

การพัฒนาเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก
ในระบบไฟฟ้าแรงต่ำ

นางสาวชไมพร ตัณฑติลก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

DEVELOPMENT OF A MEASURING DEVICE AND SOFTWARE FOR HARMONIC AND
INTERHARMONIC ANALYSES IN LOW-VOLTAGE SYSTEM

Miss Chamaiporn Tanthadiloke

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์
ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า
แรงต่ำ

โดย

นางสาวชไมพร ตันตติลล

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผศ. ดร.ธวัชชัย เตชสุนันต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชสุนันต์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาภรณ์ ธีรมงคลศรี)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชวาลย์ เจริญบุตร)

นางสาวชไมพร ตัณฑติติก : การพัฒนาเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงต่ำ. (DEVELOPMENT OF A MEASURING DEVICE AND SOFTWARE FOR HARMONIC AND INTERHARMONIC ANALYSES IN LOW-VOLTAGE SYSTEMS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.ธวัชชัย เตชสุนันต์, 123 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการพัฒนาเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงต่ำด้วยวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris พร้อมทั้งคำนวณดัชนีสำหรับการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 1459 (2010) มาตรฐาน IEC 61000 - 4 -7 (2002) และข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม (2008) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการวัดคุณลักษณะของฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกสำหรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 400 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ เครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้มีความคล่องตัวในการแสดงผล สามารถแสดงค่าขนาดและมุมเฟสของส่วนประกอบฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก พร้อมทั้งค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องของระบบไฟฟ้า 3 เฟสตามมาตรฐานที่ได้กล่าวมา สามารถแสดงค่าส่วนประกอบฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกที่สนใจ สามารถย่อหรือขยายรูป บันทึกข้อมูลและรูป พร้อมทั้งแสดงค่าข้อมูลที่ความถี่ที่สนใจได้อย่างชัดเจนและง่ายดาย ซึ่งผู้ใช้สามารถนำข้อมูลฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกที่ได้ไปปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้เครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกดังกล่าวยังได้รับการทดสอบกับสัญญาณจริงเพื่อให้มั่นใจว่าสามารถนำไปพัฒนาใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2555.....

5470161621: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: POWER QUALITY / HARMONIC / INTERHARMONIC / BLACKMAN-HARRIS WINDOW / LABVIEW / IEEE STANDARD 1459

CHAMAIPORN TANTHADILOKE: DEVELOPMENT OF A MEASURING DEVICE AND SOFTWARE FOR HARMONIC AND INTERHARMONIC ANALYSES IN LOW-VOLTAGE SYSTEMS ADVISOR: ASST. PROF. THAVATCHAI TAYJASANANT, Ph.D., 123 pp.

This thesis presents a development of measuring device and software to analyze harmonics and interharmonics in low-voltage systems using Blackman-Harris window function. Indices from IEEE Standard 1459 (2010), IEC 61000-4-7 (2002) and Thai harmonic standard compliance (PRC-PQG-01-2008) for three-phase 400 V 50 Hz system are also calculated. The developed measuring device and software are flexible to display various outputs, e.g. harmonic and interharmonic amplitudes and phase angle and related indices from aforementioned standards. The software can display harmonic and interharmonic components, zoom – in and zoom – out and save results easily. Users can further use outputs to improve power quality of the system. Moreover, the developed measuring device and software have been tested and verified with actual signals in order to make sure that they can be implemented in practice.

Department :.....Electrical Engineering.....

Student's Signature:

Field of Study: ..Electrical Engineering.....

Advisor's Signature:

Academic Year:.....2012.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชสุนันต์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา โดยได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการทำวิทยานิพนธ์มาด้วยดีตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขจนสำเร็จเรียบร้อย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกวิน ที่ได้กรุณาและเอื้อเฟื้อเครื่องมือ และสถานที่ สำหรับการทดสอบเครื่องมือวัด ณ. ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย อาจารย์ ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อภรณ์ ชีรมงคลศรีศรี และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัชวาลย์ เจริญบุตร ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ รุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้อง ในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ที่ให้คำปรึกษาและกำลังใจตลอดมา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ที่ให้กำลังใจตลอดมา ตลอดจนเพื่อนพี่น้อง ทุก ๆ คนที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินการ	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์	4
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์	5
บทที่ 2 การวิเคราะห์และการตรวจวัดฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก	6
2.1 ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก	6
2.1.1 คำจำกัดความ	6
2.1.2 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก	8
2.1.2.1 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก	8
2.1.2.2 แหล่งกำเนิดอินเทอร์ฮาร์มอนิก	9
2.1.3 ผลกระทบจากฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก	9
2.1.3.1 ผลกระทบจากฮาร์มอนิก	9
2.1.3.2 ผลกระทบจากอินเทอร์ฮาร์มอนิก	11
2.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก	11
2.2.1 ปัญหาในการวิเคราะห์คุณลักษณะฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก	12
2.2.1.1 ปัญหาเอเลียสซิง (Aliasing)	12
2.2.1.2 ปัญหาการรั่วไหลของสเปกตรัม (Spectral leakage)	13

	หน้า
2.2.2 วิธีฟังก์ชันหน้าต่าง (Window function)	14
2.2.2.1 วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Rectangular	15
2.2.2.2 วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Bartlett หรือ Triangle.....	16
2.2.2.3 วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Hamming.....	16
2.2.2.4 วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman	17
2.2.2.5 วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris	17
2.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก	19
2.3.1 มาตรฐาน IEEE 1459 (2010)	20
2.3.1.1 ระบบสามเฟสภายใต้สภาวะรูปคลื่นไซน์สมดุล	20
2.3.1.2 ระบบสามเฟสภายใต้สภาวะรูปคลื่นไซน์ไม่สมดุล	20
2.3.1.3 ระบบสามเฟสภายใต้สภาวะไม่รูปคลื่นไซน์ไม่สมดุล	20
2.3.2 มาตรฐาน IEC 61000 - 4 - 7 (2002)	26
2.3.3 ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม	28
2.3.3.1 ระดับวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าในประเทศไทย	29
2.3.3.2 วิธีการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับการอนุญาตให้เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า.....	30
2.4 การตรวจวัดฮาร์มอนิก.....	31
2.4.1 อุปกรณ์สำหรับการวัด.....	31
2.4.2 ซอฟต์แวร์สำหรับประมวลผลข้อมูล	32
2.4.2.1 ส่วนหน้าปิด (Front Panel)	33
2.4.2.2 บล็อกไดอะแกรม (Block diagram)	34
2.5 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง	35
บทที่ 3 การพัฒนาเครื่องมือวัดฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงต่ำ	37
3.1 การ์ด Data acquisition	38
3.1.1 การ์ด Data acquisition รุ่น NI USB 9215	39
3.1.2 การ์ด Data acquisition รุ่น NI USB 9227	39
3.1.3 CompaqDAQ รุ่น NI cDAQ - 9174.....	40
3.2 วงจรลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้าและป้องกันแรงดันเกิน	41
บทที่ 4 การพัฒนาซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงต่ำ	45
4.1 ขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก	46
4.2 การทำงานของซอฟต์แวร์.....	51

4.2.1	หน้าต่างแสดงผลหลัก (Overview tab).....	51
4.2.2	หน้าต่างแสดงผลของแรงดัน (Voltage tab)	54
4.2.3	หน้าต่างแสดงผลของกระแส (Current tab)	54
4.2.4	หน้าต่างแสดงดัชนีการคำนวณตามมาตรฐาน (Standard tab).....	57
4.2.5	หน้าต่างแสดงรายละเอียดของซอฟต์แวร์ (Comment tab)	58
4.2.6	หน้าต่างบันทึกข้อมูล (Export data tab)	58
บทที่ 5	การทดสอบเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิก และอินเทอร์ฮาร์มอนิก.....	64
5.1	การทดสอบขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก	64
5.1.1	ทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณเมื่อลำดับฮาร์มอนิกเปลี่ยน.....	65
5.1.1.1	จุดประสงค์ในการทดสอบ	65
5.1.1.2	วิธีการทดสอบ	65
5.1.1.3	ผลการทดสอบ.....	65
5.1.1.3.1	ผลการทดสอบของข้อมูล “แบบที่ 1”	65
5.1.1.3.2	ผลการทดสอบของข้อมูล “แบบที่ 2”	66
5.1.1.4	วิเคราะห์ผลการทดสอบ	67
5.1.2	ทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณเมื่อลำดับฮาร์มอนิกเปลี่ยน.....	67
5.1.2.1	จุดประสงค์ในการทดสอบ.....	67
5.1.2.2	วิธีการทดสอบ	68
5.1.2.3	ผลการทดสอบ.....	68
5.1.2.3.1	ผลการทดสอบชุดที่ 1-3 ของข้อมูล “แบบที่ 1”	68
5.1.2.3.2	ผลการทดสอบชุดที่ 1-3 ของข้อมูล “แบบที่ 2”	71
5.1.2.4	วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	81
5.1.3	ทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณเมื่อจำนวนฮาร์มอนิกในระบบมีมากขึ้น.....	74
5.1.3.1	จุดประสงค์ในการทดสอบ	74
5.1.3.2	วิธีการทดสอบ	74
5.1.3.3	ผลการทดสอบ.....	74
5.1.3.4	วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	75
5.1.4	ทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณเมื่อจำนวนอินเทอร์ฮาร์มอนิกในระบบ มีมากขึ้น.....	76
5.1.4.1	จุดประสงค์ในการทดสอบ.....	76

	หน้า
5.1.4.2 วิธีการทดสอบ	76
5.1.4.3 ผลการทดสอบ	76
5.1.4.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	78
5.1.5 ทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณเมื่อสัญญาณมีฮาร์มอนิกและอินเตอร์ ฮาร์มอนิกปะปน (รวมเงื่อนไขต่างๆ).....	78
5.1.5.1 จุดประสงค์ในการทดสอบ	78
5.1.5.2 วิธีการทดสอบ	78
5.1.5.3 ผลการทดสอบ	78
5.1.5.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	81
5.2 การทดสอบซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก.....	82
5.3 การทดสอบเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกกับ สัญญาณจริง.....	85
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ	93
6.1 สรุปผลงานวิจัย.....	93
6.2 ข้อเสนอแนะ	94
รายการอ้างอิง	95
ภาคผนวก.....	97
ภาคผนวก ก	98
ภาคผนวก ข.....	99
ภาคผนวก ค	104
ภาคผนวก ง.....	105
ภาคผนวก จ.....	110
ภาคผนวก ฉ.....	122
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	123

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ประเภทและความหมายของฮาร์มอนิก.....	6
ตารางที่ 2.2	ขนาดของ Side-lobe ในแต่ละฟังก์ชันหน้าต่าง [8]	18
ตารางที่ 2.3	ระบบไฟฟ้าสามเฟสแบบไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ไม่สมดุล	89
ตารางที่ 2.4	ระดับวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้า 400 โวลต์.....	94
ตารางที่ 2.5	ระดับขีดจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้า 400 โวลต์.....	98
ตารางที่ 5.1	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วและวิธีฟังก์ชัน หน้าต่างแบบ Blackman-Harris	81
ตารางที่ 5.2	เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเฟส A จากเครื่องมือวัด Power Visa และ เครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น	87
ตารางที่ 5.3	เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าเฟส A จากเครื่องมือวัด Power Visa และ เครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น	87
ตารางที่ 5.4	เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเฟส B จากเครื่องมือวัด Power Visa และ เครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น	88
ตารางที่ 5.5	เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าเฟส B จากเครื่องมือวัด Power Visa และ เครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น	88
ตารางที่ 5.6	เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเฟส C จากเครื่องมือวัด Power Visa และ เครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น	89
ตารางที่ 5.7	เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าเฟส C จากเครื่องมือวัด Power Visa และ เครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น	89
ตารางที่ ง. 1	จำลองสัญญาณสำหรับทดสอบชุดที่ 1	105
ตารางที่ ง. 2	จำลองสัญญาณสำหรับทดสอบชุดที่ 2	105
ตารางที่ ง. 3	จำลองสัญญาณสำหรับทดสอบชุดที่ 3	106
ตารางที่ ง. 4	จำลองสัญญาณสำหรับทดสอบชุดที่ 4	106
ตารางที่ ง. 5	จำลองสัญญาณสำหรับทดสอบชุดที่ 5	107
ตารางที่ ง. 6	จำลองสัญญาณสำหรับทดสอบชุดที่ 6	107
ตารางที่ ง. 7	จำลองสัญญาณสำหรับทดสอบชุดที่ 7	108
ตารางที่ ง. 8	จำลองสัญญาณสำหรับทดสอบชุดที่ 8	108
ตารางที่ ง. 9	จำลองสัญญาณสำหรับทดสอบชุดที่ 9	109

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 ความผิดเพี้ยนของสัญญาณเมื่อมีฮาร์มอนิก	7
ภาพที่ 2.2 สัญญาณในเชิงความถี่เมื่อความถี่ในการสุ่มน้อยกว่าค่าความถี่ในคริสต์ [6].....	12
ภาพที่ 2.3 การรื้อไหลของสเปกตรัมของ Window แบบ Rectangular.....	13
ภาพที่ 2.4 วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Rectangular (ซ้าย) และสเปกตรัมของฟังก์ชัน หน้าต่างเชิงความถี่ (ขวา).....	15
ภาพที่ 2.5 วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Bartlett window (ซ้าย) และสเปกตรัมของฟังก์ชัน หน้าต่างเชิงความถี่ (ขวา).....	16
ภาพที่ 2.6 วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Hamming (ซ้าย) และสเปกตรัมของฟังก์ชัน หน้าต่างเชิงความถี่ (ขวา).....	16
ภาพที่ 2.7 วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman (ซ้าย) และสเปกตรัมของฟังก์ชัน หน้าต่างเชิงความถี่ (ขวา).....	17
ภาพที่ 2.8 วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman- Harris (ซ้าย) และสเปกตรัมของฟังก์ชัน หน้าต่างเชิงความถี่ (ขวา).....	17
ภาพที่ 2.9 แผนผังจำแนกเงื่อนไขการคำนวณปริมาณทางไฟฟ้ากำลังตามมาตรฐาน IEEE 1459 (2010)	19
ภาพที่ 2.10 ภาพรวมของแนวคิดการรวมกลุ่มของฮาร์มอนิกและการรวมกลุ่มของ อินเตอร์ฮาร์มอนิก.....	26
ภาพที่ 2.11 แนวคิดการรวมกลุ่มของฮาร์มอนิกลำดับที่ 4 (ขวา) และการรวมกลุ่ม ย่อยของฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 (ซ้าย).....	27
ภาพที่ 2.12 แนวคิดการรวมกลุ่มของอินเตอร์ฮาร์มอนิกลำดับที่ 4 (ขวา) และการรวมกลุ่ม ย่อยของอินเตอร์ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 (ซ้าย).....	28
ภาพที่ 2.13 ตัวอย่างตัวควบคุม (Controller).....	33
ภาพที่ 2.14 ตัวอย่างตัวแสดงผล (Indicator).....	34
ภาพที่ 2.15 ตัวอย่างบล็อกไดอะแกรม (Block diagram)	34
ภาพที่ 3.1 ภาพรวมของเครื่องมือวัดและวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกในระบบ ไฟฟ้าแรงต่ำ	37
ภาพที่ 3.2 Data Acquisition card (DAQ) รุ่น NI USB 9215	39
ภาพที่ 3.3 Data Acquisition card (DAQ) รุ่น NI USB 9227	40

ภาพที่ 3.4	CompaqDAQ รุ่น NI cDAQ 9174.....	41
ภาพที่ 3.5	แผนภาพเค้าร่าง (Schematic Designer) ของวงจรถอดทอนระดับแรงดัน และป้องกันแรงดันเกิน	42
ภาพที่ 3.6	วงจรถอดทอนระดับแรงดันไฟฟ้าและป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกิน.....	43
ภาพที่ 3.7	เครื่องมือวัดฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกที่พัฒนาขึ้น	43
ภาพที่ 4.1	แผนภาพการประยุกต์ใช้งานซอฟต์แวร์ LabVIEW กับงานวิจัย	45
ภาพที่ 4.2	แผนภาพการคำนวณด้วยวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman - Harris.....	47
ภาพที่ 4.3	หน้าต่างแสดงผลหลัก (Overview Tab).....	53
ภาพที่ 4.4	หน้าต่างแสดงผลของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Tab)	55
ภาพที่ 4.5	หน้าต่างแสดงผลของกระแสไฟฟ้า (Current Tab)	56
ภาพที่ 4.6	ดัชนีการคำนวณตามมาตรฐาน IEEE standard 1459 (2010).....	59
ภาพที่ 4.7	ดัชนีการคำนวณตามข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและ อุตสาหกรรม (PRC-PQG-01/2008)	60
ภาพที่ 4.8	ดัชนีการคำนวณตามมาตรฐาน IEC 61000 - 4 - 7.....	61
ภาพที่ 4.9	หน้าต่างแสดงรายละเอียดของซอฟต์แวร์ (Comment Tab).....	62
ภาพที่ 4.10	หน้าต่างบันทึกข้อมูล (Export data tab).....	63
ภาพที่ 5.1	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดและมุมเฟสฮาร์มอนิก เมื่อลำดับฮาร์มอนิก เพิ่มขึ้น โดยใช้ข้อมูลขนาดและมุมเฟสของฮาร์มอนิก “แบบที่ 1”	66
ภาพที่ 5.2	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดและมุมเฟสฮาร์มอนิก เมื่อลำดับฮาร์มอนิก เพิ่มขึ้น โดยใช้ข้อมูลขนาดและมุมเฟสของฮาร์มอนิก “แบบที่ 2”	67
ภาพที่ 5.3	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดและมุมเฟสอินเทอร์ฮาร์มอนิกจากการทดสอบ “ชุดที่ 1” ด้วยข้อมูลขนาดและมุมเฟสของอินเทอร์ฮาร์มอนิก “แบบที่ 1”	69
ภาพที่ 5.4	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดและมุมเฟสอินเทอร์ฮาร์มอนิกจากการทดสอบ “ชุดที่ 2” ด้วยข้อมูลขนาดและมุมเฟสของอินเทอร์ฮาร์มอนิก “แบบที่ 1”	70
ภาพที่ 5.5	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดและมุมเฟสอินเทอร์ฮาร์มอนิกจากการทดสอบ “ชุดที่ 3” ด้วยข้อมูลขนาดและมุมเฟสของอินเทอร์ฮาร์มอนิก “แบบที่ 1”	70
ภาพที่ 5.6	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดและมุมเฟสอินเทอร์ฮาร์มอนิกจากการทดสอบ “ชุดที่ 1” ด้วยข้อมูลขนาดและมุมเฟสของอินเทอร์ฮาร์มอนิก “แบบที่ 2”	62
ภาพที่ 5.7	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดและมุมเฟสอินเทอร์ฮาร์มอนิกจากการทดสอบ “ชุดที่ 2” ด้วยข้อมูลขนาดและมุมเฟสของอินเทอร์ฮาร์มอนิก “แบบที่ 2”	72

ภาพที่ 5.8	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดและมุมเฟสอินเตอร์ฮาร์มอนิกจากการทดสอบ “ชุดที่ 3” ด้วยข้อมูลขนาดและมุมเฟสของอินเตอร์ฮาร์มอนิก “แบบที่ 2”	73
ภาพที่ 5.9	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดโดยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris เมื่อจำนวนฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้น ชั้นละหนึ่งส่วนประกอบ.....	75
ภาพที่ 5.10	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของมุมเฟสโดยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris เมื่อจำนวนฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้น ชั้นละหนึ่งส่วนประกอบ.....	75
ภาพที่ 5.11	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดโดยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris เมื่อจำนวนอินเตอร์ฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้นชั้นละหนึ่งส่วนประกอบ.....	77
ภาพที่ 5.12	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของมุมเฟสโดยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris เมื่อจำนวนอินเตอร์ฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้นชั้นละหนึ่งส่วนประกอบ.....	77
ภาพที่ 5.13	เปรียบเทียบขนาดของสัญญาณที่คำนวณได้จากวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris กับค่าจริง.....	79
ภาพที่ 5.14	เปรียบเทียบมุมของสัญญาณที่คำนวณได้จากวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และขนาดแรงดันจากวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris กับค่าจริง	80
ภาพที่ 5.15	ภาพรวมผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า [13]	83
ภาพที่ 5.16	ผลการวิเคราะห์พบความถี่อินเตอร์ฮาร์มอนิกที่ 117 เฮิร์ตซ์ จากบทความ [13].....	83
ภาพที่ 5.17	ผลการวิเคราะห์พบความถี่อินเตอร์ฮาร์มอนิกที่ 237 เฮิร์ตซ์ จากบทความ [13].....	83
ภาพที่ 5.18	ภาพรวมผลการตรวจพบความถี่อินเตอร์ฮาร์มอนิกจากซอฟต์แวร์วิเคราะห์	84
ภาพที่ 5.19	ผลการตรวจพบความถี่อินเตอร์ฮาร์มอนิกที่ 117 เฮิร์ตซ์ จากซอฟต์แวร์วิเคราะห์.....	84
ภาพที่ 5.20	ผลการตรวจพบความถี่อินเตอร์ฮาร์มอนิกที่ 237 เฮิร์ตซ์ จากซอฟต์แวร์วิเคราะห์.....	84
ภาพที่ 5.21	การทดสอบเครื่องมือวัดฮาร์มอนิกกับสัญญาณจริงและเปรียบเทียบผลลัพธ์ กับอุปกรณ์ Power VISA รุ่น 440.....	86
ภาพที่ 5.22	จอภาพแสดงรูปสัญญาณจากเครื่องมือวัด Power VISA รุ่น 440.....	90
ภาพที่ 5.23	จอภาพแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากเครื่องมือวัด Power VISA รุ่น 440.....	90
ภาพที่ 5.24	หน้าต่างแสดงผลหลักจากเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น	91
ภาพที่ 5.25	หน้าต่างแสดงผลของแรงดันจากเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น	91

	หน้า
ภาพที่ 5.26 หน้าต่างแสดงผลของกระแสจากเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น	92
ภาพที่ ก. 1 อุปกรณ์คล้องสำหรับวัดกระแส (AC Current clamp) รุ่น i200.....	98
ภาพที่ ข. 1 แผนภาพด้านบน (Top layer) และด้านล่าง (Bottom layer) ของวงจรลดทอนแรงดัน และป้องกันแรงดันเกิน	102
ภาพที่ ข. 2 แผนภาพ ด้านบน (Top layer) ของวงจรไฟเลี้ยง	102
ภาพที่ ค. 1 รูปแบบข้อมูลนำเข้า.....	103
ภาพที่ ฉ. 1 เครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้า Power VISA รุ่น 440 ของบริษัท DRANETZ	122

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาคุณภาพไฟฟ้า (Power quality, PQ) มีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้าเป็นอย่างมาก เนื่องด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาไปอย่างไม่หยุดนิ่ง ทั้งภาคอุตสาหกรรม ภาคธุรกิจ และภาคครัวเรือน มีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear load) มากขึ้น เช่น ภาคอุตสาหกรรมมีการใช้ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ (Adjustable speed drive, ASD) ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ของเครื่องจักร ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตมีมากขึ้น ภาคธุรกิจมีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำพวกคอมพิวเตอร์ เครื่องปรับอากาศ อุปกรณ์สำนักงาน และในภาคครัวเรือนมีการใช้ หลอดฟลูออเรสเซนต์ โทรทัศน์ เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้นเหล่านี้จัดเป็นแหล่งกำเนิด ฮาร์โมนิก และ อินเตอร์ฮาร์โมนิกซึ่งมีผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้า

ฮาร์โมนิก (Harmonic) และอินเตอร์ฮาร์โมนิก (Interharmonic) เป็นปรากฏการณ์อย่างหนึ่งในปัญหาทางคุณภาพไฟฟ้าที่สำคัญที่ต้องทำการแก้ไข เนื่องจากส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็น ค่ากำลังสูญเสียในระบบ ประสิทธิภาพในการทำงานของอุปกรณ์ลดลง การขยายขนาดของแรงดันและกระแสฮาร์โมนิกขณะเกิดเรโซแนนซ์ (Resonance) ส่งผลให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายเนื่องจากการได้รับกระแสหรือแรงดันเกินพิกัด นอกจากนี้ผลของกระแสฮาร์โมนิกที่สูงทำให้เกิดความร้อนซึ่งจะส่งผลต่อไปถึงอุปกรณ์ เช่น ทำให้ฟิวส์ของตัวคาปาซิเตอร์ขาดง่ายกว่าปกติ หรือเกิดสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสาร ทำให้มีการส่งข้อมูลผิดพลาด นอกจากนี้ฮาร์โมนิกอาจส่งผลกระทบต่อปริมาณใกล้เคียงได้อีกด้วย ผลกระทบต่างๆจากฮาร์โมนิกที่ปะปนในระบบไฟฟ้านี้ จึงเป็นปัญหาที่ควรจะมีการพิจารณาแก้ไข มีองค์กรมาตรฐานต่างๆ เช่น International Electrotechnical Commission (IEC) Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) รวมถึงมหาวิทยาลัยต่างๆได้ให้ความสนใจกับฮาร์โมนิก และอินเตอร์ฮาร์โมนิกมากขึ้น เนื่องจากส่งผลกระทบต่อภาคธุรกิจ และอุตสาหกรรมเป็นอย่างมากจึงได้มีการออกมาตรฐานเกี่ยวกับ คำอธิบาย การตรวจวัดและประเมินฮาร์โมนิกและอินเตอร์ฮาร์โมนิกขึ้น

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่างานวิจัยในส่วนของเครื่องมือวัดและวิเคราะห์ปริมาณฮาร์โมนิกยังคงใช้วิธีการคำนวณด้วยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier transform, FFT) ซึ่งไม่สามารถคำนวณอินเตอร์ฮาร์โมนิกได้แม่นยำ จะเน้นเฉพาะส่วนของขนาดฮาร์โมนิกเท่านั้น

ซึ่งในความเป็นจริงอินเตอร์ฮาร์โมนิกสามารถเกิดขึ้นในระบบได้ และส่งผลกระทบต่อระบบคุณภาพไฟฟ้าไม่น้อยกว่าฮาร์โมนิกเช่นกัน และการวัดฮาร์โมนิกและอินเตอร์ฮาร์โมนิกทั้งแรงดันและกระแส ของระบบ 3 เฟสยังมีไม่มาก นอกจากนี้ยังไม่มีวิธีการคำนวณดัชนีชี้วัดของเครื่องมือวัดฮาร์โมนิกที่อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 1459 (2010) มากนักซึ่งเป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับดัชนีการวิเคราะห์ฮาร์โมนิก

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ศึกษาและพัฒนาเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์โมนิกและอินเตอร์ฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้าแรงต่ำทั้งแรงดันและกระแส เพื่อใช้ในการวัดและวิเคราะห์ดัชนีที่เกี่ยวข้องกับฮาร์โมนิกและอินเตอร์ฮาร์โมนิก โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน IEEE 1459 (2010) IEC 61000-4-7 (2002) และข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์โมนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม (PRC-PQG-01/2008) มีการแสดงผลในรูปแบบกราฟ สเปกตรัม และเป็นตัวเลขสามารถบันทึกข้อมูลที่เกิดขึ้น มีการใช้งานไม่ซับซ้อน มีความยืดหยุ่นในการนำข้อมูลมาวิเคราะห์ เพื่อนำไปสู่แนวทางแก้ไขและปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้เครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์โมนิกและอินเตอร์ฮาร์โมนิกที่พัฒนาขึ้นได้มีการทดสอบกับสัญญาณที่จำลองขึ้น และสัญญาณจริงจากชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ โดยต่อผ่านวงจรลดทอนระดับแรงดันพร้อมทั้งป้องกันแรงดันเกิน และการ์ด Data Acquisition (DAQ card)

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1) พัฒนาเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์โมนิกและอินเตอร์ฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้าแรงต่ำ โดยมีดัชนีการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 1459 (2010) มาตรฐาน IEC 61000 - 4 - 7 (2002) และข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์โมนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม (PRC-PQG-01/2008) สำหรับระบบไฟฟ้าแรงต่ำ 400 โวลต์
- 2) ทดสอบเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์โมนิกและอินเตอร์ฮาร์โมนิกกับสัญญาณจริง โดยเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้า Power Visa

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) สร้างเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์โมนิกและอินเตอร์ฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้าแรงต่ำ โดยมีดัชนีการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 1459 (2010) มาตรฐาน IEC 61000 - 4 - 7 (2002) และข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์โมนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม (PRC-PQG-01/2008) สำหรับระบบไฟฟ้าแรงต่ำ 400 โวลต์

- 2) พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟสโดยใช้วิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris สำหรับทดสอบขั้นตอนวิธี (Algorithm) ในการหาขนาดและมุมเฟสของฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก
- 3) พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลัง 3 เฟสโดยใช้วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris สำหรับทดสอบเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นสำหรับวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินการ

- 1) ศึกษามาตรฐานและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้
 - 1.1) ศึกษาความหมาย แหล่งกำเนิด และผลกระทบของฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก
 - 1.2) ศึกษาข้อมูลพื้นฐานของการ์ด Data acquisition เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์วัดแรงดันและกระแส
 - 1.3) ศึกษาการออกแบบวงจรป้องกันแรงดันเกินสำหรับการ์ด Data acquisition
 - 1.4) ศึกษาวิธีการและปัญหาของวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว
 - 1.5) ศึกษาวิธีการและข้อดีของวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris
 - 1.6) ศึกษาซอฟต์แวร์ LabVIEW เพื่อใช้ในการพัฒนาซอฟต์แวร์การวัดและวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก
 - 1.7) ศึกษามาตรฐาน IEEE 1459 (2010) มาตรฐาน IEC 61000-4-7 (2002) และข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม (PRC-PQG-01/2008) สำหรับระบบไฟฟ้าแรงต่ำ 400 โวลต์
- 2) กำหนดขอบเขตของงานวิจัยรวมถึงรายละเอียดของข้อมูลต่างๆที่ใช้อ้างอิงในงานวิจัยสำหรับสร้างเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก
- 3) สร้างสัญญาณจำลองและพัฒนาซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกด้วยซอฟต์แวร์ MATLAB ดังนี้
 - 3.1) พัฒนาซอฟต์แวร์การวิเคราะห์ด้วยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว
 - 3.2) พัฒนาซอฟต์แวร์การวิเคราะห์ด้วยวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris ทดสอบซอฟต์แวร์การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของขนาดและมุมเฟสจากวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลองสัญญาณ

- 4) สร้างสัญญาณจำลองและพัฒนาซอฟต์แวร์วิเคราะห์วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris และคำนวณดัชนีการวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ LabVIEW อ้างอิงตามมาตรฐานในข้อที่ 1.7
- 5) สร้างเครื่องมือวัดฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ทั้งแรงดันและกระแส ดังนี้
 - 5.1) กำหนดอุปกรณ์การ์ด Data acquisition สำหรับวัดแรงดันและกระแส
 - 5.2) ออกแบบและสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดันและป้องกันแรงดันเกินสำหรับการวัด Data acquisition พร้อมทั้งทดสอบการทำงานของวงจร
- 6) ทดสอบเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกจากการจำลองสัญญาณและจากสัญญาณจริง โดยเปรียบเทียบกับเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า Power visa
- 7) วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย
- 8) เรียบเรียงผลงานวิจัยและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

- 1) มีความรู้ในเรื่องการออกแบบของเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ โดยมีดัชนีการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก และอินเตอร์ฮาร์มอนิกจากมาตรฐาน IEEE 1459 (2010) มาตรฐาน IEC 61000-4-7 (2002) และข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม (PRC-PQG-01/2008) สำหรับระบบไฟฟ้าแรงต่ำ 400 โวลต์
- 2) สามารถวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris โดยที่ผลของขนาดและมุมเฟสมีความใกล้เคียงกับขนาดและมุมเฟสของสัญญาณที่จำลองขึ้นมากกว่าวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว
- 3) สามารถวัดและวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงต่ำด้วยเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น
- 4) สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์สำหรับใช้ในการวัดฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกของกลุ่มพลังงานทดแทนหรือกลุ่มของโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะที่กำลังจะเข้ามามีบทบาทมากขึ้น เนื่องจากกลุ่มพลังงานเหล่านี้ในบางประเภทจำเป็นต้องใช้อินเวอร์เตอร์สำหรับแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ ซึ่งอุปกรณ์นี้เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอย่างหนึ่ง

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

- บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์
- บทที่ 2 กล่าวถึงนิยาม แหล่งกำเนิด ผลกระทบ การวิเคราะห์และมาตรฐานสำหรับการคำนวณหาคุณลักษณะของฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก
- บทที่ 3 กล่าวถึงการพัฒนาเครื่องมือวัดฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ การ์ด Data acquisition และวงจรลดทอนระดับแรงดันและป้องกันแรงดันเกิน
- บทที่ 4 กล่าวถึงการพัฒนาซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์ และการทำงานของซอฟต์แวร์
- บทที่ 5 กล่าวถึงการทดสอบเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก
- บทที่ 6 สรุปผลที่ได้จากงานวิจัยและข้อเสนอแนะแนวทางพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

การวิเคราะห์และการตรวจวัดฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิก (Harmonic) และอินเทอร์ฮาร์มอนิก (Interharmonic) เป็นปัญหาทางคุณภาพไฟฟ้า (Power quality) ที่สำคัญที่ต้องพิจารณาเกิดขึ้นได้ทั้งแรงดันและกระแส จะปรากฏผลอยู่ในรูปของการเกิดความร้อน การขยายปริมาณกระแสไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงาน อุปกรณ์เกิดความเสียหาย เสื่อมสภาพ เป็นต้น ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้โหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear load)

โหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้น คือ อุปกรณ์ซึ่งรับแรงดันไฟฟ้าที่เป็นรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal waveform) แต่ดึงกระแสที่ไม่ใช่รูปคลื่นไซน์ (Non-sinusoidal waveform) อุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นนี้จะรวมถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือแหล่งกำเนิดใดๆที่มีการสร้างกระแสที่ไม่ใช่รูปคลื่นไซน์ด้วย [1] เช่น ระบบ Regenerative braking อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ตัวเรียงกระแส ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วคอนเวอเตอร์ เป็นต้น อุปกรณ์เหล่านี้จะจ่ายกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบไฟฟ้า ซึ่งอาจไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้าอื่นในบริเวณใกล้เคียง ทำให้กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ามีความผิดเพี้ยน (Distortion) ของขนาดและมุมเฟสไปจากปกติ สร้างความเสียหายต่อคุณภาพไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า

2.1 ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก

2.1.1 คำจำกัดความ

คำนิยามของส่วนประกอบย่อยฮาร์มอนิก อินเทอร์ฮาร์มอนิก และฮาร์มอนิกสามารถสรุปได้จากหลายมาตรฐาน ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ประเภทและความหมายของฮาร์มอนิก [2]

ประเภท	ความหมาย	ตัวอย่าง
ส่วนประกอบย่อยฮาร์มอนิก	$0 < f < f_1$ เฮิร์ตซ์	1, 20, 47
ฮาร์มอนิก	$f = h \times f_1$ เมื่อ h คือจำนวนเต็มที่มีมากกว่า 1	100, 150, 950
อินเทอร์ฮาร์มอนิก	$f \neq h \times f_1$ เมื่อ h คือจำนวนเต็มที่มีมากกว่า 1	75, 183, 355

หมายเหตุ: f_1 คือความถี่มูลฐานในระบบไฟฟ้ากำลัง

1. ส่วนประกอบย่อยฮาร์โมนิก (Sub-harmonic)

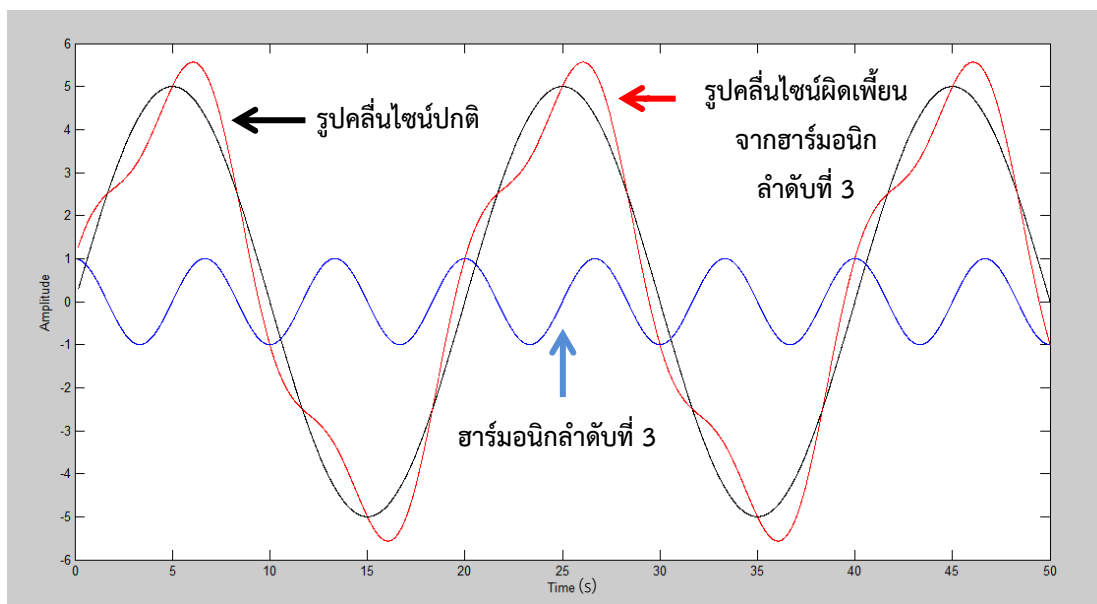
คำนิยามของส่วนประกอบย่อยฮาร์โมนิกไม่ได้มีการระบุอย่างแน่นอน ถือเป็นกรณีพิเศษของอินเทอร์ฮาร์โมนิกเมื่อมีความถี่น้อยกว่าความถี่มูลฐานในระบบ หรืออีกนัยหนึ่งส่วนประกอบย่อยฮาร์โมนิกเป็นเซตย่อยของอินเทอร์ฮาร์โมนิก

2. อินเทอร์ฮาร์โมนิก (Interharmonic)

คำนิยามของอินเทอร์ฮาร์โมนิก ตามมาตรฐาน IEC 61000-4-7 [3] คือส่วนประกอบในรูปคลื่นสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน เช่น ความถี่ 9.5 เฮิร์ตซ์ 104 เฮิร์ตซ์ และ 117 เฮิร์ตซ์ เป็นต้น

3. ฮาร์โมนิก (Harmonic)

คำนิยามของฮาร์โมนิก ตามมาตรฐาน IEEE 519 คือ ส่วนประกอบในรูปคลื่นสัญญาณไซน์ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน เช่น ความถี่ 150 เฮิร์ตซ์ 250 เฮิร์ตซ์ และ 350 เฮิร์ตซ์ เป็นต้น เมื่อสัญญาณรูปคลื่นไซน์ใด ๆ มีส่วนประกอบฮาร์โมนิกเป็นส่วนประกอบผสมจะทำให้สัญญาณมีความผิดเพี้ยนเกิดขึ้นดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ความผิดเพี้ยนของสัญญาณเมื่อมีฮาร์โมนิก

2.1.2 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกเกิดได้หลายสาเหตุ โดยส่วนใหญ่มาจากอุปกรณ์ประเภทไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากนี้ยังรวมไปถึงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือแหล่งจ่ายไฟฟ้า อุปกรณ์ประเภทสวิตซ์ซึ่ง เป็นต้น ผลกระทบที่เกิดจากฮาร์มอนิกหรืออินเตอร์ฮาร์มอนิกขึ้นอยู่กับขนาดของฮาร์มอนิกหรืออินเตอร์ฮาร์มอนิกที่ปะปนอยู่ในระบบ

2.1.2.1 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

โดยทั่วไปแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกสามารถแบ่งได้หลายประเภท [4] ดังนี้

1. แบ่งตามระยะเวลา

- 1) เกิดอย่างต่อเนื่อง เช่น ระบบส่งแรงดันไฟฟ้าด้วยไฟฟ้ากระแสตรง หม้อแปลงไฟฟ้า บาลาสต์อิเล็กทรอนิกส์
- 2) เกิดขณะใดขณะหนึ่ง เช่น เครื่องเชื่อมแบบอาร์ค และแบบสปอต อุปกรณ์ควบคุมความเร็วมอเตอร์

2. แบ่งตามส่วนประกอบ

- 1) ส่วนประกอบฮาร์มอนิก เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า กระบวนการทางเคมีไฟฟ้า อุปกรณ์ที่มีการใช้แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซ์ซึ่ง
- 2) ส่วนประกอบอินเตอร์ฮาร์มอนิก เช่น เต้าหลอมแบบอาร์ค คอนเวอร์เตอร์ ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ (Cycloconverter)

3. แบ่งตามอุปกรณ์

- 1) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นหลัก เช่น ตัวเรียงกระแส คอนเวอร์เตอร์ อินเวอร์เตอร์
- 2) อุปกรณ์ประเภทแม่เหล็กเป็นหลัก เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า มอเตอร์ บาลาสต์ แม่เหล็กไฟฟ้า
- 3) เต้าหลอม หรือ แก๊สดีสชาร์จ เช่น หลอดไฟฟ้าปล่อยประจุ เต้าหลอมแบบอาร์ค และเครื่องเชื่อมแบบอาร์ค

4. แบ่งตามขนาดของอุปกรณ์

- 1) ขนาดเล็ก เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
- 2) ขนาดใหญ่ เช่น ระบบส่งแรงดันไฟฟ้าด้วยไฟฟ้ากระแสตรง เต้าหลอมแบบอาร์ค กระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ (Adjustable speed drives)

2.1.2.2 แหล่งกำเนิดอินเตอร์ฮาร์โมนิก

อินเตอร์ฮาร์โมนิกจะปรากฏในอุปกรณ์ทุกตัวที่มีวงจรแปลงผันการสวิตช์กำลัง (Power switching converters) และจะปรากฏเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลตัวอย่างรวดเร็ว (Rapid current change) ดังนั้นสามารถแบ่งแหล่งกำเนิดอินเตอร์ฮาร์โมนิกได้ดังนี้

1. วงจรแปลงผันการสวิตช์กำลัง เช่น

- 1) ระบบจ่ายพลังงานกระแสสลับเป็นกระแสตรง (AC /DC supply)
- 2) อุปกรณ์ปรับปรุ่งค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์
- 3) PWM สำหรับควบคุมการสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย
- 4) อุปกรณ์ควบคุมความเร็วมอเตอร์ (Variable speed drives)
- 5) ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ (Cycloconverter)

2. การเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลตัวอย่างรวดเร็ว เช่น

- 1) เต้าหลอมแบบอาร์ค
- 2) เครื่องเชื่อมแบบอาร์ค

2.1.3 ผลกระทบจากฮาร์โมนิกและอินเตอร์ฮาร์โมนิก

ผลกระทบของฮาร์โมนิกและอินเตอร์ฮาร์โมนิกล้วนแต่ส่งผลเสียต่อคุณภาพไฟฟ้า รายละเอียดผลกระทบสามารถสรุปได้ดังนี้

2.1.3.1 ผลกระทบจากฮาร์โมนิก

ผลกระทบจากฮาร์โมนิกสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม มีดังต่อไปนี้

1. ผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า

- 1) ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณฮาร์โมนิกเนื่องจากเรโซแนนซ์แบบขนานและเรโซแนนซ์แบบอนุกรมในระบบไฟฟ้า และเมื่อความถี่

ฮาร์มอนิกตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ จะทำให้เกิดการขยายขนาดและแรงดันกระแสส่งผลต่ออุปกรณ์ เช่น เกิดความร้อน

- 2) ลดประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบสายส่ง และการใช้ประโยชน์ของพลังงานจากผลของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลอยู่ในระบบทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียในสายมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการส่งจ่ายลดลงเนื่องจากกระแสฮาร์มอนิก
- 3) ฉนวนเสื่อมสภาพ มีอายุการใช้งานสั้นลง
- 4) อุปกรณ์ในระบบมีการทำงานผิดพลาด

2. ผลกระทบต่ออุปกรณ์ หรือ โหลด

- 1) เกิดความร้อนและเสื่อมสภาพของตัวคาปาซิเตอร์ หม้อแปลงไฟฟ้า และมอเตอร์
- 2) ผลของกระแสฮาร์มอนิกทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดของหม้อแปลงมีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้ประสิทธิภาพในการรับโหลดของหม้อแปลงลดลงไปผลของแรงดันฮาร์มอนิกทำให้เกิดกำลังสูญเสียกระแสไหลวน และกำลังสูญเสียฮิสเทอรีซิสเพิ่มขึ้น
- 3) เกิดการสูญเสียในขดลวดตัวนำ (Copper loss) หรือในแกนเหล็ก (Iron loss) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 4) เกิดความผิดปกติของระบบควบคุมป้องกัน เช่น ส่งผลให้รีเลย์เกิดการดำเนินงานผิดพลาด โดยอาจจะทำงานช้าลง รีเลย์มีแรงดันและกระแสเกินพิกัด เป็นต้น
- 5) อุปกรณ์วัดไม่แม่นยำ
- 6) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เสียหาย
- 7) ในระบบแสงสว่างจะทำให้หลอดไส้ ใช้งานได้น้อยลง และเกิดความร้อนของหลอดฟลูออเรสเซนต์

3. ผลกระทบต่อระบบสื่อสาร

- 1) เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) ในเส้นทางการสื่อสาร
- 2) เกิดความร้อนในเส้นทางการรับ ส่ง สัญญาณ

2.1.3.2 ผลกระทบจากอินเทอร์ฮาร์โมนิก

การปรากฏของอินเทอร์ฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับกระบวนการทำงานของโหลดในระบบ แต่โดยทั่วไปแล้วผลกระทบจากอินเทอร์ฮาร์โมนิก [5] ที่พบมีดังนี้

1. เกิดการรบกวนการควบคุมและป้องกันสัญญาณในสายไฟ
2. เกิดการรบกวนในหลอดฟลูออเรสเซนต์ (เกิดไฟกระพริบ)
3. เกิดความร้อนและเสื่อมสภาพของอุปกรณ์
4. เกิดแรงบิดที่เพิ่มขึ้นในมอเตอร์ และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า
5. เกิดการแกว่งของความถี่ขนาดเล็กในระบบของเครื่องจักร
6. เกิดการรบกวนในระบบสื่อสาร
7. เกิดการรบกวนทางเสียง (Acoustic disturbance)
8. เกิดการอิมิตัวของหม้อแปลงกระแสไฟ

