



การพัฒนาเครื่องมือวัดแบบเสมือนสำหรับการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน

IEEE 1459-2010

Development of a Virtual Instrument for Power Analysis in Compliance with

IEEE 1459-2010

พลากร พรหมเมตร์

Palakorn Prommet

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Engineering in Electrical Engineering

Prince of Songkla University

2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเครื่องมือวัดแบบเสมือนสำหรับการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้า ตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010
ผู้เขียน	นายพลการ พรหมเมศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

ปัจจุบันโหลดทางไฟฟ้าหรือเครื่องใช้ไฟฟ้าในอาคารบ้านเรือนส่วนใหญ่ที่เป็น โหลดไม่เชิงเส้น เช่น คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ เต้าอบไมโครเวฟ หรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวควบคุม แต่เครื่องมือที่ใช้ในการวัดและ คำนวณค่าปริมาณกำลังไฟฟ้าที่การไฟฟ้าใช้ในปัจจุบันนั้น ได้มีการพัฒนามาจากรูปแบบและ วิธีการวัดแบบดั้งเดิม ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ในสภาวะรูปคลื่นไซน์ จึงทำให้ไม่ทราบว่าการวัดค่า กำลังไฟฟ้าในปัจจุบันมีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนาการ เครื่องมือวัดแบบเสมือนสำหรับการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ใน สภาวะโหลดไม่เชิงเส้น ซึ่งใช้วิธีการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว ในการแยกค่าแรงดัน กระแสไฟฟ้า และ มุมต่างเฟสที่ความถี่มูลฐานออกจากรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่มีความผิดเพี้ยน โดยใช้โปรแกรม LabVIEW มาช่วยในการวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดไม่เชิงเส้น ให้เกิดความถูกต้องมากขึ้น

Thesis Title Development of a Virtual Instrument for Power Analysis in Compliance with IEEE 1459-2010 Standard

Author Mr. Palakorn Prommet

Major Program Electrical Engineering

Academic Year 2011

ABSTRACT

Currently, the most electrical loads or electric appliances in majority houses are nonlinear loads, such as microwave ovens, personal computers, compact fluorescent lamps, or electronics ballasts. Since a tool, which is currently used in the measurement and calculation of the electric power quantity at electricity authority, has developed from the classical format, i.e. 50 Hz sinusoidal waveforms, the measurement of the electric power quantity may not be accurate. This thesis presents a development of a virtual instrument for the power analysis in compliance with standard IEEE 1459-2010 for nonlinear loads. The voltage, the current, and their phase different at the fundamental frequency are extracted from the distorted waveforms by using Fast Fourier transform in LabVIEW. The developed virtual instrumentation shows accurate electric power analysis of nonlinear loads.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภา จินดาเพ็ชร ประธานกรรมการที่
ปรึกษางานวิจัย ที่ได้เสียสละเวลาในการให้คำปรึกษา แนวคิดในการทำวิจัย รวมถึงการช่วยเหลือ
แก้ไขปัญหาที่เกี่ยวกับการวิจัย ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างลุล่วง
สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุสุมาลย์ เฉลิมยานนท์ ที่ได้เสียสละเวลา
ในการให้คำปรึกษา แนวคิดในการทำวิจัย คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในงานวิจัย ตลอดจน
ช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างลุล่วงสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์อนุวัตร ประเสริฐสิทธิ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา
คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ ที่กรุณาเสียสละเวลา
เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
ที่ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัยและให้ความช่วยเหลือด้านการประสานงานต่างๆ

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
นราธิวาสราชนครินทร์ เอื้อเฟื้อ ห้องปฏิบัติการ ชุดทดลองโหลดทางไฟฟ้า รวมถึงเครื่องมือวัด

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ บุคลากร และนักศึกษาปริญญาโทภาควิชา
วิศวกรรมไฟฟ้าทุกคนที่ได้ให้คำปรึกษา และกำลังใจในการทำงานเป็นอย่างดีเสมอมา

และสุดท้าย ข้าพเจ้าขอโน้มรำลึกถึงพระคุณของ บิดามารดา และครอบครัว ที่
ส่งเสริมและสนับสนุนข้าพเจ้าในทุกๆ เรื่องตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

พลากร พรหมเมศรี

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(9)
รายการภาพประกอบ	(11)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย	1
1.2 การตรวจเอกสาร	2
1.3 วัตถุประสงค์	7
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	7
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย	8
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
2. ทฤษฎีและหลักการคำนวณกำลังไฟฟ้าและฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า	9
2.1 โหลดในระบบไฟฟ้า (Electrical Load)	10
2.1.1 อุปกรณ์ไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่ทำให้เกิดฮาร์มอนิก	14
2.1.2 อุปกรณ์ไฟฟ้าสามเฟสที่ทำให้เกิดฮาร์มอนิก	16
2.2 ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น (Wave Distortion)	17
2.2.1 สมการรูปคลื่นที่มีความผิดเพี้ยน	17
2.3 กำลังไฟฟ้าและค่าตัวประกอบกำลังวงจรในระบบไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์	18
2.3.1 กำลังไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน (Power at fundamental frequency)	20
2.4 การวิเคราะห์รูปคลื่น	26
2.4.1 อนุกรมฟูริเยร์ (Fourier series)	27
2.4.2 ลักษณะรูปคลื่นที่เป็นฟังก์ชันสมมาตร (Symmetrical waveform)	31
2.5 มาตรฐาน IEEE 1459-2010	40
2.5.1 ระบบไฟฟ้าชนิด 1 เฟส ในสภาวะรูปคลื่นไซน์	41
2.5.2 ระบบไฟฟ้าชนิด 1 เฟส ในสภาวะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 การใช้งานฟาสฟูรีเยร์ทรานส์ฟอร์มในการวัดและวิเคราะห์สัญญาณบน LabVIEW และ LabWindows	54
2.6.1 ความรู้พื้นฐานการประมวลผลและวิเคราะห์สัญญาณ	55
2.6.2 การแปลงค่าแถบกำลังไฟฟ้าชนิดแถบคู่เป็นแถบกำลังไฟฟ้าแถบเดี่ยว	56
2.6.3 การปรับปรุงคุณสมบัติของค่าความถี่และรูปกราฟแถบกำลังไฟฟ้า	58
3. ระเบียบวิธีการพัฒนาเครื่องมือวัดแบบเสมือนสำหรับการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010	60
3.1 การออกแบบและสร้างเครื่องตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า	60
3.1.1 สัญญาณแรงดัน (Voltage signal)	61
3.1.2 สัญญาณกระแส (Current signal)	62
3.2 การออกแบบเครื่องมือวัดแบบเสมือนในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010	64
3.2.1 ส่วนอ่านค่าและจำลองค่าสัญญาณที่ใช้ในการวัด	66
3.2.2 ส่วนการเก็บบล็อกแสดงผลของโปรแกรม LabVIEW	67
3.2.3 ส่วนอ้างอิงส่วนแสดงผลใช้ในการบันทึกค่ากำลังไฟฟ้า	68
3.2.4 ส่วนการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010	68
3.2.5 ส่วนแสดงผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010	70
4. ผลการศึกษาและทดสอบเครื่องมือวัดแบบเสมือน	72
4.1 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของทรานสดิวเซอร์	72
4.2 การทดสอบเครื่องมือวัดแบบเสมือน โดยการจำลองสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า	79
4.2.1 การวิเคราะห์สัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า	79
4.2.2 ส่วนปรับค่าอัตราการสุ่มสัญญาณ	81
4.3 การสอบเทียบความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัดแบบเสมือนกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน	83

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 ผลการวัดค่าปริมาณกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 กับพื้นฐานและ โหลดไม่เป็นเชิงเส้น	89
4.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย	89
4.4.2 ผลการวัดโหลดพื้นฐาน	95
4.4.3 ผลการวัดโหลดไม่เป็นเชิงเส้น	99
5. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	106
5.1 บทสรุป	106
5.2 ข้อเสนอแนะ	107
บรรณานุกรม	108
ภาคผนวก ก	109
ภาคผนวก ข	116
ประวัติผู้เขียน	125

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
2-1	Summary and grouping of the quantities in single-phase systems with nonsinusoidal waveforms	54
4-1	การบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P โดยปรับแหล่งจ่ายแรงดันที่ 0 - 220 โวลต์ ที่โหลดค่าความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์	73
4-2	การบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากทรานสดิวเซอร์กระแส LA 55-P โดยปรับแหล่งจ่ายแรงดันที่ 0 - 220 โวลต์ ที่โหลดค่าความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์	76
4-3	การวัดค่ากำลังตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ที่อัตราค่าสัมสัญญาณค่าต่าง ๆ โดยพิจารณาที่ค่าความถี่มูลฐาน	82
4-4	การวัดค่ากำลังตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ที่อัตราค่าสัมสัญญาณค่าต่าง ๆ โดยพิจารณาที่ค่าความถี่ฮาร์โมนิก	82
4-5	การบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดแบบเสมือนเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปโดยปรับแหล่งจ่ายแรงดันที่ 12, 42, 220 โวลต์ ที่โหลดค่าความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์ ที่ความถี่ 50 Hz จากทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P	85
4-6	การบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดแบบเสมือนเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปโดยปรับแหล่งจ่ายแรงดันที่ 12, 42, 220 โวลต์ ที่โหลดค่าความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์ ที่ความถี่ 50 Hz จากทรานสดิวเซอร์กระแส LA 55-P	86
4-7	การบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P โดยปรับแหล่งจ่ายแรงดันที่ 0-220 โวลต์ ที่โหลดค่าความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์	87
4-8	การบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P โดยปรับแหล่งจ่ายแรงดันที่ 0-220 โวลต์ ที่โหลดค่าความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์	88
4-9	การวัดค่ากำลังไฟฟ้าโดยใช้ค่าความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์	96

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4-10 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าโดยใช้ค่าความเหนี่ยวนำ 6.0 เฮนรี 0.25 แอมแปร์	97
4-11 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าโดยใช้ค่าความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์ ค่าความเหนี่ยวนำ 6.0 เฮนรี 0.25 แอมแปร์	98
4-12 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าโดยใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล	102
4-13 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าโดยใช้หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ 247 วัตต์	103
4-14 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าโดยใช้เตาอบไมโครเวฟ 800 วัตต์	104
4-15 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าโดยใช้เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์ (Pico 162)	105

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1-1 การวัดค่าพลังงาน กำลังไฟฟ้าตามนิยามมาตรฐาน IEEE 1459-2000	4
1-2 ส่วนแสดงผลการวัดค่าพลังงาน กำลังไฟฟ้าตามนิยามมาตรฐาน IEEE 1459-2000 ในระบบการวัดแบบ 3 เฟส 4 สาย	5
1-3 ไคอะแกรมของการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าตามนิยามมาตรฐาน IEEE 1459-2000 ในระบบ 1 เฟส โดยใช้ตัวกรองผ่านต่ำ (Low pass filter)	6
2-1 ระบบจ่ายแรงดันไฟฟ้าในอุดมคติ	10
2-2 การเกิดความผิดเพี้ยนของแรงดันที่จุดต่อร่วม	11
2-3 การตอบสนองภาระที่ไม่เป็นเชิงเส้น	12
2-4 วงจรสมมูลของโหลดที่ไม่เชิงเส้น	12
2-5 รูปสัญญาณที่มีฮาร์มอนิก	13
2-6 สัญญาณที่มีฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ปะปน	13
2-7 สัญญาณที่มีความถี่ฮาร์มอนิกที่มีการเลื่อนของมุมเฟส	14
2-8 ตัวอย่างสัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดจากแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิง	15
2-9 ตัวอย่างสัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดฟลูออเรสเซนต์แบบคอมแพค	15
2-10 ตัวอย่างสัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดจากชุดแปลงสัญญาณไฟฟ้าแบบ 6 พัลส์	16
2-11 ตัวอย่างสัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดจากชุดแปลงสัญญาณไฟฟ้าแบบ 12 พัลส์	17
2-12 ระบบไฟฟ้าชนิด 1 เฟส ที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าต่อร่วมกับโหลด	19
2-13 ไคอะแกรมเฟสเซอร์ (Phasor diagram) ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า	25
2-14 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าในรูปของสามเหลี่ยมกำลัง	25
2-15 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเรกติไฟเออร์ชนิดแบบครึ่งรูปคลื่น (Half-wave rectifier)	29
2-16 ลักษณะรูปคลื่นที่เป็นฟังก์ชันสมมาตรเชิงคี่ (Odd-function symmetry waveform)	31
2-17 ลักษณะรูปคลื่นที่เป็นฟังก์ชันสมมาตรเชิงคู่ (Even-function symmetry waveform)	33
2-18 ลักษณะรูปคลื่นที่เป็นฟังก์ชันสมมาตรแบบครึ่งคลื่น (Half-wave function symmetry)	35
2-19 กระแสไฟฟารูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่กำหนดให้เป็นฟังก์ชันสมมาตรเชิงคี่	39
2-20 ไคอะแกรมเฟสเซอร์สำหรับการพิจารณาการเคลื่อนที่ของกำลังไฟฟ้า	45

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
2-21 รูปคลื่นสัญญาณแถบกำลังไฟฟ้าชนิดแถบคู่	56
2-22 รูปคลื่นสัญญาณแถบกำลังไฟฟ้าชนิดแถบเดี่ยวที่แปลงมาจากแถบกำลังไฟฟ้าชนิดแถบคู่	58
3-1 การออกแบบเครื่องตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า	60
3-2 โครงสร้างทั่วไปของทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P	61
3-3 การต่อใช้งานจริงของทรานสดิวเซอร์กระแส LA 55-P	63
3-4 การออกแบบเครื่องตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า	63
3-5 แผนผังการทำงานของเครื่องมือวัดแบบเสมือน	65
3-6 โมดูลคำสั่ง DAQ Assistant สำหรับวัดค่าสัญญาณจริงร่วมกับการวัดประมวลผล (NI DAQ USB 6009)	66
3-7 โมดูลคำสั่ง Simulate Signal สำหรับการจำลองสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า	67
3-8 ส่วนเก็บบล็อกแสดงผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าของโปรแกรม LabVIEW	67
3-9 ส่วนอ้างอิงกับส่วนแสดงผลใช้ในการบันทึกค่ากำลังไฟฟ้า	68
3-10 ส่วนคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010	69
3-11 ส่วนแสดงผลค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010	71
4-1 ลักษณะการวัดและเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันทางด้านขาเข้าและแรงดันทางด้านขาออกของทรานสดิวเซอร์ตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้า	73
4-2 รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P ที่แรงดัน 0 โวลต์ และ 40 โวลต์	73
4-3 รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P ที่แรงดัน 80 โวลต์ และ 120 โวลต์	74
4-4 รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P ที่แรงดัน 160 โวลต์ และ 200 โวลต์	74
4-5 รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P ที่แรงดัน 220 โวลต์	74

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4-6 ผลการทดสอบทรานควิเซอร์แรงดัน LV 25-P ที่แรงดัน 0 - 220 โวลต์ เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นในการวัดค่าปริมาณไฟฟ้า	75
4-7 ลักษณะการวัดและเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันทางด้านขาเข้าและแรงดันทางด้านขาออกของทรานควิเซอร์ตรวจจับสัญญาณกระแส LA 55-P	76
4-8 รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยทรานควิเซอร์กระแส LA 55-P ที่แรงดัน 0 โวลต์ และ 40 โวลต์	77
4-9 รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยทรานควิเซอร์กระแส LA 55-P ที่แรงดัน 80 โวลต์ และ 120 โวลต์	77
4-10 รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยทรานควิเซอร์กระแส LA 55-P ที่แรงดัน 160 โวลต์ และ 120 โวลต์	77
4-11 รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยทรานควิเซอร์กระแส LA 55-P ที่แรงดัน 220 โวลต์	78
4-12 ผลการทดสอบทรานควิเซอร์กระแส LA 55-P ที่แรงดัน 0 - 220 โวลต์ เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นในการวัดค่าปริมาณไฟฟ้า	78
4-13 ลักษณะรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าพื้นฐานจำลองขึ้นบนโปรแกรม LabVIEW	80
4-14 ส่วนปรับค่าองค์ประกอบสัญญาณบนโปรแกรม LabVIEW	81
4-15 เปรียบเทียบความถี่ 50 Hz ทรานควิเซอร์แรงดัน LV 25-P ที่แรงดัน 12 โวลต์	83
4-16 เปรียบเทียบความถี่ 50 Hz ทรานควิเซอร์กระแส LA 55-P ที่แรงดัน 12 โวลต์	84
4-17 เปรียบเทียบความถี่ 50 Hz ทรานควิเซอร์แรงดัน LV 25-P ที่แรงดัน 42 โวลต์	84
4-18 เปรียบเทียบความถี่ 50 Hz ทรานควิเซอร์กระแส LA 55-P ที่แรงดัน 42 โวลต์	84
4-19 เปรียบเทียบความถี่ 50 Hz ทรานควิเซอร์แรงดัน LV 25-P ที่แรงดัน 220 โวลต์	85
4-20 เปรียบเทียบที่ความถี่ 50 Hz ทรานควิเซอร์กระแส LA 55-P แรงดัน 220 โวลต์	85
4-21 สอบเทียบทรานควิเซอร์แรงดัน LV 25-P แรงดัน 0 - 220 โวลต์ ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW เพื่อหาความสัมพันธ์ในการวัดค่าปริมาณไฟฟ้า	87
4-22 สอบเทียบทรานควิเซอร์กระแส LA 55-P แรงดัน 0 - 220 โวลต์ ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW เพื่อหาความสัมพันธ์ในการวัดค่าปริมาณไฟฟ้า	88

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4-23 แบบจำลอง USB 6009 Interactive Control Panel .vi	90
4-24 การ์ด A/D USB 6009 Interactive Control Panel ใช้วัดค่าร่วมกับทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P และกระแสไฟฟ้าจากทรานสดิวเซอร์กระแส LA 55-P	90
4-25 ทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P	91
4-26 ทรานสดิวเซอร์กระแส LA 55-P	91
4-27 หลักการทำงานของโปรแกรม LabVIEW	92
4-28 การจำลองเครื่องมือวัดปริมาณกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010	93
4-29 โปรแกรมสร้างเครื่องมือวัดเสมือนด้วยโปรแกรม LabVIEW	94
4-30 รูปคลื่นสัญญาณจากโหลดค่าความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์	95
4-31 รูปคลื่นสัญญาณจากโหลดค่าความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์ บนโปรแกรม LabVIEW	95
4-32 ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณจากใช้โหลดค่าความเหนี่ยวนำ 6.0 เฮนรี 0.25 แอมแปร์	96
4-33 ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณจากใช้โหลดค่าความเหนี่ยวนำ 6.0 เฮนรี 0.25 แอมแปร์ บนโปรแกรม LabVIEW	96
4-34 ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณจากความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์ กับค่าความเหนี่ยวนำ 6.0 เฮนรี 0.25 แอมแปร์	97
4-35 ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณจากความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์ กับค่าความเหนี่ยวนำ 6.0 เฮนรี 0.25 แอมแปร์ บนโปรแกรม LabVIEW	97
4-36 ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณและค่าความถี่ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากการใช้เตาอบไมโครเวฟ	99
4-37 ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณและค่าความถี่ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ที่มีวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนประกอบ	100
4-38 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้วัดปริมาณกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010	100
4-39 หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ สำหรับการทดลองวัดปริมาณกำลังไฟฟ้า	101

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4-40 ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณและค่าความถี่ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากการใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล	101
4-41 ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณและค่าความถี่ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากการใช้หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ 247 วัตต์	102
4-42 ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณและค่าความถี่ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากการใช้เตาอบไมโครเวฟ 800 วัตต์	103
4-43 ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณและค่าความถี่ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากการใช้เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์ (Pico 162)	104

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิจัย

พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่มีความสำคัญและสร้างความมั่นคงให้กับประเทศชาติพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่แปรรูปมาจากแหล่งพลังงานที่แท้จริงอื่น ๆ มากมายหลายชนิด เช่น พลังน้ำ พลังงานธรรมชาติจากต้นกำเนิดที่ไม่หมดสิ้น เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ลม ความร้อนใต้พิภพ พลังงานจากเชื้อเพลิงต่าง ๆ เช่น ก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน ถ่านลิกไนต์ เป็นต้น ทว่าไปแล้วพลังงานเหล่านี้จะผ่านกระบวนการนำมาหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีรูปคลื่นไซน์ที่ไม่ผิดเพี้ยน[1] ในกระบวนการผลิตและส่งจ่ายไฟฟ้าในอุดมคตินั้นค่าของแรงดันและความถี่ ณ จุดใช้งานใด ๆ จะต้องมีค่าคงที่และรูปคลื่นของสัญญาณแรงดันไม่มีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นสัญญาณไซน์ที่กำหนดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่ในความเป็นจริงในทางปฏิบัติจะมีความเป็นไปได้ยากมากที่แรงดัน ความถี่ และรูปร่างของคลื่นสัญญาณแรงดันจะมีความคงที่ได้ เนื่องจากผลของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความจุทางไฟฟ้าที่แฝงอยู่ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ารวมทั้งผลจากรูปคลื่นกระแสที่ไหลดทางไฟฟ้าดึงไปจากแหล่งกำเนิดแรงดัน ดังนั้น รูปคลื่นแรงดันอาจมีความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์[1] ซึ่งความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบการผลิตและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า มีสาเหตุหลักมาจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าและมีผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ

เนื่องจาก ปัจจุบันโหลดทางไฟฟ้าหรือเครื่องใช้ไฟฟ้าในอาคารบ้านเรือนส่วนใหญ่ที่เป็นโหลดไม่เชิงเส้น เช่น เครื่องทำน้ำร้อน คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล โทรทัศน์ หรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวควบคุม แต่เครื่องมือที่ใช้ในการวัดและคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ การไฟฟ้าใช้ในปัจจุบันนั้น ได้รับการพัฒนามาจากรูปแบบและวิธีการวัดแบบที่พิจารณาที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ แบบรูปคลื่นไซน์ จึงทำให้ไม่ทราบว่าการวัดค่ากำลังไฟฟ้าในปัจจุบันมีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด ที่ผ่านมามีนักวิจัยได้นำเสนอบทความเกี่ยวกับการวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 โดยใช้โปรแกรม LabVIEW ซึ่งแต่ละบทความจะใช้

วิธีการที่แตกต่างกัน เช่น ใช้ตัวกรองความถี่ผ่านต่ำ (Low pass filter: LPF) ในการแยกหาค่าแรงดัน และกระแสที่ความถี่มูลฐานรวมถึงมุมต่างเฟสที่ความถี่มูลฐานหรือใช้วิธีการ การแปลงฟูริเยร์แบบ เร็ว (Fast Fourier Transform) ซึ่งใช้หน้าต่างอัลกอริทึมต่าง ๆ ภายในของ FFT ในการปรับปรุง สเปกตรัมของสัญญาณแรงดันและกระแสพื้นฐาน[1] จากนั้นนำเครื่องมือที่สร้างขึ้น ไปวัดค่า กำลังไฟฟ้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือโหลดภายใต้สภาวะที่มีความผิดเพี้ยน ซึ่งสามารถแสดงถึงฮาร์มอนิกต่าง ๆ ในกระแสไฟฟ้าได้

งานวิจัยนี้มีแนวความคิดที่จะพัฒนาวิธีการวัดค่ากำลังไฟฟ้า โดยทำการออกแบบ และสร้างเครื่องมือวัดแบบเสมือน ตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ซึ่งเป็นมาตรฐานใหม่ ในสภาวะ โหลดไม่เชิงเส้น ซึ่งใช้การแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว ในการแยกค่าแรงดัน และมุมต่างเฟสที่ความถี่ มูลฐาน โดยเลือกใช้การแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว ของโปรแกรม LabVIEW มาช่วยในการวิเคราะห์หาค่า กำลังไฟฟ้า

1.2 การตรวจเอกสาร

1.2.1 A time domain approach for IEEE Std 1459-2000 powers measurement in distorted and unbalanced power system [4]

ในเอกสารงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้นำเสนอเครื่องมือวัดแบบใหม่ สำหรับใช้วัดค่าของ ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEEE 1459-2000 เครื่องวัดนี้จะใช้เทคนิคและวิธีการ ของ Time domain technique สำหรับใช้ตรวจวัดค่าพื้นฐานและส่วนประกอบของฮาร์มอนิกในส่วน ของแรงดัน และกระแสไฟฟ้า สำหรับเทคนิคและวิธีการนี้ไม่สามารถที่จะทำการวิเคราะห์ได้ในทุก ๆ สเปกตรัม สำหรับการประเมินค่าของ ขนาด (Amplitudes) และมุม เฟส (Phase angles) ของ แรงดัน และกระแส จะนำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และวิจารณ์ผลที่ได้จากการทดลอง เพื่อให้ได้ ข้อสรุป รวมถึงความถูกต้องแม่นยำของการวัด

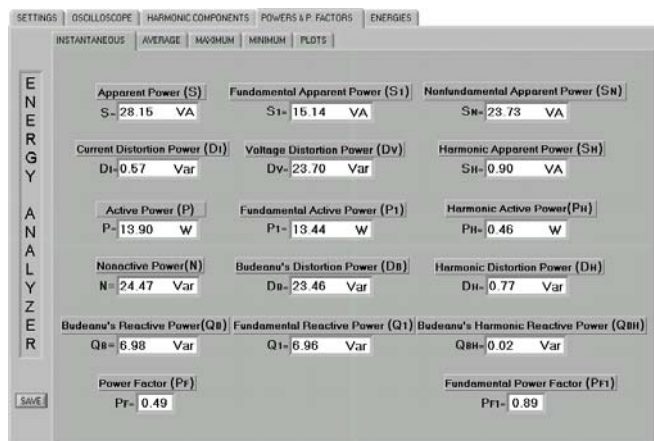
1.2.2 DSP Implementation of Power Measurements According to the IEEE Trial-Use Standard 1459 [5]

งานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการ การวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่มีความทันสมัย โดยใช้วิธีการ ประมวลผลของสัญญาณดิจิทัล (DSP) เพื่อทำการศึกษา คำนิยามและความหมาย ของมาตรฐาน รวมถึงวิธีการต่าง ๆ ภายในมาตรฐาน IEEE 1459-2000 ซึ่งเป็นมาตรฐานใหม่ที่ อธิบายถึง

โครงสร้างโดยทั่วไปของระบบไฟฟ้ากำลังและผลกระทบที่เกิดจากการสร้างหรือการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผล รวมทั้งผลที่ได้จากการวัดค่าและทดสอบภายใต้ระบบโครงข่ายการจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ

1.2.3 Single-phase virtual power and energy analyzer in compliance with IEEE Std 1459-2000 for harmonic measurement on discharge lamps [6]

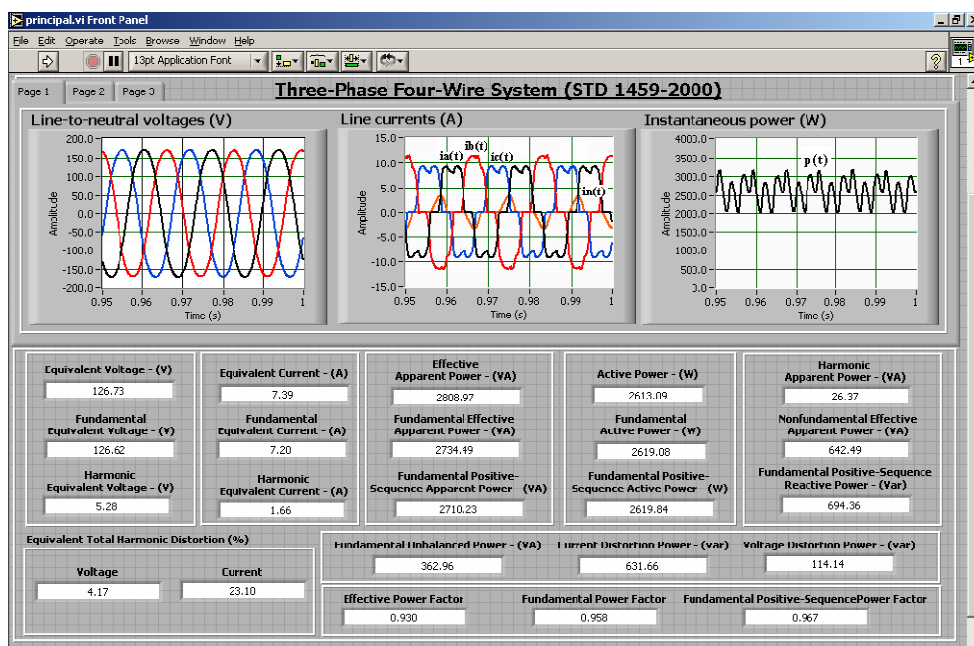
งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ กำลัง-พลังงานไฟฟ้า ในระบบ 1 เฟส เพื่อที่จะกำหนดลักษณะที่พึงประสงค์ของประสิทธิภาพในระบบไฟฟ้ากำลัง จากโหลดที่เป็นแบบไม่เชิงเส้น โดยใช้หลอดโซเดียมความดันสูง (Discharge lamps) สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมกราฟิก (Graphical programming language) ในการพัฒนา โดยจะกำหนดการวัดค่าปริมาณทางไฟฟ้าจากการวิเคราะห์สเปกตรัม พลังงาน และกำลังไฟฟ้าของระบบ โดยทำการเปรียบเทียบจากมาตรฐาน IEEE Std. 1459-2000 ซึ่งรายละเอียดในการวัดจะมีลักษณะที่เป็นแบบ Real time, On line บอร์ด DAQ ทำหน้าที่ในการรับค่าตัวอย่างสัญญาณอนาล็อกของรูปคลื่นแรงดัน และกระแสไฟฟ้า ในส่วนของขนาดความถี่ทางไฟฟ้าจะทำการคำนวณโดยใช้หลักการของ FFT ร่วมกับ DFT วิวัฒนาการของการออกแบบเครื่องมือวัดกำลังงาน และพลังงานทางไฟฟ้านั้น จะทำการบันทึกผลที่วัดได้ในลักษณะที่เป็นช่วงเวลา ซึ่งอาจทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อน อย่างไรก็ตาม การพัฒนาเครื่องมือวัดในปัจจุบันจะใช้เครื่องมือวัดดังกล่าวให้มีลักษณะเป็นเครื่องมือวัดแบบเสมือน เพื่อเป็นการง่ายต่อการปรับค่าปริมาณต่าง ๆ ในขณะที่ทำการวัด การประยุกต์ใช้งานของโปรแกรมในกระบวนการของการวัดค่าของโหลดที่เป็นแบบไม่เชิงเส้น ต้นทุนของระบบจะต่ำมาก ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับออสซิลโลสโคปมิเตอร์แบบหลายฟังก์ชัน ที่ใช้ในการวัดและวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของกำลังงานและพลังงานไฟฟ้าของระบบ



ภาพประกอบ 1-1 การวัดค่าพลังงาน กำลังไฟฟ้าตามนิยามมาตรฐาน IEEE 1459-2000 [4]

1.2.4 Virtual Instrumentation Applied to the Implementation of IEEE STD 1459-2000 Power Definitions [7]

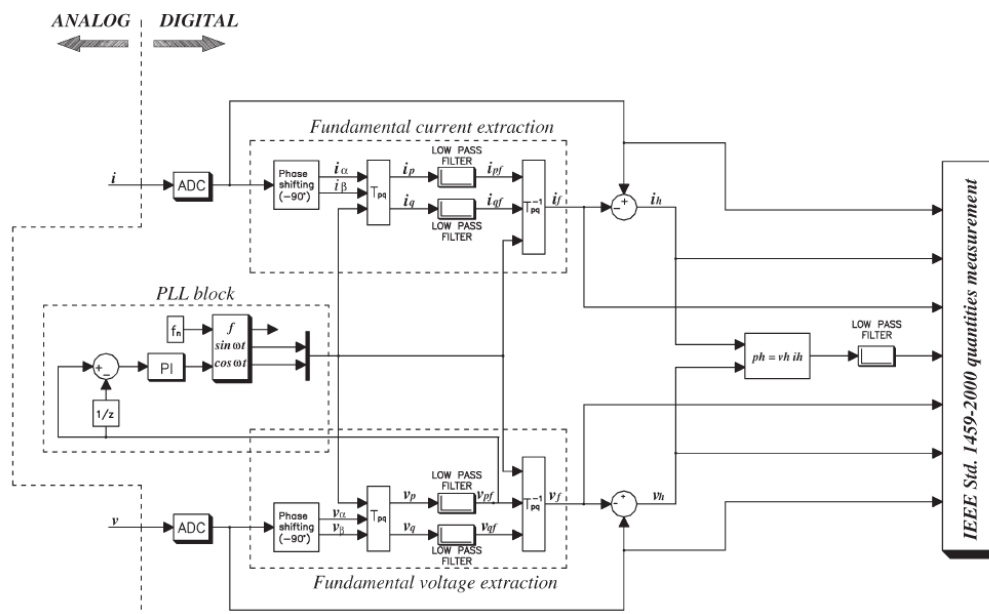
บทความนี้กล่าวถึงการใช้ประโยชน์ของเครื่องมือวัดแบบเสมือนเพื่อสร้างและประเมินผลของความแตกต่างระหว่างนิยามกำลังไฟฟ้าแบบดั้งเดิมและนิยามแบบใหม่ โดยหาความแตกต่างระหว่างเครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้าและเครื่องวิเคราะห์กำลังไฟฟ้า ดังที่ได้กล่าวมา นิยามของมาตรฐาน IEEE 1459-2000 สำหรับใช้วัดค่าปริมาณกำลังไฟฟ้าภายใต้สภาวะที่มีความผิดเพี้ยนและสภาวะที่ไม่สมดุล ซึ่งใช้วิธีการทางด้านดิจิทัล ดังนั้น ค่ากำลังไฟฟ้าต่าง ๆ และค่าตัวประกอบกำลัง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการวัดค่าสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า การนำเสนอเครื่องมือวัดแบบเสมือน โดยใช้พื้นฐานคอมพิวเตอร์และบอร์ดรับสัญญาณที่มีประสิทธิภาพสูงและเซนเซอร์แบบแยกส่วน สำหรับการจำลองหรือสร้างระเบียบวิธีการในทางด้านดิจิทัลนั้นจะให้ระบบโปรแกรมกราฟิกในการสร้างขึ้นทั้งหมด ในส่วนของการสร้างการคำนวณตามมาตรฐาน IEEE 1459-2000 นั้น บทความนี้ยังนำเสนอความแตกต่างของระเบียบวิธีการหลายรูปแบบ ที่ใช้ในการจำแนกค่าแรงดัน กระแสและองค์ประกอบทางกำลังไฟฟ้า



ภาพประกอบ 1-2 ส่วนแสดงผลการวัดค่าพลังงาน กำลังไฟฟ้าตามนิยามมาตรฐาน IEEE 1459-2000 ในระบบการวัดแบบ 3 เฟส 4 สาย [5]

1.2.5 Virtual Instrumentation for the Measurement of IEEE Std. 1459-2000 Power Quantities [8]

บทความนี้แนะนำเสนอ วิธีการวัดปริมาณกำลังไฟฟ้าตามนิยามมาตรฐาน IEEE 1459-2000 โดยใช้คอมพิวเตอร์ วิธีการวัดจะอยู่บนหลักการของโดเมนเวลา สำหรับใช้ในการตรวจจับองค์ประกอบความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสไฟฟ้า วิธีการของโดเมนเวลาได้ถูกพัฒนาในช่วงแรกโดยผู้เขียนสำหรับระบบ 3 เฟส 3 สาย ในบทความนี้ได้ทำการพัฒนาขอบเขตการวัดให้ครอบคลุมไปยังระบบ 3 เฟส 4 สายและรวมถึงระบบ 1 เฟส ในการจำลองและทดสอบพบว่าผลที่ได้ยังมีความไม่แน่นอนหรือเกิดความคลาดเคลื่อนอยู่เนื่องจากการวัดค่าของทรานส์ดิวเซอร์ ยิ่งไปกว่านั้น ความเที่ยงตรงของการวัดโดยใช้คอมพิวเตอร์นั้น ขึ้นอยู่กับการประเมินค่าของทรานส์ดิวเซอร์ ซึ่งผลการทดสอบนั้นต้องการอาศัยการสอบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้



ภาพประกอบ 1-3 ไลอะแกรมของการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าตามค่านิยามมาตรฐาน IEEE 1459-2000 ในระบบ 1 เฟส โดยใช้ตัวกรองผ่านต่ำ (Low pass filter) [6]

1.2.6 The Power Quality Monitoring System Based on Virtual Instrument [9]

ในช่วงเริ่มต้น ของความต้องการการใช้พลังงานไฟฟ้าในประเทศจีน ทำให้เศรษฐกิจภายในประเทศมีการพัฒนาขึ้น ซึ่งประชากรในประเทศย่อมมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่มีคุณภาพ ปัญหาของคุณภาพกำลังไฟฟ้านั้นจะมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับผู้ผลิตไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟ เช่น บ้านพักอาศัย โรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นผู้ใช้งานไฟฟ้าร่วมกัน ช่วงเวลาของความต้องการการใช้ไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรมในแต่ละช่วงจะมีอิทธิพลต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าและผลิตผลจากโรงงานอุตสาหกรรม องค์ประกอบในการติดตามผลและวิเคราะห์ผลของกำลังไฟฟ้าแบบดั้งเดิมนั้น โดยส่วนใหญ่จะมีองค์ประกอบพื้นฐานมาจากระบบคอมพิวเตอร์ที่มีขนาดใหญ่และยากต่อการพัฒนา ดังนั้น จึงไม่เหมาะในการพัฒนาและทดสอบในรูปแบบเวลาจริง (Real-time) และในสถานะที่มีหลายองค์ประกอบ เอกสารงานวิจัยนี้จะนำเสนอการออกแบบ ระบบการตรวจวัดองค์ประกอบคุณภาพของระบบไฟฟ้าโดยใช้พื้นฐานจากเทคโนโลยีใหม่ในการวัดและควบคุม โดยใช้เทคนิควิธีการวัดด้วยเครื่องมือวัดแบบเสมือน ด้วยขอบเขตที่จำกัด ซึ่งงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะในส่วนของความถี่ ค่าที่วัดได้ซึ่งใช้วัดในระบบสามเฟสแบบสมดุล

1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อศึกษามาตรฐาน IEEE Standard 1459-2010

1.3.2 เพื่อศึกษาและพัฒนาเครื่องมือวัดค่าปริมาณกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010

1.3.3 เพื่อนำเครื่องมือวัดแบบเสมือนที่พัฒนาได้ ไปใช้ในการวัดปริมาณกำลังไฟฟ้าโดยใช้โหลดที่ไม่เชิงเส้นชนิดต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบวิธีการวัดปริมาณกำลังไฟฟ้าตามนิยามมาตรฐาน IEEE 1459-2010

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 สามารถพัฒนาวิธีการวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ได้

1.4.2 สามารถพัฒนาต้นแบบเครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้าโดยใช้เครื่องมือวัดแบบเสมือน

1.5 ระเบียบวิธีวิจัย

จากการศึกษาการออกแบบเครื่องมือวัดแบบเสมือนในการวัดค่าปริมาณกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 เริ่มต้นจากการศึกษารายละเอียดมาตรฐาน จากนั้นออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดค่าสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าแล้วทำการทดสอบการวัดค่าสัญญาณจากอุปกรณ์เพื่อให้เกิดความแม่นยำ จากนั้นทำการออกแบบและจำลองเครื่องมือวัดแบบเสมือนในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าด้วยโปรแกรม LabVIEW เพื่อให้เกิดความถูกต้องในส่วนของการคำนวณจะทำการจำลองสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่มีความผิดเพี้ยนเพื่อหาค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าโดยเปรียบเทียบผลการคำนวณตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 จากนั้นทำการสอบเทียบเครื่องมือวัดแบบเสมือนร่วมกับเครื่องมือวัดค่าสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า แล้วใช้เครื่องมือวัดแบบเสมือนที่ได้สอบเทียบนั้น ไปทำการวัดค่าจริงภายใต้สภาวะโหลดไม่เชิงเส้น

1.6 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

- 1.6.1 รวบรวมและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.6.2 ศึกษาและจำลองเครื่องมือวัดแบบเสมือนในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าลงบนโปรแกรม LabVIEW
- 1.6.3 เปรียบเทียบค่าอัตราการสุ่มสัญญาณที่ค่าต่าง ๆ โดยการจำลองสัญญาณภายใต้สภาวะโหลดไม่เชิงเส้น
- 1.6.4 สรุปผลการเปรียบเทียบ
- 1.6.5 ศึกษาและสร้างต้นแบบเครื่องมือวัดค่าสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า
- 1.6.6 ทดลองและปรับปรุงการวัดค่าสัญญาณของเครื่องมือวัดค่าสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า
- 1.6.7 สรุปผลการทดสอบการวัดค่าสัญญาณของเครื่องมือวัดค่าสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า
- 1.6.8 นำเครื่องมือวัดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าไปใช้งานร่วมกับโปรแกรมวัดค่ากำลังไฟฟ้าบน LabVIEW ภายใต้สภาวะโหลดไม่เชิงเส้นรูปแบบต่าง ๆ
- 1.6.9 สรุปผลการทดลอง
- 1.6.10 จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1 บทสรุปผลการศึกษากการวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามค่านิยามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ด้วยโปรแกรม LabVIEW ภายใต้สภาวะโหลดไม่เชิงเส้นรูปแบบต่าง ๆ
- 1.7.2 สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานการวัดค่ากำลังไฟฟ้า ภายใต้สภาวะโหลดไม่เชิงเส้นรูปแบบต่าง ๆ

บทที่ 2

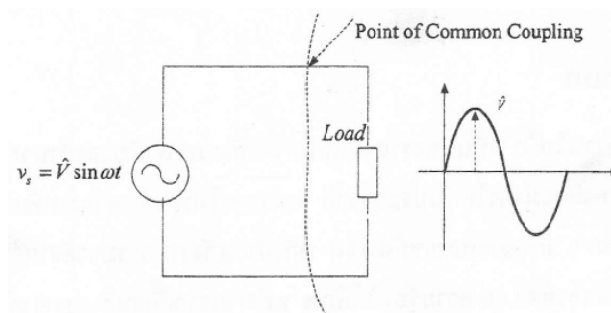
ทฤษฎีและหลักการคำนวณกำลังไฟฟ้าและฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้า

บทนี้อธิบายถึงทฤษฎีและหลักการคำนวณกำลังไฟฟ้าและฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้า ซึ่งจะแบ่งหัวข้อออกเป็น 6 ส่วนคือ ความเป็นมาของโหลดในระบบไฟฟ้า ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น กำลังไฟฟ้าและค่าตัวประกอบกำลังวงจรในระบบไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ การวิเคราะห์รูปคลื่น มาตรฐานการวัดกำลังไฟฟ้า และพื้นฐานการใช้งานฟาสฟูรีเยร์ทรานส์ฟอร์มในการวัดและวิเคราะห์สัญญาณบนโปรแกรม LabVIEW และ LabWindows

พลังงานไฟฟ้า เป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่มีความสำคัญและอำนวยความสะดวกสบายและสร้างความมั่นคงให้กับประเทศชาติ พลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่แปรรูปมาจากแหล่งพลังงานที่แท้จริงอื่น ๆ มากมายหลายชนิด เช่น พลังน้ำ พลังงานธรรมชาติจากต้นพลังงานที่ไม่หมดสิ้น เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ ลม ความร้อนใต้พิภพ พลังงานจากเชื้อเพลิงต่าง ๆ เช่น ก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน ถ่านลิกไนต์ เป็นต้น ทว่าไปแล้วพลังงานเหล่านี้จะผ่านกระบวนการเพื่อนำมาหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal waveform) ที่ไม่ผิดเพี้ยน โดยมีขนาดและความถี่ตามต้องการ ซึ่งความถี่ของระบบไฟฟ้าของประเทศไทยคือ 50 เฮิร์ตซ์ ความถี่รูปคลื่นไซน์ที่มีค่าคงที่ตามที่กำเนิดออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้เรียกว่า ความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency, f_1) จากนั้นขนาดของแรงดันอาจถูกปรับเปลี่ยนเป็นขนาดต่าง ๆ ที่เหมาะสมสำหรับการส่ง และกระจายไปยังจุดที่ต้องการใช้งาน ระบบผลิตและส่งจ่ายไฟฟ้าในอุดมคตินั้น จะต้องเป็นระบบไฟฟ้าที่มีคุณภาพ วงจรเทียบเคียงของระบบไฟฟ้าในอุดมคติแสดงได้ดังภาพประกอบ 2-1 โดยที่แรงดันที่กำเนิดจากเครื่องกำเนิดมีค่าคงที่และมีรูปคลื่นไซน์ สายส่ง และเครื่องปรับระดับแรงดันไม่มีค่าความต้านทาน เมื่อโหลดของระบบไฟฟ้าที่อยู่ในระบบจะต่ออยู่ที่จุดต่อร่วม (Point of common coupling, PCC) จะต้องได้รับแรงดันที่คงที่และไม่ผิดเพี้ยน

ในทางปฏิบัติ การทำให้แรงดันและความถี่มีค่าคงที่และไม่ผิดเพี้ยน ไปจากรูปคลื่นไซน์ไม่สามารถทำได้ทั้งหมด ดังนั้น การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power system analysis) ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับรูปคลื่นที่มีความผิดเพี้ยน (Waveform distortion) และวิธีการควบคุมหรือป้องกัน เป็นสิ่งที่สำคัญ ความผิดเพี้ยนในระบบไฟฟ้ากำลังได้เกิดมาตั้งแต่ยุคแรก ๆ ที่มีการใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ แต่ความผิดเพี้ยนยังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบที่ทำให้เกิด

