การพัฒนาเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่สามารถตรวจจับทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์และแรงดันตกชั่วขณะได้

นายสกลพงษ์ บูรณะวิทย์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A POWER QUALITY METER CAPABLE OF DETECTING HARMONIC AND VOLTAGE SAG SOURCE DIRECTIONS

Mr. Sakonpong Buranawit

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2008
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่สามารถตรวจจับทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์และแรงดันตกชั่วขณะได้
โดย	นาย สกลพงษ์ บูรณะวิทย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัศมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. ธวัชชัย เตชัสอนันต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลารัศมี)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติพันธุ์ เตชะกิตติโรจน์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สกลพงษ์ บูรณะวิทย์ : การพัฒนาเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่สามารถตรวจจับทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์และแรงดันตกชั่วขณะได้. (DEVELOPMENT OF A POWER QUALITY METER CAPABLE OF DETECTING HARMONIC AND VOLTAGE SAG SOURCE DIRECTIONS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. เอกชัย ลีลารัศมี, 105 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติพิเศษ คือสามารถตรวจจับทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์และแรงดันตกชั่วขณะได้ โครงสร้างหลักของเครื่องประกอบไปด้วย บอร์ดทดลองชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล TMS320C6711 ทำหน้าที่วิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพไฟฟ้าจากสัญญาณที่สุ่มได้จากชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล ADS8364 ความละเอียด 16 บิต มีอัตราสุ่มตัวอย่างสูงสุด 250 ksps , บอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ ATMEGA 128 ทำหน้าที่บันทึกข้อมูลลงหน่วยความจำ SD Card, รับคำสั่งต่างๆ จากผู้ใช้ และเป็นตัวกลางในการส่งผ่านข้อมูลไปแสดงผลบนโปรแกรมประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (Graphic User Interface, GUI) ส่วนสุดท้ายคือโปรแกรมประสานกราฟิกกับผู้ใช้ มีหน้าที่แสดงผลข้อมูล รูปคลื่นและพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้ ซึ่งพัฒนาขึ้นจากโปรแกรม Matlab การทดสอบวัดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้า จะทำการสอบเทียบกับเครื่องจ่ายโหลดพลังงานเสมือนและเครื่องวัดคลื่นแรงดันไฟฟ้า Fluke 199C การทดสอบหาทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์จะเปรียบเทียบผลการหาทิศด้วยวิธีพิจารณาเครื่องหมายความต้านทานวิกฤต (CI) กับเครื่องหมายกำลังไฟฟ้าขณะนั้น $\overline{p_h}$ การทดสอบหาทิศทางของแหล่งกำเนิดแรงดันตกชั่วขณะจะพิจารณาโดยการพิจารณาเครื่องหมายของความต้านทานขณะไม่เกิดการรบกวน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต สกลพงษ์ บูรณะวิทย์

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2551

5070625121 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: POWER QUALITY METER / POWER QUALITY INSTRUMENT / HARMONIC SOURCE DETECTION / VOLTAGE SAG SOURCE DETECTION

SAKONPONG BURANAWIT : DEVELOPMENT OF A POWER QUALITY METER CAPABLE OF DETECTION HARMONIC AND SAG SOURCE DIRECTIONS.

THESIS ADVISOR : ASSOC PROF. EKACHAI LEELARASMEE, Ph.D., 105 pp.

This thesis presents a development of a power quality meter capable of detection harmonic and sag source directions that mainly consists of 3 parts. The first part is a TMS320C6711 Digital Signal Processing Board, which receives the voltage and current data from ADS8364 a 16 bit 250 ksps analog to digital converter and calculates all related power quality calculations. The second part is an ATMEGA 128 microcontroller board, which logs power quality data in an SD card memory, displays data on an an LCD-display, receive user command from keypad and transmit data from DSP board to GUI computer program. The third part is a GUI computer program that is developed by Matlab program. Experiments are done and the results are compared with artificial power energy source and Fluke Scope-meter 199C for testing the accuracy and performance. The detection of harmonic source direction is found by using critical impedance and instantaneous Power methods to compare the results between them. Finally, sag source detection is done by using the resistance sign based method.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department: Electrical Engneering Student's Signature Sakonpong Buranawit

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2008

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัศมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ซึ่งได้ให้คำแนะนำและให้การสนับสนุนการวิจัยเป็นอย่างดีตลอดมา อาจารย์ สุวิทย์ นาคพีระยุทธ ซึ่งได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอล อาจารย์ ดร. ธวัชชัย เตชัสอนันต์ ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ และประสบการณ์เกี่ยวกับการวัดคุณภาพไฟฟ้า

ขอขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความรู้และประสบการณ์ดีๆ ทั้งทางด้านวิชาการด้านสังคมและอื่นๆแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบสมองกลฝังตัวและวงจรรวมทุกคน สำหรับความช่วยเหลือ คำแนะนำและความเป็นมิตรที่มีให้มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา อันเป็นที่เคารพรัก ที่อบรมสั่งสอนเลี้ยงดู ให้การสนับสนุนในทุกๆด้านและให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าตลอดเวลา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญภาพ ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1. แนวเหตุผลในการทำวิทยานิพนธ์ 1

1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย 1

1.3. ขอบเขตของการวิจัย 2

1.4. วิธีการดำเนินการวิจัย 2

1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

1.6. ลำดับขั้นตอนในงานวิจัย 3

บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง 4

2.1. ปัญหาคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality Problem) 4

2.1.1. การเปลี่ยนแปลงชั่วขณะ (Transient) 4

2.1.2. แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag) 6

2.1.3. ฮาร์มอนิกส์ (Harmonics) 7

2.1.4. แรงดันกระเพื่อม (Voltage Fluctuation) 9

2.1.5. ไฟกะพริบ (Flickers) 10

2.2. เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality Meter) 11

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

2.2.1. ประเภทของเครื่องวัด 11

2.2.2. ข้อกำหนดเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า.....11

2.2.3. โครงสร้างเครื่องวัดคุณภาไฟฟ้า (Power Quality Meter Architecture) 12

2.3. การวัดและวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า.....14

2.3.1. การวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกส์ 14

2.3.2. การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์จากความต้านทานวิกฤติ 16

2.3.3. การพิจารณาทิศทางแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์จากกำลังไฟฟ้าขณะนั้น (Harmonic Power Detection Based on Instantaneous Active Power).....20

2.3.4. การวิเคราะห์การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดแรงดันตกชั่วขณะจากเครื่องหมายความต้านทานขณะไม่เกิดการรบกวน (A Resistance Sign-Based Method).....21

2.3.5. การวิเคราะห์การเกิดไฟกะพริบ.....22

บทที่ 3 รายละเอียดด้านฮาร์ดแวร์ 25

3.1. โครงสร้างของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า 26

3.2. หน่วยประมวลและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ 26

3.2.1. ชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล 27

3.2.2. บอร์ดทดลองชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล.....28

3.2.3. ไมโครคอนโทรเลอร์.....29

3.2.4. ชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล 31

3.2.5. ชิพฐานเวลาจริง (Real-time Clock) 32

3.2.6. วงจรปรับขนาดสัญญาณ (Signal Condition Circuit).....33

3.2.7. ส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ มีดังนี้.....34

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

3.3. ฮาร์ดแวร์ที่พัฒนาขึ้น....37

บทที่ 4 รายละเอียดด้านซอฟต์แวร์....38

4.1. โปรแกรมควบคุมบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอล....38

4.1.1. การทำงานของโปรแกรมควบคุมบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอล....39

4.1.2. การเริ่มต้นการทำงานบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอลและชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล....41

4.1.3. การติดต่อกับชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล....42

4.1.4. การติดต่อและส่งข้อมูลไปยังไมโครคอนโทรเลอร์ ATMEGA 128....43

4.1.5. โปรแกรมวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า....43

4.2. โปรแกรมบนไมโครคอนโทรเลอร์....47

4.2.1. การทำงานของโปรแกรมบนไมโครคอนโทรเลอร์....48

4.2.2. การเริ่มต้นการทำงานไมโครคอนโทรเลอร์ ATMEGA 128....49

4.2.3. โปรแกรมบันทึกข้อมูลลงหน่วยความจำ SD Card....49

4.2.4. โปรแกรมรับคำสั่งจากแผงแป้นพิเศษ (Keypad)....50

4.3. โปรแกรมบนคอมพิวเตอร์....51

4.3.1. โครงสร้างของโปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้....51

4.3.2. การวิเคราะห์ไฟกะพริบ....51

4.3.3. การทำงานของโปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้....53

บทที่ 5 ผลการทดลองและการทดสอบ....56

5.1. การทดสอบการวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกส์....57

5.1.1. การทดสอบวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์ในสัญญาณแรงดันไฟฟ้าสลับ....58

5.1.2. การทดสอบวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์ในสัญญาณกระแสไฟฟ้าสลับ....65

5.2. การทดสอบวิเคราะห์หาทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ 73
5.2.1. กรณีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อยู่ทางด้านผู้ใช้ไฟฟ้า 74
5.2.2. กรณีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อยู่ทางด้านแหล่งจำหน่ายไฟ 77
5.2.3. วิเคราะห์ผลการใช้อัลกอลริธึมวิเคราะห์หาทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ 78
5.3. การทดสอบวิเคราะห์และหาทิศของแหล่งกำเนิดแรงดันตกชั่วขณะ 80
5.4. การทดสอบวัดการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะที่เกิดในช่วงความถี่ต่ำ 83
5.5. การทดสอบวิเคราะห์ไฟกะพริบ 85
5.6. การทดสอบวิเคราะห์พารามิเตอร์อื่นๆ 87
5.6.1. การทดสอบวัดกำลังจริง 88
5.6.2. การทดสอบวัดกำลังปรากฏ 88
5.6.3. การทดสอบวัดกำลังเสมือน 89
5.6.4. การทดสอบวัดตัวประกอบกำลัง 89
บทที่ 6 ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ 91
6.1. ข้อสรุป 91
6.2. ข้อเสนอแนะ 92
รายการอ้างอิง 94
ภาคผนวก 96
ภาคผนวก ก รูปวงจรซึ่งออกแบบสำหรับงานวิจัยนี้ 97
ภาคผนวก ข บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 100
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 105

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงเครื่องหมาย $\overline{p_h}$ และ Q_h กรณีแหล่งจ่าย 220V AC 76

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงเครื่องหมาย $\overline{p_h}$ และ Q_h กรณีแหล่งจ่าย เป็นเครื่องสำรองไฟ.....77

ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงเครื่องหมาย $\overline{p_h}$ และ Q_h กรณีแหล่งจ่ายUPS จ่ายโหลดไม่เชิงเส้น.....80

ตารางที่ 5.4 ตารางเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแรงดันจากเครื่องวัดกับ
การคำนวณ.....81

ตารางที่ 5.5 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์เครื่องหมาย Z_eที่จุดวัด M_1 และ M_2 83

ตารางที่ 5.6 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์หาดัชนีไฟกะพริบ P_{st} 86

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2-1 รูปคลื่นโดยทั่วไปของสัญญาณไฟฟ้าที่ถูกรบกวน....4

รูปที่ 2-2 รูปคลื่นการเปลี่ยนแปลงกระแสชั่วขณะ....5

รูปที่ 2-3 รูปคลื่นการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดแบบแกว่งในช่วงความถี่ต่ำ....6

รูปที่ 2-4 รูปคลื่นการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ....6

รูปที่ 2-5 รูปคลื่นสัญญาณความถี่หลักมูลและฮาร์มอนิกส์ที่ 2 และ 3....7

รูปที่ 2-6 ตัวอย่างการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นที่เกิดจากการรวมกันของสัญญาณ ความถี่หลักมูลกับองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์อันดับสองและสาม....8

รูปที่ 2-7 รูปคลื่นกระแสที่ผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ (a) และ ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัม (b)....9

รูปที่ 2-8 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันกระเพื่อม อันเป็นผลมาจากการใช้งาน Arc Furnace....9

รูปที่ 2-9 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันไฟกะพริบ....10

รูปที่ 2-10 โครงสร้างโดยทั่วไปของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า....13

รูปที่ 2-11หม้อแปลงกระแสโดยทั่วไปและวงจรเปลี่ยนสัญญาณกระแสเป็นแรงดัน....13

รูปที่ 2-12 วงจรสมมูล Norton (a) และ Thevenin (b) ระหว่างผู้ใช้กับแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า....16

รูปที่ 2-13 การพิจารณาแรงดันที่จุดวัดบนสายความต้านทาน (Impedance Line) jX....18

รูปที่ 2-14 บล็อกไดอะแกรมแสดงการวิเคราะห์การตรวจวัดกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิกส์....20

รูปที่ 2-15 ระบบไฟฟ้าสมมูล (Equivalent System)....21

รูปที่ 2-16 วงจรไฟฟ้าสมมูล (Equivalent Circuit)....21

รูปที่ 2-17 บล็อกไดอะแกรมเครื่องวัดสัญญาณไฟกะพริบตามมาตรฐาน IEC 61000-4-15....23

รูปที่ 3-1 แผนภาพการใช้งานเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า....25

รูปที่ 3-2 โครงสร้างภายในเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า....26

รูปที่ 3-3 โครงสร้างภายในของชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล TMS320C6711.....27

รูปที่ 3-4 การเชื่อมต่อระหว่างชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล TMS320C6711 กับ
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ 28

รูปที่ 3-5 บอร์ดทดลองชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล TMS320C6711 29

รูปที่ 3-6 โครงสร้างภายในของชิพไมโครคอนโทรเลอร์ ATMEGA128.....30

รูปที่ 3-7 การเชื่อมต่อระหว่างชิพไมโครคอนโทรเลอร์ ATMEGA128 กับ
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ 31

รูปที่ 3-8 โครงสร้างภายในของชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล ADS8364.....31

รูปที่ 3-9 การเชื่อมต่อระหว่างชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล ADS8364 กับชิพ
ประมวลผลสัญญาณดิจิตอลในโหมดควบคุมจากฮาร์ดแวร์.....32

รูปที่ 3-10 โครงสร้างภายในของชิพฐานเวลาจริง DS1307 32

รูปที่ 3-11 วงจรแบ่งแรงดันสำหรับวัดแรงดันในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย.....33

รูปที่ 3-12 วงจรวัดกระแสของระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย.....33

รูปที่ 3-13 จอแอลซีดี 16X4 34

รูปที่ 3-14 กราฟทดสอบความเป็นเชิงเส้นในการวัดในช่วงกระแส 0-10 A 35

รูปที่ 3-15 แผงแป้นพิเศษ 35

รูปที่ 3-16 โครงสร้างภายในชิพเข้ารหัส MM7C922.....35

รูปที่ 3-17 หน่วยความจำ SD Card 36

รูปที่ 3-18 ตัวอย่างข้อมูลที่บันทึกลงในหน่วยความจำ SD Card.....36

รูปที่ 3-19 ฮาร์ดแวร์ภายในเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า 37

รูปที่ 4-1 โครงสร้างโปรแกรมบนบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอล.....38

รูปที่ 4-2 แผนผังการทำงานของโปรแกรมควบคุมบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอล.....39

หน้า

รูปที่ 4-3 แผนผังการเริ่มต้นการทำงานบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอลและ
ชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล 41
รูปที่ 4-4 แผนผังการทำงานของชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล 42
รูปที่ 4-5 แผนผังการรับส่งข้อมูลระหว่างชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอลกับ
ไมโครคอนโทรเลอร์.....43
รูปที่ 4-6 แผนผังการวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกส์ 44
รูปที่ 4-7 แผนผังการวิเคราะห์ปริมาณ P, Q, P. F., RMS 44
รูปที่ 4-8 การจัดเก็บข้อมูลสัญญาณการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ 45
รูปที่ 4-9 แผนผังโปรแกรมตรวจสอบการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ.....46
รูปที่ 4-10 แผนภาพการทำงานของมอดูล EDMA.....47
รูปที่ 4-11 โครงสร้างโปรแกรมบนบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ 47
รูปที่ 4-12 แผนผังโปรแกรมบนไมโครคอนโทรเลอร์.....48
รูปที่ 4-13 แผนผังโปรแกรมตรวจสอบคำสั่ง 48
รูปที่ 4-14 แผนผังการทำงานของโปรแกรมบันทึกข้อมูลลงหน่วยความจำ SD Card.....50
รูปที่ 4-15 แผนผังการทำงานของโปรแกรมอ่านค่าปุ่มจากแผงแป้นพิเศษ.....50
รูปที่ 4-16 โครงสร้างโปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้.....51
รูปที่ 4-17 แผนผังโปรแกรมวิเคราะห์หาดัชนี P_{st}.....52
รูปที่ 4-18 โปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ 53
รูปที่ 4-19 หน้าจอโปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ 53
รูปที่ 4-20 หน้าจอแสดงผลรูปคลื่นและแผนภาพเฟเซอร์ของแรงดัน (a)หนึ่งเฟส (b) สามเฟส 54
รูปที่ 4-21 หน้าจอแสดงผลรูปคลื่น, แผนภูมิแท่งฮาร์มอนิกส์ และ ข้อมูลที่ผ่านการวิเคราะห์
(a) แรงดัน (b) กระแส.....55

หน้า

รูปที่ 5-1 อุปกรณ์สอบเทียบ (a) เครื่องจ่ายโหลดพลังงานไฟฟ้าเสมือน (b) มิเตอร์อ้างอิง.....56

รูปที่ 5-2 เครื่องวัดคลื่นแรงดันไฟฟ้า Fluke 199C Scopemeter.....56

รูปที่ 5-3 เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า Dranetz BMI Power Visa.....57

รูปที่ 5-4 ระบบทดสอบเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า 57

รูปที่ 5-5 กราฟตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์บนโปรแกรม GUI 58

รูปที่ 5-6 หน้าจอแสดงผลการวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์จากมิเตอร์อ้างอิง.....58

รูปที่ 5-7 กราฟแสดงผลการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 2 59

รูปที่ 5-8 กราฟแสดงค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 2.....59

รูปที่ 5-9 กราฟแสดงผลการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 7 60

รูปที่ 5-10 กราฟแสดงค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 7.....60

รูปที่ 5-11 กราฟแสดงผลการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 13.....61

รูปที่ 5-12 กราฟแสดงค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 13.....61

รูปที่ 5-13 กราฟแสดงผลการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 17 62

รูปที่ 5-14 กราฟแสดงค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 17.....62

รูปที่ 5-15 กราฟแสดงผลการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 19 63

รูปที่ 5-16 กราฟแสดงค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 19.....63

รูปที่ 5-17 กราฟแสดงผลการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 25 64

รูปที่ 5-18 กราฟแสดงค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 25.....64

รูปที่ 5-19 กราฟเปรียบเทียบค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์ 65

รูปที่ 5-20 กราฟตัวอย่างรูปคลื่นกระแสและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์บนโปรแกรม GUI 66

รูปที่ 5-21 การวัดฮาร์มอนิกส์ในสัญญาณกระแสไฟฟ้าสลับที่ทางเข้าชิพ A/D ADS8364.....66

รูปที่ 5-22 กราฟแสดงผลการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ 2 67

หน้า

รูปที่ 5-23 กราฟแสดงค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ 2.....67

รูปที่ 5-24 กราฟแสดงผลการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 7.....68

รูปที่ 5-25 กราฟแสดงค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ 7.....68

รูปที่ 5-26 กราฟแสดงผลการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ 11.....69

รูปที่ 5-27 กราฟแสดงค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ 11.....69

รูปที่ 5-28 กราฟแสดงผลการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ18.....70

รูปที่ 5-29 กราฟแสดค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ 18 70

รูปที่ 5-30 กราฟแสดงผลการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ 25.....71

รูปที่ 5-31 กราฟแสดงค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ 25.....71

รูปที่ 5-32 กราฟเปรียบเทียบค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ของ
เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น.....72

รูปที่ 5-33 กราฟเปรียบเทียบค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ของ
เครื่องวัด Fluke 199C 73

รูปที่ 5-34 วงจรทดสอบกรณีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อยู่ทางด้านผู้ใช้ไฟฟ้า.....74

รูปที่ 5-35 รูปคลื่นกระแสและแรงดัน กรณีจ่ายโหลดเครื่องสำรองไฟ.....74

รูปที่ 5-36 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสและแรงดัน กรณีจ่ายโหลดเครื่องสำรองไฟ 75

รูปที่ 5-37 รูปคลื่นกระแสและแรงดัน กรณีจ่ายโหลดหลอดไฟทังเสตนที่ต่ออยู่กับ
สวิตช์ไฟสูงไฟต่ำ 75

รูปที่ 5-38-ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสและแรงดัน กรณีจ่ายโหลด หลอดไฟทังเสตน
ที่ต่ออยู่กับสวิตช์ไฟสูงไฟต่ำ 75

รูปที่ 5-39 รูปคลื่นกระแสและแรงดัน กรณีจ่ายโหลดหลอดไฟเรืองแสง, จอแอลซีดี และ
โทรทัศน์.....76

หน้า

รูปที่ 5-40 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสและแรงดัน กรณีจ่ายโหลดหลอดไฟเรืองแสง, จอแอลซีดี และ โทรทัศน์ 76
รูปที่ 5-41 วงจรทดสอบกรณีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อยู่ทางด้านแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า 77
รูปที่ 5-42 รูปคลื่นกระแสและแรงดัน กรณี UPS จ่ายโหลดหลอดไฟทังเสตน 77
รูปที่ 5-43 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสและแรงดัน กรณี UPS จ่ายโหลดหลอดไฟทังเสตน..77
รูปที่ 5-44 วงจรประกอบการพิจารณา Q สำหรับการวิเคราะห์ อัลกอลริธึม CI....78
รูปที่ 5-45 รูปคลื่นกระแสและแรงดัน กรณี UPS จ่ายโหลดจอคอมพิเตอร์แอลซีดี....79
รูปที่ 5-46 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสและแรงดัน กรณี UPS จ่ายโหลด จอคอมพิวเตอร์แอลซีดี 79
รูปที่ 5-47 รูปคลื่นกระแสและแรงดัน กรณี UPS จ่ายโหลดหลอดไฟเรืองแสง....79
รูปที่ 5-48 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสและแรงดัน กรณี UPS จ่ายโหลดหลอดไฟเรืองแสง .80
รูปที่ 5-49 วงจรทดสอบวิเคราะห์และหาทิศทางของแหล่งกำเนิดแรงดันตกชั่วขณะ....80
รูปที่ 5-50 รูปคลื่นการเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่จุดวัด M1 และ M2....81
รูปที่ 5-51 กราฟเปรียบทียบร้อยละการเปลี่ยนแปลงแรงดัน 81
รูปที่ 5-52 กราฟค่า%ความผิดพลาดในการวัดดัชนีแรงดันตกชั่วขณะ 82
รูปที่ 5-53 รูปคลื่นการเกิดแรงดันตกชั่วขณะและการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่จุดวัด M1 และ M2....82
รูปที่ 5-54 การสุ่มจับสัญญาณไซน์แกว่งที่ความถี่ 7 kHz 84
รูปที่ 5-55 การสุ่มจับสัญญาณสามเหลี่ยมแกว่งที่ความถี่ 2 kHz 84
รูปที่ 5-56 การสุ่มจับสัญญาณสี่เหลี่ยมแกว่งที่ความถี่ 2 kHz....84
รูปที่ 5-57 สัญญาณกระแสของหลอดไฟ ขณะไม่เดินเครื่องสว่านมือ 84
รูปที่ 5-58 สัญญาณกระแส ขณะเดินเครื่องสว่านมือ 85
รูปที่ 5-59 สัญญาณกระแสขณะเดินเครื่องสว่านมือหลายครั้ง....85

หน้า

รูปที่ 5-60 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดัน 220VAC ในช่วงเวลา 10 นาที.....86

รูปที่ 5-61 รูปคลื่นแรงดัน 220VAC ที่ผ่านตัวกรองตามมาตรฐาน IEC61000-4-15.....87

รูปที่ 5-62 รูปคลื่นแรงดัน 220VAC ขณะจ่ายโหลดเครื่องเป่าลมร้อน ที่ผ่านตัวกรองตาม มาตรฐาน IEC61000-4-15.....87

รูปที่ 5-63 กราฟเปรียบเทียบค่า%ความผิดพลาดในการวัดกำลังจริง 88

รูปที่ 5-64 กราฟเปรียบเทียบค่า%ความผิดพลาดในการวัดกำลังปรากฏ 88

รูปที่ 5-65 กราฟเปรียบเทียบค่า%ความผิดพลาดในการวัดกำลังเสมือน.....89

รูปที่ 5-66 กราฟค่า%ความผิดพลาดในการวัดตัวประกอบกำลัง.....90

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1. แนวเหตุผลในการทำวิทยานิพนธ์

ปัญหาในระบบไฟฟ้า เช่น ไฟฟ้าดับ ไฟกะพริบ แรงดันตก ฯลฯ ส่งผลต่อความพอใจในการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าและสร้างความเสียหายต่อระบบไฟฟ้าโดยรวม ทำให้ผู้ผลิตและจำหน่ายไฟฟ้าจำเป็นต้องหาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น ปรากฏการณ์ธรรมชาติ (ฟ้าผ่า), การเกิดความผิดพร่องในระบบสายส่งและจำหน่าย, การสวิตชิ่งของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า, การใช้อุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นในโรงงานอุตสาหกรรม, การต่อลงดินไม่ถูกต้อง ฯลฯ และหาวิธีแก้ปัญหาต่อไปโดยการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า

การวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าเริ่มจากการใช้เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า วัดปริมาณที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพไฟฟ้า เช่น กำลังไฟฟ้า, ตัวประกอบกำลัง, ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ ฯลฯ จากนั้นจึงนำค่าที่วัดได้มาวิเคราะห์หาต้นเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น เมื่อทราบถึงต้นเหตุของปัญหาแล้วจึงดำเนินการแก้ไขปัญหาต่อไป ซึ่งโดยปกติจะต้องใช้บุคลากรที่มีความรู้ความสามารถ ในการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า ซึ่งทำได้ไม่สะดวกนัก ดังนั้นหากสามารถสร้างเครื่องวัดและวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าได้โดยอัตโนมัติ จะทำให้การวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าเป็นไปได้อย่างสะดวกและไม่ต้องอาศัยบุคลากรที่มีความรู้ความสามารถมาก มาวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า

ปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าบ่อยคือ การเกิดฮาร์มอนิกส์และแรงดันตกชั่วขณะ ดังนั้นการเพิ่มความสามารถในการหาทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์และแรงดันตกชั่วขณะให้เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า ณ จุดต่อเชื่อมระหว่างผู้ใช้ไฟฟ้ากับผู้ผลิตไฟฟ้า จะทำให้การวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าเพื่อหาสาเหตุของปัญหา ทำได้สะดวกยิ่งขึ้น

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ จึงนำเสนอการพัฒนาเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่มีความสามารถในการตรวจจับทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์และแรงดันตกชั่วขณะได้ ซึ่งจะต้องอาศัย ความรู้ทางด้านไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ไฟฟ้ากำลัง และการประมวลผลสัญญาณดิจิตอลมาใช้ประยุกต์เข้าด้วยกัน

1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสร้างเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่สามารถวัดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าโดยเฉพาะอย่างยิ่งการวิเคราะห์หาทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์และแรงดันตกชั่วขณะ นอกจากนี้ยังสามารถเก็บบันทึกข้อมูลได้

2. เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่สามารถวิเคราะห์ รูปคลื่นแรงดันและกระแสที่วัดอยู่ขณะนั้น หรือจากหน่วยความจำที่บันทึกไว้ เพื่อบอกลักษณะของปัญหาคุณภาพไฟฟ้า

1.3. ขอบเขตของการวิจัย

เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. ใช้กับระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย และ 1 เฟส 2 สาย
2. มีความแม่นยำในการวัดค่าแรงดันและกระแสตามมาตรฐาน IEC61000-4-30 [1]
3. มีพิกัดกระแส 10 A และ พิกัดแรงดัน 220 Vrms
4. อัตราการชักตัวอย่างสูงสุด 250 ksps, ความละเอียด 16 บิต
5. สามารถวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางคุณภาพไฟฟ้าดังนี้
   - วัดกำลังไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า
   - วิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ในสัญญาณไฟฟ้า 3 เฟส ได้ถึงลำดับที่ 50 โดยสามารถแสดงขนาดและเฟสของสัญญาณ แรงดัน และ กระแสในขณะที่ทำการวัด และสามารถแสดงค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส THD_I และของแรงดัน THD_V
   - วิเคราะห์หาค่าดัชนีของการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag)
   - วัดค่าพารามิเตอร์ของการเกิดไฟกะพริบ P_{st}
   - สามารถหาทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ และแรงดันตกชั่วขณะในระบบไฟฟ้า ที่จุดร่วมระหว่างผู้ใช้ไฟฟ้า (Customer) และผู้จำหน่ายไฟฟ้า (Utility) โดยแสดงเป็นทิศทางให้เห็นในเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า
6. มีหน่วยความจำเป็นแบบ SD card สำหรับบันทึกพารามิเตอร์ที่คำนวณได้
7. มีฐานเวลาจริง (Real time Clock) แสดงเวลาและวันที่ของพารามิเตอร์ที่วัด
8. สามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ผ่านทางจอแอลซีดี (LCD) ขนาด 4 บรรทัด บรรทัดละ 16 ตัวอักษร
9. มีโปรแกรมบนระบบปฏิบัติการวินโดว์สำหรับวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า สามารถดูรูปคลื่นและวิเคราะห์รูปคลื่นที่บันทึกไว้ในหน่วยความจำ หรือคลื่น ณ ขณะที่วัด

1.4. วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยออกแบบและสร้างเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าจะมีรายละเอียดดังนี้

1. หาความรู้ที่จำเป็นในการวิเคราะห์ ออกแบบ และสร้างเครื่อง
2. ออกแบบและสร้างตัวเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า

3. เขียนโปรแกรมวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าภายในชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล และโปรแกรมประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (GUI) โปรแกรมบนคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์หลังการประมวลผล (Post-processing Program)
4. รวบรวมผลการทดลอง, สรุปผล และ เขียนวิทยานิพนธ์

1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความรู้ในการออกแบบสร้างเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้า
2. ความรู้พื้นฐานในการวิเคราะห์ปัญหาคุณภาพไฟฟ้า และการวิเคราะห์ปัญหาในระบบไฟฟ้า
3. เรียนรู้และทดลองออกแบบระบบเครื่องวัดที่มีชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอลเป็นหน่วยประมวลกลางของอุปกรณ์
4. เพิ่มทักษะในการเขียนโปรแกรมภาษาซี, การความคุมการทำงานของโปรแกรมแบบเรียลไทม์ และการจัดการโปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าให้ทำงานได้แบบเวลาจริง (real time)
5. สามารถออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับการสร้างเครื่องมือวัด ที่ต้องคำนึงถึงความแม่นยำของข้อมูลที่วัดได้เป็นสำคัญ

1.6. ลำดับขั้นตอนในงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้จะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท โดยบทที่ 2 จะกล่าวถึง ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาสร้างเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า บทที่ 3 และบทที่ 4 จะนำเสนอข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าตามลำดับ บทที่ 5 จะกล่าวถึงการทดลองและการทดสอบใช้งานเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น และในบทที่ 6 จะกล่าวถึงข้อสรุปและข้อเสนอแนะของการวิจัยพัฒนาเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า