2.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะฮาร์โมนิกและอินเทอร์ฮาร์โมนิก

สัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเป็นสัญญาณแอนะล็อกจะต้องทำการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบดิจิทัล ก่อนจะทำการส่งสัญญาณผ่านระบบดิจิทัลได้ ซึ่งการแปลงข้อมูลสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลจะอาศัยวิธีการซิกตัวอย่าง (Sampling method) โดยการกำหนดอัตราการซิกตัวอย่างนั้นจะมีผลต่อคุณภาพในการสร้างสัญญาณต้นฉบับกลับมา หากกำหนดอัตราการซิกตัวอย่างที่ต่ำเกินไป ก็จะส่งผลให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณต้นฉบับ ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปัญหาเอเลียสซิง (Aliasing) ซึ่งจะอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อที่ 2.2.1.1

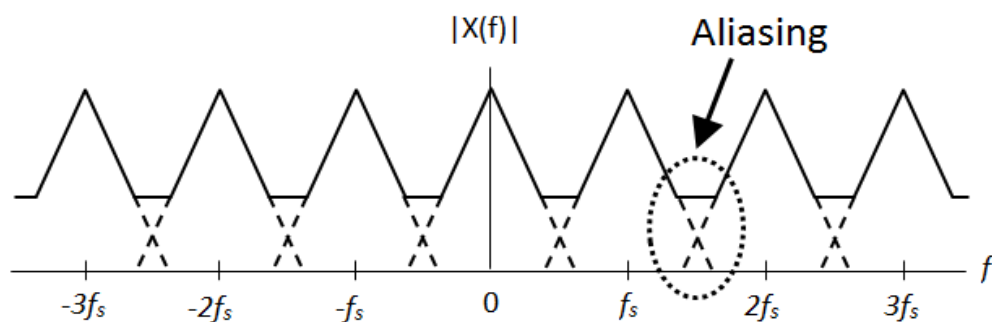
ในการวิเคราะห์สัญญาณเชิงเวลา เมื่อการซิกตัวอย่างในหนึ่งรูปคลื่นไม่ลงตัว หรือการซิกตัวอย่างไม่ลงพอดีคาบของสัญญาณนั้นจะทำให้เกิดความถี่เล็กๆนอกเหนือจากความถี่ที่แท้จริงของสัญญาณปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การรั่วไหลของสเปกตรัม (Spectral leakage) ซึ่งจะอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อที่ 2.2.1.2 และการลดปัญหาการรั่วไหลของสเปกตรัมนี้สามารถทำได้โดยวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris ซึ่งรูปแบบของฟังก์ชันหน้าต่าง (Window function) มีหลายชนิด สามารถเลือกนำไปใช้ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

2.2.1 ปัญหาในการวิเคราะห์คุณลักษณะฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก

ปัญหาการรั่วไหลของสเปกตรัมและเอเลียสซิง เป็นปัญหาที่ควรคำนึงถึงเมื่อต้องการวิเคราะห์คุณลักษณะของฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก ปัญหาเหล่านี้ส่งผลให้ในการวัดคุณลักษณะทั้งขนาดและมุมเฟสของฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกแต่ละความถี่มีความผิดพลาดเกิดขึ้น โดยทั่วไปการวัดคุณลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณกระแสและแรงดันจะใช้วิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว แต่ผลลัพธ์ที่ได้มีข้อจำกัดเมื่อมีความถี่ที่ไม่เป็นจำนวนเต็มหรือไม่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐานมาเป็นส่วนประกอบของสัญญาณ นั่นหมายถึงในแรงดันหรือกระแสมีอินเทอร์ฮาร์มอนิก หรือส่วนประกอบย่อยฮาร์มอนิกเข้ามาปะปนทำให้การวัดด้วยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว มีความผิดพลาดเกิดขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้มีความผิดพลาดจากค่าจริงไปอย่างมากโดยเฉพาะมุมเฟส เนื่องจากการซัดตัวอย่างที่ไม่เหมาะสม ซึ่งส่งผลทำให้การวิเคราะห์และการนำข้อมูลไปใช้ต่อเกิดความผิดพลาด และนำไปสู่การแก้ปัญหาที่ไม่ถูกต้อง

2.2.1.1 ปัญหาเอเลียสซิง (Aliasing)

จากทฤษฎีการสุ่มสัญญาณ (Sampling theorem) หากสัญญาณมีความถี่สูงสุดที่ f_{\max} เพื่อให้ได้สัญญาณที่สุ่มแล้วยังคงสามารถเป็นตัวแทนของสัญญาณเริ่มต้นได้นั้น ความถี่ในการสุ่มจะต้องมีค่ามากกว่าสองเท่าของความถี่สูงสุดในสัญญาณ หรือ $f_s > 2f_{\max}$ ซึ่งความถี่นี้มีชื่อเรียกว่า ค่าความถี่ไนควิสต์ (Nyquist frequency) ซึ่งถ้าความถี่ในการสุ่มมีค่าต่ำกว่าค่าความถี่ไนควิสต์จะทำให้ช่วงความถี่ส่วนปลายเกิดการซ้อนทับกันดังภาพที่ 2.2 เรียกส่วนที่ซ้อนทับกันนี้ว่า เอเลียสซิง ซึ่งส่งผลให้การสร้างสัญญาณต้นฉบับไม่เหมือนเดิม มีความผิดพลาดของสัญญาณทำให้การนำข้อมูลไปวิเคราะห์ต่อเกิดความผิดพลาดได้ [6]



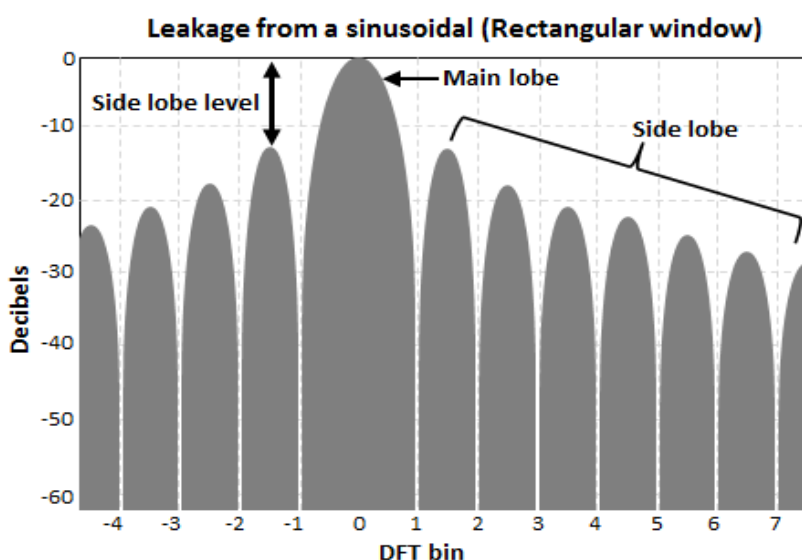
ภาพที่ 2.2 สัญญาณในเชิงความถี่เมื่อความถี่ในการสุ่มน้อยกว่าค่าความถี่ไนควิสต์ [6]

ดังนั้นอัตราการซีกตัวอย่างที่มากกว่าสองเท่าของความถี่สูงสุดนั้นจะสามารถเก็บรายละเอียดของสัญญาณได้มากกว่าอัตราการซีกตัวอย่างที่ต่ำ ดังนั้นจะทำให้รูปสัญญาณที่ได้มีความใกล้เคียงกับสัญญาณต้นฉบับเดิม

2.2.1.2 ปัญหาการรั่วไหลของสเปกตรัม (Spectral leakage)

การรั่วไหลของสเปกตรัม คือ การมีความถี่อื่นที่ไม่ใช่ความถี่ของสัญญาณจริงปรากฏในสเปกตรัม หรืออีกนัยหนึ่ง คือ พลังงานของสัญญาณมีกระจายตัวไปอยู่ในความถี่อื่นนอกเหนือจากความถี่ที่แท้จริงของสัญญาณ

สาเหตุปัญหาการรั่วไหลของสเปกตรัมเกิดเมื่อมีการเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณเป็นค่าที่ไม่เป็นเลขจำนวนเต็ม จะทำให้อัตราส่วนของจำนวนการสุ่มข้อมูลในหนึ่งรูปคลื่นไม่ลงตัวส่งผลให้การสุ่มข้อมูลไม่ลงตัวพอดีกับรูปคลื่นจึงทำให้เกิดคลื่นของความถี่เล็กๆขึ้นระหว่างค่าความถี่ที่แท้จริง หรือเกิดจากการวิเคราะห์สัญญาณที่มีความยาวจำกัดค่าหนึ่งด้วยวิธี DFT (หรือ FFT) วิธีนี้จะเป็นการซีกตัวอย่างในเชิงความถี่ นั่นคือสเปกตรัมจะมีค่าความถี่เป็นจุดๆไม่ได้เป็นสัญญาณต่อเนื่อง ที่เรียกว่า Frequency bin หรือ FFT bin นั่นเอง เพราะฉะนั้นถ้าความถี่ของสัญญาณจริงไม่เท่ากับค่าความถี่ของ bin ใด bin หนึ่ง พลังงานของความถี่นั้นๆก็จะแบ่งไปอยู่ในทั้ง 2 bin ที่อยู่ติดกัน ก็จะทำให้เกิดการรั่วไหลของสเปกตรัม นอกจากนี้การใช้วิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว เทียบเท่ากับการใช้วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Rectangular ผลในเชิงความถี่ก็จะทำให้แต่ละความถี่แพร่กระจายออกไปยังความถี่ใกล้เคียง ทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลเกิดความผิดเพี้ยนขึ้นทั้งขนาดและมุมเฟส



ภาพที่ 2.3 การรั่วไหลของสเปกตรัมของ Window แบบ Rectangular

จากภาพที่ 2.3 แสดงการรั่วไหลของสเปกตรัมของวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Rectangular จะเห็นได้ว่าระดับของ Main lobe มีระดับใกล้เคียงกับ Side lobe ข้างเคียง ส่งผลให้เกิดการรั่วไหลไปยังสเปกตรัมข้างเคียงได้

การรั่วไหลของสเปกตรัมเกิดในกรณีที่ Side lobe ของความถี่หนึ่งอาจไปทับซ้อนกับ Main lobe ของอีกความถี่หนึ่ง และถ้าขนาดของ Main lobe ของความถี่ที่สองนี้มีขนาดใกล้เคียงหรือเล็กกว่า Side lobe ของความถี่แรก ก็จะทำให้ค่าขนาดและเฟสของ Main lobe ของความถี่ที่สองนี้เพี้ยนไป เพราะมีพลังงานจากความถี่แรกรั่วไหลเข้ามาปนด้วย หรือกรณี Main lobe ของความถี่ที่สองมีขนาดเล็กกว่าของความถี่แรกมากก็อาจจะทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ความถี่ที่สองได้เลย เพราะคิดว่าเป็น Side lobe ของความถี่แรก

ในทางอุดมคติการวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณที่ถูกต้องแม่นยำจะมีรูปแบบของ Main lobe ที่แคบ และขนาด Side lobe ที่ต่ำ แต่ในความเป็นจริง ถ้า Main lobe แคบ Side lobe ก็จะมีค่าสูง ถ้า Side lobe มีค่าต่ำ Main lobe ก็มักจะบานออก ดังนั้นจึงมีการพัฒนาฟังก์ชันหน้าต่างที่มีคุณสมบัติครอบคลุม Main lobe และ Side lobe สำหรับลดปัญหาการรั่วไหลของสเปกตรัม

2.2.2 วิธีฟังก์ชันหน้าต่าง (Window function)

ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสัญญาณโดยทั่วไปแล้วสามารถคำนวณได้จากวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว ซึ่งมีโอกาสเกิดการรั่วไหลของสเปกตรัมได้ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวิธีฟังก์ชันหน้าต่างขึ้นมีจุดประสงค์หลักเพื่อลดปัญหาการรั่วไหลของสเปกตรัม วิธีฟังก์ชันหน้าต่างมีหลายรูปแบบแตกต่างกันตามลักษณะของ Side lobe level และ Main lobe ของฟังก์ชันหน้าต่างนั้น เช่น แบบ Rectangular Hanning Hamming Blackman และ Blackman - Harris เป็นต้น รูปแบบของฟังก์ชันหน้าต่างในแต่ละแบบมีข้อดีข้อเสียต่างกัน ดังนั้นควรเลือกให้เหมาะสมกับงาน โดยวิธี Window มีสมการทั่วไป ดังนี้ [7]

$$w_H(n) = \sum_{i=0}^K (-1)^i a_i \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1} i\right), n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.1)$$

โดยที่ N คือ จำนวนของข้อมูลตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์

a_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันหน้าต่างแต่ละประเภท

K และ i คือ จำนวนเต็มใดๆ ขึ้นอยู่กับฟังก์ชันหน้าต่างแต่ละประเภท

วิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะของสัญญาณด้วยวิธีฟังก์ชันหน้าต่าง สามารถทำได้โดยนำสมการที่ (2.1) มาคูณกับสัญญาณที่พิจารณาได้โดยตรงเมื่อเป็นการสุ่มตัวอย่างในเชิงเวลา ดังสมการที่ (2.2)

และหากเป็นการซัดตัวอย่างในเชิงความถี่จะนำสมการที่ (2.1) มาทำการคอนโวลูชันกับสัญญาณที่สนใจ ดังสมการที่ (2.3)

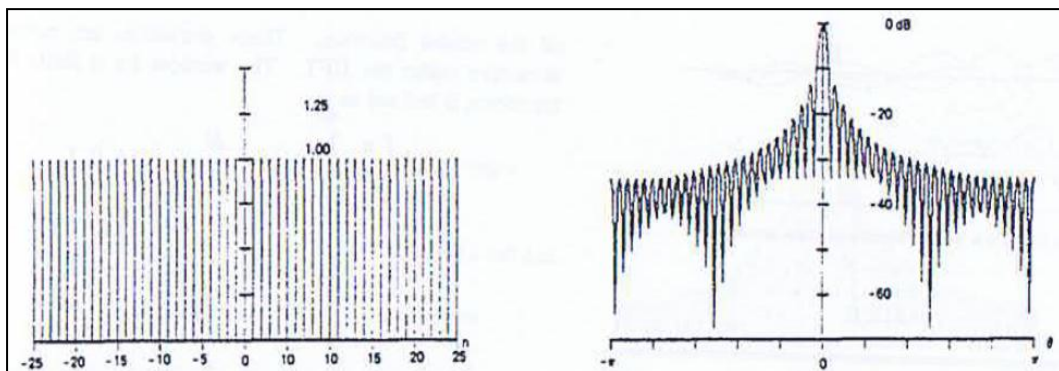
$$X(t) = x_n(t) \times w_H(n) \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} X(e^{j\omega}) &= X_n(e^{j\omega}) \otimes W_H(e^{j\omega}) \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} X_n(e^{j\tau}) W_H[e^{j(\omega-\tau)}] d\tau \\ &= A_n W_H(\omega - \omega_n) e^{j(\varphi_n - (N-1)(\omega - \omega_n)/2)} \end{aligned} \quad (2.3)$$

จากนั้นนำข้อมูลจากสมการที่ (2.2) มาวิเคราะห์ต่อไปโดยใช้วิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว จากนั้นแก้สมการหาขนาดและมุมเฟสเพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะของสัญญาณต่อไปรายละเอียดการคำนวณจะอธิบายในบทที่ 4

ตัวอย่างวิธีฟังก์ชันหน้าต่าง [8] ในแต่ละแบบมีดังนี้

2.2.2.1 วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Rectangular



ภาพที่ 2.4 วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Rectangular (ซ้าย)
และสเปคตรัมของฟังก์ชันหน้าต่างเชิงความถี่ (ขวา)

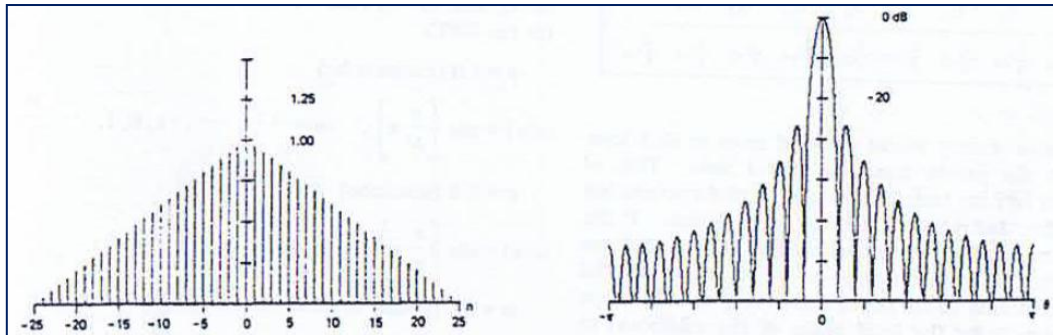
รูปแบบของสมการ

$$w(n) = 1, 0 \leq n < NP \quad (2.4)$$

โดยที่ NP คือ จำนวนจุดที่ใช้ในการสุ่มข้อมูลทั้งหมด

ขนาด Side lobe = -13 เดซิเบล

2.2.2.2 วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Bartlett หรือ Triangle



ภาพที่ 2.5 วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Bartlett window (ซ้าย)
และสเปกตรัมของฟังก์ชันหน้าต่างเชิงความถี่ (ขวา)

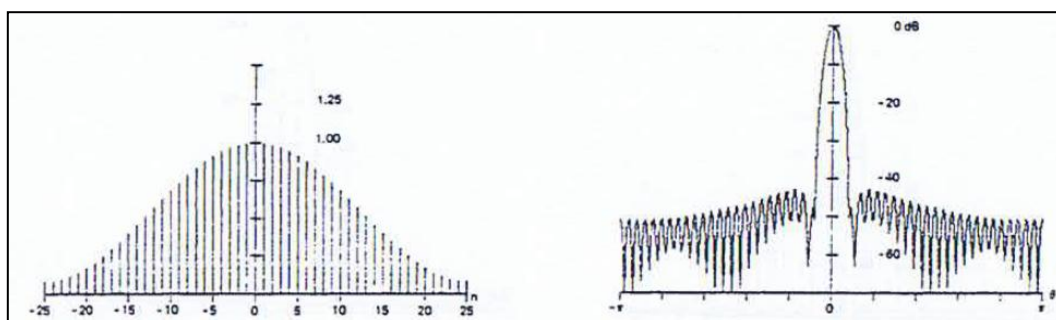
รูปแบบของสมการ

$$w(n) = \frac{2n}{(NP - 1)}, 0 \leq n < (NP / 2) - 1 \quad (2.5)$$

$$w(n) = \frac{2 - 2n}{(NP - 1)}, (NP / 2) \leq n < NP \quad (2.6)$$

ขนาด Side lobe = -27 เดซิเบล

2.2.2.3 วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Hamming



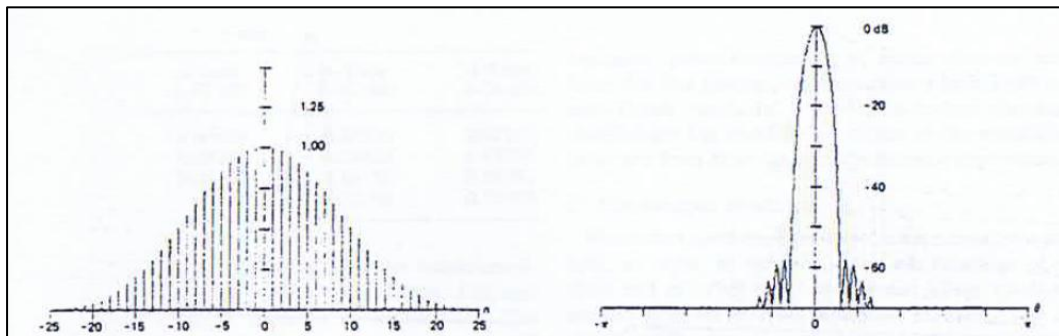
ภาพที่ 2.6 วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Hamming (ซ้าย)
และสเปกตรัมของฟังก์ชันหน้าต่างเชิงความถี่ (ขวา)

รูปแบบของสมการ

$$w(n) = 0.54 - 0.46 \left(\cos\left(\frac{2\pi n}{NP-1}\right) \right), 0 \leq n < NP \quad (2.7)$$

ขนาด Side lobe = -43 เดซิเบล

2.2.2.4 วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman



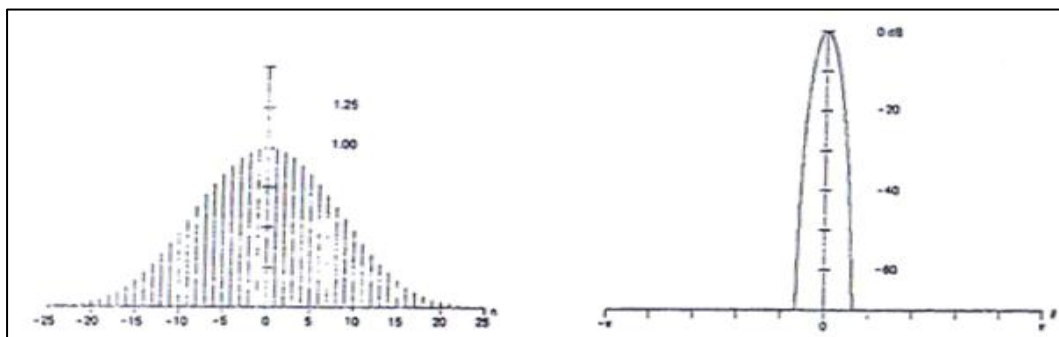
ภาพที่ 2.7 วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman (ซ้าย)
และสเปกตรัมของฟังก์ชันหน้าต่างเชิงความถี่ (ขวา)

รูปแบบของสมการ

$$w(n) = 0.42323 - 0.49755 \left(\cos\left(\frac{2\pi n}{NP-1}\right) \right) + 0.07922 \left(\cos\left(\frac{4\pi n}{NP-1}\right) \right), 0 \leq n < NP \quad (2.8)$$

ขนาด Side lobe = -58 เดซิเบล

2.2.2.5 วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris



ภาพที่ 2.8 วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris (ซ้าย)
และสเปกตรัมของฟังก์ชันหน้าต่างเชิงความถี่ (ขวา)

รูปแบบของสมการ

$$w(n) = 0.35875 - 0.48829 \left(\cos\left(\frac{2\pi n}{NP-1}\right) \right) + 0.14128 \left(\cos\left(\frac{4\pi n}{NP-1}\right) \right) - 0.01168 \left(\cos\left(\frac{6\pi n}{NP-1}\right) \right), \quad 0 \leq n < NP \quad (2.9)$$

ขนาด Side lobe = -92

ตารางที่ 2.2 ขนาดของ Side-lobe ในแต่ละฟังก์ชันหน้าต่างต่าง [8]

ชนิดฟังก์ชันหน้าต่าง	Highest Side-Lobe (dB)	Main lobe 3.0 dB BW (bins)
Rectangular	-13	0.89
Bartlett window หรือ Triangle	-27	1.28
Hamming	-43	1.30
Hanning	-47	1.86
Kaiser – Bessel	-57	1.57
Guassin	-55	1.79
Blackman	-58	1.68
Blackman-Harris	-92	1.90

จากตารางที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าลักษณะของฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris มีขนาด Side lobe ต่ำที่สุด นั่นคือสามารถหลีกเลี่ยงการเกิดซ้อนทับกันระหว่าง Side lobe กับ Main lobe ข้างเคียงดังนั้นความสามารถในการลดปัญหาการรั่วไหลของสเปกตรัมของฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris ดีที่สุดเมื่อเทียบกับฟังก์ชันหน้าต่างแบบอื่น

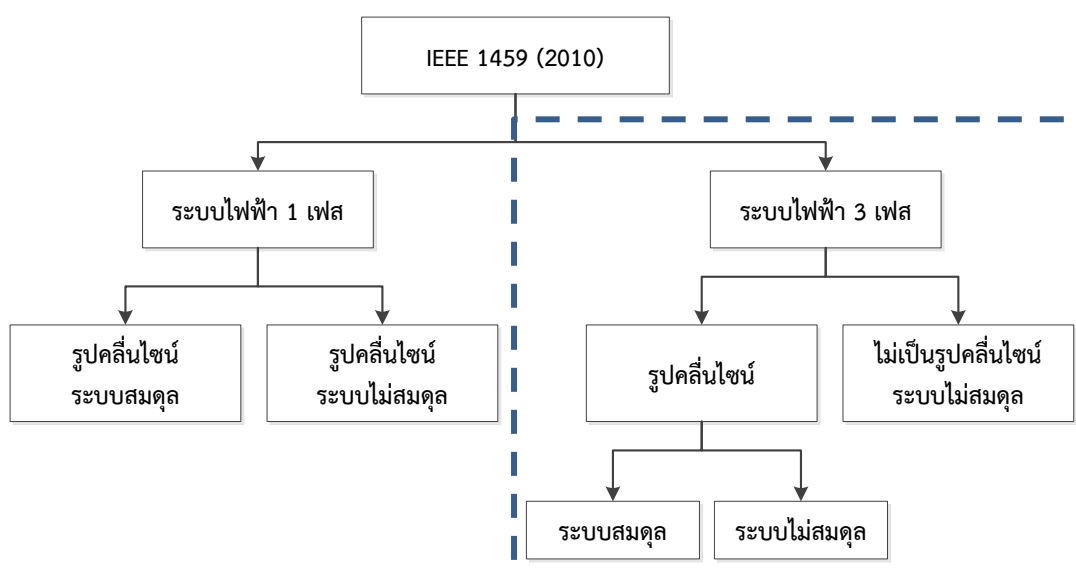
2.3 มาตรฐานสำหรับอธิบายและประเมินฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก

2.3.1 มาตรฐาน IEEE 1459 (2010)

เมื่อเดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2000 มาตรฐานดัชนีชี้วัดทางไฟฟ้าที่กล่าวเน้นถึง ส่วนประกอบฮาร์มอนิกมีการประกาศทดลองใช้ในชื่อของ IEEE 1459 (2010) หลังจากนั้น 10 ปี ได้มีการปรับปรุงแก้ไขมาตรฐานให้ถูกต้อง ให้เหมาะสมกับการวัดปริมาณทางไฟฟ้า จึงเกิดเป็นมาตรฐาน IEEE 1459 (2010) ขึ้น

มาตรฐานนี้เป็นมาตรฐานใหม่ ปี 2010 ที่อธิบายถึงการดัชนีการวัดปริมาณทางไฟฟ้า เมื่อ สัญญาณเป็นรูปคลื่นไซน์ สัญญาณไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ ระบบที่สมดุล และระบบที่ไม่สมดุล สำหรับระบบไฟฟ้า 1 เฟส และ 3 เฟส ดังภาพที่ 2.9

ความสำคัญของมาตรฐาน IEEE 1459 (2010) คือการแยกแรงดัน และกระแส ที่ความถี่มูลฐาน ออกจากส่วนประกอบฮาร์มอนิกที่ปะปนทั้งหมด มีดัชนีชี้วัดใหม่ที่สำคัญคือ Harmonic pollution ดัชนีตัวนี้จะทำการวิเคราะห์ขนาดของกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากฮาร์มอนิก หากค่าดัชนีนี้มาก จะทำให้สามารถทราบได้ว่าในระบบมีปริมาณฮาร์มอนิกปะปนอยู่ปริมาณมาก ซึ่งสามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้หาแนวทางแก้ไขปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบต่อไป [9]



ภาพที่ 2.9 แผนผังจำแนกเงื่อนไขการคำนวณปริมาณทางไฟฟ้ากำลัง

ตามมาตรฐาน IEEE 1459 (2010) [9]

ในงานวิจัยนี้ทำการวัดระบบไฟฟ้า 3 เฟส ดังนั้นดัชนีชี้วัดในมาตรฐานนี้จะพิจารณาเฉพาะระบบ 3 เฟส ในกรอบเส้นประเท่านั้น รายละเอียดจากภาพที่ 2.9 สามารถสรุปได้ดังนี้

2.3.1.1 ระบบสามเฟสภายใต้สภาวะรูปคลื่นไซน์สมดุล

รูปคลื่นของแรงดัน และกระแส เป็นฟังก์ชันของไซน์ที่ความถี่เดียว ทำให้ปริมาณทางไฟฟ้ากำลังมีเพียงค่าที่ความถี่มูลฐานเท่านั้น ปริมาณทางไฟฟ้ากำลังที่สำคัญได้แก่ กำลังไฟฟ้าจริง (P) กำลังไฟฟ้าจินตภาพ (Q) กำลังไฟฟ้าปรากฏ (S) และตัวประกอบกำลัง (PF)

2.3.1.2 ระบบสามเฟสภายใต้สภาวะรูปคลื่นไซน์ไม่สมดุล

เมื่อแรงดัน และกระแสเป็นรูปคลื่นไซน์ ส่งผลให้ปริมาณทางไฟฟ้ากำลังมีเพียงค่าที่ความถี่มูลฐานเท่านั้น ส่วนผลของสภาวะไม่สมดุล (ขนาดของแรงดัน และกระแสในแต่ละเฟสไม่เท่ากัน หรือผลต่างเฟสของแรงดัน และ กระแสแต่ละเฟส ต่างกันไม่เท่ากับ 120 องศา) จะส่งผลให้การคำนวณปริมาณทางไฟฟ้ากำลัง ในระบบ 3 เฟส 4 สาย กับ 3 เฟส 3 สายต่างกัน โดยปริมาณทางไฟฟ้าที่สำคัญคำนวณจาก แรงดันประสิทธิผล (Effective voltage, V_e) และกระแสประสิทธิผล (Effective current, I_e)

2.3.1.3 ระบบสามเฟสภายใต้สภาวะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ไม่สมดุล

เมื่อแรงดัน และกระแสไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ ส่งผลให้ปริมาณทางไฟฟ้ากำลังแบ่งออกเป็นค่าที่ความถี่มูลฐาน และค่าที่ความถี่ฮาร์โมนิก และเนื่องจากอยู่ในสภาวะไม่สมดุล ทำให้การคำนวณปริมาณทางไฟฟ้ากำลัง ในระบบ 3 เฟส 4 สาย และ 3 เฟส 3 สาย มีความแตกต่างกัน โดยการคำนวณปริมาณทางไฟฟ้าภายใต้สภาวะนี้ จำเป็นต้องพิจารณาจาก แรงดัน ประสิทธิผล (V_e) และกระแสประสิทธิผล (I_e) แต่จะมีความซับซ้อนกว่าเนื่องจาก แรงดัน และกระแส จะมีองค์ประกอบของความถี่มูลฐาน และความถี่ฮาร์โมนิก ปะปนกันอยู่ในระบบ

ดัชนีชี้วัดทางไฟฟ้ากำลังที่สำคัญในระบบ 3 เฟส ภายใต้สภาวะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ไม่สมดุลที่ใช้ในการคำนวณเพื่อนำไปวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1459 (2010) จะแบ่งกลุ่มย่อยในการคำนวณดัชนีชี้วัดแต่ละชนิดเป็น 3 กลุ่ม นั่นคือ กลุ่มของกำลังไฟฟ้ามูลฐาน (Fundamental powers) กลุ่มของกำลังไฟฟ้าไม่เป็นมูลฐาน (Nonfundamental powers) หรือกลุ่มฮาร์โมนิกที่ปนในระบบ และกลุ่มของผลรวมระหว่างกลุ่มของกำลังไฟฟ้ามูลฐานและไม่เป็นมูลฐาน (Combine) ดัชนีที่สำคัญสามารถสรุปได้ดังนี้

1) กำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent power, S)

1.1) ผลรวมกำลังไฟฟ้าปรากฏประสิทธิผล (VA)

ค่าผลรวมกำลังไฟฟ้าปรากฏประสิทธิผล เกิดจากผลคูณระหว่างค่าแรงดันและกระแสประสิทธิผล

$$\|S_e = 3V_e I_e \quad (2.10)$$

เมื่อ ค่าแรงดันประสิทธิผล และค่ากระแสประสิทธิผล สามารถหาได้จากสมการที่ 2.10 – 2.11

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{18} \left[3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2 \right]} \quad (2.11)$$

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2}{3}} \quad (2.12)$$

หมายเหตุ สัญลักษณ์ $\|$ หมายถึงสมการสุดท้ายสำหรับการคำนวณ

โดยที่ แรงดันเฟส a b และ c สามารถหาได้จากสมการที่ 2.12 – 2.14 และกระแสเฟส a b และ c สามารถหาได้จากสมการที่ 2.15 – 2.17

$$v_a = \sqrt{2}V_a \sin(\omega t + \alpha_a) \quad (2.63)$$

$$v_b = \sqrt{2}V_b \sin(\omega t + \alpha_b - 120^\circ) \quad (2.14)$$

$$v_c = \sqrt{2}V_c \sin(\omega t + \alpha_c + 120^\circ) \quad (2.75)$$

$$i_a = \sqrt{2}I_a \sin(\omega t + \beta_a) \quad (2.16)$$

$$i_b = \sqrt{2}I_b \sin(\omega t + \beta_b - 120^\circ) \quad (2.87)$$

$$i_c = \sqrt{2}I_c \sin(\omega t + \beta_c + 120^\circ) \quad (2.18)$$

1.2) กำลังไฟฟ้าปรากฏประสิทธิผลมูลฐาน (VA)

$$\|S_{e1} = 3V_{e1} I_{e1} \quad (2.19)$$

เมื่อ ค่าแรงดันประสิทธิผลที่ความถี่มูลฐาน และค่ากระแสประสิทธิผลที่ความถี่มูลฐาน คำนวณได้จากสมการที่ 2.20 – 2.21

$$\|V_{e1} = \sqrt{\frac{1}{18} \left[3(V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2) + V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2 \right]} \quad (2.20)$$

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2 + I_{n1}^2}{3}} \quad (2.21)$$

และ ค่ากำลังไฟฟ้าโหลดไฟฟ้าไม่สมดุล (Unbalance load) ที่ความถี่มูลฐาน สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$S_{U1} = \sqrt{S_{e1}^2 - S_1^{+2}} \quad (2.22)$$

โดยที่ ค่ากำลังปรากฏประสิทธิภาพลำดับบวกที่ความถี่มูลฐาน (S_1^+) คำนวณได้จาก

$$S_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \quad (2.23)$$

1.3) กำลังไฟฟ้าปรากฏประสิทธิภาพที่ไม่เป็นมูลฐาน (VA)

$$\|S_{eN} = \sqrt{S_e^2 - S_{e1}^2} \quad (2.24)$$

และ ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของฮาร์โมนิก (S_{eH}) สามารถคำนวณได้จาก

$$\|S_{eH} = 3V_{eH} I_{eH} \quad (2.25)$$

โดยที่ ค่าแรงดันประสิทธิภาพของฮาร์โมนิก (V_{eH}) และค่ากระแสประสิทธิภาพของฮาร์โมนิก (I_{eH}) คำนวณได้จาก

$$V_{eH} = \sqrt{\frac{1}{18} \left[3(V_{aH}^2 + V_{bH}^2 + V_{cH}^2) + V_{abH}^2 + V_{bcH}^2 + V_{caH}^2 \right]} = \sqrt{V_e^2 - V_{e1}^2} \quad (2.26)$$

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{I_{aH}^2 + I_{bH}^2 + I_{cH}^2 + I_{nH}^2}{3}} = \sqrt{I_e^2 - I_{e1}^2} \quad (2.27)$$

2) กำลังไฟฟ้าจริง (Active power, P)

2.1) ผลรวมกำลังไฟฟ้าจริง (W)

$$\|P = P_a + P_b + P_c \quad (2.28)$$

เมื่อ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของเฟส a b และ c คำนวณได้ดังนี้

$$P_a = V_a I_a \cos \theta_a; \quad \theta_a = \alpha_a - \beta_a \quad (2.29)$$

$$P_b = V_b I_b \cos \theta_b; \quad \theta_b = \alpha_b - \beta_b \quad (2.30)$$

$$P_c = V_c I_c \cos \theta_c; \quad \theta_c = \alpha_c - \beta_c \quad (2.31)$$

2.2) กำลังไฟฟ้าจริงที่มูลฐาน (W)

$$\|P_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \cos \theta_1^+ \quad (2.32)$$

2.3) กำลังไฟฟ้าจริงที่ไม่เป็นมูลฐาน (W)

จากสมการที่ 2.32 แสดงสูตรการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ไม่เป็นมูลฐาน ในส่วนของฮาร์มอนิก โดย ลำดับฮาร์มอนิก (H) ไม่เท่ากับ 1 เนื่องจากคำนวณผลของกำลังไฟฟ้าจริงเฉพาะของฮาร์มอนิกในแต่ละเฟสเท่านั้น

$$\|P_H = P_{aH} + P_{bH} + P_{cH} \quad (2.33)$$

เมื่อ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของฮาร์มอนิกในเฟส a b และ c สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\|P_{aH} = V_{aH} I_{aH} \cos \theta_{aH}; \quad \theta_{aH} = \alpha_{aH} - \beta_{aH} \quad (2.34)$$

$$\|P_{bH} = V_{bH} I_{bH} \cos \theta_{bH}; \quad \theta_{bH} = \alpha_{bH} - \beta_{bH} \quad (2.35)$$

$$\|P_{cH} = V_{cH} I_{cH} \cos \theta_{cH}; \quad \theta_{cH} = \alpha_{cH} - \beta_{cH} \quad (2.36)$$

3) กำลังไฟฟ้าจินตภาพ (Nonactive power, N)

3.1) ผลรวมกำลังไฟฟ้าจินตภาพ (var)

$$\|N = Q_a + Q_b + Q_c \quad (2.37)$$

เมื่อ ค่ากำลังไฟฟ้าจินตภาพของเฟส a b และ c คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\|Q_a = V_a I_a \sin \theta_a \quad (2.38)$$

$$\|Q_b = V_b I_b \sin \theta_b \quad (2.39)$$

$$\|Q_c = V_c I_c \sin \theta_c \quad (2.40)$$

3.2) กำลังไฟฟ้าจินตภาพลำดับบวกมูลฐาน (var)

$$\|Q_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \sin \theta_1^+ \quad (2.41)$$

3.3) กำลังไฟฟ้าที่ไม่เป็นมูลฐาน (var)

จากสมการที่ 2.41 แสดงสูตรการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าที่ไม่เป็นมูลฐาน ซึ่งจะสามารถคำนวณส่วนของกำลังความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก (D_{eH}) ได้ดังนี้

$$D_{eH} = \sqrt{S_{eH}^2 - P_{eH}^2} \quad (2.42)$$

และ ค่ากำลังความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดัน (D_{eV}) และกระแส (D_{eI}) สามารถคำนวณได้จากสูตรการคำนวณต่อไปนี้ โดยที่ลำดับฮาร์มอนิก (H) ไม่เท่ากับ 1

$$D_{eI} = 3V_{e1} I_{eH} \quad (2.43)$$

$$D_{eV} = 3V_{eH} I_{e1} \quad (2.44)$$

4) ตัวประกอบกำลัง (Power factor, PF)

4.1) ผลรวมตัวประกอบกำลัง

$$PF = \frac{P}{S_e} \quad (2.45)$$

4.2) ตัวประกอบกำลังลำดับบวกมูลฐาน

$$PF_1^+ = \frac{P_1^+}{S_1^+} \quad (2.46)$$

5) มลพิษฮาร์มอนิก (Harmonic pollution)

ดัชนีมลพิษฮาร์มอนิกเป็นดัชนีใหม่ที่สำคัญ กำหนดขึ้นตามมาตรฐาน IEEE 1459 (2010) โดยดัชนีนี้จะอธิบายปริมาณฮาร์มอนิกที่ปะปนในระบบไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.47

$$\text{Harmonic pollution} = \frac{S_{eN}}{S_{e1}} \quad (2.47)$$

หากค่ามลพิษฮาร์โมนิกนี้มีปริมาณมากกว่า 1 สามารถอธิบายได้ว่าในระบบไฟฟ้าที่สนใจมีฮาร์โมนิกปะปนในระบบ ซึ่งจะส่งผลให้ระบบเกิดความเสียหายได้ ซึ่งความรุนแรงของความเสียหายขึ้นอยู่กับปริมาณของค่ามลพิษนี้ ดังนั้นหากต้องการตรวจสอบในเบื้องต้นว่าระบบที่กำลังสนใจมีปริมาณฮาร์โมนิกในระบบหรือไม่ สามารถนำดัชนีมลพิษฮาร์โมนิกนี้ไปช่วยในการวิเคราะห์ได้

6) โหลดไฟฟ้าไม่สมดุล (Load unbalance)

$$\text{Load unbalance} = \frac{S_{U1}}{S_1^+} \quad (2.48)$$

7) ความบิดเบือนเนื่องจากฮาร์โมนิก (Total harmonic distortion, THD)

$$\text{THD}_{eV} = \frac{V_{eH}}{V_1} \quad (2.49)$$

$$\text{THD}_{eI} = \frac{I_{eH}}{I_1} \quad (2.50)$$

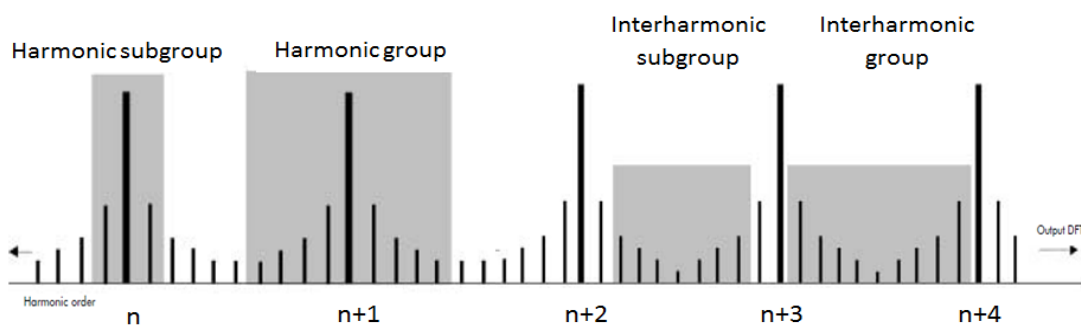
ตารางที่ 2.3 ระบบไฟฟ้าสามเฟสแบบไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ ไม่สมดุล

ดัชนีชี้วัด	แบบรวม	กำลังไฟฟ้ามูลฐาน	กำลังไฟฟ้าไม่เป็นมูลฐาน
กำลังไฟฟ้าปรากฏ (S)	S_e (VA)	S_{e1} S_1^+ S_{1U} (VA)	S_{eN} S_{eH} (VA)
กำลังไฟฟ้าจริง (P)	P (W)	P_1^+ (W)	P_H (W)
Nonactive power (N)	N (var)	Q_1^+ (var)	D_{eI} D_{eV} D_{eH} (var)
ตัวประกอบกำลัง (PF)	$PF = \frac{P}{S_e}$	$PF_1^+ = \frac{P_1^+}{S_1^+}$	-
มลพิษฮาร์โมนิก (Harmonic pollution)	-	-	$\frac{S_{eN}}{S_{e1}}$
โหลดไฟฟ้าไม่สมดุล	-	$\frac{S_{1U}}{S_1^+}$	-

2.3.2 มาตรฐาน IEC 61000 - 4 - 7 (2002)

การวิเคราะห์คุณลักษณะของฮาร์มอนิกสามารถใช้วิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว แต่ความจริงแล้ว สัญญาณในระบบไฟฟ้าไม่ได้มีเฉพาะฮาร์มอนิก อาจมีอินเตอร์ฮาร์มอนิกปะปนอยู่ หากใช้วิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วในการวิเคราะห์ก็จะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดเกิดขึ้น ดังนั้นจึงมีการหาแนวทางเพื่อลดความผิดพลาดในการวิเคราะห์คุณลักษณะของฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก โดยมาตรฐาน IEC 61000 - 4 - 7 (2002) [3] ได้กำหนดแนวคิดการรวมกลุ่มฮาร์มอนิก (Harmonic group) และการรวมกลุ่มของอินเตอร์ฮาร์มอนิก (Interharmonic group) สำหรับวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกที่ปะปนในระบบไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 2.10 เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว โดยมีเงื่อนไขดังนี้

1. ใช้วิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT)
2. Frequency resolution = 5 เฮิร์ตซ์
3. สำหรับความถี่มูลฐานที่ 50 เฮิร์ตซ์จะกำหนดให้จำนวนคาบเท่ากับ 10
4. สามารถวิเคราะห์สัญญาณได้ถึง 9 kHz



ภาพที่ 2.10 ภาพรวมของแนวคิดการรวมกลุ่มของฮาร์มอนิกและการรวมกลุ่มของอินเตอร์ฮาร์มอนิก

1. การรวมกลุ่มของฮาร์มอนิก ($G_{g,n}$)

$$G_{g,n}^2 = \frac{C_{k-5}^2}{2} + \sum_{i=-4}^4 C_{k+i}^2 + \frac{C_{k+5}^2}{2} \quad (2.51)$$

เมื่อ C คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (rms) ของขนาดสเปกตรัม

n คือ ลำดับฮาร์มอนิกที่สนใจ

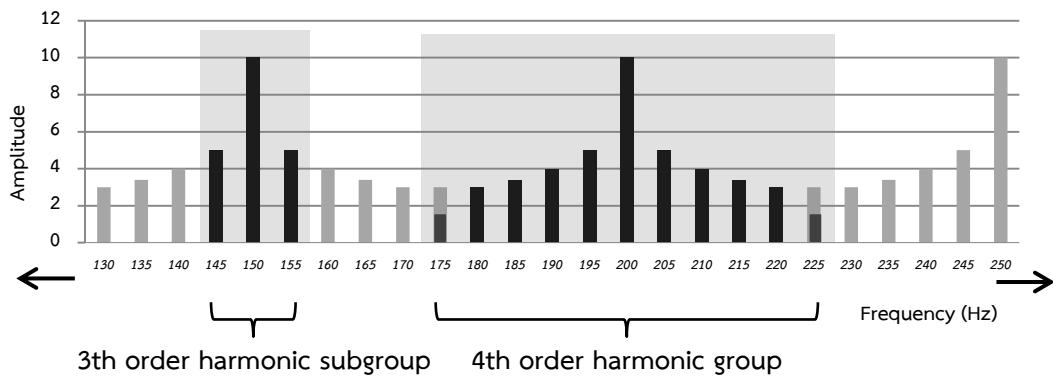
i คือ จำนวนเต็มใดๆ โดยที่ $k=(n \times \text{Frequency resolution} \times \text{Cycles}) = n \times 5 \times 10 = 50n$