ความเสียหายมากนัก แต่ในปัจจุบันปัญหาเกี่ยวกับความผิดเพี้ยนของแรงดันได้ ถูกนำมาพิจารณา มากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของโหลดที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear load) ทั้งในแง่ ปริมาณและขนาดของกำลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ที่นำมาใช้ควบคุม เครื่องจักรและระบบไฟฟ้ากำลังนั่นเอง



ภาพประกอบ 2-1 ระบบจ่ายแรงดันไฟฟ้าในอุดมคติ [1]

2.1 โหลดในระบบไฟฟ้า (Electrical Load)

ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันจากรูปคลื่นไซน์ ซึ่งทั่วไปแล้วจะแสดงในเทอม ของฮาร์มอนิก (Harmonic) โดยสาเหตุหลักของการเกิดความผิดเพี้ยนนี้มาจากโหลดทางไฟฟ้าที่ต่อ อยู่ในระบบไฟฟ้า ซึ่งโหลดแต่ละชนิดมีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกัน และอาจจำแนกได้ 2 ลักษณะ คือ โหลดที่มีคุณลักษณะสมบัติเป็นเชิงเส้น (Linear load) และโหลดที่มีคุณลักษณะสมบัติที่ไม่เป็น เชิงเส้น (Nonlinear load) โดยนิยามโหลดทั้งสองแบบแสดงได้ดังนี้

- โหลดเชิงเส้น: คือ อุปกรณ์หรือโหลดทางไฟฟ้า ซึ่งทำงานภายใต้สภาวะคงที่ และมีค่าอิมพีแดนซ์พื้นฐานที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ตลอดจนแรงดันใช้งาน
- โหลดไม่เชิงเส้น: คือ อุปกรณ์หรือโหลดทางไฟฟ้า ที่ดึงกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ ตลอดจน รูปคลื่นแรงดันทางด้านเข้า

ซึ่งโหลดในทางไฟฟ้าแบบไม่เป็นเชิงเส้นนี้เป็นอุปกรณ์หลักที่สร้างฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า หรือ เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก (Harmonic source) โดยที่โหลดหลักดังกล่าวจะเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ กำลังประเภทวงจรแปลงผันกำลัง (Power converters) หรือ โหลดอื่น ๆ เช่น หม้อแปลง

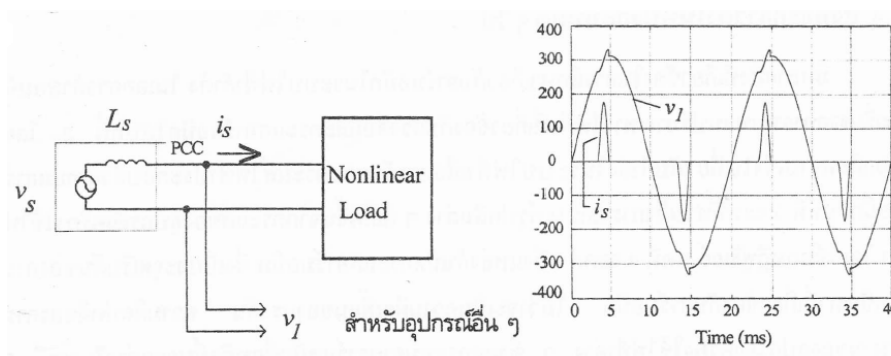
แรงดันไฟฟ้า หม้อแปลงกระแส และมอเตอร์ เป็นต้น ผลกระทบของการไหลของกระแสไหลที่
ไม่เป็นเชิงเส้นแสดงได้ดังภาพประกอบ 2-2 เมื่อกำหนดให้แรงดันที่จ่ายออกมาจากแหล่งจ่ายเป็น
รูปคลื่นไซน์ที่ไม่บิดเบี้ยว และมีค่าคงสมการ (2-1) และระบบจ่ายกำลังมีค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง
และอุปกรณ์อื่น ๆ รวมอยู่ด้วย โดยสมมติให้เป็นตัวเหนี่ยวนำ L_s

$$v_s = \hat{V} \sin \omega t \quad (2-1)$$

ดังนั้น เมื่อโหลดดึงกระแส i_s จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ และทำให้แรงดันที่จุดต่อ
ร่วมที่ v_l มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากแรงดันแหล่งจ่ายคงสมการ (2-2)

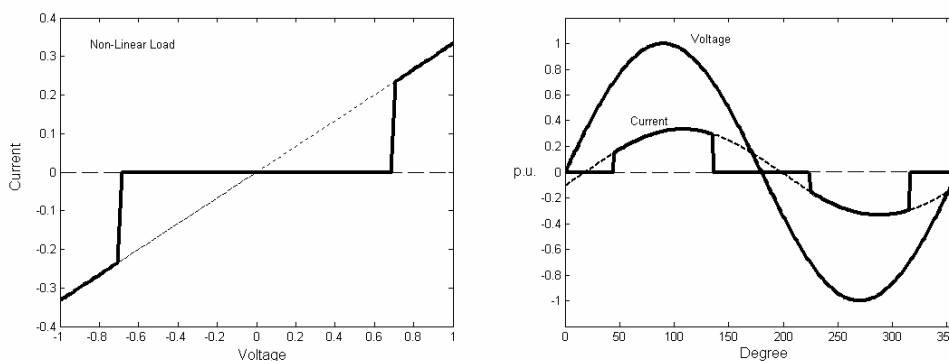
$$v_l = v_s - L_s \frac{di_s}{dt} \quad (2-2)$$

เมื่อกระแส i_s เปลี่ยนแปลงไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ แรงดันที่ v_l ก็จะมีบิดเบี้ยวจากรูปคลื่นไซน์ซึ่ง
แรงดันนี้ประกอบด้วยแรงดันที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่าง ๆ รวมอยู่ด้วย ความบิดเบี้ยวของแรงดันนี้อาจ
ก่อให้เกิดปัญหาต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่อรวมอยู่กับจุดจ่ายแรงดันร่วมนี้ได้



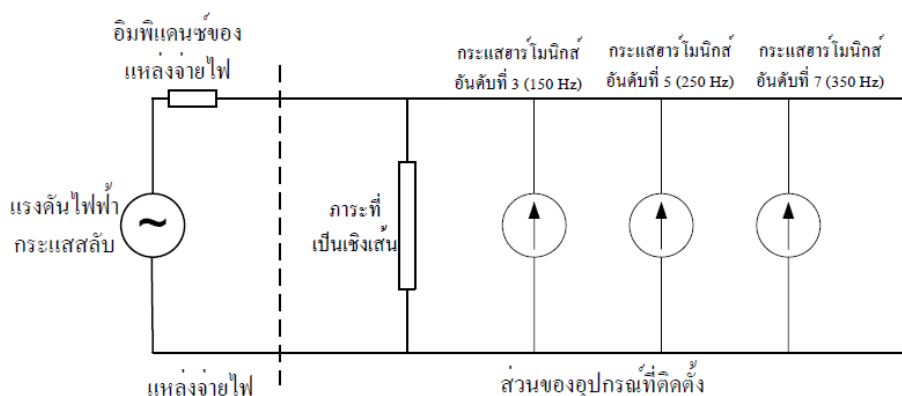
ภาพประกอบ 2-2 การเกิดความบิดเบี้ยวของแรงดันที่จุดต่อร่วม [1]

ภาพประกอบ 2-3 แสดงการตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่มีการ
ตอบสนองต่อแรงดันแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งกระแสจะไหลเมื่อค่าแรงดันมีค่าสูงเกินค่าหนึ่ง
ตัวอย่างของอุปกรณ์ประเภทนี้ได้แก่ชุดแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง (Rectifier)
ซึ่งใช้ตัวเก็บประจุในการกรองสัญญาณให้เรียบ ทำให้กระแสไหลเมื่อแรงดันที่จ่ายมีค่าสูงกว่า
แรงดันที่ตัวเก็บประจุเก็บไว้ กระแสไฟฟ้าจะไหลได้เมื่อแรงดันมีค่าสูงกว่า 0.7 p.u. ทำให้กระแสไม่
เป็นรูปคลื่นไซน์



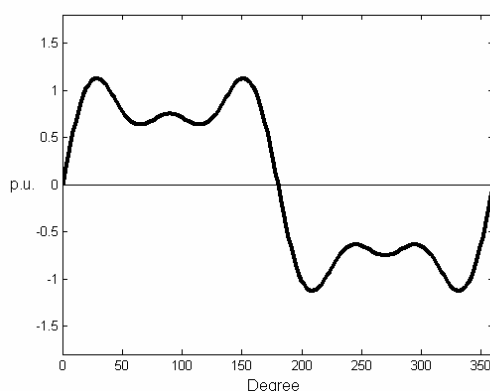
ภาพประกอบ 2-3 การตอบสนองภาระที่ไม่เป็นเชิงเส้น [2]

การตอบสนองสัญญาณที่ไม่เป็นเชิงเส้น สามารถแสดงด้วยวงจรมุมที่มีแหล่งจ่ายกระแสที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐานเรียกว่าความถี่ฮาร์มอนิก ต่อขนานกับภาระที่เป็นเชิงเส้น ภาพประกอบ 2-4 กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนี้จะไหลผ่านอุปกรณ์ที่ต่อขนานทุกตัวกับค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายทำให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกต่อคร่อมแหล่งจ่ายไฟฟ้าและส่งผลไปยังอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ทั่วไปแล้วค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะมีค่าต่ำทำให้แรงดันฮาร์มอนิกมีค่าต่ำและหากทำการวัดสัญญาณแรงดันก็จะทำให้เกิดความเข้าใจผิดว่าฮาร์มอนิกมีผลน้อยมาก ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วฮาร์มอนิกเป็นเรื่องของการผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณกระแสที่ไม่สามารถตรวจพบได้หากพิจารณาเพียงสัญญาณแรงดันเพียงอย่างเดียว

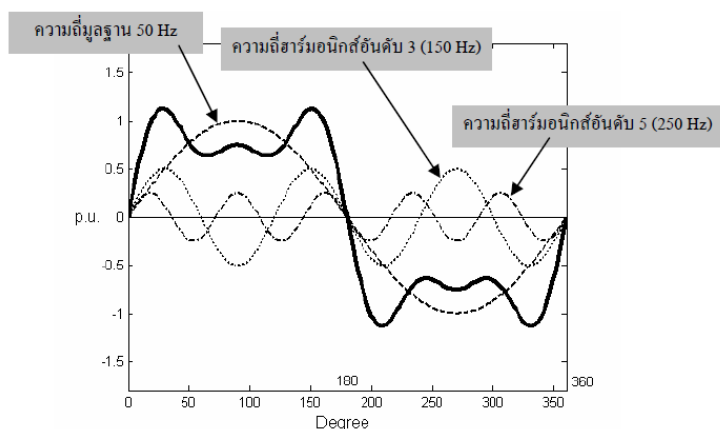


ภาพประกอบ 2-4 วงจรมุมของโหลดที่ไม่เชิงเส้น [2]

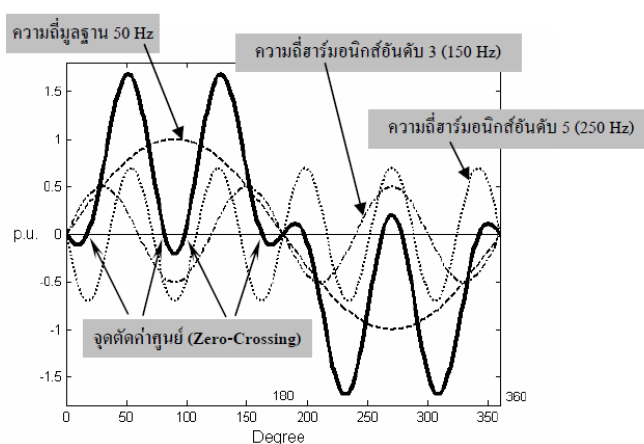
ในทางปฏิบัติสัญญาณกระแสฮาร์โมนิกจะมีความซับซ้อนมากกว่าที่แสดงไว้ดังภาพประกอบ 2-3 จากภาพประกอบ 2-5 แสดงสัญญาณไฟฟ้าที่มีสัญญาณความถี่ฮาร์โมนิกปะปนอยู่ทำให้ลักษณะสัญญาณไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ ซึ่งความถี่ฮาร์โมนิก คือ ความถี่ที่มีค่าเป็นจำนวนเต็มเท่าของค่าความถี่มูลฐาน ทั้งนี้ในกรณีที่มีความถี่มูลฐานมีค่าเป็น 50 Hz ค่าความถี่ฮาร์โมนิกลำดับที่สามจะมีค่าเป็น 150 Hz และความถี่ฮาร์โมนิกลำดับที่ห้าจะมีค่าเป็น 250 Hz ภาพประกอบ 2-6 แสดงสัญญาณไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์และฮาร์โมนิกลำดับที่สามและห้าที่รวมกันเป็นสัญญาณที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ โดยมีฮาร์โมนิกลำดับที่สามและห้าเป็น 50% และ 25% ของความถี่มูลฐานตามลำดับ ในทางปฏิบัติฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นจะมีหลายลำดับและยังมีการเลื่อนเฟสจากความถี่มูลฐานด้วย ซึ่งจะมีความซับซ้อนมาก จากภาพประกอบ 2-6 ความถี่ฮาร์โมนิกลำดับที่ 5 มีการเลื่อนมุมเฟสออกไป 90 องศา จะมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 70% ของค่าความถี่มูลฐานทำให้เกิดลักษณะสัญญาณ ดังภาพประกอบ 2-7



ภาพประกอบ 2-5 รูปสัญญาณที่มีฮาร์โมนิก [2]



ภาพประกอบ 2-6 สัญญาณที่มีฮาร์โมนิกลำดับต่าง ๆ ปะปน [2]



ภาพประกอบ 2-7 สัญญาณที่มีความถี่ฮาร์มอนิกที่มีการเลื่อนของมุมเฟส [2]

จะเห็นได้ว่ารูปคลื่นสัญญาณดังภาพประกอบ 2-7 นั้นมีความแตกต่างไปจากรูปคลื่นไซน์อย่างมากซึ่งการใช้เครื่องมือวัดที่เป็นการวัดค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองหรืออาร์เอ็มเอส (RMS) ที่เป็นการอ่านค่าแบบเฉลี่ย (Average) ไม่ใช่ค่าอาร์เอ็มเอสแบบแท้จริง (True-RMS) จะมีค่าผิดพลาดจากความจริงไปอย่างมากและจะเห็นว่ารูปสัญญาณดังกล่าวมีจุดตัดค่าศูนย์ (Zero-Crossing) จำนวนมากถึง 9 จุดแทนที่จะเป็น 2 จุดในหนึ่งรูปคลื่นซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ที่ใช้การตรวจจับการตัดค่าศูนย์ไม่สามารถทำงานได้อย่างปกติ

ครรชนิที่ใช้ในการบอกปริมาณของสัญญาณฮาร์มอนิกที่รวมอยู่ในสัญญาณไฟฟ้าคือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนฮาร์มอนิกรวม หรือ Total Harmonic Distortion (THD) ซึ่งจะบอกถึงปริมาณของสัญญาณความถี่ฮาร์มอนิกที่ปะปนอยู่ที่เปอร์เซ็นต์ และสามารถระบุเจาะจงเป็น THD ของสัญญาณฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้อีกด้วย

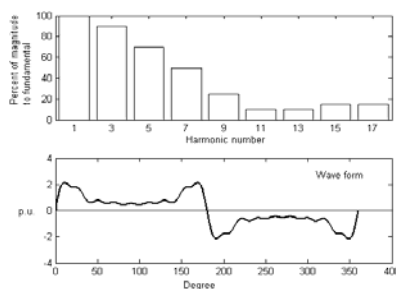
2.1.1 อุปกรณ์ไฟฟ้าหนึ่งเฟสที่ทำให้เกิดฮาร์มอนิก

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันเกือบทั้งหมดจะใช้แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่ง ซึ่งแตกต่างจากวิธีเดิมที่ใช้หม้อแปลงลดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับลงแล้วทำการแปลงให้เป็นกระแสตรงโดยการกลับสัญญาณ (Rectify) ข้อดีของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิ่งคือ มีขนาด น้ำหนัก และราคาที่ลดลงมาก ส่วนข้อเสียคือ อุปกรณ์จะดึงกระแสจากระบบไฟฟ้าเป็นช่วง ๆ (Pulse

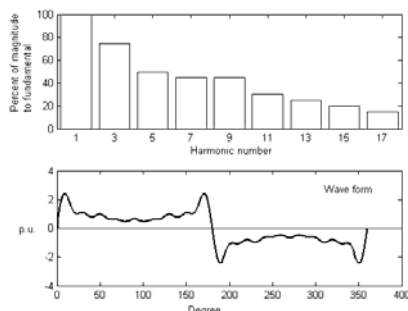
Current) ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดฮาร์มอนิกลำดับที่สามและลำดับอื่นที่สูงมาก ดังภาพประกอบ 2-8 โดย UPS ขนาดเล็กแบบหนึ่งเฟสจะมีผลของฮาร์มอนิกในลักษณะเดียวกัน

สำหรับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์นั้นได้รับความนิยมมากขึ้นในปัจจุบันในแง่ของการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในแง่ของการใช้กำลังงานไฟฟ้าของตัวบัลลาสต์เองนั้นมีการใช้กำลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าบัลลาสต์แบบแกนเหล็กที่มีประสิทธิภาพสูงเพียงเล็กน้อย แต่จากการที่ใช้ไฟฟ้าความถี่สูงจ่ายให้แก่หลอดฟลูออเรสเซนต์ทำให้หลอดมีประสิทธิภาพสูงขึ้น และทำให้การใช้กำลังงานไฟฟ้ารวมของทั้งวงจรรวมตลอดอายุการใช้งานต่ำลง ส่วนข้อเสีย คือ ทำให้เกิดฮาร์มอนิก ในปัจจุบันบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์แบบที่มีฮาร์มอนิกต่ำได้เริ่มมีการใช้งานแต่ราคาจะสูงกว่าแบบธรรมดา

หลอดฟลูออเรสเซนต์แบบคอมแพค (Compact Fluorescent Lamps, CFL) ได้มีการใช้งานกันมากโดยเฉพาะการใช้แทนหลอดแบบมีไส้ ซึ่งหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบคอมแพคขนาด 11 วัตต์ สามารถใช้แทนหลอดแบบมีไส้ขนาด 60 วัตต์ โดยให้ความสว่างมากกว่าและอายุการใช้งานนานถึง 8,000 ชั่วโมง หลอดฟลูออเรสเซนต์แบบคอมแพคนั้นมีบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์อยู่ในตัวเองซึ่งทำให้เกิดฮาร์มอนิกเช่นกัน โดยค่าอัตราส่วนของฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ที่เกิดจากหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบคอมแพค ดังภาพประกอบ 2-9



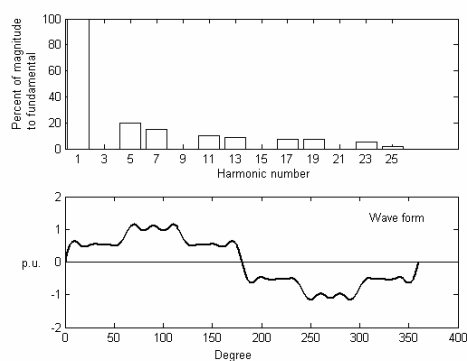
ภาพประกอบ 2-8 ตัวอย่างสัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดจากแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิง [2]



ภาพประกอบ 2-9 ตัวอย่างสัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดจากหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบคอมแพค [2]

2.1.2 อุปกรณ์ไฟฟ้าสามเฟสที่ทำให้เกิดฮาร์มอนิก

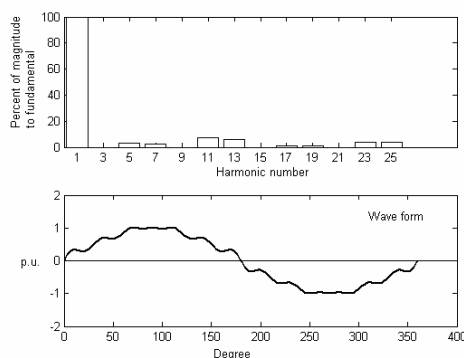
อุปกรณ์แปลงสัญญาณไฟฟ้าเพื่อการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์อุปกรณ์สำรองไฟขนาดใหญ่ที่ใช้ไฟฟ้าสามเฟส จะใช้หลักการแปลงสัญญาณแบบบริดจ์ (Bridge) ในชุดแปลงสัญญาณไฟฟ้าแบบ 6 พัลส์ (Six-pulses Bridge) ซึ่งจะสร้างสัญญาณพัลส์ 6 ลูก ในหนึ่งรูปคลื่นนั้น จะทำให้เกิดสัญญาณฮาร์มอนิกลำดับที่ $6n \pm 1$ ออกมานั้นคือลำดับที่ 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25,... โดยในทางทฤษฎีจะมีฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 อยู่ 20% และลำดับที่ 11 อยู่ 9% ของความถี่มูลฐาน ดังภาพประกอบ 2-10 แสดงปริมาณของฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ ที่เกิดจากชุดแปลงสัญญาณไฟฟ้าแบบ 6 พัลส์



ภาพประกอบ 2-10 ตัวอย่างสัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดจากชุดแปลงสัญญาณไฟฟ้าแบบ 6 พัลส์ [2]

การใช้ชุดแปลงสัญญาณไฟฟ้าแบบ 12 พัลส์จะช่วยลดฮาร์มอนิกลงได้ โดยชุดแปลงสัญญาณไฟฟ้าแบบ 12 พัลส์จะใช้ชุดแปลงสัญญาณไฟฟ้าแบบ 6 พัลส์ 2 ชุด ต่อผ่านหม้อแปลงแบบวายและแบบเดลต้า ทำให้เกิดมุมเลื่อนเฟสต่างกันอยู่ 30 องศา นอกจากช่วยลดฮาร์มอนิกโดยรวมแล้วยังทำให้เกิดฮาร์มอนิกเฉพาะที่ความถี่สูง คือ 11, 13, 23, 25,... ดังภาพประกอบ 2-11 ซึ่งจะช่วยให้การออกแบบตัวกรองสัญญาณฮาร์มอนิกทำได้ง่ายขึ้น เพราะความถี่ของสัญญาณฮาร์มอนิกต่างจากความถี่มูลฐานมาก

การใช้ชุดแปลงสัญญาณไฟฟ้าแบบ 12 พัลส์ 2 ชุด ที่มีการเลื่อนเฟสกัน 5 องศา ขนานกันเพื่อสร้างเป็นชุดแปลงสัญญาณไฟฟ้าแบบ 24 พัลส์ จะช่วยลดสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดลงได้เหลือ 4.5% ทั้งนี้ราคาในการลงทุนจะต้องสูงขึ้นอย่างมากและจะมีการใช้ในกรณีที่มีความจำเป็นจริง ๆ เท่านั้น



ภาพประกอบ 2-11 ตัวอย่างสัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดจากชุดแปลงสัญญาณไฟฟ้าแบบ 12 พัลส์ [2]

2.2 ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น (Waveform distortions)

แรงดันหรือกระแสที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่มีลักษณะรูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ จะเกิดขึ้นได้เนื่องจากมีปริมาณของกระแสหรือแรงดันที่ ความถี่อื่น ๆ ปะปนมาด้วย ซึ่งอาจเรียกปริมาณดังกล่าวว่า ปริมาณฮาร์มอนิก (Harmonic components) โดยทั่วไปแล้วปริมาณฮาร์มอนิกสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามลักษณะนิยามของค่าความถี่ ได้แก่ ความถี่ฮาร์มอนิก (Harmonic frequency) ความถี่ซับฮาร์มอนิก (Subharmonic frequency) และความถี่อินเตอร์ฮาร์มอนิก (Interharmonic frequency)

2.2.1 สมการรูปคลื่นที่มีความผิดเพี้ยน (Expression of distorted waveform)

รูปคลื่นสัญญาณต่อเนื่องใด ๆ ที่มีลักษณะเกิดขึ้นซ้ำ ๆ ในคาบเวลานั้น (Periodic waveform) สามารถเขียนหรือแสดงให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันอนุกรมฟูรีเยร์ได้ดังสมการ (2-3) หรือสมการ (2-4)

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos(1 \cdot \omega t) + a_2 \cos(2 \cdot \omega t) + \dots + a_n \cos(n \cdot \omega t) + b_1 \sin(1 \cdot \omega t) + a_2 \sin(2 \cdot \omega t) + \dots + b_n \sin(n \cdot \omega t) \quad (2-3)$$

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (2-4)$$

โดยที่

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad (2-5)$$

$$T = \frac{1}{f} \quad (2-6)$$

เมื่อ

- a_0 คือ ค่าเฉลี่ยของสัญญาณ (Average value)
 a_n คือ ส่วนประกอบของเทอมในรูปแบบของฟังก์ชันโคไซน์
 b_n คือ ส่วนประกอบของเทอมในรูปแบบของฟังก์ชันไซน์
 n คือ ลำดับฮาร์มอนิกเป็นเลขจำนวนเต็ม (Integer)
 ω คือ ค่าความถี่เชิงมุมมูลฐานของรูปคลื่นสัญญาณ (Fundamental angular frequency; rad/s)
 $n\omega$ คือ ค่าความถี่เชิงมุมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นสัญญาณ (n^{th} harmonic angular frequency)
 f คือ ค่าความถี่มูลฐานของรูปคลื่นสัญญาณ $f = f_1$ (Frequency; Hz)
 nf คือ ค่าความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ n ของรูปคลื่นสัญญาณ ($n > 1$)
 T คือ คาบเวลาของรูปคลื่นสัญญาณ (Time; sec)

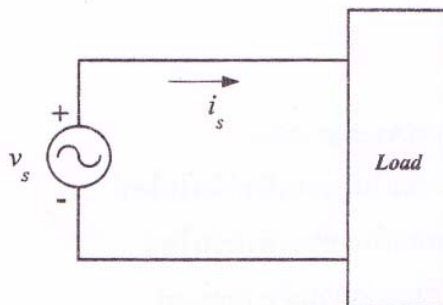
ดังนั้น จากตัวอย่างรูปคลื่นของกระแสที่มีความผิดเพี้ยนดังภาพประกอบ 2-7 ที่มีค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่าง ๆ ดังนี้ ค่าเฉลี่ยของรูปคลื่นเท่ากับศูนย์ ($a_0 = 0$), ค่ายอด (Peak value) ของรูปคลื่นที่ความถี่มูลฐาน ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 และลำดับที่ 5 มีค่าเท่ากับ 10 A, 3.33 A และ 2 A ตามลำดับ รวมทั้งกำหนดให้มุมต่างเฟสของฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับเมื่อเทียบกับสัญญาณไซน์อ้างอิงที่ความถี่เดียวกันมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น รูปคลื่นกระแสไฟฟ้างกล่าวข้างต้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันอนุกรมฟูรีเยร์ได้ดังสมการ (2-7)

$$i(t) = 0 + 10 \sin(\omega t) + 3.33 \cdot \sin(3\omega t) + 2 \cdot \sin(5\omega t) \quad (2-7)$$

2.3 กำลังไฟฟ้าและค่าตัวประกอบกำลังวงจรในระบบไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์

ถ้ากำหนดให้ระบบไฟฟ้าชนิด 1 เฟส ประกอบด้วยแหล่งจ่ายชนิดแรงดันไฟฟ้าต่อร่วมกับโหลด (Load) ดังภาพประกอบ 2-12 และสมมติให้แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเป็นแรงดันไฟฟ้าที่มีลักษณะรูปคลื่นที่ไม่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ แสดงดังสมการ (2-8)

$$v_s = \hat{V} \sin \omega t \quad (2-8)$$



ภาพประกอบ 2-12 ระบบไฟฟ้า 1 เฟส ที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าต่อร่วมกับโหลด [1]

ในส่วนของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า i_s ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับชนิดและคุณลักษณะของโหลดที่ต่ออยู่นั้น ๆ โดยถ้าโหลดของระบบไฟฟ้าเป็นชนิดที่มีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้น (Linear load) ซึ่งหมายถึง โหลดในกรณีทำงานอยู่ที่สภาวะคงตัว (Steady state) จะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่มีลักษณะคงที่ตลอดคาบเวลาของรูปคลื่นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า เช่น ค่าความต้านทาน ค่าขดลวดเหนี่ยวนำ หรือค่าตัวเก็บประจุ ดังนั้น เมื่อโหลดดังกล่าวต่ออยู่ในระบบไฟฟ้าและทำงานที่สภาวะคงตัวรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า i_s จะยังคงมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์โดยมีค่าความถี่เท่ากับค่าความถี่ของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย v_s แต่จะมีผลเฉพาะมุมเฟสของกระแสที่ไหลในระบบไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นนั่นคือ เกิดการล่าหน้าหรือล่าหลังของกระแสที่ไหลในระบบไฟฟ้าเมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายอันเป็นผลเนื่องมาจากคุณสมบัติค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดในระบบไฟฟ้า

แต่กรณีที่ต่ออยู่ในระบบไฟฟ้าเป็นชนิดที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear load) ซึ่งหมายถึง โหลดเมื่อทำงานอยู่ที่สภาวะคงตัว (Steady state) จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงคาบเวลาของรูปคลื่นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ดังนั้น รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า i_s จึงเกิดการผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ตามลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย โดยที่กระแสไฟฟ้าที่มีลักษณะการผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์นี้สามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ในรูปของฟังก์ชันอนุกรมฟูรีเยร์ที่ประกอบด้วยส่วนประกอบของค่าความถี่มูลฐาน (Fundamental term) และส่วนประกอบของค่าความถี่ฮาร์มอนิก (Harmonic term) ได้ดังสมการ (2-9)

$$i_s(t) = \hat{I}_1 \sin(\omega t + \beta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} \hat{I}_n \sin(n\omega t + \beta_n) \quad (2-9)$$

ทั้งนี้จากสมการ (2-9) เมื่อพิจารณาในรูปสมการของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าในเทอมที่เป็นส่วนประกอบของค่าความถี่มูลฐานคือปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน (Fundamental current term) นั้นเอง เมื่อใช้คุณสมบัติทางคณิตศาสตร์ของฟังก์ชันตรีโกณมิติสามารถที่จะเปลี่ยนรูปเทอมดังกล่าวได้ดังสมการ (2-11) และในเทอมที่เป็นส่วนประกอบของค่าความถี่ฮาร์มอนิกนั้นจะถูกเรียกชื่อใหม่ว่าเป็นปริมาณกระแสที่เป็นส่วนประกอบของค่าความผิดเพี้ยน (Distortion current term) โดยสมการของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้างกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อหาคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ได้

2.3.1 กำลังไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน (Power at the fundamental frequency)

เมื่อพิจารณาในกรณีเฉพาะที่เป็นส่วนประกอบของกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน และกำหนดรูปแบบสมการทั่วไปของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเฉพาะที่ค่าความถี่มูลฐานได้ดังสมการ (2-10) และสมการ (2-11) ทั้งนี้นิยามและปริมาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ จะสามารถกำหนดรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

$$v_s(t) = \hat{V} \sin(\omega t + \theta) \quad (2-10)$$

$$i_s(t) = \hat{I}_1 \sin(\omega t + \beta_1) \quad (2-11)$$

2.3.1.1 กำลังไฟฟ้าชั่วขณะ (Instantaneous power)

คือ ผลคูณระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เวลาใด ๆ ดังสมการ (2-12)

$$p(t) = v_s(t) \cdot i_s(t) \quad (2-12)$$

เมื่อนำสมการทั่วไปของแรงดันและกระแสไฟฟ้างสมการ (2-10) และ (2-11) มาแทนในสมการ (2-12) กำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่เกิดขึ้นจะวิเคราะห์ได้ค่าดังสมการ (2-13)

$$\begin{aligned} p(t) &= \hat{V}\hat{I}_1 (\sin(\omega t + \theta) \cdot \sin(\omega t + \beta_1)) \\ &= \hat{V}\hat{I}_1 (\sin \omega t \cos \theta + \cos \omega t \sin \theta) (\sin \omega t \cos \beta_1 + \cos \omega t \sin \beta_1) \\ &= \hat{V}\hat{I}_1 \left(\frac{1}{2} \cos(\theta - \beta_1) - \frac{1}{2} \cos(2\omega t + \theta + \beta_1) \right) \end{aligned} \quad (2-13)$$

ดังนั้น เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่ากำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าประกอบด้วยเทอมที่มีค่าคงที่หรือที่เรียกว่าค่าที่เป็นส่วนประกอบไฟตรง (DC component) และเทอมที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาตามลักษณะที่เป็นไซน์ (Sinusoidal component) โดยมีค่าความถี่เป็นสองเท่าของค่าความถี่มูลฐาน ดังนั้น เมื่อพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานเมื่อเกิดการล้าหน้า (Leading) หรือล้าหลัง (Lagging) (ในกรณีที่ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดในระบบไฟฟ้ามีลักษณะที่ตลอดคาบเวลาของรูปคลื่นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า) และเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์จะกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าเป็นรูปคลื่นอ้างอิง (Reference waveform) โดยมีมุมเฟสเริ่มต้น $\theta = 0^\circ$ ดังนั้น จากสมการ (2-13) สามารถจัดรูปของค่ากำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่เกิดขึ้นใหม่ได้ดังสมการ (2-14)

$$\begin{aligned} p(t) &= \frac{\hat{V}I_1}{2} \cos(\theta - \beta_1) - \frac{\hat{V}I_1}{2} [\cos 2\omega t \cos(\theta + \beta_1) - \sin 2\omega t \sin(\theta + \beta_1)] \\ &= \frac{\hat{V}I_1}{2} \cos(-\beta_1) [1 - \cos 2\omega t] + \frac{\hat{V}I_1}{2} \sin(\beta_1) \sin 2\omega t \\ &= \frac{\hat{V}I_1}{2} \cos(-\beta_1) [1 - \cos 2\omega t] + \frac{\hat{V}I_1}{2} \sin(-\beta_1) [0 - \sin 2\omega t] \quad (2-14) \end{aligned}$$

จากสมการ (2-14) เห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่เกิดขึ้นในกรณีที่รูปคลื่นกระแสไฟฟ้ามีปริมาณเฉพาะที่ค่าความถี่มูลฐานและรูปคลื่นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีลักษณะรูปคลื่นที่ไม่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ จะประกอบด้วย 2 เทอมโดยเทอมแรกเป็นผลคูณระหว่างค่าคงที่และฟังก์ชันโคไซน์ที่มีค่าความถี่เป็น 2 เท่าของค่าความถี่มูลฐาน และเทอมสองเป็นผลคูณระหว่างค่าคงที่และฟังก์ชันไซน์ที่มีค่าความถี่เป็น 2 เท่าของค่าความถี่มูลฐานเช่นกัน และจากการพิจารณาพบว่าค่าของทั้งสองเทอมจะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยเทอมแรกมีค่าเฉพาะค่าที่เป็นบวกเท่านั้น $1 - \cos 2\omega t > 0$ แต่เทอมที่สองจะมีลักษณะสมมาตร (Symmetry) โดยมีค่าเป็นได้ทั้งบวกและลบตามลักษณะของฟังก์ชันไซน์ $\sin 2\omega t$ ทั้งนี้ เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจจึงยกตัวอย่างโดยกำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีค่าตามสมการ (2-15) และสมมติให้โหลดเป็นชนิดที่มีคุณสมบัติเชิงเส้น โดยที่กระแสไฟฟ้ามีค่าเป็นไปตามสมการ (2-16) และมีค่าความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 Hz

$$v_s(t) = 220\sqrt{2} \sin(2\pi * 50 * t) \quad (2-15)$$

$$i_s(t) = \sqrt{2} \sin((2\pi * 50 * t) + \beta_1) \quad (2-16)$$

2.3.1.2 ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (Average power: P_{AV})

คือ ค่าเฉลี่ยในหนึ่งคาบเวลาที่ความถี่มูลฐานของผลคูณระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เวลาใด ๆ ซึ่งก็คือค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าชั่วขณะนั่นเอง หรืออาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (Real power) แสดงดังสมการ (2-17) ดังนั้น เมื่อนำสมการ (2-13) ที่เป็นกำลังไฟฟ้าชั่วขณะมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าเฉลี่ยในหนึ่งคาบเวลาจะได้ค่าเฉพาะในส่วนของทอมแรก โดยส่วนของทอมที่สองที่มีค่าตามลักษณะของฟังก์ชันไซน์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น จากกรณีดังกล่าวข้างต้นสามารถวิเคราะห์และหาค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (P_{avg}) ได้ดังสมการที่ (2-18) หรือ (2-19) โดยมีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt: W)

$$P_{AV} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (2-17)$$

$$P_{AV} = \frac{1}{2} \int_0^T \hat{V} \hat{I}_1 \cos(\theta - \beta_1) \quad (2-18)$$

$$P_{AV} = V_{rms} I_{rms,l} \cos(\theta - \beta_1) \quad (2-19)$$

2.3.1.3 ค่าตัวประกอบกำลังมูลฐาน (Displacement power factor: DPF)

คือ ค่าโคไซน์ของมุมต่างเฟสระหว่างรูปคลื่นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าและรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าเฉพาะที่ความถี่มูลฐานที่ปรากฏอยู่ในทอมแรกของสมการ (2-13) นั่นคือ เป็นการนิยามจากค่าของฟังก์ชันไซน์ $\cos(\theta - \beta_1)$ ที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย ดังสมการ (2-20)

$$DPF = \cos(\theta - \beta_1) \quad (2-20)$$

2.3.1.4 กำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน (Complex power: S)

นิยามของกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนจะอ้างอิงจากรูปแบบจำนวนเชิงซ้อน (Complex number) หรือ เฟสเซอร์ (Phasor) จากคุณสมบัติออยเลอร์เป็นสำคัญ (Euler's identity) โดยกำหนดให้อุปกรณ์หนึ่งมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมและกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมีค่าดังสมการ (2-21)

และ (2-22) (ทั้งนี้รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้ามีลักษณะรูปคลื่นที่ไม่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์)

$$\vec{V} = V_{rms} \angle \theta \quad (2-21)$$

$$\vec{I} = I_{rms,l} \angle \beta_1 \quad (2-22)$$

ดังนั้น จากสมการ (2-19) ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ

$$P_{AV} = V_{rms} I_{rms,l} \cos(\theta - \beta_1)$$

เมื่อนำทฤษฎีของออยเลอร์ (Euler's formula) มาประยุกต์ใช้กับสมการ (2-19) เพื่อให้สมการอยู่ในรูปของเฟสเซอร์ (Phasor) จะได้รูปแบบของสมการเป็นดังสมการ (2-23)

$$P_{AV} = V_{rms} I_{rms,l} \cdot \text{Re}\{e^{j(\theta - \beta_1)}\} = \text{Re}\{V_{rms} e^{j\theta} \cdot I_{rms,l} e^{j\beta_1}\} \quad (2-23)$$

จากสมการ 2-22 เมื่อพิจารณากระแสให้อยู่ในรูปเฟสเซอร์ จะได้ค่าดังสมการ (2-24) ซึ่งจะได้ค่าสังยุค (Conjugate term) ของกระแสดังกล่าวเป็นไปตามสมการ (2-25)

$$\vec{I} = I_{rms,l} \cdot e^{j\beta_1} \quad (2-24)$$

$$\vec{I}^* = I_{rms,l} \cdot e^{-j\beta} \quad (2-25)$$

สุดท้ายสามารถเขียนสมการค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยได้ใหม่ในรูปของเฟสเซอร์ดังสมการ (2-26)

$$P_{AV} = \text{Re}\{\vec{V} \cdot \vec{I}^*\} \quad (2-26)$$

ดังนั้น จึงทำให้เกิดนิยามของค่ากำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน (S) ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าจากผลคูณในรูปของเฟสเซอร์ระหว่างแรงดันและค่าสังยุคกระแส (Conjugate of current) ดังสมการ (2-27) กำหนดให้มีหน่วยเป็น โวลต์แอมป์ (Volt-amperes: VA)

$$S = \vec{V} \cdot \vec{I}^* \quad (2-27)$$

และเมื่อพิจารณาและวิเคราะห์หาค่ากำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนจากรูปของเฟสเซอร์ให้อยู่ในรูปแบบของจำนวนเชิงซ้อนจะได้ค่าดังสมการ (2-28)

$$S = \vec{V} \cdot \vec{I}^* = V_{rms} I_{rms,l} e^{j(\theta - \beta_1)} \equiv P_{AV} + jQ \quad (2-28)$$

ดังนั้นจากสมการค่ากำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนที่ได้ตามสมการ (2-28) นิยามของจำนวนเชิงซ้อนประกอบด้วยส่วนที่เป็นจำนวนจริง (Real term) ที่เป็นค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (Average power, P_{AV}) และส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ (Imaginary term) ซึ่งจะนิยามค่าดังกล่าวว่าเป็นกำลังไฟฟ้าเสมือน (Quardature power or Reactive power, Q) โดยมีค่าเป็นไปตามสมการ (2-29)

$$Q = \text{Im} \cdot \{ \vec{V} \cdot \vec{I}^* \} = V_{rms} I_{rms,l} \sin(\theta - \beta_1) \quad (2-29)$$

2.3.1.5 กำลังไฟฟ้าเสมือน (Quardature power: Q)

นิยามของกำลังไฟฟ้าเสมือนและค่าที่ได้ดังสมการ (2-29) พบว่าค่าดังกล่าวก็คือค่าคงที่ในส่วนของเทอมที่สองที่เป็นฟังก์ชันไซน์ของกำลังไฟฟ้าชั่วขณะดังสมการ (2-14) โดยสามารถเขียนสมการเพื่อวิเคราะห์หาลำดับกำลังไฟฟ้าเสมือนได้ดังสมการ (2-30) และกำหนดให้มีหน่วยเป็นวาร์ (Voltampere reaction, var)

$$Q = \frac{1}{2} V_{rms} I_{rms,l} \sin(\theta - \beta_1) \quad (2-30)$$

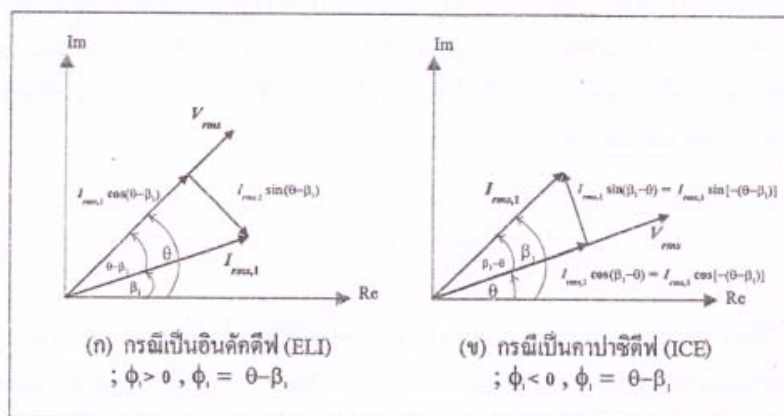
เพื่อให้เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จึงทำการยกตัวอย่างในรูปของไดอะแกรมเฟสเซอร์ (Phasor diagram) ดังภาพประกอบ 2-13 จากไดอะแกรมเฟสเซอร์ของกระแสเมื่อทำการแยกเฟสเซอร์ของกระแสออกเป็น 2 ส่วน คือ เฟสเซอร์กระแสที่มีเฟสตรงกับเฟสเซอร์ของแรงดัน (Inphase) โดยจะมีขนาดหรือแอมพลิจูด เท่ากับ $I_{rms,l} \cos(\theta - \beta_1)$ เฟสเซอร์กระแสที่มีมุมเฟสต่างกับเฟสเซอร์แรงดันเท่ากับ 90° (90° out of phase) เท่ากับ $I_{rms,l} \sin(\theta - \beta_1)$ นั่นคือ

- ผลคูณระหว่างเฟสเซอร์กระแสและเฟสเซอร์แรงดันที่มีเฟสตรงกันคือ ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย โดยที่ค่าโคไซน์ของมุมต่างเฟสระหว่างแรงดันกระแสเฉพาะที่ค่าความถี่มูลฐานที่อยู่ในสมการ คือ ค่าตัวประกอบกำลังมูลฐานนั่นเอง ($\cos(\theta - \beta_1) = \cos \theta_1$)

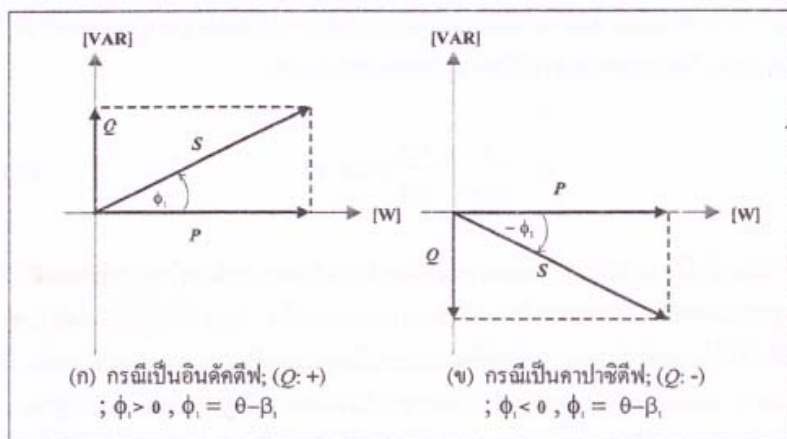
- ผลคูณระหว่างขนาดของเฟสเซอร์กระแสที่มีมุมต่างเฟสต่างกับเฟสเซอร์แรงดันอยู่เท่ากับ 90° คือ ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน โดยมีข้อสังเกตอยู่ 2 กรณี คือ กรณีแรกถ้า $\sin(\theta - \beta_1)$ มีค่าเป็นลบ นั่นคือ การที่รูปคลื่นกระแสมีลักษณะมุมเฟสที่ล่าช้าเมื่อเทียบกับรูปคลื่นแรงดัน (Lag condition) ซึ่งจะเรียกกรณีนี้ว่าสภาวะการเป็นอินดักทีฟ (Inductive) และกรณีที่สองเมื่อ