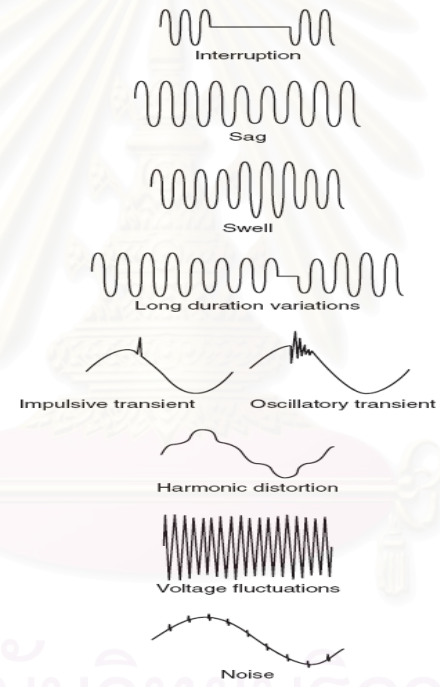
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1. ปัญหาคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality Problem)

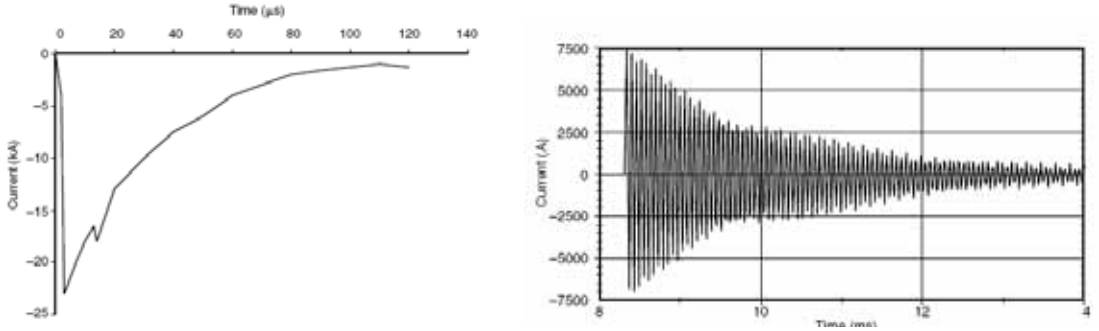
ปัญหาคุณภาพไฟฟ้า คือ ปัญหาการเบี่ยงเบนของแรงดัน, กระแส และความถี่ของระบบไฟฟ้า ที่ทำให้เกิดความเสียหายหรือความผิดพลาดของอุปกรณ์ไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2-1 ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับปัญหาคุณภาพไฟฟ้ามีหลายช่วงเวลา ตั้งแต่ช่วงเวลาที่สั้นมากเช่น การเกิดแรงดันเกินในช่วงทรานเซี้ยน (ไมโครวินาที) ไปจนถึงการหยุดของกระแสไฟเป็นเวลานาน เราสามารถจำแนกพารามิเตอร์ของคุณภาพไฟฟ้าเป็นข้อๆได้ดังนี้



รูปที่ 2-1 รูปคลื่นโดยทั่วไปของสัญญาณไฟฟ้าที่ถูกรบกวน [2]

2.1.1. การเปลี่ยนแปลงชั่วขณะ (Transient)

เป็นปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงในชั่วขณะหนึ่งของแหล่งจ่ายแรงดันหรือโหลดกระแส โดยแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ แบบกระชาก (Impulsive) และแบบแกว่ง (Oscillatory)



(a) *(b)*

รูปที่ 2-2 รูปคลื่นการเปลี่ยนแปลงกระแสชั่วขณะ [3]

2.1.1.1. **การเปลี่ยนแปลงชั่วขณะแบบกระชาก** (Impulsive Transients)

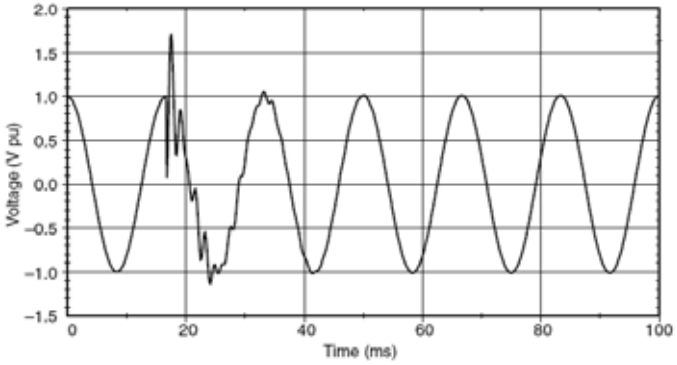
ดังแสดงในรูปที่ 2-2a เป็นปรากฏการณ์ที่แรงดันและกระแส มีค่าความชันในช่วงเวลาสั้นๆสูงมาก และกลับคืนสู่ภาวะคงตัว (Steady State) ที่ความถี่เดิม การเปลี่ยนแปลงนี้มีทิศทางเดียว (บวกหรือลบ) มีสาเหตุมาจากการเกิดฟ้าผ่า ซึ่งอาจเกิดโดยตรงหรือในบริเวณใกล้เคียง เป็นผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าได้รับความเสียหายจากการได้รับแรงดันไฟฟ้าเกิน มาตรฐาน IEEE 1159-1995 [4] ได้แบ่งประเภทของการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะแบบกระชาก (Impulsive Transient) ตามช่วงระยะเวลาการเกิดการเปลี่ยนแปลงไว้เป็น 3 ช่วงเวลาคือ

1. ช่วงนาโนวินาที (Nanosecond) มีช่วงระยะเวลาการเกิดน้อยกว่า 50 ns, ระยะเวลาที่ขึ้นสูงสุด 5 ns
2. ช่วงไมโครวินาที (Microsecond) มีช่วงระยะเวลาการเกิดในช่วง 50 ns – 1 ms, ระยะเวลาที่ขึ้นสูงสุด 1 s
3. ช่วงมิลลิวินาที (Millisecond) มีช่วงระยะเวลาในการเกิดมากกว่า 1 ms, ระยะเวลาที่ขึ้นสูงสุด 0.1 ms

2.1.1.2. **การเปลี่ยนแปลงชั่วขณะแบบแกว่ง** (Oscillatory Transients)

เป็นปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงแรงดันหรือกระแส ที่มีการเปลี่ยนขั้วของแรงดันหรือกระแส (บวกเป็นลบ หรือ ลบเป็นบวก) อย่างรวดเร็ว โดยมีสาเหตุมาจากการสวิตชิ่งของอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าเช่น การสวิตช์ตัวเก็บประจุ เป็นผลทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าหรือทำให้ฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าได้รับความเสียหาย มาตรฐาน IEEE 1159-1995 ได้แบ่งประเภทของการเกิดการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะแบบแกว่งตามความถี่ของการแกว่ง ดังนี้

1. ความถี่ต่ำ (Low Frequency) แกว่งที่ความถี่น้อยกว่า 5 kHz เกิดในช่วงระยะเวลา 0.3 ms ถึง 50 ms และมีขนาดระหว่าง 0 p.u. ถึง 4 p.u. ดังแสดงในรูปที่ 2-3



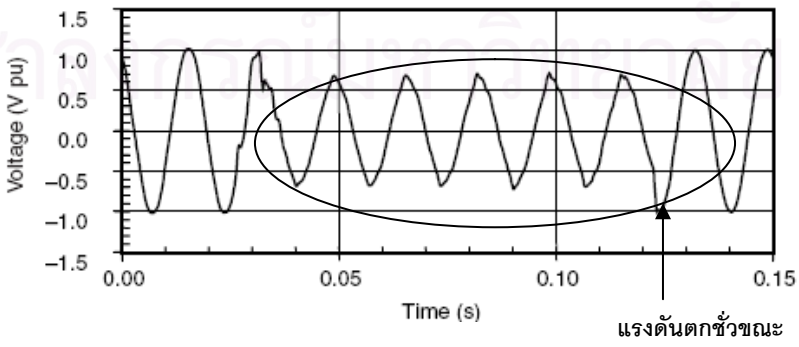
รูปที่ 2-3 รูปคลื่นการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดแบบแกว่งในช่วงความถี่ต่ำ [3]

2. ความถี่ปานกลาง (Medium Frequency) แกว่งที่ความถี่ระหว่าง 5 kHz ถึง 500 kHz เกิดในช่วงระยะเวลา 5 ms ถึง 20 ms และมีขนาดระหว่าง 0 p.u. ถึง 8 p.u.
3. ความถี่สูง (High Frequency) แกว่งที่ความถี่ระหว่าง 0.5 MHz ถึง 500 MHz เกิดในช่วงระยะเวลา 5 s และมีขนาดระหว่าง 0 p.u. ถึง 4 p.u.

2.1.2. **แรงดันตกชั่วขณะ** (Voltage Sag)

เป็นปรากฏการณ์ที่ค่ารากที่สองกำลังสองเฉลี่ยของแรงดัน (RMS) ลดลงในช่วง 0.1-0.9 p.u. นาน 10 ms (0.5 cycle) ถึง 1 นาที โดยมีสาเหตุ [7] มาจากการเพิ่มโหลด, การเปิดเดินเครื่องของมอเตอร์หรือโหลดขนาดใหญ่, ความผิดพร่อง (Fault) ในระบบไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) ขณะเริ่มเดินเครื่อง จะกินกระแสสูงสุดถึง 6-10 เท่าของกระแสปกติ ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะในระบบไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2-4 ส่งผลให้อุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตกชั่วขณะ ทำงานผิดพลาดหรือหยุดการทำงาน

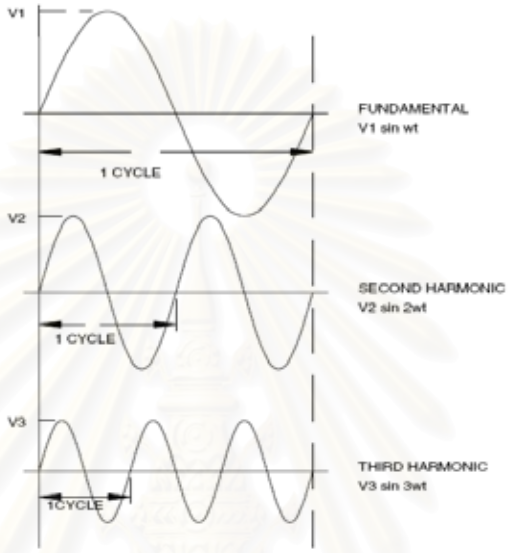
พารามิเตอร์ที่สำคัญในการวิเคราะห์แรงดันตกชั่วขณะคือ ดัชนีการตกชั่วขณะ (Sag Index) ซึ่งนิยามถึงการเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดัน ต่อขนาดแรงดันก่อนการเปลี่ยนแปลง (V_{pre}) หรือคิดเป็นร้อยละ $= \frac{\Delta V}{V_{pre}} \times 100$



รูปที่ 2-4 รูปคลื่นการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ [3]

2.1.3. **ฮาร์มอนิกส์** (Harmonics)

คือ สัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave) ที่มีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency) ซึ่งในที่นี้คือ ความถี่หลักของแหล่งจ่าย (50 Hz) สัญญาณที่มีความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่หลักมูลจะเรียกว่า ฮาร์มอนิกส์ที่ 2 (2^{nd} order harmonic) และมีความถี่เท่ากับ 100 Hz ส่วนฮาร์มอนิกส์ที่ 3 (3^{rd} order harmonic) จะมีความถี่เท่ากับ 150 Hz ดังแสดงในรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 รูปคลื่นสัญญาณความถี่หลักมูลและฮาร์มอนิกส์ที่ 2 และ 3 [4]

ในทางคณิตศาสตร์รูปคลื่นโดยทั่วไปที่มีความถี่หลักมูล w_1 สามารถแสดงได้โดยอนุกรมฟูริเยร์ (Fourier series) [5] ดังสมการที่ (2.1)

$$\begin{aligned} f(t) &= A_0 + \sum_{h=1}^{\infty}[A_h \cos(hw_1 t) + B_h \sin(hw_1 t)] \\ &= A_0 + \sum_{h=1}^{\infty}[C_h \cos(hw_1 t + j_h)] \end{aligned} \qquad (2.1)$$

โดยที่ $C_h = \sqrt{A^2{}_h + B^2{}_h}$ และ $j_h = \tan^{-1}\left(\frac{-B_h}{A_h}\right)$

จากอนุกรมฟูริเยร์ เราสามารถเขียนฟังก์ชั่นของแรงดันสลับและกระแสสลับได้โดยตัดเทอมที่มีค่าคงที่ออกตามสมการที่ (2.1) ดังสมการที่ (2.2)

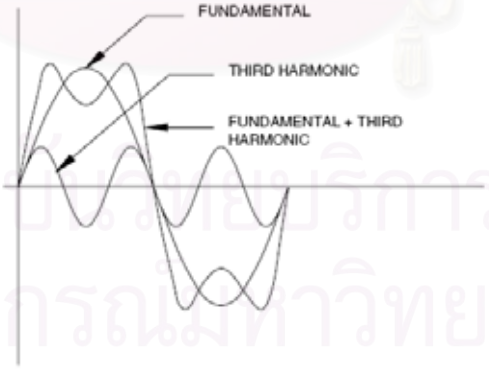
$$v(t) = \sum_{h=1}^{N} V_h \cos(hw_1 t + q_h)\,,\; i(t) = \sum_{h=1}^{N} I_h \cos(hw_1 t + f_h) \qquad (2.2)$$

ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ (Harmonic Distortion) คือการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นทางไฟฟ้า ไปจากรูปคลื่นสัญญาณไซน์ (Sine Wave) ดังแสดงรูปที่ 2-6 และรูปที่ 2-7 พารามิเตอร์สำคัญที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิกส์ [5] มีดังนี้

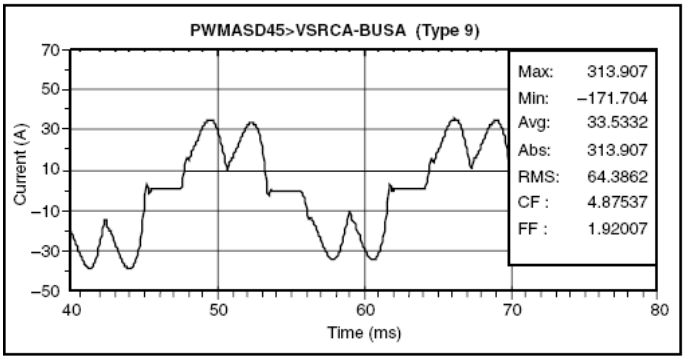
1. ปริมาณรวมฮาร์มอนิกส์ (Harmonic Content) คือปริมาณที่ได้จากการหักค่าองค์ประกอบไฟตรง (DC) และส่วนประกอบความถี่หลักมูล จากรูปคลื่นสัญญาณที่วัดได้
2. ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์เฉพาะ (Individual Harmonic Distortion, IHD) หรืออัตราส่วนฮาร์มอนิกส์ (Harmonic Ratio) คืออัตราส่วนระหว่างค่า RMS ของส่วนประกอบฮาร์มอนิกส์ (Harmonic Component) แต่ละตัวต่อค่า RMS ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล (Fundamental Component) เทียบเป็นร้อยละ
3. ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม (Total Harmonic Distortion, THD) คืออัตราส่วนระหว่างค่ารากที่สองของผลบวกกำลังสอง (Root-Sum-Square) ของค่า RMS ของส่วนประกอบฮาร์มอนิกส์ (Harmonic Component) ทุกตัวกับค่า RMS ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล (Fundamental Component) เทียบเป็นร้อยละดังแสดงในสมการที่ (2.3) และ (2.4)

$$THD_{voltage} = \frac{\sqrt{(V_2^2 + V_3^2 + ...)}}{V_1} \quad (2.3)$$

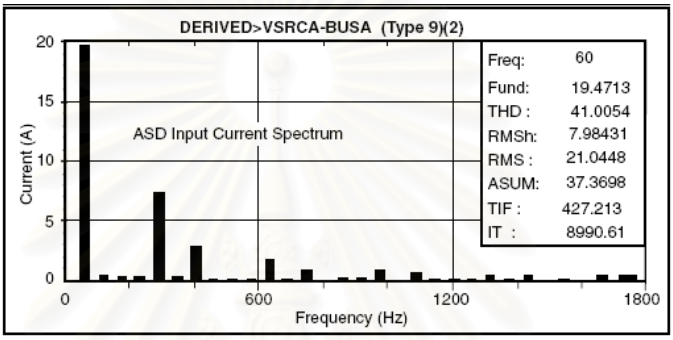
$$THD_{current} = \frac{\sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + ...)}}{I_1} \quad (2.4)$$



รูปที่ 2-6 ตัวอย่างการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นที่เกิดจากการรวมกันของสัญญาณความถี่หลักมูลกับองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์อันดับสองและสาม [4]



(a)

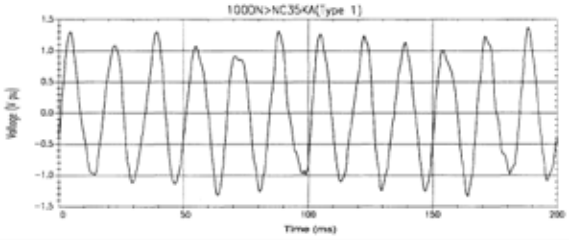


(b)

รูปที่ 2-7 รูปคลื่นกระแสที่ผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ (a) และฮาร์มอนิกส์สเปกตรัม (b) [3]

2.1.4. **แรงดันกระเพื่อม** (Voltage Fluctuation)

คือการเปลี่ยนแปลงอย่างสมมาตรของกรอบแรงดัน (Voltage Envelope) หรือการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของค่า RMS ของแรงดัน โดยมีขนาดเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 0.95 - 1.05 p.u. มีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงโหลดกระแส โดยมีโหลดไวปฏิกิริยา (Reactive Load) และ Arc Furnace เป็นต้นเหตุมากที่สุดในระบบส่งและระบบจำหน่าย ดังตัวอย่างรูปคลื่นในรูปที่ 2-8



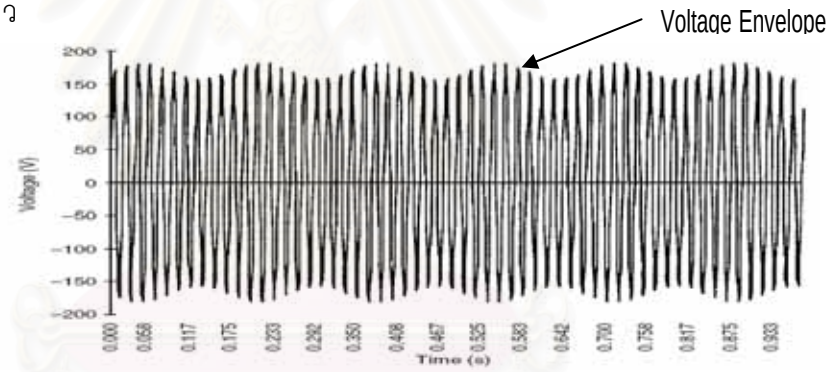
รูปที่ 2-8 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันกระเพื่อม อันเป็นผลมาจากการใช้งาน Arc Furnace [3]

เนื่องจากการเกิดแรงดันกระเพื่อมนั้น สามารถมองได้ว่าเป็นการกล้ำของแอมพลิจูด (Amplitude Modulation) ของสัญญาณที่มีความถี่หลักมูล (50 Hz) กับสัญญาณความถี่อื่น ดังนั้นการวิเคราะห์แรงดันกระเพื่อม สามารถวิเคราะห์ได้จากการเปลี่ยนแปลงของขนาด RMS ของแรงดัน เปรียบเทียบกับค่า RMS แรงดันที่ความถี่หลักมูล (50 Hz)

2.1.5. ไฟกะพริบ (Flickers)

เป็นปรากฏการณ์ของแรงดันไฟกระเพื่อมที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง (Light Intensity) ทำให้เกิดการกะพริบของแสงไฟ ที่สามารถสังเกตได้ด้วยตาของมนุษย์ ไฟกะพริบจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างกะทันหันเช่น การใช้งาน Arc Furnace, Electric Welder, มอเตอร์ในเครื่องปั้มความร้อน (Heat Pump), เครื่องทำความเย็น, เครื่องเจาะ เป็นต้น สามารถแยกได้เป็น 2 ประเภทคือ

4. แบบวงรอบ (Cyclic Flicker) เกิดจากแรงดันไฟกระเพื่อมที่เป็นคาบ (Periodic) ตลอดเวลาในระบบไฟฟ้า
5. แบบไม่เป็นวงรอบ (Noncyclic Flicker) เกิดจากแรงดันไฟกระเพื่อม ที่เกิดเป็นครั้งคราว



รูปที่ 2-9 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันไฟกะพริบ

แสงสว่างไฟกะพริบนั้นเกิดจากการกล้ำของแอมพลิจูด (Amplitude Modulation) [7] ระหว่างสัญญาณพาหะ (Carrier) ที่ความถี่หลักมูล (50 Hz) กับสัญญาณที่มากล้ำรูปไซน์ [7] (Sinusoidal Voltage Fluctuation) ดังสมการที่ (2.5)

$$u_{AM}(t) = A_c[1 + A_m \cos(w_m t)]\cos(w_c t) \qquad (2.5)$$

อย่างไรก็ดีการเปลี่ยนแปลงกรอบแรงดัน (Voltage Envelope) ของสัญญาณไฟกะพริบในรูปที่ 2-9 อาจจะเป็นรูปอื่นได้ ซึ่งสามารถระบุได้ถึงแหล่งกำเนิดของฟกะพริบได้ เช่น ถ้ากรอบการเปลี่ยนแปลงเป็นฟังก์ชั่นเสต็ป (Step Function) จะเกิดจากสวิตช์ซิ่งโหลดขนาดใหญ่, ถ้ากรอบการเปลี่ยนแปลงเป็นรูปสี่เหลี่ยม (Square Wave) จะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความถี่และอัตราส่วนช่วงทำงาน (Duty Ratio) ของเครื่องเชื่อม, ถ้าเป็นรูปไซน์ จะเกิดจากการใช้งาน Arc Furnace ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่แหล่งจ่าย

โดยปกติแล้วขนาดสัญญาณไฟกะพริบ (Flicker Signal) จะคำนวณจากการความแตกต่างระหว่างแรงดันมากสุด (Vmax) กับแรงดันน้อยสุด (Vmin) เทียบกับสัญญาณแรงดันในภาวะปกติ (V_0) คิดเป็นร้อยละ ดังสมการที่ (2.6)

$$\%V_{\mathrm{modulation}} = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_o} \times 100 \qquad (2.6)$$

2.2. เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality Meter)

ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าจะครอบคลุมหลายช่วงเวลา และมีสาเหตุแตกต่างกันตามลักษณะของปัญหา การแก้ปัญหาจึงต้องอาศัย เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า ในการเก็บข้อมูลและนำผลมาวิเคราะห์ลักษณะของปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยรายละเอียดสมรรถนะของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้ามีดังต่อไปนี้

2.2.1. ประเภทของเครื่องวัด [6]

มีหลายประเภทตามปัญหาคุณภาพไฟฟ้า การใช้งานแต่ละประเภทนั้นขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์หรือปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยสามารถจำแนกประเภทได้ดังนี้

1. อุปกรณ์ทดสอบสายตัวนำและกราวนด์ (Wiring and Grounding Test Device)
2. มัลติมิตเตอร์ (Multimeter)
3. ออสซิโลสโคป (Oscilloscope)
4. เครื่องวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ (Harmonic Analyzer)
5. เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer)
6. เครื่องวิเคราะห์การรบกวนแบบชั่วขณะ (Transient Disturbance Analyzer)
7. เครื่องวัดไฟกะพริบ (Flicker Meter)
8. เครื่องควบคุมการใช้พลังงาน (Energy Monitor)
9. เครื่องวิเคราะห์การรบกวน (Disturbance Analyzer)
10. เครื่องวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์และการรบกวน (Harmonic and Disturbance Analyzer)

2.2.2. ข้อกำหนดเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า [6] [8]

ได้แก่

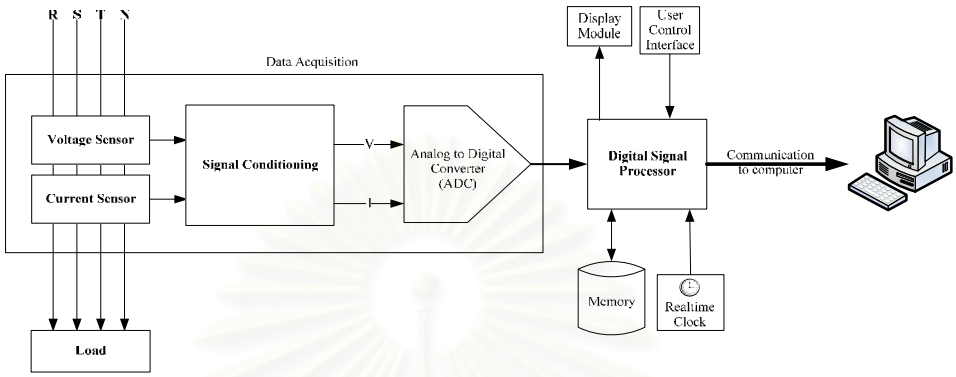
1. จำนวนช่องสัญญาณ (Number of Channels)
2. ความละเอียดและความถี่ในการสุ่มสัญญาณ (Sampling Rate)
3. หน่วยความจำภายในตัวเครื่อง
4. อุณหภูมิใช้งานของเครื่องมือ

5. ช่วงแรงดันขาเข้า
6. ความสามารถในการวัดแรงดันสามเฟส
7. ความสามารถในการวัดกระแส
8. ความสามารถในการวัดปริมาณที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพไฟฟ้าดังต่อไปนี้
   - แรงดันไฟตรง และ กระแสไฟตรง
   - ฮาร์มอนิกส์และอินเตอร์ฮาร์มอนิกส์
   - ความต้านทานในกราวนด์
   - ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power factor)
   - ไฟกะพริบ (Flicker)
   - กำลังและพลังงาน (Power/Energy)
   - การเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด (Transient)
   - แรงดันตกชั่วขณะ (Sag/Dips)
   - แรงดันเกินชั่วขณะ (Swell)
   - แรงดันเกิน (Overvoltage)
   - แรงดันไม่สมดุล (Imbalance/Unbalance)
9. ความแม่นยำของเครื่องวัด คลาส 0.1% หรือ 0.5%
10. การเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ (Communication)
    - RS-232
    - Ethernet
    - TCP/IP
    - Modem
    - Power-line-communication
11. ลักษณะการใช้งานของเครื่อง
    - แบบหิ้ว (Hand-held) หรือพกพา (Portable) เหมาะสำหรับการสำรวจปัญหาคุณภาพไฟฟ้าหลังจากที่ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าเกิดขึ้นแล้ว
    - แบบติดตั้งอยู่กับที่ (Fixed installation) เหมาะสำหรับการควบคุมดูแลคุณภาพไฟฟ้าอย่างถาวร

2.2.3. **โครงสร้างเครื่องวัดคุณภาไฟฟ้า** (Power Quality Meter Architecture)

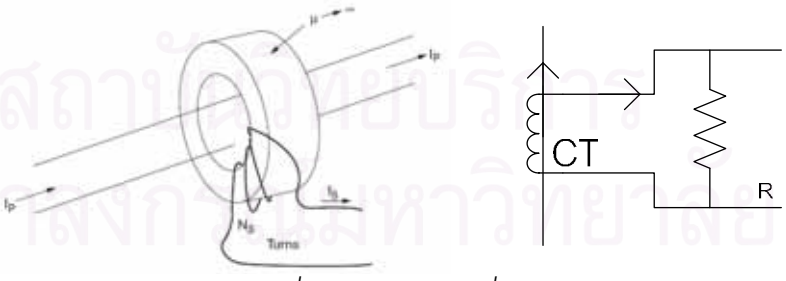
โดยทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2-10 การทำงานของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า [8] จะเริ่มจากการตรวจจับสัญญาณแรงดันและกระแสจากระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System) ที่จุดวัดโดยใช้

อุปกรณ์ตรวจจับและแปลงสัญญาณ เช่น หม้อแปลงกระแส หรือวงจรแบ่งแรงดัน สัญญาณที่ตรวจจับได้จะนำไปผ่าน หน่วยวัดเพื่อหาขนาดของสัญญาณที่วัดได้ และสุดท้ายจะนำไปประมวลผลสัญญาณเพื่อวิเคราะห์คุณภาพของสัญญาณไฟฟ้าที่วัดเข้ามา โดยรายละเอียดของโครงสร้างเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าในแต่ละส่วนมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 2-10 โครงสร้างโดยทั่วไปของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า

1. ส่วนตรวจจับสัญญาณ (Signal Transducer/Sensor (CT, PT)) สัญญาณที่ต้องตรวจจับและนำมาวิเคราะห์คือ แรงดัน และ กระแส โดยแรงดันเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าที่สามารถส่งเข้าไปยังส่วนปรับปรุงเงื่อนไขสัญญาณไฟได้โดยตรง หรืออาจจะใช้ หม้อแปลงแรงดัน (Potential Transformer) เพื่อลดระดับแรงดันลงมาก่อน ส่วนกระแสนั้นจะต้องใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าหม้อแปลงกระแส (Current Transformer) มาคล้องสายตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านดังรูปที่ 2-11 เพื่อลดระดับกระแสลงมา จากนั้นก็จะนำสัญญาณกระแสนี้ไปวิ่งผ่านตัวต้านทานเพื่อเปลี่ยนเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า เพื่อส่งไปยังส่วนแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลหรือ ส่วนปรับปรุงเงื่อนไขสัญญาณ



รูปที่ 2-11หม้อแปลงกระแสโดยทั่วไปและวงจรเปลี่ยนสัญญาณกระแสเป็นแรงดัน

2. ส่วนปรับปรุงเงื่อนไขสัญญาณ (Signal Conditioning) หลังจากที่สัญญาณถูกตรวจจับในส่วนตรวจจับสัญญาณแล้ว สัญญาณเหล่านี้จะต้องถูกนำมาปรับปรุง โดยวงจรแบ่งแรงดัน หรืออาจใช้ออพแอมป์ (Opamp) ช่วย เพื่อให้มีขนาดเหมาะสมและสามารถส่งเข้าไปยังส่วนแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลได้

3. หน่วยแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล (Analog to Digital Converter-ADC) มีหน้าที่ในการแปลงสัญญาณแอนะล็อกที่วัดมาให้เป็นสัญญาณดิจิตอล เพื่อให้สามารถนำไปประมวลผลในหน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิตอลได้
4. หน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (Digital Signal Processor-DSP) เปรียบเสมือนหัวใจหลักของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า มีหน้าที่ดังต่อไปนี้
   - จัดการแทสก์ต่างๆที่เกี่ยวกับการทำงานของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า
   - จัดการหน่วยความจำที่ใช้เก็บตัวแปรที่วิเคราะห์ได้
   - ประมวลผลข้อมูลดิบ ที่ได้จากชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลด้วยอัลกอลริธึมต่างๆเพื่อวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าของสัญญาณที่วัดเข้ามา
   - ควบคุมการติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์อื่นๆ
5. หน่วยสร้างฐานเวลาจริง (Real time Clock) เป็นส่วนที่มีหน้าที่ระบุเวลาและควบคุมจังหวะการตรวจจับสัญญาณแรงดันและกระแสให้ตรงกัน โดยหน่วยสร้างฐานเวลาจริงนี้อาจใช้ชิพสร้างฐานเวลาจริงหรือใช้มอดูลจีพีเอส (GPS Module)
6. หน่วยความจำ (Memory/Storage) เมื่อข้อมูลแรงดันและกระแส ผ่านการประมวลผลสัญญาณดิจิตอลแล้ว ผลการประมวลจะถูกนำมาเก็บภายในหน่วยความจำ เพื่อทำการวิเคราะห์ภายหลัง
7. ส่วนติดต่อสื่อสาร (Communication interface) เป็นส่วนที่มีหน้าที่ในการติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์ภายนอกอื่นๆเช่นคอมพิวเตอร์ เพื่อส่งข้อมูลที่บันทึกไว้ไปวิเคราะห์ต่อในคอมพิวเตอร์หรือจัดทำรายงานผลการตรวจสอบคุณภาพไฟฟ้า