จากภาพที่ 2.11 (ขวา) เป็นตัวอย่างการคำนวณการรวมกลุ่มของฮาร์โมนิกลำดับที่ 4 โดยจะคำนวณครอบคลุมตั้งแต่ความถี่ที่ 175 ถึง 225 เฮิรตซ์ เป็นต้น

2. การรวมกลุ่มของฮาร์โมนิก ($G_{g,n}$)

$$G_{sg,n}^2 = \sum_{i=-1}^1 C_{k+i}^2 \quad (2.52)$$

เมื่อ C คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (rms) ของขนาดสเปกตรัม



ภาพที่ 2.11 แนวคิดการรวมกลุ่มของฮาร์โมนิกลำดับที่ 4 (ขวา)
และการรวมกลุ่มย่อยของฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 (ซ้าย)

จากภาพที่ 2.11 (ซ้าย) เป็นตัวอย่างการคำนวณการรวมกลุ่มย่อยของฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 โดยจะคำนวณครอบคลุมตั้งแต่ความถี่ที่ 145 ถึง 155 เฮิรตซ์ เป็นต้น

3. การรวมกลุ่มอินเตอร์ฮาร์โมนิก ($G_{ig,n}$)

$$G_{ig,n}^2 = \sum_{i=1}^9 C_{k+i}^2 \quad (2.53)$$

2. จาก

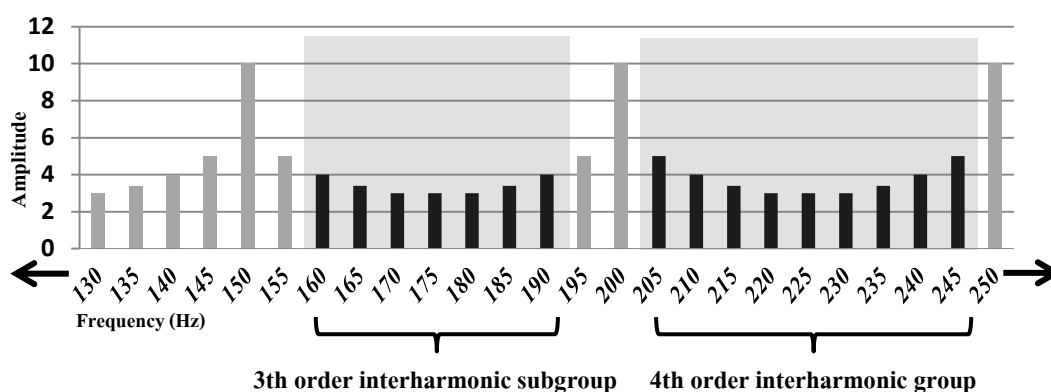
ภาพที่ 2.12 (ขวา) เป็นตัวอย่างการคำนวณการรวมกลุ่มของอินเตอร์ฮาร์โมนิกลำดับที่ 4 โดยจะคำนวณครอบคลุมตั้งแต่ความถี่ที่ 205 ถึง 245 เฮิรตซ์ เป็นต้น

4. การรวมกลุ่มย่อยของอินเตอร์ฮาร์โมนิก ($G_{isg,n}$)

$$G_{isg,n}^2 = \sum_{i=2}^8 C_{k+i}^2 \quad (2.54)$$

จากภาพที่ 2.12 (ซ้าย) เป็นตัวอย่างการคำนวณการรวมกลุ่มย่อยของอินเตอร์ฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 โดยจะคำนวณครอบคลุมตั้งแต่ความถี่ที่ 160 ถึง 190 เฮิรตซ์ เป็นต้น

จากแนวคิดการรวมกลุ่มของฮาร์โมนิกข้างต้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ขนาดของกลุ่มฮาร์โมนิกลำดับต่างๆได้



ภาพที่ 2.12 แนวคิดการรวมกลุ่มของอินเตอร์ฮาร์โมนิกลำดับที่ 4 (ขวา)

และการรวมกลุ่มย่อยของอินเตอร์ฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 (ซ้าย)

2.3.3 ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์โมนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม

คณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า ประกอบด้วยผู้แทนจากการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) เล็งเห็นถึงผลกระทบอันเนื่องมาจากปัญหาทางด้านคุณภาพไฟฟ้าซึ่งส่งผลให้เกิดความเสียหายกับภาคเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศจึงมีการแต่งตั้ง คณะทำงานศึกษาและปรับปรุง Power quality เพื่อทำหน้าที่จัดวางข้อกำหนดและมาตรฐานสำหรับควบคุมระดับคุณภาพไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมและไม่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าโดยรวม ซึ่งคณะทำงาน ได้จัดทำข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์โมนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม ซึ่งได้อ้างอิงจากมาตรฐานสากล IEC, มาตรฐานของสหราชอาณาจักร (UK) และมาตรฐานของออสเตรเลีย (AS) โดยคำนึงถึงความเหมาะสมในการนำมาใช้ในประเทศไทย

ระดับวางแผนของแรงดันฮาร์โมนิกสำหรับระบบไฟฟ้าในประเทศไทยดังตารางที่ 2.4 เป็นเป้าหมายในการควบคุมแรงดันฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้าโดยรวม ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมโดย

ไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า และเพื่อกำหนดขีดจำกัดฮาร์มอนิกที่สร้างจากผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละราย โดยระดับวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้า 400 โวลต์ และระดับขีดจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้า 400 โวลต์ [1] มีดังนี้

2.3.3.1 ระดับวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าในประเทศไทย

การไฟฟ้าได้กำหนดระดับวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าในประเทศไทย [3] เพื่อเป็นเป้าหมายในการควบคุมแรงดันฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าโดยรวมให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมโดยไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นกรอบในการวางแผนเพื่อกำหนดขีดจำกัดสำหรับฮาร์มอนิกที่สร้างจากผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละราย

ประเทศไทยมีระดับวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้า 3 ประเภทได้แก่ ระบบไฟฟ้าแรงต่ำ (400 โวลต์) ระบบไฟฟ้าแรงกลาง (12, 22, 24 และ 33 กิโลโวลต์) และระบบไฟฟ้าแรงสูง (69 และ 115 กิโลโวลต์) ซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจเฉพาะระบบไฟฟ้าแรงต่ำ

ตารางที่ 2.4 ระดับวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้า 400 โวลต์

ฮาร์มอนิกอันดับคี่ที่ไม่ใช่จำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกอันดับคี่ที่เป็นจำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกอันดับคู่	
อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)	อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)	อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)
5	4.0	3	4.0	2	1.6
7	4.0	9	1.2	4	1.0
11	3.0	15	0.3	6	0.5
13	2.5	21	0.2	8	0.4
17	1.6	>21	0.2	10	0.4
19	1.2			12	0.2
23	1.2			>12	0.2
25	0.7				
>25	0.2 + 0.5 (25/h)				
ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (THDv) = 5%					

หากระดับแรงดันฮาร์มอนิกไม่เกินขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกตามข้อกำหนดอุปกรณ์ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าที่ต่อใช้งานอยู่ในระบบจะสามารถทำงานได้ปกติไม่ได้รับผลกระทบจากฮาร์มอนิก

2.3.3.2 วิธีการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับการอนุญาตให้เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

การประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าโดยพิจารณาจากระดับแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วม (PCC) ก่อนการต่อเชื่อมของผู้ใช้ไฟฟ้า และปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจากผู้ใช้ไฟฟ้า ผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับระบบไฟฟ้าแรงต่ำจะสามารถต่อเชื่อมกับระบบไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- ขั้นที่ 1** อุปกรณ์ในการเชื่อมต่อเป็นไปตามข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับ ไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม หากไม่เกินขีดจำกัดสามารถเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าได้ แต่หากเกินขีดจำกัดให้ประเมินในขั้นต่อไป
- ขั้นที่ 2** แรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิมในระบบไฟฟ้า ณ จุดต่อร่วมก่อนการต่อเชื่อมของผู้ใช้ไฟฟ้าจะต้องมีค่าไม่เกิน 75% ของค่าขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.4 หากไม่เกินขีดจำกัดสามารถเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าได้ แต่หากเกินขีดจำกัดให้ประเมินในขั้นต่อไป
- ขั้นที่ 3** ระบบของผู้ใช้ไฟฟ้าจะต้องไม่สามารถสร้างกระแสฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมเกินกว่าค่าขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.5 หากไม่เกินขีดจำกัดสามารถเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าได้ แต่หากเกินขีดจำกัดจะไม่สามารถต่อเชื่อมกับระบบไฟฟ้าได้

ตารางที่ 2.5 ระดับขีดจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้า 400 โวลต์

อันดับ	กระแสฮาร์มอนิก (แอมแปร์)	อันดับ	กระแสฮาร์มอนิก (แอมแปร์)
2	14.4	14	1.1
3	24.1	15	0.7
4	4.5	16	0.9
5	14.4	17	6.8
6	1.5	18	0.4
7	20.6	19	4.6
8	3.6	20	0.7
9	4.8	21	0.4
10	2.9	22	0.6
11	19.7	23	3.7
12	0.6	24	0.3
13	13.9	25	2

2.4 การตรวจวัดฮาร์โมนิก

อุปกรณ์การวัดที่มีความสามารถในการแปลงข้อมูลทางกายภาพไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้นั้น ได้แก่ แผงวงจร Digital signal processing การ์ด Data acquisition เป็นต้น

การแปลงข้อมูลทางกายภาพให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อนำมาวิเคราะห์นั้นจะต้องมีอุปกรณ์การแปลงสัญญาณแอนะล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยที่สามารถทำได้ด้วยการ์ด Data acquisition และแผงวงจร Digital signal processing เป็นต้น เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการ์ด Data acquisition กับแผงวงจร Digital signal processing แล้วพบว่าการ์ด Data acquisition เป็นอุปกรณ์ที่มีอยู่และมีความแม่นยำสูงเนื่องจากมีอัตราการสุ่มที่สูง และในแต่ละช่องสัญญาณแยกกันอิสระจึงสามารถลดสัญญาณรบกวนได้ดี นอกจากนี้การ์ด Data acquisition ยังมีความซับซ้อนในการเขียนซอฟต์แวร์เพื่อควบคุมการทำงานน้อยกว่าแผงวงจร Digital signal processing เป็นอย่างมากเนื่องจากแผงวงจร Digital signal processing นั้นโดยทั่วไปจะใช้ภาษาซีในการเขียนซอฟต์แวร์เพื่อควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งมีความซับซ้อนมาก ต่างจากการ์ด Data acquisition ที่มีความยืดหยุ่นในด้านการใช้ซอฟต์แวร์ควบคุมการทำงานเนื่องจากมีซอฟต์แวร์หลายซอฟต์แวร์รองรับไม่ว่าจะเป็น LabVIEW ซึ่งใช้ภาษา G หรือ MATLAB เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การ์ด Data acquisition เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแส ดังนั้นในเนื้อหาส่วนต่อไปจะกล่าวถึงเฉพาะการ์ด Data acquisition เท่านั้น

2.4.1 อุปกรณ์สำหรับการวัด

การ์ด Data acquisition คือ อุปกรณ์การวัดที่มีความสามารถในการแปลงข้อมูลทางกายภาพ เช่น แรงดัน กระแส อุณหภูมิ ก๊าซ เป็นต้น ไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้ หรือคืออุปกรณ์ที่สามารถแปลงสัญญาณในรูปแบบแอนะล็อกไปเป็นสัญญาณแบบดิจิทัลได้ เพื่อสะดวกต่อการวิเคราะห์สัญญาณที่สนใจ จากนั้นข้อมูลจะเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ผ่านซอฟต์แวร์ประยุกต์ในลักษณะเวลาจริง (Real time) ซึ่งซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของ Data acquisition card สามารถควบคุมได้ด้วยซอฟต์แวร์ที่หลากหลาย เช่น ภาษา C Fortran Java Pascal และ LabVIEW เป็นต้น

การทำงานของระบบ Data acquisition ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน คือ

1. ส่วนการตรวจวัดสัญญาณทางกายภาพ (Transducer/Sensor/Detector)

ส่วนนี้จะใช้เป็นตัวตรวจจับ (Detector) ตัวรับรู้ (Sensor) หรือ ตัวแปลงปริมาณ (Transducer) เพื่อทำการแปลงปริมาณทางกายภาพให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า

2. วงจรปรับสภาพสัญญาณ (Signal conditioning)

ส่วนนี้จะเป็นการปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณไฟฟ้าที่มาจากส่วนการตรวจวัดสัญญาณทางกายภาพ เนื่องจากการวัดสัญญาณทางกายภาพอาจมีค่าที่สูง ต่ำเกินไป หรือมีสัญญาณรบกวน ในส่วนนี้ก็จะทำการปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณให้มีความเหมาะสมกับระบบเก็บข้อมูลนี้

3. ส่วนควบคุมการเก็บข้อมูล และการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ (Interface board)

ในส่วนนี้จะมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบการ์ดเสียบ และแบบเชื่อมต่อภายนอก โดยที่แบบการ์ดเสียบจะติดตั้งบนสล็อตขยายของเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งติดต่อผ่านบัส PCI ส่วนการเชื่อมต่อภายนอกจะใช้พอร์ตสื่อสารมาตรฐาน ได้แก่ พอร์ตอนุกรม RS-232, พอร์ตขนาน IEEE 1284 (พอร์ตเครื่องพิมพ์), พอร์ต IEEE 488 หรือบัส GPIB รวมถึงบัสแบบ VXI โดยในส่วนควบคุมการเก็บข้อมูล และเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์นี้ อาจกำหนดให้ทำหน้าที่อย่างเดียว หรือมากกว่า เพื่อรับค่าสัญญาณแอนะล็อกขาเข้า ส่งค่าสัญญาณแอนะล็อกขาออก รับค่าสัญญาณดิจิทัลขาเข้า ส่งค่าสัญญาณดิจิทัลขาออก และทำการนับจำนวนหรือจับเวลา

4. ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล

ส่วนนี้จะขึ้นกับการพัฒนาซอฟต์แวร์ เพื่อใช้ในจุดประสงค์ใด โดยในการพัฒนาซอฟต์แวร์จะพิจารณาข้อจำกัด 3 ประการคือ

- 1) ระบบปฏิบัติการที่ใช้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ว่ามีความสะดวกในการพัฒนาซอฟต์แวร์มากน้อยเพียงใด
- 2) ความเชี่ยวชาญในการเขียนซอฟต์แวร์ และการใช้ซอฟต์แวร์
- 3) ความสามารถเข้ากันได้ระหว่างซอฟต์แวร์ และฮาร์ดแวร์

2.4.2 ซอฟต์แวร์สำหรับประมวลผลข้อมูล

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) เป็นซอฟต์แวร์ที่มีความสามารถสูง และมีความยืดหยุ่นทางด้านเครื่องมือวัดและวิเคราะห์ระบบ มีข้อแตกต่างจากซอฟต์แวร์ทั่วไป คือ ซอฟต์แวร์ทั่วไปจะใช้ตัวอักษรในการเขียนซอฟต์แวร์เป็นพื้นฐาน แต่ซอฟต์แวร์ LabVIEW จะเป็นซอฟต์แวร์ในลักษณะบล็อกไดอะแกรม (Block diagram) คล้ายกับผังงาน (Flow chart)

ซอฟต์แวร์ที่เขียนขึ้นโดย LabVIEW จะเรียกว่า Virtual Instrument (VI) เพราะลักษณะที่ปรากฏทางจอภาพจะเหมือนกับเครื่องมือวัดหรืออุปกรณ์ทางวิศวกรรม สำหรับซอฟต์แวร์

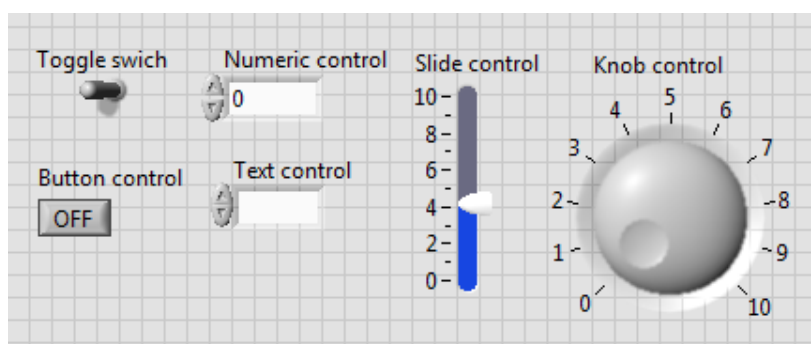
LabVIEW นั้นจะประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนคือ หน้าปัด (Front panel) และ บล็อกไดอะแกรม (Block diagram) มีรายละเอียดดังนี้

2.4.2.1 ส่วนหน้าปัด (Front Panel)

เป็นส่วนที่ใช้สื่อความกันระหว่างผู้ใช้กับซอฟต์แวร์ หรือเทียบได้กับ Graphic User Interface (GUI) ของซอฟต์แวร์ LabVIEW หน้าปัด (Front panel) ของ LabVIEW มีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 แบบ คือ ตัวควบคุม (Controller) ตัวแสดงผล (Indicator)

1. ตัวควบคุม

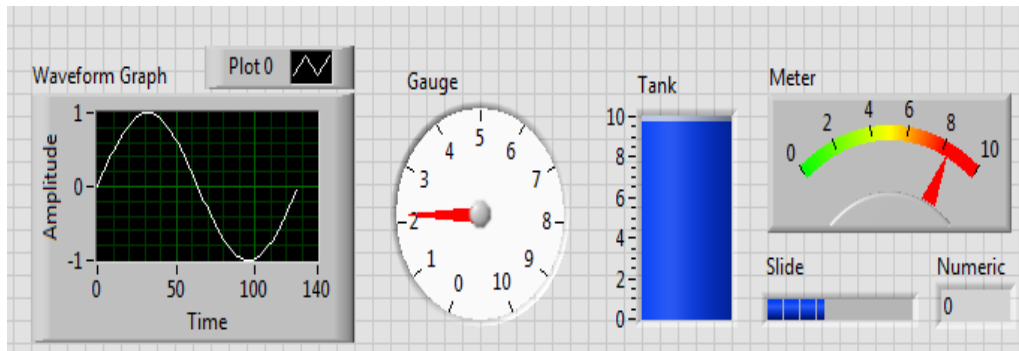
มีหน้าที่เป็นตัวควบคุม คือ ให้ค่าหรือรับข้อมูลเข้าจากผู้ใช้ลักษณะของตัวควบคุม เช่น ปุ่มปรับค่า สวิตช์เปิด – ปิดไฟ แท่งเลื่อนเพื่อปรับค่า การให้ค่าด้วยตัวเลขดิจิทัล หรืออื่นๆ ดังนั้นจากหลักการของตัวควบคุม หมายความว่า เป็นการกำหนดค่าหรือแหล่ง (source) ของข้อมูล โดยปกติจะไม่สามารถนำข้อมูลมาแสดงผลที่ตัวควบคุมได้ และถ้าหากพยายามที่จะให้ตัวควบคุมแสดงผลข้อมูลก็จะเกิดความผิดพลาดขึ้นใน VI นั่นที่



ภาพที่ 2.13 ตัวอย่างตัวควบคุม (Controller)

2. ตัวแสดงผล

มีหน้าที่เป็นตัวแสดงผลเพียงอย่างเดียวโดยจะรับค่าที่ได้จากแหล่งข้อมูลมาแสดงผลซึ่งอาจปรากฏในรูปของกราฟ เข็มชี้ ระดับของเหลว หรืออื่นๆ ตัวแสดงผลนี้เปรียบเสมือนผลลัพธ์ เพื่อให้ผู้ใช้ได้ทราบค่าสิ่งที่กำลังวิเคราะห์อยู่ และผู้ใช้ไม่สามารถปรับค่าบนตัวแสดงผลได้โดยตรงแต่ต้องมีแหล่งข้อมูลที่ส่งให้กับตัวแสดงผลเหล่านี้ ยกตัวอย่างตัวแสดงผลในภาพที่ 2.14

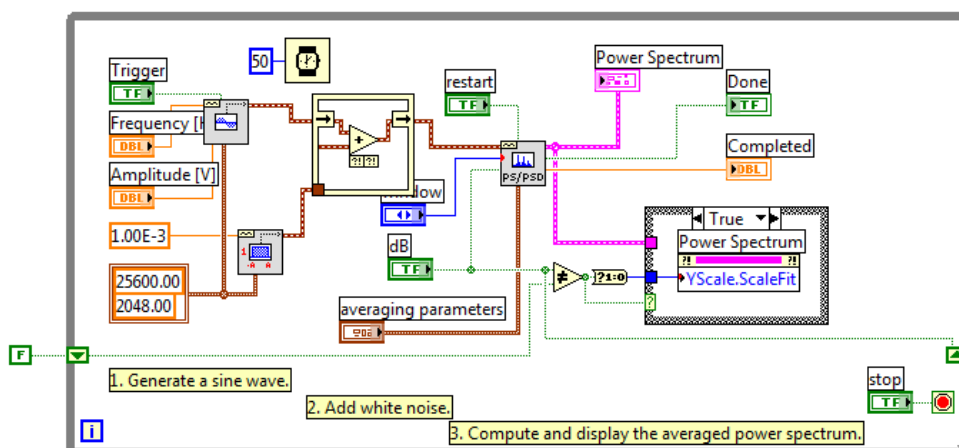


ภาพที่ 2.14 ตัวอย่างตัวแสดงผล (Indicator)

2.4.2.2 บล็อกไดอะแกรม (Block diagram)

การเขียนโค้ดของ LabVIEW จะมีลักษณะเป็นสัญลักษณ์ (Icon) ใช้แทนการเขียนด้วยตัวอักษร โดยจะเขียนในลักษณะของภาษากราฟิก หรือ ภาษา G ดังภาพที่ 2.15

ข้อได้เปรียบของซอฟต์แวร์ LabVIEW คือการพยายามทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์เมื่อรวมกับซอฟต์แวร์ LabVIEW และ อุปกรณ์เชื่อมต่อเพื่อเก็บข้อมูลหรือการ์ด Data acquisition แล้วสามารถเปลี่ยนเครื่องคอมพิวเตอร์ให้กลายเป็นเครื่องมือวัดในหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็น Oscilloscope Multi-meter Function generator หรือเครื่องมือวัดอื่นๆตามที่ต้องการทำให้เราสามารถใช้อุปกรณ์ในการทำการวัดและเครื่องมือวัดได้อย่างกว้างขวาง ซึ่งจุดนี้เป็นที่มาของเครื่องมือวัดเสมือนจริงและข้อได้เปรียบเหนือการใช้อุปกรณ์จริงเหล่านี้ คือ Virtual instrument สามารถปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับการใช้งานของผู้ใช้แต่ละกลุ่มได้ โดยการเปลี่ยน VI ให้เป็นไปตามความต้องการซึ่งไม่ซับซ้อน



ภาพที่ 2.15 ตัวอย่างบล็อกไดอะแกรม (Block diagram)

2.5 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการคำนวณฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกมีดังนี้

1) บทความเรื่อง “On the use of windows for harmonic analysis with the discrete fourier transform” [8] ผู้เสนอบทความคือ Fredric J. Harris

ในบทความนี้เป็นต้นแบบการศึกษาการใช้วิธี Window FFT สำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกกับการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง จะอธิบายถึงสมการที่ใช้ในการคำนวณของเทคนิคฟังก์ชันหน้าต่างและข้อดีของฟังก์ชันหน้าต่างสำหรับการนำไปใช้งานตามความเหมาะสม

2) บทความเรื่อง “The Algorithm of Interpolating Windowed FFT for Harmonic Analysis of Electric Power System” [7] ผู้เสนอบทความคือ Fusheng Zhang, Zhongxing Geng, และWei Yuan

ในบทความนี้อธิบายวิธีการคำนวณหาขนาดและมุมของฮาร์มอนิก พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการคำนวณขนาดและมุมของฮาร์มอนิก ด้วยวิธีการประมาณค่า Window FFT กับวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว

3) บทความเรื่อง “Interharmonics Analysis Based on Interpolating window FFT Algorithm” [10] ผู้เสนอบทความคือ Hao Qian, Rongxiang Zhao และ Tong Chen

ในบทความนี้อธิบายวิธีการคำนวณหาขนาดและมุมของฮาร์มอนิก และอินเทอร์ฮาร์มอนิก พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการคำนวณขนาดและมุมของฮาร์มอนิก และอินเทอร์ฮาร์มอนิก ด้วยวิธีการประมาณค่า Window กับวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว

4) บทความเรื่อง “DSP Implementation of Power Measurements According to the IEEE Trial-Use Standard 1459” [11] ผู้เสนอบทความ Cristina Gherasim Jeroen Van den Keybus Johan Driesen และ Ronnie Belmans

ในบทความนี้อธิบายวิธีการคำนวณหาขนาดและมุมของฮาร์มอนิก และอินเทอร์ฮาร์มอนิก พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการคำนวณขนาดและมุมของฮาร์มอนิก และอินเทอร์ฮาร์มอนิก ด้วยวิธีการประมาณค่า Window กับวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว

5) บทความเรื่อง “Power Components Estimation According to IEEE Standard 1459 – 2010 Under Wide – Range Frequency Deviation” [12] ผู้เสนอบทความคือ Predrag D. Poljak Miodrag D. Kušljević และ Josif J. Tomić

ในบทความนี้อธิบายวิธีการการออกแบบการคำนวณดัชนีตามมาตรฐาน IEEE 1459 (2010) โดยการจำลองสัญญาณ

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้นำเสนอไปนั้นพบว่างานวิจัยในส่วนของเครื่องมือวัดยังคงใช้วิธีการคำนวณด้วยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว เนื่องจากจะพิจารณาเฉพาะฮาร์มอนิกเท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริงอินเตอร์ฮาร์มอนิกสามารถเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าได้ และส่งผลกระทบต่อระบบคุณภาพไฟฟ้าไม่น้อยกว่าฮาร์มอนิกเช่นกัน และในงานวิจัยบางส่วนได้นำเสนอการวิเคราะห์สัญญาณเมื่อสัญญาณนั้นมีอินเตอร์ฮาร์มอนิกปะปนโดยนำเสนอในรูปแบบการจำลองสัญญาณ นอกจากนี้บางงานวิจัยยังพบปัญหาในการวิเคราะห์คุณลักษณะของอินเตอร์ฮาร์มอนิกและฮาร์มอนิก เมื่อความถี่ของฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกใกล้เคียงกัน

ในส่วนของ เครื่องมือวัดฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกที่สามารถแสดงคุณลักษณะทั้งขนาดและมุมในแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ของระบบ 3 เฟสยังมีไม่มาก ซึ่งโดยส่วนมากแล้วงานวิจัยที่ผ่านมา มีการสร้างเครื่องมือวัดที่พิจารณาเฉพาะฮาร์มอนิก พิจารณาเฉพาะระบบ 1 เฟส สนใจเฉพาะขนาดไม่สนใจมุมเฟส อุปกรณ์วัดมีอัตราสุ่มตัวอย่างข้อมูลต่ำ การแสดงผลข้อมูลไม่ละเอียด ข้อมูลที่ได้ยากต่อการนำไปใช้ นอกจากนี้ยังไม่มีการคำนวณดัชนีชี้วัดของเครื่องมือวัดฮาร์มอนิกที่อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 1459 -2010 มากนักซึ่งเป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกด้วยดัชนีต่างๆ

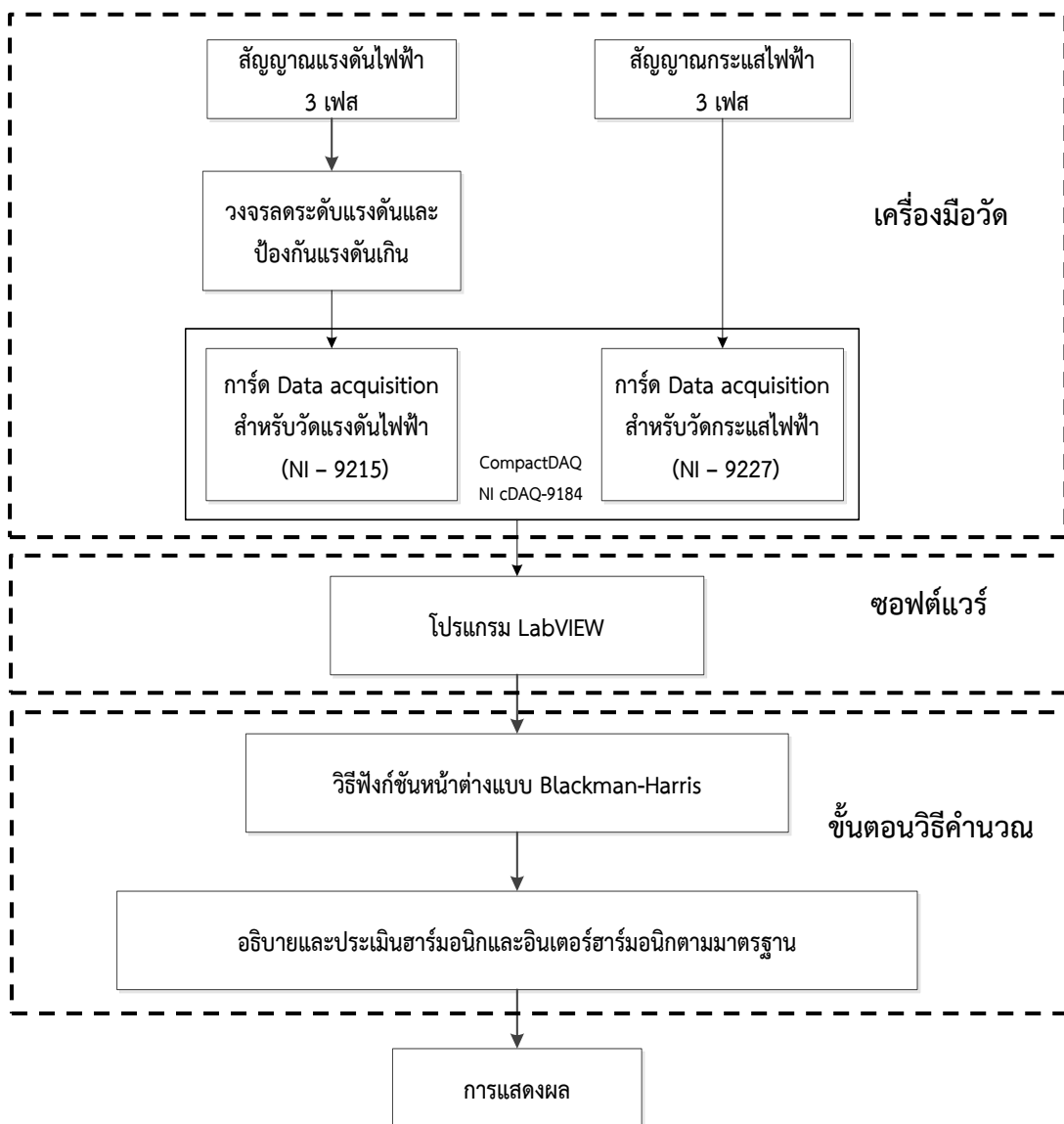
ดังนั้น ในโครงร่างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงต่ำด้วยวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์คุณลักษณะของฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก สามารถวิเคราะห์สัญญาณที่มีความถี่ของฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกใกล้เคียงกันได้ มีอัตราการสุ่มตัวอย่างข้อมูลสูง สามารถวัดทั้งแรงดัน และกระแส ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย สามารถแสดงผลข้อมูลได้อย่างละเอียด การใช้งานไม่ซับซ้อน และมีดัชนีการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 1459 (2010) มาตรฐาน IEC 61000 - 4 - 7 (2002) และข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม (PRC-PQG-01/2008) สำหรับระบบไฟฟ้าแรงต่ำ 400 โวลต์ เพื่อสะดวกสำหรับผู้ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลของปริมาณฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก

บทที่ 3

การพัฒนาเครื่องมือวัดฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก

ในปัจจุบันปัญหาคุณภาพไฟฟ้ามีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้ามากขึ้น ดังนั้นการให้ความสำคัญกับปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าจึงควรมีเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้าเพื่อนำไปสู่การพัฒนาคุณภาพไฟฟ้า โดยที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสนใจฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก

ภาพรวมของเครื่องมือวัดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงต่ำในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ภาพรวมของเครื่องมือวัดและวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงต่ำ

ภาพรวมของเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงต่ำของงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย 3 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 เครื่องมือวัด

ส่วนที่ 2 ซอฟต์แวร์

ส่วนที่ 3 วิธีการคำนวณคุณลักษณะของสัญญาณ

โดยในส่วนที่ 2 และ 3 จะอธิบายรายละเอียดในบทที่ 4 ต่อไป

เครื่องมือวัดฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงต่ำของงานวิจัยมีคุณสมบัติดังนี้

1. ช่องรับแรงดันไฟฟ้า 4 ช่องสัญญาณ รับแรงดันสูงสุดเท่ากับ 1 - 630 โวลต์ และมีจำนวนบิตคอนเวอร์เตอร์ A/D เท่ากับ 16 บิต
2. ช่องรับกระแสไฟฟ้า 4 ช่องสัญญาณ รับกระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1-240 แอมแปร์ (อุปกรณ์สำหรับวัดกระแสแสดงในภาคผนวก ก) มีจำนวนบิตคอนเวอร์เตอร์ A/D เท่ากับ 24 บิต
3. อัตราสุ่มข้อมูลเท่ากับ 512 samples/cycle (สามารถปรับได้)
4. มีดัชนีการวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 1459 (2010) มาตรฐาน IEC 61000 - 4 - 7 (2002) และข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรมของประเทศไทย (2008)
5. มีการใช้งานที่ยืดหยุ่นสามารถกำหนดความถี่มูลฐานของระบบไฟฟ้า กำหนดอัตราสุ่มข้อมูล กำหนดลำดับฮาร์มอนิกสูงสุดที่สนใจ
6. สามารถเลือกให้แสดงข้อมูลดิบที่ได้จากการวัดและบันทึกข้อมูลได้ ซึ่งความจุในการบันทึกข้อมูลขึ้นอยู่กับหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์นั้นๆ

อุปกรณ์ในการวัดของงานวิจัยนี้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือการวัด Data acquisition และ วงจรลดทอนระดับแรงดันและป้องกันแรงดันเกิน มีรายละเอียดดังนี้

3.1 การ์ด Data acquisition

ในการเลือกอุปกรณ์ในการวัดข้อมูลแรงดันและกระแส เพื่อนำไปวิเคราะห์สัญญาณสำหรับเครื่องมือวัดฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกนี้จะเลือกอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติดังนี้

1. สามารถแปลงข้อมูลทางกายภาพเป็นข้อมูลทางไฟฟ้า และส่งผ่านทางคอมพิวเตอร์
2. สามารถวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้อย่างละ 3 ช่องสัญญาณพร้อมกัน
3. สามารถวัดสัญญาณแบบระบบเวลาจริง
4. มีอัตราการสุ่มข้อมูลสูง

5. การใช้งานไม่ซับซ้อน

ซึ่งจากคุณสมบัติข้างต้นในงานวิจัยนี้เลือกใช้การ์ด Data acquisition เป็นอุปกรณ์การวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เนื่องจากการ์ด Data acquisition นี้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับงานวิจัยซึ่งลักษณะของการ์ด Data acquisition ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะประกอบไปด้วย

3.1.1 การ์ด Data acquisition รุ่น NI USB 9215

ในงานวิจัยนี้เลือกการ์ด Data acquisition รุ่น NI USB 9215 สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้า ดังภาพที่ 3.2 มีคุณสมบัติสอดคล้องกับงานวิจัยดังนี้

- 1) สามารถวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าได้โดยตรง
- 2) สามารถวัดสัญญาณขาเข้าได้ 4 ช่องสัญญาณ และมีการสุ่มสัญญาณในแต่ละช่องสัญญาณพร้อมกัน
- 3) มีอัตราการสุ่มข้อมูลสูงสุด 100 kS/s/Ch หรือ 100,000 จุดต่อวินาทีต่อช่องสัญญาณ
- 4) มีจำนวนบิตคอนเวอร์เตอร์ A/D ถึง 16 บิต
- 5) สามารถเชื่อมต่อกับพอร์ต USB และใช้ไฟเลี้ยงที่จากพอร์ตที่ USB เชื่อมต่อ
- 6) สามารถใช้ระบบปฏิบัติการ Window vista/ XP /2000 /32 bit /64 bit
- 7) รับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าช่วง ± 10 โวลต์



ภาพที่ 3.2 Data Acquisition card (DAQ) รุ่น NI USB 9215

3.1.2 การ์ด Data acquisition รุ่น NI USB 9227

ในงานวิจัยนี้เลือกการ์ด Data acquisition รุ่น NI USB 9227 สำหรับวัดกระแสไฟฟ้า ดังภาพที่ 3.3 มีคุณสมบัติสอดคล้องกับงานวิจัยดังนี้

- 1) สามารถวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง
- 2) สามารถวัดสัญญาณขาเข้าได้ 4 ช่องสัญญาณ และมีการสุ่มสัญญาณในแต่ละช่องสัญญาณพร้อมกัน
- 3) มีอัตราการสุ่มข้อมูลสูงสุด 50 kS/s/Ch หรือ 50,000 จุดต่อวินาทีต่อช่องสัญญาณ
- 4) มีจำนวนบิตคอนเวอร์เตอร์ A/D ถึง 24 บิต
- 5) สามารถเชื่อมต่อกับพอร์ต USB และสามารถใช้ไฟเลี้ยงที่พอร์ต USB เชื่อมต่อ
- 6) สามารถใช้ระบบปฏิบัติการ Window vista/XP/2000/32 bit/64 bit
- 7) รับสัญญาณกระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 14 แอมแปร์ หรือกระแสประสิทธิผลเท่ากับ 5 แอมแปร์



ภาพที่ 3.3 Data Acquisition card (DAQ) รุ่น NI USB 9227

3.1.3 CompaqDAQ รุ่น NI cDAQ - 9174

งานวิจัยนี้เลือก CompaqDAQ รุ่น NI cDAQ 9174 ดัง

ภาพที่ 3.4 ในการส่งข้อมูลจากการ์ด Data acquisition สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้า (NI USB 9215) และกระแสไฟฟ้า (NI USB 9227) ไปยังคอมพิวเตอร์ และเพื่อให้การรับส่งสัญญาณจากการ์ด Data acquisition ทั้ง 2 ชนิด ได้พร้อมกัน รวมทั้งหมด 8 ช่องสัญญาณ โดย CompaqDAQ รุ่น NI cDAQ 9174 มีคุณสมบัติสอดคล้องกับงานวิจัยดังนี้

- 1) มีช่องว่างสำหรับใส่การ์ด Data acquisitions ได้ 4 ช่อง โดยทุกช่องสามารถทำงานได้พร้อมกัน (สำหรับแก้ปัญหา Simultaneous sampling)
- 2) ติดต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB



ภาพที่ 3.4 CompaqDAQ รุ่น NI cDAQ 9174

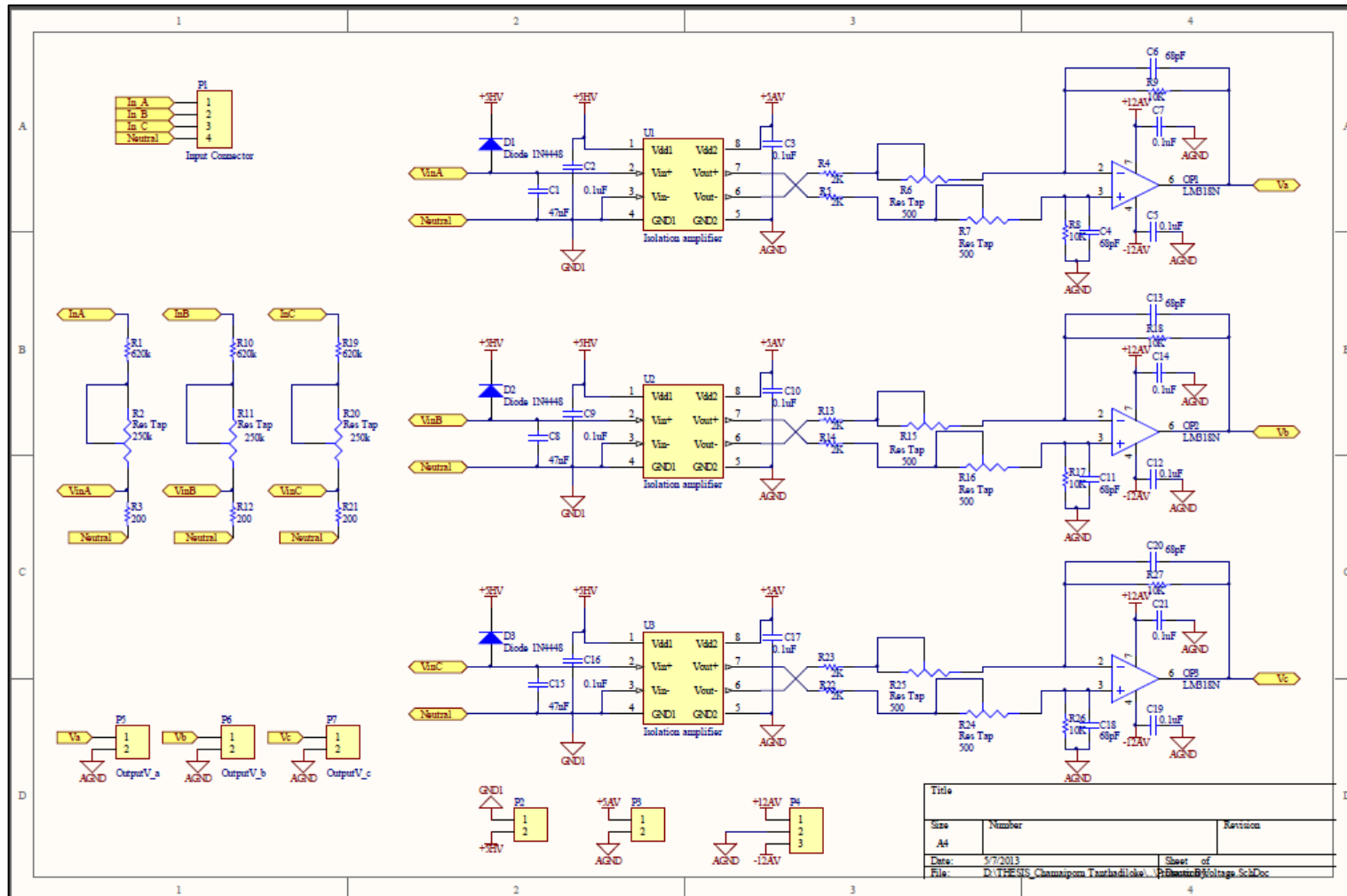
3.2 วงจรลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้าและป้องกันแรงดันเกิน

การ์ด Data acquisition มีเงื่อนไขของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้าอยู่ในช่วง ± 10 โวลต์ แต่ในระบบไฟฟ้า 3 เฟสแรงดันต่ำในประเทศไทยที่จะทำการวัดสัญญาณอยู่ในช่วง 220 - 240 โวลต์ ดังนั้นต้องมีอุปกรณ์ลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้าและป้องกันแรงดันเกินสำหรับการ์ด Data acquisition เพื่อให้อุปกรณ์วัดสามารถใช้งานตามจุดประสงค์ได้และเพื่อป้องกันความเสียหายกับอุปกรณ์การวัดเมื่อเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินกำลังความสามารถที่จะรับได้ ดังนั้นจึงต้องมีการสร้างวงจรลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้าและป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินสำหรับการ์ด Data acquisition

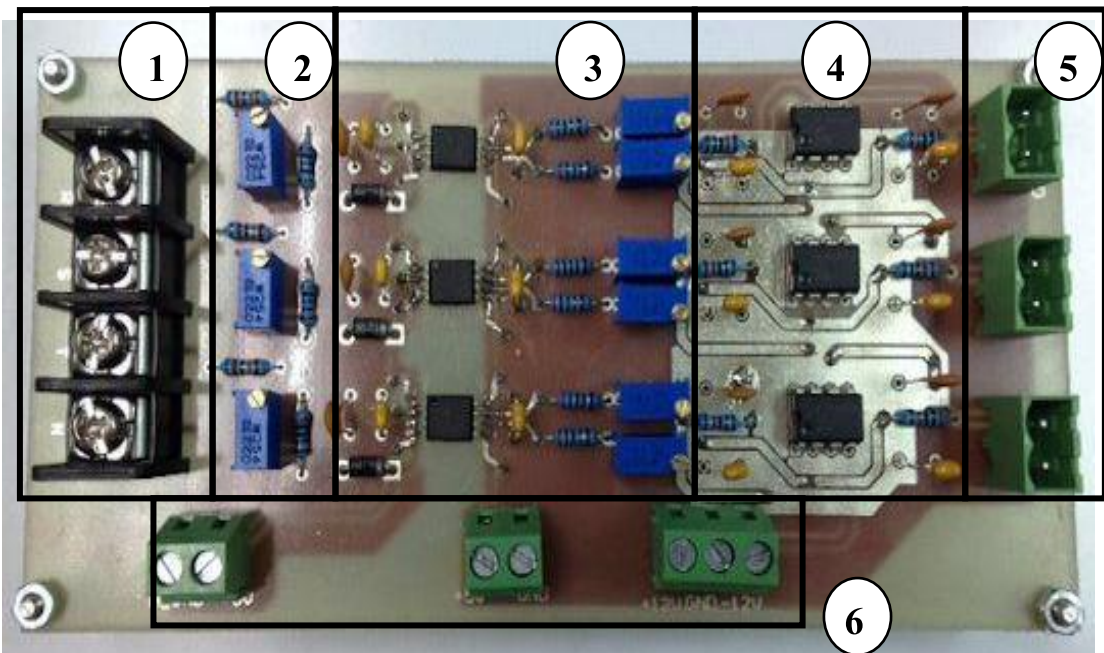
อุปกรณ์สำหรับลดทอนขนาดแรงดันโดยทั่วไปมีราคาค่อนข้างสูง จากการสืบค้นข้อมูลตามท้องตลาดพบว่าอุปกรณ์นี้ราคาประมาณ 13,900 บาท ต่อ 1 ช่องสัญญาณ ซึ่งถ้าต้องการวัดระบบไฟฟ้า 3 เฟส ประกอบไปด้วย 3 ช่องสัญญาณจะมีค่าใช้จ่ายรวมประมาณ 32,000 บาท