$\sin(\theta - \beta_1)$ มีค่าเป็นบวก นั่นคือ การที่รูปคลื่นกระแสมีลักษณะมุมเฟสที่ล่าหน้าเมื่อเทียบกับรูปคลื่นแรงดัน (Lead condition) ซึ่งจะเรียกกรณีนี้ว่า สภาวะการเป็นคาปาซิทีฟ (Capacitive)

ซึ่งจากความสัมพันธ์ของค่ากำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย และค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน สามารถเขียนความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปของสามเหลี่ยมกำลังได้ดังภาพประกอบ 2-13



ภาพประกอบ 2-13 ไดอะแกรมเฟสเซอร์ (Phasor diagram) ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า [1]



ภาพประกอบ 2-14 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าในรูปของสามเหลี่ยมกำลัง [1]

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นพบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (P) เท่านั้นที่ให้พลังงานกับโหลด (Load) ขณะที่ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) จะเป็นค่าที่แสดงถึงการถ่ายโอนพลังงานสะสม (Stored energy) ที่เกิดขึ้นไปมาระหว่างกันของแหล่งจ่ายกับโหลดในวงจรและค่ากำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน (S) คือ กำลังไฟฟ้าสุทธหรือโวลต์-แอมป์แปร์ (Volt-amperes, VA) ที่แหล่งจ่ายทำการจ่ายพลังงานให้กับโหลดในวงจรที่ความถี่มูลฐาน

ในส่วนของค่าตัวประกอบกำลังมูลฐาน (DPF) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าในรูปสามเหลี่ยมกำลังพบว่า ค่าตัวประกอบกำลังมูลฐานที่เกิดขึ้นจากโหลดในวงจรนั้นมีความสำคัญเนื่องจาก เป็นค่าที่บอกถึงปริมาณไฟฟ้าที่จะใช้ให้พอกับความต้องการของโหลด เช่น ถ้ากำหนดให้ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของโหลดมีค่าเท่ากับ 100 W โดยมีค่าตัวประกอบกำลังมูลฐานเท่ากับ 0.8 (ล้าหลัง) นั่นคือ ระบบไฟฟ้าที่ทำการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดดังกล่าวจะต้องใช้สายไฟ (Cable) รวมถึงอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ติดตั้งในระบบ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) อุปกรณ์ตัดตอนไฟฟ้า (Switch gear) และอื่น ๆ รวมทั้งแหล่งจ่ายไฟฟ้าต้องมีความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าสุทธิที่เกิดขึ้นจริงในระบบไฟฟ้าหรือค่ากำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนมีค่าเท่ากับ 125 VA (ดังค่าที่ปรากฏในสมการ (2-31)) โดยมีรายละเอียดในรูปของสามเหลี่ยมกำลัง ดังภาพประกอบ 2-14 (ก) ซึ่งสามารถพิจารณาได้ชัดเจนว่าระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าต้องมีความสามารถเพิ่มขึ้นสำหรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นในรูปของกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน (VA) ที่มีค่ามากกว่าค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของโหลดถึง 25%

$$S = \frac{P}{DPF} = \frac{100}{0.8} = 125 \text{ VA} \quad (2-31)$$

ถ้ากรณีที่โหลดต่ออยู่ในระบบไฟฟ้ามีผลทำให้เกิดกระแสที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับลักษณะรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์หรือกระแสฮาร์มอนิก ซึ่งจะไม่ได้ก่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าจริงที่โหลดเท่านั้น แต่ส่งผลทำให้เกิดผลกระทบอื่น ๆ ตามมาด้วย เช่น ความร้อนที่สายส่ง และอุปกรณ์อื่น ๆ ในระบบ โดยเฉพาะค่าตัวประกอบกำลังวงจรที่จะไม่ได้มีเฉพาะค่าตัวประกอบกำลังมูลฐาน แต่จะมีค่าตัวประกอบกำลังที่เกิดจากเทอมของกระแสฮาร์มอนิกด้วย

2.4 การวิเคราะห์รูปคลื่น[1]

รูปคลื่นที่จะพิจารณานี้จะพิจารณาถึงรูปคลื่นพื้นฐานที่เกิดจากกระแสของภาระที่ต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าสายประธานซึ่งภาระทางไฟฟ้านั้น อาจมีคุณสมบัติที่เป็นเชิงเส้นหรือไม่เชิง

เส้น รวมทั้งจะใช้หลักการอนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier series) เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์เพื่อแสดงให้เห็นว่าสัญญาณรูปคลื่นนั้น ๆ ประกอบไปด้วยสัญญาณที่มีความถี่ใดบ้างและในแต่ละความถี่นั้นมีขนาดหรือแอมพลิจูดเท่าใด ทั้งเพื่อประโยชน์ในการนำไปใช้งานหรือสำหรับการแก้ไขปัญหาที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิกในลำดับต่อไป

2.4.1 อนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier series)

รูปคลื่นสัญญาณต่อเนื่องใด ๆ ที่มีลักษณะเกิดขึ้นซ้ำ ๆ ในคาบเวลานั้น (Periodic waveform) สามารถเขียนหรือแสดงให้อยู่ในรูปอนุกรมฟูรีเยร์ได้โดยที่รูปแบบทั่วไปของอนุกรมฟูรีเยร์ คือ ผลบวกของส่วนประกอบของค่าที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC component) และส่วนประกอบของพจน์ที่เป็นจำนวนคี่และคู่ของเทอมที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ (Odd and even sine and cosine term) ที่ค่าความถี่มูลฐานและค่าความถี่ที่เป็นจำนวนเต็มเท่าของค่าความถี่มูลฐานหรือที่เรียกว่า ความถี่ฮาร์มอนิก ซึ่งแสดงในรูปของสมการคณิตศาสตร์ได้หลายรูปแบบดังสมการ (2-32) ถึง (2-34)

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos(1 \cdot \omega t) + a_2 \cos(2 \cdot \omega t) + \dots + a_n \cos(n \cdot \omega t) + b_1 \sin(1 \cdot \omega t) + a_2 \sin(2 \cdot \omega t) + \dots + b_n \sin(n \cdot \omega t) \quad (2-32)$$

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (2-33)$$

เมื่อ

- a_0 คือ ค่าเฉลี่ยของสัญญาณ (Average value) หรือส่วนประกอบที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรง
- a_n คือ ส่วนประกอบของเทอมในรูปของฟังก์ชันโคไซน์
- b_n คือ ส่วนประกอบของเทอมในรูปของฟังก์ชันไซน์
- n คือ จำนวนเต็ม (Integer)
- ω คือ ค่าความถี่เชิงมุมมูลฐานของรูปคลื่นสัญญาณ (Fundamental angular frequency)
- $n\omega$ คือ ค่าความถี่เชิงมุมฮาร์มอนิกของรูปคลื่นสัญญาณ (n^{th} harmonic angular frequency)
- f คือ ค่าความถี่มูลฐานของรูปคลื่นสัญญาณ $f = f_1$ (Frequency; Hz)
- nf คือ ค่าความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ n ของรูปคลื่นสัญญาณ ($n > 1$)
- T คือ คาบเวลาของรูปคลื่นสัญญาณ (Time; sec)

หรือ

$$f(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(n\omega t - \phi_n) \quad (2-34)$$

เมื่อ

c_0 คือ ค่าเฉลี่ยของสัญญาณ (Average value) หรือส่วนประกอบที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรง

c_1 คือ ส่วนประกอบหลักมูลของฟังก์ชัน (Fundamental component)

c_n คือ ส่วนประกอบฮาร์โมนิกของฟังก์ชัน (Harmonic component)

ϕ_n คือ ค่ามุมต่างเฟสของฮาร์โมนิกลำดับที่ n เทียบกับสัญญาณไซน์อ้างอิงที่ความถี่เดียวกัน

โดยที่

$$c_0 = a_0 \quad (2-35)$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (2-36)$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{b_n}{a_n} \right) \quad (2-37)$$

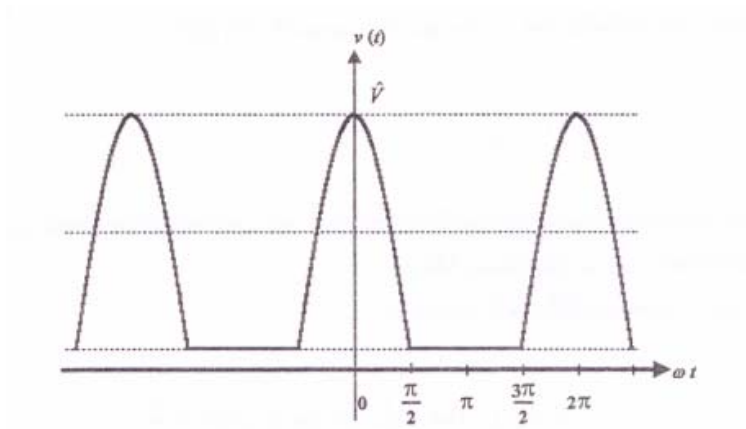
จากสมการ (2-34) ซึ่งเป็นรูปแบบสมการมาตรฐานของอนุกรมฟูรีเยร์นั้น จะมีขั้นตอนสำคัญในการจัดรูปแบบสมการ คือ การหาค่าสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ (Fourier coefficients) ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2-38)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega t dt \quad (2-39)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega t dt \quad (2-40)$$

ตัวอย่าง จากรูปคลื่นแรงดันดังภาพประกอบ 2-15 จงแสดงและวิเคราะห์รูปคลื่นดังกล่าวโดยใช้อนุกรมฟูรีเยร์



ภาพประกอบ 2-15 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าเรกติไฟเออร์แบบครึ่งรูปคลื่น (Half-wave rectifier) [1]

วิธีทำ

กำหนดให้

$$v(t) = \begin{cases} \hat{V} \cos \omega t & , \quad 0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & , \quad \frac{\pi}{2} \leq \omega t \leq \frac{3\pi}{2} \\ \hat{V} \cos \omega t & , \quad \frac{3\pi}{2} \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases}$$

หรือสามารถเขียนฟังก์ชันดังกล่าวใหม่ได้เป็น

$$v(t) = \begin{cases} \hat{V} \cos \omega t & , \quad -\frac{\pi}{2} \leq \omega t \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & , \quad \frac{\pi}{2} \leq \omega t \leq \frac{3\pi}{2} \end{cases}$$

จากรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวประกอบ 2-15 พิจารณาคาบเวลาของฟังก์ชันได้เป็น

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \cdot \text{s}$$

จากรูปแบบสมการรูปคลื่นมาตรฐานของอนุกรมฟูรีเยร์ ดังสมการ (2-33) สามารถวิเคราะห์และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ (Fourier coefficients) ได้ดังนี้

ส่วนประกอบของค่าที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรง a_0

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \hat{V} \cos \omega t d(\omega t) = \frac{\hat{V}}{\pi}$$

ส่วนประกอบของเทอมในรูปของฟังก์ชันโคไซน์ a_n

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega t dt = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \hat{V} \cos \omega t \cdot \cos n\omega t d(\omega t)$$

จากสมการส่วนประกอบของเทอมในรูปของการอินทิเกรตดังกล่าวข้างต้น จะเห็นว่ากรณีที่ $n = 1$ จะมีค่าความแตกต่างจากกรณีที่ $n = 2, 3, 4, \dots$ ดังนั้นทำการวิเคราะห์และคำนวณออกเป็น 2 กรณี

$$a_1 = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \hat{V} \cos \omega t \cdot \cos \omega t d(\omega t) = \frac{V_m}{2}$$

และ

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \hat{V} \cos \omega t \cdot \cos n\omega t d(\omega t) = \frac{2\hat{V}}{\pi} \frac{\cos(\pi n/2)}{1-n^2}, n \neq 1$$

ส่วนประกอบของเทอมในรูปของฟังก์ชันไซน์ b_n

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega t dt = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \hat{V} \cos \omega t \cdot \sin n\omega t d(\omega t) = 0$$

ดังนั้น จากรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวประกอบ 2-15 หลังจากทำการวิเคราะห์รูปคลื่นดังกล่าวโดยใช้อนุกรมฟูรีเยร์ข้างต้นสามารถจัดรูปแบบได้เป็น

$$v(t) = \frac{\hat{V}}{\pi} + \frac{\hat{V}}{2} \cos \omega t + \frac{2\hat{V}}{3\pi} \cos 2\omega t - \frac{2\hat{V}}{15\pi} \cos 4\omega t + \frac{2\hat{V}}{35\pi} \cos 6\omega t + \dots$$

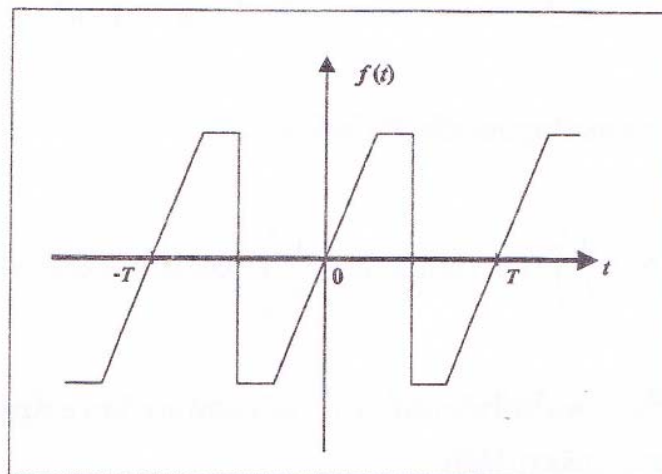
2.4.2 ลักษณะรูปคลื่นที่เป็นฟังก์ชันสมมาตร (Symmetrical waveform)

การแสดงรูปคลื่นสัญญาณต่อเนื่องให้อยู่ในรูปของอนุกรมฟูรีเยร์นั้น ขั้นตอนการหาค่าสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์จากสมการ (2-38) ถึง (2-40) ที่อยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ของการอินทิเกรตเทอมฟังก์ชันตรีโกณมิตินั้น ถ้าพิจารณารูปคลื่นสัญญาณต่อเนื่องในรูปแบบของฟังก์ชันสมมาตรจะสามารถทำให้การวิเคราะห์รูปคลื่นดังกล่าวให้อยู่ในรูปของอนุกรมฟูรีเยร์ทำได้ง่ายและสะดวกขึ้น โดยอาศัยคุณสมบัติของฟังก์ชันตรีโกณมิติที่อยู่ในสมการนั่นเอง ดังนั้น จากรูปแบบฟังก์ชันสมมาตรของรูปคลื่นจะมีลักษณะที่สำคัญอยู่ 3 รูปแบบ คือ ฟังก์ชันสมมาตรเชิงคี่ (Odd-function symmetry) ฟังก์ชันสมมาตรเชิงคู่ (Even-function symmetry) และฟังก์ชันสมมาตรแบบครึ่งคลื่น (Half-wave symmetry)

2.4.2.1 รูปคลื่นที่มีลักษณะเป็นฟังก์ชันสมมาตรเชิงคี่ (Odd-function symmetry)

รูปคลื่นที่มีลักษณะเข้าเกณฑ์การเป็นฟังก์ชันสมมาตรเชิงคี่นั้น จะต้องมีความสมบัติของฟังก์ชันเป็นไปตามสมการ (2-41) ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างรูปคลื่นได้ดังภาพประกอบ 2-16

$$f(t) = -f(-t) \quad (2-41)$$



ภาพประกอบ 2-16 ลักษณะรูปคลื่นที่เป็นฟังก์ชันสมมาตรเชิงคี่ (Odd-function symmetry waveform) [1]

รูปคลื่นที่มีลักษณะฟังก์ชันสมมาตรเชิงคี่ เมื่อทำการวิเคราะห์ฟูรีเยร์ การหาค่าสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์สามารถทำได้ง่ายเนื่องจากส่วนประกอบของเทอมในรูปของฟังก์ชันโคไซน์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ($a_n = 0$) เนื่องจากคุณสมบัติของรูปคลื่นที่เป็นฟังก์ชันสมมาตรเชิงคี่ ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้จากการวิเคราะห์สมการ ดังเช่นสมการ (2-39) ดังนี้

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega t \, dt \\ &= \frac{2}{T} \left[\int_{-T/2}^0 f(t) \cos n\omega t \, dt + \int_0^{T/2} f(t) \cos n\omega t \, dt \right] \end{aligned}$$

เมื่อกำหนดให้ $t = -\tau$ ที่เทอมแรงของการอินทิเกรตในสมการดังกล่าวข้างต้น ดังนั้น

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{T} \left[\int_{T/2}^0 f(-\tau) \cos(-n\omega\tau)(-d\tau) + \int_0^{T/2} f(t) \cos n\omega t \, dt \right] \\ &= \frac{2}{T} \left[- \int_{T/2}^0 f(-\tau) \cos n\omega\tau \, d\tau + \int_0^{T/2} f(t) \cos n\omega t \, dt \right] \end{aligned}$$

เนื่องจากคุณสมบัติของรูปคลื่นที่เป็นฟังก์ชันสมมาตรเชิงคี่ ทำให้

$$f(-\tau) = -f(\tau)$$

ดังนั้น

$$a_n = 0$$

และจากสมการ (2-40) ที่เป็นส่วนประกอบของเทอมในรูปของฟังก์ชันไซน์ b_n ดังนี้

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega t \, dt \\ &= \frac{2}{T} \left[\int_{T/2}^0 f(-\tau) \sin(-n\omega\tau)(-d\tau) + \int_0^{T/2} f(t) \sin n\omega t \, dt \right] \\ &= \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \sin n\omega t \, dt \end{aligned}$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของรูปคลื่นที่มีลักษณะเป็นฟังก์ชันสมมาตรเชิงคู่จะมีค่า ดังนี้

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

$$a_n = 0 \quad (2-42)$$

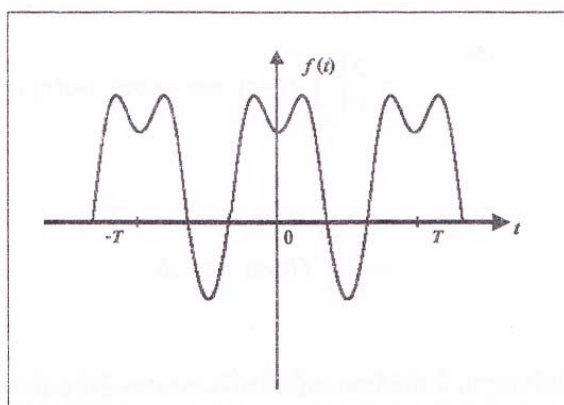
$$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \sin n\omega t dt \quad (2-43)$$

2.4.2.2 รูปคลื่นที่มีลักษณะเป็นฟังก์ชันสมมาตรเชิงคู่ (Even-function symmetry)

รูปคลื่นที่มีลักษณะเข้าเกณฑ์การเป็นฟังก์ชันสมมาตรเชิงคู่ นั้น ต้องมีคุณสมบัติของฟังก์ชันเป็นไปตามสมการ (2-44) ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างรูปคลื่นได้ดังภาพประกอบ 2-17

$$f(t) = f(-t) \quad (2-44)$$

รูปคลื่นที่มีลักษณะฟังก์ชันสมมาตรเชิงคู่ เมื่อทำการวิเคราะห์ใช้อนุกรมฟูรีเยร์ การหาค่าสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์สามารถทำได้ง่ายเนื่องจากส่วนประกอบของเทอมในรูปของฟังก์ชันไซน์จะมีค่าเป็นศูนย์ ($b_n = 0$) เนื่องจากคุณสมบัติของรูปคลื่นที่เป็นฟังก์ชันสมมาตรเชิงคู่ ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้จากการวิเคราะห์สมการ ดังเช่นสมการ (2-40) ดังนี้



ภาพประกอบ 2-17 ลักษณะรูปคลื่นที่เป็นฟังก์ชันสมมาตรเชิงคู่ (Even-function symmetry waveform) [1]

$$\begin{aligned}
 b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega t \, dt \\
 &= \frac{2}{T} \left[\int_{-T/2}^0 f(t) \sin n\omega t \, dt + \int_0^{T/2} f(t) \sin n\omega t \, dt \right]
 \end{aligned}$$

เมื่อกำหนดให้ $t = -\tau$ ที่เทอมแรกของการอินทิเกรตในสมการดังกล่าวข้างต้น ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 b_n &= \frac{2}{T} \left[\int_{T/2}^0 f(-\tau) \sin(-n\omega\tau)(-d\tau) + \int_0^{T/2} f(t) \sin n\omega t \, dt \right] \\
 &= \frac{2}{T} \left[\int_{T/2}^0 f(-\tau) \sin n\omega\tau \, d\tau + \int_0^{T/2} f(t) \sin n\omega t \, dt \right]
 \end{aligned}$$

เนื่องจากคุณสมบัติของรูปคลื่นที่เป็นฟังก์ชันสมมาตรเชิงคู่ ทำให้

$$f(t) = f(-t) = f(\tau)$$

ดังนั้น

$$b_n = 0$$

และจากสมการ (2-39) ที่เป็นส่วนประกอบของเทอมในรูปของฟังก์ชันโคไซน์ a_n

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega t \, dt \\
 &= \frac{2}{T} \left[\int_{T/2}^0 f(-\tau) \cos(-n\omega\tau)(-d\tau) + \int_0^{T/2} f(t) \cos n\omega t \, dt \right] \\
 &= \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \cos n\omega t \, dt
 \end{aligned}$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของรูปคลื่นที่มีลักษณะเป็นฟังก์ชันสมมาตรเชิงคู่จะมีค่า ดังนี้

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \, dt$$

$$a_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \cos n\omega t dt \quad (2-45)$$

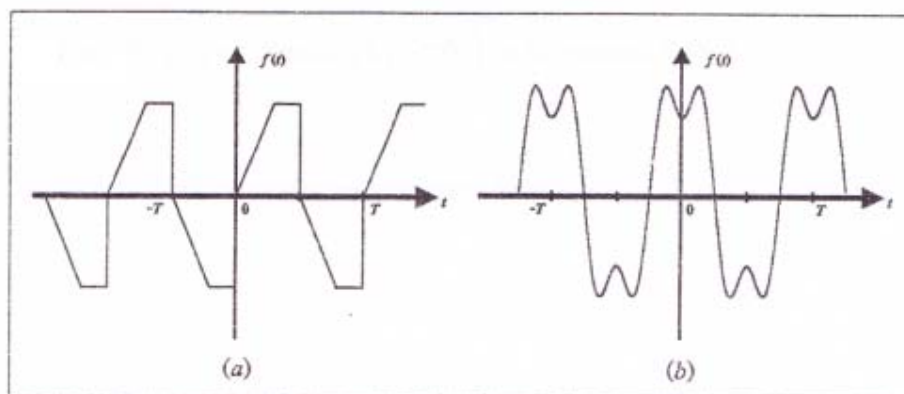
$$b_n = 0 \quad (2-46)$$

2.4.2.3 รูปคลื่นที่มีลักษณะเป็นฟังก์ชันสมมาตรแบบครึ่งคลื่น (Half-wave symmetry)

รูปคลื่นที่มีลักษณะเข้าเกณฑ์การเป็นฟังก์ชันสมมาตรครึ่งคลื่นนั้น จะต้องมีความสัมพันธ์ของฟังก์ชันเป็นไปตามสมการ (2-47) หรือ (2-48) ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างรูปคลื่นได้ดังภาพประกอบ 2-18

$$f(t) = \begin{cases} -f(t - \frac{1}{2}T) \\ -f(t + \frac{1}{2}T) \end{cases} \quad (2-47)$$

$$f(t) = \begin{cases} f(t - \frac{1}{2}T) \\ f(t + \frac{1}{2}T) \end{cases} \quad (2-48)$$



ภาพประกอบ 2-18 ลักษณะรูปคลื่นที่เป็นฟังก์ชันสมมาตรแบบครึ่งคลื่น (Half-wave function symmetry) [1]

นั่นคือ ลักษณะของรูปคลื่นที่เป็นฟังก์ชันสมมาตรแบบครึ่งคลื่นนั้น ในแต่ละครึ่งคลื่นที่อยู่ติดกัน (Adjacent half cycles) จะมีลักษณะที่เหมือนกันหรือมีค่าที่เท่ากัน โดยลักษณะหรือค่าที่เท่ากันนี้จะไม่คำนึงถึงเครื่องหมายของสัญญาณ (Sign) โดยรูปคลื่นที่เข้าเกณฑ์การเป็นฟังก์ชันสมมาตรแบบครึ่งคลื่นนั้นจะมีลักษณะที่ไม่ขึ้นกับจุดเลือกของการกำหนดเวลา $t = 0$ เหมือนกับลักษณะของรูปคลื่นที่เป็นฟังก์ชันสมมาตรเชิงคี่ ดังนั้น จากคุณสมบัติของฟังก์ชันสมมาตรแบบครึ่งคลื่นเหมือนกับลักษณะของรูปคลื่นที่เป็นฟังก์ชันสมมาตรเชิงคี่ ดังนั้น จากคุณสมบัติของฟังก์ชันสมมาตรแบบครึ่งคลื่นโดยที่ $f(t) = -f(t - T/2)$ เมื่อทำการวิเคราะห์รูปคลื่นให้อยู่ในรูปของอนุกรมฟูรีเยร์ ฟังก์ชันที่ได้ของรูปคลื่นจึงประกอบไปด้วยเทอมของฟังก์ชันตรีโกณมิติเฉพาะที่ความถี่ที่เป็นจำนวนคี่เท่านั้น หรืออาจกล่าวได้ว่าประกอบไปด้วยฮาร์โมนิกลำดับที่เป็นจำนวนคี่ ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นจากการวิเคราะห์สมการเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega t dt \\ &= \frac{2}{T} \left[\int_{-T/2}^0 f(t) \cos n\omega t dt + \int_0^{T/2} f(t) \cos n\omega t dt \right] \end{aligned}$$

เมื่อกำหนดให้ตัวแปรใหม่มีค่าเป็น $\tau = t + \frac{1}{2}T$ แทนค่าเฉพาะที่เทอมแรกของการอินทิเกรตในสมการดังกล่าวข้างต้น จะได้ผลลัพธ์ของการอินทิเกรตเป็น

$$\begin{aligned} \int_{-T/2}^0 f(t) \cos n\omega t dt &= \int_0^{T/2} f\left(\tau - \frac{1}{2}T\right) \cos n\omega\left(\tau - \frac{1}{2}T\right) d\left(\tau - \frac{1}{2}T\right) \\ &= \int_0^{T/2} -f(\tau) \cdot \cos n\pi \cdot \cos n\omega\tau d\tau \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$a_n = \frac{2}{T} (1 - \cos n\pi) \int_0^{T/2} f(t) \cos n\omega t dt$$

ทั้งนี้จากส่วนประกอบของเทอมในรูปของฟังก์ชันโคไซน์ที่ได้จะพบว่า $(1 - \cos n\pi) = 0$ เมื่อ n มีค่าเป็นจำนวนคู่ ดังนั้น ส่วนประกอบของเทอมในรูปของฟังก์ชันโคไซน์จะมีค่าเท่ากับ

$$a_n = \begin{cases} \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \cos n\omega t dt & , n \text{ is odd} \\ 0 & , n \text{ is even} \end{cases}$$

และจากสมการ (2-40) ที่เป็นส่วนประกอบของเทอมในรูปของฟังก์ชันไซน์ b_n ดังนั้น

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega t dt \\ &= \frac{2}{T} \left[\int_{-T/2}^0 f(t) \sin n\omega t dt + \int_0^{T/2} f(t) \sin n\omega t dt \right] \end{aligned}$$

และเมื่อกำหนดให้ตัวแปรใหม่มีค่าเป็น $\tau = t + \frac{1}{2}T$ แทนค่าเฉพาะที่เทอมแรกของการอินทิเกรตในสมการดังกล่าวข้างต้นเช่นกัน จะได้ผลลัพธ์ของการอินทิเกรตเป็น

$$\begin{aligned} \int_{-T/2}^0 f(t) \sin n\omega t dt &= \int_0^{T/2} f\left(\tau - \frac{1}{2}T\right) \sin n\omega\left(\tau - \frac{1}{2}T\right) d\left(\tau - \frac{1}{2}T\right) \\ &= \int_0^{T/2} -f(\tau) \cdot \cos n\pi \cdot \sin n\omega t dt \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$b_n = \frac{2}{T} (1 - \cos n\pi) \int_0^{T/2} f(t) \sin n\omega t dt$$

ทั้งนี้จากส่วนประกอบของเทอมในรูปของฟังก์ชันโคไซน์ที่ได้จะพบว่า $(1 - \cos n\pi) = 0$ เมื่อ n มีค่าเป็นจำนวนคู่ ดังนั้น ส่วนประกอบของเทอมในรูปของฟังก์ชันไซน์จะมีค่าเท่ากับ

$$b_n = \begin{cases} \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \sin n\omega t dt & , n \text{ is odd} \\ 0 & , n \text{ is even} \end{cases}$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ของรูปคลื่นที่มีลักษณะเป็นฟังก์ชันสมมาตรแบบครึ่งคลื่นจะมีค่า ดังนี้

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

$$a_n = \begin{cases} \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \cos n\omega t dt & , n \text{ is odd} \\ 0 & , n \text{ is even} \end{cases} \quad (2-49)$$

$$b_n = \begin{cases} \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \sin n\omega t dt & , n \text{ is odd} \\ 0 & , n \text{ is even} \end{cases} \quad (2-50)$$

ตัวอย่าง จากรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าดังภาพประกอบ 2-19 จงแสดงและวิเคราะห์รูปคลื่นดังกล่าวโดยใช้อนุกรมฟูรีเยร์

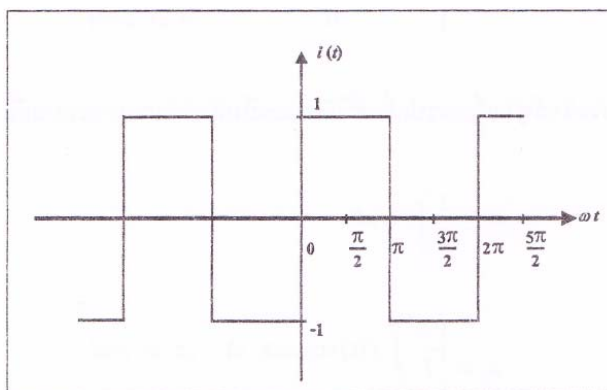
วิธีทำ

เมื่อพิจารณารูปคลื่นที่กำหนดให้สามารถเขียนฟังก์ชันดังกล่าวใหม่ได้เป็น

$$i(t) = \begin{cases} 1 & , 0 \leq \omega t \leq \pi \\ -1 & , -\pi \leq \omega t \leq 0 \end{cases}$$

ดังนั้น ฟังก์ชันที่ได้จะมีลักษณะเข้าเกณฑ์การเป็น ฟังก์ชันสมมาตรเชิงคี่ ตามเงื่อนไขในสมการ (2-41) และสามารถพิจารณาคาบเวลาและความถี่หลักมูลของฟังก์ชันได้เป็น

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \cdot s$$



ภาพประกอบ 2-19 กระแสไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่กำหนดให้เป็นฟังก์ชันสมมาตรเชิงคี่ [1]

จากรูปแบบสมการมาตรฐานของอนุกรมฟูรีเยร์ของฟังก์ชันสมมาตรเชิงคี่ สามารถวิเคราะห์และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ได้ ดังนี้
ส่วนประกอบของค่าที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรง a_0

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(t) d(\omega t) \\ &= \frac{1}{2\pi} \left[\int_{-\pi}^0 (-1) d(\omega t) + \int_0^{\pi} (1) d(\omega t) \right] = 0 \end{aligned}$$

ส่วนประกอบของเทอมในรูปของฟังก์ชัน โคไซน์ a_n

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega t dt = \frac{1}{\pi} \left[\int_{-\pi}^0 (-1) \cdot \cos n\omega t d(\omega t) + \int_0^{\pi} (1) \cdot \cos n\omega t d(\omega t) \right] = 0$$

ส่วนประกอบของเทอมในรูปของฟังก์ชันไซน์ b_n

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega t dt = \frac{1}{\pi} \left[\int_{-\pi}^0 (-1) \cdot \sin n\omega t d(\omega t) + \int_0^{\pi} (1) \cdot \sin n\omega t d(\omega t) \right] \\ &= \frac{2}{n\pi} (1 + \cos n\pi) \end{aligned}$$

ดังนั้น ส่วนประกอบของเทอมในรูปของฟังก์ชันไซน์จะมีค่าเท่ากับ

$$b_n = \begin{cases} 4/n\pi & , n \text{ is odd} \\ 0 & , n \text{ is even} \end{cases}$$

ดังนั้น รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าดังภาพประกอบ 2-19 ที่เข้าเกณฑ์ลักษณะการเป็น ฟังก์ชันสมมาตรเชิงคี่ หลังจากทำการวิเคราะห์รูปคลื่นดังกล่าวสามารถจัดรูปแบบสมการโดยใช้ อนุกรมฟูริเยร์ ได้เป็น

$$i(t) = \frac{4}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots \right)$$

โดยที่ค่ายอดคลื่นของกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ n (Peak value of the n^{th} current harmonic, \hat{I}_n) และ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยประสิทธิผลของกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ n (RMS value of the n^{th} current harmonic, $I_{rms,n}$) จะมีค่าเท่ากับ

$$\hat{I}_n = \frac{1}{n} \cdot \frac{4}{\pi} \quad \text{และ} \quad I_{rms,n} = \frac{1}{n} \cdot \frac{4}{\sqrt{2} \cdot \pi}$$

2.5 มาตรฐาน IEEE 1459-2010

มาตรฐาน IEEE 1459-2010 คือ มาตรฐานที่ใช้งานเพื่อกำหนดระเบียบวิธีการวัดค่า ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่อยู่ในสถานะสัญญาณของแรงดันและกระแสที่เป็นรูปคลื่น ไซน์ ไม่เป็น รูปคลื่น ไซน์ รวมถึงในสถานะสมดุลหรือไม่สมดุลในกรณีระบบไฟฟ้า 3 เฟส สำหรับมาตรฐานนี้ ได้แสดงรายละเอียดที่ใช้ในการพิจารณาหรือคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าแบบดั้งเดิม รวมถึงวิธีการ คำนวณแบบใหม่ และทำการอธิบายคุณลักษณะพิเศษต่าง ๆ ของมาตรฐานใหม่ด้วย

องค์ประกอบหลักที่ต้องมีการพิจารณาเปลี่ยนแปลงลักษณะมาตรฐานจากแบบเดิม ก็คือสถานะแวลดล้อมใหม่ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ภายใต้เงื่อนไข ดังนี้

1. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตัวปรับค่าความเร็วของมอเตอร์ วงจรเร็คติไฟเออร์ ที่ใช้การควบคุม ไซโครคอนเวอเตอร์ หลอดไฟฟ้าที่บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ เต้าหลอมชนิด เหนียวนำและแบบอาร์ค คอมพิวเตอรส์ส่วนบุคคล โดยส่วนใหญ่เป็น โหลดแบบไม่เชิงเส้น

(Nonlinear load) ที่ใช้ในระบบธุรกิจ อุตสาหกรรมหรือผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถทำให้เกิดความผิดเพี้ยนภายในระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบได้ ซึ่งเป็นปัญหาหลักที่เกิดการไหลของพลังงานแบบไม่ราบเรียบ (Nonactive) ทำให้เกิดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกขึ้น

2. ค่านิยมที่เกิดขึ้นใหม่ ตามรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าในปัจจุบันที่มีแนวโน้มเป็นแบบไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ (Non-sinusoidal) และไม่สมดุล (Unbalance)

3. การออกแบบเครื่องมือวัดแบบดั้งเดิมที่ใช้หลักการจากระบบ 60/50 Hz นั้น มีแนวโน้มว่าจะเกิดความผิดพลาดเมื่อทำการวัด เมื่อรูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าเกิดความผิดเพี้ยน

4. การสร้างเครื่องมือวัดรูปแบบใหม่โดยใช้ความสามารถของไมโครโปรเซสเซอร์และไมโครคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน เพื่อให้เกิดความถูกต้องและเป็นอุปกรณ์ที่มีความอนุเคราะห์ซึ่งทำให้การวัดปริมาณทางไฟฟ้าจะต้องถูกกำหนดด้วยรูปแบบของสมการคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนมากขึ้น

5. มีความต้องการในการแสดงผลพร้อมอย่างถูกต้องแม่นยำมากขึ้น เนื่องจากค่าความผิดเพี้ยนของเครื่องมือวัดเกิดจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น รวมทั้งค่าพารามิเตอร์ของระบบส่งจ่ายที่มีเสถียรภาพ รวมถึงคุณภาพของปริมาณทางด้านไฟฟ้า

2.5.1 ระบบไฟฟ้าชนิด 1 เฟส ในสภาวะรูปคลื่นไซน์

แหล่งจ่ายแรงดันที่เป็นรูปคลื่นไซน์

$$v = \sqrt{2}V \sin(\omega t) \quad (2-51)$$

เมื่อโหลดเป็นแบบเชิงเส้นทำงาน จะได้กระแสรูปคลื่นไซน์

$$i = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \theta) \quad (2-52)$$

กำหนดให้

- V คือ ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของแรงดันไฟฟ้า (V)
- I คือ ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของกระแสไฟฟ้า (A)
- ω คือ ค่าความถี่เชิงมุม: $2\pi f$ (rad/s)
- f คือ ค่าความถี่ (Hz)

θ คือ ค่ามุมเฟส (rad)
 t คือ ค่าคาบเวลา (s)

2.5.1.1 ค่ากำลังไฟฟ้าชั่วขณะ (Instantaneous power: W)

ค่ากำลังไฟฟ้าชั่วขณะ p จะแทนค่าด้วย

$$p = vi \quad (2-53)$$

$$p = p_a + p_q$$

โดยที่

$$p_a = VI \cos \theta [1 - \cos(2\omega t)] = P [1 - \cos(2\omega t)]; \quad P = VI \cos \theta \quad (2-54)$$

$$p_q = -VI \sin \theta \sin(2\omega t) = -Q \sin(2\omega t); \quad Q = VI \sin \theta \quad (2-55)$$

หมายเหตุ

1- ในกรณีค่าของกำลังไฟฟ้าชั่วขณะมาจากองค์ประกอบของกระแสแอกทีฟ ซึ่งองค์ประกอบที่กล่าวนั้นจะอินเฟส (Inphase) กันกับรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้อัตราส่วนในการเคลื่อนที่ของพลังงาน

$$w_a = \int p_a dt = Pt - \frac{P}{2\omega} \sin(2\omega t)$$

การเคลื่อนที่ของพลังงานจะเป็นไปในทิศทางเดียวกันระหว่างแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลด ซึ่งอัตราส่วนในการเคลื่อนที่ของพลังงานนั้นจะต้องไม่มีค่าเป็นลบ $p_a \geq 0$

2- ในกรณีค่าของกำลังไฟฟ้าชั่วขณะมาจากองค์ประกอบของกระแสรีแอกทีฟ ซึ่งองค์ประกอบที่กล่าวนั้นจะมีมุมต่างเฟส 90° กับรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้อัตราส่วนในการเคลื่อนที่ของพลังงาน

$$w_q = \int p_q dt = \frac{Q}{2\omega} \cos(2\omega t)$$

ชนิดของพลังงานที่เคลื่อนที่ไปมาระหว่างแหล่งจ่ายกับโหลดชนิดที่เป็นค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุ รวมถึงระบบที่มีการเคลื่อนที่ เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และรีเลย์ที่มีการ

เคลื่อนที่ อัตราส่วนของการเคลื่อนที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และพลังงานที่ส่งผ่านไปยังโหลดมีค่าสุทธิเท่ากับศูนย์เช่นกัน

2.5.1.2 ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (Active power: W)

ค่ากำลังไฟฟ้าจริง P คือ ค่าเฉลี่ยของค่ากำลังไฟฟ้าชั่วขณะระหว่างช่วงเวลาพิจารณา τ ถึง $\tau + kT$

$$\|P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p dt$$

กำหนดให้

T	คือ ค่าช่วงเวลา (s)
k	คือ เลขจำนวนเต็ม
τ	คือ ค่าชั่วขณะเมื่อเครื่องมือวัดเริ่มทำงาน

$$\|P = VI \cos \theta \quad (2-56)$$

2.5.1.3 ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power: var)

ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน Q คือ ค่าขนาดของการแกว่งของกำลังไฟฟ้าชั่วขณะ P_q

$$Q = \frac{1}{2\pi} \oint v di = \frac{-1}{2\pi} \oint i dv = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v \frac{di}{dt} dt = \frac{-1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i \frac{dv}{dt} dt = \frac{-\omega}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v [i dt] dt$$

$$\|Q = \frac{\omega}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i \left[\int v dt \right] dt$$

$$Q = VI \sin \theta \quad (2-57)$$

หมายเหตุ – ถ้าโหลดเป็นชนิดค่าความเหนี่ยวนำ แล้วค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนมีค่ามากกว่าศูนย์ ($Q > 0$)
ถ้าโหลดเป็นชนิดค่าตัวเก็บประจุ แล้วค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนจะมีค่าน้อยกว่าศูนย์ ($Q < 0$)

2.5.1.4 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent power: VA)

ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ S คือ ค่าผลคูณของค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของแรงดันและกระแสไฟฟ้า

$$\|S = VI$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2-58)$$

หมายเหตุ - ค่ากำลังไฟฟ้าชั่วขณะจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามการกระเพื่อมของรูปคลื่นไซน์ ซึ่งมีความถี่เท่ากับ $\omega = 2\pi f$ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่ากำลังไฟฟ้าจริงขนาดของการกระเพื่อมของรูปคลื่นไซน์จะเป็นไปตามค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ

2.5.1.5 ค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor)

$$\|P_F = \frac{P}{S} \quad (2-59)$$

2.5.1.6 ค่ากำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน (Complex power: VA)

$$S = VI^* = P + jQ \quad (2-60)$$

กำหนดให้

$V = V\angle 0^\circ$ คือ ค่ามมเฟสของแรงดันไฟฟ้า

$I^* = I\angle \theta$ คือ ค่าสังยุคของมมเฟสกระแสไฟฟ้า

ซึ่งจากความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อน กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้าปรากฏ สามารถเขียนความสัมพันธ์ดังกล่าวให้อยู่ในรูปของสามเหลี่ยมกำลังและจะใช้ในการศึกษาเรื่องการไหลของกำลังไฟฟ้า

2.5.2. ระบบไฟฟ้าชนิด 1 เฟส ในสถานะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

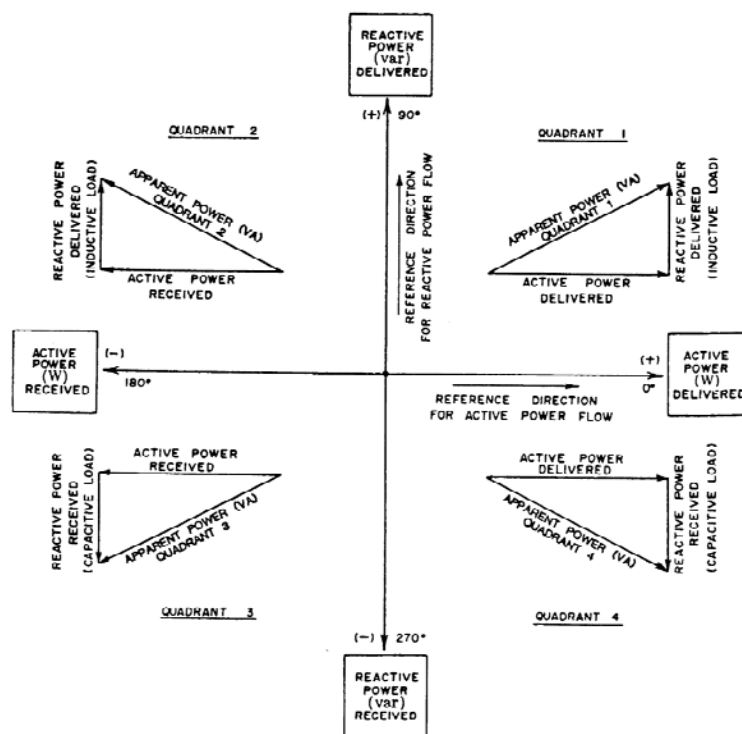
สำหรับในสถานะคงตัวค่าชั่วขณะของแรงดันและกระแสไฟฟ้าในสถานะที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ จะมียอดค่าประกอบเฉพาะอยู่ด้วยกัน 2 ส่วน คือ เทอมของค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่มีความถี่มูลฐาน (v_1, i_1) และเทอมที่เหลืออยู่คือส่วนของค่าฮาร์โมนิกของแรงดันและกระแสไฟฟ้า (v_H, i_H) ซึ่งจะประกอบด้วยฮาร์โมนิกลำดับต่าง ๆ ทั้งที่เป็นจำนวนเต็มและไม่ใช้จำนวนเต็ม

$$v_1 = \sqrt{2}V_1 \sin(\omega t - \alpha_1) \tag{2-61}$$

$$i_1 = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - \beta_1) \tag{2-62}$$

$$v_H = \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} V_h \sin(h\omega t - \alpha_h) \tag{2-63}$$

$$i_H = \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} I_h \sin(h\omega t - \beta_h) \tag{2-64}$$