2.3. การวัดและวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า

2.3.1. การวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกส์ [5]

การวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกส์ในสัญญาณไฟฟ้าที่สุ่มเข้ามาซึ่งเป็นสัญญาณที่อ้างอิงบนโดเมนเวลา f[n] จะต้องเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณที่อ้างอิงบนโดเมนความถี่โดยใช้อัลกอลริธึม DFT (Discrete Fourier Transform) [5] ดังสมการที่(2.7) และเขียนในรูปสมการเมทริกซ์ดังสมการที่ (2.8) ซึ่งใช้การคูณทั้งหมด 2N ครั้ง

$$C_h = \frac{2}{N}\sum_{n=0}^{N-1} f[n] e^{\frac{-j2\pi \cdot hn}{N}} = \frac{2}{N}\sum_{n=0}^{N-1} f[n] W^{hn} \qquad (2.7)$$

โดย $W = e^{\frac{-j2p}{N}}$

$$\begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ . \\ . \\ . \\ C_{N-1} \end{bmatrix} = \frac{2}{N} \begin{bmatrix} W^{(0\times0)} & W^{(0\times1)} & . & . & . & 1 \\ W^{(1\times0)} & W^{(1\times1)} & . & . & . & W^{(1\times(N-1))} \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ W^{((N-1)\times0)} & W^{((N-1)\times1)} & . & . & . & W^{((N-1)(N-1))} \end{bmatrix}_{N\times N} \begin{bmatrix} f[0] \\ f[1] \\ . \\ . \\ . \\ f[N-1] \end{bmatrix}_{N\times1} \tag{2.8}$$

$$\begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ . \\ . \\ . \\ C_{N-1} \end{bmatrix} = \frac{2}{N} \begin{bmatrix} 1 & 1 & . & . & . & 1 \\ 1 & W & . & . & . & W^{N-1} \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ 1 & W^{N-1} & . & . & . & W^{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f[0] \\ f[1] \\ . \\ . \\ . \\ f[N-1] \end{bmatrix}_{N\times1} \tag{2.9}$$

$$= \frac{2}{N}[W] \begin{bmatrix} f[0] \\ f[1] \\ . \\ . \\ . \\ f[N-1] \end{bmatrix}$$

$$[C_h] = \frac{2}{N}[W][f] \tag{2.10}$$

ถ้ากระจายเมทริกซ์ [W] เป็น W_1, W_2, ..., W_L โดยที่ $L = \log_2 N$ และ W_1, W_2, ..., W_L เป็นเมทริกซ์ที่มีเทอมไม่เป็นศูนย์อยู่สองตัวในแต่ละแถว การคำนวณสมการที่ (2.9) จะเร็วขึ้นกว่าเดิม โดยใช้การคูณ $\frac{N}{2}\log N$ ครั้ง เรียกอัลกอลริธึมนี้ว่าการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform - FFT) [9] อัลกอรธึมนี้มีอยู่หลายวิธีเช่น FFT Radix-2, FFT-Radix-4 ฯลฯ

เมื่อหาปริมาณฮาร์มอนิกส์อันดับต่างๆได้จะสามารถหาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

1. ค่า Root Means Square ของกระแสและแรงดัน สามารถหาได้จากสมการที่ (2.11)

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{N} I^2{}_{hrms}} \quad \text{และ} \quad V = \sqrt{\sum_{h=1}^{N} V^2{}_{hrms}} \tag{2.11}$$

2. ค่ากำลังจริง (Real Power), กำลังเสมือน (Reactive Power) และกำลังปรากฏ (Apparent Power) สามารถหาได้ดังสมการที่ (2.12) - (2.14)

กำลังจริง (W): $P = \sum_{h=1}^{N} V_{hrms} I_{hrms} \cos(q_h - f_h)$ (2.12)

กำลังเสมือน (VAR): $Q = \sum_{h=1}^{N} V_{hrms} I_{hrms} \sin(q_h - f_h)$ (2.13)

กำลังปรากฏ (VA): $S = V_{rms} I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{N} (V_{hrms})^2 \cdot \sum_{h=1}^{N} (I_{hrms})^2}$ (2.14)

3. ค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor) สามารถแยกออกมาได้เป็นสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นผลมาจากองค์ประกอบความถี่หลักมูล (Displacement Power Factor - DPF)

และส่วนที่เป็นผลมาจากองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ (Distortion Power Factor - HPF) ซึ่งสามารถได้หาได้ดังสมการที่ (2.15) - (2.17)

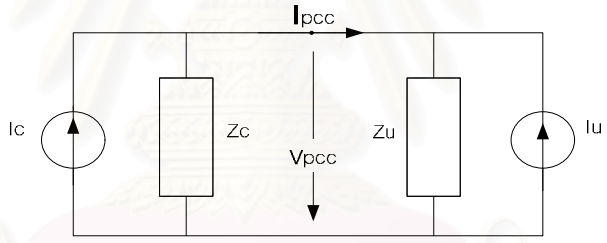
$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_1}\left(\frac{1}{\sqrt{1+THD_V^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+THD_I^2}}\right) = PF_{disp} \cdot PF_{dist} \quad (2.15)$$

$$PF \approx \cos(q_1) \times \frac{1}{\sqrt{1+THD_I^2}} \quad (2.16)$$

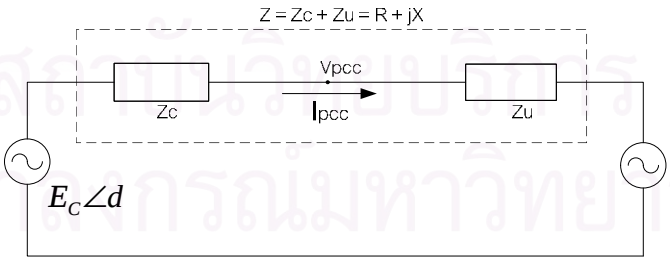
$$PF = DPF \times HPF \quad (2.17)$$

2.3.2. การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์จากความต้านทานวิกฤติ [10]

ฮาร์มอนิกส์เป็นสาเหตุของความเพี้ยนของรูปคลื่น และเกิดจากโหลดไม่เชิงเส้นในระบบไฟฟ้า การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างผู้ใช้กับแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า (Point of Common Coupling) จะบ่งชี้ได้ว่า ณ จุดเชื่อมต่อ ใครเป็นต้นเหตุของฮาร์มอนิกส์ เพื่อที่จะหาทางลดผล (Mitigation) ฮาร์มอนิกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยพิจารณาจากวงสมมูลในรูปที่ 2-12 (ตัวแปรแต่ละตัวจะละตัวห้อย h ไว้เพื่อลดความซับซ้อนในการเขียนตัวห้อยหลายๆ ตัว)



(a)



(b)

รูปที่ 2-12 วงจรสมมูล Norton (a) และ Thevenin (b) ระหว่างผู้ใช้กับแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า

I_c = *กระแสฮาร์มอนิกส์ของผู้ใช้ไฟฟ้า*

I_u = *กระแสฮาร์มอนิกส์ของแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า*

Z_u = *ความต้านทานฮาร์มอนิกส์ฝั่งแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า*

Z_c = *ความต้านทานฮาร์มอนิกส์ฝั่งผู้ใช้ไฟฟ้า*

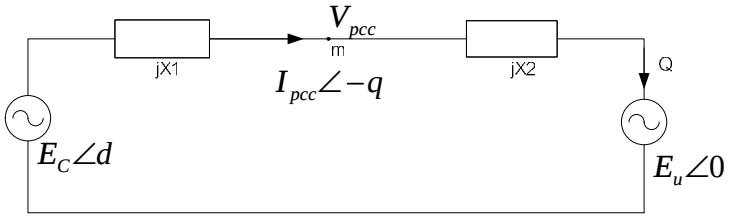
จากวงจรสมมูลระหว่างผู้ใช้ไฟฟ้ากับแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า ดังรูปที่ 2-12 สามารถวิเคราะห์หากำลังไฟฟ้าในกรณีที่ $Z = Z_c + Z_u = jX$ ได้ดังสมการที่ (2.18)

$$
\begin{aligned}
I\angle(-q) &= \frac{(E_c\cos d + jE_c\sin d) - E_u}{jX} = \frac{E_c\sin d - j(E_c\cos d - E_u)}{X} \\
S = P + jQ &= E_u \times (I\angle(-q))^* = E_u\frac{E_c\sin d + j(E_c\cos d - E_u)}{X} \\
P &= E_u I\cos q = E_u\frac{E_c\sin d}{X} \\
Q &= E_u I\sin q = E_u\frac{(E_c\cos d - E_u)}{X}
\end{aligned}
\qquad (2.18)
$$

จากสมการ $P = E_u I\cos q = E_u\frac{E_c\sin d}{X}$ มุมเฟสระหว่างแรงดันบัส จะบอกถึงทิศทางการไหลของกำลังส่วนจริง (Active Power) และความแตกต่างของขนาดระหว่างแรงดันบัสจะบอกถึงทิศทางการไหลของกำลังส่วนจินตภาพ (Reactive Power) ดังสมการ $Q = E_u I\sin q = E_u\frac{(E_c\cos d - E_u)}{X}$, ($q$ เป็นมุมต่างเฟสระหว่าง E_u กับ I)

- ถ้า $Q > 0$, E_u จะต้องมีขนาดเล็กกว่า E_c ดังนั้น I_{pcc} ที่จุดต่อร่วมระหว่างผู้ใช้กับแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า เป็นผลมาจากผู้ใช้ไฟฟ้า (Customer)
- ถ้า $Q < 0$, จากสมการ Q จะเห็นได้ว่า $\cos d$ คูณอยู่กับ E_c ดังนั้น E_c ไม่จำเป็นจะต้องมีขนาดเล็กกว่า E_u และ I_{pcc} ที่จุดต่อร่วมระหว่างผู้ใช้กับแหล่งจำหน่ายไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องเป็นผลมาจากแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า (Utility) ซึ่งสามารถมองได้ว่ากำลังไฟฟ้าเสมือนไม่จำเป็นจะต้องไปถึงผู้ใช้เสมอ เนื่องจากสายไฟอาจจะเป็นตัวดูดซับกำลังไฟฟ้าเสมือนไว้

ตัวแปรต่อมาที่มีความสำคัญในการวิเคราะห์ต่อในกรณีนี้คือ ความต้านทานในสายไฟที่แรงดันฮาร์มอนิกส์มีค่าต่ำสุด ความต้านทานฝั่งแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า (Z_u) และความต้านทานฝั่งผู้ใช้ไฟฟ้า (Z_c) โดยในเบื่องต้นจะใช้ $Z_c = jX_1$ และ $Z_u = jX_2$ ดังรูปที่ 2-13 ซึ่งจะวิเคราะห์ได้ดังสมการ (2.19)



รูปที่ 2-13 การพิจารณาแรงดันที่จุดวัดบนสายความต้านทาน (Impedance Line) jX

$$E_u = V_m - I_{pcc}Z_u = V_m - I_{pcc} \cdot jX_u \tag{2.19}$$

โดยที่ V_m สามารถหาได้จากการใช้ทฤษฎี Superposition ดังสมการที่ (2.20)

$$V_m = \frac{X_1}{X_1 + X_2}E_U\angle 0 + \frac{X_2}{X_1 + X_2}E_C\angle d \tag{2.20}$$

ประเด็นที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์หาว่าฝั่งไหนมีผลต่อกระแสที่จุดวัด (I_{pcc}) อยู่ที่ระยะทางแค่ไหนบนความต้านทาน X (X_u+X_c) ที่จะทำให้ Q ที่ถูกสร้างโดย E_u (ฝั่งแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า) ไหลไปถึง ซึ่งหาได้จาก $\frac{\partial |V_m|^2}{\partial X_2} = 0$ (อนุพันธ์เทียบกับ X_2 เพื่อวัดจากฝั่งแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า) จะได้จุดที่มีความต้านทาน x ที่ทำให้ V_m มีค่าน้อยสุดดังสมการ (2.21)

$$x = \frac{E_u^{\,2} - E_u E_c \cos d}{E_u^{\,2} + E_c^{\,2} - 2E_u E_c \cos d}X \tag{2.21}$$

จากสมการ $I\angle(-q) = \frac{E_c \sin d - j(E_c \cos d - E_u)}{X}$ จะได้ว่า

$$I^2 = \frac{E_u^{\,2} + E_c^{\,2} - 2E_u E_c \cos d}{X^2} \tag{2.22}$$

จากสมการที่ (2.22) เมื่อแทน I^2 และ $Q = E_u\frac{(E_c \cos d - E_u)}{X}$ ในสมการที่ (2.21) สามารถเขียนสมการ x ได้ดังสมการที่ (2.23)

$$x = \frac{-Q}{I^2} = -\frac{E_u}{I}\sin q \tag{2.23}$$

จากสมการที่ (2.21) ถ้าให้ $E_u = aE_c$ จะได้ว่า

$$x = \frac{a^{\,2} - a\cos d}{(1 + a^{\,2}) - 2a\cos d}X \tag{2.24}$$

ค่า $x_{\min}$ จะเกิดขึ้นเมื่อ มุมต่างเฟสระหว่าง E_u กับ E_c มีค่าเท่ากับ p

$$x_{\min} = \frac{a^{\,2} - a\cos d}{(1 + a^{\,2}) - 2a\cos d}X\Big|_{d=p} = \frac{a}{1+a}X > 0.5X \tag{2.25}$$

จะได้ว่า $\frac{x}{X} > 0.5$ เสมอซึ่งสามารถอธิบายความหมายของค่าความต้านทาน x ที่คำนวณได้ดังนี้

- ถ้า x มีค่าใกล้ฝั่งผู้ใช้ไฟฟ้า $(x > \frac{X}{2})$ จะมองได้ว่า Q ที่ถูกสร้างขึ้นจากฝั่งแหล่งจำหน่ายไฟฟ้าสามารถส่งไปได้เป็นบนความต้านทานที่มากกว่า $\frac{X}{2}$
- ถ้า x มีค่าใกล้ฝั่งแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า $(x < \frac{X}{2})$ จะมองได้ว่า Q ที่ถูกสร้างขึ้นจากฝั่งแหล่งจำหน่ายไฟฟ้าสามารถส่งไปได้เป็นบนความต้านทานที่น้อยกว่า $\frac{X}{2}$

จากการวิเคราะห์หาค่า x ที่จุดวัด สามารถนิยามดัชนี $CI = 2\frac{Q}{I^2}$ โดย Q มีทิศทางการไหลดังรูปที่ 2-12 ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการหาทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ได้ในกรณีที่มองว่า $Z_u = jX_u$ และ $Z_c = jX_c$ ดังนี้

- ถ้า CI > 0 สามารถสรุปได้เลยว่าแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อยู่ทางด้าน ผู้ใช้ไฟฟ้า
- ถ้า CI < 0 ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อยู่ทางด้านไหน ต้องหาค่าตัวแปร X_u และ X_c เพื่อนำมาคำนวณหาค่า $X = X_u + X_c$ โดยการหาค่า X นั้นจะทำการวัดหลายครั้ง และให้ X_{max} เป็นค่าสูงสุดที่วัดค่า X ได้ และให้ X_{min} เป็นค่าต่ำสุดที่สามารถวัดค่า X ได้ จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับค่า CI ดังนี้
  - ถ้า $|CI| > X_{max}$ จะได้ว่าแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อยู่ทางด้านแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า
  - ถ้า $|CI| < X_{min}$ จะได้ว่าแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อยู่ทางด้านผู้ใช้ไฟฟ้า
  - แต่ถ้า $X_{min} < |CI| < X_{max}$ ไม่สามารถสรุปได้ว่าฝั่งไหนเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์

ต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์ในกรณี Z = R + jX ดังในรูปที่ 2-12 จะได้ว่า

$$P = \frac{E_u E_c}{|Z|}\sin(d+b) - \frac{E_u^2 \sin(b)}{|Z|}$$
$$Q = \frac{E_u E_c}{|Z|}\cos(d+b) - \frac{E_u^2}{|Z|}\cos(b) \qquad (2.26)$$

โดยที่ $b = \tan^{-1}(\frac{R}{X})$ จะเห็นได้ว่าถ้าให้ $T = \begin{bmatrix} \cos(b) & \sin(b) \\ \sin(b) & \cos(b) \end{bmatrix}$ จะเขียนสมการ (2.26) ได้ดังสมการที่ (2.27)

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = T\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_u E_c}{|Z|}\sin(d+b) - \frac{E_u^2 \sin(b)}{|Z|} \\ \frac{E_u E_c}{|Z|}\cos(d+b) - \frac{E_u^2}{|Z|}\cos(b) \end{bmatrix} \qquad (2.27)$$

การวิเคราะห์หาค่าดัชนี CI หาได้จาก $E_u = V_m - I_{pcc}Z_u = V_m - I_{pcc} \cdot jX_u$ และ $CI = 2(\frac{E_u}{I})\sin(q+b)$ แล้วนำมาสรุปหาทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ได้ดังนี้

- ถ้า CI > 0 สามารถสรุปได้เลยว่าแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อยู่ทางด้านผู้ใช้ไฟฟ้า

- ถ้า $CI < 0$ ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อยู่ทางด้านไหน ต้องพิจารณาต่อดังนี้
  - ถ้า $|CI| > Z_{max}$ จะได้ว่าแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อยู่ทางด้านแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า
  - ถ้า $|CI| < Z_{min}$ จะได้ว่าแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อยู่ทางด้านผู้ใช้ไฟฟ้า
  - ถ้า $Z_{min} < |CI| < Z_{max}$ ไม่สามารถสรุปได้ว่าฝั่งไหนเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์

จุดที่ต้องระวังคือกรณีโหลด $Z = -jX$ จะทำให้ได้ค่า Q ดังสมการที่ (2.28)

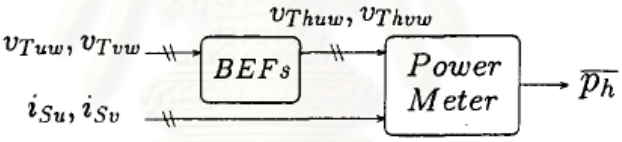
$$Q = E_u I \sin q = E_u \frac{(E_c \cos d - E_u)}{-X} \tag{2.28}$$

ถ้าฝั่งแหล่งจำหน่ายเป็นฝั่งส่งกำลังเสมือนตามทิศการไหลของ Q ในรูปที่ 2-12 จะได้ว่า $Q < 0$ ก็ต่อเมื่อ $E_c > E_u$ ซึ่งเงื่อนไขนี้จะตรงข้ามกับกรณี $Z = jX$

2.3.3. การพิจารณาทิศทางแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์จากกำลังไฟฟ้าขณะนั้น (Harmonic Power Detection Based on Instantaneous Active Power) [11]

กำลังจริงทันทีทันใด p (Instantaneous Active Power) ในระบบไฟฟ้าสามเฟสแสดงดังสมการ (2.29)

$$p = v_{Tu} i_{Su} + v_{Tv} i_{Sv} + v_{Tw} i_{Sw} \tag{2.29}$$



รูปที่ 2-14 บล็อกไดอะแกรมแสดงการวิเคราะห์การตรวจวัดกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิกส์

ถ้าใช้วิธีวัดแบบ 2 มิเตอร์ ดังรูปที่ 2-14 กำลังจริงทันทีทันใด p จะเป็นดังสมการ (2.30)

$$\begin{aligned} p &= (v_{Tu} - v_{Tw}) i_u + (v_{Tv} - v_{Tw}) i_v \\ &= v_{Tuw} i_u + v_{Tvw} i_v \end{aligned} \tag{2.30}$$

เมื่อกำจัดองค์ประกอบความถี่หลัก (50 Hz) ออกจากสัญญาณแรงดันและกระแสที่วัดได้ โดยใช้ตัวกรอง (Band Elimination Filter/Notch Filter - BEFs) ส่วนประกอบที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์แสดงได้ดังสมการ (2.31)

$$\begin{aligned} v_{Thuw} &= \sum_{n=2}^{\infty} \{\sqrt{2} V_{un} \cos nwt - \sqrt{2} V_{wn} \cos n(wt - \frac{4p}{3})\} \\ v_{Thuw} &= \sum_{n=2}^{\infty} \{\sqrt{2} V_{un} \cos nwt - \sqrt{2} V_{wn} \cos n(wt - \frac{4p}{3})\} \\ v_{Thuw} &= \sum_{n=2}^{\infty} \{\sqrt{2} V_{un} \cos nwt - \sqrt{2} V_{wn} \cos n(wt - \frac{4p}{3})\} \\ v_{Thuw} &= \sum_{n=2}^{\infty} \{\sqrt{2} V_{un} \cos nwt - \sqrt{2} V_{wn} \cos n(wt - \frac{4p}{3})\} \end{aligned} \tag{2.31}$$

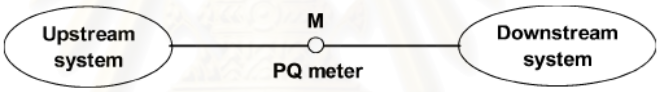
เมื่อแทน V_{Thw} และ I_{Su} ลงในสมการ $p_h = v_{Thuw}i_{Su} + v_{Thvw}i_{Sv}$ จะสามารถหาองค์ประกอบไฟตรง $\overline{p_h}$ ของ P_h ได้ดังสมการ (2.32)

$$\overline{p_h} = \sum_{k=2}^{\infty}(v_{uk}i_{uk}\cos q_{uk} + v_{vk}i_{vk}\cos q_{vk} + v_{wk}i_{wk}\cos q_{wk}) \qquad (2.32)$$

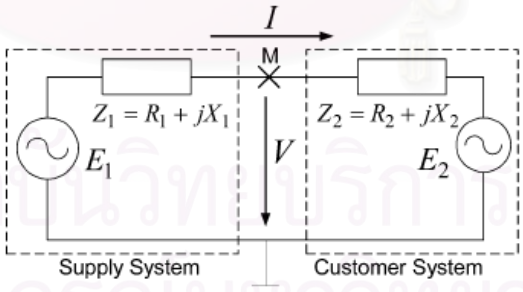
โดยองค์ประกอบไฟตรง $\overline{p_h}$ จะเป็นการรวมกันของกำลังจริงในของแต่ละอันดับฮาร์มอนิกส์ (Harmonic Order) ซึ่งสามารถนำเครื่องหมายของ $\overline{p_h}$ มาใช้พิจารณาทิศของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ได้ดังนี้

- กรณี $\overline{p_h} < 0$, แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อยู่ทางด้าน Downstream ของจุดวัด และกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิกส์ถูกปล่อยไปยังแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า
- กรณี $\overline{p_h} > 0$, แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อยู่ทางด้าน Upstream ของจุดวัด และกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิกส์ถูกรับมาจากแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า

2.3.4. การวิเคราะห์การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดแรงดันตกชั่วขณะจากเครื่องหมายความต้านทานขณะไม่เกิดการรบกวน (A Resistance Sign-Based Method) [12]



รูปที่ 2-15 ระบบไฟฟ้าสมมูล (Equivalent System)



รูปที่ 2-16 วงจรไฟฟ้าสมมูล (Equivalent Circuit)

ระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2-15 และมีวงจรดังรูปที่ 2-16 โดย ณ จุดวัด M สามารถตรวจวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ไหลจากแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า (Utility) ไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า (Customer) ให้แรงดัน V และกระแส I เป็นพารามิเตอร์ที่วัดได้ก่อนเกิดการรบกวน และแสดงได้ดังสมการ (2.33) เมื่อพิจารณาทางด้านแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า และสมการ (2.34) เมื่อพิจารณาทางด้านผู้ใช้

$$V = E_1 - IZ_1 \quad (2.33)$$

$$V = E_2 + IZ_2 \quad (2.34)$$

เนื่องจากแหล่งกำเนิดแรงดันตกชั่วขณะเกิดจากความผิดพร่องหรือการสวิตช์โหลดขนาดใหญ่ในระบบไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะที่จุด M ดังนั้นแรงดันและกระแส ที่มิเตอร์วัดได้ขณะเกิดการรบกวน (Disturbance) จะเท่ากับ $V + \Delta V$ และ $I + \Delta I$ โดย ΔV และ ΔI เป็นการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสจากการรบกวน ถ้าเกิดการรบกวนทางด้านผู้ใช้จะแสดงได้ดังสมการ (2.35) แต่ถ้าเกิดการรบกวนทางด้านแหล่งจำหน่ายไฟฟ้าจะแสดงได้ดังสมการ (2.36)

$$V + \Delta V = E_1 - (I + \Delta I)Z_1 \quad (2.35)$$

$$V + \Delta V = E_2 + (I + \Delta I)Z_2 \quad (2.36)$$

เมื่อนำสมการก่อนเกิดการรบกวน (2.33) กับ (2.34) ลบสมการขณะเกิดการรบกวน (2.35) กับ (2.36) จะสามารถหาค่าความต้านทานขณะที่ไม่เกิดการรบกวน Z_1, Z_2 ได้ดังสมการ (2.37) และ (2.38)

$$Z_1 = -\frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (2.37)$$

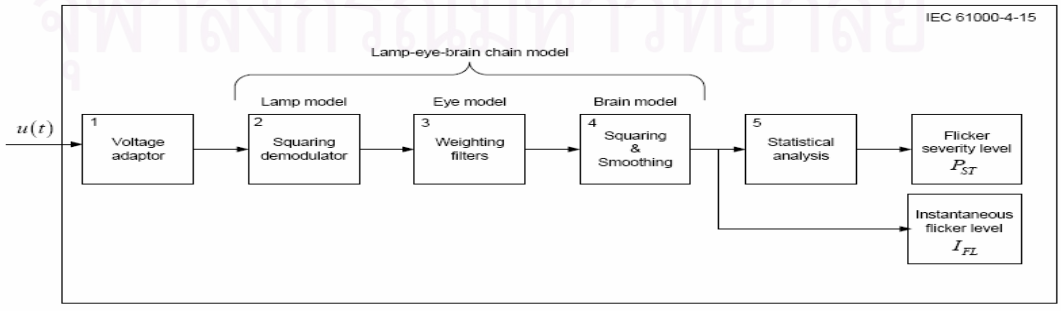
$$Z_2 = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (2.38)$$

จากสมการ (2.37) และ (2.38) ถ้าเราให้ $Z_e = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V_{during} - V_{pre}}{I_{during} - I_{pre}}$ จะสามารถหาทิศทางของแหล่งกำเนิดแรงดันตกชั่วขณะได้ดังนี้

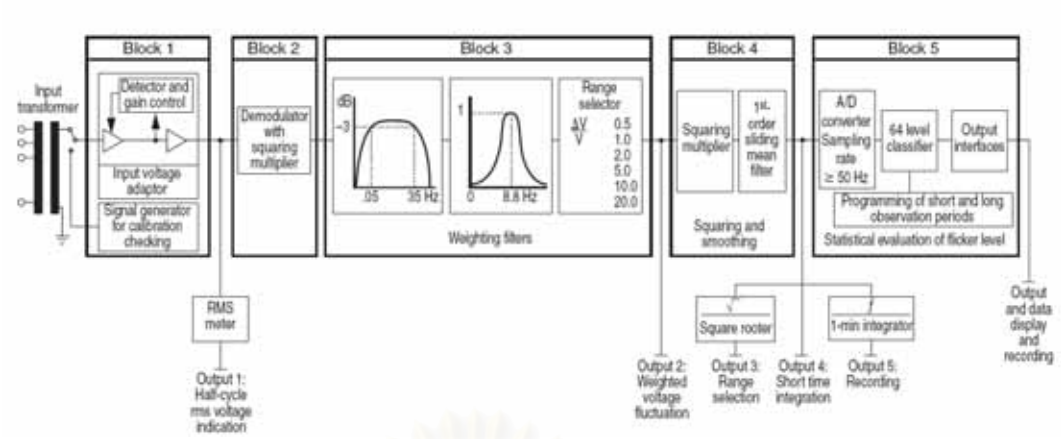
1. ถ้า $\Re eal(Z_e) > 0$, แหล่งกำเนิดแรงดันตกชั่วขณะอยู่ทางด้านแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า (Utility)
2. ถ้า $\Re eal(Z_e) < 0$, แหล่งกำเนิดแรงดันตกชั่วขณะอยู่ทางด้านผู้ใช้ไฟฟ้า (Customer)

2.3.5. การวิเคราะห์การเกิดไฟกะพริบ

การวัดแรงดันไฟกะพริบตามมาตรฐาน IEC 61000-4-15 [13] เป็นดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2-17 สามารถแบ่งส่วนประกอบของเครื่องวัดออกได้เป็นส่วนๆดังนี้



(a)



(b)

รูปที่ 2-17 บล็อกไดอะแกรมเครื่องวัดสัญญาณไฟกะพริบตามมาตรฐาน IEC 61000-4-15

1. บล็อกที่ 1 (Input voltage adapter) มีหน้าที่ในการปรับขนาดของสัญญาณที่จะวัด โดยการนำค่า RMS ของแรงดันขาเข้าไปหาร
2. บล็อกที่ 2 เป็นส่วนที่ทำหน้าที่จำลองพฤติกรรมของหลอดไฟ ด้วยการนำสัญญาณมายกกำลังสอง โดยจะให้ผลลัพธ์เป็นเชิงเส้นเทียบกับแอมพลิจูดของสัญญาณกระเพื่อมที่กล้ำ (Modulate) ด้วย Squaring Demodulator
3. บล็อกที่ 3 จะกรองส่วนที่ไม่ต้องการเช่นองค์ประกอบไฟตรง (DC) และสัญญาณที่มีความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่ของสัญญาณกระเพื่อม โดยใช้ตัวกรอง (Filter) ตัวแรก จากนั้นก็จะนำไปผ่านตัวกรองถ่วงน้ำหนัก ได้ผลตอบสนองตามโมเดล Incandescent-lamp-eye-brain ซึ่งมีฟังก์ชั่นส่งผ่าน (Transfer Function) ดังสมการที่ 2.32 สำหรับโมเดลหลอดไฟ (230 V, 50 Hz) มีค่าตัวแปร k = 1.74802, $l = 2p\,4.0598, 1w_1 = 2p\,9.15494, w_2 = 2p\,2.27979, w_3 = 2p\,1.22535, w_4 = 2p\,21.9$ เมื่อสัญญาณผ่านตัวกรองนี้จะได้สัญญาณแรงดันกระเพื่อมที่ถูกถ่วงน้ำหนักแล้ว (Weighted Voltage Fluctuation) ผลลัพธ์จากบล็อกนี้จะช่วยสำหรับพิจารณาช่วง $\%\frac{\Delta V}{V}$ เทียบได้กับการกล้ำสัญญาณไซน์ความถี่ 8.8 Hz

$$H(s) = \frac{kw_1 s}{S^2 + 2ls + w_1^2} \times \frac{1 + \frac{s}{w_2}}{(1 + \frac{s}{w_3})(1 + \frac{s}{w_4})} \qquad (2.39)$$