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้า และเพื่อความปลอดภัยจึงมีการเพิ่มในส่วนของวงจรป้องกันแรงดันเกินสำหรับการ์ด Data acquisition ขึ้นเอง

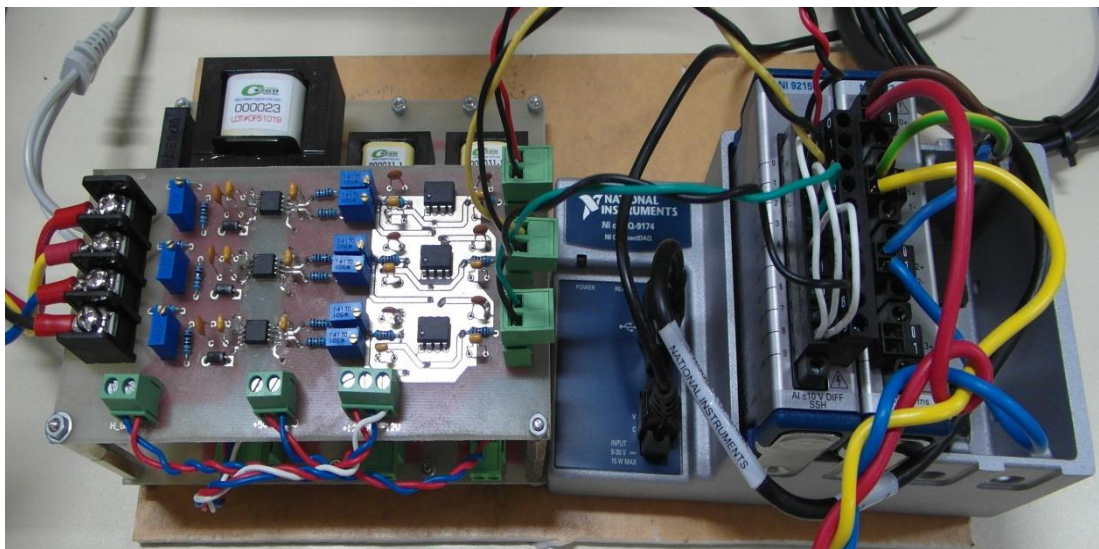
วงจรลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้าและป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินนี้ออกแบบด้วยซอฟต์แวร์ Altium Designer Winter 09 โดยแผนภาพเค้าร่างของวงจร (Schematic Designer) แสดงดังภาพที่ 3.5 และรายละเอียดของอุปกรณ์สำหรับทำวงจรดังกล่าวจะแสดงในภาคผนวก ข



ภาพที่ 3.5 แผนภาพเค้าร่าง (Schematic Designer) ของวงจรลดทอนระดับแรงดันและป้องกันแรงดันเกิน



ภาพที่ 3.6 วงจรลดทอนระดับแรงดันไฟฟ้าและป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกิน



ภาพที่ 3.7 เครื่องมือวัดฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกที่พัฒนาขึ้น

วงจรถอดทอนระดับแรงดันไฟฟ้าและป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินดังภาพที่ 3.6 มีรายละเอียดการทำงานดังนี้

1. ส่วนรับแรงดันขาเข้า

มีหน้าที่รับแรงดันไฟฟ้าขาเข้า 4 ช่องสัญญาณ ประกอบไปด้วย แรงดันไฟฟ้า 3 เฟส และนิวทรัล

2. ส่วนลดทอนแรงดัน

มีหน้าที่ลดทอนแรงดันไฟฟ้าให้ต่ำลงโดยใช้หลักการแบ่งแรงดัน (Resistance divider) โดยสามารถรับแรงดันขาเข้าสูงสุดเท่ากับ 630 โวลต์ หรือประมาณสองเท่าของแรงดันที่จะทำการวัด

3. ส่วนป้องกันแรงดันเกิน

มีหน้าที่ป้องกันแรงดันเกินเข้าตัวการ์ด Data acquisition เมื่อเกิดกรณีร้ายแรงที่สุดนั้นคือเกิดแรงดันกระชากเกิน 630 โวลต์ ส่วนนี้จะไม่ยอมให้แรงดันที่สูงเกิน 630 โวลต์ข้ามผ่านไปยังการ์ด Data acquisition นอกจากนี้ความพิเศษของไมโครชิปที่ใช้ในส่วนนี้จะสามารถลดสัญญาณรบกวนได้

4. ส่วนขยายสัญญาณ

มีหน้าที่ขยายสัญญาณในข้อ 3 ในกรณีแรงดันสูงสุดจะขยายจาก 0.2 โวลต์ให้มีขนาดไม่เกิน ± 10 โวลต์ก่อนเข้าการ์ด Data acquisition

5. ส่วนของแรงดันไฟฟ้าขาออก

มีหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณออกเพื่อนำเข้าสู่การ์ด Data acquisition

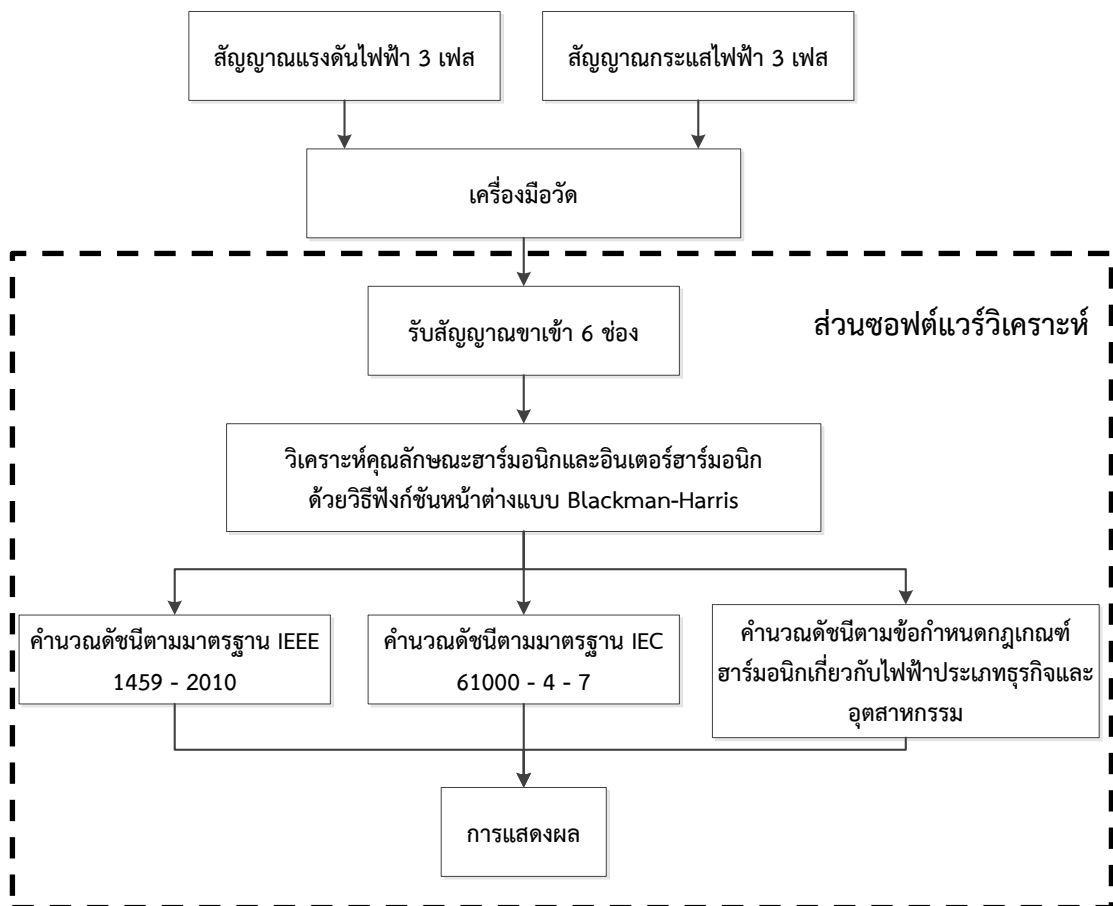
6. ส่วนของไฟเลี้ยง

มีหน้าที่จ่ายไฟเลี้ยงให้กับไมโครชิป ซึ่งในวงจรนี้ไมโครชิปที่ต้องการไฟเลี้ยงประกอบไปด้วย Isolation amplifier ACPL - C7928 และ Operational - Amplifier โดยแผนภาพของวงจรไฟเลี้ยงและรายละเอียดของอุปกรณ์สำหรับทำวงจรดังกล่าวจะแสดงในภาคผนวก ข

บทที่ 4

การพัฒนาซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก ในระบบไฟฟ้าแรงต่ำ

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ LabVIEW ในการติดต่อกับอุปกรณ์วัดและแสดงผล เนื่องจากซอฟต์แวร์ LabVIEW เป็นซอฟต์แวร์ที่มีความสามารถสูง และมีความยืดหยุ่นทางด้านเครื่องมือวัดและวิเคราะห์ระบบ มีข้อแตกต่างจากซอฟต์แวร์ทั่วไปคือ ซอฟต์แวร์ทั่วไปจะใช้ตัวอักษรในการเขียนซอฟต์แวร์เป็นพื้นฐาน ส่วนซอฟต์แวร์ LabVIEW จะเป็นซอฟต์แวร์ ในลักษณะบล็อกไดอะแกรม (Block diagram) คล้ายกับโฟลชาร์ต (Flow chart)



ภาพที่ 4.1 แผนภาพการประยุกต์ใช้งานซอฟต์แวร์ LabVIEW กับงานวิจัย

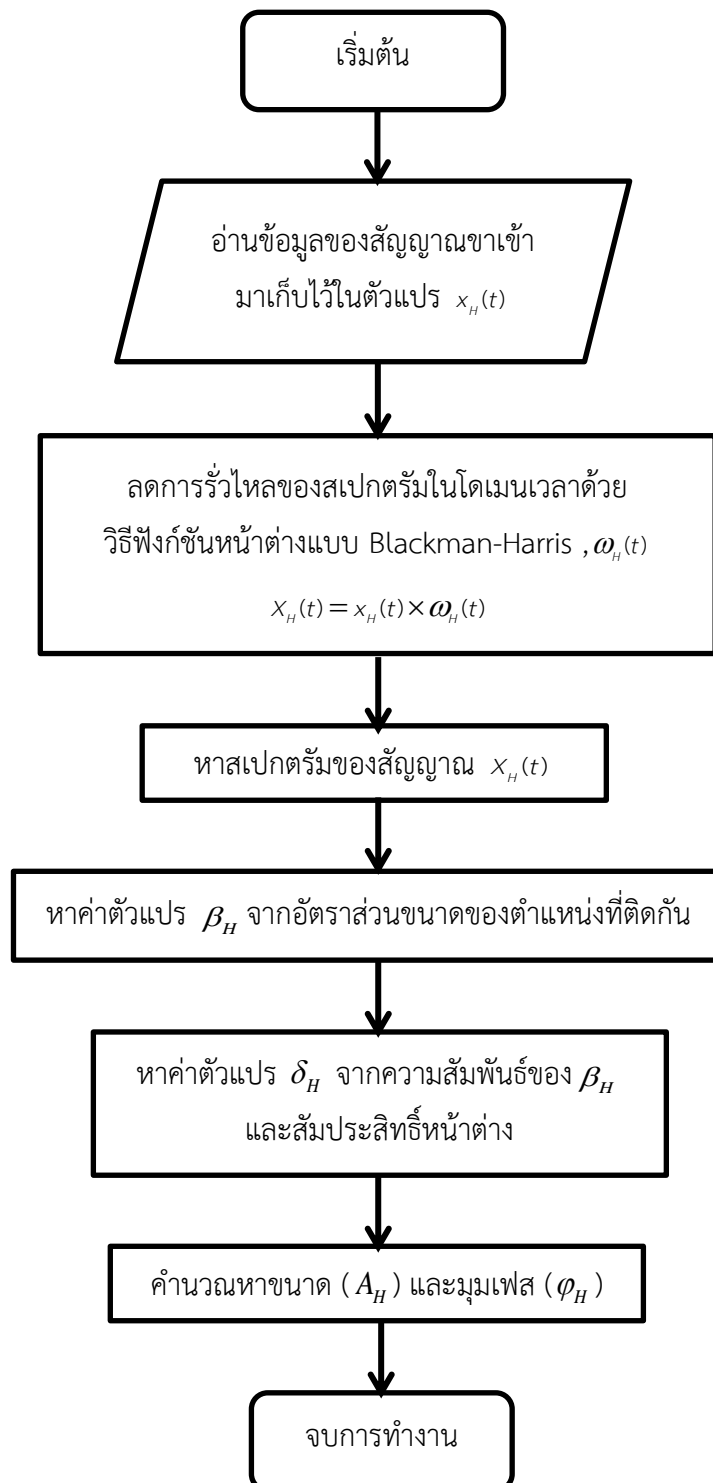
ภาพที่ 4.1 แสดงส่วนของซอฟต์แวร์ในงานวิจัยนี้โดยจะใช้ซอฟต์แวร์ LabVIEW ในการติดต่อกับเครื่องมือวัดเพื่อรับสัญญาณเข้าผ่านทาง USB พอร์ต จากนั้นจะวิเคราะห์คุณลักษณะสัญญาณ

ด้วยวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ไปคำนวณดัชนีชี้วัดต่างๆที่สนใจตามมาตรฐานสุดท้ายจะทำการแสดงผลพีธีในรูปแบบ Graphic User Interface

4.1 ขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก

โดยทั่วไปการอธิบายคุณลักษณะของสัญญาณจะใช้วิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier transform) แต่ด้วยปัญหาที่ตามมาจากข้อจำกัดคือ เมื่อมีส่วนประกอบอินเตอร์ฮาร์มอนิก หรือส่วนประกอบย่อยฮาร์มอนิกปะปนในระบบจะทำให้เกิดปัญหาการรั่วไหลของสเปกตรัมทำให้เกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์หาคุณลักษณะของสัญญาณ วิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว ไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ส่วนประกอบอินเตอร์ฮาร์มอนิกได้โดยตรงเนื่องจากมีความผิดพลาดในด้านการแปลงข้อมูลได้ไม่แม่นยำพอ เกิดความผิดพลาด จากปัญหาการรั่วไหลของสเปกตรัม ปัญหาเอเลียสซิ่ง (Aliasing) ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ส่งผลให้การแปลงข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูลเกิดความผิดพลาด โดยเฉพาะอย่างยิ่งความผิดเพี้ยนของมูมเฟส ดังนั้นการลดปัญหาความผิดพลาดที่เกิดขึ้น สามารถแก้ไขโดยการเลือกวิธีฟังก์ชันหน้าต่างที่เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งเป็นวิธีที่มีการพัฒนามาจากวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว

ในความเป็นจริงแล้วสัญญาณในระบบไฟฟ้าอาจจะมีส่วนประกอบฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกปะปนในสัญญาณมูลฐาน หากใช้วิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วก็จะส่งผลกระทบต่อเกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์หาคุณลักษณะของสัญญาณได้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธีฟังก์ชันหน้าต่าง เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นและได้เลือกวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris ในการวิเคราะห์หาคุณลักษณะของฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าเพราะสามารถลดปัญหาการรั่วไหลของสเปกตรัมได้ดีที่สุดเนื่องจากมีค่า Side lobe level ต่ำที่สุดดังตารางที่ 2.2 ที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นเมื่อนำ วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris ไปวิเคราะห์รูปคลื่นสัญญาณก็จะให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำมากขึ้นกว่าการใช้วิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว โดยเฉพาะค่ามูมเฟสที่มีความผิดเพี้ยนอย่างมาก โดยวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris มีขั้นตอนคำนวณเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ คือ ขนาดและมูมเฟสดังต่อไปนี้



ภาพที่ 4.2 แผนภาพการคำนวณด้วยวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman - Harris [2]

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าโดยทั่วไปอยู่ในรูปของ

$$x_H(t) = \sum_{H=0}^M A_H \cos(2\pi f_H t + \varphi_H) \quad (4.1)$$

โดยที่ A_H คือ ขนาดของสัญญาณแต่ละสัญญาณ
 f_H คือ ความถี่ของสัญญาณ มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์
 φ_H คือ มุมเฟสของสัญญาณ มีหน่วยเป็นองศา
 H คือ ลำดับฮาร์มอนิก
 M คือ ลำดับฮาร์มอนิกสูงสุด

ขั้นตอนที่ 2 เลือกแบบวิธีฟังก์ชันหน้าต่างที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน โดยวิธีฟังก์ชันหน้าต่างมีสมการทั่วไป ดังนี้

$$\omega_H(n) = \sum_{i=0}^K (-1)^i a_i \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1} i\right) \quad n=0,1,\dots,N-1 \quad (4.2)$$

โดยที่ N คือ จำนวนของข้อมูลตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์
 a_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละฟังก์ชันหน้าต่าง
 K คือ จำนวนเต็มบวกแตกต่างกันตามรูปแบบของฟังก์ชันหน้าต่าง

ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris ในการวิเคราะห์ข้อมูล เนื่องจากสามารถลดการรั่วไหลของสเปกตรัมได้ดีที่สุดดัง [Error! Reference source not found.](#) ดังนั้นสมการวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris ได้คือ

$$\omega_H(n) = 0.35875 - 0.48829 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + 0.14128 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right) - 0.01168 \cos\left(\frac{6\pi n}{N-1}\right) \quad (4.3)$$

โดยที่ $a_0 = 0.35875$
 $a_1 = 0.48829$
 $a_2 = 0.14128$
 และ $a_3 = 0.01168$

ขั้นตอนที่ 3 การสุ่มสัญญาณด้วยฟังก์ชันหน้าต่างในโดเมนเวลาเราสามารถหาได้จากการนำสมการแรงดันหรือกระแสจากสมการที่ (4.1) คูณกับฟังก์ชันหน้าต่างที่เลือกใช้งาน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris จากสมการที่ (4.3) จะได้

$$X(t) = x_H(t) \times \omega_H(n), \quad n=0,1,\dots,N-1 \quad (4.4)$$

หรือหากเป็นการสุ่มสัญญาณด้วยฟังก์ชันหน้าต่างในโดเมนความถี่จะนำสมการแรงดันหรือกระแสจากสมการที่ (4.1) มาคอนโวลูชันกับรูปแบบวิธีฟังก์ชันหน้าต่างที่เลือกใช้นั้นจะได้

$$\begin{aligned} X(e^{j\omega}) &= X_H(e^{j\omega}) \otimes W_H(e^{j\omega}) \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} X_H(e^{j\tau}) W_H[e^{j(\omega-\tau)}] d\tau \\ &= A_H W_H(\omega - \omega_H) e^{j(\phi_H - (N-1)(\omega - \omega_H)/2)} \end{aligned} \quad (4.5)$$

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดให้อัตราส่วนสเปกตรัมของตำแหน่งที่ติดกันคือ β_n

$$\left| X(e^{j\omega}) \right|_{\omega=(k_H) \cdot \frac{2\pi}{N}} \approx A_H \sin(\pi\delta_H) \cdot \frac{(c_0 + c_2\delta_H^2 + c_4\delta_H^4 + c_6\delta_H^6)}{\pi\delta_H(1-\delta_H^2)(4-\delta_H^2)(9-\delta_H^2)} \quad (4.6)$$

$$\left| X(e^{j\omega}) \right|_{\omega=(k_H+1) \cdot \frac{2\pi}{N}} \approx A_H \sin(\pi\delta_H) \cdot \frac{(b_0 + b_1\delta_H + b_2\delta_H^2 + b_3\delta_H^3 + b_4\delta_H^4 + b_5\delta_H^5 + b_6\delta_H^6)}{\pi\delta_H(1-\delta_H^2)(4-\delta_H^2)(3-\delta_H)(4-\delta_H^2)} \quad (4.7)$$

ดังนั้น

$$\beta_H = \frac{\left| X(e^{j\omega}) \right|_{\omega=(k_H+1) \cdot \frac{2\pi}{N}}}{\left| X(e^{j\omega}) \right|_{\omega=(k_H) \cdot \frac{2\pi}{N}}} \quad (4.8)$$

แทนสมการที่ (4.6) และ (4.7) ในสมการที่ (4.8) จะได้

$$\beta_H = \frac{(b_0 + b_1\delta_H + b_2\delta_H^2 + b_3\delta_H^3 + b_4\delta_H^4 + b_5\delta_H^5 + b_6\delta_H^6)(3 + \delta_H)}{[(c_0 + c_2\delta_H^2 + c_4\delta_H^4 + c_6\delta_H^6)(4 - \delta_H)]} \quad (4.9)$$

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ต่างในการหาค่า β_H มีดังนี้

$$\begin{aligned}
 b_0 &= 24a_1 \\
 b_1 &= 48a_0 - 26a_1 - 16a_2 + 6a_3 \\
 b_2 &= 20a_0 - 27a_1 + 36a_2 - 11a_3 \\
 b_3 &= -36a_0 + 32a_1 - 20a_2 \\
 b_4 &= -a_0 + 2a_1 - 5a_2 + 10a_3 \\
 b_5 &= 6(a_0 - a_1 + a_2 - a_3) \\
 b_6 &= -a_0 + a_1 - a_2 + a_3 \\
 c_0 &= 36a_0 \\
 c_2 &= -49a_0 + 36a_1 - 9a_2 + 4a_3 \\
 c_4 &= 14a_0 - 13a_1 + 10a_2 - 5a_3 \\
 c_6 &= -a_0 + a_1 - a_2 + a_3
 \end{aligned}$$

จากงานวิจัยนี้เลือกรูปฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris ดังนั้นจะได้ β_H เท่ากับ

$$\beta_H = \frac{[(8.61 + 2.33\delta_H - 1.05\delta_H^2 - 0.12\delta_H^3 + 0.03\delta_H^4 + (3.6 \times 10^{-4})\delta_H^5 - (6 \times 10^{-5})\delta_H^6)](3 + \delta_H)}{[(12.92 + 29.88\delta_H^2 - 8.98\delta_H^4 + 0.64\delta_H^6)](4 - \delta_H)} \quad (4.10)$$

ขั้นตอนที่ 5 แก้สมการหาค่า δ_H จากนั้นนำมาแทนในสมการที่ (4.11) และ (4.12) เพื่อหาผลลัพธ์ของขนาดของฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกลำดับที่ H ได้เท่ากับ

$$A_H \approx \left| X_H(e^{j\omega}) \right|_{\omega=k_H \cdot \frac{2\pi}{N}} \cdot \frac{\pi\delta_H(1-\delta_H^2)(4-\delta_H^2)(9-\delta_H^2)}{[\sin(\pi\delta_H) \cdot (c_0 + c_2\delta_H^2 + c_4\delta_H^4 + c_6\delta_H^6)]} \quad (4.11)$$

และมุมเฟสของฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกลำดับที่ H เท่ากับ

$$\varphi_H \approx \text{angle} \left(X(e^{j\omega}) \right)_{\omega=k_H \cdot \frac{2\pi}{N}} - \delta_H \pi \frac{(N-1)}{N} \quad (4.12)$$

4.2 การทำงานของซอฟต์แวร์

ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกในงานวิจัยนี้ถูกสร้างจากซอฟต์แวร์ LabVIEW เวอร์ชัน 2011 ซึ่งจะสามารถติดต่อกับเครื่องมือวัดได้โดยตรงผ่านพอร์ต USB ซอฟต์แวร์วิเคราะห์นี้สามารถแสดงรายละเอียดของคุณลักษณะฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกทั้งขนาด และ มุมเฟสในรูปแบบกราฟและค่าจริง มีความยืดหยุ่นในการทำงานเช่น สามารถกำหนดเลือกการทำงานของซอฟต์แวร์ กำหนดจำนวนข้อมูลการสุ่มตัวอย่าง กำหนดลำดับฮาร์มอนิกสูงสุดที่สนใจ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีมาตรฐานการวัดและการประเมินฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกเพื่อช่วยในการวิเคราะห์งานได้สะดวกขึ้น มีการแสดงผลที่ไม่ซับซ้อน และสามารถเก็บบันทึกข้อมูลที่ต้องการ

ซอฟต์แวร์ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยหน้าต่างการทำงานทั้งหมด 6 หน้าต่างดังนี้

1. หน้าต่างแสดงผลหลัก (Overview tab)
2. หน้าต่างแสดงผลของแรงดันไฟฟ้า (Voltage tab)
3. หน้าต่างแสดงผลของกระแสไฟฟ้า (Current tab)
4. หน้าต่างแสดงดัชนีการคำนวณตามมาตรฐาน (Standard tab)
5. หน้าต่างแสดงรายละเอียดของซอฟต์แวร์ (Comment tab)
6. หน้าต่างบันทึกข้อมูล (Export data tab)

รายละเอียดและการทำงานในแต่ละหน้าต้างมีดังนี้

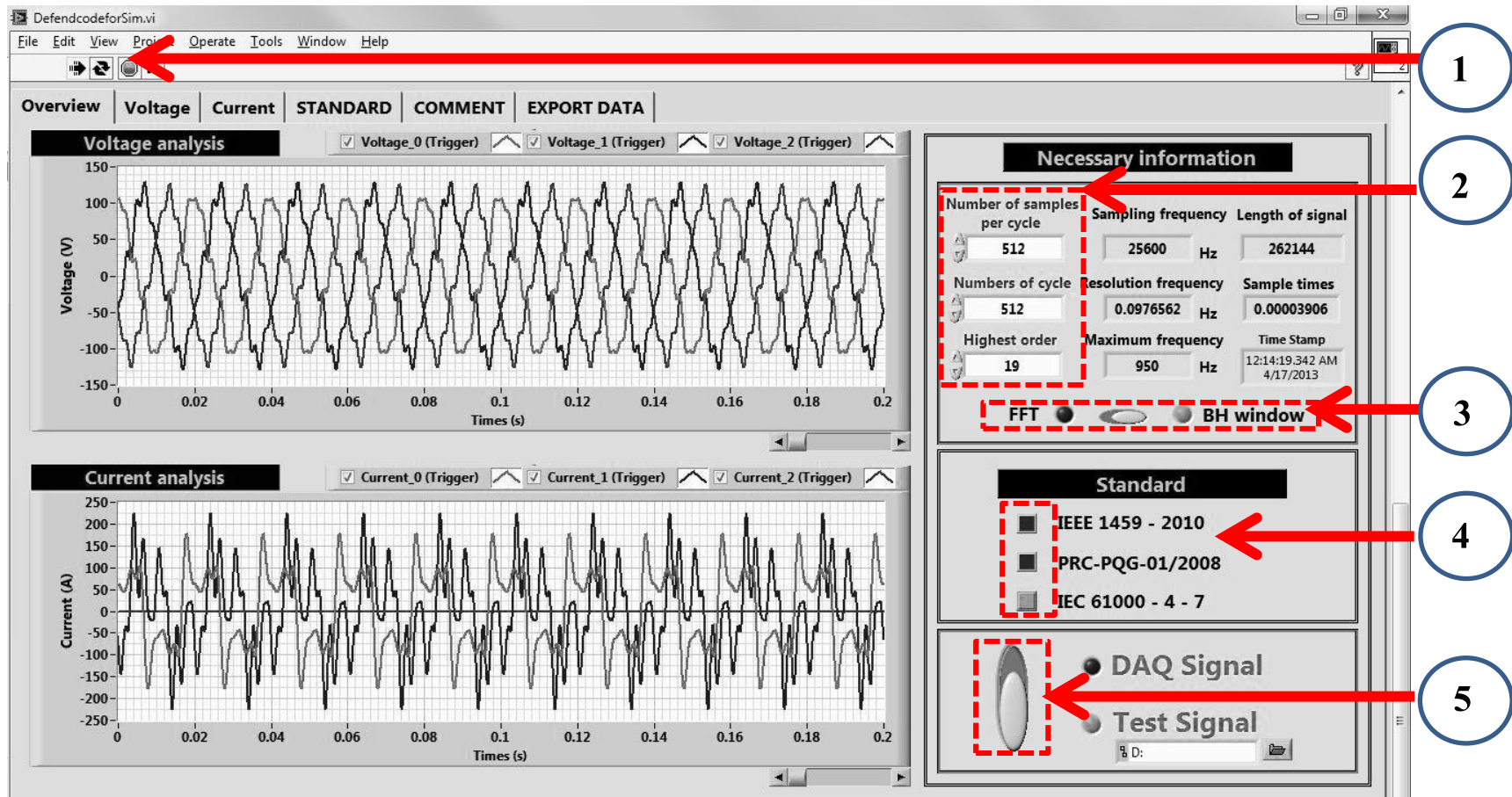
4.2.1 หน้าต่างแสดงผลหลัก (Overview tab)

ในหน้าต่างแสดงผลหลักของซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกจะเป็นหน้าต่างเริ่มต้นการทำงานของซอฟต์แวร์ โดยผู้ใช้ต้องกำหนดรูปแบบการทำงานของซอฟต์แวร์ เช่น วิเคราะห์สัญญาณโดยรับข้อมูลจากเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น (DAQ signal) หรือ วิเคราะห์สัญญาณโดยรับข้อมูลจากข้อมูลดิบ (Test signal) กำหนดขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลได้แก่ วิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว หรือ ฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris รวมทั้งกำหนดข้อมูลที่จำเป็นได้แก่ ความถี่อัตราการสุ่มข้อมูลตัวอย่าง (Sampling frequency) จำนวนข้อมูลตัวอย่างต่อ 1 วัฏจักรสัญญาณ (Number of sample per cycle) จำนวนรูปคลื่นสัญญาณในการวิเคราะห์ (Number of cycle) และลำดับฮาร์มอนิกสูงสุดที่สนใจ (Highest order of harmonic)

นอกจากนี้ผู้ใช้สามารถเลือกดัชนีจากมาตรฐานสากลเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกได้ ประกอบด้วย 3 มาตรฐานได้แก่ มาตรฐาน IEEE 1459 (2010) มาตรฐาน IEC 61000 - 4 - 7 (2002) และข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม (PRC-PQG-01/2008) สำหรับระบบไฟฟ้าแรงต่ำ 400 โวลต์

จากภาพที่ 4.3 แสดงหน้าต่างแสดงผลหลักซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. **หมายเลข 1** คือ ปุ่มเริ่มต้นการทำงาน
2. **หมายเลข 2** คือ ข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณของซอฟต์แวร์ ประกอบด้วย
 - 1) Number of samples per cycles หมายถึง จำนวนจุดที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่างข้อมูลในหนึ่งคาบ
 - 2) Number of cycle หมายถึง จำนวนคาบที่ต้องการคำนวณ
 - 3) Highest order หมายถึง ลำดับฮาร์มอนิกสูงสุดที่สนใจ
3. **หมายเลข 3** คือ ขั้นตอนวิธีในการคำนวณ สามารถเลือกได้ 2 วิธี คือ
 - 1) วิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT)
 - 2) วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris (B-H window)
4. **หมายเลข 4** คือ มาตรฐานในการวิเคราะห์ที่สนใจ สามารถเลือกได้ 3 มาตรฐาน คือ
 - 1) มาตรฐาน IEEE 1459 (2010)
 - 2) ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม (PRC-PQG-01/2008) สำหรับระบบไฟฟ้าแรงต่ำ 400 โวลต์
 - 3) มาตรฐาน IEC 61000-4-7 (2002)
 โดยที่มาตรฐาน IEC 61000 – 4 – 7 จะสามารถเลือกให้ซอฟต์แวร์คำนวณได้เมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขเฉพาะของมาตรฐานดังนี้
 - ใช้วิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT) ในการคำนวณเท่านั้น
 - จำนวนคาบที่ใช้ในการคำนวณต้องเท่ากับ 10 รูปคลื่นสำหรับระบบไฟฟ้า 50 เฮิร์ตซ์เท่านั้น
 - Resolution frequency เท่ากับ 5 เฮิร์ตซ์เท่านั้น
5. **หมายเลข 5** คือ การนำข้อมูลขาเข้าของซอฟต์แวร์ สามารถเลือกการนำเข้าข้อมูลได้ 2 วิธี คือ
 - 1) DAQ signal หมายถึง นำข้อมูลขาเข้าจากเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น
 - 2) Test signal หมายถึง นำข้อมูลขาเข้าจากข้อมูลคียบ ซึ่งมีรูปแบบข้อมูลเป็นไปตามภาคผนวก ข



ภาพที่ 4.3 หน้าต่างแสดงผลหลัก (Overview Tab)

4.2.2 หน้าต่างแสดงผลของแรงดัน (Voltage tab)

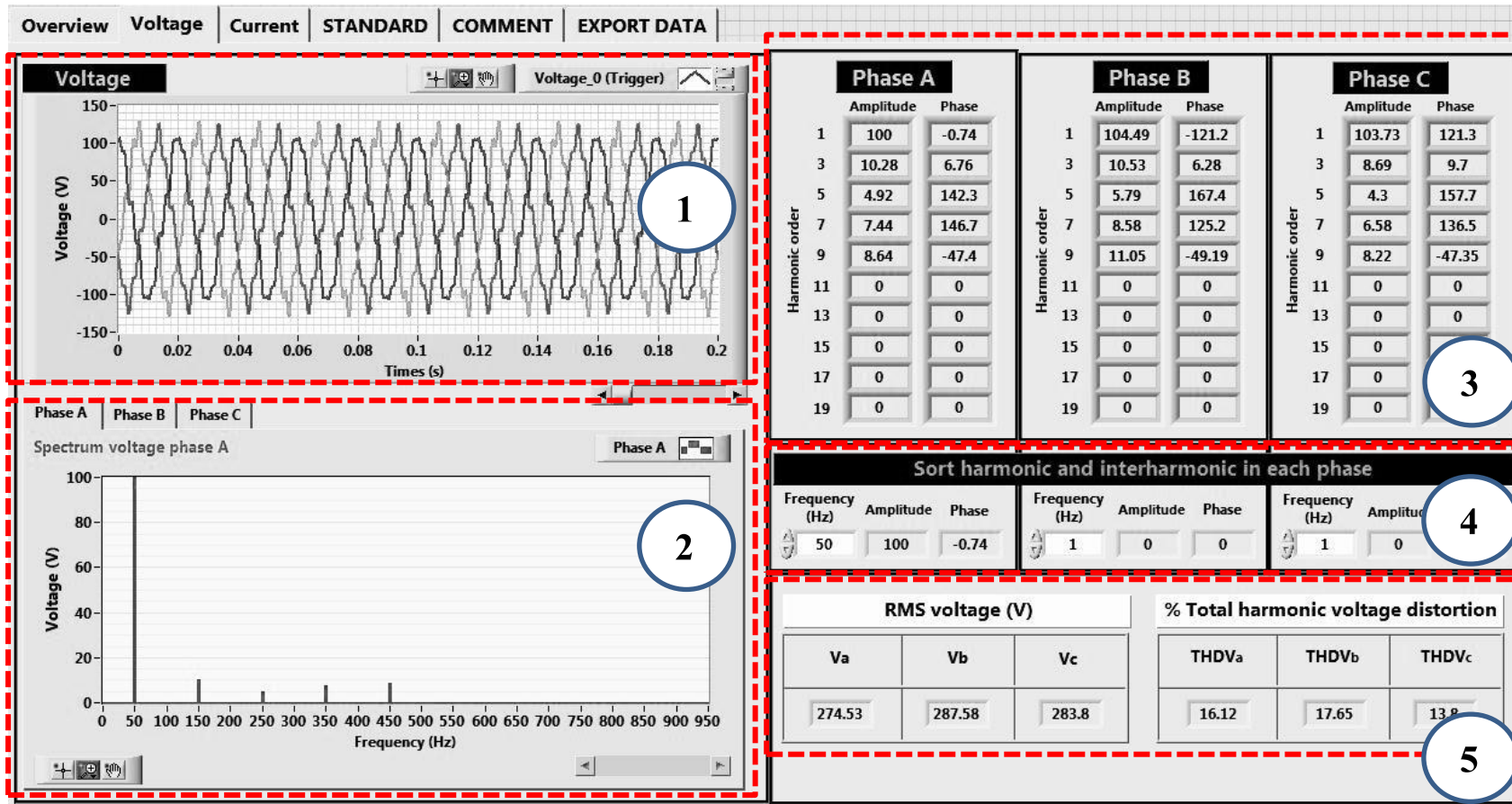
หน้าต่างแสดงผลของแรงดันไฟฟ้าจะอยู่ถัดจากหน้าต่างหลัก ผู้ใช้สามารถกดเลือกที่หัวหน้าต่างเพื่อดูผลการวิเคราะห์ของแรงดันไฟฟ้า โดยในหน้าต่างแรงดันนี้จะแสดงรูปคลื่นสัญญาณแรงดันขาเข้าทั้งสามเฟส แสดงรูปสเปกตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกที่ปะปนในระบบที่มีความถี่ต่างๆ พร้อมทั้งแสดงค่าคุณลักษณะของแรงดันทั้งขนาดและมุมเฟส จากภาพที่ 4.4 สามารถแสดงผลรายละเอียดต่างๆได้ดังนี้

1. **หมายเลข 1** แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าขาเข้าทั้ง 3 เฟสในเชิงเวลา สามารถย่อขยาย รูปสัญญาณในตำแหน่งที่สนใจได้ตามต้องการ
2. **หมายเลข 2** แสดงรูปสเปกตรัมแรงดันฮาร์มอนิกทั้ง 3 เฟส สามารถย่อขยายรูปสเปกตรัมในตำแหน่งที่สนใจได้ตามต้องการ
3. **หมายเลข 3** แสดงผลของขนาดและมุมเฟสที่ความถี่มูลฐานและฮาร์มอนิกลำดับฮาร์มอนิกเลขคี่ตั้งแต่ลำดับที่ 3 – 19 ในแต่ละเฟส
4. **หมายเลข 4** แสดงผลของขนาดและมุมเฟสของความถี่ฮาร์มอนิก และอินเตอร์ฮาร์มอนิกที่สนใจในแต่ละเฟส
5. **หมายเลข 5** แสดงค่ากำลังสองเฉลี่ย (RMS) ของแรงดันทั้ง 3 เฟส และเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิก (% of total harmonic distortion, %THD) ทั้ง 3 เฟส

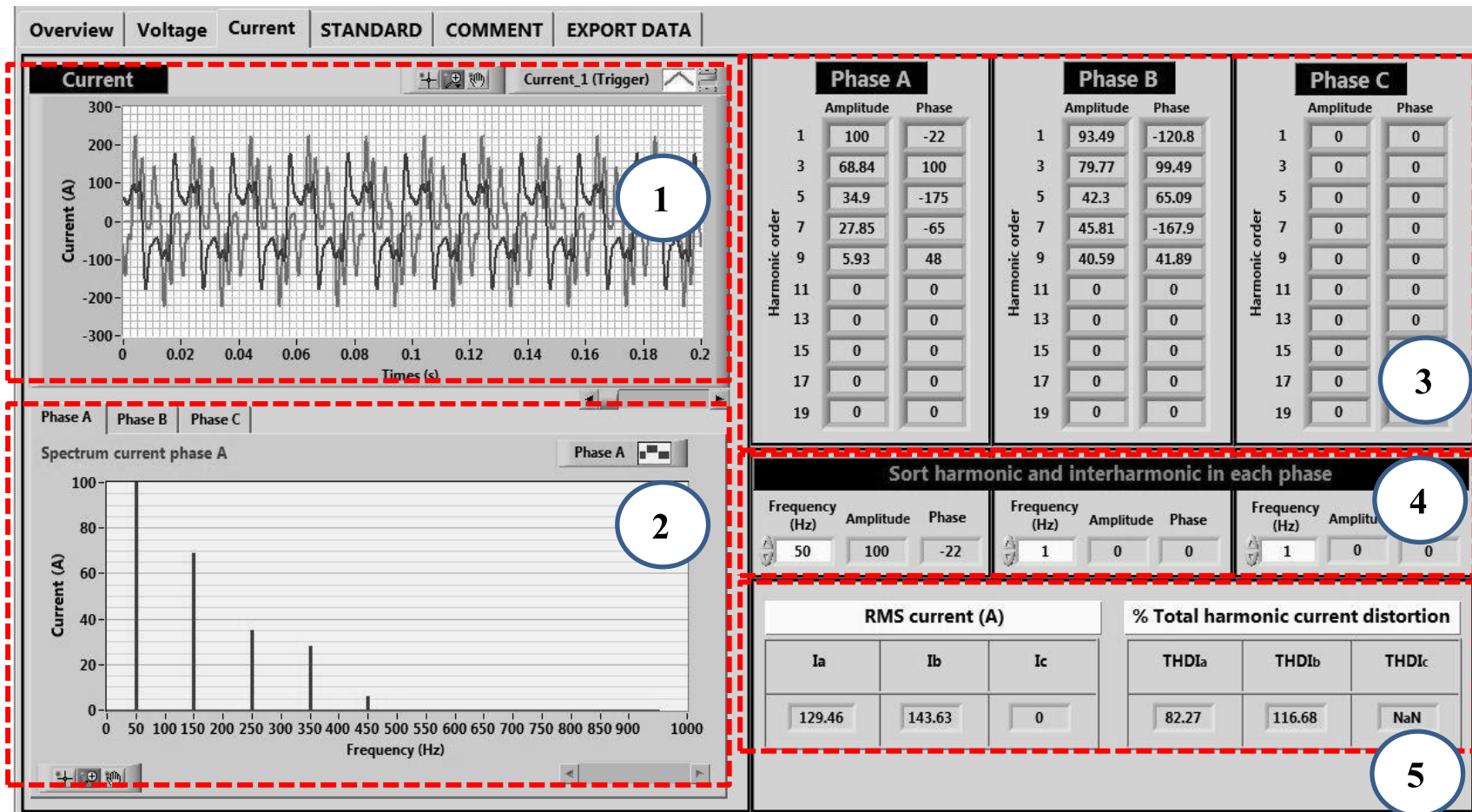
นอกจากนี้หากต้องการพิจารณาอินเตอร์ฮาร์มอนิกให้เริ่มสังเกตความผิดปกติจากรูปสเปกตรัม จากนั้นให้ทำการเลือกความถี่ที่มีความผิดปกติที่ช่องความถี่ (Frequency) ในหมายเลข 4 ของภาพที่ 4.4 ในเฟสนั้น ค่าคุณลักษณะของขนาด และมุมเฟสของฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกจะทำการแสดงผลของความถี่นั้นๆขึ้น นอกจากนี้ผู้ใช้สามารถบันทึกรูปภาพของสัญญาณรูปสเปกตรัมของสัญญาณ หรือข้อมูลดิบของรูปสัญญาณ หรือสเปกตรัมนั้นได้ โดยไปที่รูปภาพที่ต้องการ จากนั้น คลิกขวา ไปที่ส่งออกข้อมูล (Export data) สุดท้ายเลือกรูปแบบข้อมูลที่ต้องการบันทึก เสร็จสิ้นการบันทึกข้อมูล

4.2.3 หน้าต่างแสดงผลของกระแส (Current tab)

ในหน้าต่างแสดงผลของกระแสไฟฟ้ามียรายละเอียดของหน้าต่างเช่นเดียวกับแรงดัน แสดงหน้าต่างผลของกระแสดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.4 หน้าต่างแสดงผลของแรงดันไฟฟ้า (Voltage tab)



ภาพที่ 4.5 หน้าต่างแสดงผลของกระแสไฟฟ้า (Current tab)

4.2.4 หน้าต่างแสดงดัชนีการคำนวณตามมาตรฐาน (Standard tab)

หน้าต่างแสดงผลดัชนีอ้างอิงตามมาตรฐานจะแสดงผลการคำนวณเมื่อผู้ใช้ได้ทำการกำหนดเลือกมาตรฐานที่สนใจในหน้าต่างหลัก ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก ในงานวิจัยนี้มีมาตรฐานเพื่อช่วยให้ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกสะดวกขึ้น ประกอบด้วยมาตรฐาน 3 ชนิดได้แก่

1. มาตรฐาน IEEE 1459 (2010) ภาพที่ 4.6

ในหน้าต่างแสดงดัชนีที่เกี่ยวข้องกับปริมาณของฮาร์มอนิกในระบบ และค่าพื้นฐานที่สำคัญ เช่นค่าประสิทธิผลของแรงดัน และกระแสในแต่ละเฟส ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิก และกระแสฮาร์มอนิกเป็นต้น โดยดัชนีที่แนะนำคือ มลพิษฮาร์มอนิก หากในระบบมีปริมาณของดัชนีตัวนี้มากกว่า 1 ผู้ใช้จะทราบได้ทันทีว่าในระบบของผู้ใช้มีปริมาณฮาร์มอนิกปะปนในระบบนำไปสู่การแก้ไขต่อไป แสดงหน้าต่างดัชนีตามมาตรฐานดังภาพที่ 4.6

2. ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม สำหรับระบบไฟฟ้าแรงต่ำขนาด 400 โวลต์ (2008)

หน้าต่างแสดงผลการประเมินระบบไฟฟ้าของผู้ใช้ตามข้อกำหนดกฎเกณฑ์นี้ แสดงดังภาพที่ 4.7 ซึ่งในซอฟต์แวร์นี้จะช่วยผู้ใช้ในการประเมินอุปกรณ์ที่สามารถต่อเข้าร่วมกับระบบของการไฟฟ้าในชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 (โดยชั้นที่ 1 ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของอุปกรณ์ หากอุปกรณ์ของผู้ใช้ผ่านการประเมินในข้อที่ 1 ผู้ใช้สามารถนำอุปกรณ์นั้นต่อเข้ากับระบบได้ แต่หากคุณสมบัติของอุปกรณ์ไม่ผ่านการประเมินในชั้นที่ 1 จะต้องทำการประเมินในชั้นที่ 2 หรือ ชั้นที่ 3 ต่อไป)

ในหน้าต่างนี้จะเริ่มประเมินจากชั้นที่ 2 คือปริมาณของแรงดันฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับต้องไม่เกินขีดจำกัด หากค่าไม่เกินขีดจำกัดของข้อกำหนดกฎเกณฑ์นี้ หน้าต่างจะแสดงผลการประเมินว่า “PASS” และหากแรงดันในเฟสใดไม่ผ่านการประเมิน หรือมีค่าเกินขีดจำกัดแล้วนั้น หน้าต่างจะแสดงผลการประเมินว่า “FAIL” ที่แรงดันฮาร์มอนิกในลำดับและเฟสนั้นๆ นอกจากนี้มีหน้าต่างสรุปการประเมินของชั้นที่ 2 และ 3 ดังเส้นประในภาพที่ 4.7

3. มาตรฐาน IEC 61000 - 4 - 7 (2002)

แสดงดัชนีการรวมกลุ่มของฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก โดยที่ในหน้าต่างนี้ จะสามารถแสดงการคำนวณได้ก็ต่อเมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขของมาตรฐาน คือจะแสดงผลการคำนวณเมื่อใช้วิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และกำหนดคาบในการสุ่มข้อมูลตัวอย่างเท่ากับ 10 คาบ แสดงดังภาพที่ 4.8

4.2.5 หน้าต่างแสดงรายละเอียดของซอฟต์แวร์ (Comment tab)

หน้าต่างแสดงรายละเอียดของซอฟต์แวร์แสดงดังภาพที่ 4.9 ในส่วนของหน้าต่างนี้จะทำการอธิบายวิธีการใช้งานของซอฟต์แวร์ อธิบายมาตรฐานพอสั่งเขป และกล่าวถึงข้อจำกัดของซอฟต์แวร์มีดังนี้

1. มาตรฐาน IEC 61000 - 4 - 7 (2002) สามารถคำนวณได้เฉพาะขั้นตอนวิธีการคำนวณแบบ FFT มี Resolution frequency เท่ากับ 5 เฮิร์ตซ์ และวิเคราะห์ข้อมูลจากไฟล์ หรือ การทดสอบแบบ Test signal เท่านั้น
2. ในการเลือกมาตรฐาน IEC 61000 - 4 - 7 (2002) ในการวิเคราะห์การรวมกลุ่มของอินเตอร์ฮาร์โมนิก หากเลือกความถี่ที่สนใจเท่ากับ 150 หมายถึง ผู้ใช้ต้องการวิเคราะห์การรวมกลุ่มของอินเตอร์ฮาร์โมนิกระหว่างความถี่ 150 – 200 เฮิร์ตซ์
3. เครื่องมือวัดกำหนดความถี่อัตราสุ่มเท่ากับ 50 kHz และจำนวนข้อมูลตัวอย่างเท่ากับ 1000 จุด ต่อ 1 รูปคลื่นสัญญาณ เป็นค่าเริ่มต้น

4.2.6 หน้าต่างบันทึกข้อมูล (Export data tab)

ในส่วนของหน้าต่างบันทึกข้อมูลจะทำการบันทึกข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบไฟล์ที่มีนามสกุล .txt หน้าตาของหน้าต่างบันทึกข้อมูลแสดงดังภาพที่ 4. 10

Overview | Voltage | Current | STANDARD | COMMENT | EXPORT DATA

IEEE 1459-2010 | Thai Standard Compliance | IEC 61000 -4-7

IEEE STANDARD 1459 - 2010

This standard is defined for the measurement of Electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. The importance is the voltage and current at the fundamental frequency of the harmonic components included. If the index is large, it means the system has a harmonic mixed in large leads to improve the power quality in the system. In this software, a measurement system to measure only the standard 3-phase 4 wire.