ภาพประกอบ 2-20 ไคอะแกรมเฟสเซอร์สำหรับการพิจารณาการเคลื่อนที่ของกำลังไฟฟ้า [3]

ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพผลจะมีค่าเหมือนกัน ดังนี้

$$V^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v^2 dt = V_1^2 + V_H^2 \quad (2-65)$$

$$I^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i^2 dt = I_1^2 + I_H^2 \quad (2-66)$$

เมื่อ

$$V_H^2 = \sum_{h \neq 1} V_h^2 = V^2 - V_1^2 \quad \parallel \quad (2-67)$$

$$I_H^2 = \sum_{h \neq 1} I_h^2 = I^2 - I_1^2 \quad \parallel \quad (2-68)$$

หมายเหตุ – เทอมของกระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V_0 และ I_0) จะมีค่าฮาร์มอนิกเท่ากับศูนย์ ($h = 0$) เป็นส่วนหนึ่งของกระแสและแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิก (V_H และ I_H) ค่านี้มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับค่า $\alpha_0 = \beta_0 = -45^\circ$; $(\sin(-\alpha_0) = \sin(-\beta_0) = \sin 45^\circ = 1/\sqrt{2})$ ส่วนประกอบของไฟฟ้ากระแสตรงมีความสำคัญและจะเห็นไม่บ่อยในกรณีที่เป็นระบบไฟฟ้าแบบกระแสสลับ อย่างไรก็ตามองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรงจะพบเห็นได้น้อย

2.5.2.1 ค่าความผิดเพี้ยนรวม (Total harmonic distortion: THD)

ค่าความผิดเพี้ยนรวมเป็นค่าหนึ่งที่ใช้ในการบอกปริมาณความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น ผลรวมความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า จะมีค่าตามสมการ ดังนี้

$$\parallel THD_v = \frac{V_H}{V_1} = \sqrt{\left(\frac{V}{V_1}\right)^2 - 1} \quad (2-69)$$

ผลรวมความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้า จะมีค่าตามสมการ ดังนี้

$$\parallel THD_i = \frac{I_H}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (2-70)$$

2.5.2.2 ค่ากำลังไฟฟ้าชั่วขณะ (Instantaneous power: W)

$$p = vi$$

$$p = p_a + p_q$$

เมื่อ

$$p_{a1} = \sum_h V_h I_h \cos \theta_h [1 - \cos(2h\omega t)] \quad (2-71)$$

ส่วนประกอบทั้งหมดของเทอมนี้จะมีค่าเฉลี่ยไม่เป็นศูนย์ และ

$$p_{q1} = \sum_h V_h I_h \sin \theta_h \sin(2h\omega t) + \sum_{\substack{m \neq n \\ m, n \neq 1}} 2V_m I_n \sin(m\omega t + \alpha_m) \sin(n\omega t + \beta_n) \quad (2-72)$$

ในเทอมนี้จะเป็นที่มาในการส่งผ่านพลังงานสุทธิ ซึ่งค่าเฉลี่ยของเทอมนี้จะมีค่าเป็นศูนย์ ค่าของมุม $\theta_h = \beta_h - \alpha_h$ จะมีค่าเป็นมุมต่างเฟสของแรงดันและกระแสที่ความถี่ฮาร์โมนิก (V_h และ I_h)

2.5.2.3 ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (Active power: W)

$$\|P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p dt$$

$$P = P_1 + P_H \quad (2-73)$$

2.5.2.4 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ความถี่มูลฐานหรือ 50 Hz (Fundamental active power: W)

$$\|P_1 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v_1 i_1 dt = V_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (2-74)$$

2.5.2.5 ค่าฮาร์มอนิกของกำลังไฟฟ้าจริง (Harmonic active power: W)

$$P_H = \sum_{h \neq 1} V_h I_h \cos \theta_h = P - P_1 \quad (2-75)$$

หมายเหตุ – สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งเป็นโหลดส่วนใหญ่ของระบบไฟฟ้า ค่าฮาร์มอนิกของกำลังไฟฟ้าจริง จะเป็นกำลังไฟฟ้าที่ไม่มีผลใด ๆ ดังนั้น จะใช้ค่าฮาร์มอนิกของกำลังไฟฟ้าจริง ในการแยกค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ความถี่มูลฐาน (P_1) ออกจากค่าฮาร์มอนิกของกำลังไฟฟ้า (P_H)

2.5.2.6 ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่ความถี่มูลฐาน (Fundamental reactive power: var)

$$\|Q_1 = \frac{\omega_1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i_1 [\int v_1 dt] dt = V_1 I_1 \sin \theta_1 \quad (2-76)$$

2.5.2.7 ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนบูเดานู (Budeanu's reactive power: var)

$$Q_B = \sum_h V_h I_h \sin \theta_h = Q_1 + Q_{BH} \quad (2-77)$$

เมื่อ

$$Q_{BH} = \sum_{h \neq 1} V_h I_h \sin \theta_h \quad (2-78)$$

หมายเหตุ – ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนบูเดานู ใช้ในการบอกปริมาณอัตราการใช้ของค่าฮาร์มอนิกของกำลังไฟฟ้าเสมือน และได้พิสูจน์จากการวัดว่ารูปแบบของค่าฮาร์มอนิกของกำลังไฟฟ้าเสมือนมีค่าน้อยกว่าศูนย์ ($Q_{BH} < 0$) ดังนั้นจะมีผลทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนบูเดานูจะมีค่าน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่ความถี่มูลฐาน ($Q_B < Q_1$) เช่นกัน

2.5.2.8 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent power: VA)

$$\|S = V I$$

หมายเหตุ – คุณสมบัติที่สำคัญของกำลังไฟฟ้าปรากฏ จะใช้ในการบ่งบอกค่ากำลังสูญเสีย (Power loss; ΔP) ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกำลังสองของกำลังไฟฟ้าปรากฏ

$$\Delta P = \frac{r_e}{V^2} S^2 + \frac{V^2}{R} \quad (2-79)$$

เมื่อ

R คือ ค่าความต้านทานสมมูล จะใช้อธิบายค่าสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงและค่าสูญเสียของฉนวนของสายเคเบิล

r_e คือ ผลของค่าความต้านทานตามทฤษฎีเทวินิน ดังนั้น r_e จะพิจารณาจากค่าความสูญเสียสมมูล ซึ่งเป็นไปตามสมการ ดังนี้

$$r_e I^2 = r_{dc} \sum_h K_{sh} I_h^2 \quad (2-80)$$

เมื่อ

K_{sh} คือ ผลของสัมประสิทธิ์พื้นที่ผิวของตัวนำสำหรับฮาร์มอนิก

r_{dc} คือ ค่าความต้านทานเทวินินที่สภาวะไฟฟ้ากระแสตรง

2.5.2.9 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่ความถี่มูลฐาน (Fundamental apparent power:

VA)

หลักการเบื้องต้นของกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ความถี่มูลฐานและองค์ประกอบของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ความถี่มูลฐาน นั้น จะเป็นปริมาณที่แท้จริงที่ช่วยในการกำหนดหรือนิยามอัตราส่วนของความสัมพันธ์ในการเคลื่อนที่พลังงานสนามแม่เหล็กของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน

$$\|S_1 = V_1 I_1 \quad (2-81)$$

$$S_1^2 = P_1^2 + Q_1^2 \quad (2-82)$$

2.5.2.10 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไม่ใช้ความถี่มูลฐาน (Nonfundamental apparent power: VA)

การพิจารณาค่าประสิทธิผลของกระแสและแรงดันไฟฟ้าในกรณีที่เป็นความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์โมนิกต้องพิจารณาเป็นส่วน ๆ ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏสามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$S^2 = (VI)^2 = (V_1^2 + V_H^2)(I_1^2 + I_H^2) = (V_1I_1)^2 + (V_1I_H)^2 + (V_HI_1)^2 + (V_HI_H)^2 = (S_1^2 + S_1^2)$$

$$S_N = \sqrt{S^2 - S_1^2} \quad (2-83)$$

กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไม่ใช้ความถี่มูลฐานสามารถเขียนเป็นสมการใหม่ได้โดยประกอบด้วยเทอมใหม่ทั้งสามเทอมได้ ดังนี้

$$S_N^2 = D_1^2 + D_v^2 + S_H^2 \quad (2-84)$$

2.5.2.11 ค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่เกิดจากกระแส (Current distortion power: var)

$$D_I = V_1I_H = S_1(THD_I) \quad (2-85)$$

2.5.2.12 ค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่เกิดจากแรงดัน (Voltage distortion power: var)

$$D_V = V_HI_1 = S_1(THD_V) \quad (2-86)$$

2.5.2.13 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่ความถี่ฮาร์โมนิก (Harmonic apparent power: VA)

$$S_H = V_HI_H = S_1(THD_I)(THD_V)$$

$$S_H = \sqrt{P_H^2 + D_H^2} \quad (2-87)$$

2.5.2.14 ค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนจากฮาร์โมนิก (Harmonic distortion power: var)

var)

$$D_H = \sqrt{S_H^2 - P_H^2} \quad (2-88)$$

หมายเหตุ - ในทางปฏิบัติระบบไฟฟ้ากำลัง ผลรวมความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าน้อยกว่าผลรวมความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้า ($THD_V < THD_I$) และค่ากำลังไฟฟ้าที่ไม่ใช้ความถี่มูลฐานจะมีค่าตามสมการ ดังนี้

$$S_N \approx S_1 \sqrt{(THD_I)^2 + (THD_V)^2} \quad (2-89)$$

เมื่อ ผลรวมความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับห้าเปอร์เซ็นต์ ($THD_V \leq 5\%$) และผลรวมความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับสองร้อยเปอร์เซ็นต์ ($THD_I \leq 200\%$) จะทำให้เกิดความผิดพลาดมากกว่า 0.15 %

สำหรับ ผลรวมความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าน้อยกว่าห้าเปอร์เซ็นต์ ($THD_V < 5\%$) และผลรวมความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณกระแสไฟฟ้ามีค่ามากกว่าสี่สิบเปอร์เซ็นต์ ($THD_I > 40\%$) แล้วจะทำให้เกิดความผิดพลาดมากกว่า 0.15 % จะทำให้เกิดความผิดพลาดมากกว่า 1.00 % ซึ่งการพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไม่ใช้ความถี่มูลฐานจะมีค่าตามสมการ ดังนี้

$$S_N \approx S_1(THD_I) \quad (2-90)$$

2.5.2.15 ค่ากำลังไฟฟ้าไม่เสมือน (Nonactive power: var)

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2-91)$$

ค่ากำลังไฟฟ้าไม่จริงนี้จะเกิดจากการรวมกันระหว่างองค์ประกอบของค่ากำลังไฟฟ้าไม่จริงทั้งที่ความถี่มูลฐานและไม่ใช้ความถี่มูลฐาน ซึ่งที่ผ่านมามักจะเรียกกำลังไฟฟ้าชนิดนี้ว่า “กำลังไฟฟ้าไม่จริง (Fictitious power)”

2.5.2.16 ค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนเบรุต (Budeanu's distortion power: var)

ค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนเบรุตนั้นมาจากการพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏโดยใช้กำลังไฟฟ้าจริงเบรุต ซึ่งผลในการพิจารณาจะมีค่าตามสมการ ดังนี้

$$S_2 = P_2 + Q_B^2 + D_B^2 \quad (2-92)$$

เมื่อ

$$D_B = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_B^2} \quad (2-93)$$

หมายเหตุ – ค่าความผิดเพี้ยนของระบบที่เกิดขึ้น เกิดจากการค่ากำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยนเบรุต

2.5.2.17 ค่าตัวประกอบกำลังที่ความถี่มูลฐาน (Fundamental power factor)

$$P_{F1} = \cos \theta_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (2-94)$$

อัตราส่วนนี้จะช่วยในการแยกและการประมาณการเคลื่อนที่ของกำลังไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน ซึ่งจะเรียกว่า ค่าตัวประกอบกำลังที่ความถี่มูลฐาน หรือบางครั้งอาจถูกให้คำจำกัดความว่า ค่าตัวประกอบกำลังมูลฐาน (Displacement power factor)

2.5.2.18 ค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor)

$$P_F = \frac{P}{S} \quad (2-95)$$

$$P_F = \frac{P}{S} = \frac{P_1 + P_H}{\sqrt{S_1^2 + S_N^2}} = \frac{(P_1 / S_1)[1 + (P_H / P_1)]}{\sqrt{1 + (S_N / S_1)^2}} = \frac{[1 + (P_H / P_1)]P_{F1}}{\sqrt{1 + THD_I^2 + THD_V^2 + (THD_I THD_V)^2}}$$

หมายเหตุ

1- ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ จะพิจารณาในรูปค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าจริง ที่ถูกส่งผ่านไปยังโหลดทางไฟฟ้า ถึงแม้ว่าจะรักษาแรงดันที่โหลดให้มีค่าคงที่และค่าสูญเสียในสายไลน์มีค่าคงที่ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะนำมาพิจารณาค่าแรงดันและค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ ดังนั้น อัตราส่วนของ P/S จะเป็นตัวบอกระสิทธิภาพของระบบ

2- ระดับความเข้มข้นของฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้น โดยโหลดที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นที่มีขนาดใหญ่หรือจากกลุ่มของโหลด หรือจากผู้ใช้ไฟฟ้า สามารถประมาณค่าได้จากอัตราส่วนของค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไม่ใช้ความถี่มูลฐานต่อค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่ความถี่มูลฐาน (S_N/S_1) ประสิทธิภาพของตัวกรองฮาร์โมนิกสามารถพิจารณาได้จากการวัดค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่ความถี่มูลฐาน กำลังไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน ค่าตัวประกอบกำลังที่ความถี่มูลฐาน และค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่ความถี่มูลฐาน ซึ่งจะช่วยให้เห็นลักษณะเฉพาะของการเคลื่อนที่ของกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

3- ในความเป็นจริงแล้วค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ความถี่ฮาร์โมนิกมีค่าน้อยกว่าค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ความถี่มูลฐานมาก ๆ ซึ่งเป็นการยากที่จะทำการวัดค่าส่วนประกอบกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์โมนิกในย่านความถี่สูง ๆ ให้เกิดความถูกต้องด้วยอุปกรณ์และเครื่องมือวัดโดยทั่วไป ดังนั้น จะขึ้นอยู่กับ การพิจารณาการวัดค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ความถี่ฮาร์โมนิก ถึงแม้ว่า จะกำหนดวิธีการเกี่ยวกับการกำหนดรูปแบบของการชดเชยฮาร์โมนิกแล้วก็ตาม พิกัดของพลังงาน หรือปริมาณของความเสียหายที่เกิดจากผลกระทบของโหลดไม่เชิงเส้นหรือองค์ประกอบของโหลด จะทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดความผิดปกติไป

4- เมื่อผลรวมความผิดปกติของรูปคลื่นแรงดันมีค่าน้อยกว่า 5 % และผลรวมความผิดปกติของรูปคลื่นกระแสมีค่ามากกว่า 40 % จะได้รูปแบบสมการ ดังนี้

$$P_F \approx \frac{1}{\sqrt{1 + THD_1^2}} P_{F1}$$

5- ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นของระบบที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์มีค่า ดังนี้ $D_I > D_V > S_H > P_H$

ซึ่งสามารถทำกรณินิยามได้ตามหัวข้อที่ 2.5.1.2.8 ถึง 2.5.1.2.17 และสามารถสรุปค่ากำลังไฟฟ้าลักษณะต่าง ๆ ได้ตามตาราง 2-1

ตารางที่ 2-1 Summary and grouping of the quantities in single-phase systems with nonsinusoidal waveforms [3]

Quantity or indicator	Combined	60 Hz powers (fundamental)	Non-60 Hz powers (nonfundamental)
Apparent	S (VA)	S_I (VA)	S_N (VA) S_H (VA)
Active	P (W)	P_I (W)	P_H (W)
Nonactive	N (var)	Q_I (var)	D_I D_V D_H (var)
Line utilization	$P_F = P/S$	$P_{FI} = P_I/S_I$	—
Harmonic pollution	—	—	S_N/S_I

2.6 การใช้งานการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็วในการวัดและวิเคราะห์สัญญาณบนโปรแกรม LabVIEW และ LabWindows

การแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform; FFT) และเพาเวอร์สเปกตรัมในโปรแกรม LabVIEW และ LabWindows ถือเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์และวัดสัญญาณจากบอร์ดรับข้อมูล (DAQ boards) เช่น สามารถหาผลลัพธ์ของสัญญาณในรูปแบบโดเมนเวลา การวัดองค์ประกอบความถี่ ทำการแปลงผลการวัดไปเป็นปริมาณที่แท้จริง และแสดงจุดที่มีค่าสูงที่สุดของแถบกำลังงานรวมถึงการวิเคราะห์เครือข่าย โดยการใช้บอร์ดรับข้อมูลสามารถสร้างระบบการวัดค่าที่มีค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่า เพื่อหลีกเลี่ยงการทำงานในการติดต่อสื่อสารกับเครื่องมือเพียงชิ้นเดียว รวมไปถึงต้องมีความยืดหยุ่นในการกำหนดกระบวนการและวิธีการวัดตามที่คุณต้องการ

อย่างไรก็ตามการใช้งานการวัดค่าสัญญาณด้วยพื้นฐานของ FFT ต้องมีความเข้าใจระเบียบวิธีการตามเอกสารการใช้งาน FFT ในการวัดและวิเคราะห์สัญญาณบนโปรแกรม LabVIEW และ LabWindows และการคำนวณที่มีความเกี่ยวข้องจากทฤษฎีที่ผ่านมา ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ของการวัดและวิเคราะห์สัญญาณบนโปรแกรม LabVIEW และ LabWindows นี้จะอธิบายการพื้นฐานการวิเคราะห์และคำนวณค่าต่าง ๆ ของสัญญาณ เช่น การป้องกันการเกิดแอลลีแอส (Antialiasing) การพัฒนารูปแบบการแสดงผลสำหรับการวิเคราะห์สัญญาณด้วยพื้นฐาน FFT

อธิบายการใช้งานโปรแกรมบนส่วนแสดงผล (Windows) ที่ถูกต้อง อธิบายวิธีการคำนวณแถบกำลังงาน และแสดงฟังก์ชันการใช้งาน FFT สำหรับวัดค่าในระบบ

หน้าที่พื้นฐานของโปรแกรม LabVIEW และ LabWindows ในการวิเคราะห์สัญญาณ โดยวิธีการของ FFT คือ การหาแถบกำลังงานและติดตามตรวจสอบแถบกำลังงาน การใช้งานฟังก์ชันเหล่านี้สามารถสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการวัดได้ เช่น การหาทรานซ์เฟอ์ฟังก์ชัน ผลตอบสนองชั่วขณะ ช่วงกว้างของสัญญาณ ขนาดของแถบสัญญาณ และการหามุมเฟสของแถบสัญญาณ

FFT และแถบกำลังงานจะมีประโยชน์สำหรับการวัดค่าองค์ประกอบความถี่ของสัญญาณที่คงที่และสัญญาณที่เกิดขึ้นชั่วขณะ เครื่องมือ FFT ที่สร้างขึ้นจะทำการเฉลี่ยองค์ประกอบความถี่ของสัญญาณตลอดช่วงสัญญาณที่ได้มาจากการวัด ด้วยเหตุผลนี้จึงใช้ FFT ในการวิเคราะห์สัญญาณที่คงที่หรือหากต้องการวัดค่ากำลังเฉลี่ยในแต่ละแถบสัญญาณ สำหรับการวัดค่าความถี่จะเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลา ซึ่งอาจใช้ฟังก์ชันของความถี่และเวลาของสัญญาณ เช่น Gabor Spectrogram ซึ่งจะปรากฏอยู่ภายในเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับการวัดค่าความถี่ในแต่ละช่วงเวลาของโปรแกรม LabVIEW ซึ่งรายละเอียดดังกล่าวสามารถทำการอธิบายปัญหาที่เกิดจากการใช้วิธีการ FFT ในการวัด เช่น ลักษณะของการแสดงผลค่าสัญญาณที่ได้จากการวัด ความสำคัญของการใช้หน้าต่าง (Windows) แสดงผล ผลกระทบของการใช้หน้าต่างแสดงผลบนเครื่องมือวัด และการตรวจวัดสัญญาณรบกวน (Noise) ระหว่างองค์ประกอบความถี่ที่ไม่ต่อเนื่องของสัญญาณ

2.6.1 ความรู้พื้นฐานการประมวลผลและวิเคราะห์สัญญาณ

พื้นฐานในการคำนวณและการวิเคราะห์สัญญาณจะประกอบไปด้วยการแปลงสัญญาณแถบกำลังงานแถบคู่ไปเป็นสัญญาณแถบกำลังงานแบบแถบเดี่ยว ปรับปรุงและแก้ปัญหาเรื่องความถี่และรูปกราฟแถบสัญญาณ การใช้งานฟาสฟูริเยร์ทรานส์ฟอร์มและการแปลงขนาดและกำลังรวมถึงการแปลงหน่วยทางคณิตศาสตร์

สำหรับการแสดงค่าแถบกำลังงานในโปรแกรม LabVIEW และ LabWindows จะมีลักษณะการแปลงข้อมูลจำกัดเป็นอาร์เรย์แถบคู่ ของสัญญาณในโดเมนเวลา ค่าในอาร์เรย์จะเป็นขนาดของแต่ละองค์ประกอบความถี่ซึ่งอยู่ในรูปแบบโดเมนเวลา จุดของแถบกำลังงานแบบแถบคู่จะแสดงองค์ประกอบความถี่ทั้งทางด้านบวกและลบในรูปแบบความสูงของสัญญาณซึ่งแสดงตามสมการ (2-96)

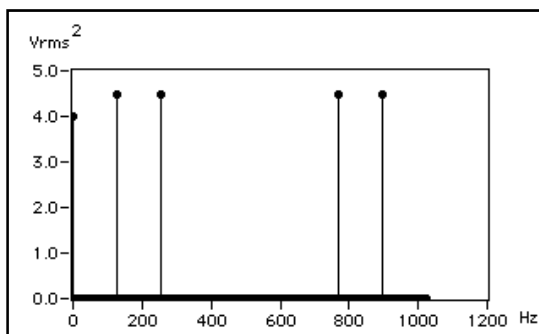
$$\frac{A_k^2}{4} \quad (2-96)$$

เมื่อ

A_k คือ ค่าสูงสุดรูปคลื่น ไซน์ที่องค์ประกอบที่ความถี่ k

A_0 คือ ค่าขนาดขององค์ประกอบรูปคลื่น ไฟฟ้ากระแสตรง

ดังภาพประกอบ 2-21 แสดงผลของแถบกำลังงานในรูปแบบโดเมนเวลา ที่ประกอบด้วยแรงดันรูปคลื่น ไซน์ที่ $3 V_{\text{rms}}$ ที่ความถี่ 128 Hz ที่แรงดันรูปคลื่น ไซน์ที่ $3 V_{\text{rms}}$ ที่ความถี่ 256 Hz และที่องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรงที่ $2 V_{\text{DC}}$ ที่ค่าแรงดันรูปคลื่น ไซน์ที่ $3 V_{\text{rms}}$ มีค่าสูงสุดอยู่ที่ $3 \cdot \sqrt{2}$ หรือมีค่าโดยประมาณ 4.2426 V ค่าแถบกำลังไฟฟ้านั้นสามารถคำนวณได้ด้วยฟังก์ชันพื้นฐานของฟาสฟูรีเยร์ทรานส์ฟอร์ม



ภาพประกอบ 2-21 รูปคลื่นสัญญาณแถบกำลังไฟฟ้าชนิดแถบคู่ [10]

2.6.2 การแปลงค่าแถบกำลังไฟฟ้าชนิดแถบคู่ เป็นแถบกำลังไฟฟ้าแถบเดี่ยว

โดยส่วนใหญ่แล้วเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และวัดค่าความถี่จะแสดงเฉพาะแถบความถี่ที่อยู่ในครึ่งบวกเท่านั้น เพราะว่าแถบความถี่ของสัญญาณทั่วไปจะมีลักษณะสมมาตรใกล้เคียงกับไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นข้อมูลที่เป็นความถี่ในทางด้านลบจะเกิดขึ้นซ้ำ ๆ กันและมีจำนวนมากเกินไป ผลในการวิเคราะห์ค่าแถบพลังงานชนิดแถบคู่ จะใช้ฟังก์ชันภายในโปรแกรม LabVIEW และ LabWindows ซึ่งประกอบไปด้วยแถบกำลังงานครึ่งบวกและตามมาด้วยแถบกำลังงานครึ่งลบดังภาพประกอบ 2-22

ในแถบกำลังงานชนิดแถบคู่ ในแต่ละความถี่จะมีค่ามากกว่ากระแสตรง ครึ่งหนึ่งของพลังงานจะแสดงค่าความถี่ที่เป็นบวกและอีกครึ่งหนึ่งจะแสดงค่าความถี่ที่เป็นลบ เพราะฉะนั้น

การแปลงแอมป์กำลังงานคู่ไปเป็นแอมป์พลังงานเดี่ยวนั้นจำนวนจุดของความถี่ในทุก ๆ ครั้งนำที่การคูณของอาร์เรย์จะถูกตัดทิ้งไปยกเว้นในส่วนขององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสมการ (2-98) แสดงให้เห็นว่า N คือ จำนวนจุดที่มีค่าเป็นเลขคู่

$$G_{AA}(i) = S_{AA}(i), \quad i = 0 \text{ (DC)} \quad (2-97)$$

$$G_{AA}(i) = 2 \cdot S_{AA}(i), \quad i = 1 \text{ to } \frac{N}{2} - 1 \quad (2-98)$$

เมื่อ

$S_{AA}(i)$ คือ ค่าแอมป์กำลังงานชนิดแอมป์คู่

$G_{AA}(i)$ คือ ค่าแอมป์กำลังงานชนิดแอมป์เดี่ยว

N คือ ความยาวของแอมป์กำลังงานชนิดแอมป์คู่ ส่วนที่เหลืออยู่ของแอมป์กำลังงานชนิดแอมป์คู่ S_{AA}

$\left(\frac{N}{2} \text{ through } N-1\right)$ ซึ่งสามารถละเลยได้

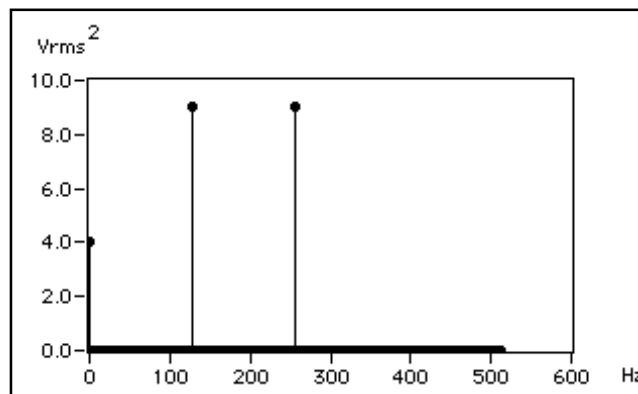
ค่าที่ไม่ใช่ขององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรงในแอมป์กำลังงานชนิดเดี่ยวขึ้นอยู่กับ

$$\frac{A_k^2}{4} \text{ หรือเท่ากับ } \left(\frac{A_k}{\sqrt{2}}\right)^2$$

เมื่อ

$\frac{A_k}{\sqrt{2}}$ คือ ปริมาณค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพ (RMS) ที่องค์ประกอบสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ k

ดังนั้น จำนวนของแอมป์กำลังงานไฟฟ้าจะแปรตามกำลังสองของค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพ ที่ปริมาณนี้คือค่าจำนวนของสัญญาณในโดเมนเวลา ยกตัวอย่างเช่น แอมป์กำลังงานไฟฟ้าชนิดแอมป์คู่ของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าอยู่ในรูปแบบกำลังสองของค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพ จากภาพประกอบ 2-22 แสดงแอมป์พลังงานชนิดแอมป์เดี่ยวของสัญญาณที่ทำการแปลงมาจากแอมป์กำลังงานชนิดแอมป์คู่ที่ ดังภาพประกอบ 2-21



ภาพประกอบ 2-22 รูปคลื่นสัญญาณแอมป์กำลังไฟฟ้าชนิดแอมป์เดี่ยวที่แปลงมาจากแอมป์กำลังไฟฟ้าชนิดแอมป์คู่ [10]

จะเห็นได้ว่า ระดับของความถี่ที่องค์ประกอบที่ไม่ใช้กระแสตรงจะมีลักษณะเป็นแอมป์กำลังงานชนิดคู่เมื่อทำการเปรียบเทียบจากภาพประกอบ 2-21 และจะมีลักษณะความถี่สูงสุดแค่ครึ่งหนึ่งของค่าความถี่ทั้งหมด ภาพประกอบ 2-21

2.6.3 การปรับปรุงคุณสมบัติของค่าความถี่และรูปกราฟแอมป์กำลังไฟฟ้า

จากภาพประกอบ 2-21 และ 2-22 แสดงรูปสัญญาณแอมป์กำลังในรูปแบบโดเมนเวลา ย่านความถี่สัญญาณจะแสดงบนแกน x ของรูปกราฟ ซึ่งจำนวนจุดบนกราฟแอมป์กำลังไฟฟ้าขึ้นอยู่กับอัตราการสุ่มตัวอย่างและจำนวนจุดที่ได้มา จำนวนของจุดความถี่หรือเส้นกราฟความถี่ ดังภาพประกอบ 2-22 มีค่าเท่ากับ

$$\frac{N}{2}$$

เมื่อ N คือ จำนวนจุดที่ได้มาจากสัญญาณรูปแบบ โดเมนเวลา ซึ่งความถี่เริ่มต้นจะมีค่าอยู่ที่ 0 Hz นั้นคือค่าองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรงและค่าความถี่สุดท้ายจะมีค่าเท่ากับ

$$\frac{F_s}{2} - \frac{F_s}{N}$$

เมื่อ F_s คือ ค่าความถี่สุ่มที่ได้จากสัญญาณรูปแบบโดเมนเวลา ซึ่งจะเกิดความถี่ในช่วงเวลา Δf มีค่า ดังสมการ (2-99)

$$\Delta f = \frac{F_s}{N} \quad (2-99)$$

หรือสามารถคำนวณเพื่อหาค่า Δf ได้ตามสมการ (2-100)

$$\Delta f = \frac{1}{N \cdot \Delta t} \quad (2-100)$$

เมื่อ Δt คือ อัตราการสุ่มตัวอย่าง ดังนั้น $N \cdot \Delta t$ คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการบันทึกค่าสัญญาณในรูปโดเมนเวลาที่วัดได้ ซึ่งสัญญาณดังกล่าวประกอบ 2-21 และ 2-22 มีจำนวนตัวอย่างที่ 1,024 จุด อัตราการสุ่มสัญญาณที่ 1.024 kHz ระยะเวลาของ $\Delta f = 1$ kHz และย่านความถี่ขององค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าเท่ากับ 511 Hz

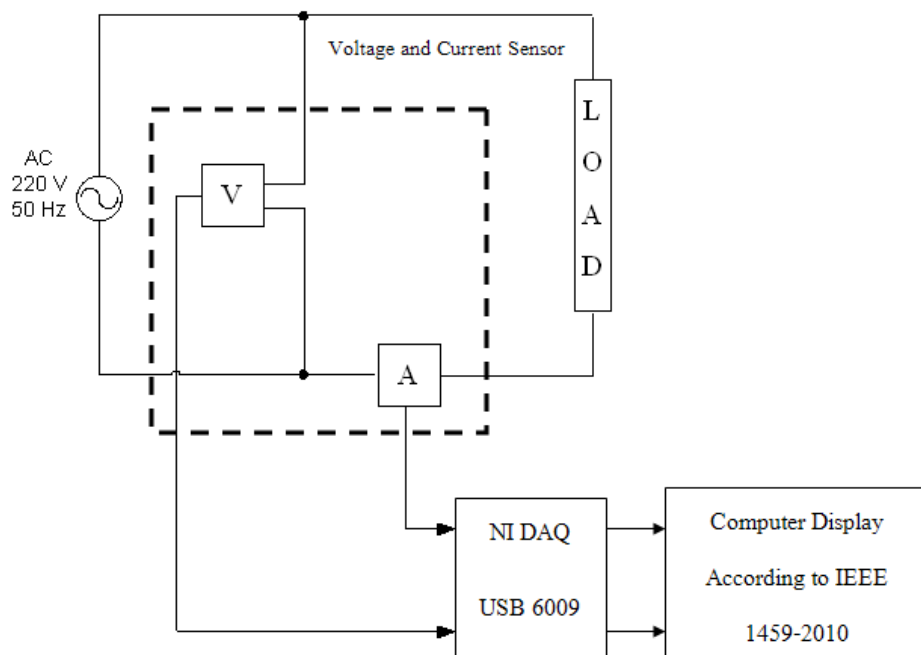
สำหรับการคำนวณแบนความถี่ต้องมีการพิสูจน์ค่าอัตราการสุ่มตัวอย่างต้องมีการกำหนดค่าย่านความถี่หรือความกว้างของแถบกำลังงานและเลือกอัตราการสุ่มตัวอย่างที่เหมาะสม จำนวนจุดของสัญญาณในรูปแบบของโดเมนเวลาจะต้องมีการกำหนดค่าที่แน่นอน การเพิ่มขึ้นของความถี่เพื่อใช้สำหรับการแก้ไขในเรื่องของย่านความถี่ การเพิ่มขึ้นของจำนวนจุดที่ค่าอัตราการสุ่มเดียวกัน เช่น จำนวนจุด 2,048 จุด ที่อัตราการสุ่ม 1.024 kHz ทำให้ค่า $\Delta f = 0.5$ Hz สำหรับย่านความถี่อยู่ระหว่าง 0-511.5 Hz ซึ่งหากเลือกค่าอัตราการสุ่มสัญญาณที่ 10.24 kHz ที่จำนวนจุด 1,024 จุด ทำให้ค่า $\Delta f = 10$ Hz และย่านความถี่อยู่ระหว่าง 0-51.1 Hz นั้นเอง

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการพัฒนาเครื่องมือวัดแบบเสมือนสำหรับการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าตาม มาตรฐาน IEEE 1459-2010

ในบทนี้อธิบายถึงขั้นตอนวิธีการดำเนินการวิจัยตั้งแต่การศึกษาและออกแบบเครื่องตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า การออกแบบและจำลองเครื่องมือวัดแบบเสมือนในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010

3.1 การออกแบบและสร้างเครื่องตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า



ภาพประกอบ 3-1 การออกแบบเครื่องตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า

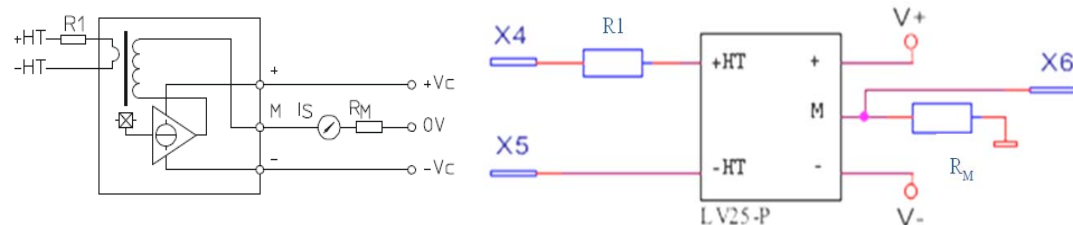
การออกแบบเครื่องตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า จากภาพประกอบ 3-1 จะใช้ทรานซิวเซอร์แรงดัน LV 25-P เป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการวัดค่าสัญญาณแรงดันร่วมกับทรานซิวเซอร์กระแส LA 55-P ที่ใช้ในการวัดค่าสัญญาณกระแสจากโหลดทางไฟฟ้าที่

แรงดันของแหล่งจ่าย 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ ซึ่งสัญญาณจากเครื่องตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า ทั้ง 2 ชนิด จะนำไปทำการประมวลผลสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าโดยการ์ด DAQ USB 6009 ของบริษัท National Instrument แล้วนำสัญญาณดังกล่าว ส่งไปทำการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010

3.1.1 สัญญาณแรงดัน (Voltage signal)

สำหรับการวัดค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้านั้น จะใช้ทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P ซึ่งคุณสมบัติของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแรงดันนี้ สามารถวัดได้ทั้งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง กระแสสลับและสัญญาณพัลส์ สามารถแยกส่วนการวัดระหว่างวงจรภาคแรงดันสูง (Primary circuit หรือ High voltage) ที่ต้องการวัดกับวงจรภาคแรงต่ำ (Secondary circuit หรือ Electronic circuit) ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นอุปกรณ์จำพวกอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความละเอียดอ่อนและต้องการความปลอดภัยสูงเพื่อป้องกันไม่ใช้วงจรเกิดความเสียหาย ลักษณะโครงสร้างทั่วไปและวงจรการต่อใช้งานในการวัดดังภาพประกอบ 3-2

Connection



ภาพประกอบ 3-2 โครงสร้างทั่วไปของทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P

ทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P นั้นจะเป็นทรานสดิวเซอร์แบบ Closed loop หรือ Compensated โดยใช้หลักการของ Hall effect sensor มีพิกัดกระแสด้านเข้า 10 mA กระแสด้านออก 25 mA สำหรับค่ากระแสด้านเข้านั้นสามารถกำหนดเองได้โดยการเลือกค่าความต้านทาน R_1 ตามค่าของแรงดันที่ต้องการวัด ส่วนค่าของแรงดันทางด้านออกนั้นมาจากการวัดค่าแรงดันตกคร่อมที่ค่าความต้านทาน R_M ดังภาพประกอบ 3-2 ส่วนค่าอัตราส่วนการแปลงผัน (Conversion ratio) มีค่าเท่ากับ 2500 : 1000 และแหล่งจ่ายแรงดันที่จ่ายให้กับทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P คือ ± 12 หรือ ± 15 โวลต์ดีซี

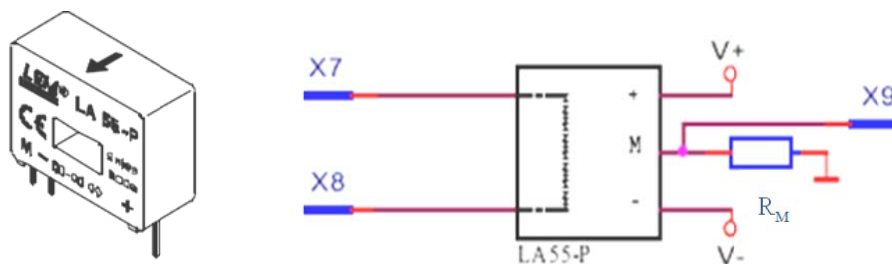
เพราะฉะนั้น สำหรับการเลือกค่าความต้านทาน R1 เพื่อใช้ร่วมกับทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P ต้องมีการพิจารณา ค่าความต้านทาน R1 ที่ต่อกับส่วนขดลวดทางด้านเข้าของทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P เพื่อให้เกิดความถูกต้องในการวัดมากที่สุด ในกรณีที่ค่ากระแสทางด้านเข้ามีค่าน้อยซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ ค่าความต้านทาน R1 สามารถกำหนดจากค่าแรงดันที่ต้องการวัด (V_{PN}) กระแสทางด้านเข้า (I_p) ค่าความถูกต้องเที่ยงตรงที่อุณหภูมิ (T_A) ต่าง ๆ ซึ่งมีการกำหนดตัวอย่างไว้ในเอกสารประกอบของตัวอุปกรณ์ไว้ ดังนี้

ตัวอย่าง : ค่าแรงดันที่ต้องการวัด $V_{PN} = 250$ โวลต์

- ค่าความต้านทาน R1 = 25 กิโลโอห์ม กำลังไฟฟ้า 2.5 วัตต์ กระแสทางด้านเข้า $I_p = 10$ มิลลิแอมป์ ความถูกต้องเที่ยงตรง = $\pm 0.8\%$ ที่ย่านแรงดัน 250 โวลต์ ที่อุณหภูมิ $T_A = +25^\circ\text{C}$
- ค่าความต้านทาน R1 = 50 กิโลโอห์ม ที่กำลังไฟฟ้า 1.25 วัตต์ กระแสทางด้านเข้า $I_p = 5$ มิลลิแอมป์ ความถูกต้องเที่ยงตรง = $\pm 1.6\%$ ที่ย่านแรงดัน 250 โวลต์ ที่อุณหภูมิ $T_A = +25^\circ\text{C}$

3.1.2 สัญญาณกระแส (Current signal)

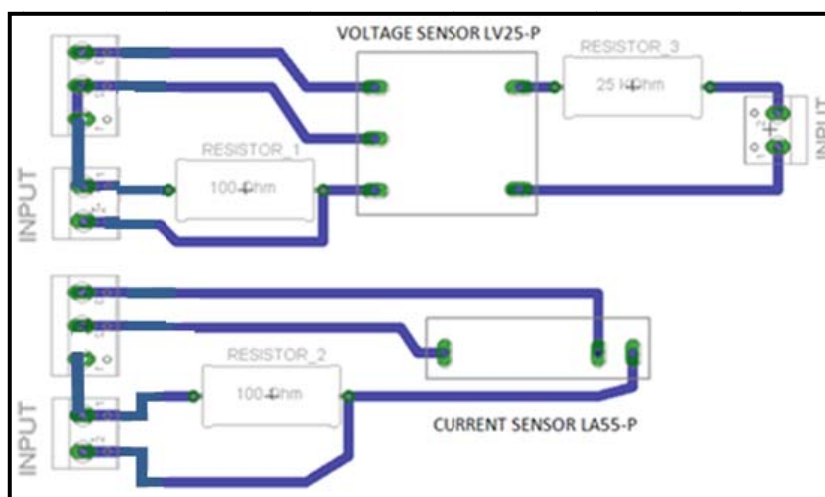
สำหรับการวัดค่าสัญญาณกระแสไฟฟ้านั้น จะใช้ทรานสดิวเซอร์กระแส LA 55-P ซึ่งคุณสมบัติของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแสนี้ สามารถวัดได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรง กระแสสลับและสัญญาณพัลส์ สามารถแยกส่วนการวัดระหว่างวงจรภาคแรงดันสูง (Primary circuit หรือ High voltage) ที่ต้องการวัดกับวงจรภาคแรงต่ำ (Secondary circuit หรือ Electronic circuit) ซึ่งทรานสดิวเซอร์กระแส LA 55-P นั้นจะเป็นทรานสดิวเซอร์แบบ Closed loop หรือ compensated โดยใช้หลักการของ Hall effect sensor ซึ่งทรานสดิวเซอร์กระแส LA 55-P มีความเสถียรและแม่นยำในการวัด มีอัตราส่วนการแปลงผันที่ 1:1000 ส่วนรับค่าสัญญาณของทรานสดิวเซอร์กระแส LA 55-P จะเชื่อมต่ออยู่กับหม้อแปลงกระแส (Current transformer : CT) ซึ่งจะเป็นส่วนหลักที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณทางด้านออก ค่าพิกัดกระแสของหม้อแปลงกระแส เท่ากับ 5 แอมแปร์ ส่วนของค่ากระแสทางด้านออกนั้นต้องแปลงจากค่าของแรงดันที่วัดได้จากค่าความต้านทาน R6 ซึ่งลักษณะโครงสร้างทั่วไปและวงจรการต่อใช้งานในการวัด ดังภาพประกอบ 3-3



ภาพประกอบ 3-3 การต่อใช้งานจริงของทรานดิวเซอร์กระแส LA 55-P

สำหรับทรานดิวเซอร์กระแส LA 55-P มีพิกัดกระแสด้านเข้า 50 A กระแสด้านออก 50 mA ย่านการวัดกระแสไฟฟ้าที่สามารถวัดได้อยู่ในช่วง 0 - ± 70 A ซึ่งในการเลือกค่าความต้านทานที่ใช้ในการประกอบกรวัด R_M ของทรานดิวเซอร์กระแส LA 55-P ขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 อย่าง คือ แหล่งจ่ายแรงดัน สภาวะอุณหภูมิโดยรอบ และย่านการวัดกระแสที่กำหนด ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากข้อมูลต่าง ๆ คู่มือประกอบของเคอเรนท์ทรานดิวเซอร์ LA 55-P

ในส่วนของการออกแบบการเครื่องตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า โดยใช้ทรานดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P และทรานดิวเซอร์กระแส LA 55-P นั้น ได้พิจารณาองค์ประกอบต่าง ๆ ในการวัด เช่น ย่านการวัดค่ากระแสและแรงดัน อุณหภูมิในการวัด ค่าความต้านทานประกอบวงจร และค่าความเที่ยงตรงของอุปกรณ์ ดังนั้นจึงได้สร้างเครื่องตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า ขึ้น ดังภาพประกอบ 3-4