4. บล็อกที่ 4 ประกอบไปด้วย Squaring Multiple มีหน้าที่กระตุ้นผลตอบสนอง non-linear-eye-brain และ Sliding Mean Filter ซึ่งเป็น First order LPF สุดท้ายเมื่อสัญญาณผ่านบล็อกที่ 4 จะได้ค่าตัวแปร ระดับไฟกะพริบแบบทันทีทันใด

(Instantaneous Flicker Level, IFL) โดยนำมาเทียบกับสัญญาณไซน์ความถี่ 50 Hz ที่มีการกล้ำแอมพลิจูด (Amplitude Modulation) $\%\frac{\Delta V}{V}$ ที่ได้จากบล็อกที่ 3 ด้วยสัญญาณไซน์ความถี่ 8.8 Hz มีค่า IFL เป็น 1

5. บล็อกที่ 5 เป็นส่วนที่มีหน้าที่วิเคราะห์ในทางสถิติ โดยนำค่า IFL ที่เก็บไว้มาวิเคราะห์ระดับความรุนแรงในการเกิดไฟกะพริบ ซึ่งสุดท้ายจะได้ค่าออกมาเป็นตัวแปร P_{st}และ P_{lt} ซึ่งมีสูตรดังต่อไปนี้

- ดัชนีไฟกะพริบระยะสั้น (Short-Term Severity Values , P_{st}) คือค่าที่ใช้ประเมินความรุนแรงของไฟกะพริบในช่วงเวลาสั้นๆ (10 นาที) ตามสูตรในสมการที่ (2.40) โดยค่า P0.1, P1S, P3S P10S, P50S เป็นค่าปอร์เซ็นต์ไทล์ที่มีระดับของไฟกะพริบ (Flicker Level) เกิน 0.1, 1, 3, 10 และ 50% ของช่วงเวลาที่เก็บข้อมูลมาตามลำดับ และดัชนี s ของ P1S, P3S P10S, P50S หมายถึง ค่า Smooth percentile ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (2.40)

$$P_{st} = \sqrt{0.0314 \cdot P_{0.1} + 0.0525 \cdot P_{1S} + 0.0657 \cdot P_{3S} + 0.28 \cdot P_{10S} + 0.8 \cdot P_{50S}} \quad (2.40)$$

$$\begin{aligned} P_{1s} &= (P_{0.7} + P_1 + P_{1.5})/3 \\ P_{3s} &= (P_{2.2} + P_3 + P_4)/3 \\ P_{10s} &= (P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17})/3 \\ P_{50s} &= (P_{30} + P_{50} + P_{80})/3 \end{aligned} \quad (2.41)$$

- ดัชนีไฟกะพริบระยะยาว (Long-Term Severity Values , P_{lt}) คือค่าที่ใช้ประเมินความรุนแรงของไฟกะพริบในระยะยาว (2-3 ชั่วโมง) โดยหาได้จากค่า P_{st} ตามสูตรในสมการที่ (2.42) โดยที่ N เป็นจำนวนค่า P_{st} ที่อ่านได้

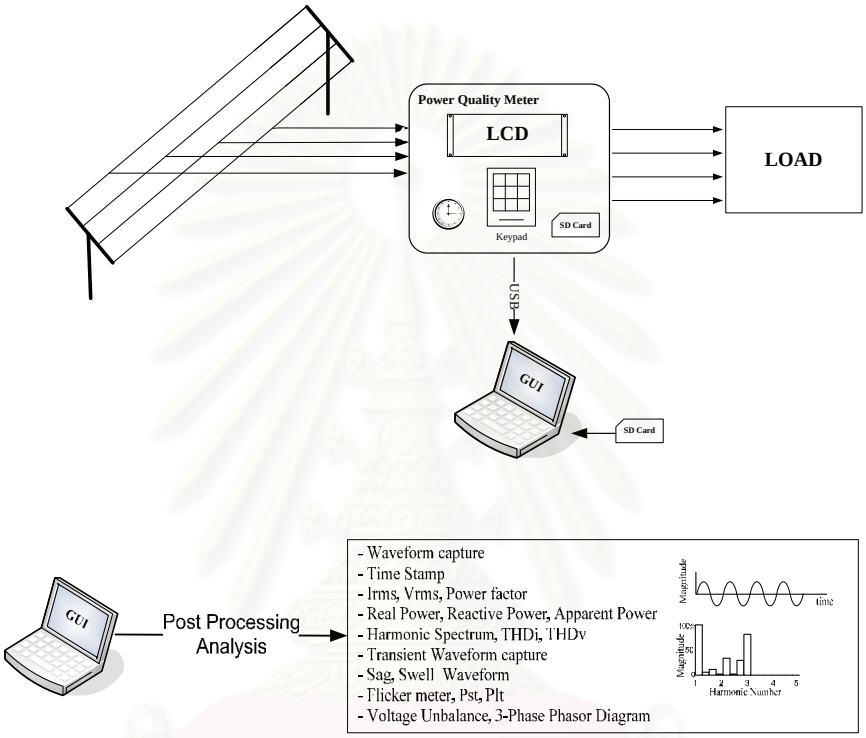
$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} P_{STi}^3} \quad (2.42)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

รายละเอียดด้านฮาร์ดแวร์

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า เพื่อวัดพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพไฟฟ้าและวิเคราะห์หาทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์และแรงดันตกชั่วขณะ ของระบบไฟฟ้า 1 เฟส หรือ 3 เฟส โดยตัวเครื่องมีวิธีการใช้งานดังรูปที่ 3-1



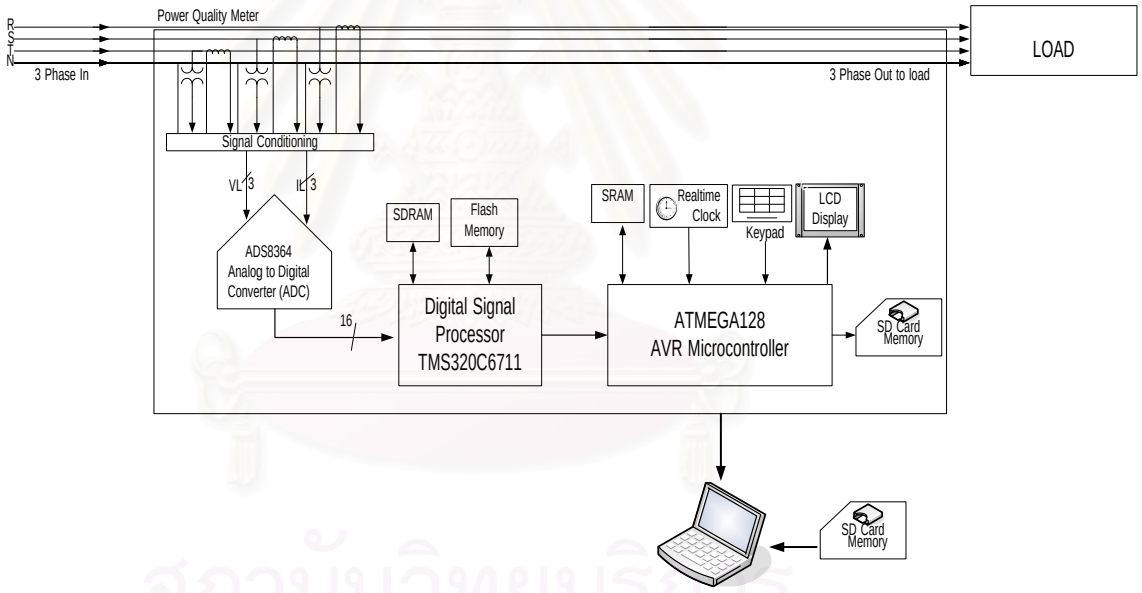
รูปที่ 3-1 แผนภาพการใช้งานเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า

การทำงานของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า เริ่มจากวัดสัญญาณแอนะล็อกของแรงดันโดยใช้วงจรแบ่งแรงดัน และวัดสัญญาณแอนะล็อกของกระแสไฟฟ้าโดยใช้ Current Transformer (CT) จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ไปผ่านการปรับขนาดของสัญญาณ (Signal Conditioning) เพื่อให้ได้ขนาดสัญญาณที่เหมาะสมก่อนที่จะส่งเข้าไปยังหน่วยแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล (Analog to Digital Converter - ADC) เพื่อแปลงสัญญาณแอนะล็อกที่วัดมาเป็นสัญญาณดิจิตอล ข้อมูลดิจิตอลจะถูกส่งไปยังชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (Digital Signal Processors - DSP) เพื่อคำนวณหาพารามิเตอร์และข้อมูลที่เกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้าเช่น ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส (THD_I), ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน (THD_V), สเปกตรัมของฮาร์มอนิกส์ เป็นต้น ข้อมูลที่วิเคราะห์ได้ จะถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรเลอร์ 8 บิต ซึ่งมีหน้าที่ควบคุมกระบวนการติดต่อกับผู้ใช้และการบันทึกข้อมูล ข้อมูลที่วิเคราะห์ได้ที่เป็นตัวเลขจะถูกแสดงทางหน้าจอแอลซีดี (LCD) และถูกส่งไปบันทึกยัง SD card เพื่อที่จะนำข้อมูลที่บันทึกไว้มาวิเคราะห์

ภายหลัง (Post Processing) โดยตัวเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่สร้างขึ้นสามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (Graphic User Interface - GUI) เพื่อดูรูปคลื่นของข้อมูลและพารามิเตอร์ต่างๆ ณ จุดวัดได้

3.1. โครงสร้างของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า

เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่ออกแบบในงานวิจัยนี้ มีโครงสร้างภายในดังรูปที่ 3-2 มีพิกัดกระแส 10 แอมแปร์ และพิกัดแรงดัน 220 โวลต์ โดยมีชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล TMS320C6711 ทำหน้าที่วิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์หาพารามิเตอร์และข้อมูลที่เกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้าจากสัญญาณดิจิตอลที่แปลงได้จากชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล ADS8364 และมีชิพไมโครคอนโทรเลอร์ 8 บิตตระกูล AVR เบอร์ ATMEGA128 ทำหน้าที่ควบคุม การบันทึกข้อมูลลง SD Card, การแสดงผลผ่านหน้าจอผลึกเหลว, การติดต่อกับผู้ใช้ และการส่งข้อมูลไปแสดงผลบนโปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ในคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3-2 โครงสร้างภายในเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า

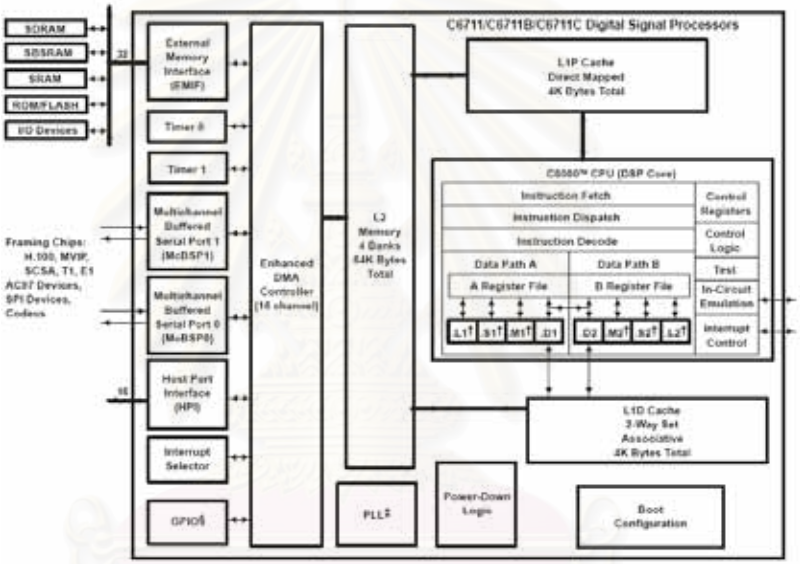
3.2. หน่วยประมวลและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ

ในส่วนนี้จะแสดงรายละเอียดของหน่วยประมวลผลที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกระบวนการทำงานทั้งหมดของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่ออกแบบ ตั้งแต่การคำนวณทาง

คณิตศาสตร์ไปจนถึงการบันทึกข้อมูล และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ โดยมีรายละเอียดของส่วนประกอบที่สำคัญมีดังนี้

3.2.1. ชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล [14]

ชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ TMS320C6711 เป็นของบริษัท Texas Instrument จัดอยู่ในกลุ่ม TMS320C6000 Floating-Point DSPs ที่ผลิตขึ้นมาสำหรับการใช้งานที่ต้องการความเร็วในการคำนวณสูง ในระดับ MIPS (Million Instruction per Second) เหมาะสำหรับการใช้งานด้านสื่อสาร โทรศัพท์มือถือ โมเดม การประมวลผลภาพ ฯลฯ TMS320C6000 มีสถาปัตยกรรมภายในแบบ VLIW (Very Long Instruction Word) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ง่ายและมีความยืดหยุ่นในการใช้งาน ชิพนี้มีโครงสร้างภายในดังรูปที่ 3-3



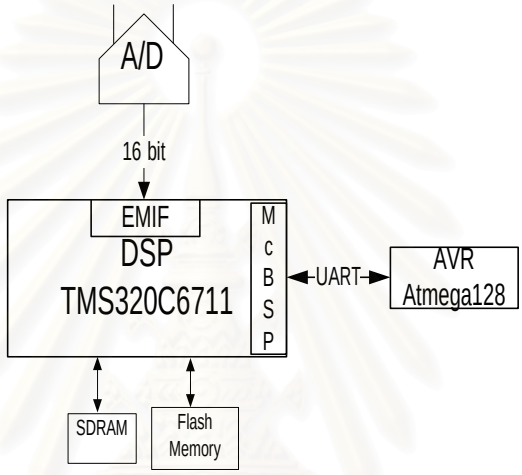
รูปที่ 3-3 โครงสร้างภายในของชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล TMS320C6711

รายละเอียดที่สำคัญของชิพประมวลผลสัญญาดิจิตอล TMS320C6711 สำหรับการออกแบบและสร้างเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าในงานวิจัยนี้มีดังนี้

1. ประมวลผลที่สัญญาณนาฬิกาความถี่ 150 MHz
2. หน่วยความจำภายในแบบ L1/L2 (4K-Byte L1P Program Cache, 4K-Byte L1D Data Cache, 64k-Byte L2 Memory)
3. เป็นชิพแบบ Floating Point ทำคำสั่งได้ถึง 900 MFLOPS (million floating point operation per second)
4. มีมอดูลเชื่อมต่อกับหน่วยความจำภายนอก (External Memory Interface-EMIF) แบบ 32 บิต

5. มีช่องสัญญาณดีเอ็มเอแบบ Enhanced Direct-Memory Access (EDMA) 16 ช่องสัญญาณ
6. มีตัวตั้งเวลา (Timers) ขนาด 32 บิต 2 ชุด
7. มีพอร์ตอนุกรม McBSP (Multichannel Buffer Serial Port) สำหรับใช้สื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมกับอุปกรณ์ภายนอก 2 พอร์ต

จากโครงสร้างของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 3-2 ชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอลจะเชื่อมต่อกับชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลผ่านทางมอดูล EMIF และติดต่อกับไมโครคอนโทรเลอร์แบบอนุกรม UART โดยใช้มอดูล McBSP ดังแสดงในรูปที่ 3-4

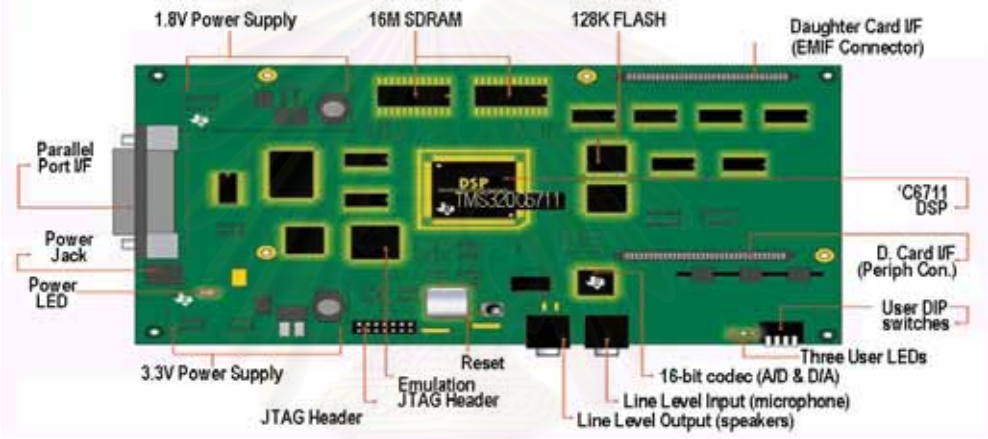


รูปที่ 3-4 การเชื่อมต่อระหว่างชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล TMS320C6711 กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ

3.2.2. บอร์ดทดลองชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล

เนื่องจากการออกแบบลายวงจรสำหรับชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล มีความซับซ้อนค่อนข้างมาก เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้บอร์ดทดลองชิพประมวลสัญญาณดิจิตอล TMS320C6711 DSK ดังรูปที่ 3-5 เพื่อลดความซับซ้อนในการพัฒนาเครื่อง

(a)



(b)

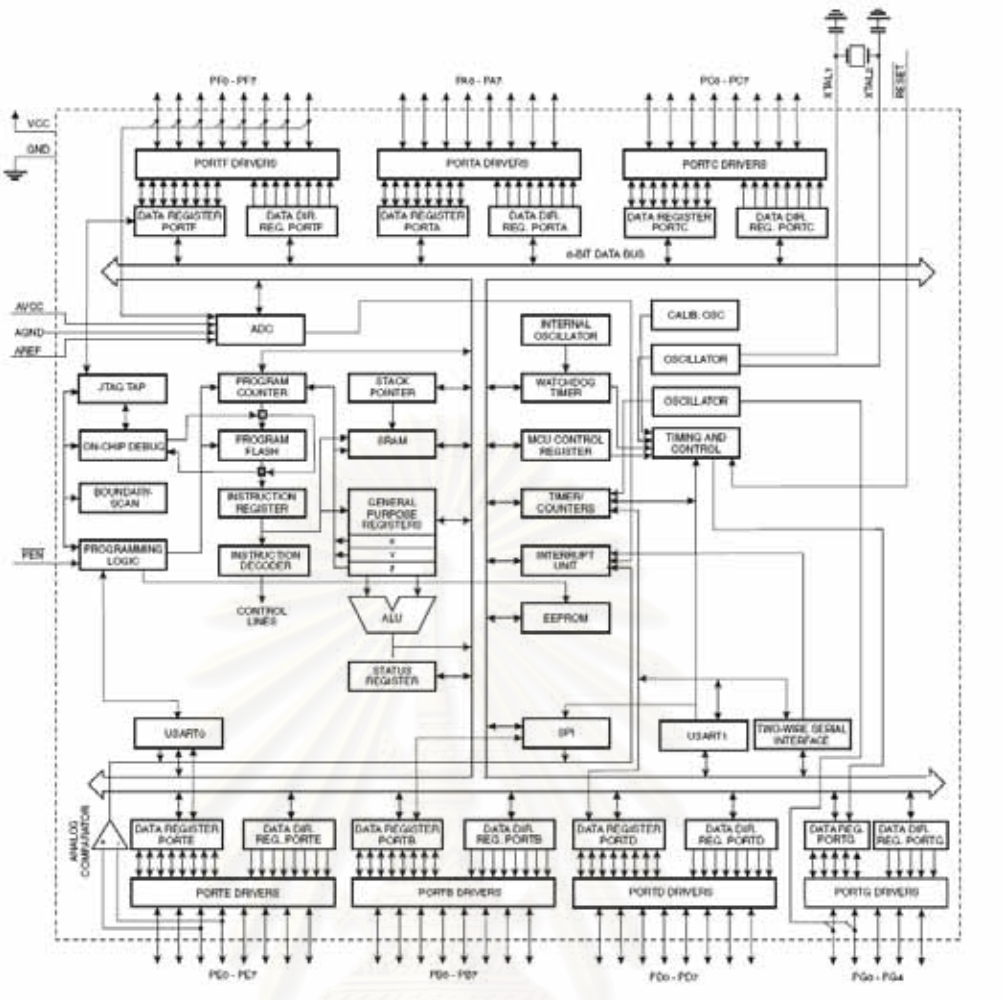
รูปที่ 3-5 บอร์ดทดลองชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล TMS320C6711

ภายในบอร์ดทดลองประกอบไปด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ดังนี้

1. ชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล TMS320C6711
2. ชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล 16 บิต TI AD35
3. หน่วยความจำภายนอกแบบ SDRAM ขนาด 16 Mbytes
4. หน่วยความจำแบบ Flash Rom ขนาด 128 Kbytes
5. ส่วนต่อขยายไปยังบอร์ดลูก

3.2.3. ไมโครคอนโทรเลอร์

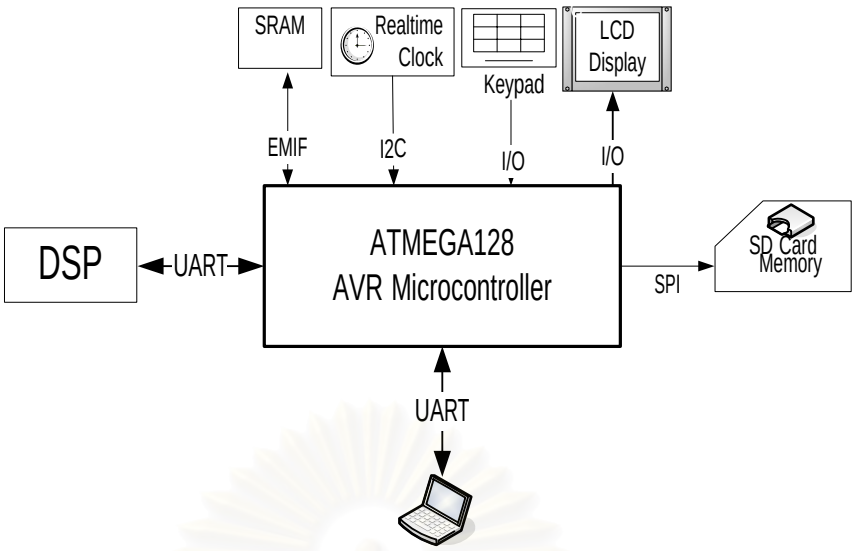
ไมโครคอนโทรเลอร์ ATMEGA128 [15] เป็นไมโครคอนโทรเลอร์ในตระกูล AVR ของบริษัท Atmel มีสถาปัตยกรรมแบบ RISC ที่ทำงานหนึ่งคำสั่งต่อสัญญาณนาฬิกา 1 ลูก และมีโครงสร้างภายในดังรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 โครงสร้างภายในของชิพไมโครคอนโทรเลอร์ ATMEGA128

ไมโครคอนโทรเลอร์ในเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่ออกแบบนี้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นดังรูปที่ 3-7และมีหน้าที่ต่างๆดังนี้

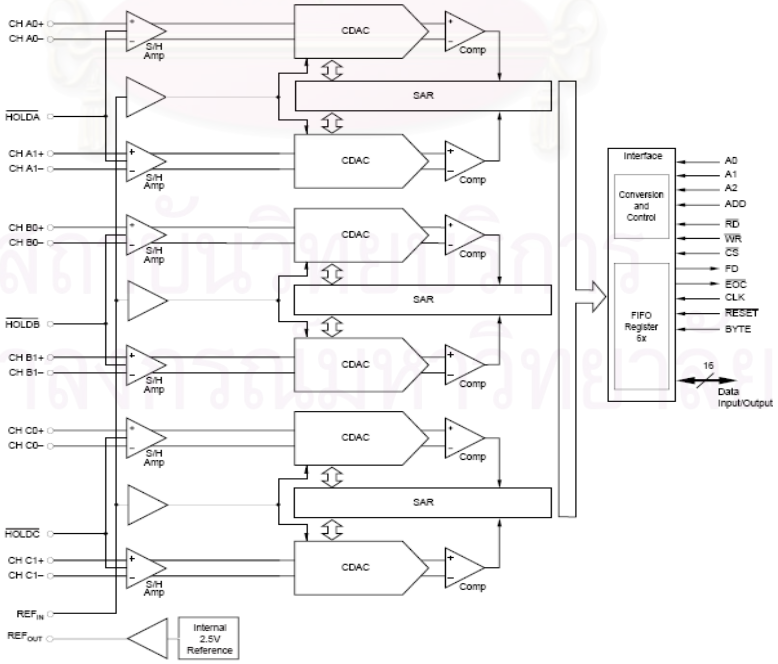
1. แสดงผลผ่านจอผลึกเหลว โดยใช้พอร์ตอินพุตเอาต์พุต (I/O)
2. บันทึกข้องมูลลงหน่วยความจำแบบ SD Card โดยใช้พอร์ตสื่อสารอนุกรม SPI
3. รับฐานเวลาจากชิพฐานเวลาจริง ผ่านพอร์ตสื่อสารอนุกรม I2C
4. ควบคุมการส่งข้อมูลจากชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอลไปยังส่วนต่างๆ ผ่านทางพอร์ตสื่อสารอนุกรม UART
5. ควบคุมการส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ โดยใช้พอร์ตสื่อสารอนุกรม UART
6. ควบคุมการรับข้อมูลจากผู้ใช้ โดยใช้แผงแป้นพิเศษ (keypad) ติดต่อผ่านพอร์ตอินพุตเอาต์พุต (I/O) และขาอินเทอร์รัปต์



รูปที่ 3-7 การเชื่อมต่อระหว่างชิพไมโครคอนโทรเลอร์ ATMEGA128 กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ

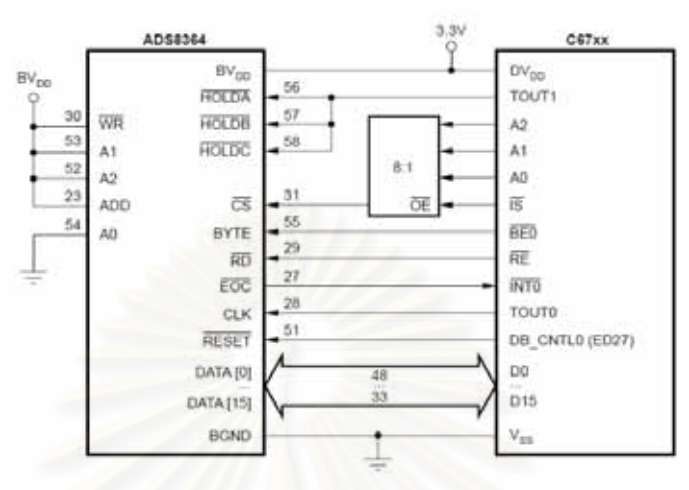
3.2.4. ชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล

ชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลเบอร์ ADS8364 [16] เป็นชิพของบริษัท Texas Instrument มีช่องสัญญาณจำนวน 6 ช่อง ที่ทำงานเป็นอิสระต่อกัน ดังรูปที่ 3-8 ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า 3 เฟสได้ และมีอัตราสุ่มสัญญาณสูงสุด 250 kSPS



รูปที่ 3-8 โครงสร้างภายในของชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล ADS8364

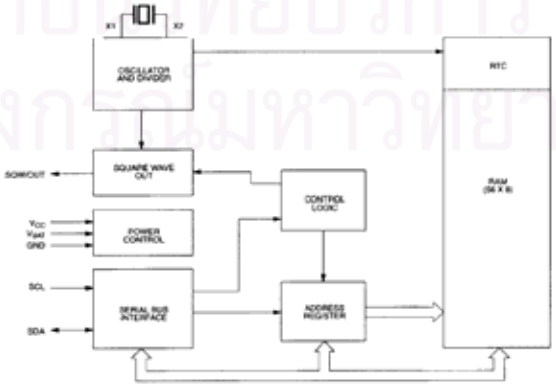
การส่งข้อมูลไปยังชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอลเป็นแบบขนาน (Parallel Interface) 16 บิต ติดต่อกับชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอลผ่านทางมอดูล EMIF (External Memory Interface) ดังรูปที่ 3-9



รูปที่ 3-9 การเชื่อมต่อระหว่างชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล ADS8364 กับชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอลในโหมดควบคุมจากฮาร์ดแวร์

3.2.5. **ชิพฐานเวลาจริง** (Real-time Clock)

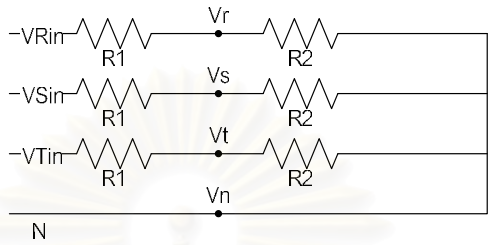
ชิพ DS1307 [17] เป็นชิพที่สร้างฐานเวลาจริงสำหรับบอกช่วงเวลา วินาที นาที ชั่วโมง วัน วันที่ เดือน และปี เป็นไอซีแบบ 8 ขา กินกระแสน้อยกว่า 500 nA ในโหมดแบตเตอรี่สำรอง มีหน่วยความจำภายในไม่ลบเลือน แบบแรม (nonvolatile RAM) ขนาด 56 ไบต์ มีหน้าที่ส่งข้อมูลเวลามายังไมโครคอนโทรเลอร์ผ่านทางพอร์ตสื่อสารอนุกรม I2C และมีโครงสร้างภายในดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3-10 โครงสร้างภายในของชิพฐานเวลาจริง DS1307

3.2.6. **วงจรปรับขนาดสัญญาณ** (Signal Condition Circuit)

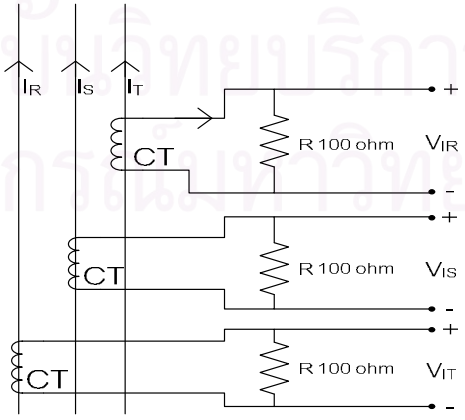
สัญญาณแรงดันและกระแสที่วัดจากในระบบไฟฟ้าสลับ 220 โวลต์จะต้องลดทอนระดับแรงดันให้อยู่ในช่วงที่ชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลสามารถรับได้ตามข้อกำหนดของชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล ADS8364 ซึ่งสามารถรับแรงดันแอนะล็อกได้ระหว่าง 0-5 โวลต์ โดยใช้วงจรปรับขนาดดังนี้



รูปที่ 3-11 วงจรแบ่งแรงดันสำหรับวัดแรงดันในระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย

1. วงจรปรับขนาดสัญญาณสำหรับการวัดแรงดัน เป็นวงจรแบ่งแรงดันโดยใช้ตัวต้านทาน เนื่องจากมีความเป็นเชิงเส้นที่ดีและไม่ยุ่งยาก ดังแสดงในรูปที่ 3-11 เลือกใช้ค่า R1 = 200 kΩ , R2 = 1 kΩ จะได้สัญญาณแรงดันขาออกดังสมการที่ (3.1)

$$V_r - V_n = V_{rn} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) \times (V_{Rin} - V_n)$$
$$V_s - V_n = V_{sn} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) \times (V_{Sin} - V_n) \qquad (3.1)$$
$$V_t - V_n = V_{tn} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) \times (V_{Tin} - V_n)$$