RMS voltage (V)				RMS current (A)		
Va	Vb	Vc		Ia	Ib	Ic
274.53	287.58	283.8		129.46	143.63	0

The effective voltage (V)			The effective current (A)		
Ve	Ve	VeH	Ie	Ie1	IeH
280.26	278.46	31.72	164.66	107.4	124.81

% Total harmonic voltage distortion				% Total harmonic current distortion			
THDVa	THDVb	THDVc	THDeV	THDIa	THDIb	THDIc	THDeI
16.12	17.65	13.8	11.39	82.27	116.68	NaN	116.21

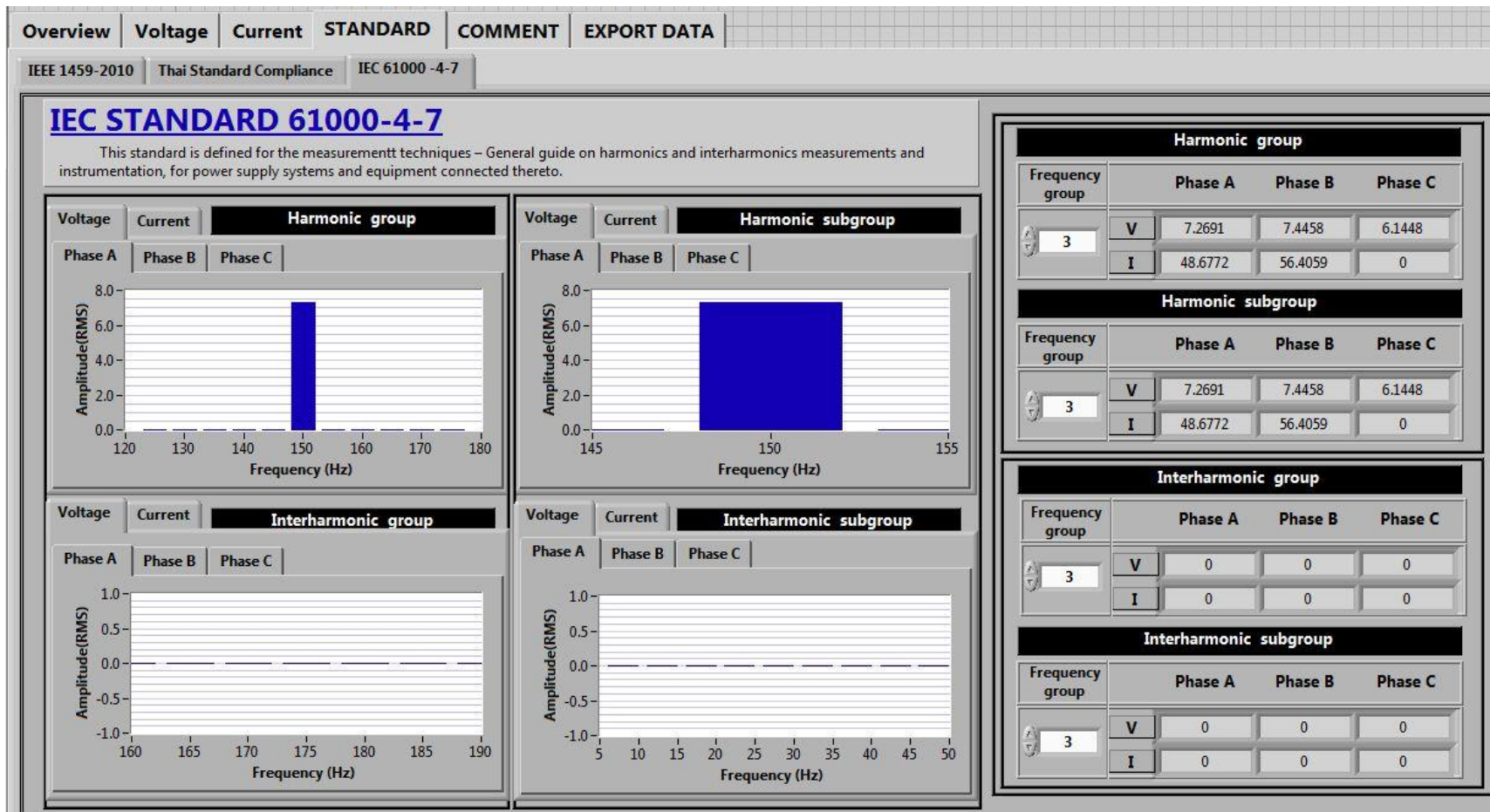
Indicators	Combine	Fundamental	Non-Fundamental	
Apparent (VA)	Se 154.3	Se1 100 Ss1_1 59 S1_U 80.74	SeN 117.51 SeH 13.24	
	Active (W)	P 57.5	P_1 57.65 Ps0_1 -0.12 Ps1_1 57.81 Ps2_1 -0.04	PH -0.15
		Non Active (var)	N 143.19	Qs0_1 -1.04 Qs1_1 11.82 Qs2_1 -0.03
Line utilization			PF 0.37	P1+ 0.98
Harmonic pollution				
Load unbalance		1.37		

0=zero 1=positive 2=Negative U=unbalanced

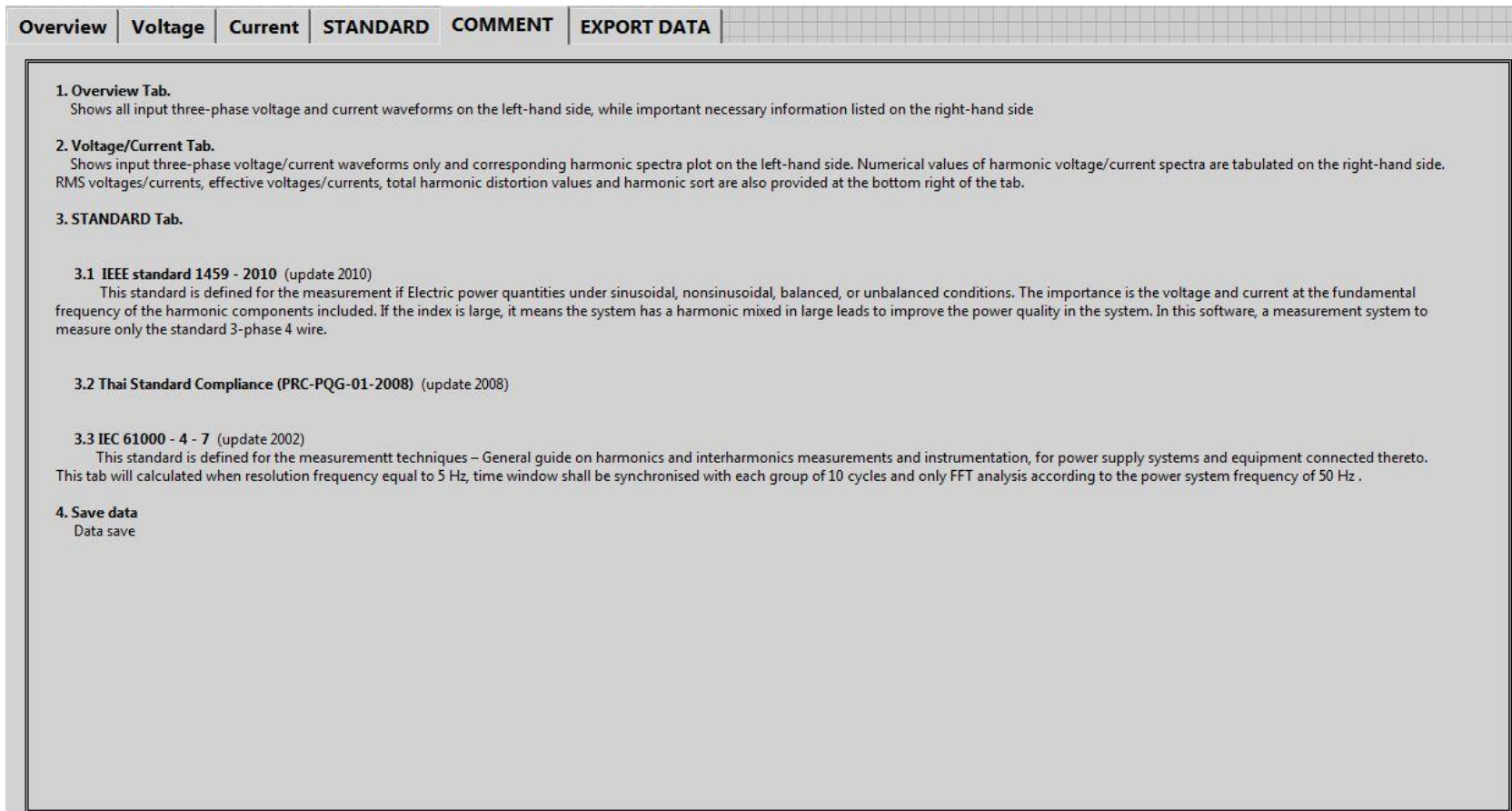
ภาพที่ 4.6 ดัชนีการคำนวณตามมาตรฐาน IEEE standard 1459 (2010)

Overview	Voltage	Current	STANDARD	COMMENT	EXPORT DATA									
IEEE 1459-2010	Thai Standard Compliance	IEC 61000 -4-7												
Thai Standard Compliance (PRC-PQG-01-2008)														
This standard is defined for the measurement voltages/currents harmonic compared with limit for low voltage system (400V).														
Harmonic Voltage			Harmonic Current											
Phase A	Phase B	Phase C	Phase A	Phase B	Phase C									
FAIL	PASS	FAIL	FAIL	PASS	-----									
STEP 2: Voltage Limit for 400 V														
Odd harmonic		Odd harmonic multiple 3			Even harmonic									
Order	Limit	Phase A	Phase B	Phase C	Order	Limit	Phase A	Phase B	Phase C	Order	Limit	Phase A	Phase B	Phase C
5	4	FAIL	PASS	FAIL	3	4	FAIL	PASS	FAIL	2	1.6	-	-	-
7	4	FAIL	PASS	FAIL	9	1.2	FAIL	PASS	FAIL	4	1	-	-	-
11	3	-	-	-	15	0.3	-	-	-	6	0.5	-	-	-
13	2.5	-	-	-	21	0.2	-	-	-	8	0.4	-	-	-
17	1.6	-	-	-	0	0				10	0.4	-	-	-
19	1.2	-	-	-	0	0				12	0.2	-	-	-
23	1.2	-	-	-	0	0				14	0.2	-	-	-
25	0.7	-	-	-	0	0				16	0.2	-	-	-
0	0				0	0				18	0.2	-	-	-
0	0				0	0				20	0.2	-	-	-
0	0				0	0				22	0.2	-	-	-
0	0				0	0				24	0.2	-	-	-
0	0				0	0								
STEP 3: Current Limit for 400 V														
Order	Limit current	Phase A	Phase B	Phase C										
2	14.4	-	-	-										
3	24.1	FAIL	PASS	-										
4	4.5	-	-	-										
5	14.4	FAIL	PASS	-										
6	1.5	-	-	-										
7	20.6	FAIL	PASS	-										
8	3.6	-	-	-										
9	4.8	FAIL	PASS	-										
10	2.9	-	-	-										
11	19.7	-	-	-										
12	0.6	-	-	-										
13	13.9	-	-	-										
14	1.1	-	-	-										
15	0.7	-	-	-										
16	0.9	-	-	-										
17	6.8	-	-	-										
18	0.4	-	-	-										
19	4.6	-	-	-										
20	0.7	-	-	-										
21	0.4	-	-	-										
22	0.6	-	-	-										
23	3.7	-	-	-										
24	0.3	-	-	-										
25	2	-	-	-										

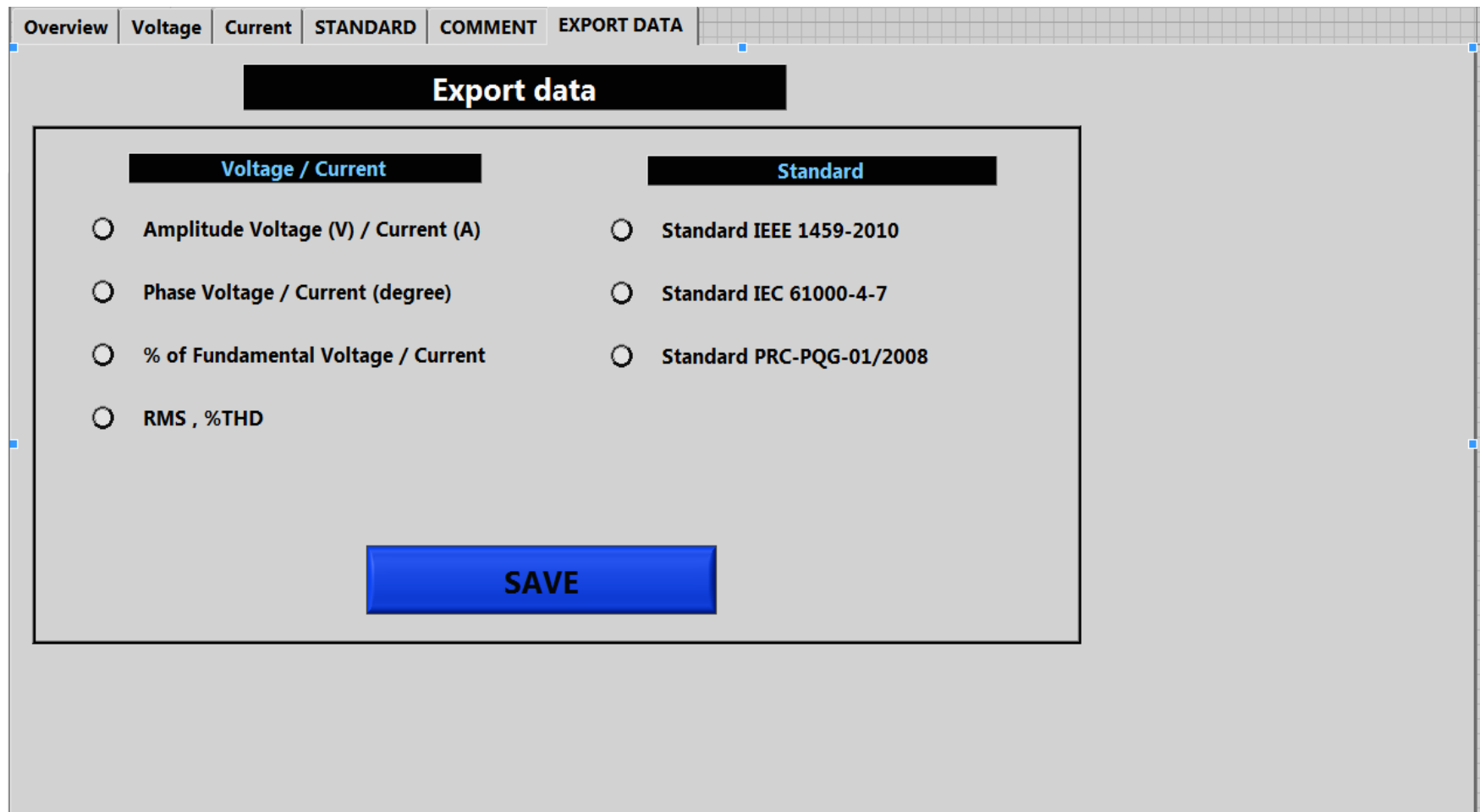
ภาพที่ 4.7 ดัชนีการคำนวณตามข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม (PRC-PQG-01/2008)



ภาพที่ 4.8 ดัชนีการคำนวณตามมาตรฐาน IEC 61000 - 4 - 7



ภาพที่ 4.9 หน้าต่างแสดงรายละเอียดของซอฟต์แวร์ (Comment Tab)



ภาพที่ 4.10 หน้าต่างบันทึกข้อมูล (Export data tab)

บทที่ 5

การทดสอบเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิก และอินเทอร์ฮาร์มอนิก

ในการทดสอบเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก ประกอบไปด้วยการทดสอบดังนี้

1. การทดสอบขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกตามเงื่อนไขที่กำหนด
2. การทดสอบซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกจากสัญญาณจำลอง
3. การทดสอบเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกจากสัญญาณจริง

5.1 การทดสอบขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก

จุดประสงค์ในการทดสอบคือ เปรียบเทียบความแม่นยำในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสัญญาณเมื่อมีฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกปนในระบบไฟฟ้าระหว่างขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะของสัญญาณด้วยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว กับวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยความถี่อัตราการสุ่ม (Sampling Frequency) เท่ากับ 25.6 kHz จำนวนข้อมูลตัวอย่างเท่ากับ 512 จุดต่อ 1 วัฏคลื่นสัญญาณ

ขั้นตอนการทดสอบ

1. สร้างเงื่อนไขสำหรับการทดสอบขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์ในรูปแบบต่างๆ
2. สร้างสัญญาณจำลองที่มีฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก หรือสัญญาณขาเข้าที่สอดคล้องกับเงื่อนไขการทดสอบที่สร้างขึ้น ดังตารางที่ ง. 1 – ง. 9
3. วิเคราะห์คุณลักษณะของสัญญาณด้วยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว
4. วิเคราะห์คุณลักษณะของสัญญาณด้วยวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman -Harris
5. เปรียบผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของสัญญาณในข้อ 3 และ 4

เงื่อนไขในการวิเคราะห์มีดังนี้

1. ทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณเมื่อลำดับฮาร์มอนิกเปลี่ยนไป
2. ทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณเมื่อความถี่อินเทอร์ฮาร์มอนิกเปลี่ยนไป
 - 1) เมื่อความถี่อินเทอร์ฮาร์มอนิกอยู่ใกล้กับความถี่มูลฐาน
 - 2) เมื่อความถี่อินเทอร์ฮาร์มอนิกอยู่ใกล้กับฮาร์มอนิกเลขคู่

- 3) เมื่อความถี่อินเตอร์ฮาร์โมนิกอยู่ใกล้กับฮาร์โมนิกเลขคี่
3. ทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณเมื่อจำนวนฮาร์โมนิกในระบบมีมากขึ้น
4. ทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณเมื่อจำนวนอินเตอร์ฮาร์โมนิกในระบบมีมากขึ้น
5. ทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณเมื่อสัญญาณมีฮาร์โมนิก และอินเตอร์ฮาร์โมนิก

5.1.1 ทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณเมื่อลำดับฮาร์โมนิกเปลี่ยน

5.1.1.1 จุดประสงค์ในการทดสอบ

เมื่อลำดับของฮาร์โมนิกมากขึ้น จะส่งผลต่อความแม่นยำในการคำนวณหาขนาด และมุม ด้วยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris หรือไม่

5.1.1.2 วิธีการทดสอบ

ทดสอบความแม่นยำในการคำนวณหาขนาด และมุมเฟสของทั้งสองวิธี โดยจำลองให้สัญญาณแรงดันที่ความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 เฮิรตซ์ มีขนาดเท่ากับ 100 โวลต์ มุมเท่ากับ 90 องศา และลำดับของฮาร์โมนิกที่ปะปน มีดังนี้

การทดสอบชุดที่ 1 เมื่อสัญญาณมีฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 (150 เฮิรตซ์)

การทดสอบชุดที่ 2 เมื่อสัญญาณมีฮาร์โมนิกลำดับที่ 13 (650 เฮิรตซ์)

การทดสอบชุดที่ 3 เมื่อสัญญาณมีฮาร์โมนิกลำดับที่ 50 (2,500 เฮิรตซ์)

โดยในการทดสอบชุดที่ 1 – 3 ใช้ข้อมูลขนาด และมุมเฟสของฮาร์โมนิกดังนี้

แบบที่ 1 ขนาดของฮาร์โมนิกเพิ่มขึ้นขั้นละ 10 โวลต์ โดยมีมุมคงที่ (ภาคผนวก ง ตารางที่ ง. 1)

แบบที่ 2 ขนาดของฮาร์โมนิกคงที่ โดยมีมุมเฟสเพิ่มขึ้นขั้นละ 10 องศา (ภาคผนวก ง ตารางที่ ง. 2)

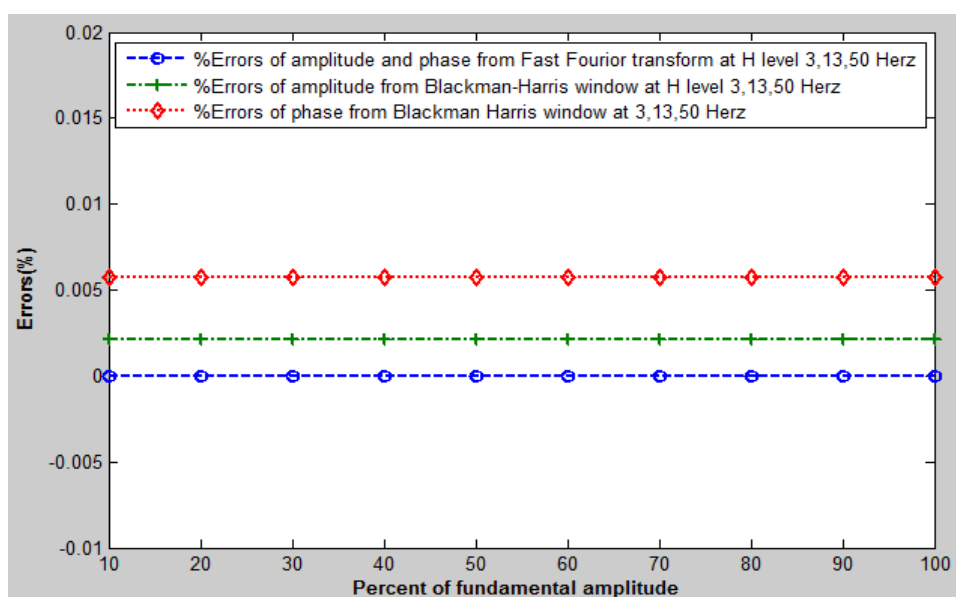
5.1.1.3 ผลการทดสอบ

5.1.1.3.1 ผลการทดสอบของข้อมูล “แบบที่ 1”

เมื่อลำดับฮาร์โมนิกเพิ่มขึ้น (150 เฮิรตซ์ 650 เฮิรตซ์ 2,500 เฮิรตซ์ ตามลำดับ) โดยมีขนาด และมุมเฟสฮาร์โมนิก “แบบที่ 1” พบว่าผลการทดสอบความแม่นยำของขั้นตอนวิธีการคำนวณทั้งสองวิธีมีดังนี้

1) วิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว มีความผิดพลาดของขนาดและมุมฮาร์มอนิกที่คำนวณได้เท่ากับ 0.00% ดังภาพที่ 5.1 รายละเอียดผลความผิดพลาดของขนาดและมุมฮาร์มอนิกแสดงในภาคผนวก จ. ตารางที่ จ. 1 – จ. 2

2) วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris มีความผิดพลาดของขนาดน้อยกว่า 0.01% (โดยเฉลี่ยมีความผิดพลาดของขนาดเท่ากับ $\pm 0.0021\%$) และมุมเฟสน้อยกว่า 0.01% (โดยเฉลี่ยมีความผิดพลาดของมุมเฟสเท่ากับ $\pm 0.0057\%$) ดังภาพที่ 5.1 รายละเอียดผลความผิดพลาดของขนาดและมุมฮาร์มอนิกแสดงในภาคผนวก จ. ตารางที่ จ. 1 – จ. 2



ภาพที่ 5.1 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดและมุมเฟสฮาร์มอนิก เมื่อลำดับฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้น โดยใช้ข้อมูลขนาดและมุมเฟสของฮาร์มอนิก “แบบที่ 1”

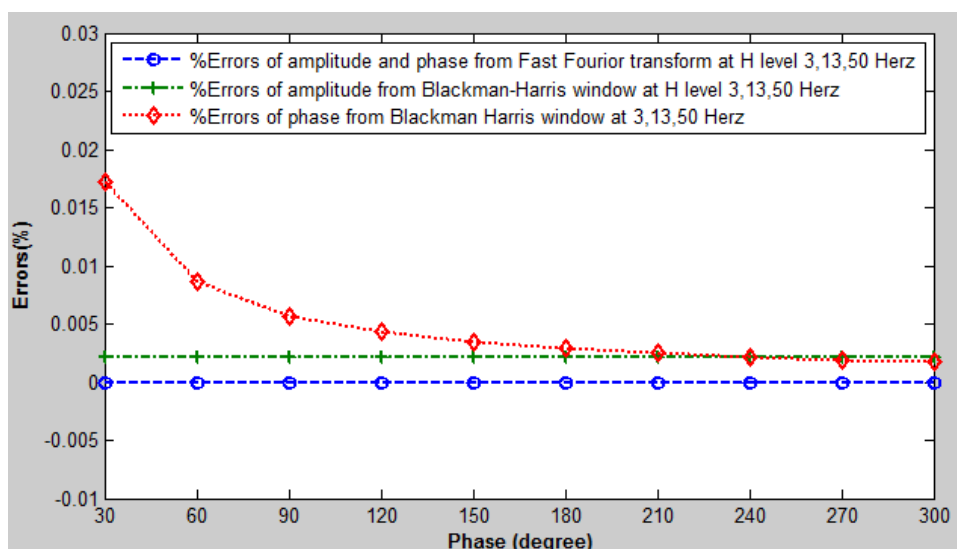
5.1.1.3.2 ผลการทดสอบของข้อมูล “แบบที่ 2”

เมื่อลำดับฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้น (150 เฮิร์ตซ์ 650 เฮิร์ตซ์ 2,500 เฮิร์ตซ์ ตามลำดับ) โดยมีขนาด และมุมเฟสฮาร์มอนิก “แบบที่ 2” พบว่าผลการทดสอบความแม่นยำของขั้นตอนวิธีการคำนวณทั้งสองวิธีมีดังนี้

1) วิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว มีความผิดพลาดของขนาดและมุมฮาร์มอนิกที่คำนวณได้เท่ากับ 0.00% ดังภาพที่ 5.1 (รายละเอียดผลความผิดพลาดของขนาดและมุมฮาร์มอนิกแสดงในภาคผนวก จ. ตารางที่ จ. 3 – จ. 4)

2) วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris มีความผิดพลาดของขนาดน้อยกว่า 0.01% (โดยเฉลี่ยมีความผิดพลาดของขนาดเท่ากับ $\pm 0.0021\%$) และมุมเฟสน้อยกว่า 0.01% (โดย

เฉลี่ยมีความผิดพลาดของมุมเฟสเท่ากับ $\pm 0.005\%$) ดังภาพที่ 5.1 (รายละเอียดผลความผิดพลาดของขนาดและมุมฮาร์มอนิกแสดงในภาคผนวก จ. ตารางที่ จ. 3 – จ. 4)



ภาพที่ 5.2 เปอร์เซนต์ความผิดพลาดของขนาดและมุมฮาร์มอนิกเมื่อลำดับฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้น โดยใช้ข้อมูลขนาดและมุมของฮาร์มอนิกแบบที่ 2

5.1.1.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

วิเคราะห์ผลการทดสอบความแม่นยำของขั้นตอนวิธีการคำนวณในหัวข้อที่ 5.1.1 พบว่าลำดับฮาร์มอนิกที่เพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลต่อการคำนวณทั้งวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris ไม่ว่าจะเงื่อนไขของขนาดฮาร์มอนิกที่เพิ่มขึ้น หรือมุมเฟสของฮาร์มอนิกจะเพิ่มขึ้นก็ตาม

ดังนั้นถ้าในระบบมีเฉพาะฮาร์มอนิกปะปนเพียงหนึ่งส่วนประกอบ สามารถคำนวณหาขนาดและมุมได้แม่นยำทั้งสองวิธี

5.1.2 ทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณเมื่อความถี่อินเตอร์ฮาร์มอนิกเปลี่ยน

5.1.2.1 จุดประสงค์ในการทดสอบ

เมื่อความถี่ของอินเตอร์ฮาร์มอนิกมากขึ้น จะส่งผลต่อความแม่นยำในการคำนวณหาขนาด และมุม ด้วยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris หรือไม่

5.1.2.2 วิธีการทดสอบ

ทดสอบความแม่นยำในการคำนวณหาขนาด และมุมเฟสของทั้งสองวิธี โดยจำลองให้สัญญาณแรงดันที่ความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 เฮิรตซ์ มีขนาดเท่ากับ 100 โวลต์ มุมเท่ากับ 90 องศา และลำดับของฮาร์โมนิกที่ปะปน มีดังนี้

การทดสอบชุดที่ 1 เมื่อสัญญาณมีความถี่ของอินเทอร์ฮาร์โมนิกใกล้เคียงกับความถี่มูลฐาน
(ความถี่ในการทดสอบคือ 47 เฮิรตซ์ 52 เฮิรตซ์ และ 57 เฮิรตซ์)

การทดสอบชุดที่ 2 เมื่อสัญญาณมีความถี่ของอินเทอร์ฮาร์โมนิกใกล้เคียงกับฮาร์โมนิก“เลขคู่”
(ความถี่ในการทดสอบคือ 98 เฮิรตซ์ 203 เฮิรตซ์ และ 305 เฮิรตซ์)

การทดสอบชุดที่ 3 เมื่อสัญญาณมีความถี่ของอินเทอร์ฮาร์โมนิกใกล้เคียงกับฮาร์โมนิก“เลขคี่”
(ความถี่ในการทดสอบคือ 147 เฮิรตซ์ 248 เฮิรตซ์ และ 349 เฮิรตซ์)

โดยในการทดสอบชุดที่ 1 – 3 ใช้ข้อมูลขนาด และมุมเฟสของอินเทอร์ฮาร์โมนิกดังนี้

แบบที่ 1 ขนาดของฮาร์โมนิกเพิ่มขึ้นขั้นละ 10 โวลต์ โดยมีมุมคงที่ (ภาคผนวก ง ตารางที่ ง. 1)

แบบที่ 2 ขนาดของฮาร์โมนิกคงที่ โดยมีมุมเฟสเพิ่มขึ้นขั้นละ 10 องศา (ภาคผนวก ง ตารางที่ ง. 2)

5.1.2.3 ผลการทดสอบ

5.1.2.3.1 ผลการทดสอบชุดที่ 1 - 3 ของข้อมูล “แบบที่ 1”

1) ผลการทดสอบชุดที่ 1

พบว่า การคำนวณด้วยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วได้รับผลกระทบจากการที่สัญญาณมีอินเทอร์ฮาร์โมนิกเข้ามาปะปน โดยเฉพาะมุมเฟสจะมีความผิดพลาดอย่างมาก (มากกว่า 20%) ดังภาพที่ 5.3 และการคำนวณด้วยวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris พบว่ามีความผิดพลาดของขนาดน้อยกว่า 0.001% และความผิดพลาดของมุมเฟสน้อยกว่า 0.01% โดยที่ขนาดของอินเทอร์ฮาร์โมนิกที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อการคำนวณ โดยมีรายละเอียด แสดงในภาคผนวก จ. ตารางที่ จ. 5 – จ. 6

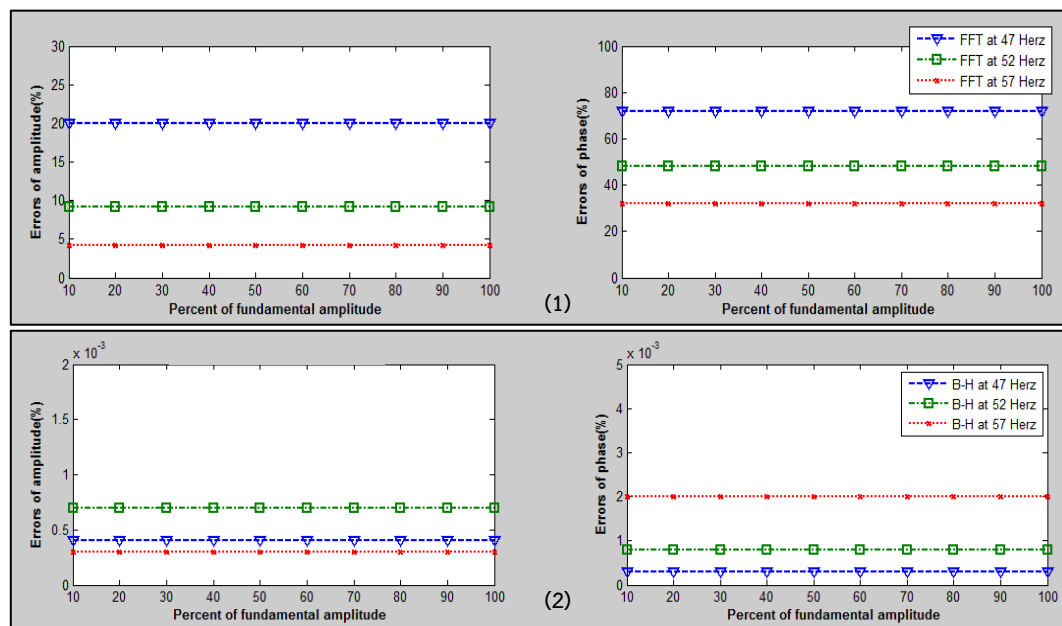
2) ผลการทดสอบชุดที่ 2

พบว่า การคำนวณด้วยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว ได้รับผลกระทบจากการที่สัญญาณมีอินเทอร์ฮาร์โมนิกเข้ามาปะปน โดยเฉพาะมุมเฟสจะมีความผิดพลาดอย่างมาก (มากกว่า 20%) ภาพที่ 5.4 และการคำนวณด้วยวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris พบว่ามีความผิดพลาดของขนาดน้อยกว่า 0.001% และความผิดพลาดของมุมเฟสน้อยกว่า 0.02% ดังภาพที่

5.4 โดยที่ขนาดของอินเทอร์ฮาร์โมนิกที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อการคำนวณ โดยมีรายละเอียดแสดงในภาคผนวก จ. ตารางที่ จ. 9 – จ. 10

3) ผลการทดสอบชุดที่ 3

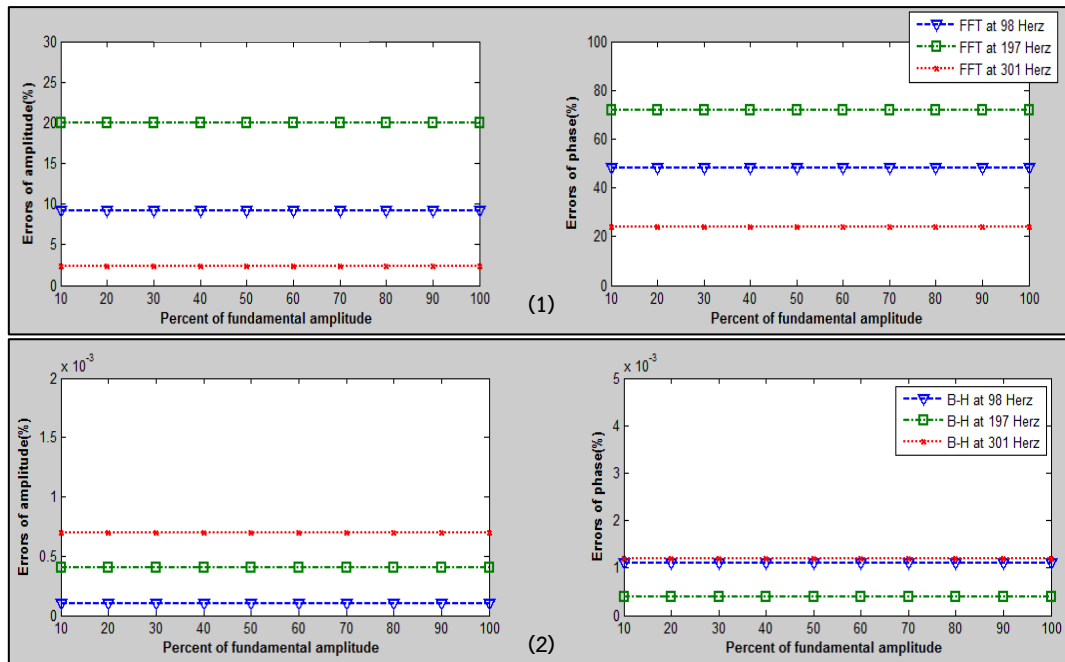
พบว่า การคำนวณด้วยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris ให้ผลการทดสอบที่มีแนวโน้มเดียวกับผลการทดสอบชุดที่ 2 ดังภาพที่ 5.5 โดยมีรายละเอียดแสดงในภาคผนวก จ. ตารางที่ จ. 13 – จ. 14



ภาพที่ 5.3 เปรูเซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดและมุมเฟสอินเทอร์ฮาร์โมนิกจากการทดสอบ

“ชุดที่ 1” ด้วยข้อมูลขนาดและมุมเฟสของอินเทอร์ฮาร์โมนิก “แบบที่ 1”

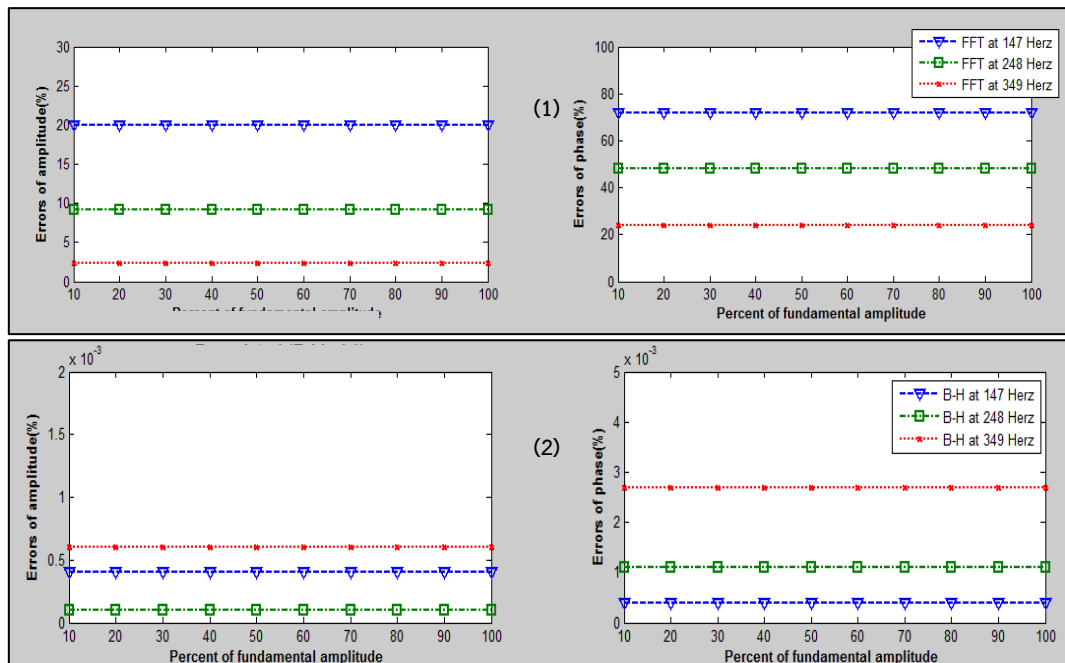
(1) ในวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (2) ในวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris



ภาพที่ 5.4 เปรียบเทียบความผิดพลาดของขนาดและมุมเฟสอินเทอร์ฮาร์โมนิกจากการทดสอบ

“ชุดที่ 2” ด้วยข้อมูลขนาดและมุมเฟสของอินเทอร์ฮาร์โมนิก “แบบที่ 1”

(1) ในวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (2) ในวิธีฟังก์ชันหน้าต่าง Blackman-Harris



ภาพที่ 5.5 เปรียบเทียบความผิดพลาดของขนาดและมุมเฟสอินเทอร์ฮาร์โมนิกจากการทดสอบ

“ชุดที่ 3” ด้วยข้อมูลขนาดและมุมเฟสของอินเทอร์ฮาร์โมนิก “แบบที่ 1”

(1) ในวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (2) ในวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris

5.1.2.3.2 ผลการทดสอบชุดที่ 1 - 3 ของข้อมูล “แบบที่ 2”

1) ผลการทดสอบชุดที่ 1

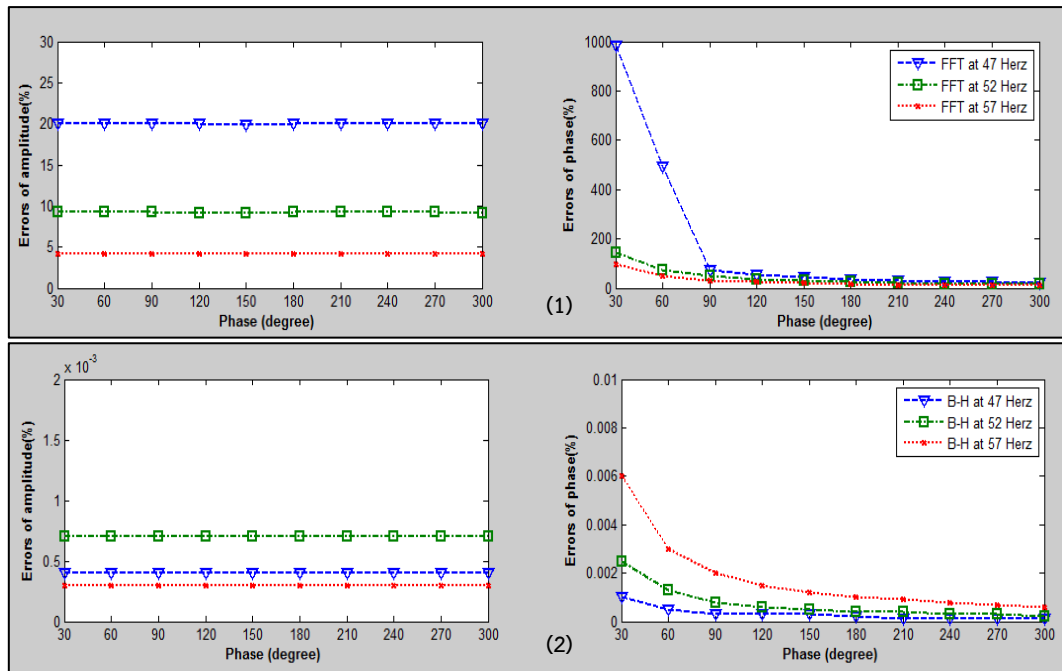
พบว่า การคำนวณด้วยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว ได้รับผลกระทบจากการที่สัญญาณมีอินเทอร์ฮาร์โมนิกเข้ามาปะปน โดยเฉพาะมุมของอินเทอร์ฮาร์โมนิกที่มีขนาดเล็กจะมีโอกาสผิดเพี้ยนอย่างมากดังภาพที่ 5.6 และการคำนวณด้วยวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris พบว่ามีความผิดเพี้ยนของขนาดไม่เกิน 0.001% และความผิดเพี้ยนของมุมไม่เกิน 0.01% โดยที่มุมของอินเทอร์ฮาร์โมนิกที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการคำนวณด้วยวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris เพียงเล็กน้อย โดยมีรายละเอียดแสดงในภาคผนวก จ. ตารางที่ จ. 7 – จ. 8

2) ผลการทดสอบชุดที่ 2

พบว่า การคำนวณด้วยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว ได้รับผลกระทบจากการที่สัญญาณมีอินเทอร์ฮาร์โมนิกเข้ามาปะปน โดยเฉพาะมุมของอินเทอร์ฮาร์โมนิกที่มีขนาดเล็กจะมีโอกาสผิดเพี้ยนอย่างมากดังภาพที่ 5.7 และการคำนวณด้วยวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris พบว่ามีความผิดเพี้ยนของขนาดไม่เกิน 0.001% และความผิดเพี้ยนของมุมไม่เกิน 0.02% โดยที่มุมของอินเทอร์ฮาร์โมนิกที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการคำนวณด้วยวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris เพียงเล็กน้อย โดยมีรายละเอียดแสดงในภาคผนวก จ. ตารางที่ จ. 11 – จ. 12