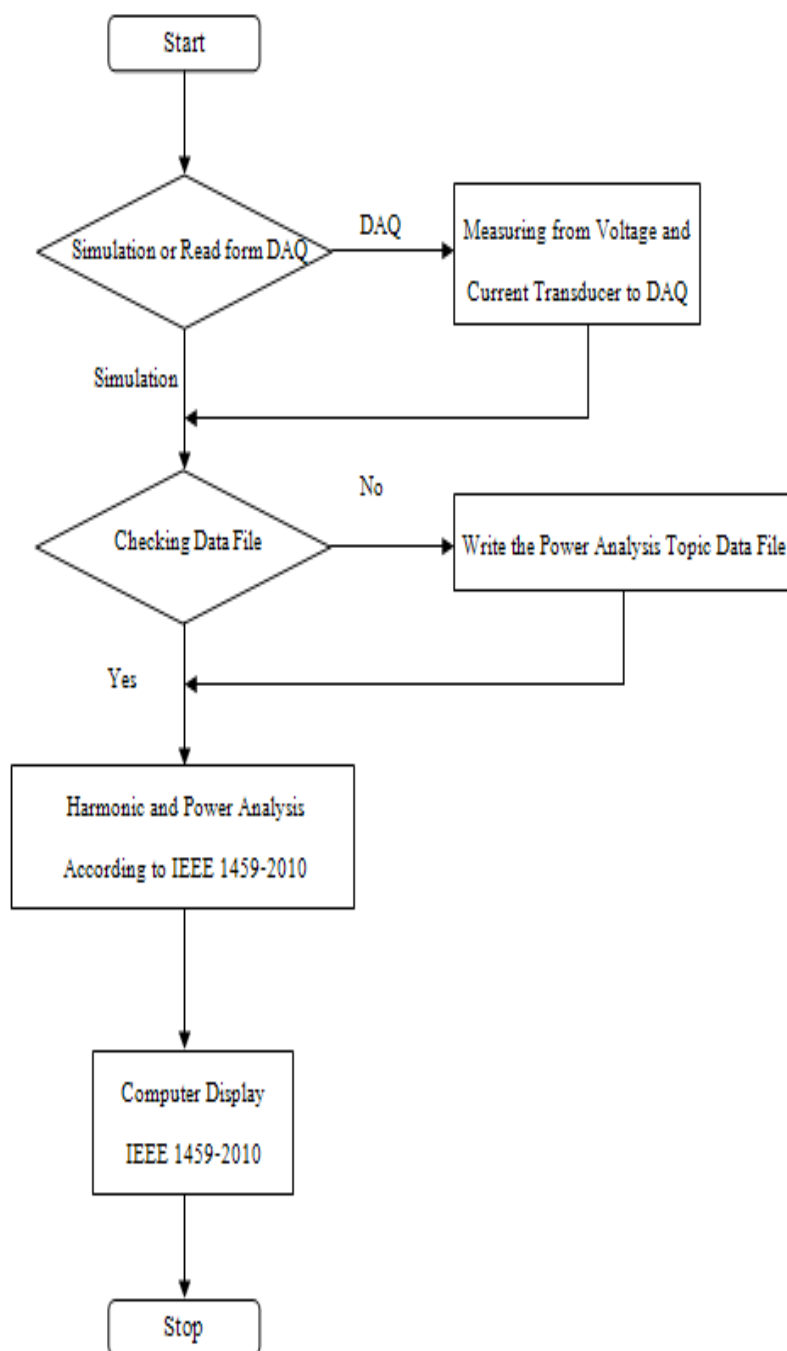


ภาพประกอบ 3-4 การออกแบบเครื่องตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า

3.2 การออกแบบเครื่องมือวัดแบบเสมือนในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010

ในการออกแบบเครื่องมือวัดแบบเสมือนในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 จากบทที่ 2 ได้นำเสนอนิยามการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการออกแบบเครื่องมือวัดแบบเสมือนโดยใช้โปรแกรม LabVIEW ซึ่งสามารถแบ่งการทำงานของโปรแกรมออกเป็น 5 ส่วนประกอบด้วย ส่วนที่ 1 คือ ส่วนการอ่านค่าสัญญาณที่ต้องการวัดจากการ์ดประมวล (NI DAQ USB 6009) และการสร้างสัญญาณทดสอบ ส่วนที่ 2 คือ ส่วนการเก็บฟังก์ชันแสดงผลของโปรแกรม LabVIEW ส่วนที่ 3 คือ ส่วนอ้างอิงที่เชื่อมโยงกับส่วนแสดงผลเพื่อใช้ในการบันทึกค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้ ส่วนที่ 4 คือ ส่วนสมการการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ส่วนที่ 5 คือ ส่วนแสดงผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน

ในการออกแบบจะเป็นไปตามขั้นตอนตามแผนภูมิการทำงาน ดังภาพประกอบ 3-5 โดยที่เริ่มต้นการทำงานของโปรแกรมจะมีส่วนการทำงานในการสร้างสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าจำลองหรือสัญญาณที่วัดได้จริงจากอุปกรณ์ตรวจสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า จากนั้น นำสัญญาณที่ได้จากส่วนที่กำหนด ผ่านไปยังส่วนโปรแกรมการตรวจสอบข้อมูล (Checking Data File) เพื่อทำการพิจารณาข้อมูลเดิมที่อาจมีอยู่ในส่วนบันทึกค่าบนโปรแกรม Microsoft excel เพื่อตรวจสอบว่ามีข้อมูลเดิมอยู่หรือไม่ หมายถึง หากมีข้อมูลเดิมอยู่ไม่ต้องทำการเขียนชื่อหัวตารางใหม่ (ตารางค่าปริมาณกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010) จากนั้น เมื่อทำการตรวจสอบเสร็จเรียบร้อยแล้วจะนำค่าสัญญาณที่ได้ไม่ว่าจะเป็นส่วนของการจำลองสัญญาณหรือส่วนของการวัดค่าจริงจากอุปกรณ์ตรวจสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า ไปทำการคำนวณปริมาณกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 หลังจากนั้น นำผลที่ได้ทำการคำนวณไปแสดงผลการคำนวณบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ด้วยโปรแกรม LabVIEW Front Panel ซึ่งผลการคำนวณปริมาณกำลังไฟฟ้าแต่ละส่วนนั้นจะทำการเก็บบันทึกบนโปรแกรม Microsoft excel อย่างต่อเนื่อง

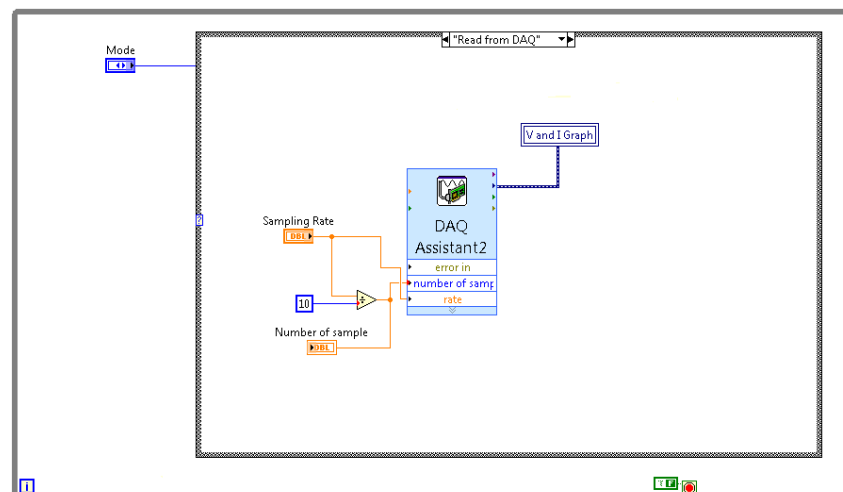


ภาพประกอบ 3-5 แผนผังการทำงานของเครื่องมือวัดแบบเสมือน

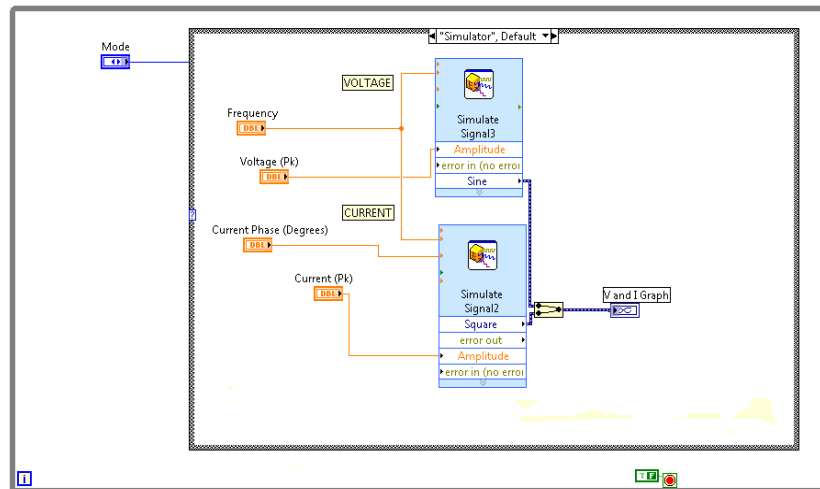
3.2.1 ส่วนอ่านค่าและจำลองค่าสัญญาณที่ใช้ในการวัด

รายละเอียดของโปรแกรมการอ่านค่าและจำลองค่าสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้านั้นจะใช้คำสั่ง Case Structure ในการแยกและสามารถเลือกฟังก์ชันการรับค่าสัญญาณที่วัดจริงจากทรานสดิวเซอร์กับฟังก์ชันของการจำลองสัญญาณได้ ซึ่งในส่วนฟังก์ชันการรับค่าสัญญาณที่วัดจริงนั้นจะรับค่าสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าจากทรานสดิวเซอร์จริงแล้วส่งมายังการ์ดที่ใช้ในการประมวลผล (NI DAQ USB 6009) จากนั้นจะใช้โมดูลคำสั่ง DAQ Assistant ภายในโปรแกรม LabVIEW เพื่อเป็นส่วนในการเชื่อมต่อการวัดค่าสัญญาณระหว่างการ์ดประมวลผลกับโปรแกรม LabVIEW ดังภาพประกอบ 3-6

ฟังก์ชันของการจำลองสัญญาณภายในตัวโปรแกรม LabVIEW จะใช้โมดูลคำสั่ง Simulate Signal 2 ชุด เพื่อใช้ในการจำลองสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ดังภาพประกอบ 3-7 ซึ่งภายในโมดูลคำสั่งทั้ง 2 ชุด คือ DAQ Assistant และ Simulate Signal นั้น สามารถทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในได้ตามที่ต้องการ



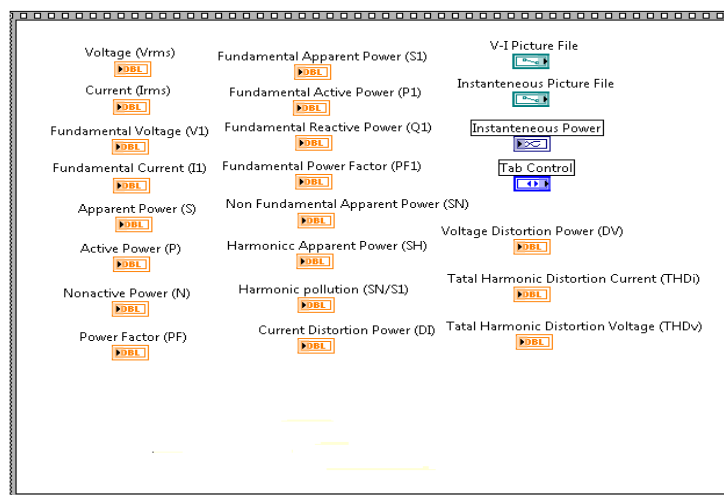
ภาพประกอบ 3-6 โมดูลคำสั่ง DAQ Assistant สำหรับวัดค่าสัญญาณจริงร่วมกับการ์ดประมวลผล (NI DAQ USB 6009)



ภาพประกอบ 3-7 โมดูลคำสั่ง Simulate Signal สำหรับการจำลองสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า

3.2.2 ส่วนการเก็บบล็อกแสดงผลของโปรแกรม LabVIEW

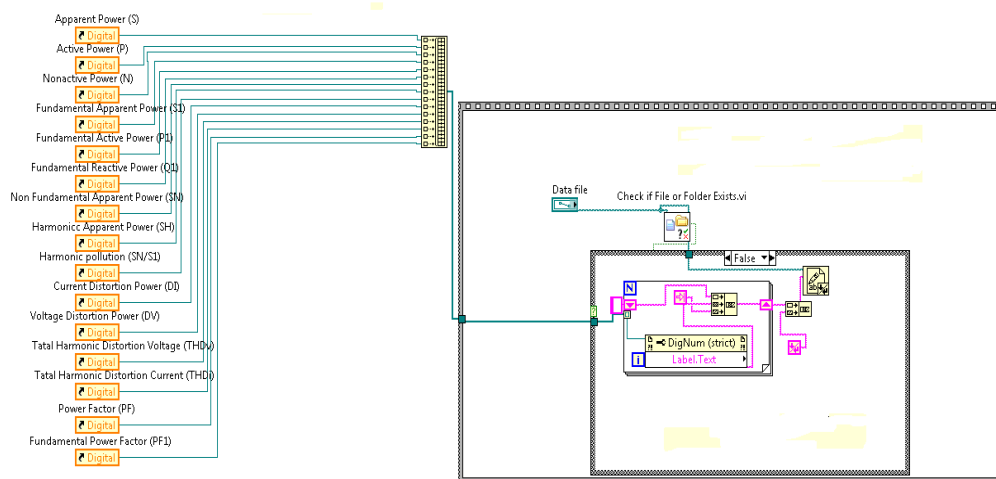
รายละเอียดของโปรแกรมส่วนการเก็บบล็อกแสดงผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ด้วยโปรแกรม LabVIEW จะใช้คำสั่ง Stacked Sequence ในการเก็บรายละเอียด Terminal ของส่วนแสดงบนที่ Front Panel เพื่อความเป็นระเบียบหากต้องการใช้ในการแสดงผลหรือเป็น Terminal เชื่อมต่อในการคำนวณ ดังภาพประกอบ 3-8



ภาพประกอบ 3-8 ส่วนเก็บบล็อกแสดงผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าของโปรแกรม LabVIEW

3.2.3 ส่วนอ้างอิงส่วนแสดงผลใช้ในการบันทึกค่ากำลังไฟฟ้า

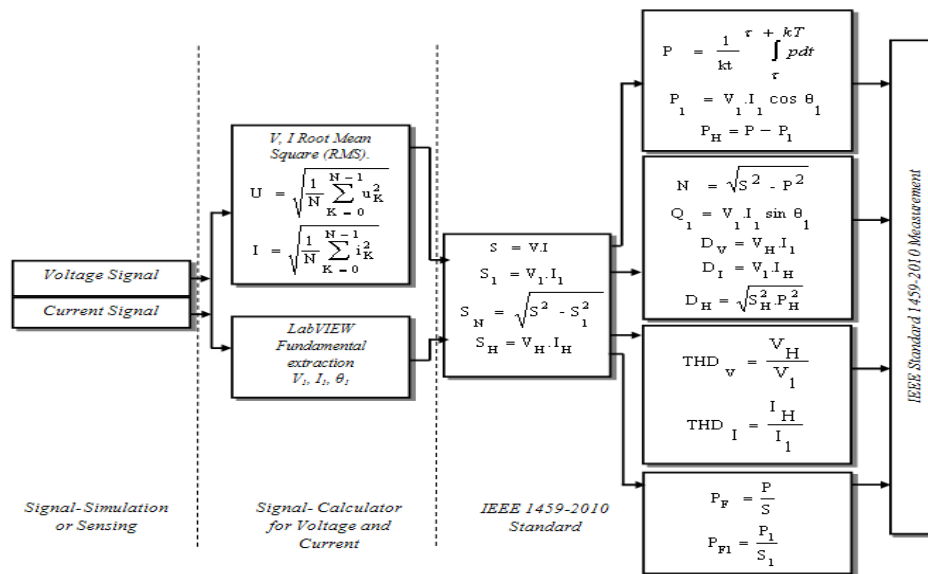
รายละเอียดของโปรแกรมส่วนอ้างอิงกับส่วนแสดงผลที่ใช้ในการบันทึกค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ด้วยโปรแกรม LabVIEW นั้น จะทำการสร้าง Reference จากส่วนที่แสดงผลจาก Front Panel แล้วนำผลที่ได้จากการวัดแปลงเป็นอาร์เรย์โดยใช้คำสั่ง Build Array จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดที่ได้ทั้งหมดไปจัดเรียงและบันทึกลงบนโปรแกรม Excel โดยในส่วนนี้จะมีฟังก์ชันตรวจสอบข้อมูล (Data File) เดิม ที่ได้ทำการคำนวณผ่านมาแล้วว่ามีอยู่หรือไม่ หากข้อมูลเดิมที่ได้คำนวณไว้ยังคงอยู่ให้ทำการคำนวณต่อไปได้ หากไม่มีข้อมูลเดิมหรือเป็นข้อมูลในการวัดและคำนวณชุดใหม่แล้วนั้น ให้ทำการเขียนหัวข้อของตารางการคำนวณตาม Reference จากส่วนที่แสดงผลจาก Front Panel ซึ่งเป็นข้อมูลในการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ที่ได้กำหนดไว้ ดังภาพประกอบ 3-9



ภาพประกอบ 3-9 ส่วนอ้างอิงกับส่วนแสดงผลใช้ในการบันทึกค่ากำลังไฟฟ้า

3.2.4 ส่วนการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010

ในการออกแบบเครื่องมือวัดแบบเสมือนเพื่อวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ในบทที่ 2 ได้นำเสนอนิยามการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญเพื่อใช้ในการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้า ทั้งในส่วนของการจำลองสัญญาณและการวัดค่าสัญญาณจริงจากเซนเซอร์แรงดันและกระแสไฟฟ้า ดังภาพประกอบ 3-10



ภาพประกอบ 3-10 ส่วนคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010

ภาพประกอบ 3-10 การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าตามนิยามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 เป็นส่วนในการออกแบบและคำนวณจากโปรแกรม LABVIEW โดยได้เขียนโปรแกรมแบ่งส่วนการคำนวณออกเป็น 4 ส่วน ส่วนที่ 1 คือ ส่วนการคำนวณค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองขึ้นหรือสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่วัดจริงจากจากอุปกรณ์ตรวจสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีสมการการคำนวณค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า ดังสมการ 3-1 และ สมการ 3-2

$$U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u_k^2} \quad (3-1)$$

และ

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i_k^2} \quad (3-2)$$

เมื่อ

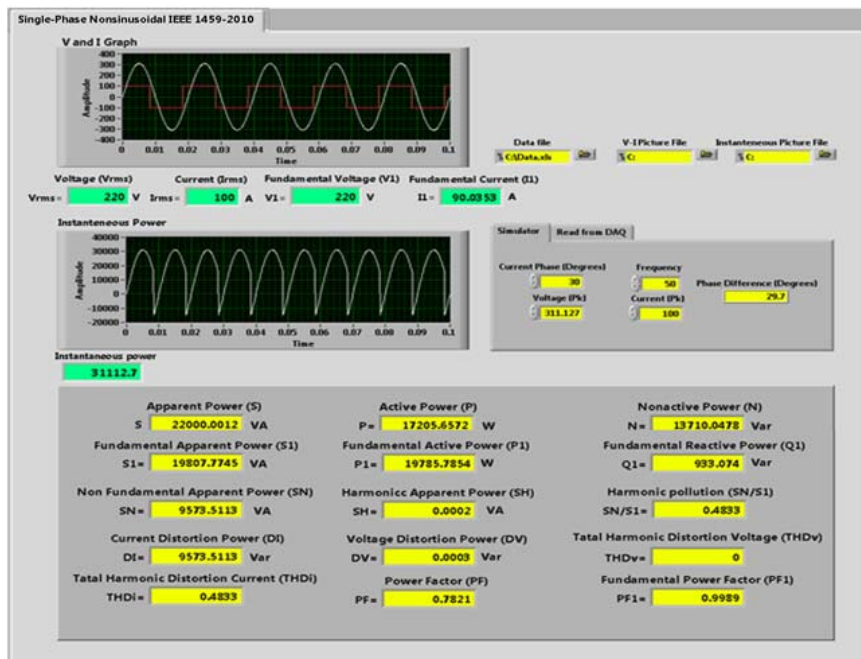
U, I คือ ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) ของแรงดันและกระแสไฟฟ้า

N คือ จำนวนจุดการสุ่มตัวอย่าง $K = 0, 1, \dots, N-1$

ส่วนที่ 2 คือ ส่วนการคำนวณค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานโดยใช้วิธีการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว ทำการแสดงค่าขนาด (Magnitude RMS) แล้วแปลงข้อมูลเป็นอาร์เรย์ จากนั้นจะใช้ฟังก์ชันของอาร์เรย์ Max & Min ในการแสดงค่าสูงสุดของอาร์เรย์ ของทั้งสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าเพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ค่าแรงดันและกระแสที่ความถี่มูลฐาน ส่วนที่ 3 ส่วนคำนวณค่ามุมต่างเฟสที่ความถี่มูลฐาน โดยใช้มุมต่างเฟสที่หาได้จากแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานด้วยวิธีการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว ซึ่งนำค่ามุมที่ได้ของสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าแปลงข้อมูลเป็นอาร์เรย์ จากนั้นจะใช้ฟังก์ชันของอาร์เรย์ Index ในการแสดงค่ามุมเฟสที่สัญญาณแรงดันและความถี่มูลฐานแล้วนำค่าดังกล่าว มาทำการหาค่าผลต่างของมุมเฟสจะได้ค่ามุมเฟสค่าความถี่มูลฐาน ส่วนที่ 4 ส่วนการคำนวณค่าตามนิยามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ซึ่งต้องมีการเขียนชุดคำสั่งเพื่อทำการคำนวณตามมาตรฐานทั้งหมด ดังภาพประกอบ 3-10

3.2.5 ส่วนแสดงผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010

การวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามนิยามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ด้วยโปรแกรม LabVIEW ทั้งในส่วนของการจำลองสัญญาณและการวัดค่าสัญญาณจริงจากทรานสดิวเซอร์แรงดันและกระแสไฟฟ้า นั้น เมื่อมีการจำลองหรือวัดค่าแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าแล้วก็จะไปทำการคำนวณตามนิยามมาตรฐานการวัดค่ากำลังไฟฟ้า จากนั้นค่าที่ได้จากการคำนวณแล้วจะทำการแสดงผลที่ส่วนแสดงผล (Front Panel) ของโปรแกรม LabVIEW เอง ซึ่งส่วนแสดงผลนี้จะแบ่งรายละเอียดของการแสดงผลออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 คือ ส่วนที่แสดงผลลักษณะรูปภาพของแรงดันและกระแสไฟฟ้า ที่ได้ทำการจำลองหรือวัดค่าจริงที่ต้องการคำนวณรวมถึงรูปภาพของกำลังไฟฟ้าชั่วขณะ (Instantaneous Power) ส่วนที่ 2 คือ ส่วนที่แสดงผลค่าที่เป็นตัวเลขที่ผ่านการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าตามนิยามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ซึ่งค่าตัวเลขกำลังไฟฟ้าทั้งหมดจะทำการเก็บบันทึกทุกค่าลงในโปรแกรม Excel เพื่อใช้ในการประมวลผลในแต่ละช่วงเวลาต่อไป ดังภาพประกอบ 3-11



ภาพประกอบ 3-11 ส่วนแสดงผลค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010

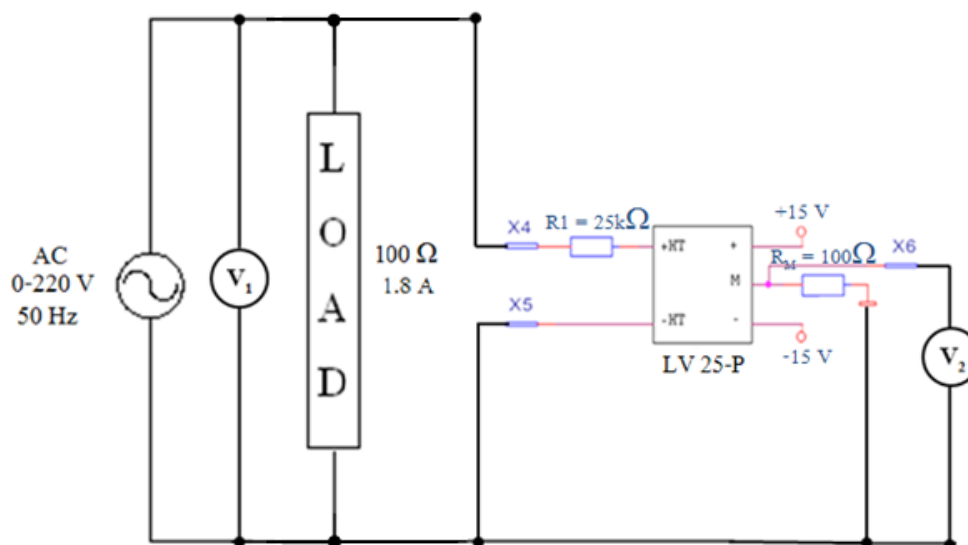
บทที่ 4

ผลการศึกษาและทดสอบเครื่องมือวัดแบบเสมือน

ในบทนี้อธิบายถึงขั้นตอนและผลการศึกษาและทดสอบระบบเครื่องมือวัดแบบเสมือน ตั้งแต่การศึกษาและทดสอบความเป็นเชิงเส้นของทรานสดิวเซอร์ตรวจจับสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า การทวนสอบเครื่องมือวัดแบบเสมือน โดยการจำลองสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าเพื่อหาค่าความถูกต้องในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่อัตราสุ่มและจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสม ผลการสอบเทียบความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัดแบบเสมือนกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน และผลการวัดปริมาณกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 กับโหลดพื้นฐานและโหลดไม่เชิงเส้น

4.1 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของทรานสดิวเซอร์

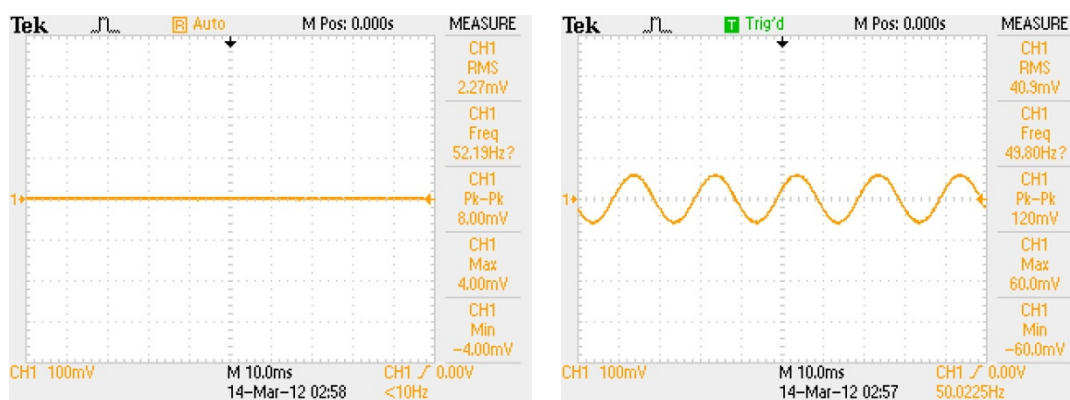
จากบทที่ 3 หลังจากที่ได้ออกแบบและประกอบชุดทรานสดิวเซอร์ตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าเสร็จเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ได้ทำการทดลองโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ระดับแรงดัน 0 - 220 โวลต์ โดยใช้โหลดทางไฟฟ้าเป็นแบบค่าความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์ เพื่อเปรียบเทียบผลการวัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากทรานสดิวเซอร์ตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า ให้เป็นไปตามค่าที่ออกแบบจากทรานสดิวเซอร์ตรวจวัดและทดสอบว่าสัญญาณที่ได้จากเครื่องตรวจวัดสามารถนำไปใช้งานได้ จากภาพประกอบ 4-1 แสดงตำแหน่งการตรวจวัดแรงดันเพื่อเปรียบเทียบค่าแรงดันทางด้านขาเข้าและแรงดันทางด้านขาออกของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า โดยกำหนดให้ V_1 คือ แรงดันทางด้านขาเข้าซึ่งได้จากแหล่งจ่ายแรงดันแบบปรับค่าได้ V_2 คือ แรงดันทางด้านขาออกที่ทำการวัดด้วยออสซิลโลสโคปของทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P และ V_3 คือ แรงดันทางด้านขาออกที่ทำการวัดด้วยออสซิลโลสโคปของทรานสดิวเซอร์กระแส LA 55-P ทำการบันทึกค่าแรงดันที่ได้แล้วทำการเปรียบเทียบแรงดันทางด้านขาเข้าและแรงดันทางด้านขาออกของทรานสดิวเซอร์ตรวจจับสัญญาณและกระแสไฟฟ้า จากนั้น ทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสเพื่อหาความเป็นเชิงเส้นของทรานสดิวเซอร์ ก่อนนำไปใช้วัดจริงร่วมกับโปรแกรม LabVIEW และวัดกำลังไฟฟ้าจากโหลดพื้นฐานและโหลดไม่เชิงเส้นลักษณะต่าง ๆ



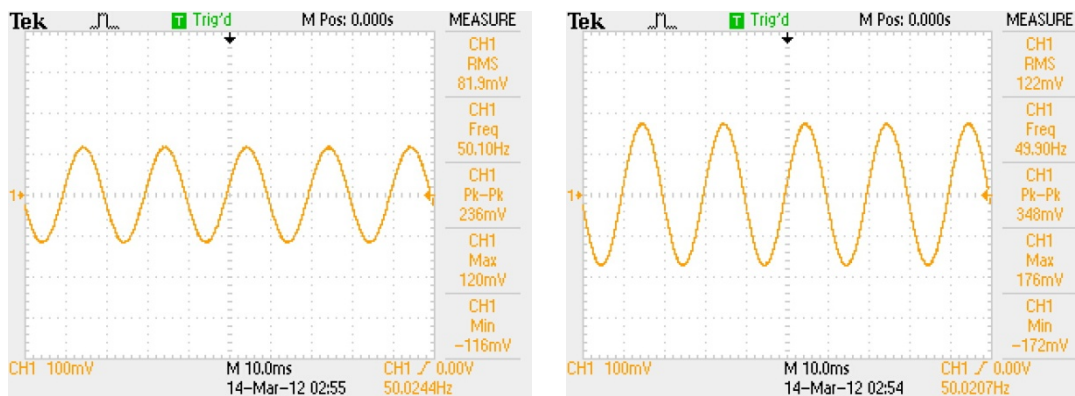
ภาพประกอบ 4-1 ลักษณะการวัดและเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันทางด้านขาเข้าและแรงดันทางด้านขาออกของทรานสดิวเซอร์ตรวจจับสัญญาณแรงดัน LV 25-P

ตารางที่ 4-1 การบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P โดยปรับแหล่งจ่ายแรงดันที่ 0 - 220 โวลต์ ที่โหลดค่าความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์

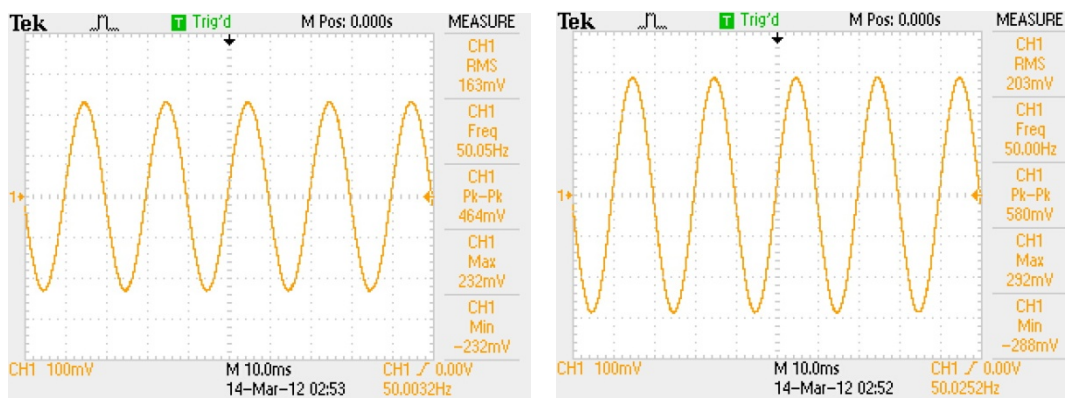
แรงดันด้านขาเข้า V_1 (V)	0	40	80	120	160	200	220
แรงดันด้านขาออก V_2 (mV)	2.27	40.9	81.9	122	163	203	223



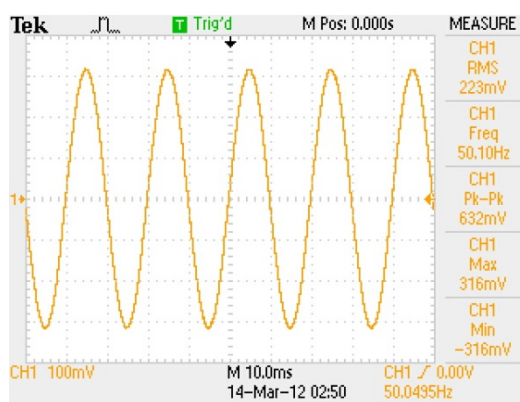
ภาพประกอบ 4-2 รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P ที่แรงดัน 0 โวลต์ และ 40 โวลต์



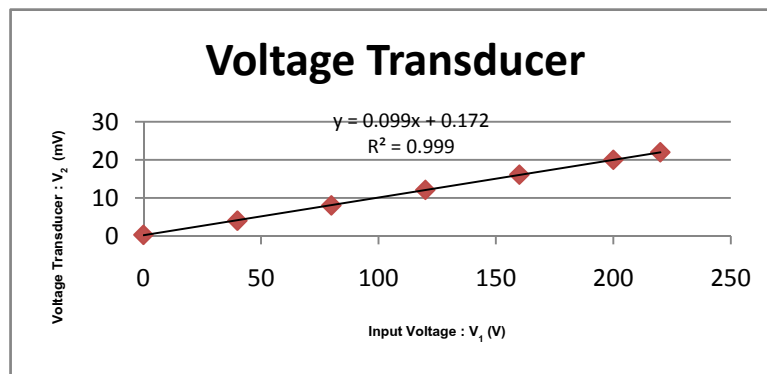
ภาพประกอบ 4-3 รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยทรานดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P ที่แรงดัน 80 โวลต์ และ 120 โวลต์



ภาพประกอบ 4-4 รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยทรานดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P ที่แรงดัน 160 โวลต์ และ 200 โวลต์

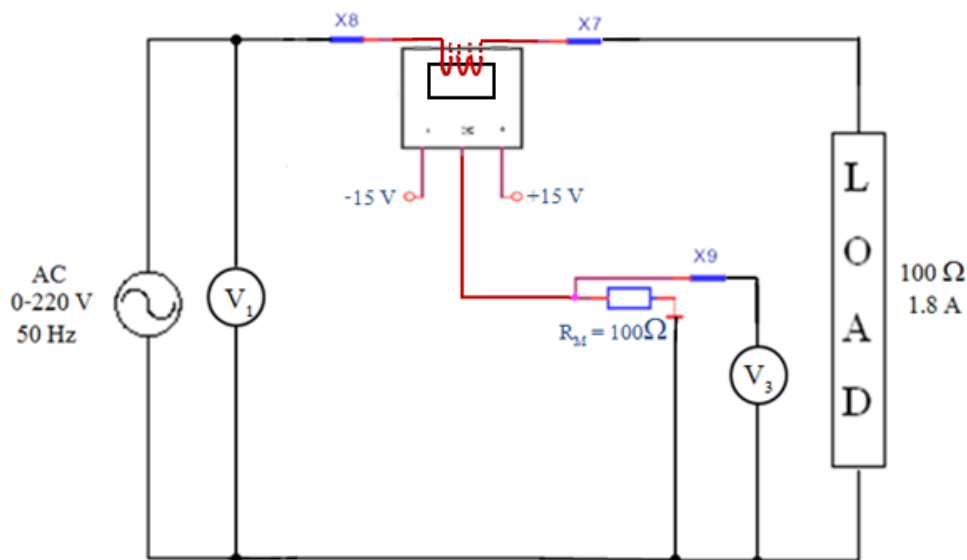


ภาพประกอบ 4-5 รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยทรานดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P ที่แรงดัน 220 โวลต์



ภาพประกอบ 4-6 ผลการทดสอบทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P ที่แรงดัน 0 - 220 โวลต์ เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นในการวัดค่าปริมาณไฟฟ้า

จากการทดลอง ปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ย่าน 0 - 220 โวลต์ ตามลำดับ ดังตาราง 4-1 และใช้โหลดทางไฟฟ้าเป็นแบบค่าความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์ เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของแรงดันที่จ่ายให้กับโหลดซึ่งทำการวัดจากโวลต์มิเตอร์กับแรงดันที่วัดจากทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P ซึ่งทำการวัดจากออสซิลโลสโคป โดยทำการวัดและเปรียบเทียบค่าของแรงดันและลักษณะของสัญญาณที่ได้จากออสซิลโลสโคป ดังภาพประกอบ 4-2 ถึง 4-5 แล้วนำผลที่ได้จากการวัดค่าแรงดันของจากทรานสดิวเซอร์แรงดัน ที่บันทึกลงในตารางการทดลองนั้น ไปทำการพล็อตกราฟจะได้เส้นกราฟในรูปแบบที่เป็นเชิงเส้น ดังภาพประกอบ 4-6 ซึ่งสามารถหาสมการความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเชิงเส้น หากแต่เมื่อทำการพิจารณาทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P ดังกล่าว ซึ่งมีค่า อัตราส่วนการแปลงผัน (Conversion Ratio) อยู่ที่ 2500 : 1000 และผลที่ได้จากการวัดเปรียบเทียบค่าแรงดันทางด้านเข้าและแรงดันทางด้านออกของทรานสดิวเซอร์แรงดัน ยังคงมีความผิดเพี้ยนอยู่เนื่องจากการเลือกค่าความต้านทานที่ไม่เหมาะสม จึงจำเป็นที่จะต้องทำการปรับตัวคูณค่าให้มีความเหมาะสมอีกครั้ง ในการวัดร่วมกับโปรแกรม LabVIEW

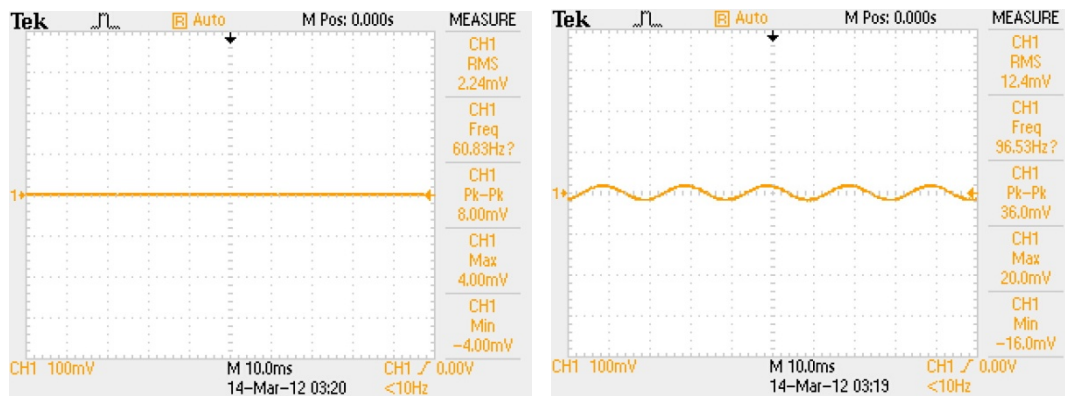


ภาพประกอบ 4-7 ลักษณะการวัดและเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันทางด้านขาเข้าและแรงดันทางด้านขาออกของทรานสิฟอรมอเตอร์ตรวจสอบสัญญาณกระแส LA 55-P

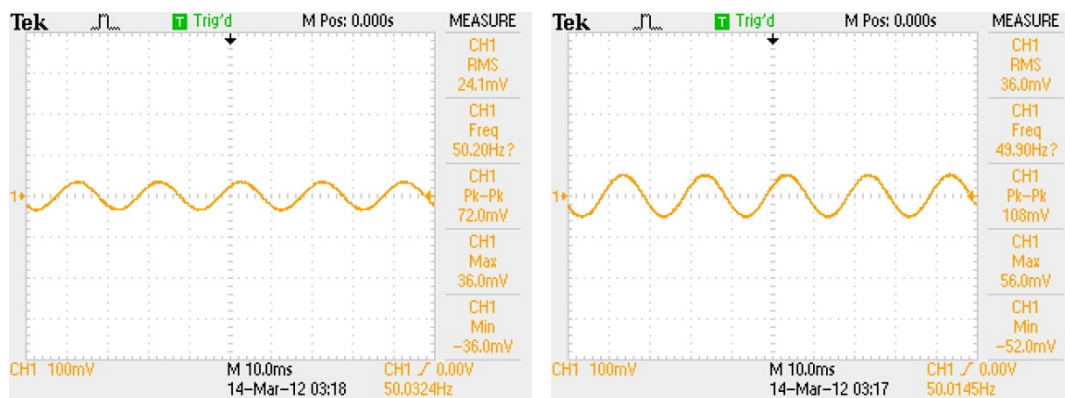
ตารางที่ 4-2 การบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากทรานสิฟอรมอเตอร์กระแส LA 55-P โดยปรับแหล่งจ่ายแรงดันที่ 0 - 220 โวลต์ ที่โหลดค่าความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์

แรงดันด้านขาเข้า V_1 (V)	0	40	80	120	160	200	220
แรงดันด้านขาออก V_3 (mV)	2.24	12.4	24	36	47.9	59.7	65.9
กระแสค่านวนที่จ่ายให้กับโหลด (A)	0	0.4	0.8	1.2	1.6	2	2.2

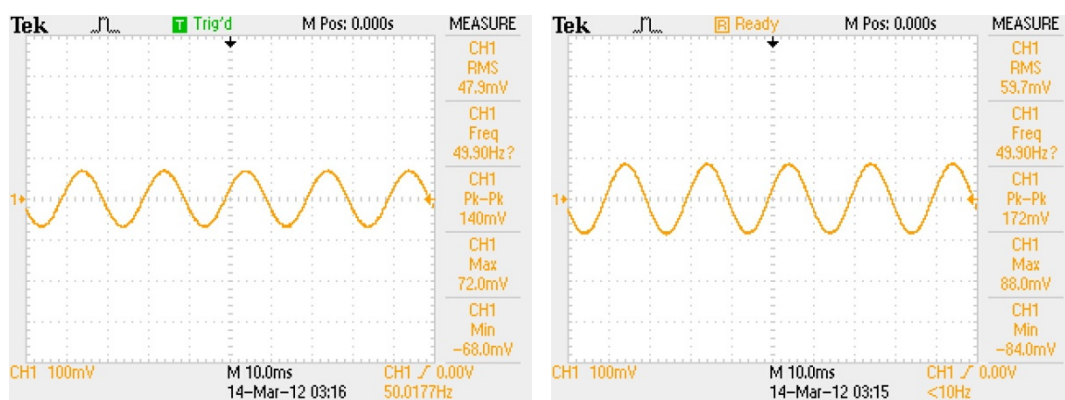
จากการทดลอง ปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ย่าน 0 - 220 โวลต์ ตามลำดับ ดังตาราง 4-2 และจำลองโหลดทางไฟฟ้าเป็นแบบค่าความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์ เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของแรงดันที่จ่ายให้กับโหลดซึ่งทำการวัดจากโวลต์มิเตอร์กับแรงดันที่วัดจากทรานสิฟอรมอเตอร์กระแส LA 55-P และทำการคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าโดยใช้การหาความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าจากกฎของโอห์มคำนวณหาค่ากระแสจากทรานสิฟอรมอเตอร์กระแส LA 55-P เพื่อพิจารณาผลของกระแสที่จ่ายให้โหลดกับแรงดันทางด้านขาเข้าว่ามีความสอดคล้องกับอัตราส่วนการแปลงผัน (Conversion ratio) ของจากทรานสิฟอรมอเตอร์กระแส ที่ 1 : 1000 หรือไม่



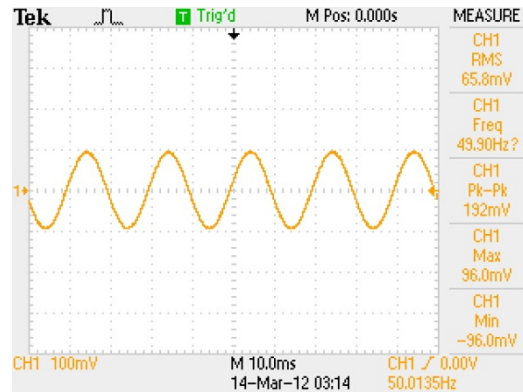
ภาพประกอบ 4-8 รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยทรานสดิวเซอร์กระแส LA 55-P ที่แรงดัน 0 โวลต์ และ 40 โวลต์



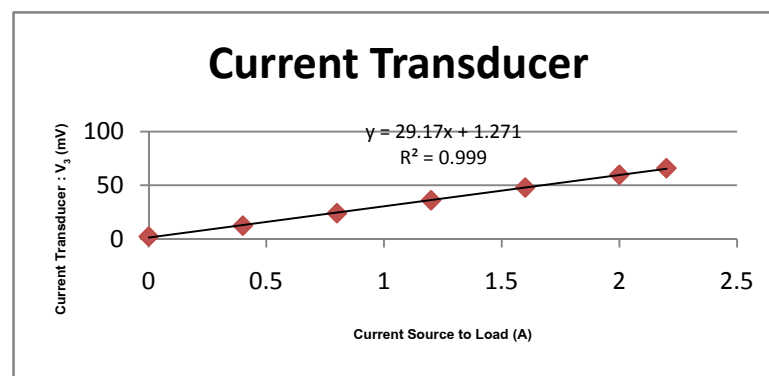
ภาพประกอบ 4-9 รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยทรานสดิวเซอร์กระแส LA 55-P ที่แรงดัน 80 โวลต์ และ 120 โวลต์



ภาพประกอบ 4-10 รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยทรานสดิวเซอร์กระแส LA 55-P ที่แรงดัน 160 โวลต์ และ 200 โวลต์