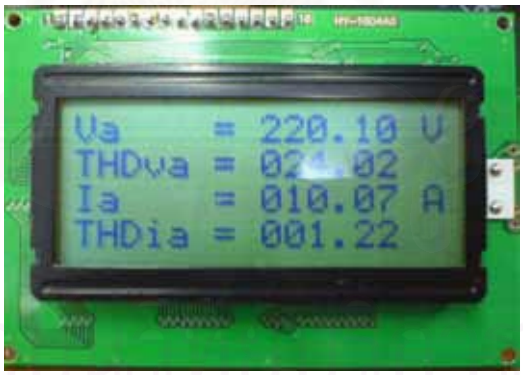


รูปที่ 3-12 วงจรวัดกระแสของระบบไฟฟ้า 3 เฟส 4 สาย

2. วงจรปรับขนาดสัญญาณสำหรับการวัดกระแส สัญญาณกระแสในสาย R, S, T ของระบบไฟฟ้า 3 เฟส จะถูกวัดโดยใช้หม้อแปลงกระแส ที่มีอัตราส่วนของขดลวดปฐมภูมิต่อขดลวดทุติยภูมิเท่ากับ 1:1000 จากนั้นกระแสที่ขดลวดทุติยภูมิจะถูกนำไปผ่านตัวต้านทานขนาด 100 Ω เพื่อสร้างเป็นสัญญาณแรงดันส่งไปยังชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลดังแสดงในรูปที่ 3-12

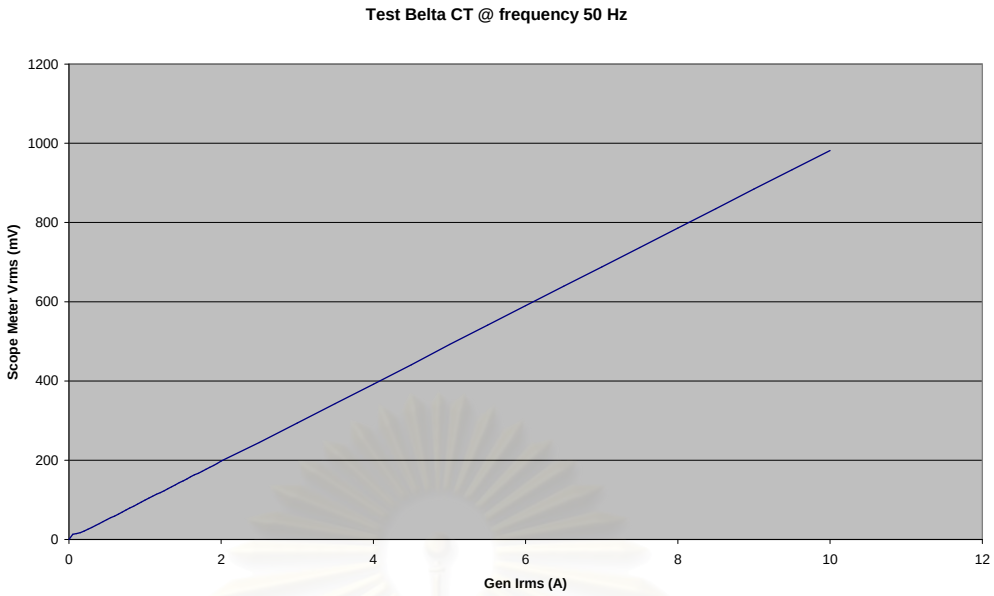
3.2.7. ส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ มีดังนี้

- **จอผลึกเหลว** (LCD) ขนาด 4 บรรทัด บรรทัดละ16 ตัวอักษร ทำหน้าที่แสดงผลข้อมูลคุณภาพไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3-13 ข้อมูลที่จะแสดงผลบนจอแอลซีดีมีดังนี้
  1. ค่ารากที่สองกำลังเฉลี่ยของแรงดันและกระแส
  2. กำลังจริง (Real Power), กำลังเสมือน (Reactive Power), กำลังปรากฏ (Apparent Power)
  3. ปริมาณฮาร์มอนิกส์ของแรงดันและกระแส
  4. ทิศทางของแหล่งกำเนิดแรงดันตกชั่วขณะ
  5. ตัวประกอบกำลัง (Power Factor)
  6. ดัชนีการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Sag Index)
  7. ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดันและกระแส (THD_V, THD_I)



รูปที่ 3-13 จอแอลซีดี 16X4

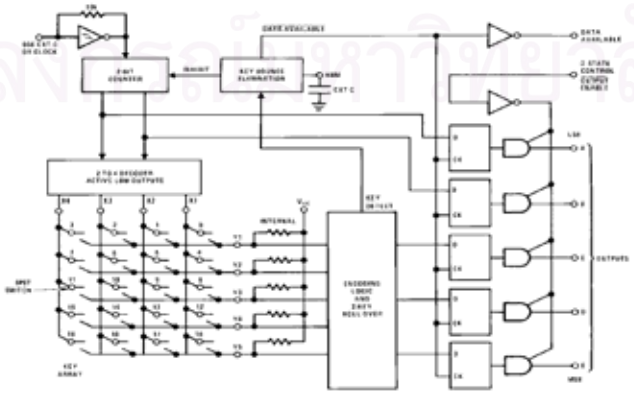
- **หม้อแปลงกระแส** (Current Transformer) 3 **เฟส** ของบริษัท Shenzhen Belta Electronic ความแม่นยำระดับคลาส 0.1% อัตราส่วนขดลวดปฐมภูมิต่อทุติยภูมิ 1:1000 กระแสพิกัด 10 A มีความเป็นเชิงเส้นในการวัดในช่วงกระแส 0 - 10 A ดังกราฟในรูปที่ 3-14



รูปที่ 3-14 กราฟทดสอบความเป็นเชิงเส้นในการวัดในช่วงกระแส 0-10 A

- **แผงแป้นพิเศษ** (keypad) 16 ปุ่ม จัดเรียงแบบ 4X4 มีหน้าที่รับคำสั่งจากผู้ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 3-15 จะใช้งานร่วมกับชิพเข้ารหัส MM74C922 [18] มีโครงสร้างภายในดังรูปที่ 3-16 เพื่อนำค่าที่อ่านจากปุ่มบนแผงแป้นพิเศษ มาเข้ารหัสเป็นตัวเลขฐานสอง 4 บิต

รูปที่ 3-15 แผงแป้นพิเศษ



รูปที่ 3-16 โครงสร้างภายในชิพเข้ารหัส MM7C922

- **หน่วยความจำชนิด** SD Card ดังแสดงในรูปที่ 3-17 เป็นหน่วยความจำที่ใช้ในการบันทึกค่าพารามิเตอร์คุณภาพไฟฟ้าและข้อมูลรูปคลื่นของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทั้ง 3 เฟสดังแสดงตัวอย่างการบันทึกข้อมูลในรูปที่ 3-18

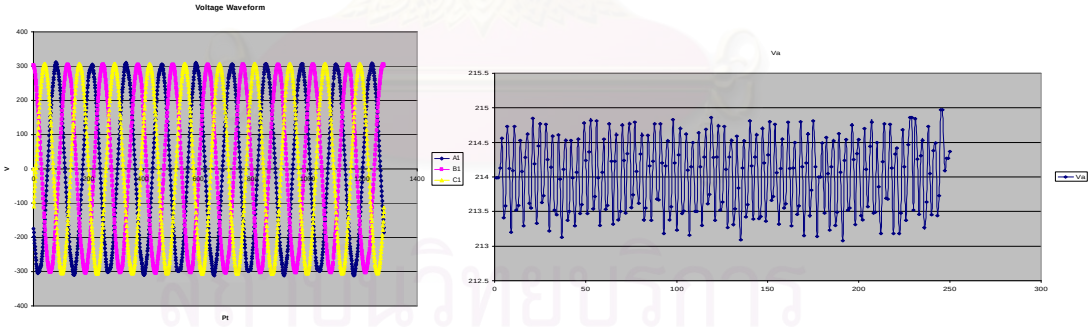
รูปที่ 3-17 หน่วยความจำ SD Card

Microsoft Excel - 1039-20-2.xls

File Edit View Insert Format Tools Data Window Help

A205 100309-20:56:47

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
1	1039-20.dat														
2	Time	Va	THDva	Ia	THDIa	Vb	THDvb	Ib	THDIb	Vc	THDvc	Ic	THDic	Pa	Qa
3	100309-20:46:38	213.99	1.75	10.14	2.44	212.52	1.93	10.08	2.06	216.31	1.36	10.06	4.17	1.931	
4	100309-20:46:40	213.99	1.75	10.14	2.44	212.52	1.93	10.08	2.06	216.31	1.36	10.06	4.17	1.931	
5	100309-20:46:43	214.13	1.45	10.06	1.41	213.77	1.43	10.14	5.93	215.02	2.21	10.08	4.25	1.913	
6	100309-20:46:46	214.56	1.39	10.11	0.79	212.68	2.11	10.1	4	215.54	1.59	10.04	2.4	1.933	
7	100309-20:46:49	213.41	1.91	10.1	0.9	213.03	1.73	10.08	3.14	216.46	1.32	10.1	5.62	1.913	
8	100309-20:46:52	213.58	1.84	10.05	1.48	214	1.3	10.09	6.89	215.41	1.88	10.1	5.13	1.901	
9	100309-20:46:55	214.73	1.37	10.09	1.18	213.27	1.8	10.13	5.42	215	1.96	10.04	1.64	1.928	
10	100309-20:46:58	214.12	1.77	10.13	0.72	212.61	2.07	10.07	1.99	216.1	1.47	10.06	4.05	1.947	
11	100309-20:47:01	213.2	2.11	10.07	1.32	213.64	1.52	10.08	3.67	216.07	1.77	10.11	5.88	1.904	
12	100309-20:47:04	214.09	1.55	10.06	1.37	213.9	1.57	10.14	5.87	215.2	2.11	10.06	3.28	1.912	
13	100309-20:47:07	214.73	1.51	10.12	0.74	212.74	2.11	10.11	4.01	215.41	1.68	10.04	2.23	1.937	
14	100309-20:47:10	213.52	2.09	10.11	0.92	212.99	1.79	10.07	2.83	216.34	1.43	10.1	5.61	1.915	
15	100309-20:47:13	213.59	1.87	10.06	1.54	214.01	1.35	10.12	5.22	215.45	1.91	10.1	5.16	1.904	
16	100309-20:47:16	214.53	1.44	10.08	1.15	213.27	1.89	10.14	5.45	214.99	2.07	10.03	1.82	1.923	
17	100309-20:47:19	214.08	1.79	10.12	0.74	212.53	2.01	10.07	2.04	216.08	1.52	10.06	4.17	1.928	
18	100309-20:47:22	213.29	2.24	10.07	1.28	213.65	1.55	10.09	3.62	216.03	1.79	10.11	5.88	1.904	

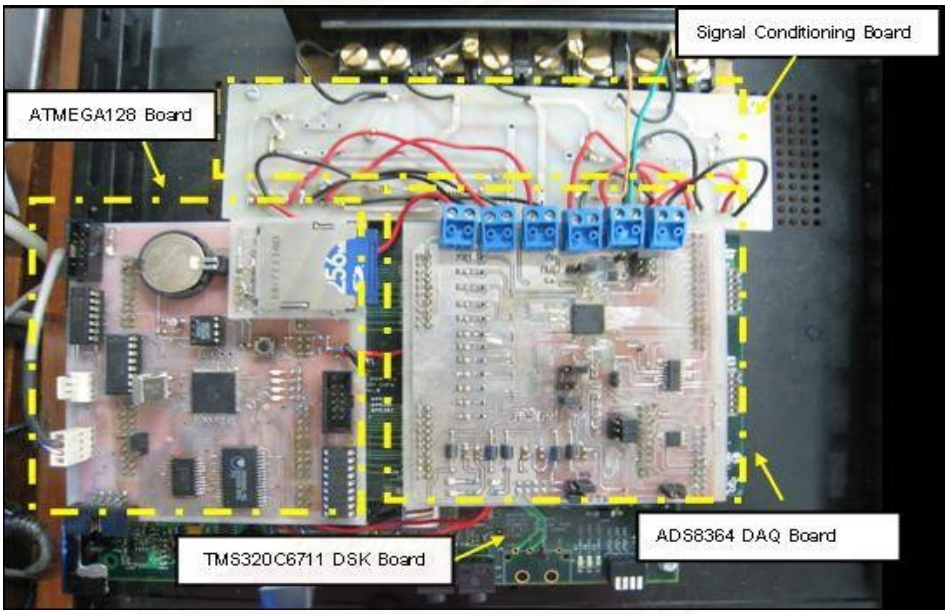


รูปที่ 3-18 ตัวอย่างข้อมูลที่บันทึกลงในหน่วยความจำ SD Card

3.3. ฮาร์ดแวร์ที่พัฒนาขึ้น

ฮาร์ดแวร์ภายในเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในรูปที่ 3-19 ประกอบไปด้วยบอร์ดต่างๆดังนี้

1. บอร์ดปรับปรุงขนาดสัญญาณ (Signal Conditioning Board)
2. บอร์ดดึงสัญญาณข้อมูล (ADS8364 Data Acquisition Board)
3. บอร์ดวิเคราะห์ประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (TMS320C6711 DSK Board)
4. บอร์ดบันทึก, รับส่ง และแสดงผลข้อมูล (ATMEGA128 Board)



(a)

(b)

รูปที่ 3-19 ฮาร์ดแวร์ภายในเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า

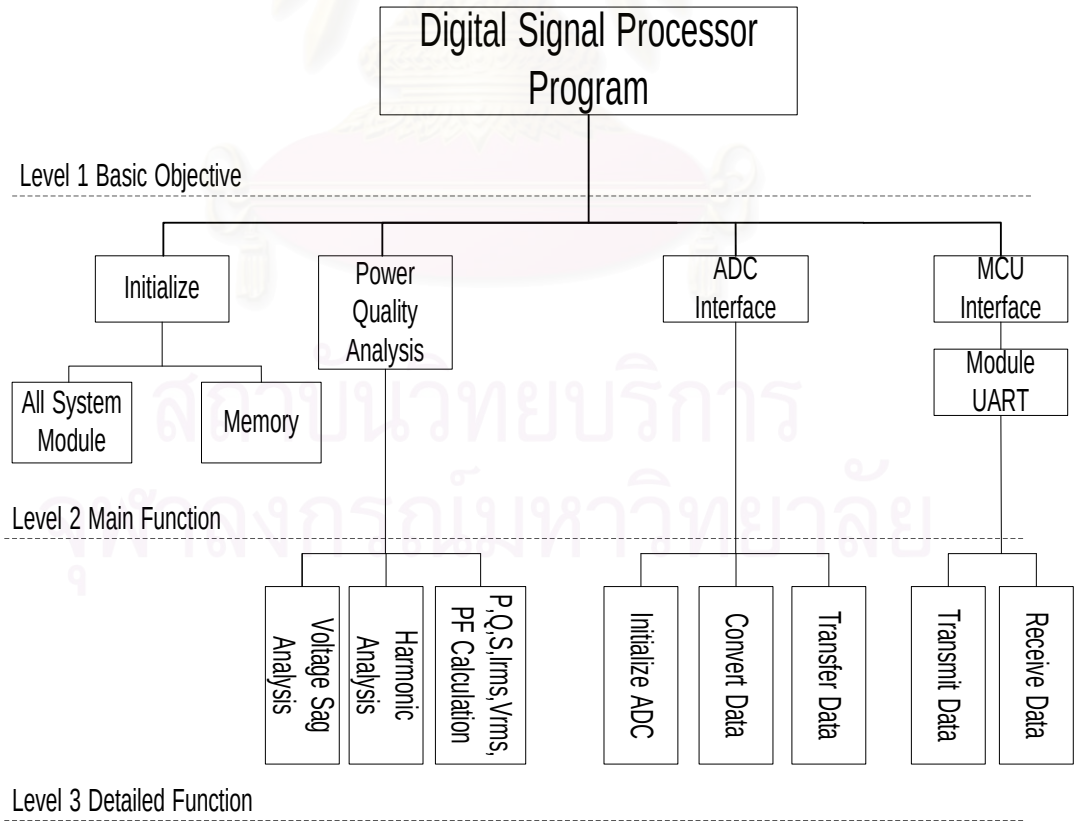
บทที่ 4

รายละเอียดด้านซอฟต์แวร์

ซอฟต์แวร์ควบคุมการทำงานของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ โปรแกรมควบคุมบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอล, โปรแกรมควบคุมการทำงานไมโครคอนโทรเลอร์ และโปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (Graphic User Interface - GUI)

4.1. โปรแกรมควบคุมบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอล

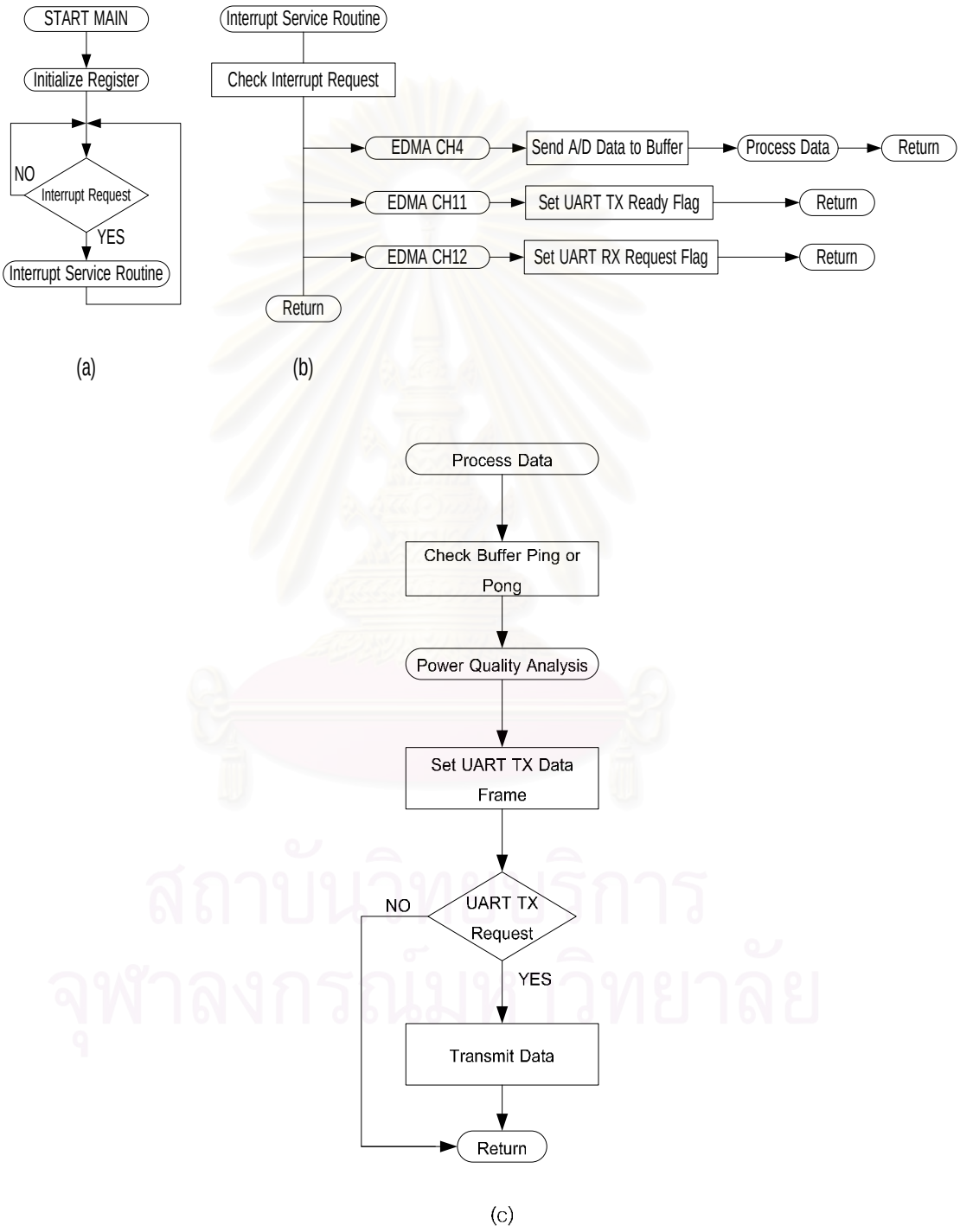
โปรแกรมควบคุมบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอลในเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าใช้ภาษาซีในการพัฒนา โดยใช้โปรแกรม Code Composer Studio ของบริษัท Texas Instruments ทำหน้าที่เริ่มการทำงานของบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอล, ควบคุมการทำงานของชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล, คำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อหาพารามิเตอร์และข้อมูลที่เกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้า, จัดการหน่วยความจำภายในบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอล และรับส่งข้อมูลไปยังไมโครคอนโทรเลอร์ โปรแกรมนี้มีโครงสร้างดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4-1 โครงสร้างโปรแกรมบนบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอล

4.1.1. การทำงานของโปรแกรมควบคุมบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอล

การทำงานเริ่มต้นจาก ตั้งค่าเริ่มต้นให้กับเรจิสเตอร์ต่างๆภายในชิพประมวลผลสัญญาณดิจตอลได้แก่ EMIF, Timer, McBSP, Interrupt, EDMA ฯลฯ จากนั้น ชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอลก็จะเข้าสู่โหมดรอการร้องขอจากสัญญาณขัดจังหวะ เพื่อทำงานในแต่ละประเภทของสัญญาณขัดจังหวะ (Interrupt) โดยมีวงรอบการทำงานดังแผนผังในรูปที่ 4-2a



รูปที่ 4-2 แผนผังการทำงานของโปรแกรมควบคุมบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

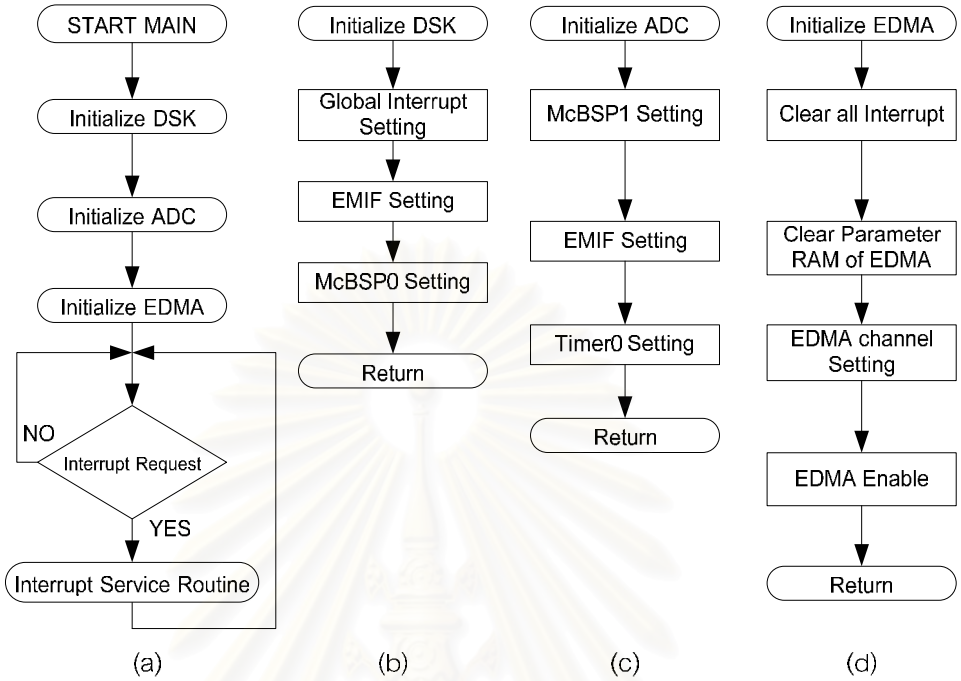
สัญญาณขัดจังหวะจะถูกสร้างขึ้นจากเหตุการณ์การต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4-2b ดังนี้

1. เมื่อข้อมูลจาก A/D ถูกส่งไปยังชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล ครบตามขนาดหน่วยความจำที่ตั้งไว้ตอนตั้งค่าเริ่มต้นให้กับเจิสเตอร์มอดูล EDMA CH4
2. เมื่อไมโครคอนโทรเลอร์ร้องขอข้อมูลผ่านทางมอดูลสื่อสารอนุกรม UART มายัง EDMA CH 12
3. เมื่อข้อมูลจากชิพประมวลสัญญาณดิจิตอลถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรเลอร์ ซึ่งควบคุมโดยมอดูล EDMA CH11 ครบตามจำนวนที่ร้องขอ

ข้อมูลแรงดันสลับและกระแสสลับ 3 เฟส จาก A/D จะถูกส่งมายังชิพประมวลสัญญาณดิจิตอลตลอดเวลา เมื่อบัฟเฟอร์ที่สร้างไว้สำหรับเก็บข้อมูล 3 วินาที (150 cycle) เต็มแล้ว ข้อมูลในบัฟเฟอร์นี้จะถูกนำไปวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ทางคุณภาพไฟฟ้าได้แก่ ปริมาณฮาร์มอนิกส์, ดัชนีแรงดันตก, V_{rms}, I_{rms}, กำลังจริง (P), กำลังเสมือน (Q), กำลังปรากฏ (S), และตัวประกอบกำลัง ในขณะเดียวกัน ข้อมูลชุดใหม่ก็จะถูกส่งไปเก็บยังบัฟเฟอร์อีกชุด วงรอบนี้จะวนไปเรื่อยๆ ถ้ามีสัญญาณขัดจังหวะจากมอดูล EDMA CH12 ดังรูปที่ 4-2c ซึ่งเป็นสัญญาณร้องขอข้อมูลจากไมโครคอนโทรเลอร์ ชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอลจะตรวจสอบว่าบัฟเฟอร์ Ping หรือ Pong เป็นบัฟเฟอร์ที่กำลังถูกประมวลผลโดยหน่วยประมวลผลกลางอยู่ และพร้อมที่จะส่งข้อมูลไปยังไมโครคอนโทรเลอร์ ข้อมูลรูปคลื่นและข้อมูลคุณภาพไฟฟ้าจะถูกนำไปจัดเรียงสำหรับส่งไปยังไมโครคอนโทรเลอร์ทางช่องสัญญาณ EDMA CH11 จากนั้น เมื่อข้อมูลทั้งหมดถูกส่งออกไปมอดูล EDMA CH11 ก็จะส่งสัญญาณขัดจังหวะมาบอกว่าข้อมูลได้ถูกส่งไปหมดแล้ว จากนั้นชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอลก็จะรอรับสัญญาณขัดจังหวะเหล่านี้ไปตลอดการทำงานของเครื่อง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.2. การเริ่มต้นการทำงานบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอลและชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล



รูปที่ 4-3 แผนผังการเริ่มต้นการทำงานบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอลและชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล

บอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอลจะเริ่มต้นทำงานโดยตั้งค่าเรจิสเตอร์ที่เกี่ยวกับสัญญาณขัดจังหวะ (Interrupt) จากนั้นก็จะตั้งค่าเรจิสเตอร์ของมอดูล EMIF ภายในชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอลให้ติดต่อกับหน่วยความจำบนบอร์ด ได้แก่หน่วยความจำประเภท SDRAM และสุดท้ายจะตั้งค่ารีจิสเตอร์ภายในมอดูล McBSP0 ให้สามารถรับส่งข้อมูลอนุกรมแบบ UART ได้ดังแผนผังในรูปที่ 4-3b

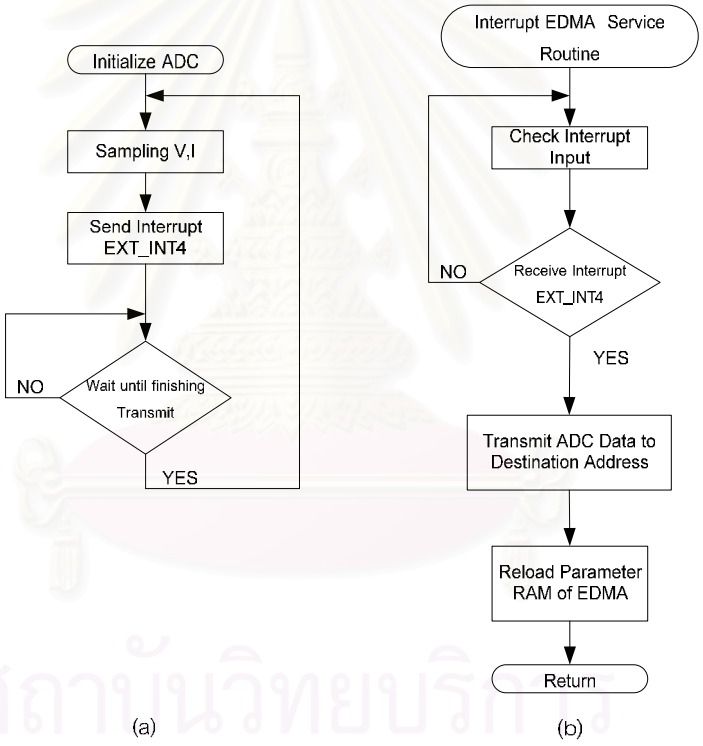
ชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล ADS8364 จะเริ่มทำงานตามแผนผังในรูปที่ 4-3c การติดต่อระหว่างชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอลกับชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลจะต้องเริ่มต้นการทำงานของมอดูล EMIF, EDMA, McBSP1, Interrupt4 และ Timer0 โดยการตั้งค่าเรจิสเตอร์ในมอดูล McBSP1 ให้ทำงานในโหมด GPIO ทำหน้าที่คุมขา ADD (Address Mode Select) และ ขา Reset ของชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล กำหนดค่าในเรจิสเตอร์ Timer0 เพื่อขับสัญญาณนาฬิกาและกำหนดอัตราการสุ่มของชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลและเปิดการทำงานขา EXT_INT4 (External Interrupt 4) เพื่อรับสัญญาณขัดจังหวะ(Interrupt) จากชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลหลังจากสุ่มข้อมูลและแปลง

ข้อมูลเสร็จ สุดท้ายต้องกำหนดช่องสัญญาณของ EDMA ที่จะคอยรับสัญญาณขัดจังหวะและเรจิสเตอร์เลขที่อยู่ของแหล่งต้นทาง (Source Address Register) และปลายทาง (Destination Address Register) รวมถึงขนาดข้อมูลให้กับมอดูล EDMA ดังแสดงในรูปที่ 4-3d

เมื่อเริ่มต้นการทำงานในทุกๆส่วนแล้ว หน่วยประมวลสัญญาณดิจิตอลจะรอจนกว่ามีสัญญาณขัดจังหวะเข้ามาจึงจะเข้าไปทำงานตามแต่ประเภทของสัญญาณขัดจังหวะที่เข้ามาดังแผนผังในรูปที่ 4-3a

4.1.3. การติดต่อกับชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล

เมื่อชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลเริ่มทำงานแล้ว จังหวะการสุ่มและแปลงข้อมูลแรงดันและกระแสจากระบบไฟฟ้าที่วัดเข้ามาจะถูกกำหนดโดยสัญญาณนาฬิกาที่ควบคุมโดยมอดูล Timer0 ดังแสดงในรูปที่ 4-4a