3) ผลการทดสอบชุดที่ 3

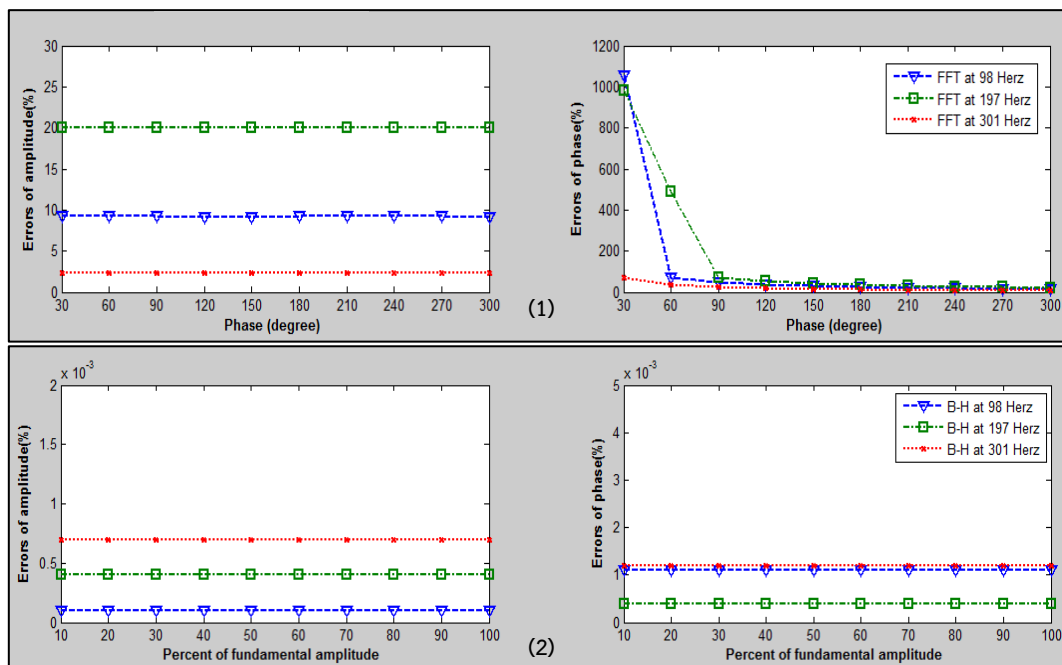
พบว่า การคำนวณด้วยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris ให้ผลการทดสอบที่มีแนวโน้มเดียวกับผลการทดสอบชุดที่ 2 ดังภาพที่ 5.8 โดยมีรายละเอียดแสดงในภาคผนวก จ. ตารางที่ จ. 15 – จ. 16



ภาพที่ 5.6 เปรี่เซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดและมุมเฟสอินเตอร์ฮาร์โมนิกจากการทดสอบ

“ชุดที่ 1” ด้วยข้อมูลขนาดและมุมเฟสของอินเตอร์ฮาร์โมนิก “แบบที่ 2”

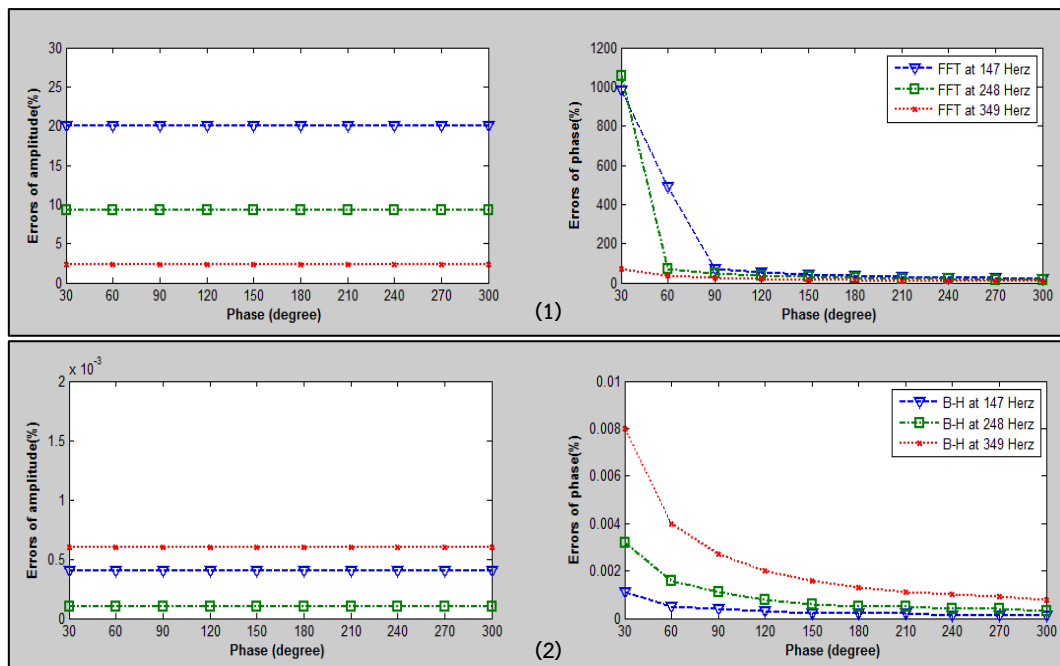
(1) ในวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (2) ในวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris



ภาพที่ 5.7 เปรี่เซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดและมุมเฟสอินเตอร์ฮาร์โมนิกจากการทดสอบ

“ชุดที่ 2” ด้วยข้อมูลขนาดและมุมเฟสของอินเตอร์ฮาร์โมนิก “แบบที่ 2”

(1) ในวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (2) ในวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris



ภาพที่ 5.8 เปรูเซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดและมุมเฟสอินเทอร์ฮาร์โมนิกจากการทดสอบ

“ชุดที่ 3” ด้วยข้อมูลขนาดและมุมเฟสของอินเทอร์ฮาร์โมนิก “แบบที่ 2”

(1) ในวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (2) ในวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris

5.1.2.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

วิเคราะห์ผลการทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณเมื่อความถี่ของอินเทอร์ฮาร์โมนิกเปลี่ยนไปพบว่า สัญญาณที่มีอินเทอร์ฮาร์โมนิกปะปนที่ความถี่ใดๆ ส่งผลต่อการคำนวณด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว ทั้งขนาดและมุมเฟส โดยเฉพาะมุมเฟสที่มีความผิดพลาดมาก และจากการเปลี่ยนข้อมูลเป็นชุดที่สองพบว่าความผิดพลาดของมุมที่เกิดขึ้นจากวิธีการคำนวณทั้งสองวิธีนั้นจะแปรผกผันกับขนาดของมุม ถ้ามุมมีขนาดเล็กจะมีความผิดพลาดมากกว่ามุมที่มีขนาดใหญ่แต่ไม่ส่งผลให้การคำนวณโดยรวมของวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris เกิดความผิดพลาดมาก (เฉลี่ยความผิดพลาดของมุมอยู่ที่ 0.01% ดังนั้นถ้าในระบบมีเฉพาะอินเทอร์ฮาร์โมนิกปะปนหนึ่งส่วนประกอบควรคำนวณหาขนาดและมุมด้วยวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris

5.1.3 ทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณเมื่อจำนวนฮาร์มอนิกในระบบมีมากขึ้น

5.1.3.1 จุดประสงค์ในการทดสอบ

จำนวนของฮาร์มอนิกที่ปะปนเมื่อเพิ่มจำนวนมากขึ้นชั้นละหนึ่งส่วนประกอบ จะส่งผลต่อความแม่นยำในการคำนวณหาขนาดและมุมเฟสของการคำนวณด้วยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris หรือไม่

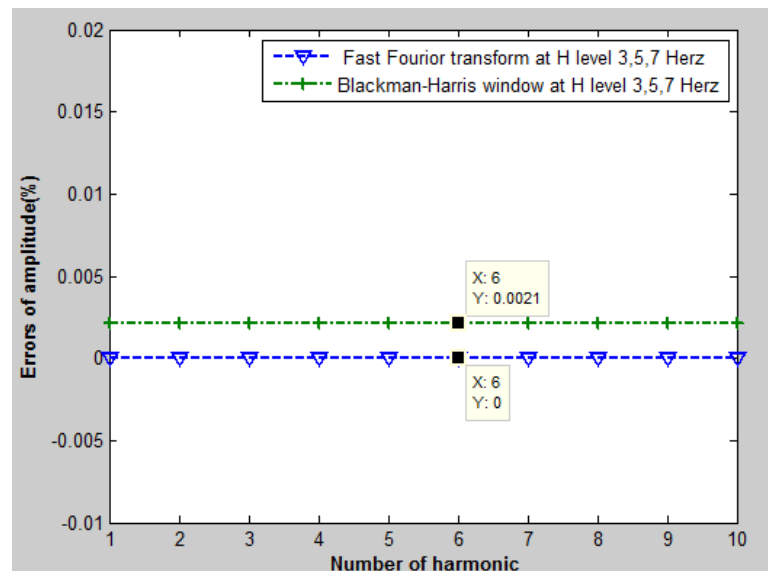
5.1.3.2 วิธีการทดสอบ

ทดสอบความแม่นยำในการคำนวณหาขนาด และมุมเฟสของทั้งสองวิธี โดยจำลองให้สัญญาณแรงดันที่มีความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์ มีขนาดเท่ากับ 100 โวลต์ มุมเท่ากับ 90 องศา และเพิ่มลำดับฮาร์มอนิกลำดับอื่นชั้นละหนึ่งลำดับ โดยลำดับฮาร์มอนิกที่เพิ่มขึ้นทีละชั้นมีขนาดเท่ากับ 5 โวลต์ มุมเท่ากับ 60 องศา จากนั้นเลือกพิจารณา ดังนี้

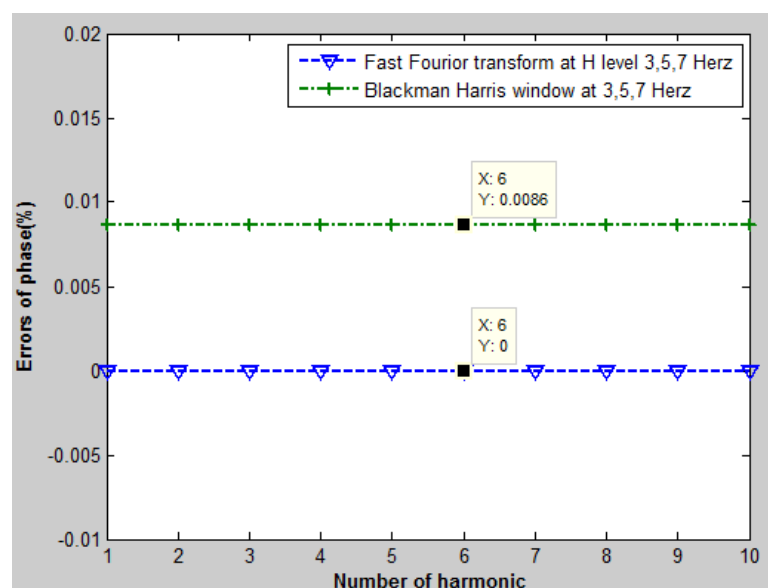
- การทดสอบครั้งที่ 1 พิจารณาฮาร์มอนิกลำดับ 3 (150 เฮิร์ตซ์) ด้วยข้อมูลจากภาคผนวก ง
- การทดสอบครั้งที่ 2 พิจารณาฮาร์มอนิกลำดับ 5 (250 เฮิร์ตซ์) ด้วยข้อมูลจากภาคผนวก ง
- การทดสอบครั้งที่ 3 พิจารณาฮาร์มอนิกลำดับ 7 (350 เฮิร์ตซ์) ด้วยข้อมูลจากภาคผนวก ง

5.1.3.3 ผลการทดสอบ

ผลจากการทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณเมื่อจำนวนส่วนประกอบฮาร์มอนิกที่ปะปนมีจำนวนมากขึ้นพบว่า การคำนวณด้วยวิธีฟูเรียร์แบบเร็วมีความผิดพลาดของขนาดและมุมเฟสเท่ากับ 0.00% ทั้ง 3 ลำดับ และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris มีความผิดพลาดของขนาดน้อยกว่า 0.01% และมุมเฟสน้อยกว่า 0.01% ทั้ง 3 ลำดับ ดังภาพที่ 5.9 และภาพที่ 5.10 โดยมีรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ง. ตารางที่ จ. 17 – จ. 18)



ภาพที่ 5.9 เปรอ์เซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดโดยวิธีผลทางแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris เมื่อจำนวนฮาร์โมนิกเพิ่มขึ้นชั้นละหนึ่งส่วนประกอบ



ภาพที่ 5.10 เปรอ์เซ็นต์ความผิดพลาดของมุมเฟสโดยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris เมื่อจำนวนฮาร์โมนิกเพิ่มขึ้นชั้นละหนึ่งส่วนประกอบ

5.1.3.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

วิเคราะห์ผลการทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณเมื่อจำนวนฮาร์โมนิกที่ปะปนมีจำนวนมากขึ้นพบว่า จำนวนที่เพิ่มขึ้นของฮาร์โมนิกไม่มีผลต่อการคำนวณทั้งวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris ดังนั้นถ้าในระบบมีเฉพาะฮาร์โมนิกปะปนไม่ว่าจะมีจำนวนส่วนประกอบมากเท่าใด สามารถคำนวณหาขนาดและมุมได้แม่นยำทั้งสองวิธี

5.1.4 ทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณเมื่อจำนวนอินเตอร์ฮาร์โมนิกในระบบมีมากขึ้น

5.1.4.1 จุดประสงค์ในการทดสอบ

จำนวนของอินเตอร์ฮาร์โมนิกที่ปะปนเมื่อเพิ่มจำนวนให้มากขึ้น ชั้นละหนึ่ง ส่วนประกอบจะส่งผลต่อความแม่นยำในการคำนวณหาขนาดและมุมเฟสของการคำนวณด้วยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris window หรือไม่

5.1.4.2 วิธีการทดสอบ

ทดสอบความแม่นยำในการคำนวณหาขนาด และมุมเฟสของทั้งสองวิธี โดยจำลองให้สัญญาณแรงดันที่ความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์ มีขนาดเท่ากับ 100 โวลต์ มุมเท่ากับ 90 องศา และเพิ่มลำดับฮาร์โมนิกลำดับอื่นชั้นละหนึ่งลำดับ โดยลำดับฮาร์โมนิกที่เพิ่มขึ้นทีละชั้นมีขนาดเท่ากับ 5 โวลต์ มุมเท่ากับ 60 องศา จากนั้นเลือกพิจารณา ดังนี้

การทดสอบครั้งที่ 1 พิจารณาอินเตอร์ฮาร์โมนิกที่ความถี่ 57 เฮิร์ตซ์ ด้วยข้อมูลจากภาคผนวก ง ตารางที่ ง. 6

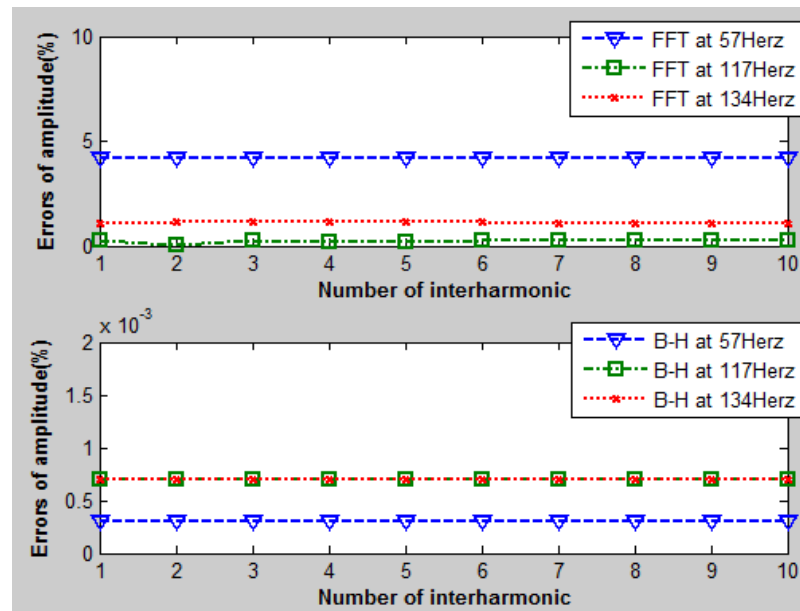
การทดสอบครั้งที่ 2 พิจารณาอินเตอร์ฮาร์โมนิกที่ความถี่ 117 เฮิร์ตซ์ ด้วยข้อมูลจากภาคผนวก ง ตารางที่ ง. 7

การทดสอบครั้งที่ 3 พิจารณาอินเตอร์ฮาร์โมนิกที่ความถี่ 134 เฮิร์ตซ์ ด้วยข้อมูลจากภาคผนวก ง ตารางที่ ง. 8

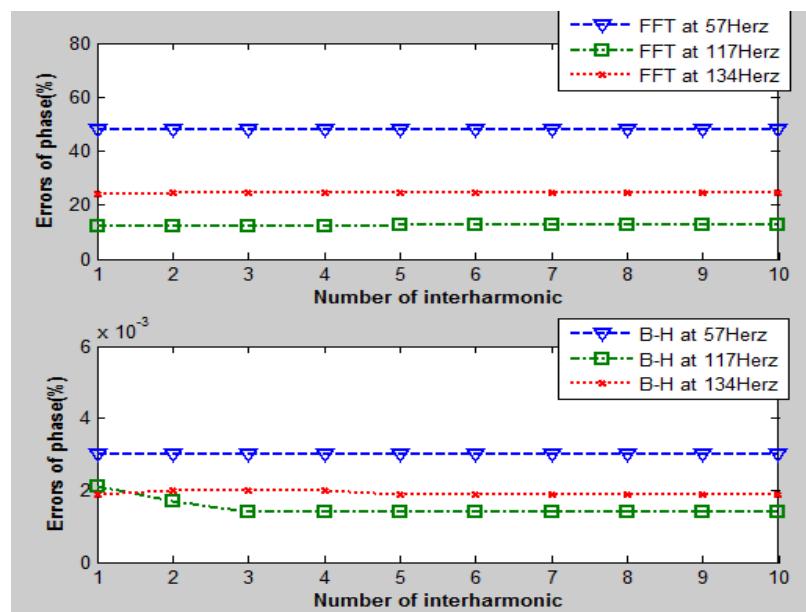
5.1.4.3 ผลการทดสอบ

ผลจากการทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณเมื่อจำนวนของอินเตอร์ฮาร์โมนิกที่ปะปนมีจำนวนเพิ่มขึ้นชั้นละหนึ่งความถี่ พบว่าการคำนวณด้วยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วมีมากกว่า 1% และเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของมุมเฟสมีมากกว่า 20% และส่วนวิธีการคำนวณของวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris มีความผิดพลาดของขนาดน้อยกว่า 0.01% และมุมเฟสน้อยกว่า 0.01% มีรายละเอียดดังภาพที่ 5.11 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดโดยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris เมื่อจำนวนอินเตอร์

ฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้นชั้นละหนึ่งส่วนประกอบภาพที่ 5.11 - ภาพที่ 5.12 โดยมีรายละเอียดแสดงใน
ภาคผนวก จ ตารางที่ จ. 19 - จ. 20



ภาพที่ 5.11 เปรอ์เซ็นต์ความผิดพลาดของขนาดโดยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชัน
หน้าต่างแบบ Blackman-Harris เมื่อจำนวนอินเตอร์ฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้นชั้นละหนึ่งส่วนประกอบ



ภาพที่ 5.12 เปรอ์เซ็นต์ความผิดพลาดของมุมเฟสโดยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชัน
หน้าต่างแบบ Blackman-Harris เมื่อจำนวนอินเตอร์ฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้นชั้นละหนึ่งส่วนประกอบ

5.1.4.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

วิเคราะห์ผลการทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณเมื่อจำนวนของอินเตอร์ฮาร์โมนิกที่ปะปนมีจำนวนมากขึ้นพบว่า สัญญาณที่มีอินเตอร์ฮาร์โมนิกปะปนที่ความถี่ใดๆ ส่งผลต่อการคำนวณด้วยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว ทั้งขนาดและมุมเฟส โดยเฉพาะมุมเฟสที่มีความผิดพลาดมาก ตรงข้ามกับวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris ที่มีความผิดพลาดของขนาดและมุมเฟสเพียงเล็กน้อย ดังนั้นถ้าในระบบมีเฉพาะอินเตอร์ฮาร์โมนิกปะปนควรคำนวณหาขนาดและมุมด้วยวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris

5.1.5 ทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณเมื่อสัญญาณมีฮาร์โมนิกและอินเตอร์ฮาร์โมนิกปะปน

5.1.5.1 จุดประสงค์ในการทดสอบ

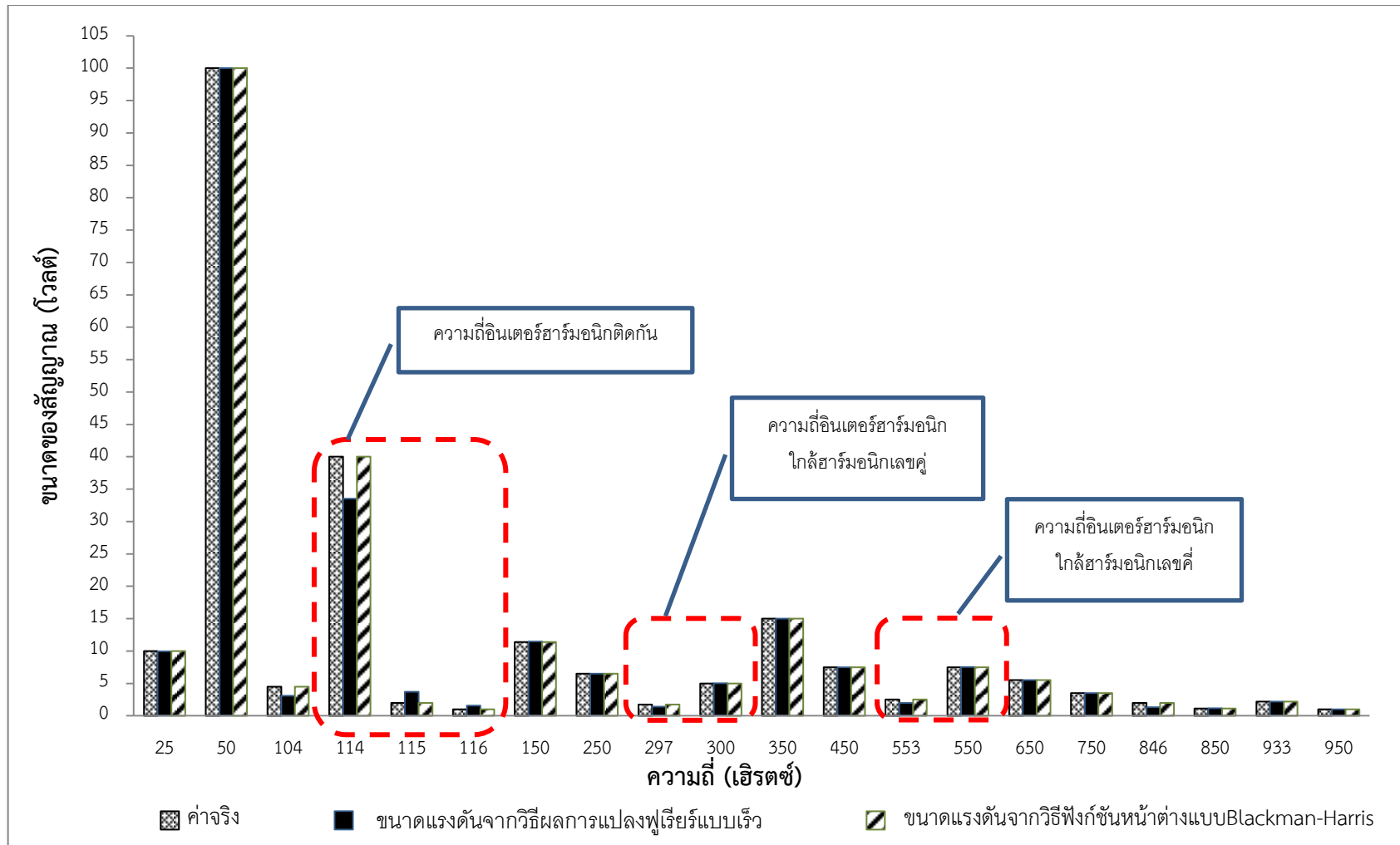
เมื่อสัญญาณมีฮาร์โมนิกและอินเตอร์ฮาร์โมนิกปะปนส่งผลต่อความแม่นยำในการคำนวณหาขนาดและมุมเฟสของการคำนวณด้วยวิธีแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris หรือไม่

5.1.5.2 วิธีการทดสอบ

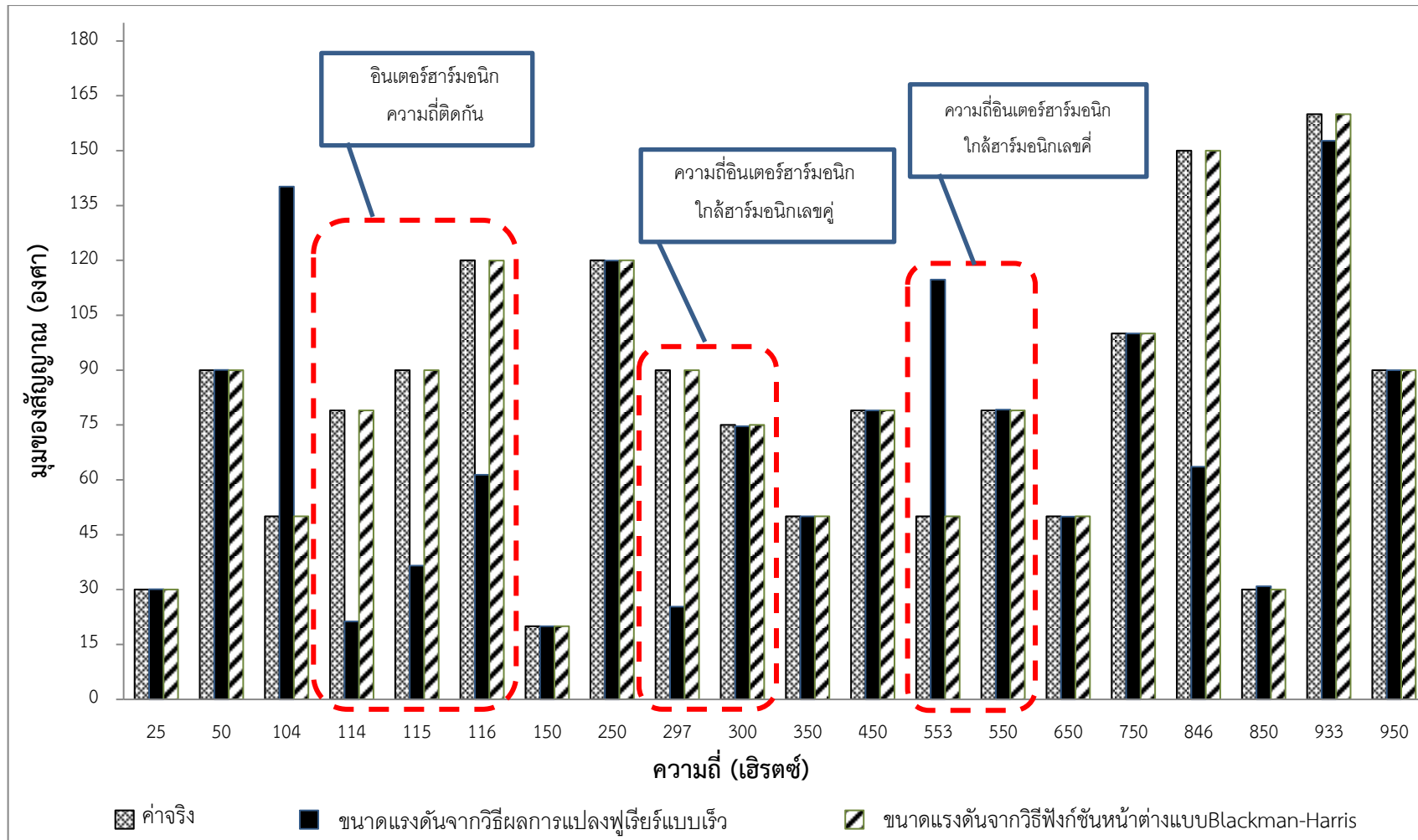
วิธีการทดสอบความแม่นยำในการคำนวณหาขนาดและมุมเฟสของการคำนวณด้วยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris จะกำหนดให้มีสัญญาณปกติที่มีความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์มีขนาดเท่ากับ 100 และมุมเฟสเท่ากับ 90 องศา และใช้ข้อมูลฮาร์โมนิกและอินเตอร์ฮาร์โมนิกจากภาคผนวก ง ตารางที่ ง. 9 จากนั้นจะพิจารณาขนาดและมุมที่คำนวณได้ของข้อมูลทั้งหมด

5.1.5.3 ผลการทดสอบ

ผลจากการทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณเมื่อสัญญาณมีฮาร์โมนิกและอินเตอร์ฮาร์โมนิกปะปน พบว่าการคำนวณด้วยวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris จะให้ความแม่นยำมากกว่า เนื่องจากมีความผิดพลาดในการคำนวณน้อยกว่าวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว มาก โดยมีรายละเอียดแสดงในภาคผนวก จ. ตารางที่ จ. 21 – จ. 22) และภาพที่ 5.13 - ภาพที่ 5.4



ภาพที่ 5.13 เปรียบเทียบขนาดของสัญญาณที่คำนวณได้จากวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบBlackman-Harris กับค่าจริง



ภาพที่ 5.14 เปรียบเทียบมมของสัญญาณที่คำนวณได้จากวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วและขนาดแรงดันจากวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบBlackman-Harrisกับค่าจริง

5.1.5.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

วิเคราะห์ผลการทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณเมื่อสัญญาณมีฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกปะปนในระบบพบว่า ความถี่อินเตอร์ฮาร์มอนิกที่ปนในระบบส่งผลกระทบต่อวิธีการคำนวณด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วทั้งขนาด และมุมเฟส โดยเฉพาะมุมเฟสจะเกิดความผิดพลาดเห็นได้ชัดเจน ดังภาพที่ 5.14 ตรงข้ามกับขั้นตอนวิธีการคำนวณด้วยวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris ที่สามารถคำนวณคุณลักษณะของฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกได้ใกล้เคียงกับค่าจริงของสัญญาณที่จำลองขึ้น

ดังนั้นหากในระบบไฟฟ้า มีฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกปะปนควรคำนวณหาขนาด และมุมเฟสด้วยวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris จะช่วยให้การคำนวณค่าคุณลักษณะของฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกได้ใกล้เคียงกับค่าจริง

จากการทดสอบในหัวข้อที่ 5.1 – 5.5 สามารถสรุปผลการคำนวณค่าคุณลักษณะฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เปรอ์เซ็นต์ความผิดพลาดของวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วและวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris

เงื่อนไข		วิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว		วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris	
		ขนาด	มุมเฟส	ขนาด	มุมเฟส
1	เมื่อลำดับฮาร์มอนิกเปลี่ยนไป	-	-	<0.01%	<0.02%
2	เมื่อลำดับอินเตอร์ฮาร์มอนิกเปลี่ยนไป				
	- ความถี่อินเตอร์ฮาร์มอนิกใกล้ความถี่มูลฐาน	>4%	>30 %	<0.001%	<0.01%
	- ความถี่อินเตอร์ฮาร์มอนิกใกล้ฮาร์มอนิกเลขคู่	>2%	>20 %	<0.001%	<0.01%
	- ความถี่อินเตอร์ฮาร์มอนิกใกล้ฮาร์มอนิกเลขคี่	>2%	>20 %	<0.001%	<0.01%
3	เมื่อจำนวนฮาร์มอนิกในระบบมีมากขึ้น	-	-	<0.05%	<0.02%
4	เมื่อจำนวนอินเตอร์ฮาร์มอนิกในระบบมีมากขึ้น	>1%	>10%	<0.001%	<0.01%
5	เมื่อมีฮาร์มอนิก และอินเตอร์ฮาร์มอนิกปะปน (รวมเงื่อนไขข้อ 1-4)	>80%	100%	0.001%	0.01%

จากตารางที่ 5.1 พบว่าการคำนวณด้วยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นมากเมื่อมีอินเตอร์ฮาร์โมนิกปะปนในระบบ โดยเฉพาะความผิดพลาดของมูมเฟส แต่วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris สามารถคำนวณขนาดและมูมได้แม่นยำทุกเงื่อนไขโดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเฉลี่ยทุกเงื่อนไขของขนาดไม่เกิน 0.05% และมูมไม่เกิน 0.02% ดังนั้นเมื่อสัญญาณมีอินเตอร์ฮาร์โมนิกปน วิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris จะสามารถคำนวณได้แม่นยำกว่าวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว

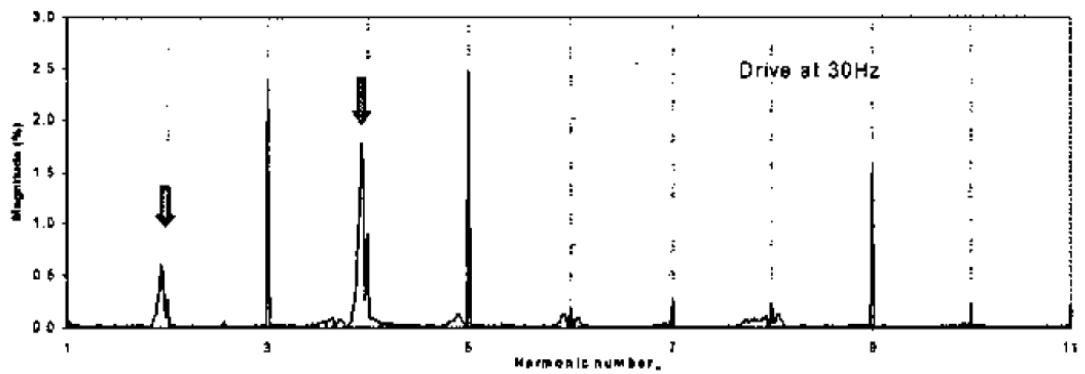
5.2 การทดสอบซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์โมนิกและอินเตอร์ฮาร์โมนิก

การทดสอบซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์โมนิก และอินเตอร์ฮาร์โมนิกที่พัฒนาขึ้น จะทำการทดสอบความสามารถของซอฟต์แวร์ในการตรวจวัดฮาร์โมนิก และอินเตอร์ฮาร์โมนิกด้วยข้อมูลการวัดจากบทความ [13] โดยบทความนี้ได้ทำการวัดข้อมูลดิบจากระบบไฟฟ้า 60 เฮิร์ตซ์ และมีชุดขับเคลื่อนปรับความถี่ได้ (Variable frequency drives) ต่อในระบบ ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของอินเตอร์ฮาร์โมนิก และสร้างปัญหาไฟกระพริบ (Flicker) ในระบบไฟฟ้า

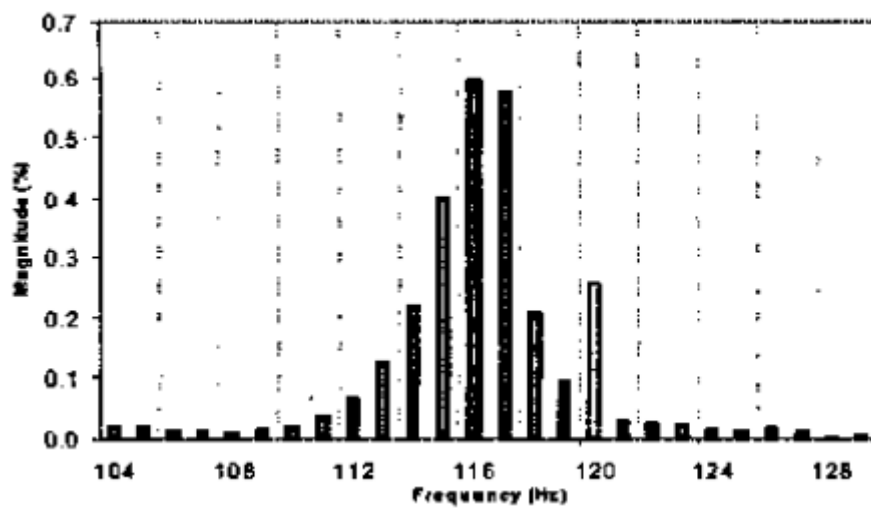
ขั้นตอนการทดสอบซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์โมนิกและอินเตอร์ฮาร์โมนิกที่พัฒนาขึ้นมีดังนี้

1. กำหนดความถี่มูลฐานของระบบไฟฟ้าที่จะทำการวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ที่มีความยืดหยุ่นเท่ากับ 60 เฮิร์ตซ์
2. เลือกข้อมูลที่จะทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของอินเตอร์ฮาร์โมนิกที่ถูกสร้างจากชุดขับเคลื่อนปรับความถี่ได้
3. กำหนดจำนวนจุดที่ใช้ในการสุ่มข้อมูลตัวอย่างเท่ากับ 192 จุดต่อ 1 รูปคลื่นตามบทความ
4. กำหนดขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์เป็นแบบฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris
5. กดปุ่มเริ่มต้นการทำงาน

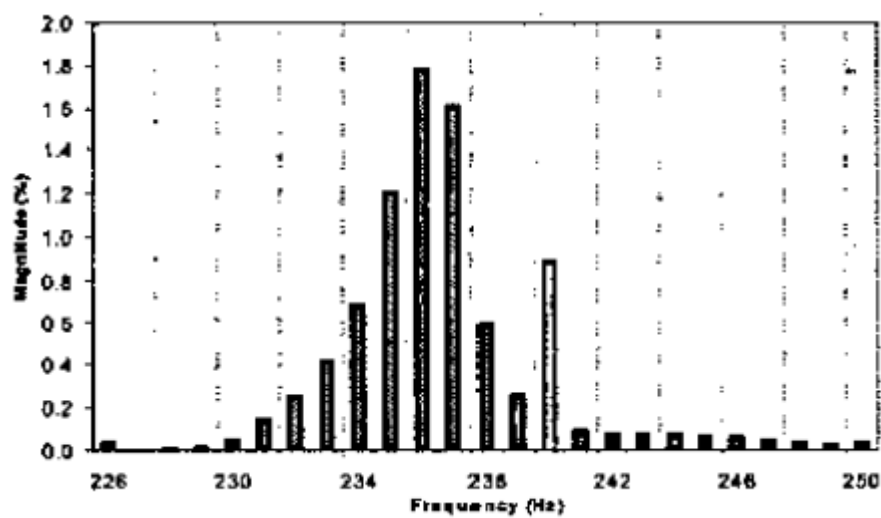
ผลลัพธ์ในการวิเคราะห์ฮาร์โมนิก และอินเตอร์ฮาร์โมนิกโดยรวมในระบบจากบทความที่ใช้ในการอ้างอิง และเปรียบเทียบเป็นไปดังภาพที่ 5.15 จากภาพพบว่าชุดขับเคลื่อนปรับความถี่ได้สร้างอินเตอร์ฮาร์โมนิก ซึ่งข้อมูลจากการวัดของบทความอธิบายว่าจะพบอินเตอร์ฮาร์โมนิกที่ความถี่ 117 เฮิร์ตซ์ และ 237 เฮิร์ตซ์ แสดงดังภาพที่ 5.16 และภาพที่ 5.17 โดยความถี่อินเตอร์ฮาร์โมนิกดังกล่าวส่งผลให้เกิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้านั้นคือ เกิดปัญหาไฟกระพริบในระบบไฟฟ้า



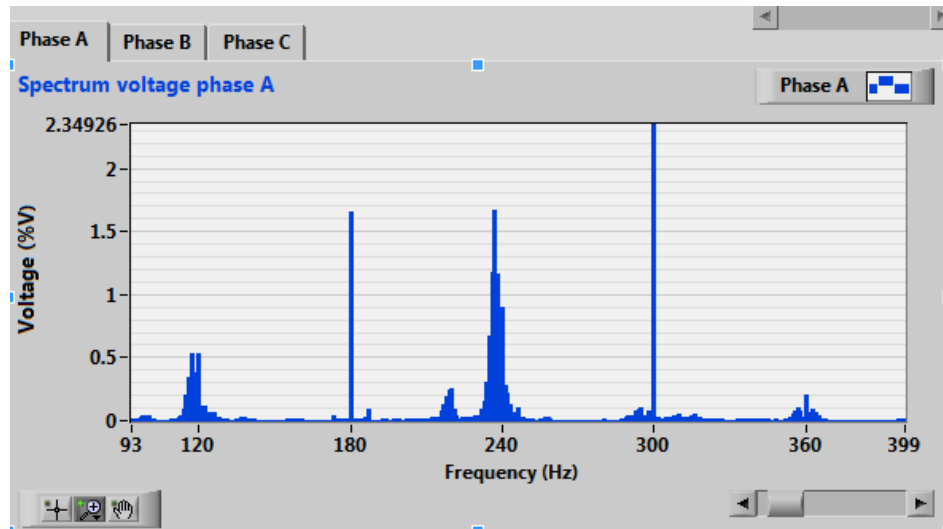
ภาพที่ 5.15 ภาพรวมผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า [13]



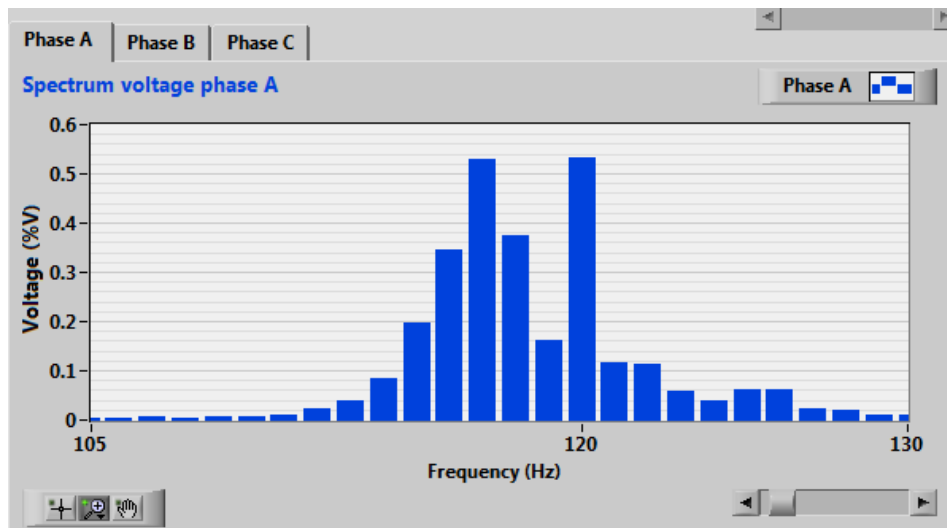
ภาพที่ 5.16 ผลการวิเคราะห์พบความถี่อินเทอร์ฮาร์มอนิกที่ 117 เฮิร์ตซ์ จากบทความ [13]



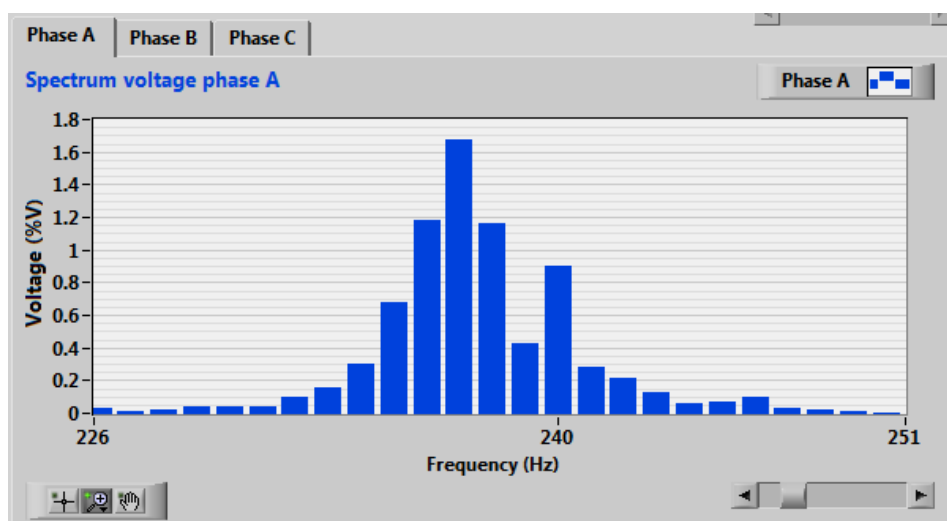
ภาพที่ 5.17 ผลการวิเคราะห์พบความถี่อินเทอร์ฮาร์มอนิกที่ 237 เฮิร์ตซ์ จากบทความ [13]



ภาพที่ 5.18 ภาพรวมผลการตรวจพบความถี่ฮาร์โมนิกจากซอฟต์แวร์วิเคราะห์



ภาพที่ 5.19 ผลการตรวจพบความถี่ฮาร์โมนิกที่ 117 เฮิรตซ์ จากซอฟต์แวร์วิเคราะห์



ภาพที่ 5.20 ผลการตรวจพบความถี่ฮาร์โมนิกที่ 237 เฮิรตซ์ จากซอฟต์แวร์วิเคราะห์

จากการทดสอบซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก ผลลัพธ์แสดงดังภาพที่ 5.18 – ภาพที่ 5.20 จะเห็นว่าซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดอินเทอร์ฮาร์มอนิกที่ความถี่ 117 เฮิร์ตซ์ และ 237 เฮิร์ตซ์ ได้อย่างชัดเจนตามที่บทความได้อธิบายไว้ โดยผลลัพธ์ที่ได้จากบทความและซอฟต์แวร์วิเคราะห์นี้มีผลลัพธ์ที่มีแนวโน้มและปริมาณที่วัดได้ใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการทดสอบในขั้นต่อไปกับสัญญาณจริงสามารถนำซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกไปประยุกต์ใช้ในการทดสอบเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์กับสัญญาณจริงได้

5.3 การทดสอบเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกกับสัญญาณจริง

ในการทดสอบเครื่องมือวัดกับสัญญาณจริงในงานวิจัยนี้ ทำการทดสอบโดยการสร้างฮาร์มอนิก ด้วยแหล่งกำเนิดจากขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ แสดงดังภาพที่ 5.21 โดยจะทำการเปรียบเทียบค่าของข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้า Power Visa รุ่น 440 (รายละเอียดเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้าแสดงในภาคผนวก ฉ)