ภาพประกอบ 4-11 รูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยทรานสดิวเซอร์กระแส LA 55-P ที่แรงดัน 220 โวลต์



ภาพประกอบ 4-12 ผลการทดสอบทรานสดิวเซอร์กระแส LA 55-P ที่แรงดัน 0 - 220 โวลต์ เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นในการวัดค่าปริมาณไฟฟ้า

จากการทดลอง ปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ย่าน 0 - 220 โวลต์ ตามลำดับ ดังตาราง 4-2 และจำลองโหลดทางไฟฟ้าเป็นแบบค่าความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์ เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของแรงดันที่จ่ายให้กับโหลดซึ่งทำการวัดจากโวลต์มิเตอร์กับแรงดันที่วัดจากทรานสดิวเซอร์กระแส LA 55-P ซึ่งทำการวัดจากออสซิลโลสโคป โดยทำการวัดและเปรียบเทียบค่าของแรงดันและลักษณะของสัญญาณที่ได้จากออสซิลโลสโคปและกระแสที่คำนวณดังภาพประกอบ 4-7 ถึง 4-10 แล้วนำผลที่ได้จากการวัดค่ากระแสที่คำนวณที่ได้จากการแปลงค่าแรงดันจากการวัดและโหลดค่าความต้านทานจากทรานสดิวเซอร์กระแส ที่บันทึกลงในตารางการทดลองนั้น ไปทำการพล็อตกราฟจะได้เส้นกราฟในรูปแบบที่เป็นเชิงเส้น ดังภาพประกอบ 4-12 ซึ่งสามารถหาสมการความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการเชิงเส้น หากแต่เมื่อทำการพิจารณาทรานสดิว

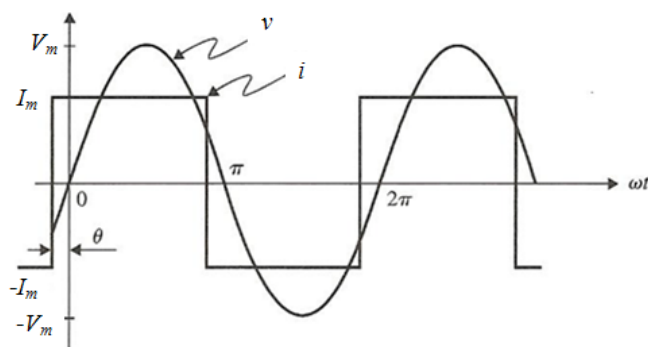
เซอร์กระแส LA 55-P ดังกล่าว ซึ่งมีค่า อัตราส่วนการแปลงผัน (Conversion Ratio) อยู่ที่ 1 : 1000 และผลที่ได้จากการวัดเปรียบเทียบค่าแรงดันทางด้านขาเข้าและแรงดันทางด้านขาออกรวมถึงค่ากระแสเมื่อทำการคำนวณเปรียบเทียบกับโหลดค่าความต้านทานของทรานซิวเซอร์กระแส ยังคงมีความผิดพลาดอยู่เนื่องจากการเลือกค่าความต้านทานที่ไม่เหมาะสม จึงจำเป็นที่จะต้องทำการปรับตัวคูณค่าให้มีความเหมาะสมอีกครั้ง ในการวัดร่วมกับโปรแกรม LabVIEW

4.2 การทวนสอบเครื่องมือวัดแบบเสมือนโดยการจำลองสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบการวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ด้วยโปรแกรม LabVIEW แล้วเพื่อเป็นการพิสูจน์ความถูกต้องของสมการการวัดค่ากำลังไฟฟ้า จำเป็นต้องมีการทดลองและเปรียบเทียบผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้า โดยทำการเลือกฟังก์ชันการจำลองสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าขึ้น ซึ่งทำการกำหนดเงื่อนไขภายใต้สภาวะที่มีความผิดพลาด โดยกำหนดให้จำลองสัญญาณแรงดันรูปคลื่นไซน์ และกระแสไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความผิดพลาดที่ความถี่ 50 Hz แรงดัน 311.127 V_p กระแส 100 I_p จากนั้นนำสัญญาณที่ได้จำลองขึ้นไปคำนวณหาค่ากำลังสองเฉลี่ยประสิทธิภาพของแรงดันและกระแสไฟฟ้า (V_{RMS} , I_{RMS}) รวมถึงค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน (V_1 , I_1) และมุมต่างเฟสที่ความถี่มูลฐาน (θ_1) โดยใช้วิธีการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว ในการแยกค่าของแรงดันและกระแสที่ความถี่มูลฐานรวมถึงมุมเฟส ภายในโปรแกรม LabVIEW เพื่อนำผลการคำนวณที่ได้ไปทำการเปรียบเทียบจากค่าที่คำนวณจริง และหาค่าอัตราการสุ่มของสัญญาณที่ทำการวัดว่ามีค่าที่เหมาะสมที่เท่าไร ก่อนทำการวัดค่าจริงร่วมกับจากเครื่องตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่สร้างขึ้น การศึกษาและทวนสอบสมการคณิตศาสตร์ของมาตรฐาน IEEE 1459-2010 มีขั้นตอน ดังนี้

4.2.1 การวิเคราะห์สัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า

ในการทดลองได้จำลองสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าในสภาวะที่มีความผิดพลาดบนโปรแกรม LabVIEW มีลักษณะรูปคลื่นพื้นฐาน ดังภาพประกอบ 4-12



ภาพประกอบ 4-13 ลักษณะรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าพื้นฐานที่ได้จำลองขึ้นบนโปรแกรม LabVIEW

ภาพประกอบ 4-13 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เวลาใด ๆ ดังสมการที่ (4-1) และสมการที่ (4-2)

$$v(t) = V_m \sin(\omega t) \quad (4-1)$$

$$i(t) = \begin{cases} I_m, & \theta \leq \omega t \leq \pi - \theta \\ -I_m, & \pi - \theta \leq \omega t \leq 2\pi - \theta \end{cases} \quad (4-2)$$

จากสมการที่ (4-2) จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ได้มีฮาร์มอนิกเป็นค่าอนันต์ จากสมการพื้นฐานอนุกรมฟูรีเยร์ของฟังก์ชันสมมาตรเชิงคี่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์และสามารถจัดรูปแบบสมการกระแสโดยใช้อนุกรมฟูรีเยร์ได้ ดังสมการที่ (4-3)

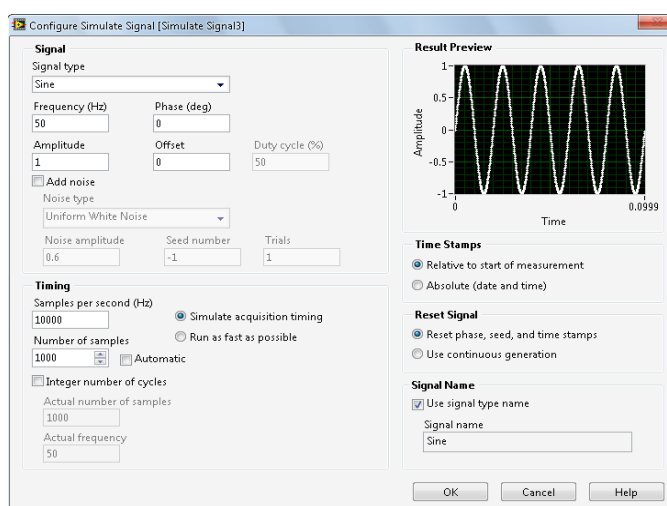
$$i(t) = \frac{4}{\pi} \left(\sin(\omega t + \theta) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t + \theta) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t + \theta) + \frac{1}{7} \sin(7\omega t + \theta) \dots \right) \quad (4-3)$$

โดยที่ค่าความถี่มูลฐานมีเฟสเดียวกันกับรูปคลื่นสัญญาณและมีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ $4/\pi$ ดังนั้น ค่ากำลังสองเฉลี่ยประสิทธิผลของกระแสไฟฟ้า (RMS Current) มีค่าดังสมการที่ (4-4)

$$I_{rms} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (4-4)$$

4.2.2 ส่วนปรับค่าอัตราการสุ่มสัญญาณ

การปรับค่าอัตราการสุ่มสัญญาณที่ได้ทำการจำลองขึ้นนั้นทำโดยการเปลี่ยนแปลงค่า Configure Simulate Signal ภาพประกอบ 4-14 ของตัวจำลองสัญญาณบนโปรแกรม LabVIEW ซึ่งกำหนดโดยการจำลองสัญญาณเสมือนแรงดันรูปคลื่นไซน์ และกระแสไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมในระบบจริงที่มีความผิดพลาด ที่ค่าความถี่ 50 Hz แรงดัน 311.127 V_p กระแส 100 I_p และทำการปรับอัตราการสุ่มและจำนวนตัวอย่างสัญญาณให้เปลี่ยนแปลงไปเป็นจำนวนเต็มสิบเท่าโดยอัตโนมัติ เพื่อหาค่าความเหมาะสมของอัตราการสุ่มสัญญาณ ที่ไม่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010



ภาพประกอบ 4-14 ส่วนปรับค่าองค์ประกอบสัญญาณบน โปรแกรม LabVIEW

หลังจากได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าองค์ประกอบของสัญญาณบน โปรแกรม LabVIEW ตามที่ได้กำหนดไว้ พร้อมทำการตรวจสอบโปรแกรมในส่วนคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 เพื่อหาความถูกต้องอีกครั้ง จากนั้นทำการทดลองโดยการจำลองสัญญาณดังกล่าวเพื่อให้โปรแกรมทำการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้า แล้วนำผลการคำนวณบนโปรแกรม LabVIEW มาเปรียบเทียบผลการคำนวณตามทฤษฎี แล้วจึงทำการปรับค่าอัตราการสุ่มพร้อมกับจำนวนตัวอย่างหลาย ๆ ค่าเพื่อเป็นการตรวจสอบให้มั่นใจว่าค่าอัตราการสุ่มที่เท่าไรมีความเหมาะสมมากที่สุดและไม่เกิดความผิดพลาดซึ่งผลการคำนวณแสดงค่า ดังตาราง 4-3

ตารางที่ 4-3 การวัดค่ากำลังตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ที่อัตราค่าสุ่มสัญญาณค่าต่าง ๆ โดยพิจารณาที่ค่าความถี่มูลฐาน

Sample per second (Hz)	IEEE 1459-2010 Calculations ($v(t) = 311.127 \sin \omega t$ and $i(t) = 100 \sin (\omega t + \beta_1)$)											
	V_{rms} (V)	V_1 (V)	I_{rms} (A)	I_1 (A)	S (VA)	P (W)	N (Var)	S_1 (VA)	P_1 (W)	Q_1 (Var)	P_F	P_{F1}
	220	220	100	90.03	22000	19806.95	9575.21	19807.04	19807.04	0	0.9003	1
1000	220	220	100	90.4	22000	19643.78	9905.64	19888.64	19643.78	3111.27	0.8929	0.987
1024	220.39	220.25	100	89.87	22039.7	19843.29	9591.26	19795.83	19787.43	576.59	0.9003	0.999
2048	219.89	219.88	100	90.05	21989.3	19786.45	9593	19801.39	19796.1	457.51	0.899	0.999
4096	219.89	219.88	100	90.05	21989.26	19786.45	9592.91	19801.36	19796.1	456.02	0.899	0.999
8192	220.02	220.02	100	90.03	22002.68	19811.78	9571.38	19809.33	19809.01	113.75	0.9004	1
10000	220	220	100	90.03	22000	19805.33	9578.56	19807.77	19805.33	311.12	0.9002	0.999
10240	220	220	100	90.03	22000	19806.89	9575.32	19806.99	19806.89	60.76	0.9003	1
20480	220	220	100	90.03	22000	19806.94	9575.22	19806.96	19806.94	30.38	0.9003	1
40960	220	220	100	90.03	22000	19806.95	9575.2	19806.96	19806.95	15.19	0.9003	1
81920	220	220	100	90.03	22000	19806.95	9575.19	19806.96	19806.95	7.59	0.9003	1
100000	220	220	100	90.03	22000	19806.94	9575.23	19806.96	19806.94	31.11	0.9003	1
102400	220	220	100	90.03	22000	19806.94	9575.22	19806.96	19806.94	30.38	0.9003	1
204800	220	220	100	90.03	22000	19806.95	9575.2	19806.96	19806.95	15.19	0.9003	1
409600	220	220	100	90.03	22000	19806.95	9575.19	19806.96	19806.95	7.59	0.9003	1
819200	220	220	100	90.03	22000	19806.95	9575.19	19806.96	19806.95	3.79	0.9003	1
1000000	220	220	100	90.03	22000	19806.95	9575.19	19806.96	19806.95	3.11	0.9003	1
1024000	220	220	100	90.03	22000	19806.95	9575.19	19806.96	19806.95	3.03	0.9003	1
2048000	220	220	100	90.03	22000	19806.96	9575.19	19806.96	19806.96	1.51	0.9003	1
4096000	220	220	100	90.03	22000	19806.96	9575.19	19806.96	19806.96	0.75	0.9003	1
8192000	220	220	100	90.03	22000	19806.96	9575.19	19806.96	19806.96	0.37	0.9003	1
10000000	220	220	100	90.03	22000	19806.96	9575.19	19806.96	19806.96	0.31	0.9003	1

ตารางที่ 4-4 การวัดค่ากำลังตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ที่อัตราค่าสุ่มสัญญาณค่าต่าง ๆ โดยพิจารณาที่ค่าความถี่ฮาร์โมนิก

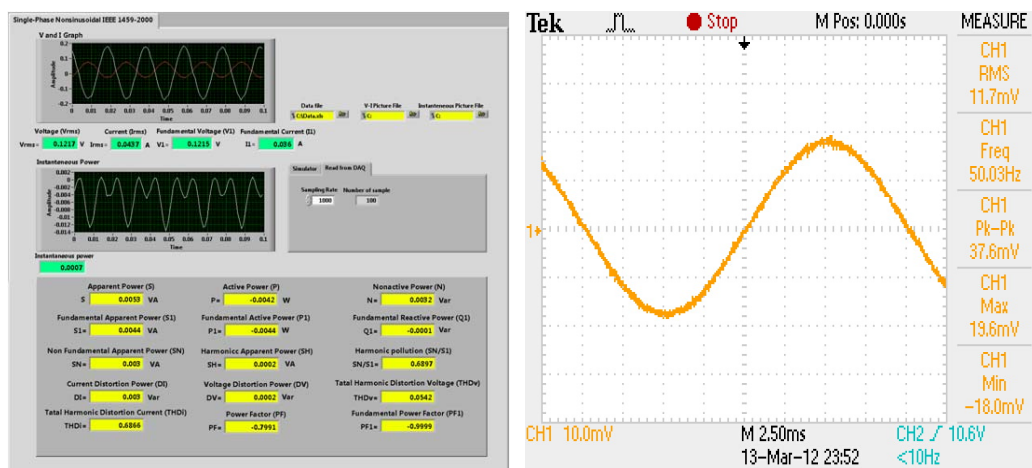
Sample per second (Hz)	IEEE 1459-2010 Calculations ($v(t) = 311.127 \sin \omega t$ and $i(t) = 100 \sin (\omega t + \beta_1)$)						
	S_N (VA)	S_H (VA)	D_1 (Var)	D_V (Var)	THD ₁	THD _V	S_N/S_1
	9575.03	0	9575.06	0	0.483	0	0.483
1000	9404.34	0.0002	9404.34	0.0003	0.472	0	0.472
1024	9688.83	341.39	9657.49	699.79	0.487	0.035	0.489
2048	9562.13	84.87	9560.13	175.8	0.482	0.008	0.489
4096	9562.11	84.88	9560.12	175.8	0.482	0.008	0.482
8192	9576.44	21.23	9576.31	43.91	0.483	0.002	0.483
10000	9573.51	0.0002	9573.51	0.0003	0.483	0	0.483
10240	9575.13	0.0002	9575.13	0.0003	0.483	0	0.483
20480	9575.18	0.0002	9575.18	0.0003	0.483	0	0.483
40960	9575.19	0.0002	9575.19	0.0003	0.483	0	0.483
81920	9575.19	0	9575.19	0	0.483	0	0.483
100000	9575.17	0	9575.17	0	0.483	0	0.483
102400	9575.18	0	9575.18	0	0.483	0	0.483
204800	9575.19	0.0002	9575.19	0.0003	0.483	0	0.483
409600	9575.19	0	9575.19	0	0.483	0	0.483
819200	9575.19	0	9575.19	0	0.483	0	0.483
1000000	9575.19	0	9575.19	0	0.483	0	0.483
1024000	9575.19	0	9575.19	0	0.483	0	0.483
2048000	9575.19	0	9575.19	0	0.483	0	0.483
4096000	9575.19	0	9575.19	0	0.483	0	0.483
8192000	9575.19	0	9575.19	0	0.483	0	0.483
10000000	9575.19	0	9575.19	0	0.483	0	0.483

การทวนสอบสมการคณิตศาสตร์สำหรับการวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามนิยามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ที่มีการทดลองและเปรียบเทียบผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้า โดยทำการเลือกฟังก์ชันการจำลองสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าขึ้น ซึ่งทำการกำหนดเงื่อนไขภายใต้สภาวะที่มีความ

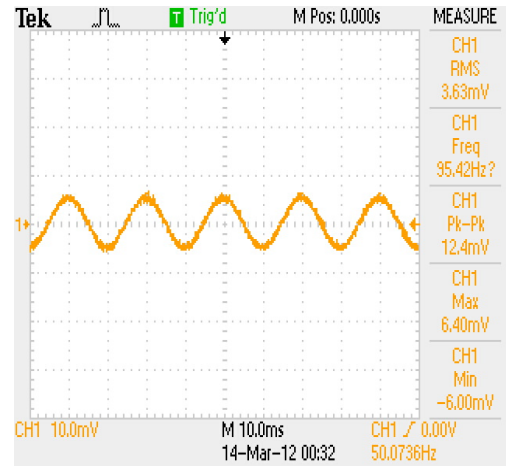
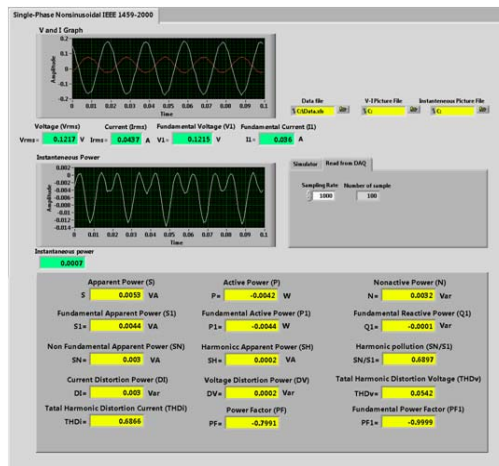
ผิเคเพี้ยน ที่ได้ทำการจำลองขึ้นบนโปรแกรม LabVIEW เพื่อนำสมการคณิตศาสตร์และผลการตรวจสอบการวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่สามารถเชื่อถือได้ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลได้ถูกต้อง ดังตาราง 4-3 และ 4-4 จากการทดลองพบว่า ที่ค่าอัตราสุ่มที่ 10 MHz ที่ 1,000,000 ตัวอย่าง มีผลการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ได้ถูกต้องแม่นยำมากที่สุด ซึ่งสามารถพิจารณาจากค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่ความถี่มูลฐาน (Fundamental reactive power: Q_1) ที่ค่อย ๆ เข้าถึงผลคำตอบที่ถูกต้องขึ้นเมื่อทำการเพิ่มจำนวนอัตราการสุ่มเข้าใกล้ 10 MHz ซึ่งจากการทวนสอบสมการคณิตศาสตร์สำหรับการวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามนิยามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 นี้ถูกต้องแล้วจะนำวิธีการวัดที่ได้ทำการจำลองขึ้นไปใช้ในการวัดจริง ร่วมกับอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ตรวจวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าต่อไป

4.3 การสอบเทียบความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัดแบบเสมือนกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน

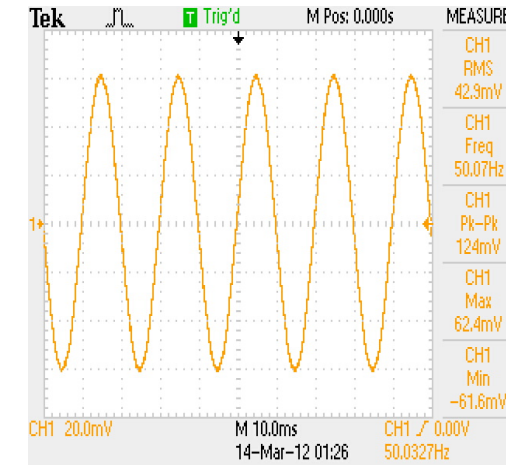
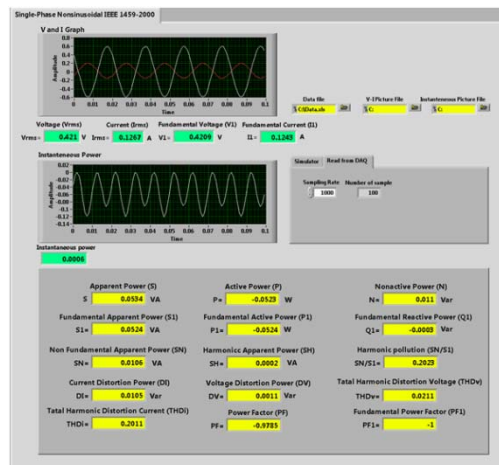
การสร้างเครื่องมือวัดแบบเสมือนกับโปรแกรม LabVIEW เพื่อใช้วัดค่าปริมาณกำลังไฟฟ้า ให้มีความน่าเชื่อถือสามารถนำค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดแบบเสมือนเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) โดยวัดร่วมกันกับอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า ดังนี้



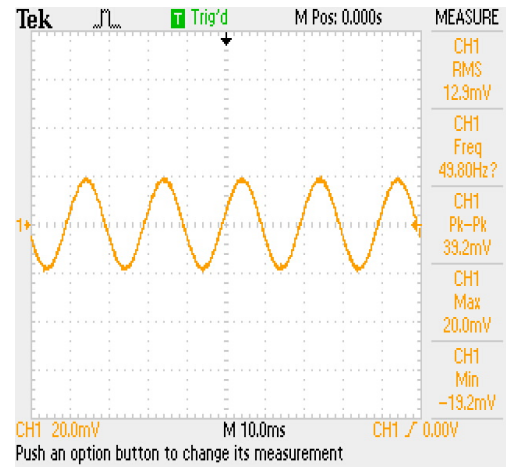
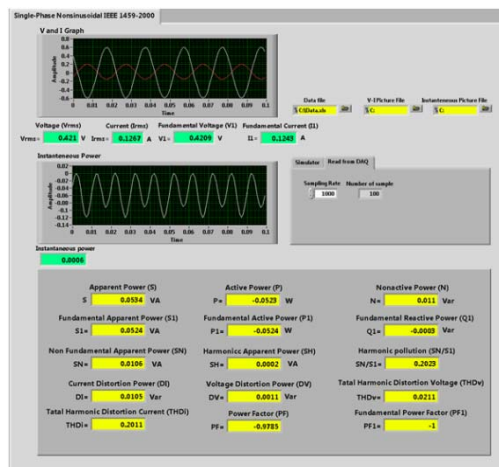
ภาพประกอบ 4-15 เปรียบเทียบความถี่ 50 Hz ทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P ที่แรงดัน 12 โวลต์



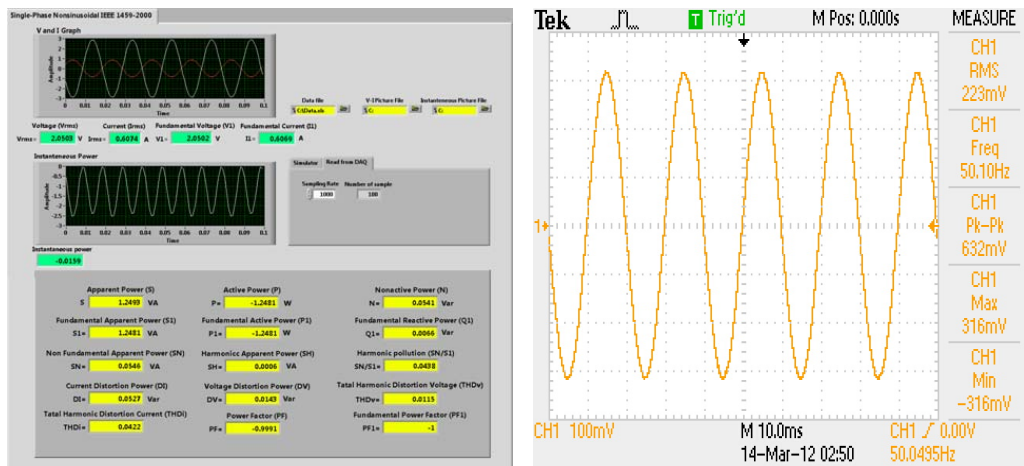
ภาพประกอบ 4-16 เปรียบเทียบความถี่ 50 Hz ทรานสดิวเซอร์กระแส LA 55-P ที่แรงดัน 12 โวลต์



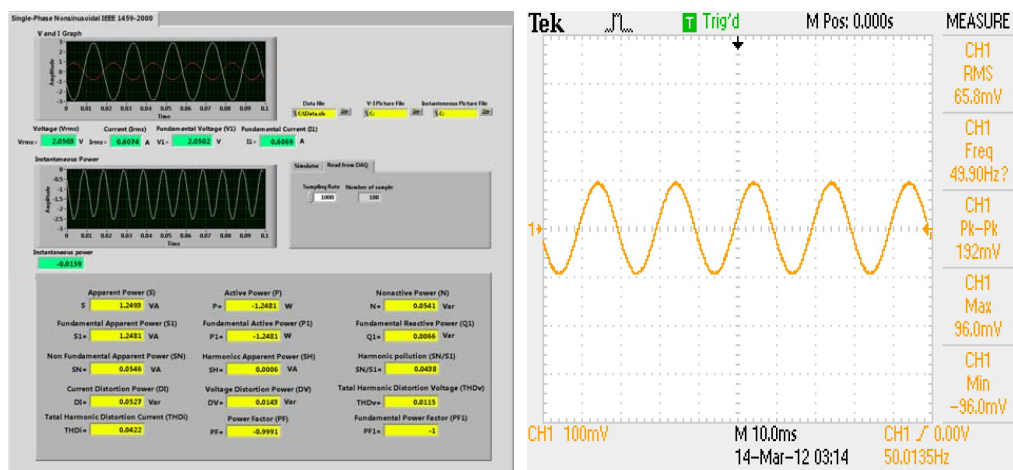
ภาพประกอบ 4-17 เปรียบเทียบความถี่ 50 Hz ทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P ที่แรงดัน 42 โวลต์



ภาพประกอบ 4-18 เปรียบเทียบความถี่ 50 Hz ทรานสดิวเซอร์กระแส LA 55-P ที่แรงดัน 42 โวลต์



ภาพประกอบ 4-19 เปรียบเทียบความถี่ 50 Hz ทรานสิฟอเมอร์แรงดัน LV 25-P ที่แรงดัน 220 โวลต์



ภาพประกอบ 4-20 เปรียบเทียบที่ความถี่ 50 Hz ทรานสิฟอเมอร์กระแส LA 55-P แรงดัน 220 โวลต์ ตารางที่ 4-5 การบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดแบบเสมือนเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปโดยปรับแหล่งจ่ายแรงดันที่ 12, 42, 220 โวลต์ ที่โหลดค่าความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์ ที่ความถี่ 50 Hz จากทรานสิฟอเมอร์แรงดัน LV 25-P

แหล่งจ่ายแรงดัน V_1 (V)	แรงดันด้านขาออกจาก LabVIEW : V_2 (V)	แรงดันด้านขาออกจาก Oscilloscope : V_2 (V)
12	0.0121	0.011
42	0.041	0.042
220	0.221	0.223

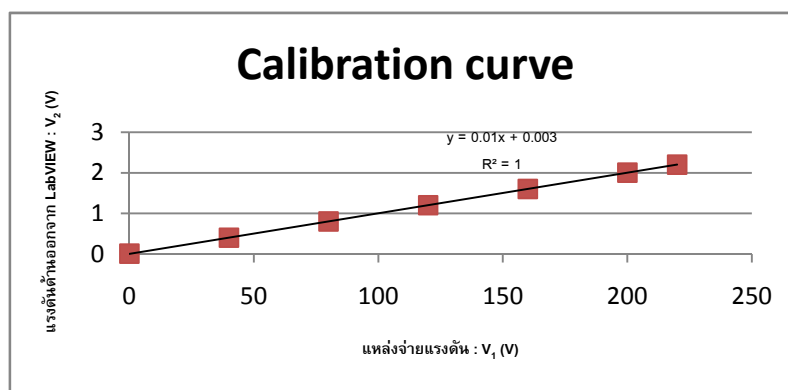
ตารางที่ 4-6 การบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดแบบเสมือนเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปโดยปรับแหล่งจ่ายแรงดันที่ 12, 42, 220 โวลต์ ที่โหลดค่าความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์ ที่ความถี่ 50 Hz ทรานควิเซอร์กระแส LA 55-P

แหล่งจ่ายแรงดัน V_1 (V)	กระแสจากโหลด (LabVIEW : A)	แรงดันด้านขาออกจาก Oscilloscope : V_3 (V)
12	0.0043	0.004
42	0.012	0.012
220	0.066	0.065

จากภาพประกอบ 4-15 ถึง 4-20 เป็นการสอบเทียบผลที่ได้ของเครื่องมือวัดเสมือนที่สร้างขึ้นกับผลที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป โดยการสร้างสัญญาณแรงดันที่ 12 โวลต์ 42 โวลต์ และ 220 โวลต์ โดยใช้โหลดความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์ ตามที่ต้องการเปรียบเทียบแล้วป้อนสัญญาณแรงดันเข้าออสซิลโลสโคปกับเครื่องมือวัดแบบเสมือน เพื่อทำการเปรียบเทียบความเที่ยงตรง ผลปรากฏว่าค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดแบบเสมือนกับผลที่ได้จากออสซิลโลสโคปที่ระดับแรงดันที่กำหนด นั้นมีค่าแรงดันที่วัดได้แปลงผันในลักษณะที่เพิ่มขึ้นตามระดับแรงดันที่จ่าย เมื่อทำการพิจารณา จากตาราง 4-5 และ 4-6 เปรียบเทียบผลการวัดค่าจากออสซิลโลสโคปกับเครื่องมือวัดแบบเสมือนโดยพิจารณาที่ทรานควิเซอร์แรงดัน LV 25-P มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดอยู่ที่ 1.62 ส่วนเปรียบเทียบผลการวัดค่าจากออสซิลโลสโคปกับเครื่องมือวัดแบบเสมือนโดยพิจารณาที่ทรานควิเซอร์กระแส LA 55-P มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดอยู่ที่ 0.050 ดังนั้น ในการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่มีการเปลี่ยนแปลงนี้ เพื่อเขียนสมการความสัมพันธ์และสอบเทียบการทำงานระหว่างโปรแกรม LabVIEW กับทรานควิเซอร์แรงดันและทรานควิเซอร์กระแส เพื่อให้เกิดความถูกต้องในการวัดค่าปริมาณกำลังไฟฟ้ามากขึ้นอีกครั้ง จึงต้องทำการเขียนสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นที่เกิดขึ้นจากการเปรียบเทียบค่าแรงดันระหว่างโปรแกรม LabVIEW และค่าระดับแรงดันที่ปรับขึ้นไปเพื่อให้ผลการวัดค่านั้นเกิดความถูกต้อง จากตาราง 4-7 และ 4-8

ตารางที่ 4-7 การบันทึกค่าแรงดัน ไฟฟ้าที่วัดได้จากทรานดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P โดยปรับ แหล่งจ่ายแรงดันที่ 0 - 220 โวลต์ ที่โหลดค่าความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์

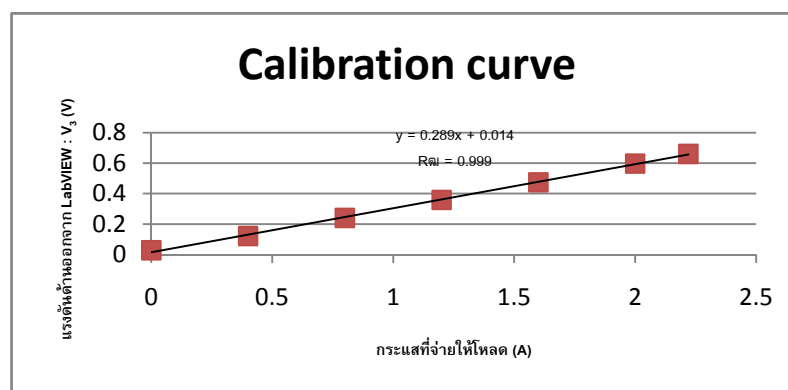
แหล่งจ่ายแรงดัน V_1 (V)	แรงดันด้านขาออกจาก LabVIEW : V_2 (V)	แรงดันด้านขาออกจาก Oscilloscope : V_2 (V)
0	0.0072	0.0013
40	0.04	0.0409
80	0.08	0.0812
120	0.1202	0.122
160	0.16	0.163
200	0.2	0.203
220	0.22	0.222



ภาพประกอบ 4-21 สอบเทียบทรานดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P แรงดัน 0 - 220 โวลต์ ร่วมกับ โปรแกรม LabVIEW เพื่อหาความสัมพันธ์ในการวัดค่าปริมาณไฟฟ้า

ตารางที่ 4-8 การบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากทรานสดิวเซอร์กระแส LA 55-P โดยปรับแหล่งจ่ายแรงดันที่ 0 - 220 โวลต์ ที่โหลดค่าความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์

กระแสที่จ่ายให้โหลด (A)	แรงดันด้านขาออกจาก LabVIEW : V_3 (V)	แรงดันด้านขาออกจาก Oscilloscope : V_3 (V)
0	0.0027	0.0038
0.4	0.012	0.012
0.8	0.024	0.024
1.2	0.035	0.035
1.6	0.047	0.047
2	0.059	0.059
2.22	0.066	0.066



ภาพประกอบ 4-22 สอบเทียบทรานสดิวเซอร์กระแส LA 55-P แรงดัน 0 - 220 โวลต์ ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW เพื่อหาความสัมพันธ์ในการวัดค่าปริมาณไฟฟ้า

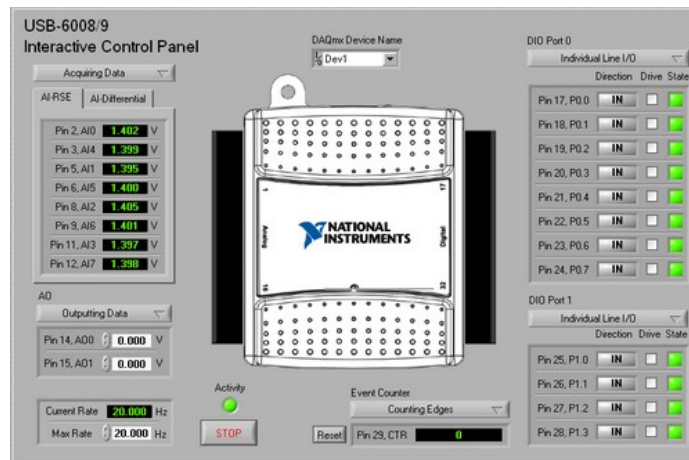
4.4 ผลการวัดค่าปริมาณกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 กับโหลดพื้นฐานและโหลดไม่ เป็นเชิงเส้น

เมื่อทำการทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าร่วมกับโปรแกรม LabVIEW เป็นที่เรียบร้อยแล้ว นำสมการความสัมพันธ์และสอบเทียบการทำงานระหว่างโปรแกรม LabVIEW กับอุปกรณ์ตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้า ไปทำการปรับปรุงค่าองค์ประกอบสัญญาณที่ได้วัดมา จากการ์ด A/D โดยนำสมการดังกล่าวไปเขียนลงในส่วนโปรแกรม LabVIEW เพื่อการวัดค่าปริมาณ กำลังไฟฟ้าที่ได้ มีความถูกต้องแม้ว่าลักษณะของสัญญาณที่อุปกรณ์ตรวจจับแรงดันและ กระแสไฟฟ้าจะวัดออกมามีความผิดเพี้ยน โดยขั้นตอนต่อไปเมื่อทำการทวนสอบความสัมพันธ์ ระหว่างอุปกรณ์ตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าและโปรแกรม LabVIEW เรียบร้อยแล้วก็จะนำ อุปกรณ์ตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้ารวมถึงโปรแกรม LabVIEW ที่ออกแบบนี้ ไปทำการวัด ค่ากับ โหลดพื้นฐานและ โหลดไม่เชิงเส้นที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้าชนิด 1 เฟส ตามที่ได้ทำการ กำหนดไว้ในเบื้องต้นโดยเริ่มจากการจำลองโหลดพื้นฐาน เช่น ค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำ จากนั้นทดลองกับ โหลดไม่เชิงเส้นในระบบ ไฟฟ้า 1 เฟส เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ เต้าอบไมโครเวฟ และเครื่อง เชื่อมไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์ ซึ่งผลการวัด ดังตารางที่ 4-13 ถึง ตารางที่ 4-16

4.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย

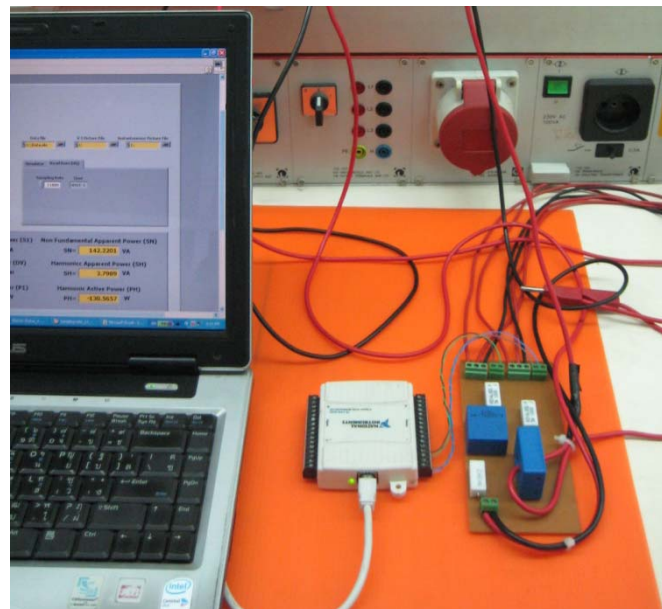
งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม LabVIEW 8.6 เป็นตัวสร้างเครื่องมือโดยเขียนโปรแกรม สำหรับสร้างเครื่องมือวัดเสมือน เพื่อใช้ในการวัดค่าปริมาณกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 โดยการจับสัญญาณแรงดันจากทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P และกระแสไฟฟ้าจากทรานสดิว เซอร์กระแส LA 55-P จากระบบไฟฟ้า 1 เฟสภายใต้สภาวะโหลดไม่เชิงเส้น ที่เป็นสัญญาณ อนาล็อก นำเข้าพอร์ทอนาล็อกของการ์ด A/D แล้วส่งผ่านไปยังเครื่องมือวัดแบบเสมือนและ แสดงผลของสัญญาณที่วัดได้ทั้งในส่วนของสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้ากำลังสองเฉลี่ย ประสิทธิภาพ (Voltage and Current RMS) ค่ากำลังไฟฟ้าชั่วขณะ (Instantaneous power) รวมถึง แสดงปริมาณกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้จากสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ทางมอนิเตอร์ของเครื่องมือวัดแบบเสมือน โดยมีอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

4.4.1.1 แบบจำลอง USB 6009 Interactive Control Panel



ภาพประกอบ 4-23 แบบจำลอง USB 6009 Interactive Control Panel .vi

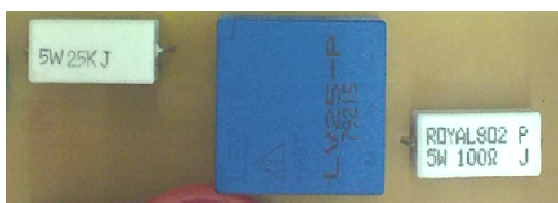
จากภาพประกอบ 4-23 เป็นแบบจำลองการวัดค่าด้วยเครื่องมือวัดแบบเสมือนที่สร้างขึ้นโดยใช้ USB 6009 Interactive Control Panel .vi เป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ในการรับค่าสัญญาณอนาล็อกมาประมวลผลและทำการแสดงผลบนมอนิเตอร์ของโปรแกรม LabVIEW ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบการแสดงผลได้หลากหลายขึ้นอยู่กับลักษณะงาน



ภาพประกอบ 4-24 การ์ด A/D USB 6009 Interactive Control Panel ใช้วัดค่าร่วมกับทรานสดิวเซอร์แรงดัน LV 25-P และกระแสไฟฟ้าจากทรานสดิวเซอร์กระแส LA 55-P

4.4.1.2 อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแรงดัน

จากบทที่ 3 ในการวัดค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้านั้น จะใช้ทรานควิเซอร์แรงดัน LV 25-P ซึ่งเป็นทรานควิเซอร์แบบ Closed loop (compensated) โดยใช้หลักการของ Hall effect sensor มีพิกัดกระแสด้านเข้า 10 A กระแสด้านออก 25 A ได้ทำการออกแบบวงจรประกอบการวัด โดยการกำหนดค่าความต้านทาน R_1 ไว้ที่ 25 k Ω และค่าความต้านทาน R_m ที่ 100 Ω ดังภาพประกอบ 4-25



ภาพประกอบ 4-25 ทรานควิเซอร์แรงดัน LV 25-P

4.4.1.3 อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแส

จากบทที่ 3 ในการวัดค่าสัญญาณกระแสไฟฟ้านั้น จะใช้ทรานควิเซอร์กระแส LA 55-P จะเป็นทรานควิเซอร์แบบ Closed loop compensated โดยใช้หลักการของ Hall effect sensor ซึ่งทรานควิเซอร์กระแส LA 55-P ค่าพิกัดกระแสของหม้อแปลงกระแส เท่ากับ 5 แอมแปร์ ส่วนของค่ากระแสทางด้านออกนั้นต้องแปลงจากค่าของแรงดันที่วัดได้จากค่าความต้านทาน R_6 ซึ่งค่าความต้านทาน R_6 ได้ทำการออกแบบวงจรประกอบการวัดโดยการกำหนดค่าความต้านทาน R_6 ไว้ที่ 100 Ω ดังภาพประกอบที่ 4-26

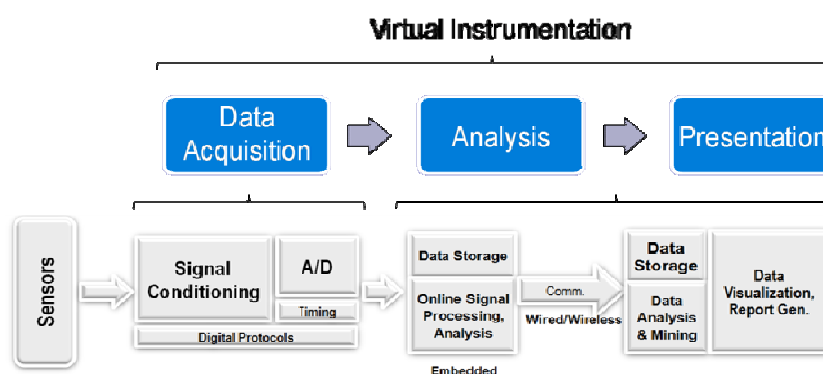


ภาพประกอบ 4-26 ทรานควิเซอร์กระแส LA 55-P

4.4.1.4 การจำลองเครื่องมือวัดปริมาณกำลังไฟฟ้าจาก LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) คือเครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนา Application (โปรแกรมประยุกต์) ชนิดหนึ่งเช่นเดียวกับ Visual Basic, Visual C++ แต่จะเป็นการเขียนโปรแกรมโดยใช้รูปแบบในการพัฒนาแบบกราฟิก (Graphical-based programming) ซึ่งจะแตกต่างจาก Text-based Programming นั่นคือ Text-base จะทำงานจากบนลงล่าง แต่ LabVIEW จะทำงานแบบ Dataflow ดังภาพประกอบ 4-27

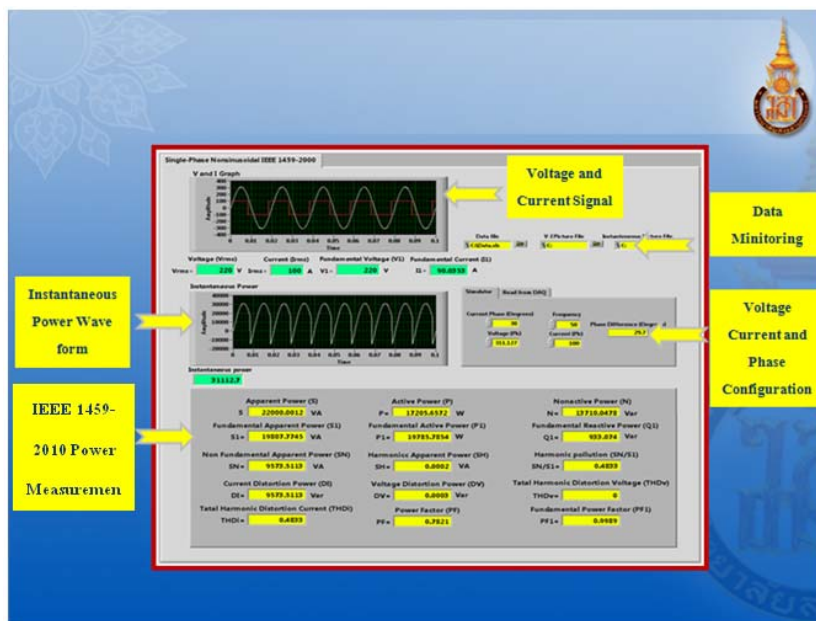
การใช้งานโปรแกรม LabVIEW จะเน้นไปในทางติดต่อกับเครื่องมือหรือทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ที่ใช้ในการวัดค่าสัญญาณทางกายภาพต่าง ๆ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม LabVIEW ถูกเรียกว่า Virtual Instrument หรือเรียกย่อ ๆ ว่า VI ซึ่งจะหมายถึงเครื่องมือวัดแบบเสมือน ซึ่งหลักการดังกล่าวสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ