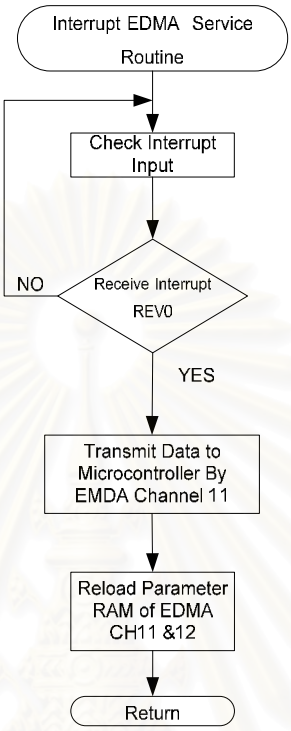


รูปที่ 4-4 แผนผังการทำงานของชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล และทำงานของมอดูล EDMA ช่องสัญญาณที่ 4

เมื่อแปลงข้อมูลเสร็จ ชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลจะส่งสัญญาณขัดจังหวะไปยังชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล เพื่อสั่งให้มอดูล EDMA ช่องสัญญาณที่ถูกตั้งให้รับสัญญาณขัดจังหวะ (Channel 4) รับข้อมูลที่แปลงได้และส่งไปยังหน่วยความจำตามเลขที่อยู่ปลายทาง (Destination Address) เมื่อรับข้อมูลเสร็จ มอดูล EDMA ช่องสัญญาณนี้จะลบตัวบ่งชี้

สัญญาณขัดจังหวะนี้ (Clear Interrupt Flag) แล้วกลับไปรอรับข้อสัญญาณขัดจังหวะใหม่ ดังรูปที่ 4-4b

4.1.4. การติดต่อและส่งข้อมูลไปยังไมโครคอนโทรเลอร์ ATMEGA 128



รูปที่ 4-5 แผนผังการรับส่งข้อมูลระหว่างชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอลกับไมโครคอนโทรเลอร์

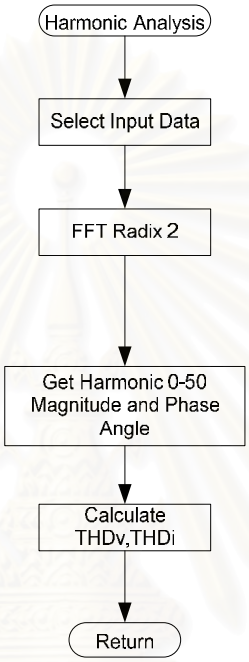
ข้อมูลทางคุณภาพไฟฟ้าที่วิเคราะห์ได้จะถูกนำมาจัดเป็นชุดข้อมูลและใส่กรอบ (Frame) โดยจะใส่ตัวนำหน้า (Header) เพื่อระบุเฟสของข้อมูลแรงดันหรือกระแสที่บรรจุมา ก่อนที่จะถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรเลอร์ การติดต่อระหว่าง 2 หน่วยประมวลนี้จะติดต่อแบบอนุกรม UART ดังแผนผังในรูปที่ 4-5 การส่งข้อมูลจะเริ่มต้นเมื่อมีสัญญาณคำสั่งจากไมโครคอนโทรเลอร์มาสั่งให้ชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอลส่งข้อมูล การรับคำสั่งนี้จะถูกควบคุมโดยมอดูล EDMA ช่องสัญญาณที่ 12 ซึ่งเชื่อมต่อกับส่วนรับข้อมูลของมอดูล McBSP0 จากนั้นชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอลจะสั่งให้มอดูล EDMA ช่องสัญญาณที่ 11 ซึ่งเชื่อมต่อกับส่วนส่งข้อมูลของมอดูล McBSP0 ส่งข้อมูลที่เก็บไว้ในหน่วยความจำตามเลขที่อยู่ของแหล่งต้นทาง (Source Address Register) ไปยังไมโครคอนโทรเลอร์

4.1.5. โปรแกรมวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า

โปรแกรมในส่วนนี้จะทำหน้าที่วิเคราะห์หาปริมาณต่างๆที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพไฟฟ้า ประกอบด้วยโปรแกรมต่างๆดังนี้

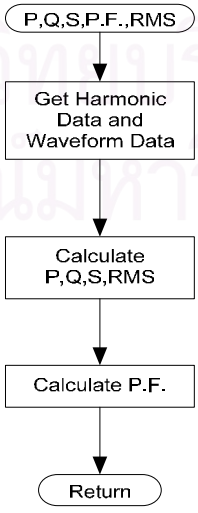
4.1.5.1. โปรแกรมวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์

มีหน้าที่วิเคราะห์หาปริมาณฮาร์มอนิกส์ในสัญญาณแรงดันและกระแสที่สุ่มเข้ามา โดยการแปลงฟรูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform - FFT) ชนิด Radix2 หลังจากแปลงแล้ว จะได้ข้อมูลขนาดและเฟสของสัญญาณแรงดันและกระแส ตั้งแต่ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 0 ถึง 50 ข้อมูลนี้จะถูกนำไปคำนวณหาพารามิเตอร์ ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดันและกระแส ตามสมการที่ (2.3)และ (2.4) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4-6



รูปที่ 4-6 แผนผังการวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกส์

4.1.5.2. โปรแกรมคำนวณหาปริมาณทางไฟฟ้า (P, Q, S, PF, I_{rms}, V_{rms})



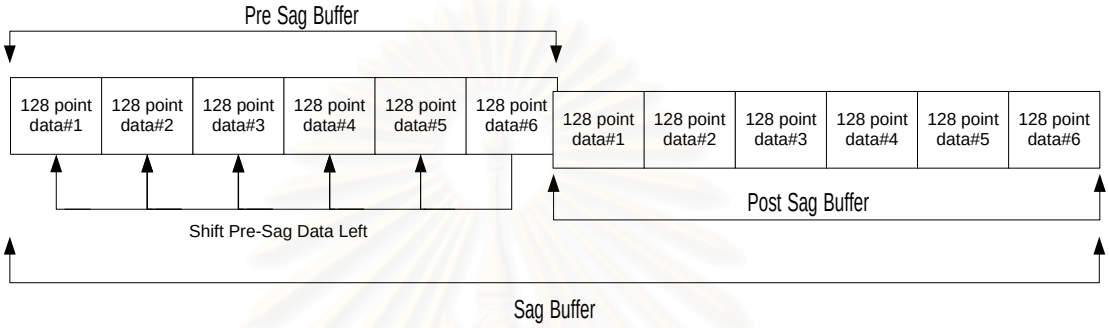
รูปที่ 4-7 แผนผังการวิเคราะห์ปริมาณ P, Q, P. F., RMS

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การใช้อัลกลริธึมแปลงฟรูเรียร์แบบเร็ว จะให้ค่ามุมเฟสของสัญญาณแรงดันและกระแสของสัญญาณที่สุ่มด้วย ทำให้การวิเคราะห์หากำลังจริง (P), กำลังเสมือน (Q), กำลังปรากฏ (S) และตัวประกอบกำลังดังแผนผังในรูปที่ 4.6 ทำได้อย่างสะดวกตามสมการที่ (2.12) - (2.17)

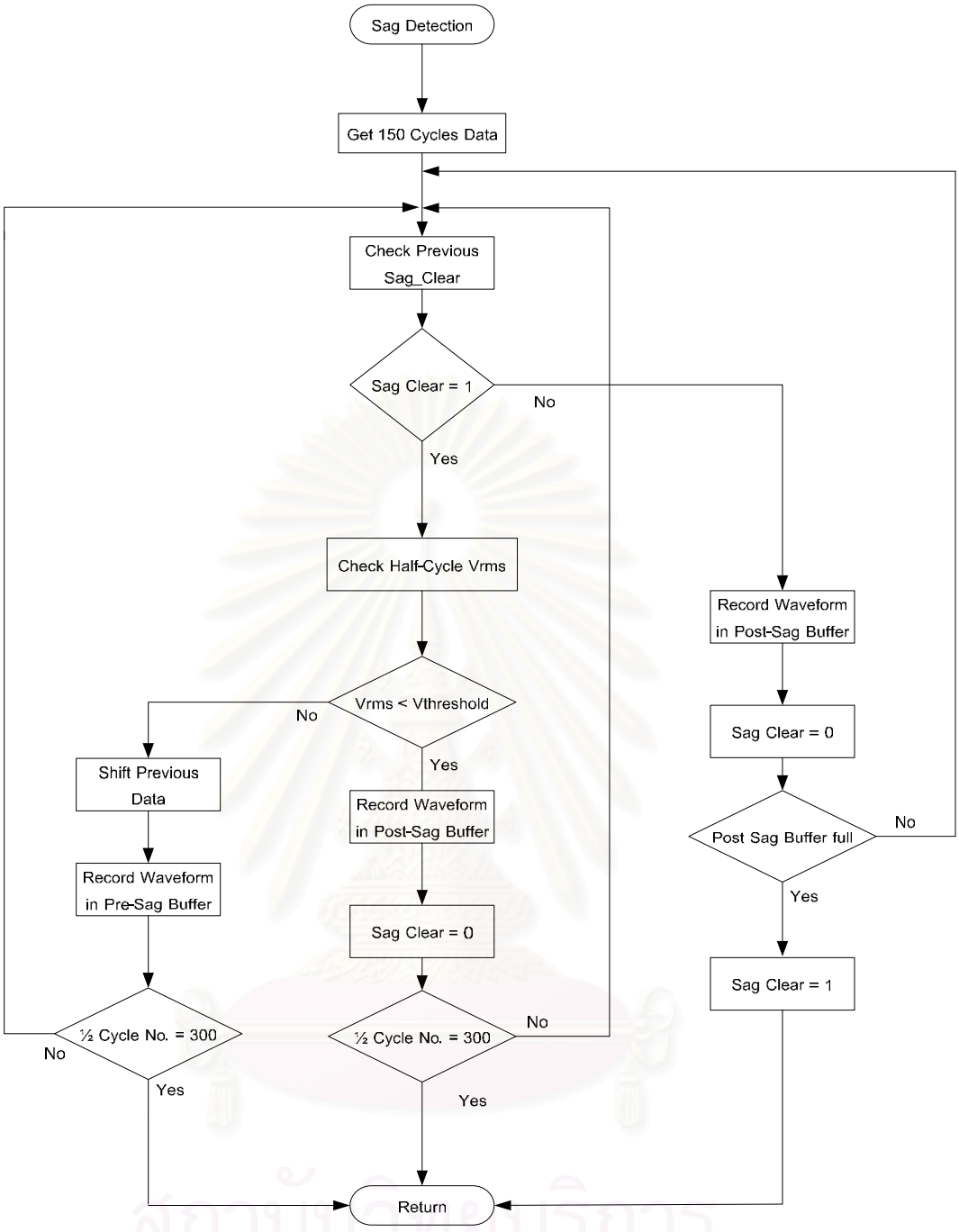
4.1.5.3. โปรแกรมวิเคราะห์การเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Sag)

มีหน้าที่วิเคราะห์หาดัชนีการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ และหาทิศทางของแหล่งกำเนิดแรงดันตกชั่วขณะโดยการพิจารณาจากเครื่องหมายความต้านทาน (Resistance Sign Based)



รูปที่ 4-8 การจัดเก็บข้อมูลสัญญาณการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ

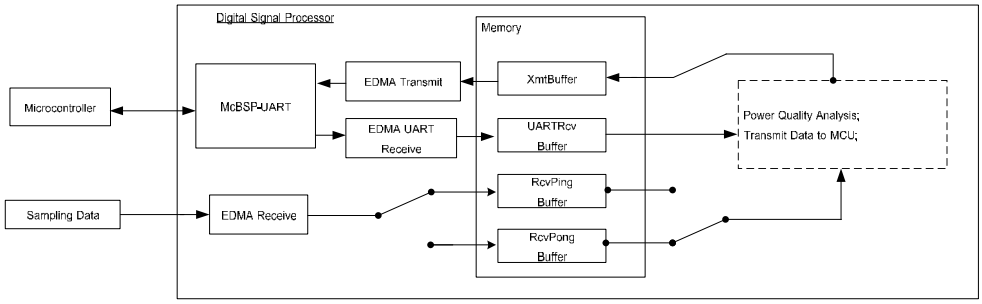
การทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์การเกิดแรงดันตกชั่วขณะ เริ่มจากการนำรูปคลื่นแรงดัน 150 cycle ที่ถูกเก็บบันทึกในบัฟเฟอร์มาตรวจค่า RMS ของแรงดันทุกๆครึ่งคาบสัญญาณ (Half Cycle V_{rms}, $V_{1/2rms}$) ถ้าค่า $V_{1/2rms}$ มีค่ามากกว่าค่าขีดแบ่งแรงดัน (Threshold Voltage - V_{th}) ข้อมูลแรงดันในช่วงครึ่งคาบนี้หรือข้อมูล 128 จุดนี้จะถูกบันทึกลงบัฟเฟอร์ในส่วนของการบันทึกรูปคลื่นก่อนเกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Pre Sag Buffer) ณ ตำแหน่งที่ 6 ข้อมูลก่อนหน้านี้จะถูกเลื่อนไปทางซ้ายดังแสดงในรูปที่ 4-8 ถ้าค่า $V_{1/2rms}$ มีค่าน้อยกว่าค่า V_{th} สัญญาณแรงดันจะถูกบันทึกในบัฟเฟอร์ในส่วนที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ (Post Sag Buffer) จนกระทั่งบัฟเฟอร์ในส่วนนี้เต็ม (6 cycle) จากนั้นก็จะเริ่มกระบวนการคำนวณหาดัชนีแรงดันตกชั่วขณะและทิศของต้นกำเนิดแรงดันตกชั่วขณะ โดยการตรวจสอบระดับแรงดัน $V_{1/2rms}$ จะทำทั้งหมด 300 ครั้ง (ครบ 150 cycle) ต่อหนึ่งบัฟเฟอร์ จากนั้นก็ทำการวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดัน 150 cycle ในบัฟเฟอร์ต่อไป ซึ่งกระบวนการทำงานของโปรแกรมตรวจสอบการเกิดแรงดันตกชั่วขณะเป็นดังแผนผังในรูปที่ 4-9



รูปที่ 4-9 แผนผังโปรแกรมตรวจสอบการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ

4.1.5.4. การควบคุมการรับส่งข้อมูลระหว่างหน่วยความจำด้วยมอดูล EDMA

การรับส่งข้อมูลระหว่างชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล, ชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล และไมโครคอนโทรเลอร์จะถูกควบคุมด้วยมอดูล EDMA ดังแสดงในรูปที่ 4-10

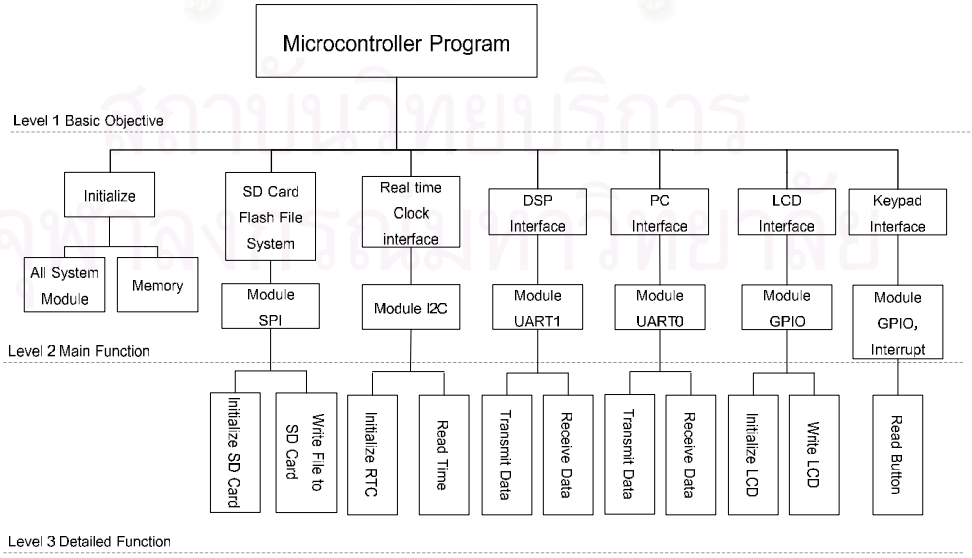


รูปที่ 4-10 แผนภาพการทำงานของมอดูล EDMA

ขณะที่หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) ของชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอลกำลังวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าอยู่ โดยนำข้อมูลที่บันทึกอยู่ในบัฟเฟอร์ Pong มาวิเคราะห์ ข้อมูลแรงดันและกระแสจากชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกที่แปลงอยู่ขณะนี้จะถูกส่งเข้ามาเก็บยังบัฟเฟอร์ Ping หลังจากที่วิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าเสร็จ ก็จะสลับไปรับข้อมูลจากบัฟเฟอร์ Ping มาวิเคราะห์แทน ส่วนข้อมูลแรงดันและกระแสจากชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกก็จะถูกส่งเข้ามาเก็บยังบัฟเฟอร์ Pong แทน กระบวนการแบบนี้เรียกว่า Ping-Pong Buffering จะช่วยให้การวิเคราะห์ข้อมูลหรือการบันทึกข้อมูลเป็นไปได้อย่างต่อเนื่อง ไม่มีการขาดหายไปของสัญญาณในช่วงที่หน่วยประมวลกลางกำลังทำงานอยู่ เนื่องจากมอดูล EDMA กับ หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) ทำงานเป็นอิสระต่อกัน

4.2. โปรแกรมบนไมโครคอนโทรเลอร์

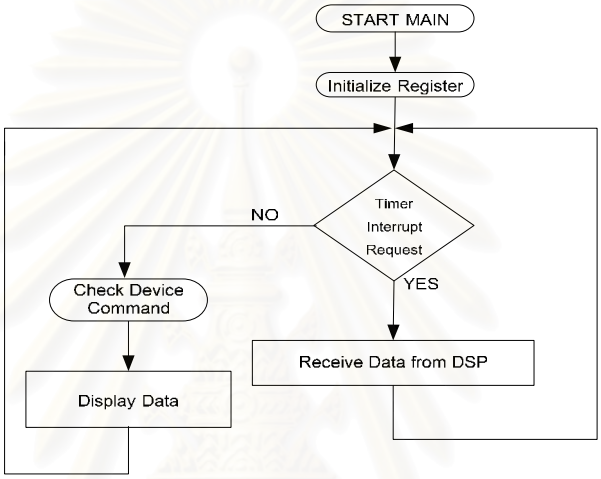
ไมโครคอนโทรเลอร์ ATMEGA 128 ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการติดต่อระหว่างเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้ากับผู้ใช้ มีโครงสร้างโปรแกรมภายในดังรูปที่ 4-11



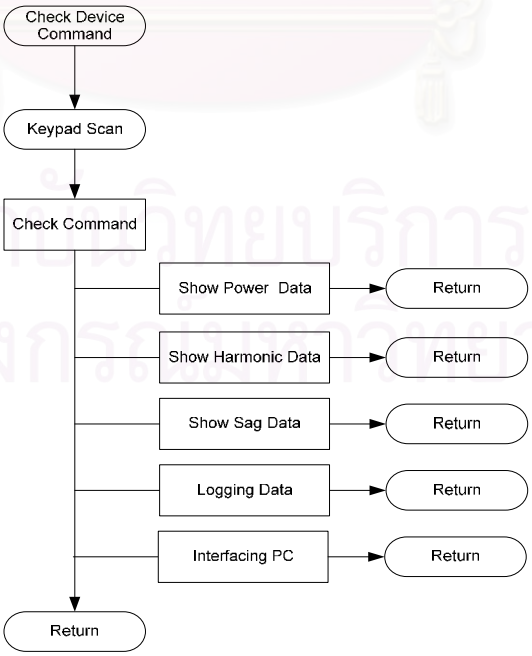
รูปที่ 4-11 โครงสร้างโปรแกรมบนบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์

4.2.1. การทำงานของโปรแกรมบนไมโครคอนโทรเลอร์

การทำงานของโปรแกรมบนไมโครคอนโทรเลอร์จะเริ่มต้นจากการตั้งค่าเริ่มต้นให้กับเรจิสเตอร์ต่างๆได้แก่ UART, Timer, GPIO, SPI, I2C และ Interrupt จากนั้นไมโครคอนโทรเลอร์จะส่งสัญญาณไปยังบอร์ดประมวลสัญญาณดิจิตอลทุกๆ 3 วินาที เพื่อร้องขอข้อมูล กระบวนการนี้จะถูกควบคุมโดยมอดูล Timer ซึ่งจะส่งสัญญาณขัดจังหวะมายังไมโครคอนโทรเลอร์ตามช่วงเวลาที่กำหนดในเรจิสเตอร์ หลังจากที่ไมโครคอนโทรเลอร์รับข้อมูลแล้วก็จะตรวจสอบคำสั่งที่รับจากแผงแป้นพิเศษ เพื่อแสดงผลผ่านจอผลึกเหลว หรือแสดงผลผ่านโปรแกรมประสานกราฟิกกับผู้ใช้ หรือบันทึกข้อมูลลงหน่วยความจำ SD Card ดังแสดงในรูปที่ 4-12 และ รูปที่ 4-13



รูปที่ 4-12 แผนผังโปรแกรมบนไมโครคอนโทรเลอร์



รูปที่ 4-13 แผนผังโปรแกรมตรวจสอบคำสั่ง

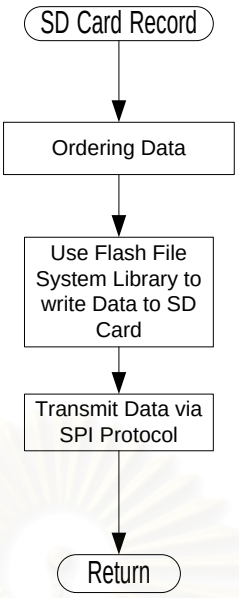
4.2.2. การเริ่มต้นการทำงานไมโครคอนโทรเลอร์ ATMEGA 128

การเริ่มต้นการทำงานของไมโครคอนโทรเลอร์จะเริ่มจากการตั้งค่าเริ่มต้นการทำงานให้กับเรจิสเตอร์ โดยการตั้งค่าเริ่มต้นให้กับเรจิสเตอร์ต่างๆดังนี้

1. เรจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของมอดูล UART0, UART1 เพื่อกำหนดความเร็วในการรับส่งข้อมูล (Baud-Rate) เป็น 115,200 bit/sec สำหรับการรับส่งข้อมูลกับหน่วยประมวลสัญญาณดิจิตอลและโปรแกรมประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (GUI)
2. เรจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของมอดูล Timer สำหรับควบคุมระยะเวลาในการติดต่อกับบอร์ดประมวลผลสัญญาณดิจิตอล
3. เรจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของมอดูล GPIO สำหรับควบคุมการแสดงผลบนจอแอลซีดี
4. เรจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของมอดูล SPI สำหรับการส่งข้อมูลไปบันทึกยังหน่วยความจำ SD Card
5. เรจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของมอดูล I2C สำหรับติดต่อกับชิพฐานเวลาจริง
6. เรจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของมอดูล Interrupt เพื่อกำหนดประเภทการรับของสัญญาณขัดจังหวะให้เป็นขอบขาขึ้น (Rising Edge) สำหรับการรับค่าจากแผงแป้นพิเศษ (Keypad)

4.2.3. โปรแกรมบันทึกข้อมูลลงหน่วยความจำ SD Card

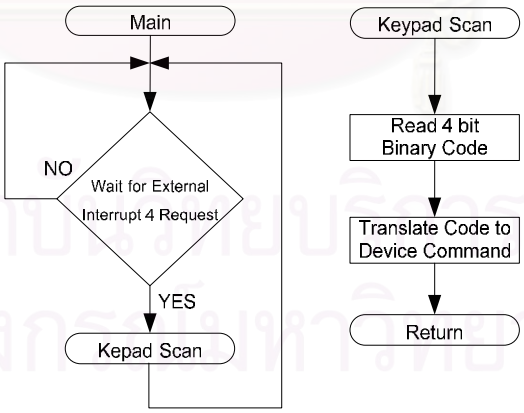
เพื่อความสะดวกในการเขียนโปรแกรมสำหรับบันทึกไฟล์ข้อมูลลงในหน่วยความจำ SD Card เครื่องคุณภาพไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ได้ใช้คลังโปรแกรม FlashFile V2.0 File System Library สำหรับไมโครคอนโทรเลอร์ตระกูล AVR ที่พัฒนาขึ้นโดยบริษัท Progressive Resource LLC เพื่อนำฟังก์ชั่นที่เกี่ยวกับการเขียนบันทึกไฟล์ลงหน่วยความจำ SD Card มาใช้ในการบันทึกข้อมูลทางคุณภาพไฟฟ้า กระบวนการบันทึกข้อมูลลงหน่วยความจำ SD Card จะเริ่มจากการจัดลำดับข้อมูลที่จะบันทึก จากนั้นก็ใช้ฟังก์ชั่นในคลังโปรแกรม FlashFile มาเขียนข้อมูลลงหน่วยความจำ SD Card ดังแสดงในแผนผังในรูปที่ 4-14



รูปที่ 4-14 แผนผังการทำงานของโปรแกรมบันทึกข้อมูลลงหน่วยความจำ SD Card

4.2.4. โปรแกรมรับคำสั่งจากแผงแป้นพิเศษ (Keypad)

การทำงานของโปรแกรมรับคำสั่งจากแผงแป้นพิเศษจะเป็นไปตามแผนผังในรูปที่ 4-15 ไมโครคอนโทรเลอร์จะอ่านรหัสและแปลงเป็นคำสั่งเพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า จากชิพอ่านแผงแป้นพิเศษและแปลงเป็นรหัสตัวเลขฐานสอง 4 บิต MM74C922 ที่เชื่อมต่ออยู่กับแผงแป้นพิเศษ โดยชิพนี้จะส่งสัญญาณขัดจังหวะไปยังไมโครคอนโทรเลอร์ เมื่อไมโครคอนโทรเลอร์ได้รับสัญญาณขัดจังหวะนี้ ก็จะเริ่มกระบวนการอ่านค่าจากปุ่ม



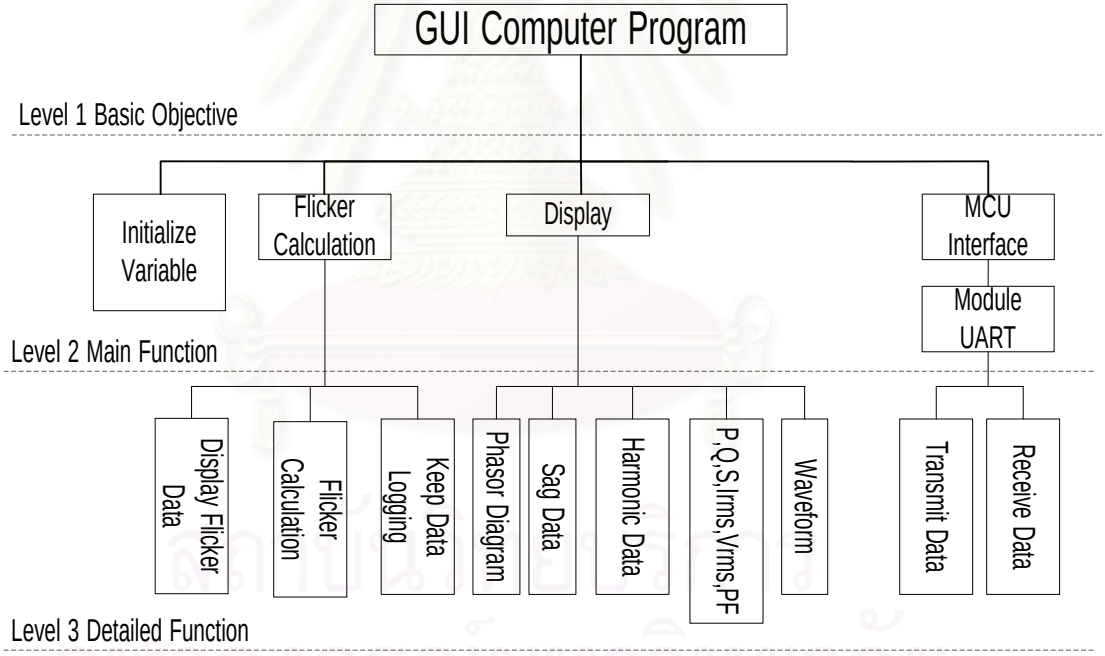
รูปที่ 4-15 แผนผังการทำงานของโปรแกรมอ่านค่าปุ่มจากแผงแป้นพิเศษ

4.3. โปรแกรมบนคอมพิวเตอร์

โปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (Graphic User Interface - GUI) เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการ Window พัฒนาขึ้นโดยโปรแกรม GUI Matlab 2007a ทำหน้าที่แสดงรูปคลื่นและพารามิเตอร์ของสัญญาณที่วัดขณะนั้น, อ่านข้อมูลจากหน่วยความจำ SD Card ที่บันทึกไว้ และคำนวณหาดัชนีการเกิดไฟกะพริบ P_{st} การรับส่งข้อมูลกับตัวเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าจะทำโดยใช้ฟังก์ชันติดต่อแบบอนุกรม UART ติดต่อกับไมโครคอนโทรเลอร์ ATMEGA 128

4.3.1. โครงสร้างของโปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้

โปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ มีโครงสร้างโปรแกรมภายในดังแสดงในรูปที่ 4-16 ประกอบไปด้วยฟังก์ชันหลักๆ 4 ส่วน คือ ส่วนเริ่มต้นค่าตัวแปรต่างๆภายในโปรแกรม, ส่วนติดต่อสื่อสารกับผู้ใช้, ส่วนวิเคราะห์ไฟกะพริบ และส่วนแสดงผล