โดยในการทดสอบมีรายละเอียดขั้นตอนดังนี้

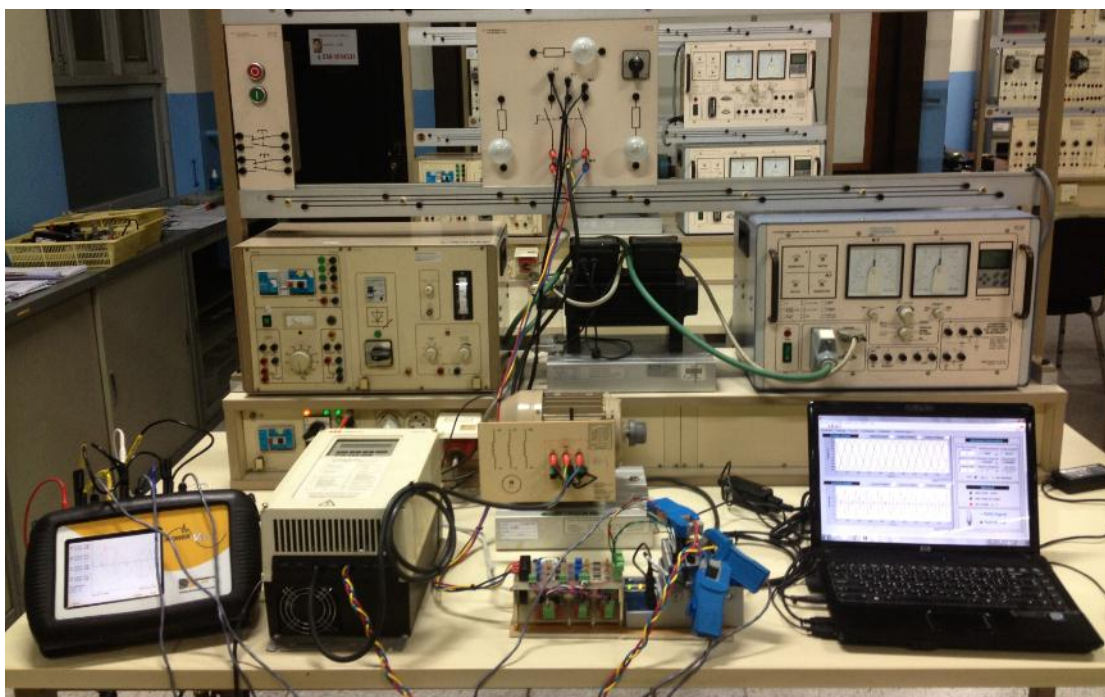
- ขั้นตอนที่ 1 ตรวจวัดสัญญาณแรงดันจากแรงดันด้านเข้าของชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ (Adjustable speed drive, ASD) ขนาด 220 - 240 โวลต์ ส่งต่อไปยังวงจรลดทอนระดับแรงดันและป้องกันแรงดันเกิน เพื่อลดระดับแรงดัน และป้องกันแรงดันเกินสำหรับการ์ด Data acquisition สำหรับวัดแรงดัน ซึ่งจะได้แรงดันขาออกจากวงจรดังกล่าวไม่เกิน 10 โวลต์
- ขั้นตอนที่ 2 ตรวจวัดสัญญาณกระแสจากกระแสด้านเข้าของชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ (Adjustable speed drive, ASD) ขนาดไม่เกิน 8 แอมแปร์ ส่งต่อไปยังการ์ด Data acquisition สำหรับวัดกระแส
- ขั้นตอนที่ 3 สัญญาณแรงดันขาออกจากขั้นตอนที่ 1 จะถูกส่งไปยังการ์ด Data acquisition รุ่น NI USB 9215 สำหรับแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล
- ขั้นตอนที่ 4 สัญญาณกระแสขาออกจากขั้นตอนที่ 2 จะถูกส่งไปยังการ์ด Data acquisition รุ่น NI USB 9227 สำหรับแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล
- ขั้นตอนที่ 5 สัญญาณแรงดันและกระแสจากขั้นตอนที่ 3 และ 4 จะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์ โดยผ่าน CompaqDAQ รุ่น NI cDAQ – 9174 เพื่อให้การวัดแรงดัน และกระแส เริ่มต้นการวัดที่เวลาเดียวกัน และถูกส่งไปยัง

คอมพิวเตอร์พร้อมกัน ด้วยพอร์ต USB และสื่อสารกับคอมพิวเตอร์โดยซอฟต์แวร์ LabVIEW ที่สร้างขึ้น

ขั้นตอนที่ 6 ในส่วนของซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกกำหนดข้อมูลที่จำเป็นในการวิเคราะห์ดังนี้

1. กำหนดอัตราการสุ่ม (Sampling rate) ของการ์ด Data acquisition ดังกล่าวเท่ากับ 50 kHz กำหนดจำนวนการสุ่มข้อมูลตัวอย่างเท่ากับ 1000 จุดต่อ 1 รูปคลื่น และจำนวนคาบในการสุ่มข้อมูลเท่ากับ 450 คาบ
2. กำหนดการนับเฟสเริ่มต้น (Trigger) ของเครื่องมือวัดสัญญาณแรงดันตามเฟส A
3. ใช้ขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีฟังก์ชันหน้าต่าง แบบBlackman – Harris

ขั้นตอนที่ 7 เปรียบเทียบผลการวัดของเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้นกับ เครื่องมือวัด Power VISA 440



ภาพที่ 5.21 การทดสอบเครื่องมือวัดฮาร์มอนิกกับสัญญาณจริง และเปรียบเทียบผลลัพธ์กับอุปกรณ์

Power VISA รุ่น 440

ผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงต่ำวัด แสดงดังตารางที่ 5.2 – ตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเฟส A จากเครื่องมือวัด Power Visa และเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น

ลำดับ ฮาร์มอนิก	เครื่องมือวัด Power Visa		เครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น	
	โวลต์	องศา	โวลต์	องศา
1	226.9	360	226.95	1.3
3	0.235	80.5	0.19	83.67
5	1.147	199.7	1.1	201.29
7	0.471	55	0.46	57.36
9	0.488	251.6	0.51	249.4
11	0.517	26.6	0.49	28.12
13	0.327	243.4	0.33	239.46
15	0.139	33.7	0	0
%THD	0.691		0.685	

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าเฟส A จากเครื่องมือวัด Power Visa และเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น

ลำดับ ฮาร์มอนิก	เครื่องมือวัด Power Visa		เครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น	
	แอมแปร์	องศา	แอมแปร์	องศา
1	0.241	4.3	0.25	3.89
3	-	-	0.1	111.68
5	0.202	137.9	0.21	136.47
7	0.186	324.7	0.173	322.65
11	0.112	97	0.14	94.9
13	-	-	0.01	73.02
%THD	139		140.91	

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเฟส B จากเครื่องมือวัด Power Visa และเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น

ลำดับ ฮาร์มอนิก	เครื่องมือวัด Power Visa		เครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น	
	โวลต์	องศา	โวลต์	องศา
1	226.3	240	226.72	242
3	0.416	111.8	0.45	109.43
5	1.095	312.1	1.08	314.06
7	0.537	300.3	0.63	304.19
9	0.504	237.5	0.51	239.85
11	0.557	146.3	0.53	143.71
13	0.235	80.5	0.21	79.8
15	0.139	33.7	0.14	35.6
%THD	0.705		0.697	

ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าเฟส B จากเครื่องมือวัด Power Visa และเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น

ลำดับ ฮาร์มอนิก	เครื่องมือวัด Power Visa		เครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น	
	แอมแปร์	องศา	แอมแปร์	องศา
1	0.225	219.9	0.23	217.64
3	0.107	68.4	0.12	66.88
5	0.200	282.6	0.21	284.12
7	0.165	182.2	0.18	180.93
11	0.123	237.4	0.1	235.2
13	-	-	0.1	102.77
%THD	147.3		146.53	

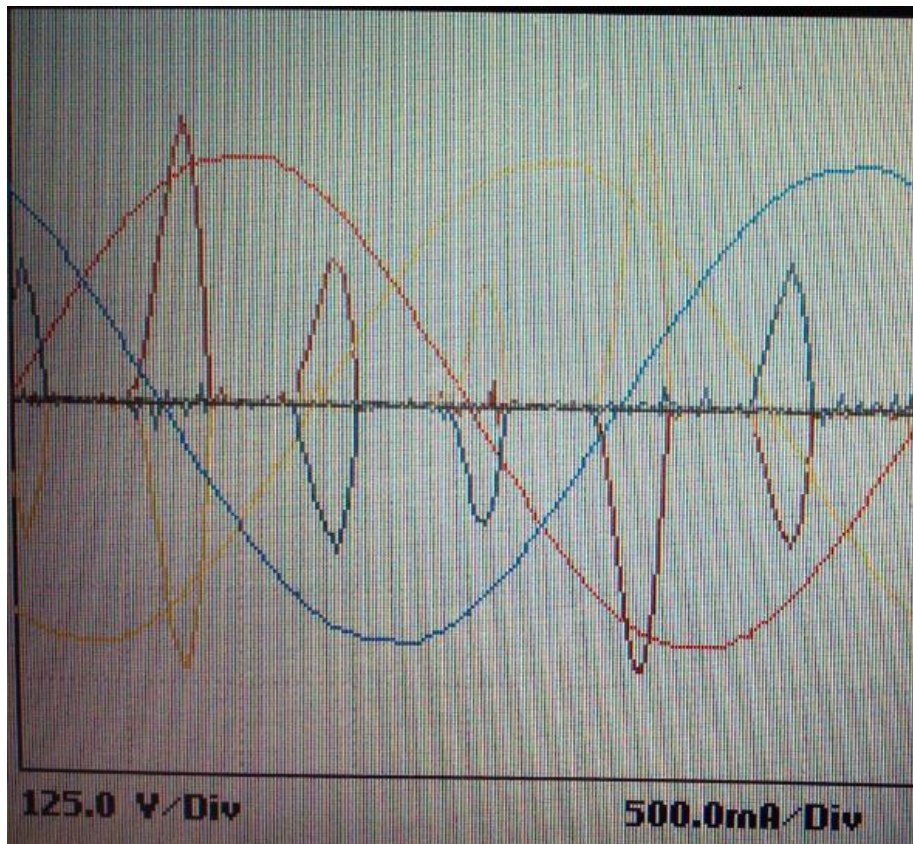
ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเฟส C จากเครื่องมือวัด Power Visa และเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น

ลำดับ ฮาร์มอนิก	เครื่องมือวัด Power Visa		เครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น	
	โวลต์	องศา	โวลต์	องศา
1	225	120.4	226.04	121.36
3	0.309	90	0.28	93.21
5	1.032	77	1.1	75.99
7	0.589	156.8	0.61	154.3
9	0.489	251.6	0.49	253.32
11	0.509	261.3	0.51	259.74
13	0.489	341.6	0.49	343.65
15	0.219	45	0.23	47
%THD	0.719		0.703	

ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าเฟส C จากเครื่องมือวัด Power Visa และเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น

ลำดับ ฮาร์มอนิก	เครื่องมือวัด Power Visa		เครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น	
	แอมแปร์	องศา	แอมแปร์	องศา
1	0.135	120.6	0.15	119.5
3	-	-	0.09	118.91
5	0.119	30.4	0.13	33.6
7	0.109	87.3	0.11	90.17
11	-	-		
13	-	-		
%THD	147.6		146.21	

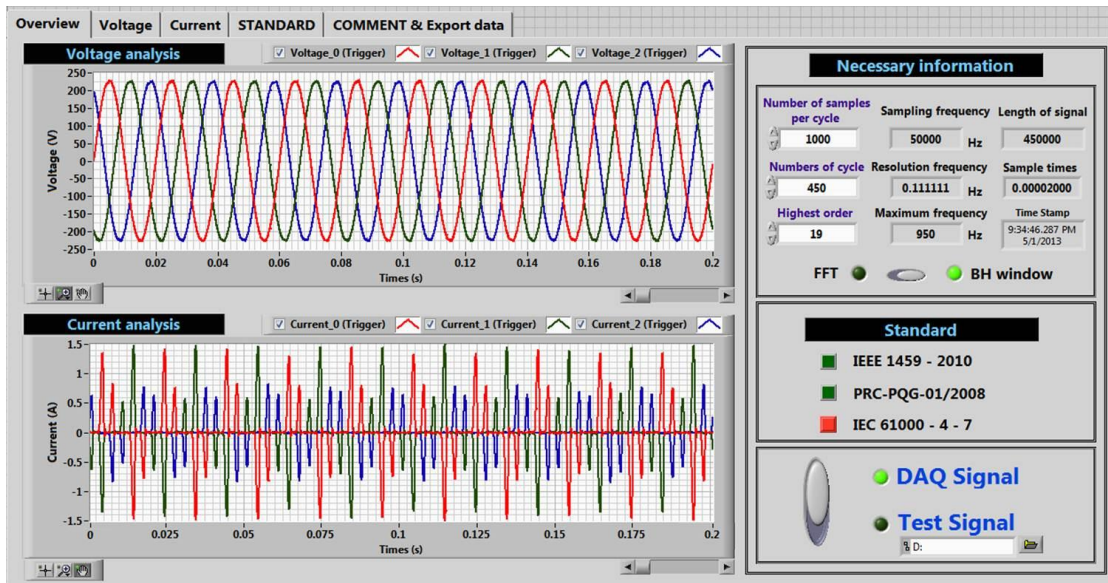
จากการทดสอบเครื่องมือวัดและวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก ผลลัพธ์ของค่าคุณลักษณะของสัญญาณ ทั้งขนาดและมุมเฟส จากเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น พบว่าสามารถวัดและวิเคราะห์ฮาร์มอนิกที่ปะปนในระบบไฟฟ้าทั้งแรงดันและกระแสไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกับเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้า Power VISA 440 ทั้งขนาดและมุมเฟส สังเกตได้จากเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยน (%THD) ของแรงดัน และกระแสฮาร์มอนิก



ภาพที่ 5.22 จอภาพแสดงรูปสัญญาณจากเครื่องมือวัด Power VISA รุ่น 440

	V THD(%)	I THD(%)	Harm Pwr Unsigned
A	0.691	139.0	<0.01
B	0.705	147.3	<0.01
C	0.719	147.6	<0.01
D	355.4	399.5	<0.01

ภาพที่ 5.23 จอภาพแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนจากเครื่องมือวัด Power VISA รุ่น 440



ภาพที่ 5.24 หน้าต่างแสดงผลหลักจากเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น

Phase A			Phase B			Phase C		
Harmonic order	Amplitude	Phase	Harmonic order	Amplitude	Phase	Harmonic order	Amplitude	Phase
1	226.95	1.3	1	226.72	242	1	226.04	121.36
3	0.19	83.67	3	0.45	109.43	3	0.28	93.21
5	1.1	201.29	5	1.08	314.06	5	1.1	75.99
7	0.46	57.36	7	0.63	304.19	7	0.61	253.32
9	0.51	249.43	9	0.51	239.85	9	0.49	259.74
11	0.49	28.12	11	0.53	143.71	11	0.51	87.96
13	0.33	239.46	13	0.21	79.8	13	0.49	343.65
15	0	0	15	0.14	35.6	15	0.23	47
17	0	0	17	0	0	17	0	0
19	0	0	19	0	0	19	0	0

Sort harmonic and interharmonic in each phase								
Frequency (Hz)	Amplitude	Phase	Frequency (Hz)	Amplitude	Phase	Frequency (Hz)	Amplitude	Phase
50	226.95	1.3	50	226.72	242	50	226.04	121.36

RMS voltage (V)			% Total harmonic voltage distortion		
Va	Vb	Vc	THDVa	THDVb	THDVc
226.95	226.73	226.1	0.685	0.697	0.703

ภาพที่ 5.25 หน้าต่างแสดงผลของแรงดันจากเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น

Phase A			Phase B			Phase C		
	Amplitude	Phase		Amplitude	Phase		Amplitude	Phase
1	0.24	3.89	1	0.23	217.64	1	0.15	20.55
3	0.1	111.68	3	0.12	66.88	3	0.09	118.91
5	0.21	136.47	5	0.21	284.12	5	0.13	33.6
7	0.17	322.65	7	0.18	180.93	7	0.11	90.17
9	0	0	9	0	0	9	0	0
11	0.14	94.9	11	0.1	235.2	11	0	0
13	0.01	73.02	13	0.1	102.77	13	0	0
15	0	0	15	0	0	15	0	0
17	0	0	17	0	0	17	0	0
19	0	0	19	0	0	19	0	0

Sort harmonic and interharmonic in each phase								
Frequency (Hz)	Amplitude	Phase	Frequency (Hz)	Amplitude	Phase	Frequency (Hz)	Amplitude	Phase
50	0.24	3.89	50	0.23	217.64	50	0.15	20.55

RMS current (A)			% Total harmonic current distortion		
Ia	Ib	Ic	THDIa	THDIb	THDIc
0.46	0.43	0.29	140.91	146.53	146.21

ภาพที่ 5.26 หน้าต่างแสดงผลของกระแสจากเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยการพัฒนาเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงต่ำนี้ประกอบด้วยกัน 5 ส่วน คือ

1. เครื่องมือวัดฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก
2. ขั้นตอนการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกด้วยวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris
3. ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก
4. ค่าพารามิเตอร์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEEE 1459 (2010) IEC 61000-4-7 (2002) และข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม (PRC-PQG-01/2008)
5. การใช้งานและการแสดงผล

ในส่วนการแสดงผลจะประกอบไปด้วย การแสดงผลในรูปแบบคลื่นสัญญาณ รูปแบบสเปกตรัม รูปแบบค่าจริง โดยในแต่ละส่วนสามารถสังเกตค่าดัชนีการคำนวณต่างๆได้อย่างชัดเจน ผู้ใช้สามารถย่อหรือขยายรูป บันทึกรูป แสดงค่าข้อมูลที่จุดนั้นๆ นอกจากนี้ยังสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการบันทึกของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่มีอยู่ในห้องตลาดมาป้อนให้กับซอฟต์แวร์การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในงานวิจัยนี้ได้

ในส่วนการทดสอบซอฟต์แวร์เครื่องมือวัดฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกได้ทำการทดสอบกับสัญญาณจริง โดยนำชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้มาใช้สำหรับเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก จากนั้นคำนวณค่าคุณลักษณะฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น แสดงผลผ่านรูปคลื่นสัญญาณ และค่าข้อมูลจริง พบว่าได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้า (Power VISA รุ่น 440) นอกจากนี้ซอฟต์แวร์ยังมีความยืดหยุ่นในการเลือกมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า

ดังนั้นประโยชน์ของเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าต่ำของงานวิจัยนี้ จะสามารถช่วยให้ผู้ใช้สามารถวัดปริมาณฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกได้สะดวกขึ้น และนำข้อมูลที่ได้ไปปรับปรุงระบบไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการวัดปริมาณอินเตอร์ฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ายังมีข้อจำกัดในการวัด เนื่องจากห้องปฏิบัติการวิจัยไฟฟ้ากำลัง และอิเล็กทรอนิกส์ไฟฟ้ากำลัง ไม่มีอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดอินเตอร์ฮาร์โมนิก จึงไม่สามารถทดสอบกับสัญญาณจริงได้ มีเพียงข้อมูลดิบจากการวัดของบทความ [13] ที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลการวัดเท่านั้น

เครื่องมือวัดในงานวิจัยนี้สามารถพัฒนารูปแบบการทำงานให้มีการวัดที่ความครอบคลุมมากขึ้นได้ เช่น สามารถเพิ่มรูปแบบของการวัดให้สามารถตรวจวัดแรงดันตก ตรวจวัดไฟกระพริบ หรือเพิ่มมาตรฐานสากลสำหรับการนำไปวิเคราะห์หัตถ์ชนิดต่างๆ เป็นต้น

นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มรูปแบบขั้นตอนวิธีในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสัญญาณเพื่อให้การตรวจวัดมีความยืดหยุ่นมากขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] คณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร: 2551 (อัดสำเนา)
- [2] IEEE 519. Recommend Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, (2000).
- [3] IEC 61000 4-7. Part 4: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto. Second edition, 2002.
- [4] ธวัชชัย เตชสุนันต์. Power System Harmonics. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2009 (อัดสำเนา)
- [5] Copper Development Association. Section 3 - Harmonics. [Online] Available from : <http://www.copperinfo.co.uk/power-quality/harmonics/homepage.shtml> [2002, September]
- [6] ลัญฉกร วุฒิสัทติกุลกิจ และคนอื่นๆ. หลักการไฟฟ้าสื่อสาร. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [7] Zhang, F., Geng, Z., and Yuan, W. The algorithm of interpolating windowed FFT for harmonic analysis of electric power system. IEEE Transactions on Power Delivery 16, 2 (April 2001) : 160-164.
- [8] Harris, F. J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete fourier transform. Proceedings of the IEEE 66, 1 (January 1978) : 51-83.
- [9] IEEE 1459. Institute of Electrical and Electronics Engineers.: IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, 2010.
- [10] Qian, H., Zhao, R., and Chen, T. Interharmonics analysis based on interpolating window FFT algorithm. IEEE Transactions on Power Delivery 22, 2 (April 2007) : 1064-1069.

- [11] Gherasim, C., Van Den Keybus, J., Driesen, J., and Belmans, R. DSP implementation of power measurements according to the IEEE trial-use standard 1459. Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2003. IMTC '03. Proceedings of the 20th IEEE 2, (August 2004) : 1042-1047.
- [12] Kusljevic, M. D., and Tomic, J. J. Power components estimation according to IEEE standard 1459-2010 under wide-range frequency deviations. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 61, 3 (March 2012) : 636-644.
- [13] Tayjasanant, T., and Xu, W. Study of flicker Interharmonic problems caused by a variable frequency drive. International Conference on Harmonics and Quality of Power A Case (2004).

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก อุปกรณ์สำหรับวัดกระแส

งานวิจัยการพัฒนาเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงต่ำนี้ สามารถรับกระแสได้ในช่วง 0.5 - 240 แอมแปร์ โดยใช้อุปกรณ์คล็องสำหรับวัดกระแส (AC Current clamp) รุ่น i200 ของบริษัท Fluke เพื่อตรวจวัดกระแส

การทำงานของอุปกรณ์ชิ้นนี้จะทำการวัดและลดทอนระดับกระแสก่อนส่งไปยังการ์ด Data acquisition มีอัตราการลดทอนกระแสเท่ากับ 1mV/A แสดงดังภาพที่ ก. 1



ภาพที่ ก. 1 อุปกรณ์คล็องสำหรับวัดกระแส (AC Current clamp) รุ่น i200

ภาคผนวก ข

วงจรถอดทอนระดับแรงดันไฟฟ้าและป้องกันแรงดันเกิน

การวัดฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงต่ำนั้นการนำสัญญาณแรงดันขาเข้าจากภายนอกมาใช้กับการ์ด Data acquisition สำหรับงานวิจัยนี้ จำเป็นจะต้องมีการลดทอนระดับแรงดันลง เนื่องจากการ์ด Data Acquisition มีความสามารถในการรับแรงดันขาเข้าได้ไม่เกิน ± 10 โวลต์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีการพัฒนาวงจรถอดทอนระดับแรงดันไฟฟ้าและป้องกันแรงดันเกินขึ้น เพื่อให้สัญญาณจากภายนอกสามารถเชื่อมต่อกับการ์ด Data Acquisition ซึ่งใช้ในการแปลงข้อมูลจากรูปแบบอนาล็อกเป็นดิจิทัลได้

วงจรถอดทอนระดับแรงดันไฟฟ้าและป้องกันแรงดันเกินมีขนาดเท่ากับ 72.39×148.49 มิลลิเมตร ออกแบบด้วยซอฟต์แวร์ Altium Designer Winter 09 แผนภาพเค้าร่างของวงจร (Schematic Designer) แสดงดัง โดยลักษณะของบอร์ดวงจรมี 2 ชั้น คือ ชั้นบน (Top layer) และ ชั้นล่าง (Bottom layer) แสดงดังภาพที่ ข.1 และ ข.2

รายละเอียดของวงจรถอดทอนระดับแรงดันไฟฟ้าและป้องกันแรงดันเกินในแต่ละส่วนมีดังนี้

1. ส่วนรับแรงดันขาเข้า

อุปกรณ์:

- 1) Terminal block ชนิด Barrier type แบบ 4 pin

จำนวน 1 ตัว ราคา: $16 \times 1 = 16$ บาท

2. ส่วนลดทอนแรงดัน

กำหนดให้แรงดันขาเข้าสูงสุดมากกว่าแรงดันที่วัดจริง 2 เท่า ดังนั้นจะกำหนดให้แรงดันขาเข้าสูงสุดมีค่าเท่ากับ 630 โวลต์ และจะทำการปรับค่าตัวต้านทานให้เท่ากับ $4.8 \text{ k}\Omega$ ซึ่งคำนวณได้จากสูตร

$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_{th}} \right) \quad (\text{ข.1})$$

$$0.2 = 630 \times \left(\frac{200}{625k + 200 + R_{th}} \right) \quad (\text{ข.2})$$

$$R_{th} = 4.8 \text{ k}\Omega \quad (\text{ข.3})$$

อุปกรณ์:

- 1) ตัวต้านทานชนิด Trimmer ขนาด 250 k Ω
จำนวน 3 ตัว ราคา: 26.5 x 3 = 79.5 บาท
- 2) ตัวต้านทานขนาด 620 k Ω (1/4W, 1%)
จำนวน 3 ตัว ราคา: 0.17x3 = 0.51 บาท
- 3) ตัวต้านทานขนาด 200 Ω (1/4W, 1%)
จำนวน 3 ตัว ราคา: 0.17x3 = 0.51 บาท

3. ส่วนป้องกันแรงดันเกิน

อุปกรณ์:

- 1) Isolation amplifier ACPL - C7928
จำนวน 3 ตัว ราคา: 448x3 = 1,344 บาท
- 2) ตัวเก็บประจุ ชนิด Tantalum ขนาด 0.1 μ F
จำนวน 6 ตัว ราคา: 1x6 = 6 บาท
- 3) ตัวเก็บประจุ ชนิด Ceramic ขนาด 47 nF
จำนวน 3 ตัว ราคา: 0.9x3 = 2.7 บาท
- 4) ตัวต้านทานชนิด Trimmer ขนาด 500 Ω
จำนวน 6 ตัว ราคา: 18.75x6 = 112.5 บาท
- 5) ตัวต้านทานขนาด 2 k Ω (1/4W, 1%)
จำนวน 6 ตัว ราคา: 0.17x6 = 1.02 บาท
- 6) ไดโอดเบอร์ IN4001 (1A, 50V)
จำนวน 3 ตัว ราคา: 1 x3 = 3 บาท

4. ส่วนขยายสัญญาณ

อุปกรณ์:

- 1) Operational - Amplifier เบอร์ LM318N
จำนวน 3 ตัว ราคา: 18.2x3 = 54.6 บาท

2) ตัวเก็บประจุ ชนิด Tantalum ขนาด 0.1 μ F

จำนวน 6 ตัว ราคา: $1 \times 6 = 6$ บาท

3) ตัวเก็บประจุ ชนิด Ceramic ขนาด 68 pF

จำนวน 6 ตัว ราคา: $0.35 \times 6 = 2.1$ บาท

4) ตัวต้านทานขนาด 10 k Ω (1/4W, 1%)

จำนวน 6 ตัว ราคา: $0.17 \times 6 = 1.02$ บาท

5. ส่วนของแรงดันไฟฟ้าขาออก

อุปกรณ์:

1) Terminal block ชนิด Plug – in terminal แบบ 2 pin

จำนวน 3 ตัว ราคา: $3.51 \times 3 = 10.53$ บาท

6. ส่วนของไฟเลี้ยง

อุปกรณ์:

1) Terminal block ชนิด Screw terminal แบบ 2 pin

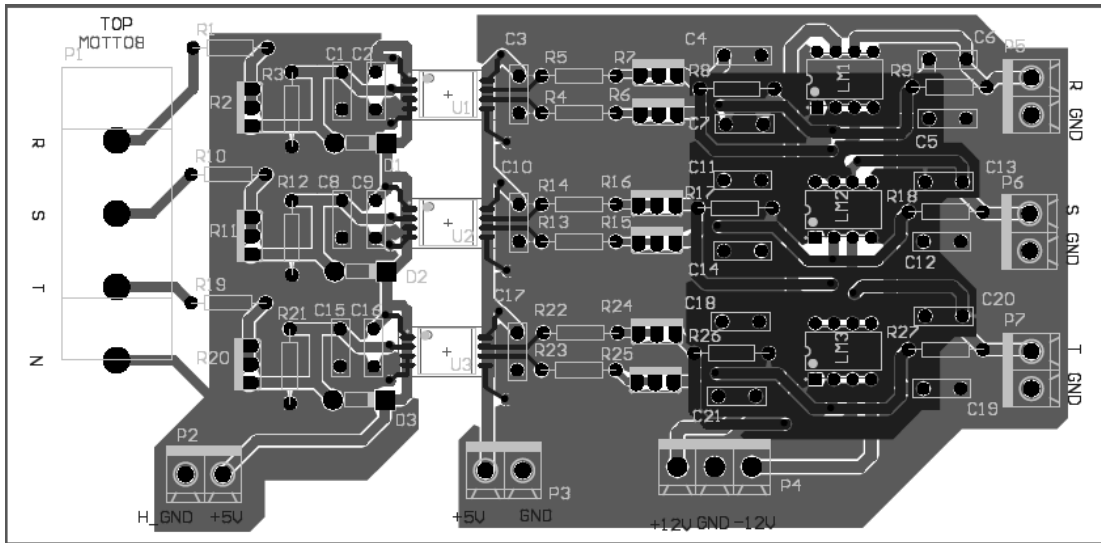
จำนวน 2 ตัว ราคา: $4.54 \times 2 = 9.08$ บาท

2) Terminal block ชนิด Screw terminal แบบ 3 pin

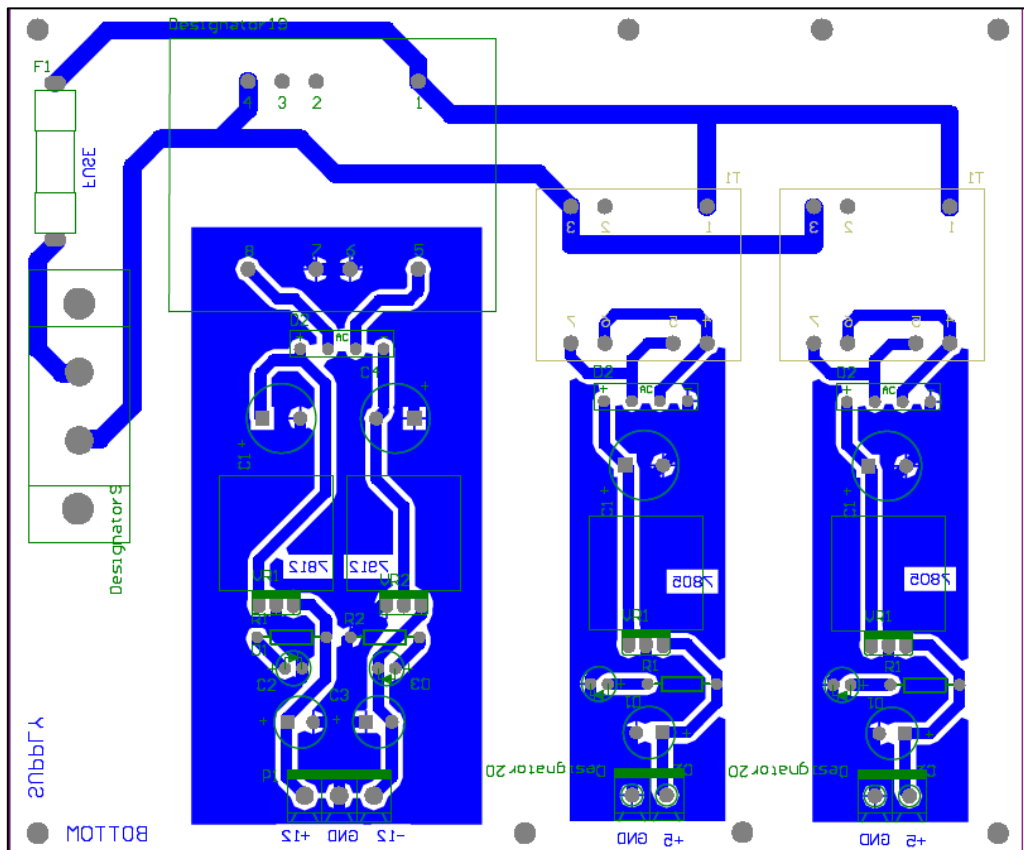
จำนวน 1 ตัว ราคา: $5.14 \times 1 = 5.14$ บาท

วงจรลดทอนระดับแรงดันและป้องกันแรงดันเกินในงานวิจัยนี้ต้องการส่วนของวงจรไฟเลี้ยงแสดงดังภาพที่ ข.3 สำหรับเลี้ยงไมโครชิป 2 ตัวให้ทำงาน มีรายละเอียดดังนี้

1. ไมโครชิป Isolation amplifier ACPL - C7928 ต้องการไฟเลี้ยงขนาด 5 โวลต์ จำนวน 2 ชุด
2. Operational – Amplifier (LM 318N) ต้องการไฟเลี้ยงขนาด ± 12 โวลต์ จำนวน 1 ชุด



ภาพที่ ข. 1 แผนภาพด้านบน (Top layer) และด้านล่าง (Bottom layer) ของวงจรลดทอนแรงดัน และป้องกันแรงดันเกิน



ภาพที่ ข. 2 แผนภาพ ด้านบน (Top layer) ของวงจรไฟเลี้ยง

รายละเอียดของอุปกรณ์สำหรับทำวงจรไฟเลี้ยงให้กับไมโครชิปทั้งสองมีดังนี้

1) หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด $\pm 12V$	จำนวน	1	ตัว	ราคา:	$80 \times 1 = 80$	บาท
2) หม้อแปลงไฟฟ้า 5V	จำนวน	2	ตัว	ราคา:	$72 \times 2 = 144$	บาท
3) ไดโอด เบอร์ KBP206G	จำนวน	4	ตัว	ราคา:	$10 \times 4 = 40$	บาท
4) ตัวเก็บประจุ ขนาด 1,000 μF	จำนวน	4	ตัว	ราคา:	$4 \times 4 = 16$	บาท
5) Rectifier เบอร์ KBP206G	จำนวน	4	ตัว	ราคา:	$10 \times 4 = 40$	บาท
6) Regulator เบอร์ 7805	จำนวน	2	ตัว	ราคา:	$15 \times 2 = 30$	บาท
7) Regulator เบอร์ 7912	จำนวน	1	ตัว	ราคา:	$15 \times 1 = 15$	บาท
8) Regulator เบอร์ 7812	จำนวน	1	ตัว	ราคา:	$15 \times 1 = 15$	บาท
9) ฟิวส์เซรามิก	จำนวน	1	ตัว	ราคา:	$10 \times 1 = 10$	บาท
10) ตัวต้านทาน ขนาด 10k	จำนวน	4	ตัว	ราคา:	$0.17 \times 4 = 0.68$	บาท
11) Terminal block แบบ 2 pin	จำนวน	4	ตัว	ราคา:	$4.54 \times 2 = 9.08$	บาท
12) Terminal block แบบ 3 pin	จำนวน	4	ตัว	ราคา:	$5.14 \times 1 = 5.14$	บาท
13) สายไฟ	จำนวน	1	ตัว	ราคา:	$20 \times 1 = 20$	บาท
				รวม	<u>425</u>	บาท

งานวิจัยการพัฒนาเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงต่ำมีค่าใช้จ่ายโดยรวมทั้งหมดดังนี้

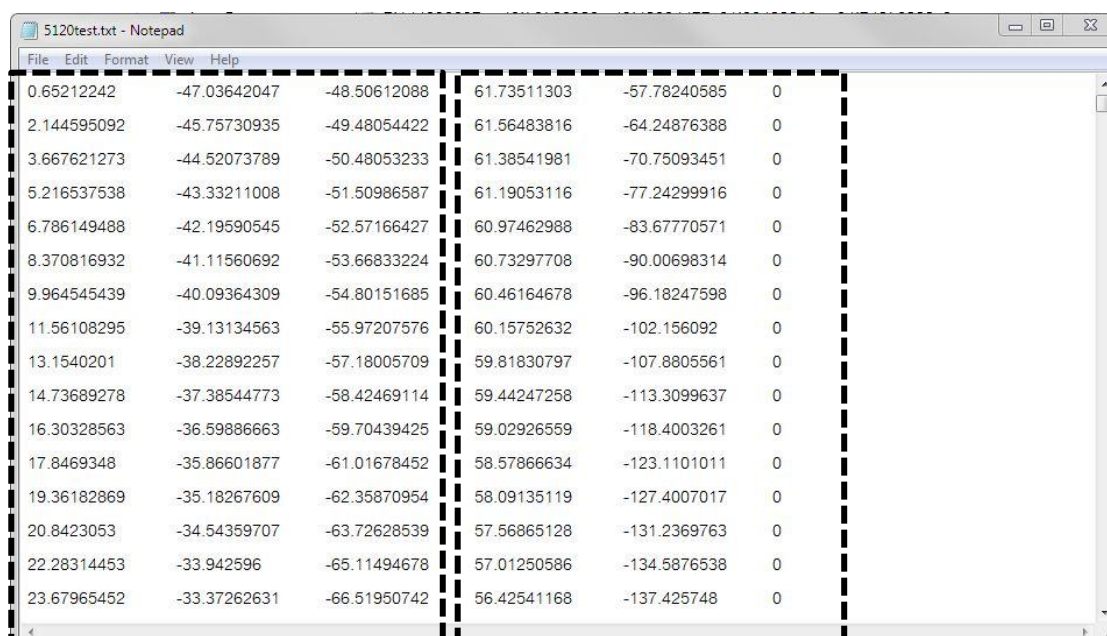
1. การ์ด Data acquisition สำหรับวัดแรงดัน	ราคา	17,500 บาท
2. การ์ด Data acquisition สำหรับวัดกระแส	ราคา	28,900 บาท
3. CompaqDAQ 9174	ราคา	19,635 บาท
4. วงจรลดทอนระดับแรงดันและป้องกันแรงดันเกิน	ราคา	1,800 บาท
5. วงจรไฟเลี้ยง	ราคา	425 บาท

รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดในงานวิจัยนี้เป็นจำนวนทั้งสิ้น 68,260 บาท

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างข้อมูลนำเข้าสำหรับซอฟต์แวร์

รูปแบบข้อมูลนำเข้าที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับซอฟต์แวร์ในงานวิจัยนี้จะต้องเป็นข้อมูลของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 3 เฟส เชิงเวลา และไฟล์มีนามสกุล “.txt” เท่านั้น ดังภาพด้านล่าง



0.65212242	-47.03642047	-48.50612088	61.73511303	-57.78240585	0
2.144595092	-45.75730935	-49.48054422	61.56483816	-64.24876388	0
3.667621273	-44.52073789	-50.48053233	61.38541981	-70.75093451	0
5.216537538	-43.33211008	-51.50986587	61.19053116	-77.24299916	0
6.786149488	-42.19590545	-52.57166427	60.97462988	-83.67770571	0
8.370816932	-41.11560692	-53.66833224	60.73297708	-90.00698314	0
9.964545439	-40.09364309	-54.80151685	60.46164678	-96.18247598	0
11.56108295	-39.13134563	-55.97207576	60.15752632	-102.156092	0
13.1540201	-38.22892257	-57.18005709	59.81830797	-107.8805561	0
14.73689278	-37.38544773	-58.42469114	59.44247258	-113.3099637	0
16.30328563	-36.59886663	-59.70439425	59.02926559	-118.4003261	0
17.8469348	-35.86601877	-61.01678452	58.57866634	-123.1101011	0
19.36182869	-35.18267609	-62.35870954	58.09135119	-127.4007017	0
20.8423053	-34.54359707	-63.72628539	57.56865128	-131.2369763	0
22.28314453	-33.942596	-65.11494678	57.01250586	-134.5876538	0
23.67965452	-33.37262631	-66.51950742	56.42541168	-137.425748	0

ภาพที่ ค. 1 รูปแบบข้อมูลนำเข้า

จากภาพที่ ค. 1 รูปแบบข้อมูลนำเข้าจะประกอบไปด้วยข้อมูลสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า โดยใน 3 คอลัมน์แรกจะเป็นข้อมูลของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเฟส A เฟส B เฟส C ตามลำดับ และ 3 คอลัมน์หลังจะเป็นข้อมูลของสัญญาณกระแสไฟฟ้าเฟส A เฟส B เฟส C ตามลำดับ

ภาคผนวก ง

ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบความแม่นยำของขั้นตอนวิธีการคำนวณ

ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณมีดังนี้

ตารางที่ ง. 1 จำลองสัญญาณสำหรับทดสอบชุดที่ 1

ทดสอบครั้งที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ขนาด (โวลต์)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
มุม (องศา)	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90

ข้อมูลในตารางที่ ง. 1 จะใช้ในการทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris ในเงื่อนไขการวิเคราะห์ข้อที่ 5.1.1 และ 5.1.2

ตารางที่ ง. 2 จำลองสัญญาณสำหรับทดสอบชุดที่ 2

ทดสอบครั้งที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ขนาด (โวลต์)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
มุม (องศา)	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150

ข้อมูลในตารางที่ ง. 2 จะใช้ในการทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris ในเงื่อนไขการวิเคราะห์ข้อที่ 5.1.1 และ 5.1.2

ตารางที่ ง. 3 จำลองสัญญาณสำหรับทดสอบชุดที่ 3

ทดสอบ ครั้งที่	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)
1	150									
2	150	250								
3	150	250	300							
4	150	250	300	350						
5	150	250	300	350	450					
6	150	250	300	350	450	650				
7	150	250	300	350	450	650	750			
8	150	250	300	350	450	650	750	850		
9	150	250	300	350	450	650	750	850	900	
10	150	250	300	350	450	650	750	850	900	950

ข้อมูลในตารางที่ ง. 3 จะใช้ในการทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris ในเงื่อนไขการวิเคราะห์ข้อที่ 5.1.3 การทดสอบครั้งที่ 1

ตารางที่ ง. 4 จำลองสัญญาณสำหรับทดสอบชุดที่ 4

ทดสอบ ครั้งที่	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)
1	250									
2	250	300								
3	250	300	350							
4	250	300	350	450						
5	250	300	350	450	650					
6	250	300	350	450	650	750				
7	250	300	350	450	650	750	850			
8	250	300	350	450	650	750	850	900		
9	250	300	350	450	650	750	850	900	950	
10	250	300	350	450	650	750	850	900	950	1050

ข้อมูลในตารางที่ ง. 4 จะใช้ในการทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris ในเงื่อนไขการวิเคราะห์ข้อที่ 5.1.3 การทดสอบครั้งที่ 2

ตารางที่ ง. 5 จำลองสัญญาณสำหรับทดสอบชุดที่ 5

ทดสอบ ครั้งที่	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)
1	350									
2	350	400								
3	350	400	450							
4	350	400	450	650						
5	350	400	450	650	750					
6	350	400	450	650	750	850				
7	350	400	450	650	750	850	900			
8	350	400	450	650	750	850	900	950		
9	350	400	450	650	750	850	900	950	1050	
10	350	400	450	650	750	850	900	950	1050	1100

ข้อมูลในตารางที่ ง. 5 จะใช้ในการทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris ในเงื่อนไขการวิเคราะห์ข้อที่ 5.1.3 การทดสอบครั้งที่ 3

ตารางที่ ง. 6 จำลองสัญญาณสำหรับทดสอบชุดที่ 6

ทดสอบ ครั้งที่	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)
1	37									
2	37	117								
3	37	117	135							
4	37	117	135	197						
5	37	117	135	197	211					
6	37	117	135	197	211	217				
7	37	117	135	197	211	217	318			
8	37	117	135	197	211	217	318	519		
9	37	117	135	197	211	217	318	519	717	
10	37	117	135	197	211	217	318	519	717	993

ข้อมูลในตารางที่ ง. 6 จะใช้ในการทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris ในเงื่อนไขการวิเคราะห์ข้อที่ 5.1.3

ตารางที่ ง. 7 จำลองสัญญาณสำหรับทดสอบชุดที่ 7

ทดสอบ ครั้งที่	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)
1	117									
2	117	127								
3	117	127	135							
4	117	127	135	197						
5	117	127	135	197	211					
6	117	127	135	197	211	217				
7	117	127	135	197	211	217	318			
8	117	127	135	197	211	217	318	519		
9	117	127	135	197	211	217	318	519	717	
10	117	127	135	197	211	217	318	519	717	993

ข้อมูลในตารางที่ ง. 7 จะใช้ในการทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris ในเงื่อนไขการวิเคราะห์ข้อที่ 5.1.3 การทดสอบครั้งที่ 3

ตารางที่ ง. 8 จำลองสัญญาณสำหรับทดสอบชุดที่ 8

ทดสอบ ครั้งที่	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความถี่ (เฮิรตซ์)
1	134									
2	134	147								
3	134	147	163							
4	134	147	163	197						
5	134	147	163	197	211					
6	134	147	163	197	211	217				
7	134	147	163	197	211	217	318			
8	134	147	163	197	211	217	318	519		
9	134	147	163	197	211	217	318	519	717	
10	134	147	163	197	211	217	318	519	717	993

ข้อมูลในตารางที่ ง. 8 จะใช้ในการทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris ในเงื่อนไขการวิเคราะห์ข้อที่ 5.1.4 การทดสอบที่ 3

ตารางที่ ง. 9 จำลองสัญญาณสำหรับทดสอบชุดที่ 9

ความถี่ (เฮิรตซ์)	ขนาด	มุม (องศา)
25	10	30
50	100	100
104	4.5	50
114	20	79
115	0.2	60
116	1	120
150	11.4	20
250	6.5	120
289	3	90
300	1.76	75
350	15	150
367	0.82	110
500	1.12	50
550	7.5	79
650	5.5	50
750	3.5	100
818	2	150
850	1.12	30
933	0.57	160
950	1	90

ข้อมูลในตารางที่ ง. 9 จะใช้ในการทดสอบความแม่นยำของวิธีการคำนวณด้วยวิธีผล
การแปลงฟูรีเยร์แบบเร็วและวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris ในเงื่อนไขการวิเคราะห์
ข้อที่ 5.1.5