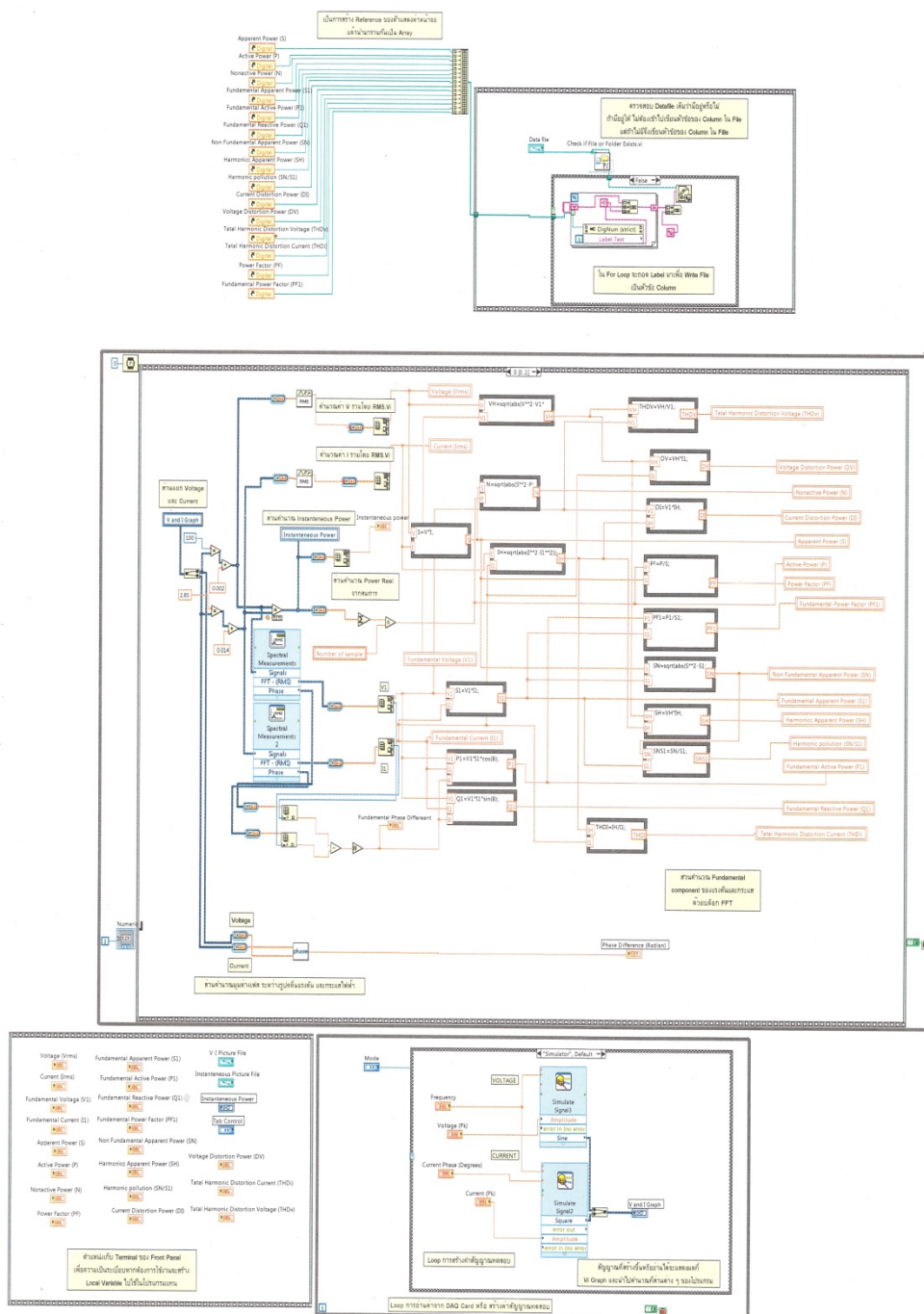
ภาพประกอบ 4-27 หลักการทำงานของโปรแกรม LabVIEW

1. Acquisition เป็นส่วนที่รับข้อมูล (Input) จากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์โดยข้อมูลที่ได้อาจมาจากการ์ด DAQ (สำหรับสัญญาณทางไฟฟ้า) การ์ด IMAQ (สำหรับข้อมูลประเภทรูปภาพ) และ GPIB (สำหรับควบคุมเครื่องมือวัด)
2. Analysis เป็นส่วนที่รับข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ ซึ่งจะแสดงผลในรูปแบบที่สื่อความหมายในสิ่งที่ผู้ใช้งานสามารถนำไปแสดงแทนสื่อที่วัดหรือใช้งานได้
3. Presentation เป็นการแสดงผลที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งาน โดยอาจแสดงบนหน้าจคอมพิวเตอร์ เช่น DMM (Digital Multimeter) แสดงผลสัญญาณที่วัดได้โดยไม่จำเป็นต้องรู้ความสัมพันธ์กับเวลา หรือ Oscilloscope แสดงผลของข้อมูลที่สัมพันธ์กับเวลา หรือ Spectrum Analyzer จะแสดงผลสัญญาณในรูปแบบของความถี่

จากการศึกษาโปรแกรม LabVIEW สามารถทำการออกแบบและเขียนโปรแกรม ให้ได้หน้าจอแสดงผลที่ Front panel เป็นเครื่องมือวัดเสมือน โดยสามารถวัดค่าต่าง ๆ ได้ดัง ภาพประกอบ 4-28 และแสดงโปรแกรมสร้างเครื่องมือวัดเสมือน ดังภาพประกอบ 4-29



ภาพประกอบ 4-28 การจำลองเครื่องมือวัดปริมาณกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010

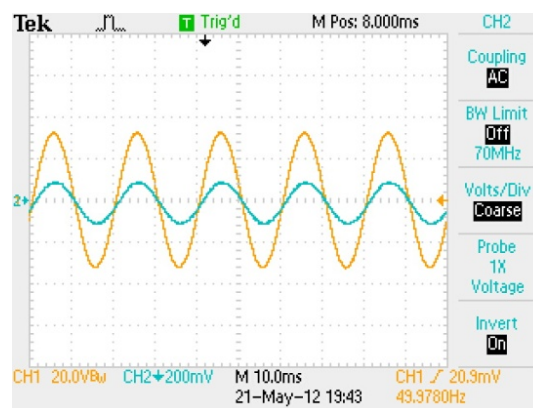


ภาพประกอบ 4-29 โปรแกรมสร้างเครื่องมือวัดเสมือนด้วยโปรแกรม LabVIEW

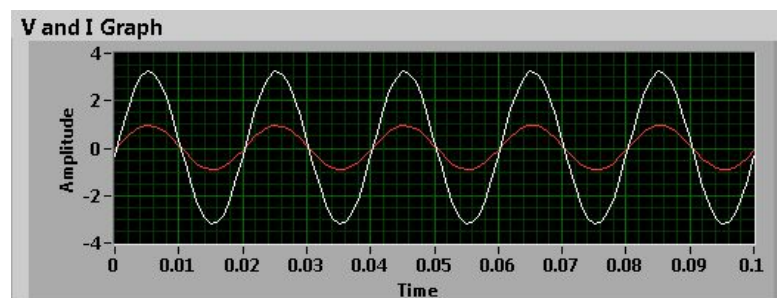
จากบทที่ 3 การทำงานของโปรแกรมเครื่องมือวัดเสมือนเพื่อใช้ในการวัดค่าปริมาณกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 สามารถแบ่งการทำงานของโปรแกรมออกเป็น 5 ส่วนประกอบด้วย ส่วนที่ 1 คือ ส่วนการอ่านค่าสัญญาณที่ต้องการวัดจากการ์ดประมวล (NI DAQ USB 6009) และการสร้างสัญญาณทดสอบ ส่วนที่ 2 คือ ส่วนการเก็บบล็อกแสดงผลของโปรแกรม LabVIEW ส่วนที่ 3 คือ ส่วนอ้างอิงที่เชื่อมโยงกับส่วนแสดงผลเพื่อใช้ในการบันทึกค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้ ส่วนที่ 4 คือ ส่วนสมการการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ส่วนที่ 5 คือ ส่วนแสดงผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ซึ่งองค์ประกอบทั้งหมดจะทำงานสัมพันธ์กัน ดังภาพประกอบ 3-5 ในบทที่ 3

4.4.2 ผลการวัดโหลดพื้นฐาน

ทำการวัดค่ากับโหลดมาตรฐานในห้องทดลอง เช่น ค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความต้านทานร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งผลการวัด ดังตารางที่ 4-9 ถึง ตารางที่ 4-11



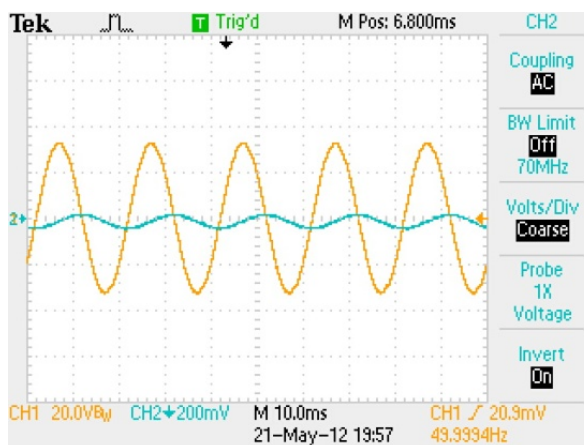
ภาพประกอบ 4-30 รูปคลื่นสัญญาณจากโหลดค่าความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์



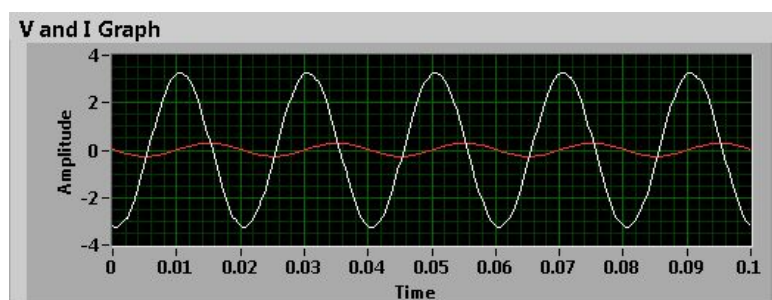
ภาพประกอบ 4-31 รูปคลื่นสัญญาณจากโหลดค่าความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์ บนโปรแกรม LabVIEW

ตารางที่ 4-9 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าโดยใช้ค่าความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์

ปริมาณ		Power Meter (Metrix: PX 120)	LabVIEW Power Measurement	% Error
Combined	V_{rms} (V)	230.1	230.1	0
	I_{rms} (A)	2.31	2.33	0.86
	P (W)	530.4	538.1	1.4
	S (VA)	530.4	538.1	1.4
	Q (Var)	0	17.2	NA
	P_F	1	1	0
Fundamental	V_1 (V)	-	230	NA
	I_1 (A)	-	2.32	NA
	P_1 (W)	-	534.12	NA
	S_1 (VA)	-	534.12	NA
	Q_1 (Var)	-	2.49	NA
	P_{F1}	-	1	NA
Nonfundamental	S_N (VA)	-	11.256	NA
	S_H (VA)	-	0.089	NA
	D_I (Var)	-	9.64	NA
	D_V (Var)	-	4.27	NA
	THD _I	-	0.0175	NA
	THD _V	-	0.0078	NA
	S_N/S_1	-	0.0191	NA



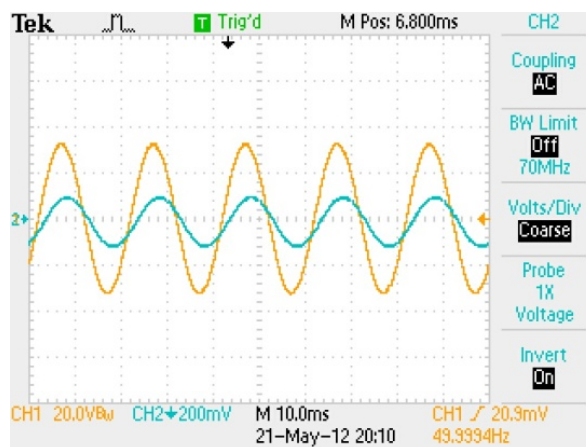
ภาพประกอบ 4-32 ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณจากใช้โหลดค่าความเหนี่ยวนำ 6.0 เฮนรี่ 0.25 แอมแปร์



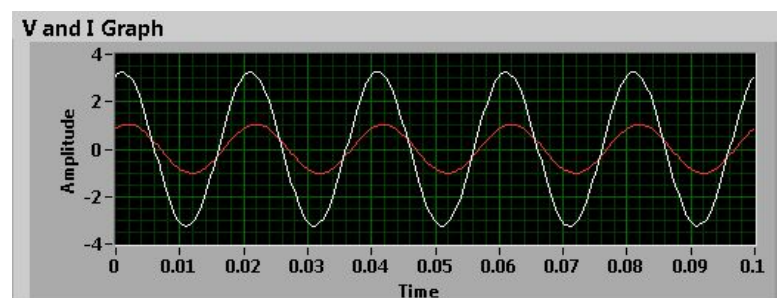
ภาพประกอบ 4-33 ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณจากใช้โหลดค่าความเหนี่ยวนำ 6.0 เฮนรี่ 0.25 แอมแปร์ บนโปรแกรม LabVIEW

ตารางที่ 4-10 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าโดยใช้ค่าความเหนี่ยวนำ 6.0 เฮนรี 0.25 แอมแปร์

ปริมาณ		Power Meter (Metrix: PX 120)	LabVIEW Power Measurement	% Error
Combined	V_{rms} (V)	230.1	230.3	0.086
	I_{rms} (A)	0.67	0.68	1.49
	P (W)	25.4	22.1	0.12
	S (VA)	155	158.6	2.32
	Q (Var)	153.1	157	2.54
	P_F	0.16	0.183	0.12
Fundamental	V_1 (V)	-	230.2	NA
	I_1 (A)	-	0.68	NA
	P_1 (W)	-	29.52	NA
	S_1 (VA)	-	160.05	NA
	Q_1 (Var)	-	157.31	NA
	P_{F1}	-	0.184	NA
Nonfundamental	S_N (VA)	-	19.436	NA
	S_H (VA)	-	0.912	NA
	D_V (Var)	-	17.54	NA
	D_V (Var)	-	8.324	NA
	THD _I	-	0.109	NA
	THD _V	-	0.052	NA
	S_N/S_1	-	0.121	NA



ภาพประกอบ 4-34 ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณจากความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์ กับค่าความเหนี่ยวนำ 6.0 เฮนรี 0.25 แอมแปร์



ภาพประกอบ 4-35 ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณจากความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์ กับค่าความเหนี่ยวนำ 6.0 เฮนรี 0.25 แอมแปร์ บนโปรแกรม LabVIEW

ตารางที่ 4-11 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าโดยใช้ค่าความต้านทาน 100 โอห์ม 1.8 แอมแปร์ ค่าความเหนี่ยวนำ 6.0 เฮนรี 0.25 แอมแปร์

ปริมาณ		Power Meter (Metrix: PX 120)	LabVIEW Power Measurement	% Error
Combined	V_{rms} (V)	230.1	230	0.04
	I_{rms} (A)	2.51	2.53	0.79
	P (W)	555.6	564.4	1.58
	S (VA)	575.3	583.4	1.4
	Q (Var)	158.1	151.1	4.42
	P_F	0.96	0.96	0
Fundamental	V_1 (V)	-	229.98	NA
	I_1 (A)	-	2.51	NA
	P_1 (W)	-	556.83	NA
	S_1 (VA)	-	577.23	NA
	Q_1 (Var)	-	153.78	NA
	P_{F1}	-	0.97	NA
Nonfundamental	S_N (VA)	-	18.437	NA
	S_H (VA)	-	0.217	NA
	D_I (Var)	-	16.729	NA
	D_V (Var)	-	7.746	NA
	THD _I	-	0.028	NA
	THD _V	-	0.013	NA
	S_N/S_1	-	0.03	NA

จากการทดลองวัดค่ากำลังไฟฟ้าจากโหนดค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความต้านทานร่วมกับค่าความเหนี่ยวนำนั้น ดังตาราง 4-9 ถึง 4-11 ผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าความผิดพลาดจากการวัดเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดค่ากำลังไฟฟ้ามาตรฐาน Metrix PX 120 ซึ่งสามารถวัดค่ากำลังไฟฟ้าได้เพียงองค์ประกอบกำลังไฟฟ้าหลัก เช่น ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้ากำลังสองเฉลี่ยประสิทธิภาพ กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าเสมือน กำลังไฟฟ้าปรากฏ และค่าตัวประกอบกำลัง ผลการวัดที่ได้เมื่อมีการเปรียบเทียบมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 1.02 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น การวัดค่ากำลังไฟฟ้าด้วยโหนดมาตรฐานลักษณะดังกล่าว เพื่อเป็นการพิสูจน์ลักษณะของรูปคลื่นที่เกิดขึ้นตามหลักการและผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าว่าเป็นไปตามหลักการหรือไม่ เพื่อใช้เป็นค่าในการสอบเทียบก่อนทำการวัดค่าจากโหนดไม่เชิงเส้น ในรูปแบบต่าง ๆ ต่อไป

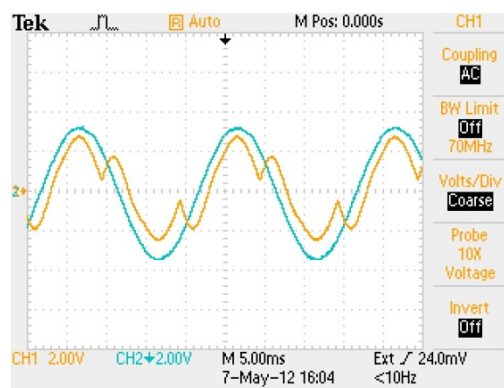
4.4.3 ผลการวัดโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

การไฟฟ้าทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่เป็นรูปคลื่นไซน์ให้กับโหลดประเภทต่าง ๆ ของผู้ใช้ไฟแต่ในกรณีในระบบไฟฟ้าที่ผู้ใช้ไฟฟ้าบางรายมีโหลดประเภทไม่เชิงเส้น (Nonlinear load) ซึ่งโหลดดังกล่าวเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก กระแสฮาร์มอนิกนั้นจะไหลเข้าสู่ระบบของผู้ใช้ไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าที่อยู่ใกล้เคียง ผลของกระแสฮาร์มอนิกจะทำให้เกิดแรงดันในระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้นไป จากรูปคลื่นไซน์ และขนาดของกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่ต่าง ๆ ผลของกระแสฮาร์มอนิก ดังกล่าวไหลเข้าสู่ระบบใกล้เคียง ทำให้ไปรบกวนหรือสร้างความเสียหายให้แก่อุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่น ๆ หรืออุปกรณ์ในระบบของการไฟฟ้าได้ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่ต้องทราบว่าโหลดที่อยู่ในบ้านเรือน อาคารสำนักงาน หรือโรงงานอุตสาหกรรม นั้นมีลักษณะเป็นโหลดไม่เชิงเส้น ซึ่งเป็นสาเหตุหรือต้นกำเนิดของฮาร์มอนิก เพื่อทำการวิเคราะห์ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นและส่งผลกระทบต่อการใช้ปริมาณกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งสามารถแบ่งแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกตามคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ได้ ดังนี้

1. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีทั่วไปในบ้านสำนักงานส่วนใหญ่เป็นชนิด 1 เฟส

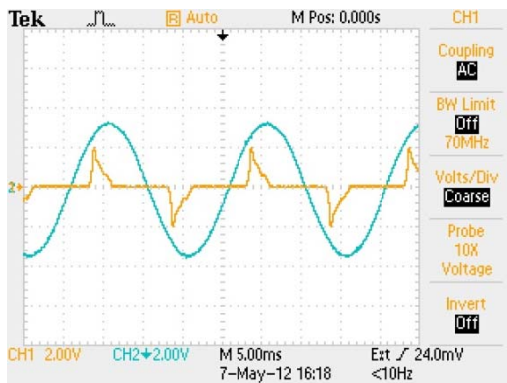
- อุปกรณ์ที่มีการให้ความร้อนแบบแผ่คลื่นย่านความถี่ เช่น เตาอบ

ไมโครเวฟ



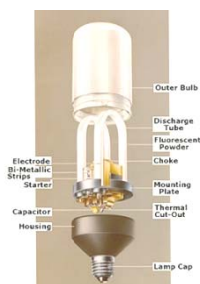
ภาพประกอบ 4-36 ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณและค่าความถี่ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากการใช้เตาอบไมโครเวฟ

- อุปกรณ์ที่มีวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนประกอบ เช่น บาลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ เครื่องทำน้ำอุ่น



ภาพประกอบ 4-37 ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณและค่าความถี่ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ที่มีวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนประกอบ

โหลดไม่เชิงเส้นที่ใช้ในการทดลองวิจัยนี้ คือ เครื่องคอมพิวเตอร์ หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ เต้าอบไมโครเวฟ และเครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์เพื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่วัดได้ตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ในแต่ละชนิดของโหลด ดังภาพ 4-37 และ 4-38



The Right Solution
FOR EVERY REQUIREMENT

UNIQUE EXPERTISE FROM OVER 50 YEARS OF EXPERIENCE.

EWM LIGHTING WELDING
SIMPLY MORE

PICO 162

	MMA	TIG
Setting Range	30 - 150 A	100 - 160 A
Welding Current	20 A / 26V	10 A / 16.4V
Welding Voltage	150 A / 50%	160 A / 45%
Duty Cycle at 20 °C	100 A / 100%	120 A / 100%
	150 A / 35%	160 A / 30%
Duty Cycle at 40 °C	100 A / 60%	130 A / 50%
Open Circuit Voltage	100 A / 100%	100 A / 100%
Mean Voltage (50/60 Hz) / Tolerance	1 x 230 V (-10% - +5%)	
Mains Fuse	1 x 16 A	
Max. Power Consumption	6 kVA	
Recommended Generator Power	2.1 kVA	
Efficiency / COS φ	88% / 0.98	
Protection Classification	IP 23	
Isolation Class	F	
Dimensions (L x W x H) mm	385 x 116 x 224	
Weight Approx	4.8 kg	
Standards / Regulations	VDE 0544, EN 60974-1, S - Symbol, CE, IP 23	



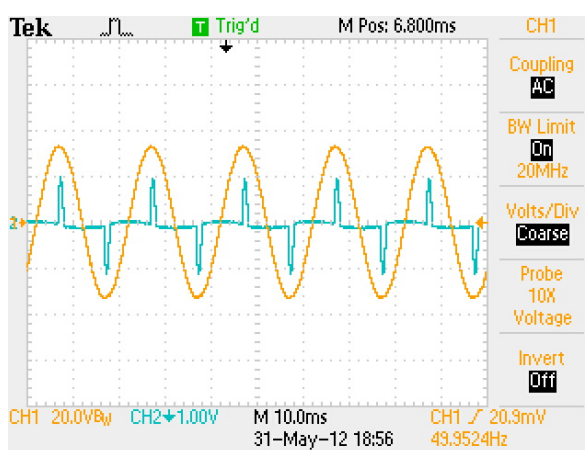
ภาพประกอบ 4-38 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้วัดปริมาณกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010



ภาพประกอบ 4-39 หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ สำหรับการทดลองวัดปริมาณกำลังไฟฟ้า

4.4.3.1 โหลดคอมพิวเตอรส์ส่วนบุคคล

ทำการวัดค่ากับโหลดไม่เชิงเส้นจริงที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้าชนิด 1 เฟส ตามที่ได้ทำการกำหนดไว้ในเบื้องต้น คือ คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ และเตาอบไมโครเวฟ และเครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์ ซึ่งผลการวัดที่ได้นั้น ดังตารางที่ 4-12 ถึงตารางที่ 4-15

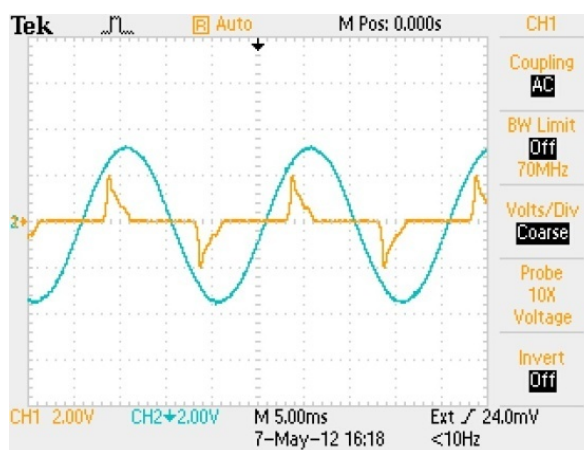


ภาพประกอบ 4-40 ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณและค่าความถี่ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากการใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

ตารางที่ 4-12 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าโดยใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

ปริมาณ		Power Meter (Metrix: PX 120)	LabVIEW Power Measurement	% Error
Combined	V_{rms} (V)	233.3	233.4	0.04
	I_{rms} (A)	0.921	0.968	0.51
	P (W)	103.6	103.4	0.19
	S (VA)	219	219.7	0.31
	Q (Var)	194.2	194.7	0.25
	P_F	0.47	0.45	0.42
Fundamental	V_1 (V)	-	233.1	NA
	I_1 (A)	-	0.462	NA
	P_1 (W)	-	100.2	NA
	S_1 (VA)	-	106.4	NA
	Q_1 (Var)	-	33.52	NA
	P_{F1}	-	0.94	NA
Nonfundamental	S_N (VA)	-	191.97	NA
	S_H (VA)	-	5.97	NA
	D_1 (Var)	-	191.55	NA
	D_V (Var)	-	0.749	NA
	THD_I	-	1.809	NA
	THD_V	-	0.011	NA
	S_N/S_1	-	1.812	NA

4.4.3.2 โหลดหลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์

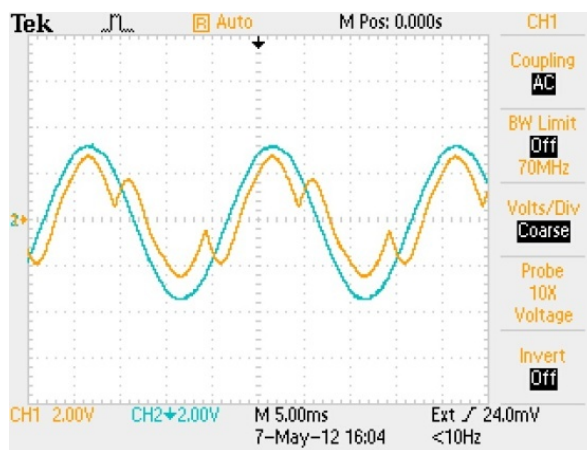


ภาพประกอบ 4-41 ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณและค่าความถี่ฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นจากการใช้หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ 247 วัตต์

ตารางที่ 4-13 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าโดยใช้หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ 247 วัตต์

ปริมาณ		Power Meter (Metrix: PX 120)	LabVIEW Power Measurement	% Error
Combined	V_{rms} (V)	233.3	233.4	0.04
	I_{rms} (A)	1.75	1.78	0.17
	P (W)	243.8	242.9	0.36
	S (VA)	417.1	417.2	0.02
	Q (Var)	332.1	340.1	2.4
	P_F	0.6	0.58	0.33
Fundamental	V_1 (V)	-	233.1	NA
	I_1 (A)	-	1.72	NA
	P_1 (W)	-	241.16	NA
	S_1 (VA)	-	265.76	NA
	Q_1 (Var)	-	113.83	NA
	P_{F1}	-	0.906	NA
Nonfundamental	S_N (VA)	-	305.16	NA
	S_H (VA)	-	6.231	NA
	D_I (Var)	-	304.63	NA
	D_V (Var)	-	6.357	NA
	THD_I	-	1.137	NA
	THD_V	-	0.029	NA
	S_N/S_1	-	1.139	NA

4.4.3.3 โหลดเตอบไมโครเวฟ

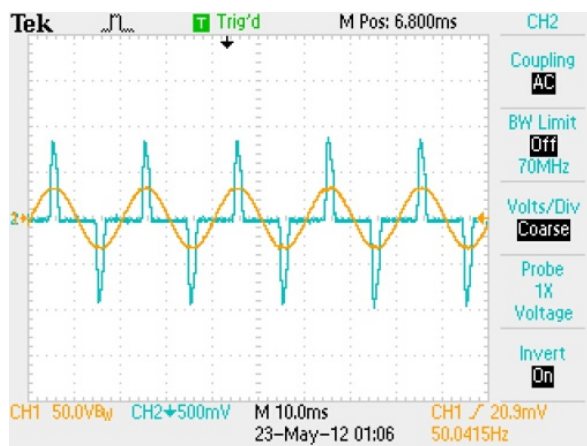


ภาพประกอบ 4-42 ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณและค่าความถี่ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากการใช้เตอบไมโครเวฟ 800 วัตต์

ตารางที่ 4-14 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าโดยใช้เตาอบไมโครเวฟ 800 วัตต์

ปริมาณ		Power Meter (Metrix: PX 120)	LabVIEW Power Measurement	% Error
Combined	V_{rms} (V)	233.3	233.3	0
	I_{rms} (A)	5.41	5.44	0.55
	P (W)	1075	1073	0.18
	S (VA)	1214	1220	0.49
	Q (Var)	601.9	601.9	0
	P_F	0.88	0.88	0
Fundamental	V_1 (V)	-	233.1	NA
	I_1 (A)	-	5.174	NA
	P_1 (W)	-	1074.2	NA
	S_1 (VA)	-	1091	NA
	Q_1 (Var)	-	359.59	NA
	P_{F1}	-	0.97	NA
Nonfundamental	S_N (VA)	-	369.71	NA
	S_H (VA)	-	20.767	NA
	D_1 (Var)	-	353.32	NA
	D_V (Var)	-	64.53	NA
	THD _I	-	0.337	NA
	THD _V	-	0.041	NA
	S_N/S_1	-	0.332	NA

4.4.3.4 โหลดเครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์



ภาพประกอบ 4-43 ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณและค่าความถี่ฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นจากการใช้เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์ (Pico 162)

ตารางที่ 4-15 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าโดยใช้เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์ (Pico 162)

ปริมาณ		Power Meter (Metrix: PX 120)	LabVIEW Power Measurement	% Error
Combined	V_{rms} (V)	233.3	233.3	0
	I_{rms} (A)	OL	10.1	NA
	P (W)	OL	1509.1	NA
	S (VA)	OL	2685.3	NA
	Q (Var)	OL	1760.1	NA
	P_F	OL	0.58	NA
Fundamental	V_1 (V)	-	228.62	NA
	I_1 (A)	-	6.256	NA
	P_1 (W)	-	1410.4	NA
	S_1 (VA)	-	1430.34	NA
	Q_1 (Var)	-	237.998	NA
	P_{F1}	-	0.98	NA
Nonfundamental	S_N (VA)	-	1866.714	NA
	S_H (VA)	-	48.074	NA
	D_I (Var)	-	1865.73	NA
	D_V (Var)	-	36.855	NA
	THD_I	-	1.304	NA
	THD_V	-	0.025	NA
	S_N/S_1	-	1.305	NA

จากการทดลองวัดค่ากำลังไฟฟ้าจากเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ เตอบไมโครเวฟ และเครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์ จากตาราง 4-12 ถึง 4-15 ผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าความผิดพลาดจากการวัดเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดค่ากำลังไฟฟ้ามาตรฐาน Metrix PX120 ซึ่งสามารถวัดค่ากำลังไฟฟ้าได้เพียงองค์ประกอบกำลังไฟฟ้าหลัก เช่น ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้ากำลังสองเฉลี่ยประสิทธิภาพกำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าเสมือน กำลังไฟฟ้าปรากฏ และค่าตัวประกอบกำลัง ผลการวัดที่ได้มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 0.16 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึงสรุปผลการวิจัยที่ได้ดำเนินการสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งข้อเสนอแนะต่างๆ ที่จะเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยด้านวิเคราะห์และวัดคุณภาพกำลังไฟฟ้า

5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการพัฒนาเครื่องมือวัดแบบเสมือนสำหรับการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 การศึกษาและออกแบบเครื่องตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า การออกแบบและจำลองเครื่องมือวัดแบบเสมือนในการวัดค่าปริมาณกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 การทวนสอบสมการคณิตศาสตร์จากนิยามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 โดยการจำลองสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าในสถานะที่มีความผิดเพี้ยนรวมทั้งหาอัตราส่วนสัญญาณที่มีความเหมาะสม ทดสอบการทำงานระหว่างเครื่องตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้ากับเครื่องมือวัดแบบเสมือนที่สร้างขึ้น จากนั้นทำการทดลองภายใต้สถานะโหลดไม่เชิงเส้นชนิดต่าง ๆ หลายรูปแบบ เปรียบเทียบผลการวัดค่าปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ได้เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของโหลดไม่เชิงเส้นที่อยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง

ผลที่ได้รับจากการจำลองพบว่าเครื่องมือวัดแบบเสมือนในการวัดค่าปริมาณกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 สามารถวัดค่าปริมาณกำลังไฟฟ้าภายใต้สถานะโหลดไม่เชิงเส้นรูปแบบที่จำลองขึ้นนั้น ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่วัดได้ออกมาและลักษณะรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าจะเกิดความผิดเพี้ยนเนื่องจากคุณสมบัติของโหลดไม่เชิงเส้นที่ประกอบด้วยองค์ประกอบความถี่อื่น ๆ เข้ามาปะปน ซึ่งในการวัดค่าปริมาณกำลังไฟฟ้าในรูปแบบนี้จะมีค่าพารามิเตอร์ของอัตราส่วนและตัวอย่างข้อมูลมาเป็นส่วนประกอบหลักในการคำนวณด้วยว่ามีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด ต้องมีการพิจารณาส่วนของการ์ดที่มีอัตราส่วนที่จำกัด และความถี่อื่น ๆ ที่เข้ามาปะปน

สรุปผลการวิจัยการศึกษาและออกแบบเครื่องตรวจวัดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า การออกแบบและจำลองเครื่องมือวัดแบบเสมือนในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 การทวนสอบสมการคณิตศาสตร์ของมาตรฐาน IEEE 1459-2010 โดยการจำลองสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าในสถานะที่มีความผิดเพี้ยนรวมทั้งหาอัตราการสุ่มสัญญาณที่มีความเหมาะสม แล้วทำการวัดค่าโดยให้โหลดเป็นแบบไม่เชิงเส้น

1. การสร้างเครื่องมือวัดแบบเสมือนเพื่อใช้ในการวัดค่าปริมาณกำลังไฟฟ้ามีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ ส่วนค่าพื้นฐานของสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะประกอบด้วย การหาค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า (Voltage and Current Root Mean Square: RMS) และส่วนหาค่าองค์ประกอบของแรงดันและกระแสมูลฐานรวมทั้งมุมต่างเฟสระหว่างสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น (LabVIEW Fundamental Extraction) ส่วนคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010

2. จากการทวนสอบสมการความถูกต้องของมาตรฐาน IEEE 1459-2010 โดยใช้ อัตราสุ่มและจำนวนตัวอย่างที่แตกต่างกันผลการคำนวณที่ได้จะมีความถูกต้องที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับอัตราสุ่มที่เหมาะสมในการคำนวณ

3. ผลการคำนวณที่ได้จะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบความถี่ที่ปะปนมาซึ่งมีความแตกต่างกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการจำลองอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าต้องมีการทวนสอบและเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้ให้คงที่ก่อนทำการวัดร่วมกับโปรแกรม LabVIEW

2. ในการพัฒนาโปรแกรม LabVIEW สำหรับใช้ในการวัดค่าปริมาณกำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 นั้น ควรจะมีการเพิ่มองค์ประกอบการวัดค่าฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ รวมถึงการวิเคราะห์ด้านพลังงานอื่นควบคู่กันไปด้วยเพื่อให้งานการวัดมีความครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

3. ในอนาคตอาจมีการปรับปรุงระบบการวัดให้อยู่ในระบบเครือข่ายหรืออินเทอร์เน็ตเพื่อสามารถตรวจสอบคุณภาพและปริมาณกำลังไฟฟ้าในแต่ละส่วนของระบบได้ง่ายขึ้นและสามารถพัฒนารูปแบบการวัดได้หลากหลาย

บรรณานุกรม

- [1] วิบูลย์ ชื่นแขก, “ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2546.
- [2] กীরติ ชยะกุลศิริ, “สาเหตุและผลกระทบของฮาร์มอนิกส์” ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม, 2548.
- [3] IEEE power and energy society, “IEEE standard 1459-2010 definition for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, non sinusoidal, balance or unbalance condition”, Instrument and Measurement Technology Conference, PP.1-40, 2 February 2010.
- [4] A. Cataliotti, V. Cosentino, and S. Nuccio, “A time domain approach for IEEE Std 1459-2000 powers measurement in distorted and unbalanced power system”, Instrument and Measurement Technology Conference, Italy, Vol. 2, PP.1388-1393, 18-20 May 2004.
- [5] C. Gherasim, J. Van den Keybus, J. Driesen, and R. Belmans, “DSP implementation of power measurements according to the IEEE trial-use standard 1459”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 53, No.4, PP.1086-1092, August 2004.
- [6] C. N. Orfanos, and F. V. Topalis, “Single-phase virtual power and energy analyzer in compliance with IEEE Std 1459-2000 for harmonic measurement on discharge lamps”, Power Tech, 2005 IEEE Russia, PP.1-6, 27-30 June 2005.
- [7] C. Moreira, S.M. Deckmann, F.P. Marafao, E.G. De Lima, and M.A. Bini, “Virtual instrument applied to the implementation of IEEE Std. power definition”, Power Electronic Specialists Conference, PP.1712-1718, 16 June 2005.
- [8] A. Cataliotti, V. Cosentino, and S. Nuccio, “A virtual instrument for the measurement of IEEE Std. 1459-2000 Power Quantities”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 57, No.1, PP.85-94, January 2008.
- [9] Y. Huping, and B. Zhipeng, “The power quality monitoring system based on virtual instrument”, World Congress on Software Engineering, Vol. 4, PP.243-245, 19-21 May 2009.
- [10] A. F. Harvey, and M. Cerna, “The fundamentals of FFT-based signal analysis and measurement in LabVIEW and LabWindows”, Copyright National Instruments Corporation, PP.1-20, November 1993.

ภาคผนวก ก

ข้อมูลคุณลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้า LV25-P



Voltage Transducer LV 25-P

For the electronic measurement of voltages : DC, AC, pulsed..., with a galvanic isolation between the primary circuit (high voltage) and the secondary circuit (electronic circuit).



16084

Electrical data

I_{PN}	Primary nominal current rms	10	mA			
I_{PM}	Primary current, measuring range	0 ... ± 14	mA			
R_M	Measuring resistance	with ± 12 V	@ ± 10 mA _{maxi}	30	190	Ω
			@ ± 14 mA _{maxi}	30	100	Ω
	with ± 15 V	@ ± 10 mA _{maxi}	100	350	Ω	
		@ ± 14 mA _{maxi}	100	190	Ω	
I_{SN}	Secondary nominal current rms	25	mA			
K_N	Conversion ratio	2500 : 1000				
V_C	Supply voltage (± 5 %)	± 12 ... 15	V			
I_C	Current consumption	10 (@ ± 15 V) + I_S	mA			

Accuracy - Dynamic performance data

X_G	Overall Accuracy @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	@ ± 12 ... 15 V	± 0.9	%	
		@ ± 15 V (± 5 %)	± 0.8	%	
ϵ_L	Linearity error		< 0.2	%	
I_O	Offset current @ $I_p = 0$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	Typ	Maxi		
I_{OT}	Temperature variation of I_O	0°C ... + 25°C	± 0.06	± 0.25	mA
		+ 25°C ... + 70°C	± 0.10	± 0.35	mA
t_r	Response time ¹⁾ to 90 % of I_{PN} step		40	μs	

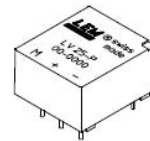
General data

T_A	Ambient operating temperature	0 ... + 70	°C
T_S	Ambient storage temperature	- 25 ... + 85	°C
R_P	Primary coil resistance @ $T_A = 70^\circ\text{C}$	250	Ω
R_S	Secondary coil resistance @ $T_A = 70^\circ\text{C}$	110	Ω
m	Mass	22	g
	Standards	EN 50178: 1997	

Note: ¹⁾ $R_1 = 25 \text{ k}\Omega$ (L/R constant, produced by the resistance and inductance of the primary circuit).

$$I_{PN} = 10 \text{ mA}$$

$$V_{PN} = 10..500 \text{ V}$$



Features

- Closed loop (compensated) voltage transducer using the Hall effect
- Insulated plastic case recognized according to UL 94-V0.

Principle of use

- For voltage measurements, a current proportional to the measured voltage must be passed through an external resistor R_s , which is selected by the user and installed in series with the primary circuit of the transducer.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low thermal drift
- Low response time
- High bandwidth
- High immunity to external interference
- Low disturbance in common mode.

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Power supplies for welding applications.

Application domain

- Industrial.



Voltage Transducer LV 25-P

Isolation characteristics

V_d	Rms voltage for AC isolation test, 50 Hz, 1 min	2.5 ²⁾	kV
\hat{V}_w	Impulse withstand voltage 1.2/50 μ s	16	kV
		Mini	
dCp	Creepage distance	19.5	mm
dCl	Clearance distance	19.5	mm
CTI	Comparative Tracking Index (Group IIIa)	175	

Note: ²⁾ Between primary and secondary.

Application examples

According to EN 50178 and IEC 61010-1 standards and following conditions:

- Over voltage category OV 3
- Pollution degree PD2
- Non-uniform field

	EN 50178	IEC 61010-1
dCp, dCl, \hat{V}_w	Rated isolation voltage	Nominal voltage
Single isolation	1600 V	1600 V
Reinforced isolation	800 V	800 V

Safety



This transducer must be used in electric/electronic equipment with respect to applicable standards and safety requirements in accordance with the manufacturer's operating instructions.



Caution, risk of electrical shock

When operating the transducer, certain parts of the module can carry hazardous voltage (eg. primary busbar, power supply).

Ignoring this warning can lead to injury and/or cause serious damage.

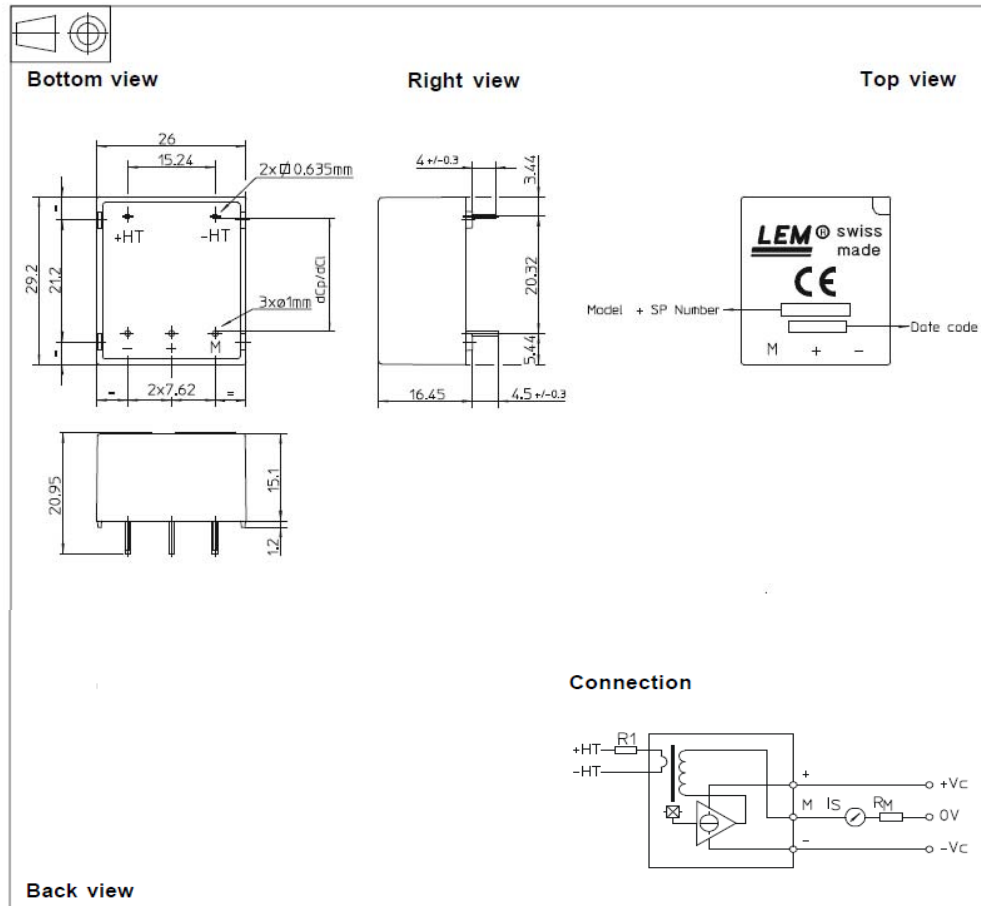
This transducer is a built-in device, whose conducting parts must be inaccessible after installation.