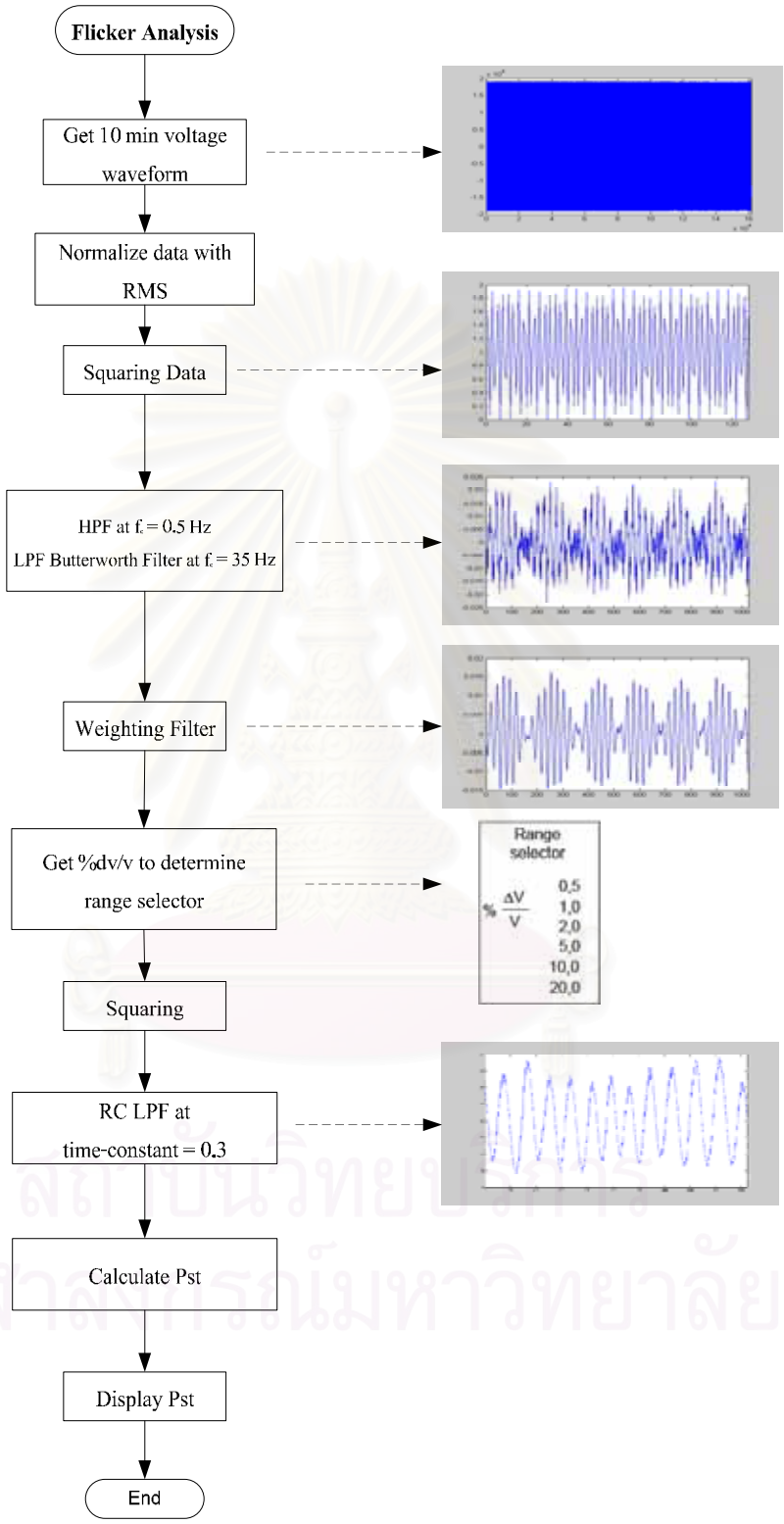


รูปที่ 4-16 โครงสร้างโปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้

4.3.2. การวิเคราะห์ไฟกะพริบ

การวิเคราะห์หาค่าดัชนีไฟกะพริบ P_{st} ตามมาตรฐาน IEC 61000-4-15 ทำโดยใช้โปรแกรม Matlab จะเริ่มจากโปรแกรมประสานกราฟิกกับผู้ใช้ส่งคำสั่งไปยังเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าให้เก็บข้อมูลแรงดันในช่วง 10 นาที โดยใช้อัตราสุ่มสัญญาณ 256 point/sec และส่งข้อมูล

รูปคลื่นแรงดันมายังโปรแกรมประสานกราฟิกกับผู้ใช้ จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณหาค่าดัชนี P_{st} ตามแผนผังในรูปที่ 4-17



รูปที่ 4-17 แผนผังโปรแกรมวิเคราะห์หาดัชนี P_{st}

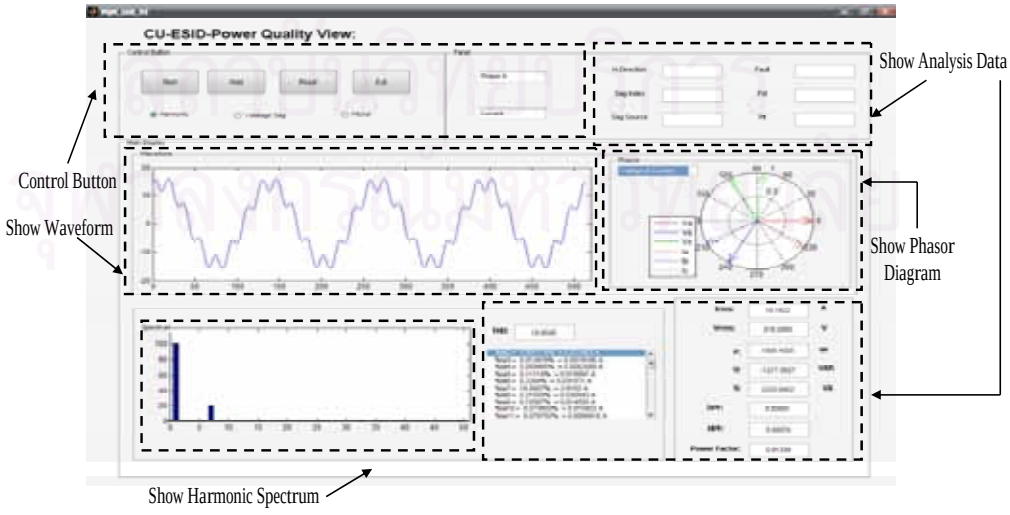
4.3.3. การทำงานของโปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้

การทำงานของโปรแกรมประสานกราฟิกกับผู้ใช้ จะติดต่อกับไมโครคอนโทรเลอร์ ATMEGA128 ซึ่งทำหน้าที่เสมือนตัวกลางในการติดต่อ, รับ และส่งข้อมูล ระหว่างบอร์ดชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอลกับโปรแกรมผ่านทางพอร์ตสื่อสาร GUI เมื่อผู้ใช้กดปุ่ม "Start" บนหน้าจอของโปรแกรมในส่วนของปุ่มควบคุมดังแสดงในรูปที่ 4-18 โปรแกรม Matlab จะส่งคำสั่งไปบอกให้เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าส่งข้อมูล รูปคลื่นแรงดันสลับ, กระแสสลับ และข้อมูลที่ได้วิเคราะห์ไว้แล้ว มาแสดงผลบนโปรแกรม หรือนำข้อมูลแรงดันในช่วง 10 นาทีมาวิเคราะห์หาดัชนีไฟกะพริบ P_{ST} จากนั้นโปรแกรมประสานกราฟิกกับผู้ใช้จะนำข้อมูลที่ได้ไปแสดงผลบนหน้าจอของโปรแกรม

รูปที่ 4-18 โปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้

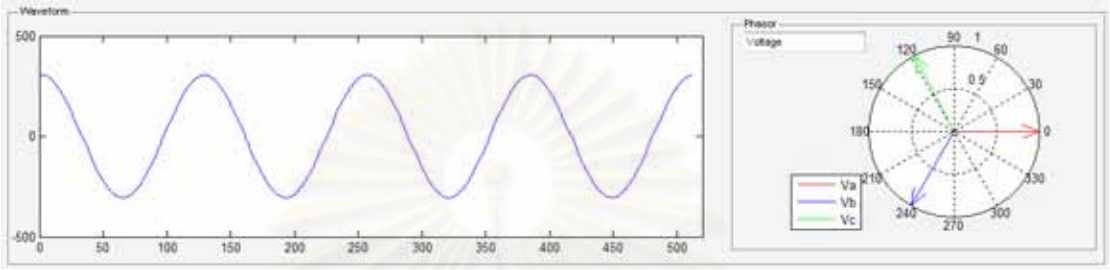
หน้าจอของโปรแกรมประสานกราฟิกกับผู้ใช้โดยรวมเป็นดังรูปที่ 4-19 ภายในโปรแกรมจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆดังนี้

1. ปุ่มรับคำสั่งจากผู้ใช้ (Control Button)
2. ส่วนแสดงผลข้อมูลคุณภาพไฟฟ้าที่ผ่านการวิเคราะห์แล้ว
3. ส่วนแสดงรูปคลื่นแรงดันหรือกระแส
4. ส่วนแสดงแผนภาพเฟเซอร์ของแรงดันและกระแส
5. ส่วนแสดงแผนภูมิแท่งฮาร์มอนิกส์ (Harmonic Spectrum) ของแรงดัน หรือกระแส

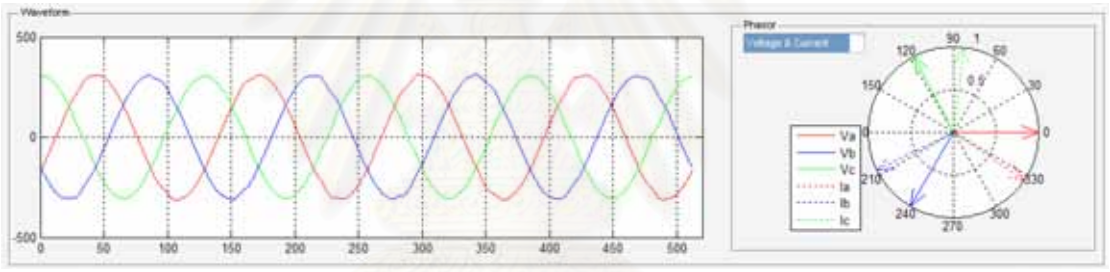


รูปที่ 4-19 หน้าจอโปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้

การแสดงผลข้อมูลเป็นรูปคลื่นของโปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ จะแสดงรูปคลื่นของแรงดันสลับหรือกระแสสลับ โดยผู้ใช้สามารถเลือกได้ว่าจะให้แสดงรูปคลื่นออกมาเฟสเดียวหรือทั้งสามเฟส ในส่วนแผนภาพเฟเซอร์ ผู้ใช้สามารถเลือกดูแผนภาพเฟเซอร์ของแรงดันหรือกระแสอย่างเดียวดังแสดงในรูปที่ 4-20a เพื่อพิจารณาความสมดุลของแรงดันหรือกระแสทั้ง 3 เฟส หรือดูของทั้งแรงดันและกระแสเพื่อพิจารณามุมเฟสระหว่างแรงดันและกระแสดังแสดงในรูปที่ 4-20b



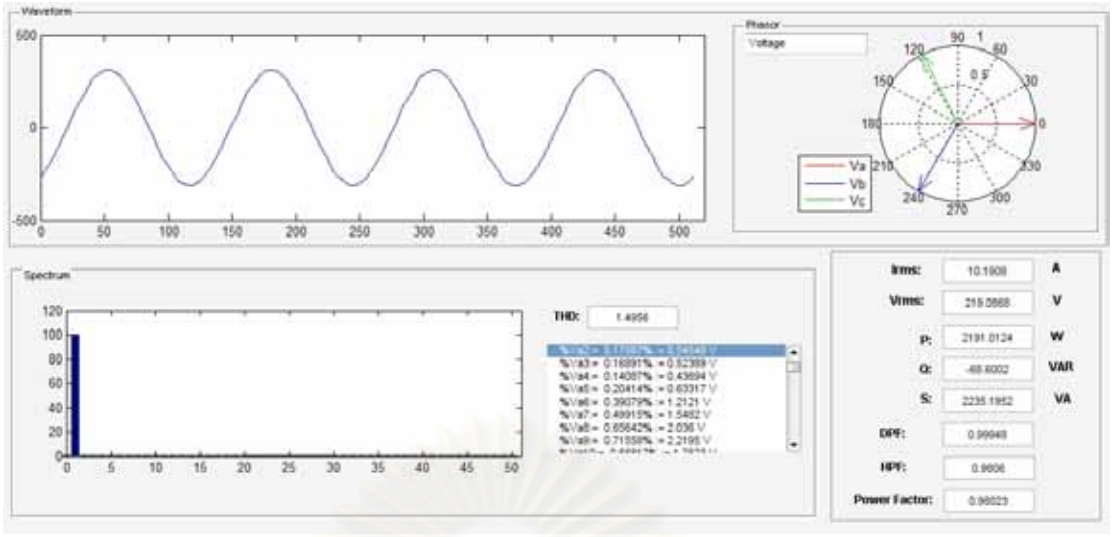
(a)



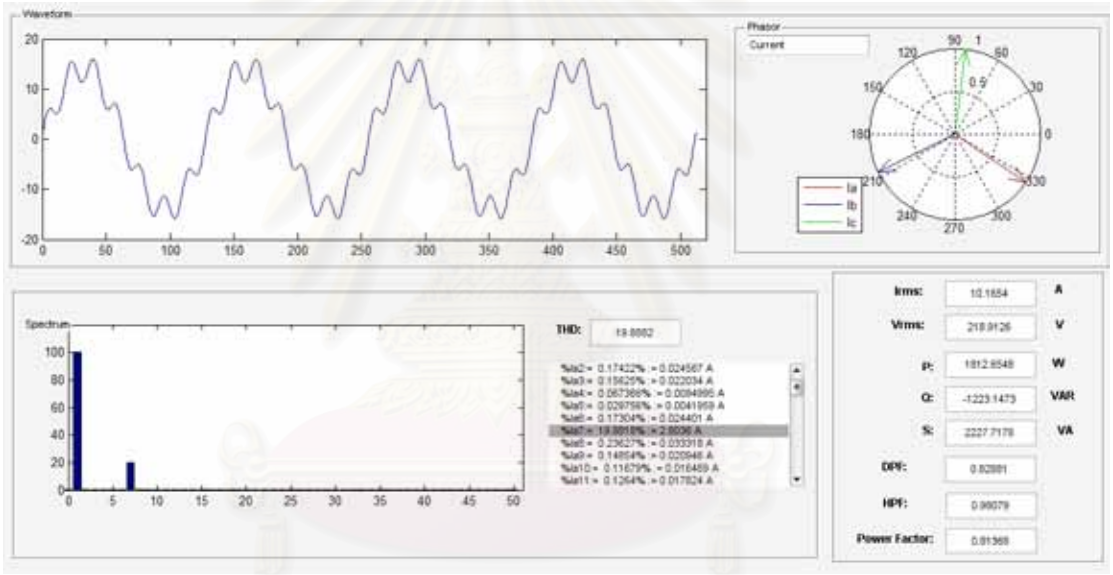
(b)

รูปที่ 4-20 หน้าจอแสดงผลรูปคลื่นและแผนภาพเฟเซอร์ของแรงดัน (a)หนึ่งเฟส (b) สามเฟส

การแสดงผลข้อมูลฮาร์มอนิกส์ในแรงดันหรือกระแส จะแสดงออกมาในรูปแผนภูมิแท่งและตารางแสดงค่าเปอร์เซ็นต์และขนาดของแรงดันหรือกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับต่างๆ รวมถึงค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน (THD_V) หรือกระแส (THD_I) ในส่วนแสดงผลข้อมูลที่ผ่านการวิเคราะห์แล้วจะแสดงข้อมูล RMS ของแรงดันและกระแส, กำลังจริง (P), กำลังเสมือน (Q), กำลังปรากฏ (S) และตัวประกอบกำลัง (PF) โดยในส่วนของตัวประกอบกำลังจะแสดงค่าองค์ประกอบ DPF และ HPF ดังแสดงในรูปที่ 4-21



(a)



(b)

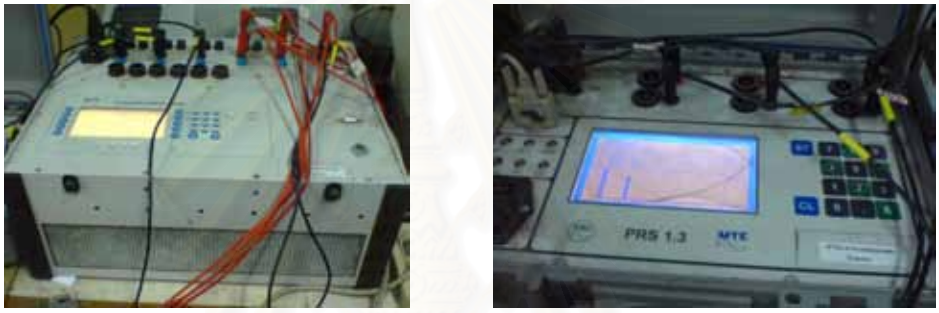
รูปที่ 4-21 หน้าจอแสดงผลรูปคลื่น, แผนภูมิแท่งฮาร์มอนิกส์ และ ข้อมูลที่ผ่านการวิเคราะห์ (a) แรงดัน (b) กระแส

บทที่ 5

ผลการทดลองและการทดสอบ

การทดสอบเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย การวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกส์, การทดลองหาทิศทางแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์, การทดสอบวิเคราะห์และหาทิศทางแหล่งกำเนิดแรงดันตกชั่วขณะ และการทดสอบวิเคราะห์พารามิเตอร์อื่นๆที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพไฟฟ้า โดยจะใช้อุปกรณ์สอบเทียบต่างๆดังนี้

1. เครื่องจ่ายโหลดพลังงานไฟฟ้าเสมือน CALSOURCE 200 และมิเตอร์อ้างอิงที่มีความแม่นยำในการวัดระดับ 0.05% PRS1.3 ของบริษัท MEH (Energie Messtechnik GmbH) ดังแสดงในรูปที่ 5-1a และ รูปที่ 5-1b ตามลำดับ



(a) *(b)*

รูปที่ 5-1 อุปกรณ์สอบเทียบ (a) เครื่องจ่ายโหลดพลังงานไฟฟ้าเสมือน (b) มิเตอร์อ้างอิง

2. เครื่องวัดคลื่นแรงดันไฟฟ้า (Oscilloscope) Fluke 199C ดังแสดงในรูปที่ 5-2 มีความแม่นยำในการวัดแรงดันระดับ 0.5%

รูปที่ 5-2 เครื่องวัดคลื่นแรงดันไฟฟ้า Fluke 199C Scopemeter

3. เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality Meter) Dranetz BMI Power Visa ดังแสดงในรูปที่ 5-4 มีความแม่นยำในการวัด 0.1% ตามมาตรฐาน IEC 61000-4-30 Class A

รูปที่ 5-3 เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า Dranetz BMI Power Visa

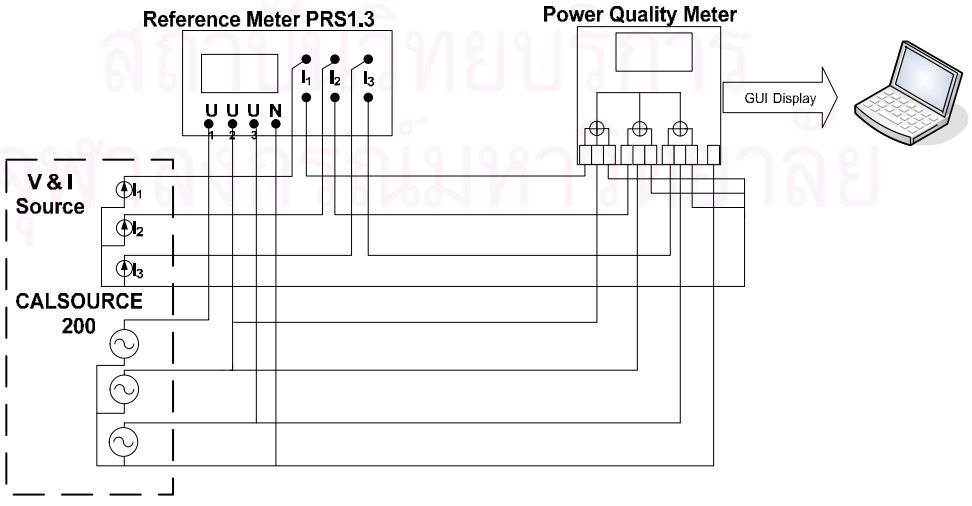
5.1. การทดสอบการวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกส์

ระบบทดสอบวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์เป็นดังรูปที่ 5-4 สัญญาณแรงดันสลับและกระแสสลับ 3 เฟส สร้างขึ้นจากเครื่องจ่ายโหลดพลังงานไฟฟ้าเสมือน CALSOURCE 200 ปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าวัดได้ จะถูกแสดงผลบนโปรแกรมประสานกราฟิกกับผู้ใช้บนคอมพิวเตอร์หรือบนหน้าจอผลึกเหลว เพื่อเปรียบเทียบหาค่าคลาดเคลื่อนกับค่าที่วัดได้โดยมิเตอร์อ้างอิง PRS1.3 โดยค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดหาได้จากสมการ (5.1)

$$\%error = \frac{(M_{dsp} - M_{testmeter})}{M_{testmeter}} \times 100 \qquad (5.1)$$

โดย M_{dsp} = ปริมาณที่วัดได้จากเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น

$M_{testmeter}$ = ปริมาณที่วัดได้จากมิเตอร์อ้างอิง



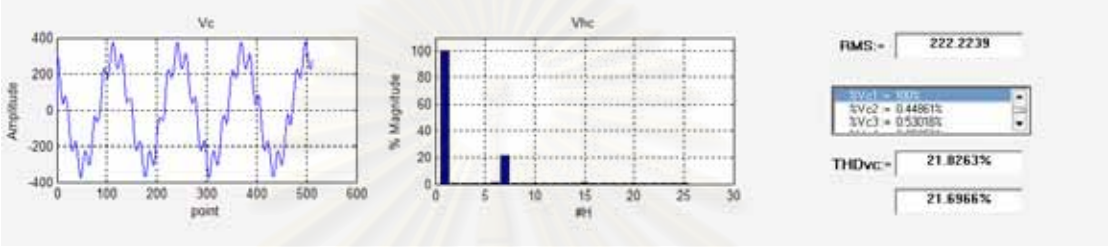
รูปที่ 5-4 ระบบทดสอบเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า

ในการทดสอบความแม่นยำในการวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์จะแบ่งการวัดเป็น 2 ส่วนคือ

1. การทดสอบวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์ในสัญญาณแรงดันไฟฟ้าสลับ
2. การทดสอบวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์ในสัญญาณกระแสไฟฟ้าสลับ

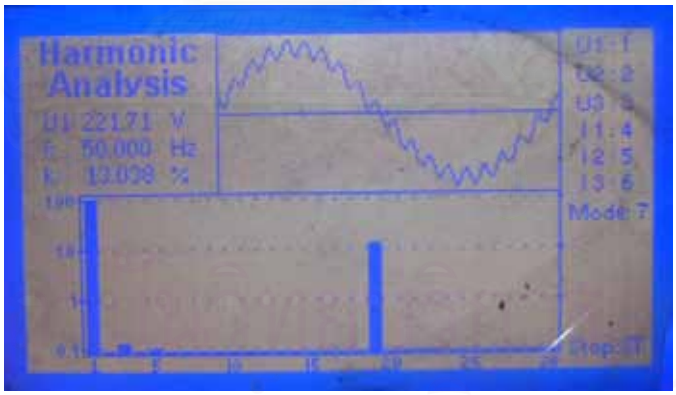
5.1.1. การทดสอบวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์ในสัญญาณแรงดันไฟฟ้าสลับ

เครื่องจ่ายโหลดพลังงานไฟฟ้าเสมือนจะถูกตั้งให้จ่ายฮาร์มอนิกส์อันดับต่างๆออกทางช่องสัญญาณแรงดัน เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าจะนำสัญญาณแรงดันไปวิเคราะห์หาปริมาณฮาร์มอนิกส์และแสดงผลบนโปรแกรม GUI ดังรูปที่ 5-5

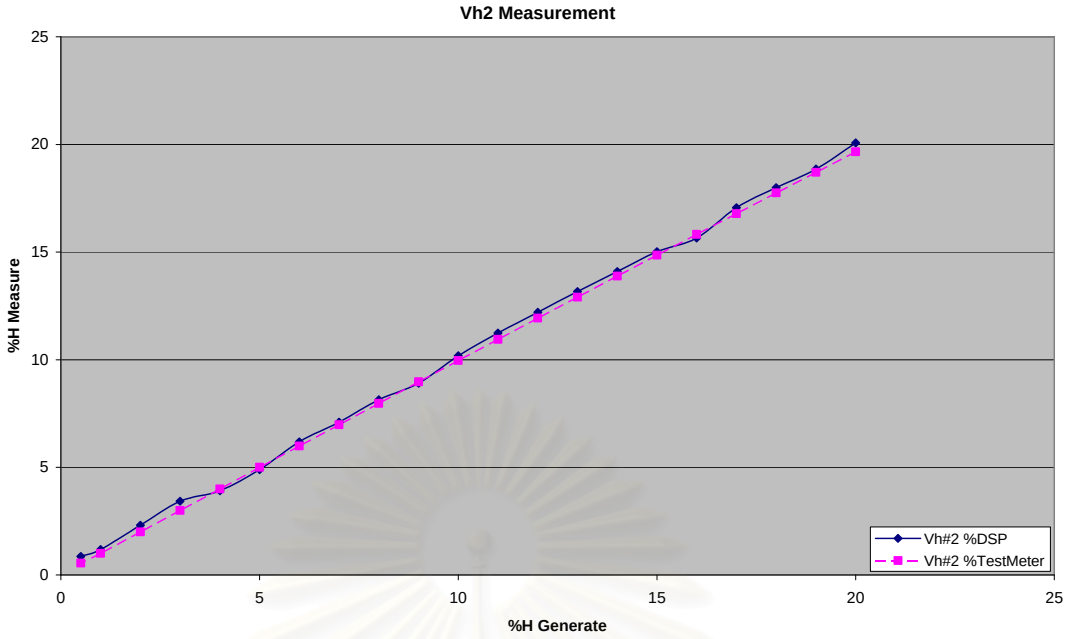


รูปที่ 5-5 กราฟตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์บนโปรแกรม GUI

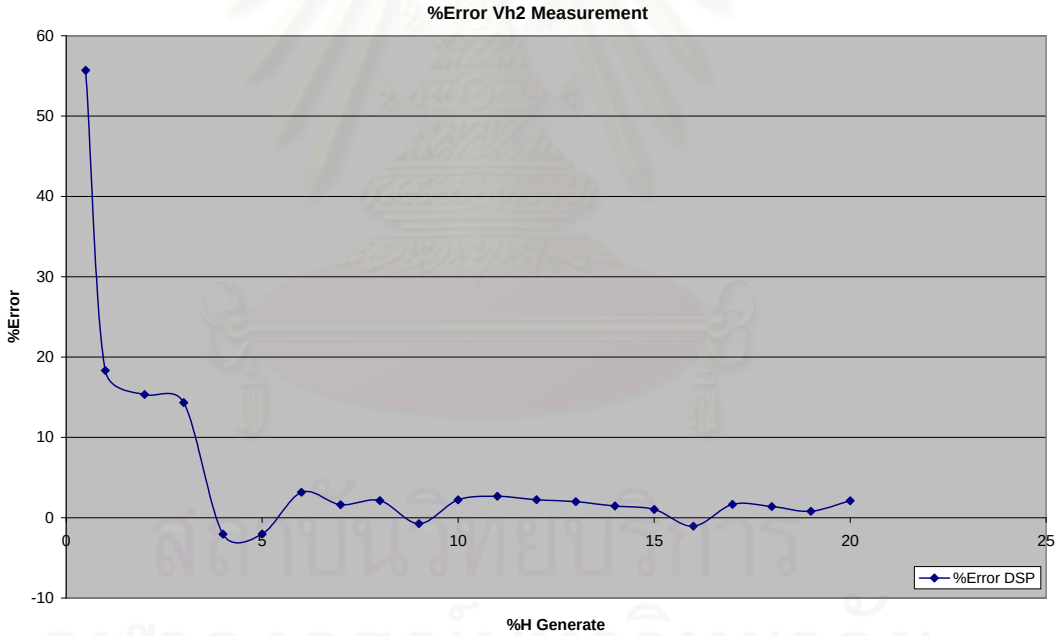
ปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากมิเตอร์อ้างอิง ดังหน้าจอในรูปที่ 5-6 ณ เวลาเดียวกัน ผลการวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์และความคลาดเคลื่อนในสัญญาณแรงดันเป็นดังกราฟในรูปที่ 5-7 ถึง รูปที่ 5-18



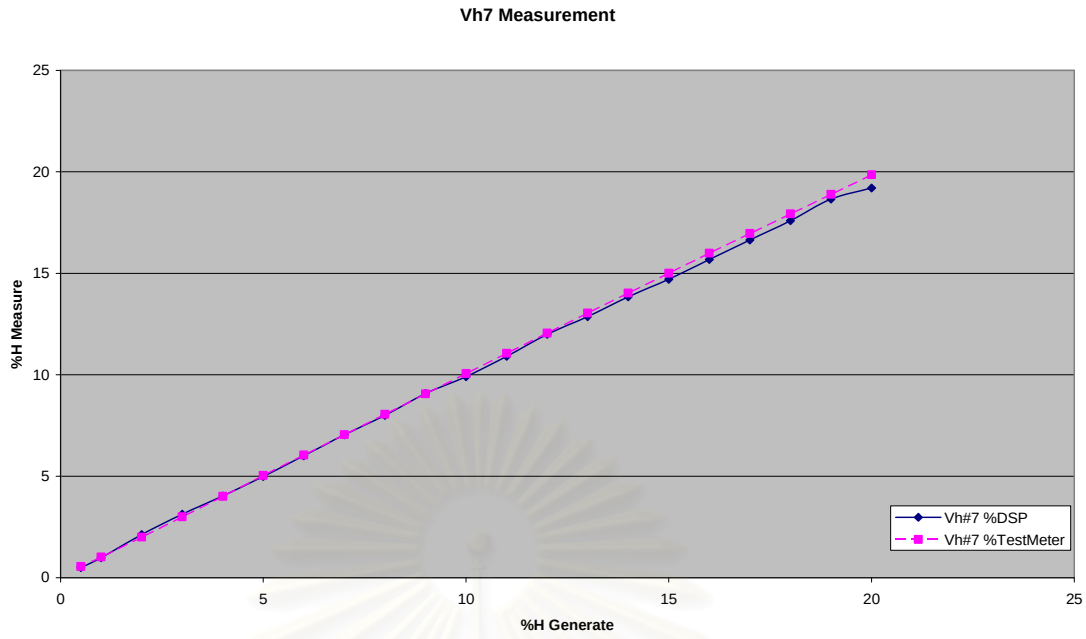
รูปที่ 5-6 หน้าจอแสดงผลการวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์จากมิเตอร์อ้างอิง



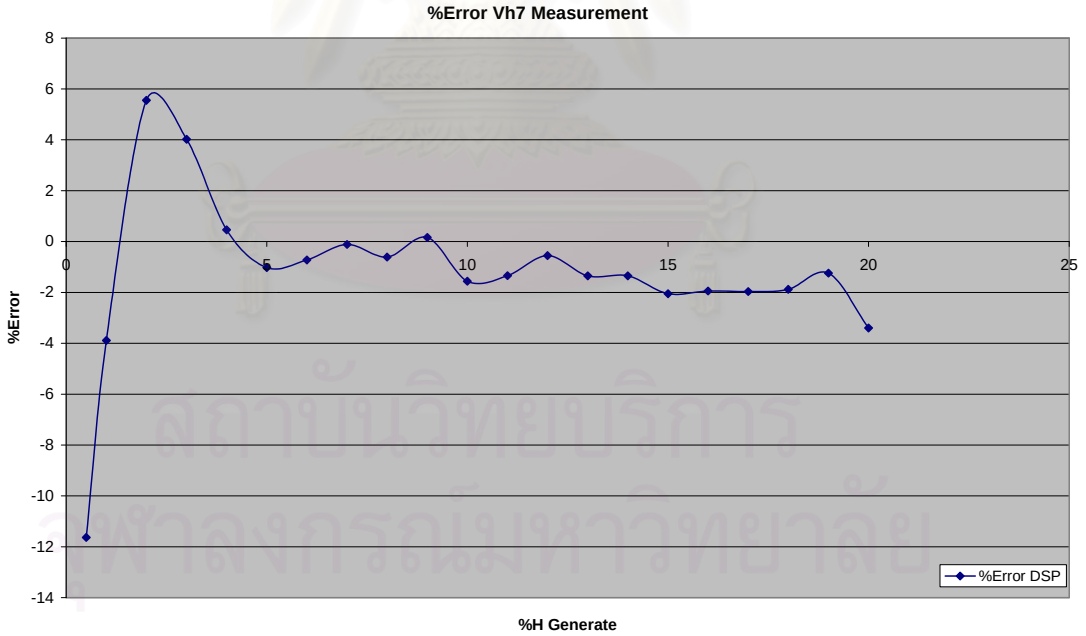
รูปที่ 5-7 กราฟแสดงผลการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 2