ภาคผนวก จ
ผลการทดสอบความแม่นยำของขั้นตอนวิธีการคำนวณ

ตารางที่ จ. 1 เปรียบเทียบผลการทดสอบ “ขนาด” ของสัญญาณที่มีฮาร์มอนิกปะปน ระหว่างวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris โดยใช้ข้อมูลแบบที่ 1

ค่าจริง ขนาด (โวลต์)	ชุดที่ 1 ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ความถี่ 150 เฮิร์ตซ์				ชุดที่ 2 ฮาร์มอนิกลำดับที่ 13 ความถี่ 650 เฮิร์ตซ์				ชุดที่ 3 ฮาร์มอนิกลำดับที่ 50 ความถี่ 2,500 เฮิร์ตซ์			
	ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด	
	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH
10	10	10.0002	0	0.0021	10	10.0002	0	0.0021	10	10.0002	0	0.0021
20	20	20.0004	0	0.0021	20	20.0004	0	0.0021	20	20.0004	0	0.0021
30	30	30.0006	0	0.0021	30	30.0006	0	0.0021	30	30.0006	0	0.0021
40	40	40.0008	0	0.0021	40	40.0008	0	0.0021	40	40.0008	0	0.0021
50	50	50.0010	0	0.0021	50	50.0010	0	0.0021	50	50.0010	0	0.0021
60	60	60.0012	0	0.0021	60	60.0012	0	0.0021	60	60.0012	0	0.0021
70	70	70.0015	0	0.0021	70	70.0015	0	0.0021	70	70.0015	0	0.0021
80	80	80.0017	0	0.0021	80	80.0017	0	0.0021	80	80.0017	0	0.0021
90	90	90.0019	0	0.0021	90	90.0019	0	0.0021	90	90.0019	0	0.0021
100	100	100.002	0	0.0021	100	100.002	0	0.0021	100	100.002	0	0.0021
% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		0	0.0021		% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		0	0.0021	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		0	0.0021

ตารางที่ จ. 2 เปรียบเทียบผลการทดสอบ “มูมเฟส” ของสัญญาณที่มีฮาร์มอนิกปะปน ระหว่างวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris โดยใช้ข้อมูลแบบที่ 1

ค่าจริง มูมเฟส (องศา)	ชุดที่ 1 ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ความถี่ 150 เฮิร์ตซ์				ชุดที่ 2 ฮาร์มอนิกลำดับที่ 13 ความถี่ 650 เฮิร์ตซ์				ชุดที่ 3 ฮาร์มอนิกลำดับที่ 50 ความถี่ 2,500 เฮิร์ตซ์			
	มูมเฟสที่คำนวณได้ (องศา)		% ความผิดพลาด		มูมเฟสที่คำนวณได้ (องศา)		% ความผิดพลาด		มูมเฟสที่คำนวณได้ (องศา)		% ความผิดพลาด	
	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH
90	90	89.9949	0	0.0057	90	89.9949	0	0.0057	90	89.9949	0	0.0057
90	90	89.9949	0	0.0057	90	89.9949	0	0.0057	90	89.9949	0	0.0057
90	90	89.9949	0	0.0057	90	89.9949	0	0.0057	90	89.9949	0	0.0057
90	90	89.9949	0	0.0057	90	89.9949	0	0.0057	90	89.9949	0	0.0057
90	90	89.9949	0	0.0057	90	89.9949	0	0.0057	90	89.9949	0	0.0057
90	90	89.9949	0	0.0057	90	89.9949	0	0.0057	90	89.9949	0	0.0057
90	90	89.9949	0	0.0057	90	89.9949	0	0.0057	90	89.9949	0	0.0057
90	90	89.9949	0	0.0057	90	89.9949	0	0.0057	90	89.9949	0	0.0057
90	90	89.9949	0	0.0057	90	89.9949	0	0.0057	90	89.9949	0	0.0057
90	90	89.9949	0	0.0057	90	89.9949	0	0.0057	90	89.9949	0	0.0057
% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		0	0.0057		% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		0	0.0057	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		0	0.0057

ตารางที่ จ. 3 เปรียบเทียบผลการทดสอบ “ขนาด” ของสัญญาณที่มีฮาร์มอนิกปะปน ระหว่างวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris โดยใช้ข้อมูลแบบที่ 2

ค่าจริง ขนาด (โวลต์)	ชุดที่ 1 ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ความถี่ 150 เฮิรตซ์				ชุดที่ 1 ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ความถี่ 150 เฮิรตซ์				ชุดที่ 1 ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ความถี่ 150 เฮิรตซ์					
	ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด			
	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH		
50	50	50.001	0	0.0021	50	10.0002	0	0.0021	50	10.0002	0	0.0021		
50	50	50.001	0	0.0021	50	20.0004	0	0.0021	50	20.0004	0	0.0021		
50	50	50.001	0	0.0021	50	30.0006	0	0.0021	50	30.0006	0	0.0021		
50	50	50.001	0	0.0021	50	40.0008	0	0.0021	50	40.0008	0	0.0021		
50	50	50.001	0	0.0021	50	50.0010	0	0.0021	50	50.0010	0	0.0021		
50	50	50.001	0	0.0021	50	60.0012	0	0.0021	50	60.0012	0	0.0021		
50	50	50.001	0	0.0021	50	70.0015	0	0.0021	50	70.0015	0	0.0021		
50	50	50.001	0	0.0021	50	80.0017	0	0.0021	50	80.0017	0	0.0021		
50	50	50.001	0	0.0021	50	90.0019	0	0.0021	50	90.0019	0	0.0021		
50	50	50.001	0	0.0021	50	100.002	0	0.0021	50	100.002	0	0.0021		
% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย			0	0.0021	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย			0	0.0021	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย			0	0.0021

ตารางที่ จ. 4 เปรียบเทียบผลการทดสอบ “มูมเฟส” ของสัญญาณที่มีฮาร์มอนิกปะปน ระหว่างวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris โดยใช้ข้อมูลแบบที่ 2

ค่าจริง มูมเฟส (องศา)	ชุดที่ 1 ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ความถี่ 150 เฮิรตซ์				ชุดที่ 2 ฮาร์มอนิกลำดับที่ 13 ความถี่ 650 เฮิรตซ์				ชุดที่ 3 ฮาร์มอนิกลำดับที่ 50 ความถี่ 2,500 เฮิรตซ์					
	มูมเฟสที่คำนวณได้ (องศา)		% ความผิดพลาด		มูมเฟสที่คำนวณได้ (องศา)		% ความผิดพลาด		มูมเฟสที่คำนวณได้ (องศา)		% ความผิดพลาด			
	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH		
30	30	29.9949	0	0.0172	30	29.9949	0	0.0172	30	29.9949	0	0.0172		
60	60	59.9949	0	0.0086	60	59.9949	0	0.0086	60	59.9949	0	0.0086		
90	90	89.9949	0	0.0057	90	89.9949	0	0.0057	90	89.9949	0	0.0057		
120	120	119.994	0	0.0043	120	119.994	0	0.0043	120	119.994	0	0.0043		
150	150	149.994	0	0.0034	150	149.994	0	0.0034	150	149.994	0	0.0034		
180	180	179.994	0	0.0029	180	179.994	0	0.0029	180	179.994	0	0.0029		
210	210	209.994	0	0.0025	210	209.994	0	0.0025	210	209.994	0	0.0025		
240	240	239.994	0	0.0021	240	239.994	0	0.0021	240	239.994	0	0.0021		
270	270	269.994	0	0.0019	270	269.994	0	0.0019	270	269.994	0	0.0019		
300	300	299.994	0	0.0017	300	299.994	0	0.0017	300	299.994	0	0.0017		
% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย			0	0.005	% ความผิดพลาดรวม เฉลี่ย			0	0.005	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย			0	0.005

ตารางที่ จ. 5 เปรียบเทียบผลการทดสอบ “ขนาด” ของสัญญาณที่มีอินเทอร์ฮาร์โมนิกปะปน ระหว่างวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris โดยใช้ข้อมูล แบบที่ 1 และการทดสอบที่ 1

ค่าจริง ขนาด (โวลต์)	อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 47 เฮิรตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 52 เฮิรตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 57 เฮิรตซ์					
	ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด			
	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH		
10.0	7.9966	10	20.034	0.0004	9.0788	9.9999	9.21	0.0007	9.5856	10	4.14	0.0003		
20.0	15.9931	19.9999	20.034	0.0004	18.1576	19.9999	9.21	0.0007	19.1711	20.0001	4.14	0.0003		
30.0	23.9897	29.9999	20.034	0.0004	27.2363	29.9998	9.21	0.0007	28.7567	30.0001	4.14	0.0003		
40.0	31.9863	39.9998	20.034	0.0004	36.3151	39.9997	9.21	0.0007	38.3422	40.0001	4.14	0.0003		
50.0	39.9828	49.9998	20.034	0.0004	45.3939	49.9997	9.21	0.0007	47.9278	50.0002	4.14	0.0003		
60.0	47.9794	59.9997	20.034	0.0004	54.4727	59.9996	9.21	0.0007	57.5134	60.0002	4.14	0.0003		
70.0	55.9759	69.9997	20.034	0.0004	63.5515	69.9995	9.21	0.0007	67.0989	70.0002	4.14	0.0003		
80.0	63.9725	79.9997	20.034	0.0004	72.6302	79.9995	9.21	0.0007	76.6845	80.0002	4.14	0.0003		
90.0	71.9691	89.9996	20.034	0.0004	81.709	89.9994	9.21	0.0007	86.2701	90.0003	4.14	0.0003		
100.0	79.9656	99.9996	20.034	0.0004	90.7878	99.9993	9.21	0.0007	95.8556	100.000	4.14	0.0003		
% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย			20.0344	0.0004	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย			9.12	0.0007	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย			4.14	0.0003

ตารางที่ จ. 6 เปรียบเทียบผลการทดสอบ “มูมเฟส” ของสัญญาณที่มีอินเทอร์ฮาร์โมนิกปะปน ระหว่างวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris โดยใช้ข้อมูล แบบที่ 1 และการทดสอบที่ 1

ค่าจริง มูมเฟส (องศา)	อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 47 เฮิรตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 52 เฮิรตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 57 เฮิรตซ์					
	มูมเฟสที่คำนวณได้ (องศา)		% ความผิดพลาด		มูมเฟสที่คำนวณได้ (องศา)		% ความผิดพลาด		มูมเฟสที่คำนวณได้ (องศา)		% ความผิดพลาด			
	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH		
90	25.2332	89.9997	71.9631	0.0003	133.225	89.9993	48.0283	0.0008	61.2136	89.9982	31.9849	0.002		
90	25.2332	89.9997	71.9631	0.0003	133.225	89.9993	48.0283	0.0008	61.2136	89.9982	31.9849	0.002		
90	25.2332	89.9997	71.9631	0.0003	133.225	89.9993	48.0283	0.0008	61.2136	89.9982	31.9849	0.002		
90	25.2332	89.9997	71.9631	0.0003	133.225	89.9993	48.0283	0.0008	61.2136	89.9982	31.9849	0.002		
90	25.2332	89.9997	71.9631	0.0003	133.225	89.9993	48.0283	0.0008	61.2136	89.9982	31.9849	0.002		
90	25.2332	89.9997	71.9631	0.0003	133.225	89.9993	48.0283	0.0008	61.2136	89.9982	31.9849	0.002		
90	25.2332	89.9997	71.9631	0.0003	133.225	89.9993	48.0283	0.0008	61.2136	89.9982	31.9849	0.002		
90	25.2332	89.9997	71.9631	0.0003	133.225	89.9993	48.0283	0.0008	61.2136	89.9982	31.9849	0.002		
90	25.2332	89.9997	71.9631	0.0003	133.225	89.9993	48.0283	0.0008	61.2136	89.9982	31.9849	0.002		
% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย			71.96	0.0003	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย			48.03	0.0008	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย			31.99	0.002

ตารางที่ จ. 7 เปรียบเทียบผลการทดสอบ “ขนาด” ของสัญญาณที่มีอินเทอร์ฮาร์โมนิกปะปน ระหว่างวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris โดยใช้ข้อมูล แบบที่ 2 และการทดสอบที่ 1

ค่าจริง ขนาด (โวลต์)	อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 47 เฮิรตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 52 เฮิรตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 57 เฮิรตซ์			
	ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด	
	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH
50	39.992	49.9997	20.0159	0.0004	45.3785	49.9996	9.2429	0.0007	47.9078	50.0001	4.1844	0.0003
50	39.9727	49.9997	20.0546	0.0004	45.377	49.9996	9.246	0.0007	47.9147	50.0001	4.1706	0.0003
50	39.9828	49.9997	20.0344	0.0004	45.3939	49.9996	9.2122	0.0007	47.9278	50.0001	4.1444	0.0003
50	40.0122	49.9997	19.9755	0.0004	45.4123	49.9996	9.1753	0.0007	47.9341	50.0001	4.1319	0.0003
50	40.0316	49.9997	19.9369	0.0004	45.4139	49.9996	9.1722	0.0007	47.9272	50.0001	4.1457	0.0003
50	40.0215	49.9997	19.9571	0.0004	45.397	49.9996	9.206	0.0007	47.914	50.0001	4.1719	0.0003
50	39.992	49.9997	20.0159	0.0004	45.3785	49.9996	9.2429	0.0007	47.9078	50.0001	4.1844	0.0003
50	39.9727	49.9997	20.0546	0.0004	45.377	49.9996	9.246	0.0007	47.9147	50.0001	4.1706	0.0003
50	39.9828	49.9997	20.0344	0.0004	45.3939	49.9996	9.2122	0.0007	47.9278	50.0001	4.1444	0.0003
50	40.0122	49.9997	19.9755	0.0004	45.4123	49.9996	9.1753	0.0007	47.9341	50.0001	4.1319	0.0003
	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		20.0344	0.0004	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		9.12	0.0007	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		4.14	0.0003

ตารางที่ จ. 8 เปรียบเทียบผลการทดสอบ “มูมเฟส” ของสัญญาณที่มีอินเทอร์ฮาร์โมนิกปะปน ระหว่างวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris โดยใช้ข้อมูล แบบที่ 2 และการทดสอบที่ 1

ค่าจริง มูมเฟส (องศา)	อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 47 เฮิรตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 52 เฮิรตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 57 เฮิรตซ์			
	มูมเฟสที่คำนวณได้ (องศา)		% ความผิดพลาด		มูมเฟสที่คำนวณได้ (องศา)		% ความผิดพลาด		มูมเฟสที่คำนวณได้ (องศา)		% ความผิดพลาด	
	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH
30	325.160	29.9997	983.86	0.001	73.1851	29.9992	143.95	0.0025	1.2007	29.9982	95.99	0.006
60	355.192	59.9997	491.98	0.0005	103.210	59.9992	72.0181	0.0013	31.214	59.9982	47.98	0.003
90	25.2332	89.9997	71.96	0.0003	133.225	89.9993	48.03	0.0008	61.2136	89.9982	31.99	0.002
120	55.2408	119.999	53.97	0.0003	163.214	119.999	36.02	0.0006	91.1998	119.998	24.00	0.0015
150	85.2081	149.999	43.19	0.0003	193.188	149.999	28.79	0.0005	121.186	149.998	19.21	0.0012
180	115.167	179.999	36.02	0.0002	223.173	179.999	23.99	0.0004	151.186	179.998	16.01	0.001
210	145.160	209.999	30.88	0.0001	253.185	209.999	20.56	0.0004	181.200	209.998	13.71	0.0009
240	175.192	239.999	27.00	0.0001	283.210	239.999	18.01	0.0003	211.214	239.998	11.99	0.0008
270	205.233	269.999	23.99	0.0001	313.225	269.999	16.01	0.0003	241.213	269.998	10.66	0.0007
300	235.240	299.999	21.59	0.0001	343.214	299.999	14.40	0.0002	271.199	299.998	9.60	0.0006
	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		178.4	0.0003	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		42.2	0.0008	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		28.1	0.002

ตารางที่ จ. 9 เปรียบเทียบผลการทดสอบ “ขนาด” ของสัญญาณที่มีอินเทอร์ฮาร์โมนิกปะปน ระหว่างวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris โดยใช้ข้อมูล แบบที่ 1 และการทดสอบที่ 2

ค่าจริง ขนาด (โวลต์)	อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 98 เฮิรตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 197 เฮิรตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 301 เฮิรตซ์			
	ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด	
	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH
10	9.0791	10	9.2087	0.0001	7.9996	10	20.0035	0.0004	9.7646	9.9999	2.3545	0.0007
20	18.158	20	9.2087	0.0001	15.9993	19.9999	20.0035	0.0004	19.5291	19.9999	2.3545	0.0007
30	27.237	30	9.2087	0.0001	23.9989	29.9999	20.0035	0.0004	29.2937	29.9998	2.3545	0.0007
40	36.316	40	9.2087	0.0001	31.9986	39.9998	20.0035	0.0004	39.0582	39.9997	2.3545	0.0007
50	45.395	49.999	9.2087	0.0001	39.9982	49.9998	20.0035	0.0004	48.8228	49.9996	2.3545	0.0007
60	54.474	59.999	9.2087	0.0001	47.9979	59.9997	20.0035	0.0004	58.5873	59.9996	2.3545	0.0007
70	63.553	69.999	9.2087	0.0001	55.9975	69.9997	20.0035	0.0004	68.3519	69.9995	2.3545	0.0007
80	72.633	79.999	9.2087	0.0001	63.9972	79.9997	20.0035	0.0004	78.1164	79.9994	2.3545	0.0007
90	81.712	89.999	9.2087	0.0001	71.996	89.9996	20.0035	0.0004	87.881	89.9994	2.3545	0.0007
100	90.791	99.999	9.2087	0.0001	79.996	99.9996	20.0035	0.0004	97.6455	99.9993	2.3545	0.0007
% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย			9.2087	0.0001	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		20.004	0.0007	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		2.351	0.0007

ตารางที่ จ. 10 เปรียบเทียบผลการทดสอบ “มูมเฟส” ของสัญญาณที่มีอินเทอร์ฮาร์โมนิกปะปน ระหว่างวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris โดยใช้ข้อมูล แบบที่ 1 และการทดสอบที่ 2

ค่าจริง มูมเฟส (องศา)	อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 98 เฮิรตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 197 เฮิรตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 301 เฮิรตซ์			
	มูมเฟสที่คำนวณได้ (องศา)		% ความผิดพลาด		มูมเฟสที่คำนวณได้ (องศา)		% ความผิดพลาด		มูมเฟสที่คำนวณได้ (องศา)		% ความผิดพลาด	
	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH
90	46.8094	89.999	47.9896	0.0011	25.2065	89.9997	71.9928	0.0004	111.601	89.999	24.0011	0.0012
90	46.8094	89.999	47.9896	0.0011	25.2065	89.9997	71.9928	0.0004	111.601	89.999	24.0011	0.0012
90	46.8094	89.999	47.9896	0.0011	25.2065	89.9997	71.9928	0.0004	111.601	89.999	24.0011	0.0012
90	46.8094	89.999	47.9896	0.0011	25.2065	89.9997	71.9928	0.0004	111.601	89.999	24.0011	0.0012
90	46.8094	89.999	47.9896	0.0011	25.2065	89.9997	71.9928	0.0004	111.601	89.999	24.0011	0.0012
90	46.8094	89.999	47.9896	0.0011	25.2065	89.9997	71.9928	0.0004	111.601	89.999	24.0011	0.0012
90	46.8094	89.999	47.9896	0.0011	25.2065	89.9997	71.9928	0.0004	111.601	89.999	24.0011	0.0012
90	46.8094	89.999	47.9896	0.0011	25.2065	89.9997	71.9928	0.0004	111.601	89.999	24.0011	0.0012
90	46.8094	89.999	47.9896	0.0011	25.2065	89.9997	71.9928	0.0004	111.601	89.999	24.0011	0.0012
90	46.8094	89.999	47.9896	0.0011	25.2065	89.9997	71.9928	0.0004	111.601	89.999	24.0011	0.0012
% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย			47.99	0.0011	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		71.99	0.0004	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		24.00	0.0012

ตารางที่ จ. 11 เปรียบเทียบผลการทดสอบ “ขนาด” ของสัญญาณที่มีอินเทอร์ฮาร์โมนิกปะปน ระหว่างวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris โดยใช้ข้อมูล แบบที่ 2 และการทดสอบที่ 2

ค่าจริง ขนาด (โวลต์)	อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 98 เฮิรตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 197 เฮิรตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 301 เฮิรตซ์			
	ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด	
	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH
50	45.386	49.9999	9.228	0.0001	40.000	49.9998	20.000	0.0004	48.824	49.9996	2.353	0.0007
50	45.386	49.9999	9.228	0.0001	39.995	49.9998	20.010	0.0004	48.822	49.9996	2.356	0.0007
50	45.396	49.9999	9.208	0.0001	39.997	49.9998	20.005	0.0004	48.823	49.9996	2.355	0.0007
50	45.405	49.9999	9.190	0.0001	40.004	49.9998	19.991	0.0004	48.824	49.9996	2.351	0.0007
50	45.405	49.9999	9.191	0.0001	40.009	49.9998	19.982	0.0004	48.826	49.9996	2.348	0.0007
50	45.395	49.9999	9.210	0.0001	40.007	49.9998	19.986	0.0004	48.826	49.9996	2.349	0.0007
50	45.386	49.9999	9.228	0.0001	40.000	49.9998	20.000	0.0004	48.824	49.9996	2.353	0.0007
50	45.386	49.9999	9.228	0.0001	39.995	49.9998	20.010	0.0004	48.822	49.9996	2.356	0.0007
50	45.396	49.9999	9.208	0.0001	39.997	49.9998	20.005	0.0004	48.823	49.9996	2.355	0.0007
50	45.405	49.9999	9.190	0.0001	40.004	49.9998	19.991	0.0004	48.824	49.9996	2.351	0.0007
	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		9.21	0.0001	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		20.00	0.0004	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		2.35	0.0007

ตารางที่ จ. 12 เปรียบเทียบผลการทดสอบ “มูมเฟส” ของสัญญาณที่มีอินเทอร์ฮาร์โมนิกปะปน ระหว่างวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris โดยใช้ข้อมูล แบบที่ 2 และการทดสอบที่ 2

ค่าจริง มูมเฟส (องศา)	อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 98 เฮิรตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 197 เฮิรตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 301 เฮิรตซ์			
	มูมเฟสที่คำนวณได้ (องศา)		% ความผิดพลาด		มูมเฟสที่คำนวณได้ (องศา)		% ความผิดพลาด		มูมเฟสที่คำนวณได้ (องศา)		% ความผิดพลาด	
	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH
30	346.794	29.9991	1055.98	0.0031	325.191	29.9997	983.969	0.0011	51.598	29.999	71.992	0.0035
60	16.808	59.9991	71.987	0.0016	355.198	59.9997	491.997	0.0005	81.599	59.9989	35.998	0.0018
90	46.814	89.999	47.984	0.0011	25.208	89.9997	71.991	0.0004	111.601	89.999	24.001	0.0012
120	76.807	119.999	35.994	0.0008	55.210	119.999	53.992	0.0003	141.602	119.999	18.002	0.0009
150	106.793	149.999	28.805	0.0006	85.203	149.999	43.198	0.0002	171.601	149.999	14.400	0.0007
180	136.787	179.999	24.007	0.0005	115.193	179.999	36.004	0.0002	201.598	179.999	11.999	0.0006
210	166.794	209.999	20.574	0.0004	145.191	209.999	30.862	0.0002	231.598	209.999	10.285	0.0005
240	196.808	239.999	17.997	0.0004	175.198	239.999	27.001	0.0001	261.599	239.998	9.000	0.0004
270	226.814	269.999	15.995	0.0004	205.208	269.999	23.997	0.0001	291.601	269.999	8.001	0.0004
300	256.807	299.999	14.398	0.0003	235.210	299.999	21.597	0.0001	321.602	299.999	7.201	0.0003
	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		133.4	0.0009	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		178.5	0.0003	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		21.1	0.001

ตารางที่ จ. 13 เปรียบเทียบผลการทดสอบ “ขนาด” ของสัญญาณที่มีอินเทอร์ฮาร์โมนิกปะปน ระหว่างวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris โดยใช้ข้อมูล แบบที่ 1 และการทดสอบที่ 3

ค่าจริง ขนาด (โวลต์)	อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 147 เฮิรตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 248 เฮิรตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 349 เฮิรตซ์			
	ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด	
	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH
10.0	7.9992	10	20.008	0.0004	9.0791	10	9.2091	0.0001	9.765	10.0001	23.9982	0.0027
20.0	15.9983	19.9999	20.008	0.0004	18.1582	20	9.2091	0.0001	19.5301	20.0001	23.9982	0.0027
30.0	23.9975	29.9999	20.0084	0.0004	27.2373	30	9.2091	0.0001	29.2951	30.0002	23.9982	0.0027
40.0	31.9966	39.9998	20.0084	0.0004	36.3164	40	9.2091	0.0001	39.0601	40.0002	23.9982	0.0027
50.0	39.9958	49.9998	20.0084	0.0004	45.3954	49.9999	9.2091	0.0001	48.8251	50.0003	23.9982	0.0027
60.0	47.9949	59.9997	20.0084	0.0004	54.4745	59.9999	9.2091	0.0001	58.5902	60.0004	23.9982	0.0027
70.0	55.9941	69.9997	20.0084	0.0004	63.5536	69.9999	9.2091	0.0001	68.3552	70.0004	23.9982	0.0027
80.0	63.9932	79.9997	20.0084	0.0004	72.6327	79.9999	9.2091	0.0001	78.1202	80.0005	23.9982	0.0027
90.0	71.9924	89.9996	20.0084	0.0004	81.7118	89.9999	9.2091	0.0001	87.8852	90.0006	23.9982	0.0027
100.0	79.9916	99.9996	20.0084	0.0004	90.7909	99.9999	9.2091	0.0001	97.6503	100.000	23.9982	0.0027
% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย			20.0	0.0004	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		9.2	0.0001	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		24.0	0.0027

ตารางที่ จ. 14 เปรียบเทียบผลการทดสอบ “มูมเฟส” ของสัญญาณที่มีอินเทอร์ฮาร์โมนิกปะปน ระหว่างวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris โดยใช้ข้อมูล แบบที่ 1 และการทดสอบที่ 3

ค่าจริง มูมเฟส (องศา)	อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 147 เฮิรตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 248 เฮิรตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 349 เฮิรตซ์			
	มูมเฟสที่คำนวณได้ (องศา)		% ความผิดพลาด		มูมเฟสที่คำนวณได้ (องศา)		% ความผิดพลาด		มูมเฟสที่คำนวณได้ (องศา)		% ความผิดพลาด	
	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH
90	25.2107	89.9997	71.9881	0.0004	46.8057	89.999	47.9936	0.0011	2.3497	0.0006	23.9982	0.0027
90	25.2107	89.9997	71.9881	0.0004	46.8057	89.999	47.9936	0.0011	2.3497	0.0006	23.9982	0.0027
90	25.2107	89.9997	71.9881	0.0004	46.8057	89.999	47.9936	0.0011	2.3497	0.0006	23.9982	0.0027
90	25.2107	89.9997	71.9881	0.0004	46.8057	89.999	47.9936	0.0011	2.3497	0.0006	23.9982	0.0027
90	25.2107	89.9997	71.9881	0.0004	46.8057	89.999	47.9936	0.0011	2.3497	0.0006	23.9982	0.0027
90	25.2107	89.9997	71.9881	0.0004	46.8057	89.999	47.9936	0.0011	2.3497	0.0006	23.9982	0.0027
90	25.2107	89.9997	71.9881	0.0004	46.8057	89.999	47.9936	0.0011	2.3497	0.0006	23.9982	0.0027
90	25.2107	89.9997	71.9881	0.0004	46.8057	89.999	47.9936	0.0011	2.3497	0.0006	23.9982	0.0027
90	25.2107	89.9997	71.9881	0.0004	46.8057	89.999	47.9936	0.0011	2.3497	0.0006	23.9982	0.0027
90	25.2107	89.9997	71.9881	0.0004	46.8057	89.999	47.9936	0.0011	2.3497	0.0006	23.9982	0.0027
% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย			71.99	0.0004	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		47.99	0.0011	% ความผิดพลาด รวมเฉลี่ย		24	0.0027

ตารางที่ จ. 15 เปรียบเทียบผลการทดสอบ “ขนาด” ของสัญญาณที่มีอินเทอร์ฮาร์โมนิกปะปน ระหว่างวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris โดยใช้ข้อมูล แบบที่ 2 และการทดสอบที่ 3

ค่าจริง ขนาด (โวลต์)	อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 147 เฮิรตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 248 เฮิรตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 349 เฮิรตซ์			
	ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด	
	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH
50	39.9991	49.9998	20.0017	0.0004	45.3917	49.9999	9.2166	0.0001	48.8224	50.0003	2.3551	0.0006
50	39.9928	49.9998	20.0145	0.0004	45.3917	49.9999	9.2165	0.0001	48.8235	50.0003	2.3529	0.0006
50	39.9958	49.9998	20.0084	0.0004	45.3954	49.9999	9.2091	0.0001	48.8251	50.0003	2.3497	0.0006
50	40.0051	49.9998	19.9897	0.0004	45.3992	49.9999	9.2017	0.0001	48.8256	50.0003	2.3487	0.0006
50	40.0115	49.9998	19.977	0.0004	45.3992	49.9999	9.2017	0.0001	48.8245	50.0003	2.3509	0.0006
50	40.0085	49.9998	19.983	0.0004	45.3954	49.9999	9.2091	0.0001	48.8229	50.0003	2.3541	0.0006
50	39.9991	49.9998	20.0017	0.0004	45.3917	49.9999	9.2166	0.0001	48.8224	50.0003	2.3551	0.0006
50	39.9928	49.9998	20.0145	0.0004	45.3917	49.9999	9.2165	0.0001	48.8235	50.0003	2.3529	0.0006
50	39.9958	49.9998	20.0084	0.0004	45.3954	49.9999	9.2091	0.0001	48.8251	50.0003	2.3497	0.0006
50	40.0051	49.9998	19.9897	0.0004	45.3992	49.9999	9.2017	0.0001	48.8256	50.0003	2.3487	0.0006
	% ความผิดพลาดรวม เฉลี่ย		20.00	0.0004	% ความผิดพลาดรวม เฉลี่ย		9.21	0.0001	% ความผิดพลาดรวม เฉลี่ย		2.35	0.0006

ตารางที่ จ. 16 เปรียบเทียบผลการทดสอบ “มูมเฟส” ของสัญญาณที่มีอินเทอร์ฮาร์โมนิกปะปน ระหว่างวิธีผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และวิธีฟังก์ชันหน้าต่างแบบ Blackman-Harris โดยใช้ข้อมูล แบบที่ 2 และการทดสอบที่ 3

ค่าจริง มูมเฟส (องศา)	อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 147 เฮิรตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 248 เฮิรตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 349 เฮิรตซ์			
	มูมเฟสที่คำนวณได้ (องศา)		% ความผิดพลาด		มูมเฟสที่คำนวณได้ (องศา)		% ความผิดพลาด		มูมเฟสที่คำนวณได้ (องศา)		% ความผิดพลาด	
	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH
30	325.187	29.9997	983.958	0.0011	346.797	29.999	1055.99	0.0032	8.4006	29.9976	71.9981	0.008
60	355.197	59.9997	491.996	0.0005	16.803	59.999	71.9949	0.0016	38.402	59.9976	35.9967	0.004
90	25.2107	89.9997	71.9881	0.0004	46.8057	89.999	47.9936	0.0011	68.4016	89.9976	23.9982	0.0027
120	55.2135	119.999	53.9887	0.0003	76.803	119.999	35.9975	0.0008	98.3998	119.997	18.0002	0.002
150	85.2033	149.999	43.1978	0.0002	106.797	149.999	28.8016	0.0006	128.398	149.997	14.4011	0.0016
180	115.190	179.999	36.0054	0.0002	136.794	179.999	24.0028	0.0005	158.398	179.997	12.0007	0.0013
210	145.187	209.999	30.8631	0.0002	166.797	209.999	20.5726	0.0005	188.400	209.997	10.2854	0.0011
240	175.197	239.999	27.0009	0.0001	196.803	239.999	17.9987	0.0004	218.402	239.997	8.9992	0.001
270	205.210	269.999	23.996	0.0001	226.805	269.999	15.9979	0.0004	248.401	269.997	7.9994	0.0009
300	235.213	299.999	21.5955	0.0001	256.803	299.999	14.399	0.0003	278.399	299.997	7.2001	0.0008
	% ความผิดพลาดรวม เฉลี่ย		178.46	0.0003	% ความผิดพลาดรวม เฉลี่ย		133.4	0.0009	% ความผิดพลาดรวม เฉลี่ย		21.1	0.002

ตารางที่ จ. 17 เปรียบเทียบผลการทดสอบ “ขนาด” ของสัญญาณที่มีจำนวนฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้นชั้นละ
หนึ่งส่วนประกอบ

		ชุดที่ 1 ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ความถี่ 150 เฮิร์ตซ์				ชุดที่ 2 ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ความถี่ 250 เฮิร์ตซ์				ชุดที่ 3 ฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 ความถี่ 350 เฮิร์ตซ์			
จำนวน ฮาร์มอนิก	ค่าจริง ขนาด (โวลต์)	ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด	
		FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH
1	5.0	5.00	5.0001	0.00	0.0021	5.00	5.0001	0.00	0.0021	5.00	5.0001	0.00	0.0021
2	5.0	5.00	5.0001	0.00	0.0021	5.00	5.0001	0.00	0.0021	5.00	5.0001	0.00	0.0021
3	5.0	5.00	5.0001	0.00	0.0021	5.00	5.0001	0.00	0.0021	5.00	5.0001	0.00	0.0021
4	5.0	5.00	5.0001	0.00	0.0021	5.00	5.0001	0.00	0.0021	5.00	5.0001	0.00	0.0021
5	5.0	5.00	5.0001	0.00	0.0021	5.00	5.0001	0.00	0.0021	5.00	5.0001	0.00	0.0021
6	5.0	5.00	5.0001	0.00	0.0021	5.00	5.0001	0.00	0.0021	5.00	5.0001	0.00	0.0021
7	5.0	5.00	5.0001	0.00	0.0021	5.00	5.0001	0.00	0.0021	5.00	5.0001	0.00	0.0021
8	5.0	5.00	5.0001	0.00	0.0021	5.00	5.0001	0.00	0.0021	5.00	5.0001	0.00	0.0021
9	5.0	5.00	5.0001	0.00	0.0021	5.00	5.0001	0.00	0.0021	5.00	5.0001	0.00	0.0021
10	5.0	5.00	5.0001	0.00	0.0021	5.00	5.0001	0.00	0.0021	5.00	5.0001	0.00	0.0021
		% ความผิดพลาดรวมเฉลี่ย		0.0	0.0021	% ความผิดพลาดรวมเฉลี่ย		0.0	0.0021	% ความผิดพลาดรวมเฉลี่ย		0.0	0.0021

ตารางที่ จ. 18 เปรียบเทียบผลการทดสอบ “มูมเฟส” ของสัญญาณที่มีจำนวนฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้นชั้น
ละหนึ่งส่วนประกอบ

		ชุดที่ 1 ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ความถี่ 150 เฮิร์ตซ์				ชุดที่ 2 ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ความถี่ 250 เฮิร์ตซ์				ชุดที่ 3 ฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 ความถี่ 350 เฮิร์ตซ์			
จำนวน ฮาร์มอนิก	ค่าจริง ขนาด (โวลต์)	ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด	
		FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH
1	60.0	60.00	59.994	0.00	0.0086	60.00	59.994	0.00	0.0086	60.00	59.994	0.00	0.0086
2	60.0	60.00	59.994	0.00	0.0086	60.00	59.994	0.00	0.0086	60.00	59.994	0.00	0.0086
3	60.0	60.00	59.994	0.00	0.0086	60.00	59.994	0.00	0.0086	60.00	59.994	0.00	0.0086
4	60.0	60.00	59.994	0.00	0.0086	60.00	59.994	0.00	0.0086	60.00	59.994	0.00	0.0086
5	60.0	60.00	59.994	0.00	0.0086	60.00	59.994	0.00	0.0086	60.00	59.994	0.00	0.0086
6	60.0	60.00	59.994	0.00	0.0086	60.00	59.994	0.00	0.0086	60.00	59.994	0.00	0.0086
7	60.0	60.00	59.994	0.00	0.0086	60.00	59.994	0.00	0.0086	60.00	59.994	0.00	0.0086
8	60.0	60.00	59.994	0.00	0.0086	60.00	59.994	0.00	0.0086	60.00	59.994	0.00	0.0086
9	60.0	60.00	59.994	0.00	0.0086	60.00	59.994	0.00	0.0086	60.00	59.994	0.00	0.0086
10	60.0	60.00	59.994	0.00	0.0086	60.00	59.994	0.00	0.0086	60.00	59.994	0.00	0.0086
		% ความผิดพลาดรวมเฉลี่ย		0.0	0.0086	% ความผิดพลาดรวมเฉลี่ย		0.0	0.0086	% ความผิดพลาดรวมเฉลี่ย		0.0	0.0086

ตารางที่ จ. 19 เปรียบเทียบผลการทดสอบ “ขนาด” ของสัญญาณที่มีจำนวนอินเทอร์ฮาร์โมนิกเพิ่มขึ้นชั้นละหนึ่งส่วนประกอบ

จำนวนฮาร์โมนิก	ค่าจริงขนาด (โวลต์)	อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 57 เฮิร์ตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 117 เฮิร์ตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 134 เฮิร์ตซ์			
		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด	
		FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH
1	5.0	4.7915	5.0	4.1706	0.0	4.9867	4.9999	0.2652	0.0007	4.9473	4.9999	1.0543	0.0007
2	5.0	4.792	5.0	4.1606	0.0	5.0031	4.9999	0.0623	0.0007	4.9429	4.9999	1.1412	0.0007
3	5.0	4.7924	5.0	4.1514	0.0	5.0113	4.9999	0.2268	0.0007	4.9431	4.9999	1.1383	0.0007
4	5.0	4.7898	5.0	4.2036	0.0	5.0099	4.9999	0.1972	0.0007	4.9420	4.9999	1.1602	0.0007
5	5.0	4.7891	5.0	4.2172	0.0	5.0109	4.9999	0.2175	0.0007	4.9438	4.9999	1.1247	0.0007
6	5.0	4.7893	5.0	4.2144	0.0	5.0113	4.9999	0.2253	0.0007	4.9442	4.9999	1.1151	0.0007
7	5.0	4.7895	5.0	4.2108	0.0	5.0116	4.9999	0.2315	0.0007	4.9446	4.9999	1.1075	0.0007
8	5.0	4.7893	5.0	4.2144	0.0	5.0117	4.9999	0.2332	0.0007	4.9448	4.9999	1.1043	0.0007
9	5.0	4.7893	5.0	4.2134	0.0	5.0117	4.9999	0.2339	0.0007	4.9448	4.9999	1.1037	0.0007
10	5.0	4.7894	5.0	4.2125	0.0	5.0117	4.9999	0.2349	0.0007	4.9449	4.9999	1.1027	0.0007
		% ความผิดพลาดรวมเฉลี่ย		4.2	0.0	% ความผิดพลาดรวมเฉลี่ย		0.0	0.0007	% ความผิดพลาดรวมเฉลี่ย		1.1	0.0007

ตารางที่ จ. 20 เปรียบเทียบผลการทดสอบ “มูมเฟส” ของสัญญาณที่มีจำนวนอินเทอร์ฮาร์โมนิกเพิ่มขึ้นชั้นละหนึ่งส่วนประกอบ

จำนวนฮาร์โมนิก	ค่าจริงขนาด (โวลต์)	อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 57 เฮิร์ตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 117 เฮิร์ตซ์				อินเทอร์ฮาร์โมนิก ความถี่ 134 เฮิร์ตซ์			
		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด		ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		% ความผิดพลาด	
		FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH	FFT	BH
1	60.0	31.21	59.998	47.976	0.003	67.198	59.998	11.997	0.0021	74.398	59.998	23.996	0.0019
2	60.0	31.215	59.998	47.973	0.003	67.339	59.999	12.232	0.0017	74.654	59.988	24.424	0.002
3	60.0	31.231	59.998	47.946	0.003	67.392	59.999	12.320	0.0014	74.786	59.998	24.643	0.002
4	60.0	31.251	59.998	47.913	0.003	67.439	59.999	12.399	0.0014	74.846	59.998	24.743	0.002
5	60.0	31.265	59.998	47.890	0.003	67.464	59.999	12.440	0.0014	74.874	59.998	24.790	0.0019
6	60.0	31.267	59.998	47.887	0.003	67.465	59.999	12.442	0.0014	74.875	59.998	24.718	0.0019
7	60.0	31.267	59.998	47.887	0.003	67.464	59.999	12.440	0.0014	74.873	59.998	24.789	0.0019
8	60.0	31.269	59.998	47.883	0.003	67.468	59.999	12.447	0.0014	74.877	59.998	24.795	0.0019
9	60.0	31.269	59.998	47.883	0.003	67.467	59.999	12.446	0.0014	74.876	59.998	24.794	0.0019
10	60.0	31.269	59.998	47.884	0.003	67.467	59.999	12.445	0.0014	74.876	59.998	24.794	0.0019
		% ความผิดพลาดรวมเฉลี่ย		47.5	0.003	% ความผิดพลาดรวมเฉลี่ย		12.4	0.0014	% ความผิดพลาดรวมเฉลี่ย		24.7	0.0019

ตารางที่ จ. 21 เปรียบเทียบผลการทดสอบ “ขนาด” ของสัญญาณเมื่อมีฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก

ความถี่	ขนาดจริง (โวลต์)	ขนาดที่คำนวณได้ (โวลต์)		เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด	
		FFT	BH	FFT	BH
25	10	9.96	10.00	0.38	0.00
50	100	99.99	100.00	0.01	0.00
104	4.5	3.08	4.50	31.53	0.00
114	40	33.53	40.00	16.17	0.00
115	2	3.73	2.00	86.34	0.01
116	1	1.57	1.00	56.99	0.00
150	11.4	11.45	11.40	0.48	0.00
250	6.5	6.50	6.50	0.02	0.00
297	1.76	1.42	1.76	19.56	0.00
300	5	5.03	5.00	0.56	0.00
350	15	15.01	15.00	0.05	0.00
450	7.5	7.50	7.50	0.06	0.00
553	2.5	2.00	2.50	19.94	0.00
550	7.5	7.54	7.50	0.54	0.00
650	5.5	5.50	5.50	0.02	0.00
750	3.5	3.50	3.50	0.00	0.00
846	2	1.33	2.00	33.75	0.00
850	1.12	1.15	1.12	2.44	0.00
933	2.2	2.19	2.20	0.26	0.00
950	1	1.00	1.00	0.27	0.00
		เปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาดรวมเฉลี่ย		13.47	0.0013

ตารางที่ จ. 22 เปรียบเทียบผลการทดสอบ “มูมเฟส” ของสัญญาณเมื่อมีฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก

ความถี่	มูมจริง (องศา)	มูมที่คำนวณได้ (องศา)		เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด	
		FFT	BH	FFT	BH
25	30	30.11	30.00	0.36	0.01
50	90	90.03	90.00	0.03	0.00
104	50	140.15	50.00	180.30	0.00
114	79	21.28	79.00	73.06	0.00
115	90	36.58	89.95	59.36	0.05
116	120	61.37	119.99	48.85	0.01
150	20	20.02	20.00	0.08	0.00
250	120	119.92	120.00	0.07	0.00
297	90	25.30	90.00	71.89	0.00
300	75	74.67	75.00	0.45	0.00
350	50	50.00	50.00	0.01	0.00
450	79	78.99	79.00	0.01	0.00
553	50	114.73	50.00	129.47	0.00
550	79	79.20	79.00	0.25	0.00
650	50	49.99	50.00	0.02	0.00
750	100	99.99	100.00	0.01	0.00
846	150	63.59	150.00	57.61	0.00
850	30	30.88	30.00	2.94	0.01
933	160	152.73	160.00	4.54	0.00
950	90	89.99	90.00	0.01	0.00
		เปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาดรวมเฉลี่ย		31.47	0.005

ภาคผนวก ฉ

คุณสมบัติเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้าสำหรับเปรียบเทียบผลในงานวิจัย

ในงานวิจัยการพัฒนาเครื่องมือวัดและซอฟต์แวร์วิเคราะห์ฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงต่ำนี้จำเป็นต้องมีเครื่องมือวัดสำหรับเปรียบเทียบผลการทดสอบเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้น ซึ่งเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้าที่นำมาใช้สำหรับเป็นมาตรฐานการวัดคือ เครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้า Power VISA รุ่น 440 ของบริษัท DRANETZ ดังรูปที่ ฉ. 1 โดยคุณสมบัติของเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้าที่กล่าวมามีรายละเอียดดังนี้

1. ช่องสัญญาณแรงดันขาเข้า 4 ช่องสัญญาณ รับแรงดันสูงสุด 1-600 Vrms
2. ช่องสัญญาณกระแสขาเข้า 4 ช่องสัญญาณ รับกระแสสูงสุด 1-6000 Arms
3. จำนวนอัตราสุ่มข้อมูลในหนึ่งรูปคลื่นสัญญาณเท่ากับ 256 จุด (256 sample/cycle)
4. จำนวนบิตคอนเวอร์เตอร์ A/D เท่ากับ 16 บิต
5. มีคุณสมบัติของเครื่องมือวัดตรงตามมาตรฐาน IEEE1159 IEC61000-4-30 และ EN50160
6. ใช้มาตรฐาน IEC 61000-4-7 อ้างอิงสำหรับวิเคราะห์ปริมาณทางฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิก
7. สามารถวัดและคำนวณดัชนีที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิกได้ถึงลำดับที่ 63



ภาพที่ ฉ. 1 เครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้า Power VISA รุ่น 440 ของบริษัท DRANETZ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชไมพร ตัณฑติลก เกิดเมื่อวันที่ 11 พฤศจิกายน 2531 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ วิทยาเขตรังสิต เมื่อปี พ.ศ. 2553 จากนั้นได้เข้าทำงานที่บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด จากนั้นเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทที่ ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 2555

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ชื่อ “Development of a Measuring Device and Software for Measurement of Electric Power Quantities Based on IEEE Standard 1459-2010” ซึ่งวารสาร International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2013/2nd) สถานที่จัด ณ. เมืองกู่หยลีน ประเทศจีนในวันที่ 19 – 21 เมษายน 2556

ได้รับทุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในภาคการศึกษาที่ 2 ปีการศึกษา 2555 จนถึง ภาคการศึกษาที่ 2 ปี 2556