A protective housing or additional shield could be used.

Main supply must be able to be disconnected.



Dimensions LV 25-P (in mm. 1 mm = 0.0394 inch)



Mechanical characteristics

- General tolerance ± 0.2 mm
- Fastening & connection of primary 2 pins
0.635 x 0.635 mm
- Fastening & connection of secondary 3 pins \varnothing 1 mm
- Recommended PCB hole 1.2 mm

Remarks

- I_p is positive when V_p is applied on terminal +HT.
- This is a standard model. For different versions (supply voltages, turns ratios, unidirectional measurements...), please contact us.

Instructions for use of the voltage transducer model LV 25-P

Primary resistor R_1 : the transducer's optimum accuracy is obtained at the nominal primary current. As far as possible, R_1 should be calculated so that the nominal voltage to be measured corresponds to a primary current of 10 mA.

Example: Voltage to be measured $V_{PN} = 250$ V

a) $R_1 = 25$ k Ω / 2.5 W, $I_p = 10$ mA	Accuracy = ± 0.8 % of V_{PN} (@ $T_A = +25^\circ\text{C}$)
b) $R_1 = 50$ k Ω / 1.25 W, $I_p = 5$ mA	Accuracy = ± 1.6 % of V_{PN} (@ $T_A = +25^\circ\text{C}$)

Operating range (recommended): taking into account the resistance of the primary windings (which must remain low compared to R_1 in order to keep thermal deviation as low as possible) and the isolation, this transducer is suitable for measuring nominal voltages from 10 to 500 V.

ข้อมูลคุณลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณกระแสไฟฟ้า LA55-P



Current Transducer LA 55-P

$$I_{PN} = 50 \text{ A}$$

For the electronic measurement of currents : DC, AC, pulsed..., with a galvanic isolation between the primary circuit (high power) and the secondary circuit (electronic circuit).



Electrical data

I_{PN}	Primary nominal r.m.s. current	50	A		
I_P	Primary current, measuring range	0 .. ± 70	A		
R_M	Measuring resistance @	$T_A = 70^\circ\text{C}$	$T_A = 85^\circ\text{C}$		
		$R_{M \min}$ $R_{M \max}$	$R_{M \min}$ $R_{M \max}$		
		with $\pm 12 \text{ V}$	@ $\pm 50 \text{ A}_{\max}$	10 100	60 95 Ω
		with $\pm 15 \text{ V}$	@ $\pm 70 \text{ A}_{\max}$	10 50	60 ¹⁾ 60 ¹⁾ Ω
	@ $\pm 50 \text{ A}_{\max}$	50 160	135 155 Ω		
	@ $\pm 70 \text{ A}_{\max}$	50 90	135 ²⁾ 135 ²⁾ Ω		
I_{SN}	Secondary nominal r.m.s. current	50	mA		
K_N	Conversion ratio	1 : 1000			
V_C	Supply voltage ($\pm 5\%$)	$\pm 12 \dots 15$	V		
I_C	Current consumption	10 (@ $\pm 15 \text{ V}$) + I_S	mA		
V_d	R.m.s. voltage for AC isolation test, 50 Hz, 1 mn	2.5	kV		

Features

- Closed loop (compensated) current transducer using the Hall effect
- Printed circuit board mounting
- Insulated plastic case recognized according to UL 94-V0.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low temperature drift
- Optimized response time
- Wide frequency bandwidth
- No insertion losses
- High immunity to external interference
- Current overload capability.

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications.

Accuracy - Dynamic performance data

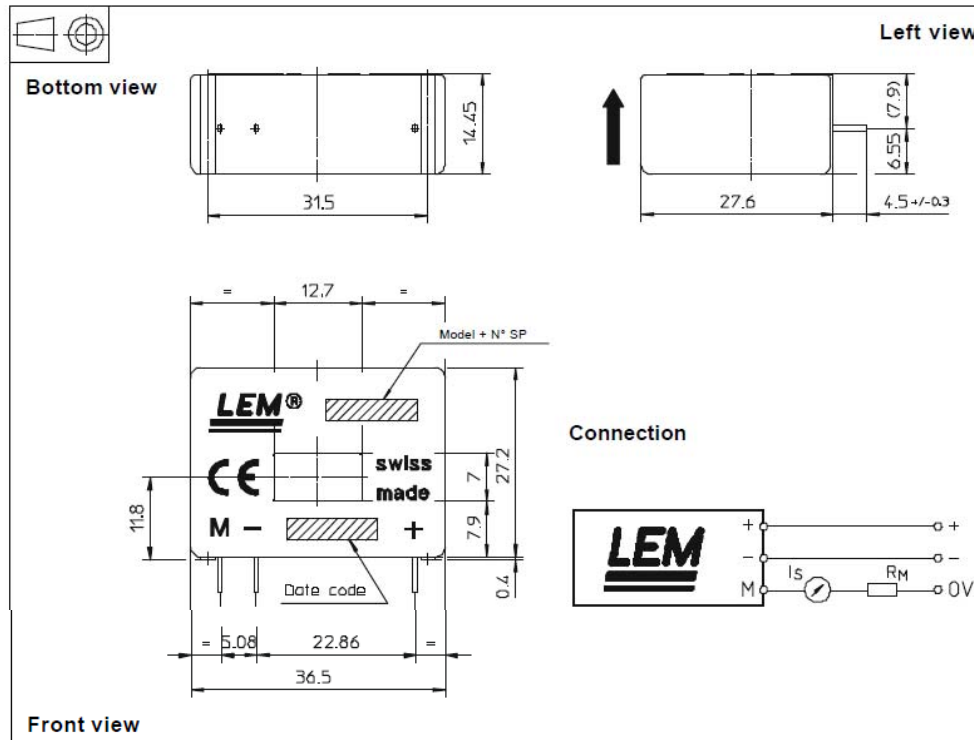
X	Accuracy @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	@ $\pm 15 \text{ V}$ ($\pm 5\%$)	± 0.65	%
		@ $\pm 12 \dots 15 \text{ V}$ ($\pm 5\%$)	± 0.90	%
\mathcal{E}_L	Linearity		< 0.15	%
I_O	Offset current @ $I_P = 0$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	Typ	Max	mA
I_{OM}	Residual current ³⁾ @ $I_P = 0$, after an overload of $3 \times I_{PN}$		± 0.3	mA
I_{OT}	Thermal drift of I_O	$0^\circ\text{C} \dots +70^\circ\text{C}$	± 0.1	± 0.5 mA
		$-25^\circ\text{C} \dots +85^\circ\text{C}$	± 0.1	± 0.6 mA
t_{ra}	Reaction time @ 10 % of I_{PN}		< 500	ns
t_r	Response time @ 90 % of I_{PN}		< 1	μs
di/dt	di/dt accurately followed		> 200	A/ μs
f	Frequency bandwidth (-1 dB)		DC .. 200	kHz

General data

T_A	Ambient operating temperature	-25 .. +85	$^\circ\text{C}$
T_S	Ambient storage temperature	-40 .. +90	$^\circ\text{C}$
R_S	Secondary coil resistance @	$T_A = 70^\circ\text{C}$	80 Ω
		$T_A = 85^\circ\text{C}$	85 Ω
m	Mass	18	g
	Standards ⁴⁾	EN 50178(97.10.01)	

Notes : ¹⁾ Measuring range limited to $\pm 60 \text{ A}_{\max}$
²⁾ Measuring range limited to $\pm 55 \text{ A}_{\max}$
³⁾ Result of the coercive field of the magnetic circuit
⁴⁾ A list of corresponding tests is available

030709/9

Dimensions LA 55-P (in mm. 1 mm = 0.0394 inch)

Mechanical characteristics

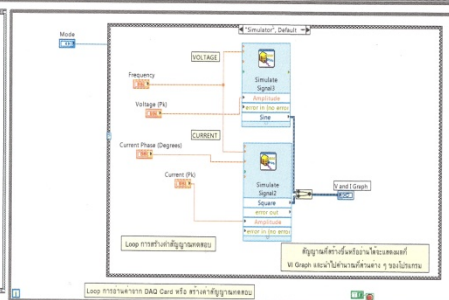
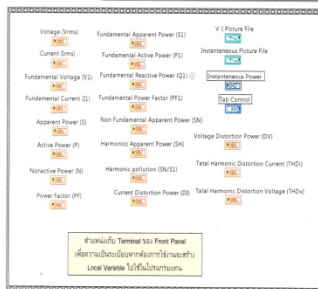
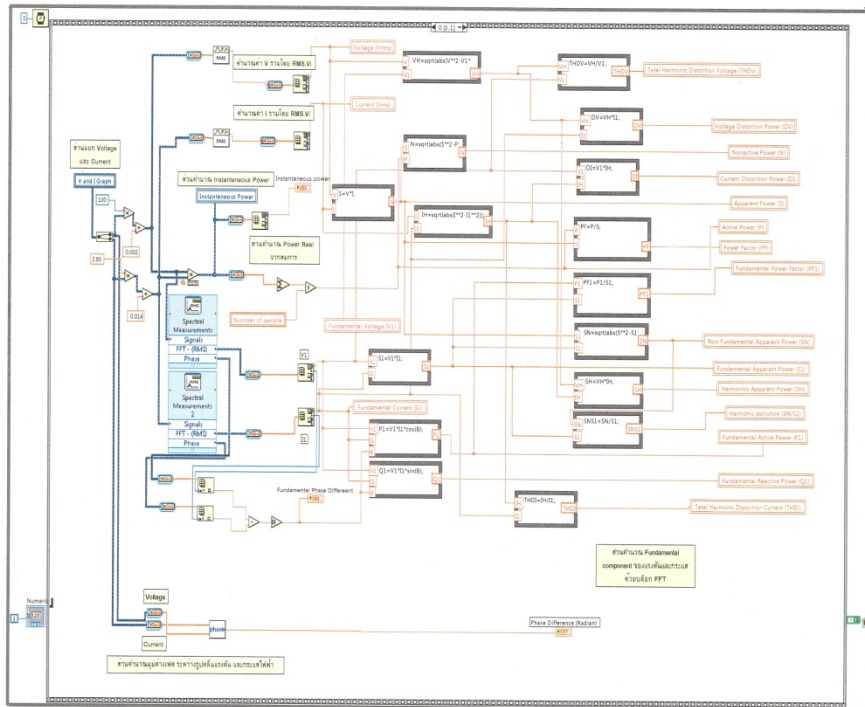
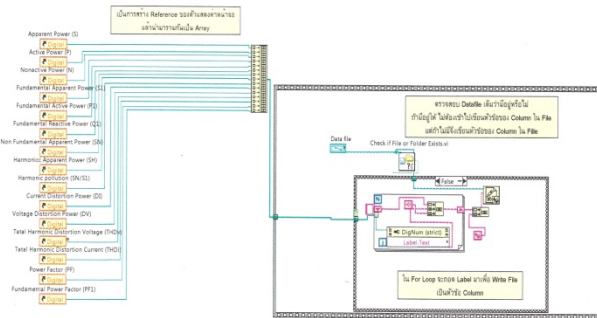
- General tolerance ± 0.2 mm
- Primary through-hole 12.7 x 7 mm
- Fastening & connection of secondary 3 pins
- 0.63 x 0.56 mm
- Recommended PCB hole 0.9 mm

Remarks

- I_p is positive when I_p flows in the direction of the arrow.
- Temperature of the primary conductor should not exceed 90°C.
- Dynamic performances (di/dt and response time) are best with a single bar completely filling the primary hole.
- In order to achieve the best magnetic coupling, the primary windings have to be wound over the top edge of the device.
- This is a standard model. For different versions (supply voltages, turns ratios, unidirectional measurements...), please contact us.

LEM reserves the right to carry out modifications on its transducers, in order to improve them, without previous notice.

โปรแกรมสร้างเครื่องมือวัดเสมือนด้วยโปรแกรม LabVIEW



ภาคผนวก ข

เอกสารการประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

Electrical Engineering Network 2012

of Rajamangala University of Technology (EENET 2012)



CONFERENCE TOPICS

GROUP 1 (PE)
Power Electronics, Electric Machines, Motor Control and Drive, Measurement, Control and Robotics.

GROUP 2 (PW)
Power System, Transmission and Distribution, High Voltage and Electrical Energy, Generating Systems.

GROUP 3 (RE)
Renewable Energy, Energy Saving Technologies, Industry Specific Energy Conversion and Conditioning Technologies, Materials for Energy and Environment.

GROUP 4 (TE)
Telecommunication, Electronics, Information and Communication Technologies, Antennas, Microwave Theory and Techniques.

GROUP 5 (CP)
Computer Technologies and Network, Computer Graphics, Machine Learning and Human-Computer Interaction.

GROUP 6 (GN)
Education in Electrical Engineering, Simulation Software and Design tools, Related Topics in Electrical Engineering.






EENET 2012

GRAND PARADISE HOTEL

Nong Khai, THAILAND

April 3-5, 2012

เอกสารตอบรับบทความการประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคล

	<p>การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล Electrical Engineering Network of Rajamangala University, EENET2012 http://dee.ea.rmuti.ac.th/eenet2012</p>	
<p>22 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2555</p>		
<p>เรื่อง ตอบรับบทความสำหรับการประชุมวิชาการ EENET2012</p> <p>เรียน คุณพลากร พรหมเมศร์ คุณณัฐฐา จินดาเพชร คุณกุสุมาลัย เฉลิมยานนท์ และคุณอนุวัตร ประเสริฐสิทธิ์</p> <p>ตามที่ท่านได้ส่งบทความเรื่อง "การพัฒนาเครื่องมือวัดแบบเสมือนสำหรับการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2000" เพื่อเข้าร่วมประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 (EENET2012) ระหว่างวันที่ 3-5 เมษายน พ.ศ. 2555 ณ โรงแรมแกรนด์พาราไดซ์ จังหวัดหนองคาย นั้น</p> <p>ในกรณีนี้ คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการประจำเครือข่ายมีความยินดีที่จะเรียนให้ท่านทราบว่า บทความเรื่องดังกล่าวได้ ผ่านการพิจารณา โดยผู้ทรงคุณวุฒิให้นำเสนอในที่ประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 (EENET2012) แล้ว</p> <p>จึงเรียนมาเพื่อทราบ</p>		
<p>ลงชื่อ  (รองศาสตราจารย์ ดร.อวิชัย เกิดชื่น) ประธานกรรมการดำเนินงาน ประชุมวิชาการ EENET2012 ประจำเครือข่าย</p>		

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

การพัฒนาเครื่องมือวัดแบบเสมือนสำหรับการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010

A Development of Virtual Instrument for Power Analysis in Compliance with IEEE 1459-2010 Standard

พลากร พรหมเมศรี^{1*} ฉัญญา จินดาพัชรี กุสุมาลย์ เฉลิมยานนท์ อนุวัตร ประเสริฐสิทธิ์

^{1,2,3,4}ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

E-mail: Palakom.ep@hotmail.com*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาการวัดค่ากำลังไฟฟ้า ตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ด้วยเครื่องมือวัดแบบเสมือน เพื่อประยุกต์ใช้ในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าในระบบ 1 เฟส ภายใต้สภาวะแบบโหลดไม่เชิงเส้น มีการใช้การแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว ในการแยกแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานรวมถึงมุมเฟสที่ความถี่มูลฐาน บนเครื่องมือวัดแบบเสมือนนี้ ได้ทำการจำลองสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ที่มีความผิดเพี้ยนขึ้น เพื่อทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลของอัตราการสุ่มสัญญาณว่ามีผลต่อความผิดพลาดของการคำนวณอย่างไร จากผลการทดลองพบว่าที่อัตราการสุ่มที่ 10 เมกะเฮิร์ตซ์ เป็นอัตราการสุ่มที่มีความเหมาะสม เนื่องจากทำให้ผลในการคำนวณปริมาณกำลังไฟฟ้ามีความถูกต้องมากที่สุดเมื่อทำการเปรียบเทียบกับอัตราการสุ่มค่าต่าง ๆ

คำสำคัญ: โหลดไม่เชิงเส้น, อัตราการสุ่ม

Abstract

This paper presents a development of virtual instrumentation for the power analysis in compliance with standard IEEE 1459-2010 for single-phase nonlinear loads. On this virtual instrumentation, a voltage signal and a current signal at frequency 50 Hz under distorted were simulated for studying the effects of the number of samples and samples per second (Sps) to the error of the calculation. From the experiment results, the sampling rate 10 MHz has the suitability because the electrical power quantities calculation gave the most accurate when compared to the other sampling rate.

Keywords: Nonlinear load, Samples per second (Sps)

1. บทนำ

ปัจจุบัน ได้มีการศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพของระบบไฟฟ้ากำลังและทำให้เกิด

ความผิดเพี้ยนกับอุปกรณ์เครื่องมือวัด[1] โดยส่วนใหญ่มีสาเหตุหลักมาจากอุปกรณ์ไฟฟ้าในปัจจุบัน เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ได้แก่ อุปกรณ์ปรับความเร็ว วงจรเรกติฟายเออร์ที่สามารถควบคุมได้ ไซโครคอนเวอเตอร์ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ เคาหลอมแบบอาร์คและแบบอินตักชันและคอมพิวเตอรส์ส่วนบุคคล ดังนั้น คณะกรรมการวัดค่ากำลังไฟฟ้าของ IEEE ได้มีการกำหนดนิยามของปริมาณกำลังไฟฟ้ารวมถึงวิธีการวัด คือ มาตรฐาน IEEE 1459-2010 [2] เพื่อใช้อธิบายปริมาณกำลังไฟฟ้าและวิธีการวัดในระบบ 3 เฟสและ 1 เฟส ภายใต้สภาวะที่ความผิดเพี้ยนและไม่สมดุล

ที่ผ่านมา นักวิจัยได้นำเสนอบทความเกี่ยวกับการวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 โดยใช้โปรแกรม LabVIEW ซึ่งแต่ละบทความจะใช้วิธีการที่แตกต่างกัน เช่น ใช้ตัวกรองความถี่ผ่านต่ำ (Low pass filter: LPF) ในการแยกค่าแรงดันและกระแสที่ความถี่มูลฐานรวมถึงมุมต่างเฟสที่ความถี่มูลฐาน[3] หรือใช้วิธีการ การแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform) ซึ่งใช้หน้าต่างอัลกอริทึมต่าง ๆ ภายในของ FFT ในการปรับปรุงสเปกตรัมของสัญญาณแรงดันและกระแสพื้นฐาน[1] จากนั้นนำเครื่องมือที่สร้างขึ้นไปวัดค่ากำลังไฟฟ้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือโหลด ภายใต้สภาวะที่ความผิดเพี้ยน ซึ่งสามารถแสดงถึงฮาร์มอนิกต่าง ๆ ในกระแสไฟฟ้าได้ แต่ไม่ได้วิเคราะห์จำนวนตัวอย่างและอัตราการสุ่มที่เหมาะสมอย่างชัดเจน ดังนั้น จึงต้องศึกษาค่าตัวแปรต่าง ๆ ให้มีความเหมาะสมมากขึ้นเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการวัด

บทความนี้เสนอการพัฒนาเครื่องมือแบบเสมือนสำหรับการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ภายใต้สภาวะโหลดที่ไม่เชิงเส้น มีการใช้การแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว แบบไม่ใช้หน้าต่างอัลกอริทึม ในการแยกแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานรวมถึงมุมเฟสที่ความถี่มูลฐาน ซึ่งมีสเปกตรัมสูงกว่าฮาร์มอนิก ทำให้ลดความซับซ้อนในการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณ จากนั้น ทำการศึกษาหาจำนวนตัวอย่างและอัตราการสุ่มที่เหมาะสม โดยทำการจำลองสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ความถี่ 50 Hz ที่มีความผิดเพี้ยน ซึ่งผลการศึกษาที่ได้สามารถนำไปพัฒนาเป็นเครื่องมือวัดจริงได้

2. วัดค่ากำลังตามมาตรฐาน IEEE Standard 1459 - 2010

2.1 การวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณ

ค่า RMS ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ตามสมการ (1) และ (2) สำหรับสภาวะคงตัวแรงดันและกระแสไฟฟ้าชั่วขณะที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ จะมีส่วนประกอบเฉพาะอยู่ 2 อย่าง คือ ส่วนประกอบแรงดันและกระแสที่มีความถี่มูลฐานของระบบไฟฟ้า V_1 และ I_1 และเทอมของฮาร์โมนิกที่เป็นจำนวนเต็มที่ยังคงอยู่คือเทอม V_h และ I_h ทั้งหมด [1] ดังสมการ (3)-(4)

$$V^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v^2 dt = V_1^2 + V_H^2 \quad (1)$$

$$I^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i^2 dt = I_1^2 + I_H^2 \quad (2)$$

$$V_H^2 = V_0^2 + \sum_{h \neq 1} V_h^2 = V^2 - V_1^2 \quad (3)$$

$$I_H^2 = I_0^2 + \sum_{h \neq 1} I_h^2 = I^2 - I_1^2 \quad (4)$$

เทอมของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เป็นกระแสตรง คือ V_0 และ I_0 จะมีค่าฮาร์โมนิก $h = 0$ เป็นส่วนหนึ่งใน V_H และ I_H เพื่อให้เกิดความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น จะต้องมีการทำตามขั้นตอนซ้ำ ๆ หลายครั้ง จะช่วยในการประมาณค่าผลรวมฮาร์โมนิก ผลรวมความถี่ของรูปคลื่นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าจะเป็นไปตามสมการ (5)-(6) ดังนี้

$$\text{THD}_V = \frac{V_H}{V_1} = \sqrt{\left(\frac{V}{V_1}\right)^2 - 1} \quad (5)$$

$$\text{THD}_I = \frac{I_H}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (6)$$

2.2 การวิเคราะห์ปริมาณกำลังไฟฟ้า

การเก็บค่าสัญญาณทางไฟฟ้าของกำลังไฟฟ้าจริงจะใช้การคำนวณในรูปแบบของโคไซน์เวลา ลำดับแรก ค่ากำลังไฟฟ้าชั่วขณะ $p(t) = v(t) \cdot i(t)$ ซึ่งจะได้จากการคำนวณและจากการอินทิเกรต ค่าที่ต้องการของกำลังไฟฟ้าชั่วขณะ คือ ผลรวมของกำลังไฟฟ้าใช้งาน [3]

$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p dt \quad (W) \quad (7)$$

ตามรูปแบบจะได้การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าได้อีกหลายแบบ คือ

กำลังไฟฟ้าจริงที่มีความถี่มูลฐาน โดยที่ θ_1 คือ มุมค่าเฟสที่มีความถี่มูลฐาน

$$P_1 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v_1 i_1 dt = V_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (8)$$

กำลังไฟฟ้าจริงของฮาร์โมนิก โดยที่ θ_h คือ มุมค่าเฟสที่มีความถี่ฮาร์โมนิก

$$P_H = V_0 I_0 + \sum_{h \neq 1} V_h I_h \cos \theta_h = P - P_1 \quad (9)$$

กำลังไฟฟ้าเสมือนที่มีความถี่มูลฐาน

$$Q_1 = \frac{\omega}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i_1 \left[\int v_1 dt \right] dt = V_1 I_1 \sin \theta_1 \quad (10)$$

กำลังไฟฟ้าปรากฏ

$$S = VI \quad (11)$$

กำลังไฟฟ้าปรากฏมูลฐาน

$$S_1 = V_1 I_1 \quad (12)$$

กำลังไฟฟ้าคิดเทียบที่เกิดจากกระแส

$$D_I = V_1 I_H = S_1 (\text{THD}_I) \quad (13)$$

กำลังไฟฟ้าคิดเทียบที่เกิดจากแรงดัน

$$D_V = V_H I_1 = S_1 (\text{THD}_V) \quad (14)$$

ฮาร์โมนิกของกำลังไฟฟ้าปรากฏ

$$S_H = V_H I_H = S_1 (\text{THD}_I) (\text{THD}_V) \quad (15)$$

กำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไม่มูลฐาน

$$S_N = \sqrt{S^2 - S_1^2} \quad (16)$$

สำหรับกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ไม่มูลฐาน (Nonfundamental apparent power: VA) จะพิจารณาเฉพาะ 3 เทอม คือ $S^2_N = D^2_I + D^2_V + S^2_H$

กำลังไฟฟ้าคิดเทียบจากฮาร์โมนิก

$$D_H = \sqrt{S_H^2 - P_H^2} \quad (17)$$

กำลังไฟฟ้าไม่เสมือน

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (18)$$

สุดท้าย ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า จะได้

$$P_F = \frac{P}{S} \quad (19)$$

และ ตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามูลฐาน

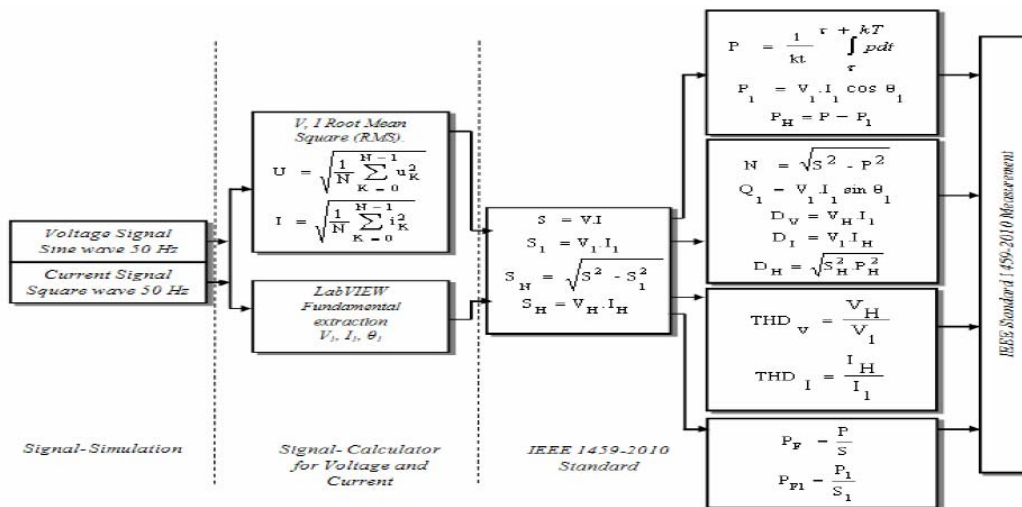
$$P_{F1} = \cos \theta_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (20)$$

3. การพัฒนาเครื่องมือวัดแบบเสมือน

3.1 ภาพรวมของระบบ

การพัฒนาเครื่องมือวัดแบบเสมือนด้วยโปรแกรม LabVIEW ภาพรวมระบบจะใช้การจำลองสัญญาณแรงดันรูปคลื่นไซน์ และกระแสไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ความถี่ความถี่ 50 Hz แรงดัน 311.127 V_p กระแส 100 I_p จากนั้นนำสัญญาณที่ได้จำลองขึ้นไปคำนวณหาค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของแรงดันและกระแสไฟฟ้า (V_{RMS} , I_{RMS}) รวมถึงค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่มีความถี่มูลฐาน (V_1 , I_1) และมุมค่าเฟสที่มีความถี่มูลฐาน (θ_1) โดยใช้วิธีการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว ในการแยกค่าของแรงดันและกระแสที่มีความถี่มูลฐานรวมถึงมุมเฟส เพื่อนำผลการคำนวณที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 แสดงตามรูปที่ 1

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555



รูปที่ 1 ภาพรวมของระบบการวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ด้วยโปรแกรม LabVIEW

3.2 ส่วนคำนวณค่ากำลังไฟฟ้า

การคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าตามค่านิยมมาตรฐาน IEEE 1459 - 2010 เป็นส่วนในการออกแบบและคำนวณจากโปรแกรม LabVIEW โดยที่ได้เขียนโปรแกรมแบ่งการทำงานออก 4 ส่วน คือ

1) ส่วนการคำนวณค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของแรงดันและกระแสที่จำลองขึ้น ซึ่งมีสมการการคำนวณหาค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ (21) และ (22)

$$U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{K=0}^{N-1} u_k^2} \tag{21}$$

และ

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{K=0}^{N-1} i_k^2} \tag{22}$$

เมื่อ U, I คือ ค่า RMS ของแรงดันและกระแสไฟฟ้า

N คือ จำนวนจุดการสุ่มตัวอย่าง K = 0, 1, ... N - 1

2) ส่วนการคำนวณค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานโดยใช้วิธีการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว ทำการแสดงค่าขนาด (Magnitude RMS) แล้วแปลงข้อมูลเป็นอาร์เรย์ จากนั้นจะใช้ฟังก์ชันของอาร์เรย์ Max & Min ในการแสดงค่าสูงสุดของอาร์เรย์ของทั้งสัญญาณแรงดันและกระแส จะได้ค่าแรงดันและกระแสที่ความถี่มูลฐาน

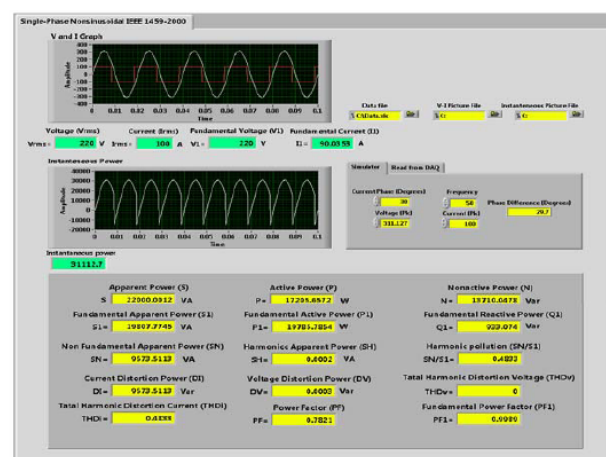
3) และมุมต่างเฟสที่ความถี่มูลฐาน โดยใช้มุมต่างเฟสที่หาได้จากแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานด้วยวิธีการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว ซึ่งนำค่ามุมที่ได้ของสัญญาณแรงดันและกระแสแปลงข้อมูลเป็นอาร์เรย์ จากนั้นจะใช้ฟังก์ชันของอาร์เรย์ Index ในการแสดง

ค่ามุมเฟสที่สัญญาณแรงดันและความถี่มูลฐานแล้วมาทำการหาผลต่างของมุมเฟส จะได้ค่ามุมต่างเฟสที่ความถี่มูลฐาน

4) ส่วนการคำนวณค่าตามค่านิยมมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ซึ่งต้องมีการเขียนชุดคำสั่งเพื่อการคำนวณตามมาตรฐานทั้งหมดที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.1 - 2.2

3.3 ส่วนแสดงค่าบนคอมพิวเตอร์

ส่วนแสดงผลการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าตามค่านิยมมาตรฐาน IEEE 1459-2010 จะแสดงค่าต่าง ๆ ตามมาตรฐานซึ่งค่าเหล่านี้ได้มาจากผลการคำนวณในส่วนของการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม แสดงดังรูปที่ 2



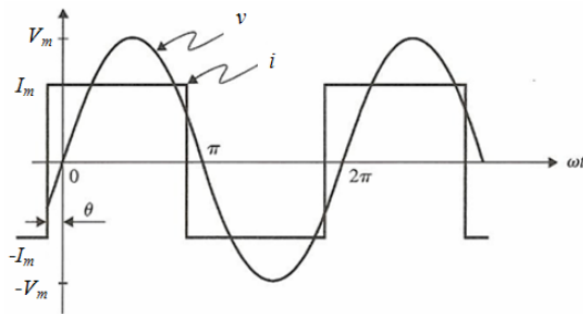
รูปที่ 2 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010

4. การทดลอง

การทดลองการวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามคำนิยามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 มีขั้นตอน ดังนี้

4.1 การวิเคราะห์สัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า

ในการทดลองได้จำลองสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าในสถานะที่มีความผิดเพี้ยนบนโปรแกรม LabVIEW มีลักษณะรูปคลื่นพื้นฐาน ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ลักษณะรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าพื้นฐานที่ได้จำลองขึ้นบนโปรแกรม LabVIEW

จากรูปที่ 3 แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เวลาใด ๆ ดังสมการที่ (23) และ (24)

$$v(t) = V_m \sin(\omega t) \quad (23)$$

$$i(t) = \begin{cases} I_m, & -\theta \leq \omega t \leq \pi - \theta \\ -I_m, & \pi - \theta \leq \omega t \leq 2\pi - \theta \end{cases} \quad (24)$$

จากสมการที่ (25) จะเห็นได้ว่ากระแสไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่ได้มีฮาร์มอนิกเป็นค่าอนันต์ จากสมการพื้นฐานอนุกรมฟูริเยร์ของฟังก์ชันสมมาตรเชิงคู่ที่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ฟูริเยร์และสามารถจัดรูปแบบสมการกระแสโดยใช้อนุกรมฟูริเยร์ได้ [5] ดังนี้

$$i(t) = \frac{4}{\pi} \left(\sin(\omega t + \theta) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t + \theta) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t + \theta) + \frac{1}{7} \sin(7\omega t + \theta) + \dots \right) \quad (25)$$

โดยที่ค่าความถี่มูลฐานมีเฟสเดียวกันกับรูปคลื่นสัญญาณและมีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ $4/\pi$ ดังนั้น ค่าเฉลี่ยประสิทธิผลของกระแสไฟฟ้า (RMS Current) มีค่า ดังนี้

$$I_{\text{rms}} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (26)$$

4.2 ส่วนปรับค่าอัตราการสุ่มสัญญาณ

การปรับค่าอัตราการสุ่มของสัญญาณ ที่ได้จำลองขึ้นนั้นทำโดยเปลี่ยนแปลงค่า Configure simulate signal ของตัวจำลองสัญญาณบนโปรแกรม LabVIEW ซึ่งกำหนดโดยการจำลองสัญญาณเสมือนแรงดันรูปคลื่นไซน์ และกระแสไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมในระบบจริงที่มีความผิดเพี้ยน ที่ความถี่ 50 Hz แรงดัน 311.127 V_p กระแส 100 I_p และปรับอัตราการสุ่มและจำนวนตัวอย่างสัญญาณให้เปลี่ยนแปลงไปเป็นจำนวนสิบเท่า เพื่อหาค่าความเหมาะสมของอัตราการสุ่มสัญญาณ ที่ไม่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010

5. ผลการทดลองและการวิจารณ์

จากผลการทดลองการวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 โดยทำการจำลองสัญญาณเสมือนแรงดันรูปคลื่นไซน์ และกระแสไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมในระบบจริงที่มีความผิดเพี้ยน ที่ความถี่ 50 Hz แรงดัน 311.127 V_p กระแส 100 I_p ที่ความถี่ 50 Hz โดยปรับอัตราการสุ่มสัญญาณตามลำดับ ดังตารางที่ 1 เพื่อหาอัตราการสุ่มที่มีความเหมาะสม จากการทดลองพบว่า ที่ค่าอัตราสุ่มที่ 10 MHz ที่ 1,000,000 ตัวอย่าง มีผลการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ได้ถูกต้องแม่นยำมากที่สุด ซึ่งสามารถพิจารณาจากค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่ความถี่มูลฐาน (Fundamental reactive power: Q) ที่ค่อย ๆ เข้าถึงผลค่าตอบที่ถูกต้องมากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มจำนวนอัตราการสุ่มเข้าใกล้ 10 MHz โดยพิจารณาผลการทดลองดังตารางที่ 1 และ 2 และทำการเปรียบเทียบผลค่าคำนวณกำลังไฟฟ้าหลัก คือ กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าปรากฏ กำลังไฟฟ้าเสมือนและค่าตัวประกอบกำลังเพื่อแสดงค่าความเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดที่ค่าอัตราสุ่มที่ 10 MHz ที่ 1,000,000 ตัวอย่างดังตารางที่ 3

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ตารางที่ 1 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ที่อัตราการสุ่มสัญญาณค่าต่าง ๆ โดยพิจารณาที่ค่าความถี่มูลฐาน

Sample per second (Hz)	IEEE 1459-2010 Calculations ($v(t) = 311.127 \sin \omega t$ and $i(t) = 100 \sin (\omega t + \beta_1)$)											
	V_{rms} (V)	V_1 (V)	I_{rms} (A)	I_1 (A)	S (VA)	P (W)	N (Var)	S_1 (VA)	P_1 (W)	Q_1 (Var)	P_F	P_{F1}
	220	220	100	90.03	22000	19806.95	9575.21	19807.04	19807.04	0	0.9003	1
1000	220	220	100	90.4	22000	19643.78	9905.64	19888.64	19643.78	3111.27	0.8929	0.987
1024	220.39	220.25	100	89.87	22039.7	19843.29	9591.26	19795.83	19787.43	576.59	0.9003	0.999
2048	219.89	219.88	100	90.05	21989.3	19786.45	9593	19801.39	19796.1	457.51	0.899	0.999
4096	219.89	219.88	100	90.05	21989.26	19786.45	9592.91	19801.36	19796.1	456.02	0.899	0.999
8192	220.02	220.02	100	90.03	22002.68	19811.78	9571.38	19809.33	19809.01	113.75	0.9004	1
10000	220	220	100	90.03	22000	19805.33	9578.56	19807.77	19805.33	311.12	0.9002	0.999
10240	220	220	100	90.03	22000	19806.89	9575.32	19806.99	19806.89	60.76	0.9003	1
20480	220	220	100	90.03	22000	19806.94	9575.22	19806.96	19806.94	30.38	0.9003	1
40960	220	220	100	90.03	22000	19806.95	9575.2	19806.96	19806.95	15.19	0.9003	1
81920	220	220	100	90.03	22000	19806.95	9575.19	19806.96	19806.95	7.59	0.9003	1
100000	220	220	100	90.03	22000	19806.94	9575.23	19806.96	19806.94	31.11	0.9003	1
102400	220	220	100	90.03	22000	19806.94	9575.22	19806.96	19806.94	30.38	0.9003	1
204800	220	220	100	90.03	22000	19806.95	9575.2	19806.96	19806.95	15.19	0.9003	1
409600	220	220	100	90.03	22000	19806.95	9575.19	19806.96	19806.95	7.59	0.9003	1
819200	220	220	100	90.03	22000	19806.95	9575.19	19806.96	19806.95	3.79	0.9003	1
1000000	220	220	100	90.03	22000	19806.95	9575.19	19806.96	19806.95	3.11	0.9003	1
1024000	220	220	100	90.03	22000	19806.95	9575.19	19806.96	19806.95	3.03	0.9003	1
2048000	220	220	100	90.03	22000	19806.96	9575.19	19806.96	19806.96	1.51	0.9003	1
4096000	220	220	100	90.03	22000	19806.96	9575.19	19806.96	19806.96	0.75	0.9003	1
8192000	220	220	100	90.03	22000	19806.96	9575.19	19806.96	19806.96	0.37	0.9003	1
10000000	220	220	100	90.03	22000	19806.96	9575.19	19806.96	19806.96	0.31	0.9003	1

ตารางที่ 2 การวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ที่อัตราการสุ่มสัญญาณค่าต่าง ๆ โดยพิจารณาที่ค่าความถี่ฮาร์โมนิก

Sample per second (Hz)	IEEE 1459-2010 Calculations ($v(t) = 311.127 \sin \omega t$ and $i(t) = 100 \sin (\omega t + \beta_1)$)						
	S_N (VA)	S_H (VA)	D_I (Var)	D_V (Var)	THD _I	THD _V	S_W/S_1
	9575.03	0	9575.06	0	0.483	0	0.483
1000	9404.34	0.0002	9404.34	0.0003	0.472	0	0.472
1024	9688.83	341.39	9657.49	699.79	0.487	0.035	0.489
2048	9562.13	84.87	9560.13	175.8	0.482	0.008	0.489
4096	9562.11	84.88	9560.12	175.8	0.482	0.008	0.482
8192	9576.44	21.23	9576.31	43.91	0.483	0.002	0.483
10000	9573.51	0.0002	9573.51	0.0003	0.483	0	0.483
10240	9575.13	0.0002	9575.13	0.0003	0.483	0	0.483
20480	9575.18	0.0002	9575.18	0.0003	0.483	0	0.483
40960	9575.19	0.0002	9575.19	0.0003	0.483	0	0.483
81920	9575.19	0	9575.19	0	0.483	0	0.483
100000	9575.17	0	9575.17	0	0.483	0	0.483
102400	9575.18	0	9575.18	0	0.483	0	0.483
204800	9575.19	0.0002	9575.19	0.0003	0.483	0	0.483
409600	9575.19	0	9575.19	0	0.483	0	0.483
819200	9575.19	0	9575.19	0	0.483	0	0.483
1000000	9575.19	0	9575.19	0	0.483	0	0.483
1024000	9575.19	0	9575.19	0	0.483	0	0.483
2048000	9575.19	0	9575.19	0	0.483	0	0.483
4096000	9575.19	0	9575.19	0	0.483	0	0.483
8192000	9575.19	0	9575.19	0	0.483	0	0.483
10000000	9575.19	0	9575.19	0	0.483	0	0.483

ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ที่อัตราการสุ่มสัญญาณ 10 MHz

Sample per second (Hz)	IEEE 1459-2010 Calculations ($v(t) = 311.127 \sin \omega t$ and $i(t) = 100 \sin (\omega t + \beta_1)$)							
	P (W)	S (VA)	N (Var)	P_1 (W)	S_1 (VA)	Q_1 (Var)	P_F	P_{F1}
	19806.95	22000	9575.21	19807.04	19807.04	0	0.9003	1
10000000	19806.96	22000	9575.19	19806.96	19806.96	0.31	0.9003	1
% Error	0.00005	0	0.000208873	0.000403897	0.000403897	NA	0	0

6. วิจัยผลและสรุป

จากการศึกษาการเขียนโปรแกรม LabVIEW เพื่อวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 โดยจำลองสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่มีความถี่ 50 Hz แรงดัน 311.127 V_r กระแส 100 I_r นำสัญญาณที่จำลองขึ้นไปทำการคำนวณค่าเพื่อหาลำดับไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 โดยปรับอัตราการสุ่มสัญญาณตามลำดับ ดังตารางที่ 1 และ 2 เพื่อหาอัตราการสุ่มที่มีความเหมาะสม พบว่าค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้ยังมีความผิดพลาดอยู่เนื่องจากการกำหนดอัตราการสุ่มและจำนวนตัวอย่างสัญญาณที่ไม่เหมาะสม ดังนั้น จากการเปรียบเทียบผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าด้วยโปรแกรม LabVIEW กับการคำนวณเพื่อดูผลความแตกต่างจะเห็นว่า การกำหนดอัตราการสุ่มสัญญาณที่ 10 MHz ที่ 1,000,000 ตัวอย่าง มีค่าความผิดพลาดจากการวัดเมื่อเปรียบเทียบกับกับผลจากคำนวณน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการสุ่มและจำนวนตัวอย่างสัญญาณที่ค่าอื่น ๆ และเมื่อพิจารณาจากผลการคำนวณแล้วจะเห็นว่า ผลการวัดค่ากำลังไฟฟ้าใช้งานและกำลังไฟฟ้าปรากฏ ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าที่ผลต่อการคิดค่าไฟฟ้า ถูกต้องและแม่นยำที่ค่า อัตราการสุ่มสัญญาณที่ 10 MHz ที่ 1,000,000 ตัวอย่าง ซึ่งแสดงผลการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดไว้ตามตารางที่ 3 สุดท้ายวัตถุประสงค์ของบทความนี้คือ ต้องการพิสูจน์ผลของการวัดค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 ที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม LabVIEW โดยจำลองสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่มีความถี่ 50 Hz ที่อัตราการสุ่มสัญญาณและจำนวนตัวอย่างที่แตกต่าง ว่ามีความถูกต้องหรือไม่ ตามคำนิยามมาตรฐาน IEEE 1459-2010 โดยเปรียบเทียบผลการวัดกับค่าที่คำนวณ และหาค่าอัตราการสุ่มสัญญาณและจำนวนตัวอย่างที่มีความเหมาะสมในการวัดเพื่อให้เกิดค่าความผิดพลาดลดลง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Charis N. Orfanos, Frangiskos V. Topalis. 2008. Single-phase virtual power and energy analyzer in compliance with IEEE Std 1459-2000 for harmonic measurement on discharge lamps. PP.1388-1390.
- [2] IEEE Standard 1459-2010. 2002. IEEE Standard definition for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, non sinusoidal, balance or unbalance condition. PP. 1-40.
- [3] Antonio Cataliotti, Valentina Cosentino and Salvatore Nuccio. 2008. A Virtual Instrument for the Measurement of IEEE Std. 1459-2000 Power Quantities. PP. 85-94.

[4] Yang Huping, Bi Zhipeng. 2009. The Power Quality Monitoring System Based on Virtual Instrument. World Congress on software engineering

- [5] วิบูลย์ ชื่นแจก. 2546. ฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ, หน้า 18-19.



ผู้นำเสนอผลงาน: นายพลากร พรหมเมษฐ์
ประวัติการศึกษา: อุดสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
สถานที่ทำงาน: มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์
งานวิจัยที่สนใจ: การวัดและควบคุมในระบบไฟฟ้ากำลัง, การพัฒนาระบบพลังงานทดแทน

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายพลากร พรหมเมศรี		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5010120108		
วุฒิการศึกษา			
	วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
	อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีไฟฟ้า)	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	2548

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับระหว่างการศึกษา)

- ทุนค่าเล่าเรียนของนักศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ทุนอุดหนุนงานวิจัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ประจำปีการศึกษา 2552

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

พลากร พรหมเมศรี, ณีฎฐา จินดาเพ็ชร, กุสุมาลย์ เฉลิมยานนท์ และอนุวัตร ประเสริฐสิทธิ์,
การพัฒนาเครื่องมือวัดแบบเสมือนสำหรับการวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE
1459-2010, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
ครั้งที่ 4 , 3-5 เมษายน 2555, 33-38