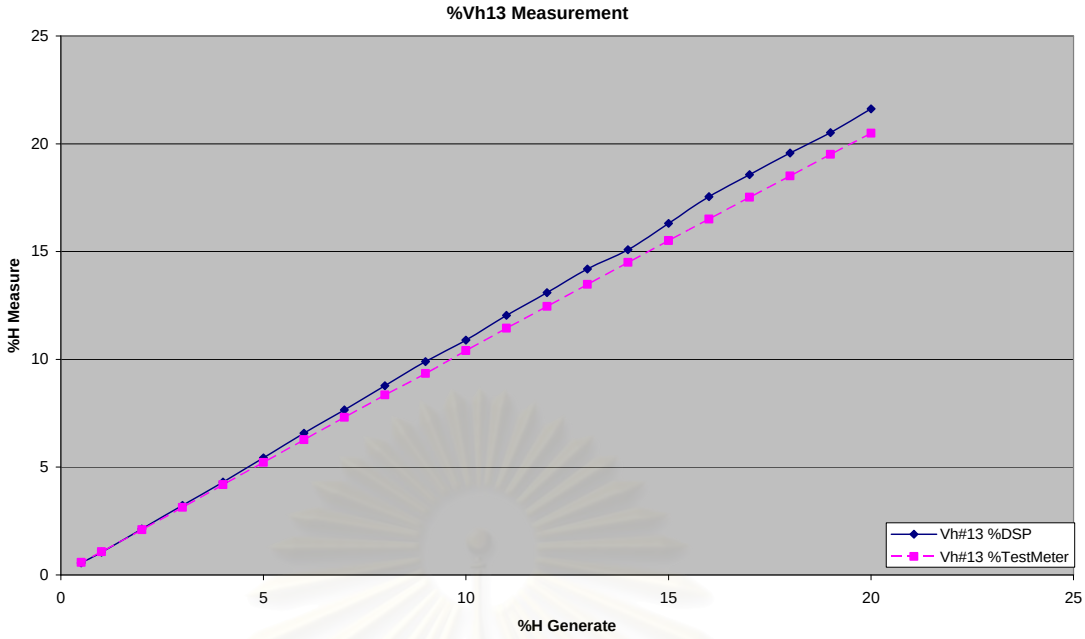
รูปที่ 5-8 กราฟแสดงค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 2



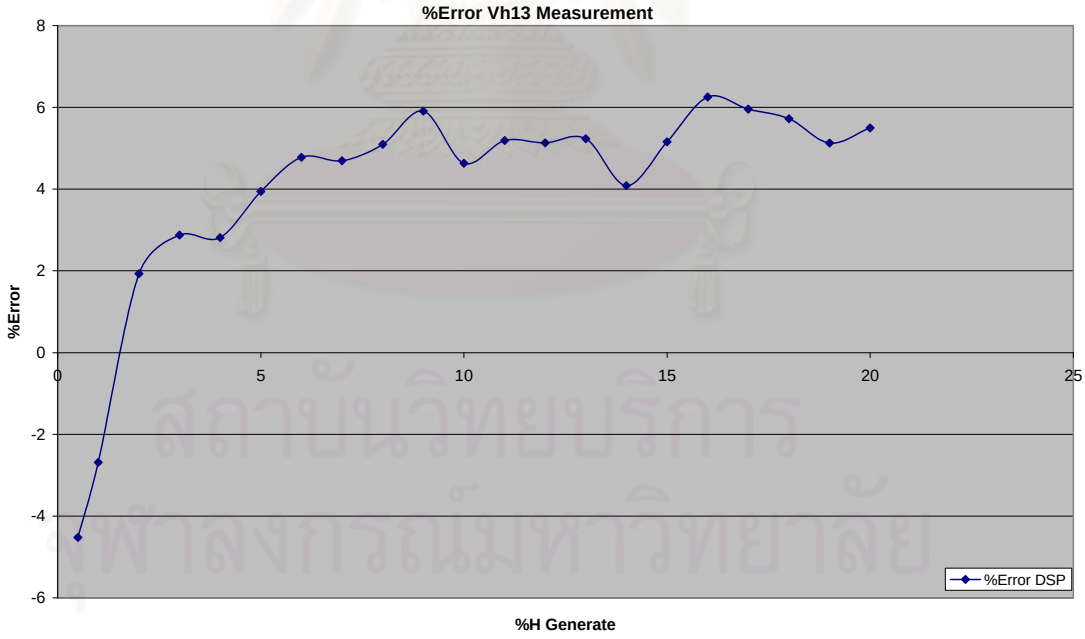
รูปที่ 5-9 กราฟแสดงผลการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 7



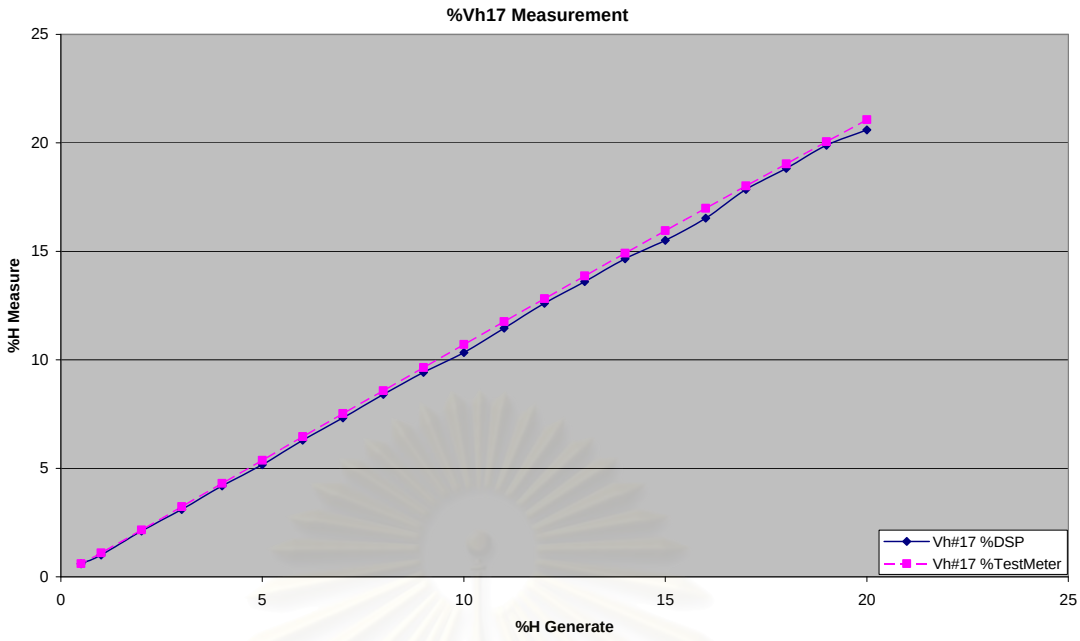
รูปที่ 5-10 กราฟแสดงค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 7



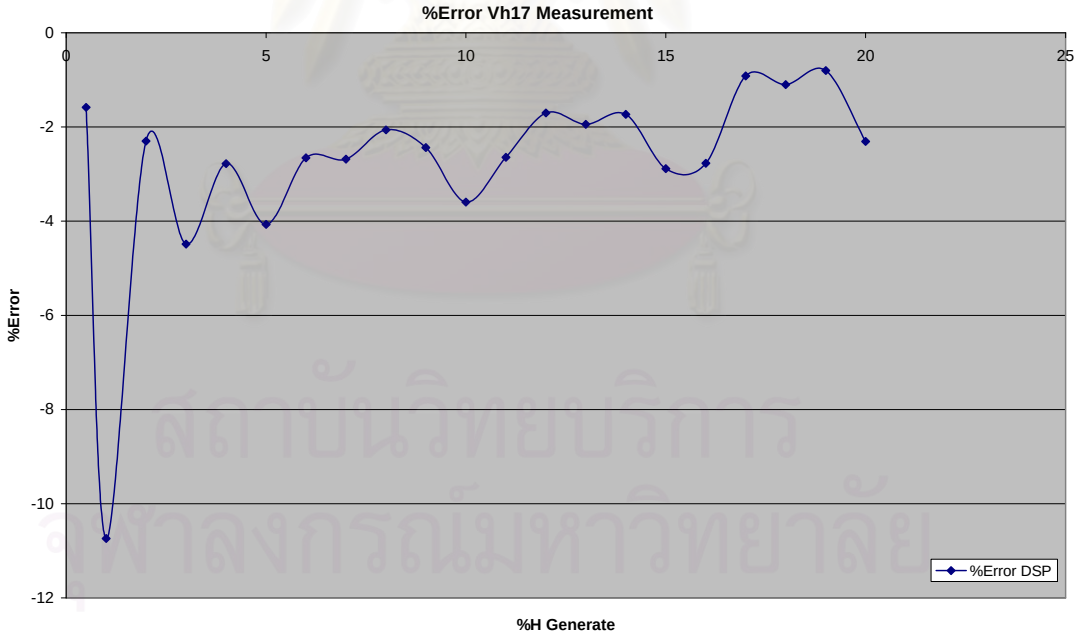
รูปที่ 5-11 กราฟแสดงผลการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 13



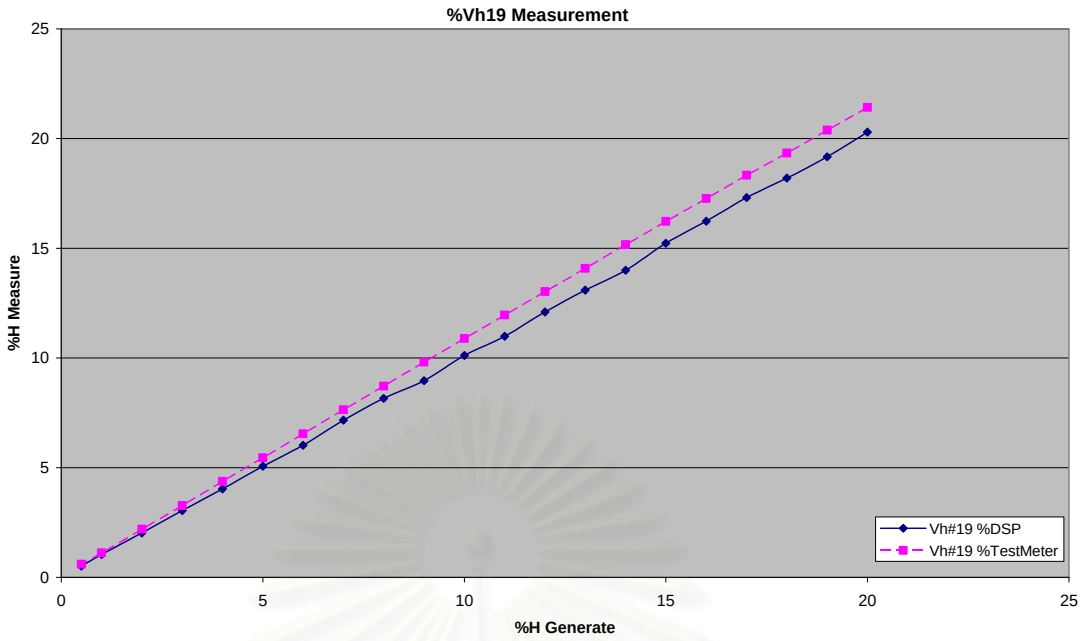
รูปที่ 5-12 กราฟแสดงค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 13



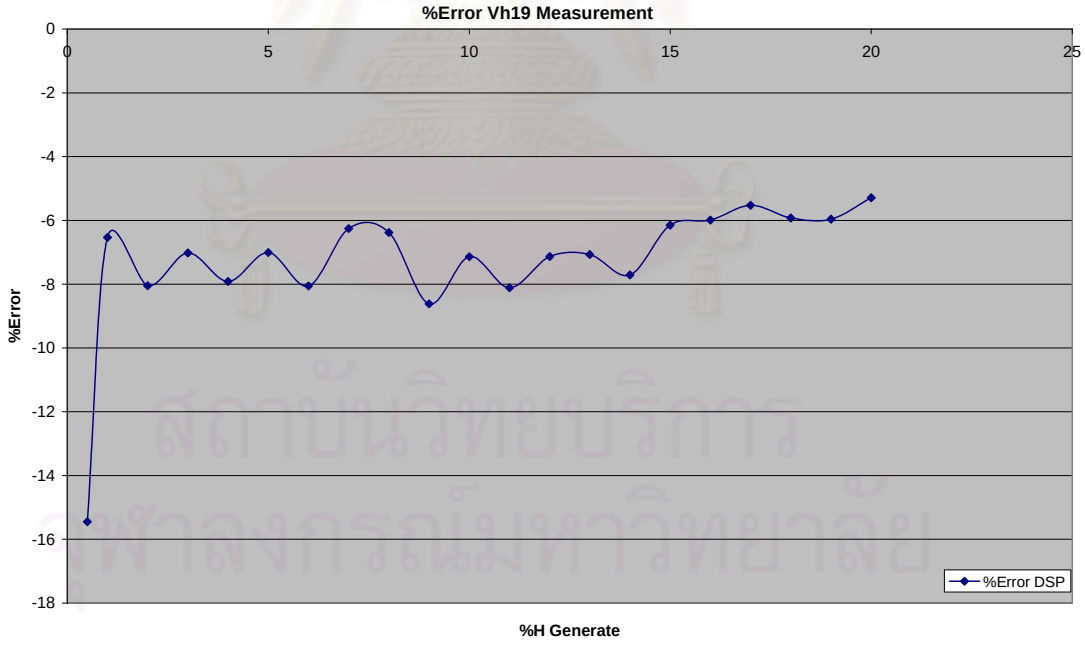
รูปที่ 5-13 กราฟแสดงผลการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 17



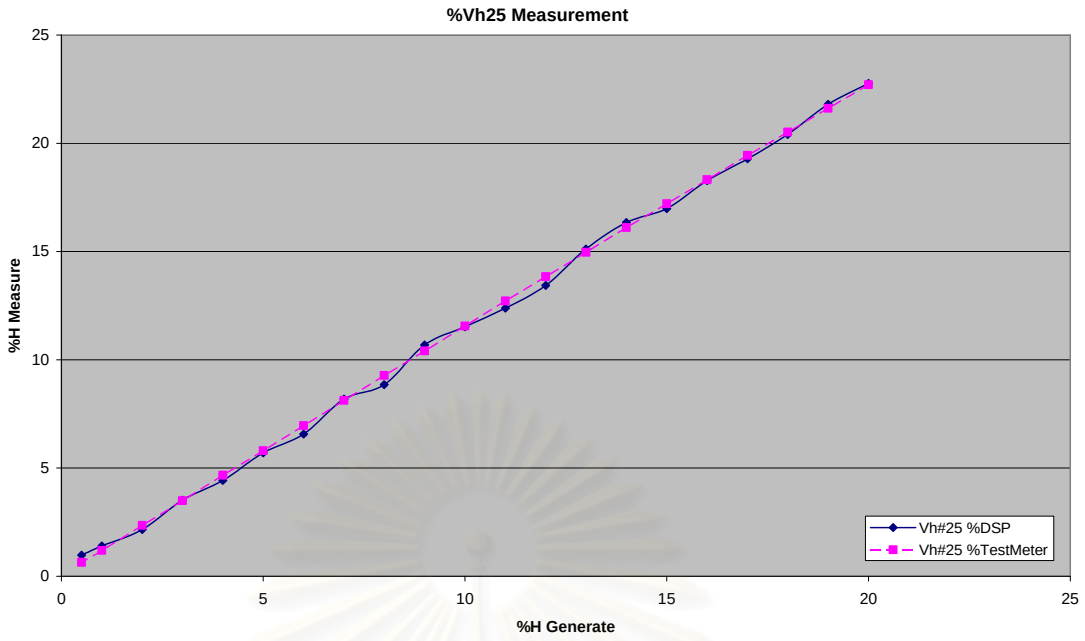
รูปที่ 5-14 กราฟแสดงค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 17



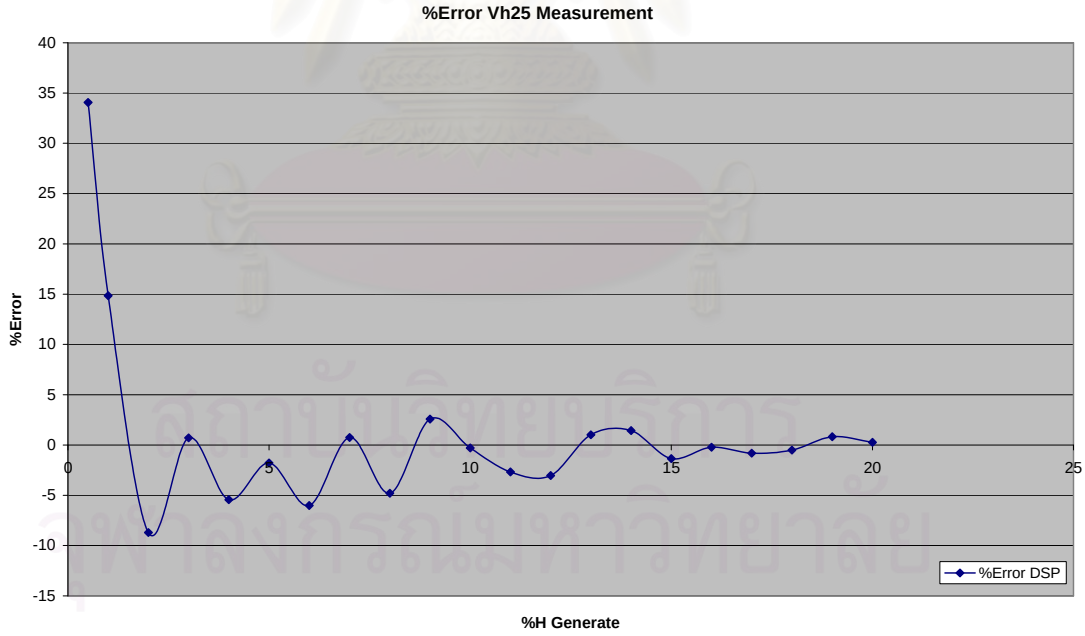
รูปที่ 5-15 กราฟแสดงผลการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 19



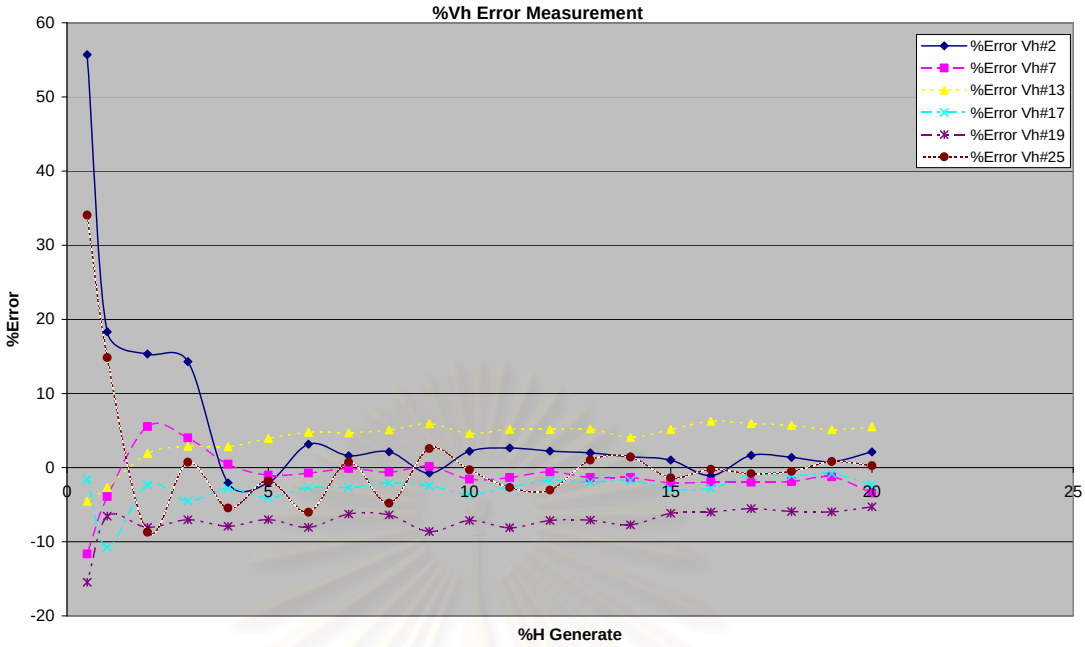
รูปที่ 5-16 กราฟแสดงค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 19



รูปที่ 5-17 กราฟแสดงผลการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 25



รูปที่ 5-18 กราฟแสดงค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 25



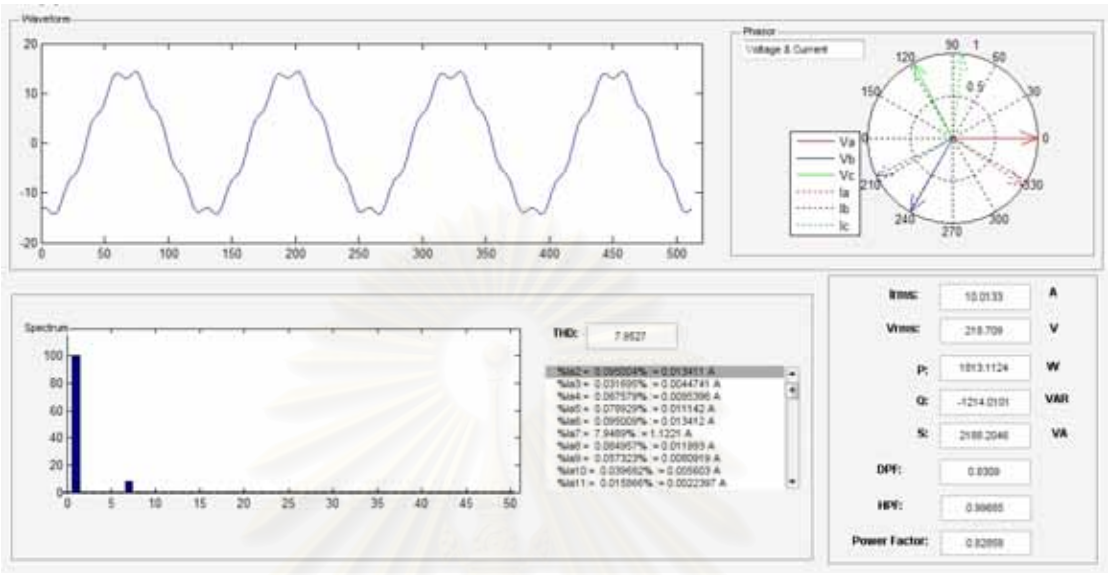
รูปที่ 5-19 กราฟเปรียบเทียบค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์

เมื่อนำผลความคลาดเคลื่อนในการวัดฮาร์มอนิกส์ในสัญญาณแรงดันสลับมาวาดกราฟรวมกัน ได้ดังรูปที่ 5-19 ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์ในสัญญาณแรงดันสลับของทุกๆฮาร์มอนิกส์ จะมีค่ามากและไม่คงที่ในช่วงที่มีปริมาณฮาร์มอนิกส์อยู่ 0% – 3% และจะมีค่าน้อยลงและมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อนน้อยลงเมื่อสัญญาณมีปริมาณฮาร์มอนิกส์ตั้งแต่ 3% ขึ้นไป เนื่องจากปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่วัดจากมิเตอร์อ้างอิงเป็นค่าร้อยละ THD_V ทำให้มีการรวมผลของฮาร์มอนิกส์อันดับอื่นๆ ซึ่งมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่สร้างขึ้นจากเครื่องจ่ายโหลด แต่จะส่งผลต่อการวัดฮาร์มอนิกส์ในบางอันดับ ทำให้ผลการวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์จากมิเตอร์อ้างอิงมีค่ามากกว่าค่าที่วัดจากเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า ซึ่งวัดปริมาณของฮาร์มอนิกส์นั้นจริงๆ โดยรวมแล้วผลการวัดฮาร์มอนิกส์ในสัญญาณแรงดันสลับมีค่าใกล้เคียงกับเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าและมิเตอร์อ้างอิงมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่กำหนดไว้จากเครื่องจ่ายโหลด

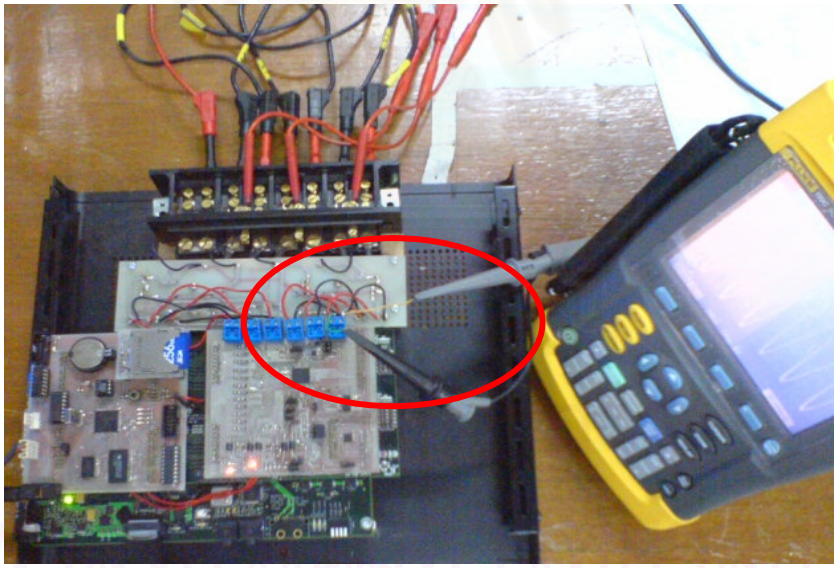
5.1.2. การทดสอบวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์ในสัญญาณกระแสไฟฟ้าสลับ

เครื่องจ่ายโหลดพลังงานไฟฟ้าเสมือนจะถูกตั้งให้จ่ายฮาร์มอนิกส์อันดับต่างๆออกทางช่องสัญญาณกระแส เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าจะนำสัญญาณกระแสไปวิเคราะห์หาปริมาณฮาร์มอนิกส์และแสดงผลบนโปรแกรม GUI ดังรูปที่ 5-20 เนื่องจากสัญญาณกระแสที่วัดต้องผ่านหม้อแปลงกระแสก่อนเข้าชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล การทดสอบวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์ในสัญญาณกระแสไฟฟ้าสลับจะใช้หัวตรวจ (Probe) ร่วมกับเครื่องวัดคลื่นแรงดันไฟฟ้า Fluke

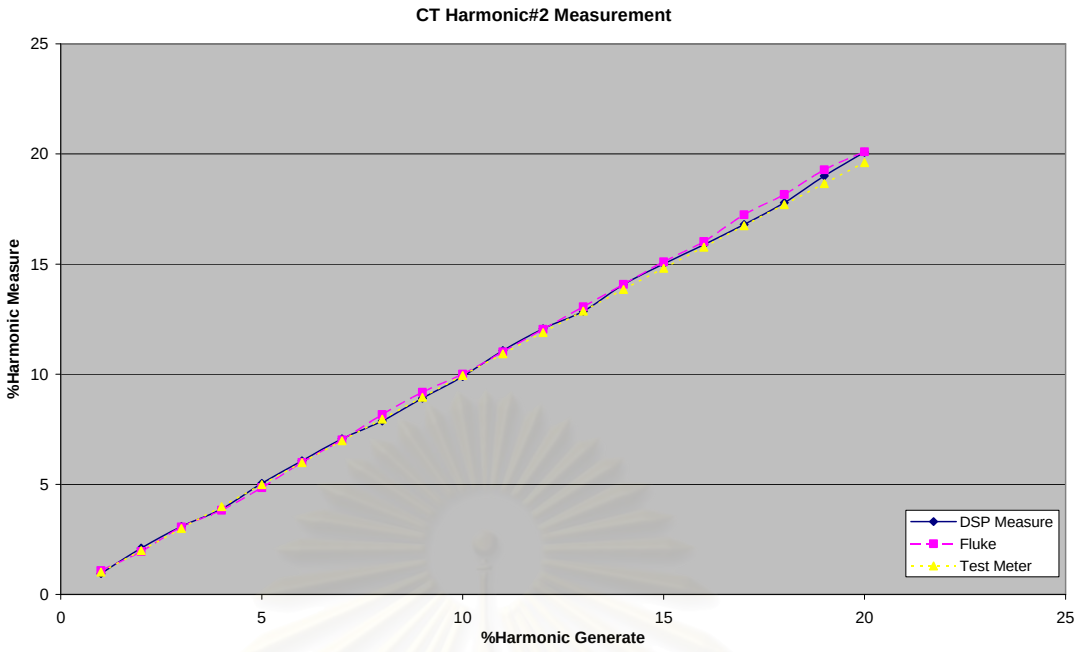
199C Scopemeter มาวัดสัญญาณที่ทางเข้า A/D เพิ่มอีกหนึ่งจุด ดังแสดงในรูปที่ 5-21 เพื่อดูผลของหม้อแปลงกระแสที่มีต่อการวัดสัญญาณฮาร์มอนิกส์อันดับต่างๆของสัญญาณกระแสไฟฟ้าสลับ ผลการวัดจะเป็นดังกราฟในรูปที่ 5-22 ถึง รูปที่ 5-31



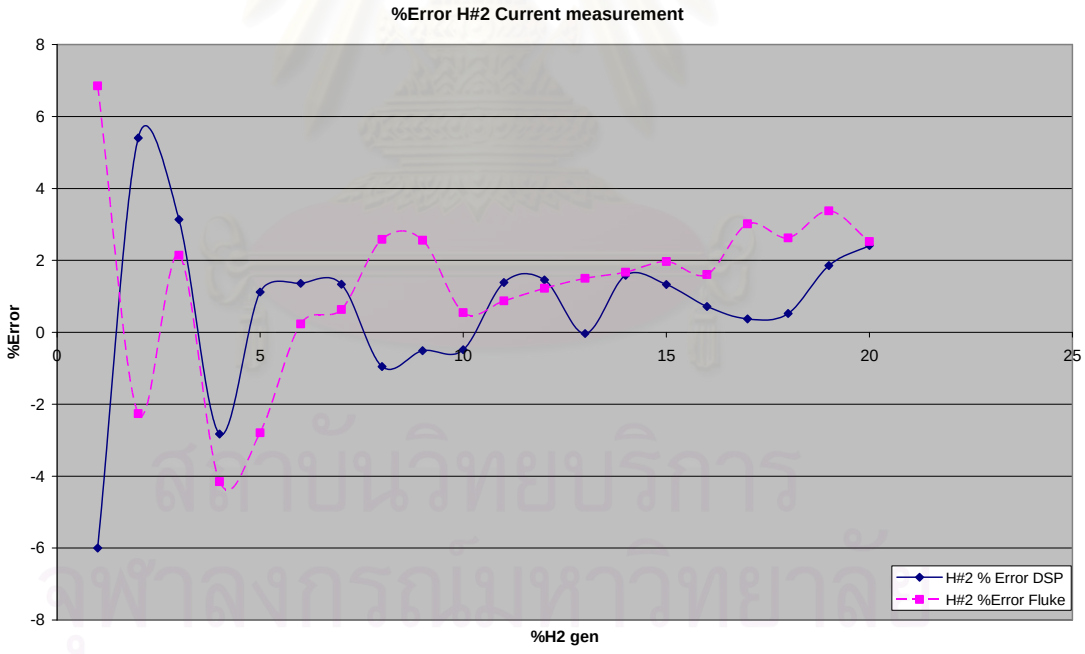
รูปที่ 5-20 กราฟตัวอย่างรูปคลื่นกระแสและสเปกตรัมฮาร์มอนิกส์บนโปรแกรม GUI



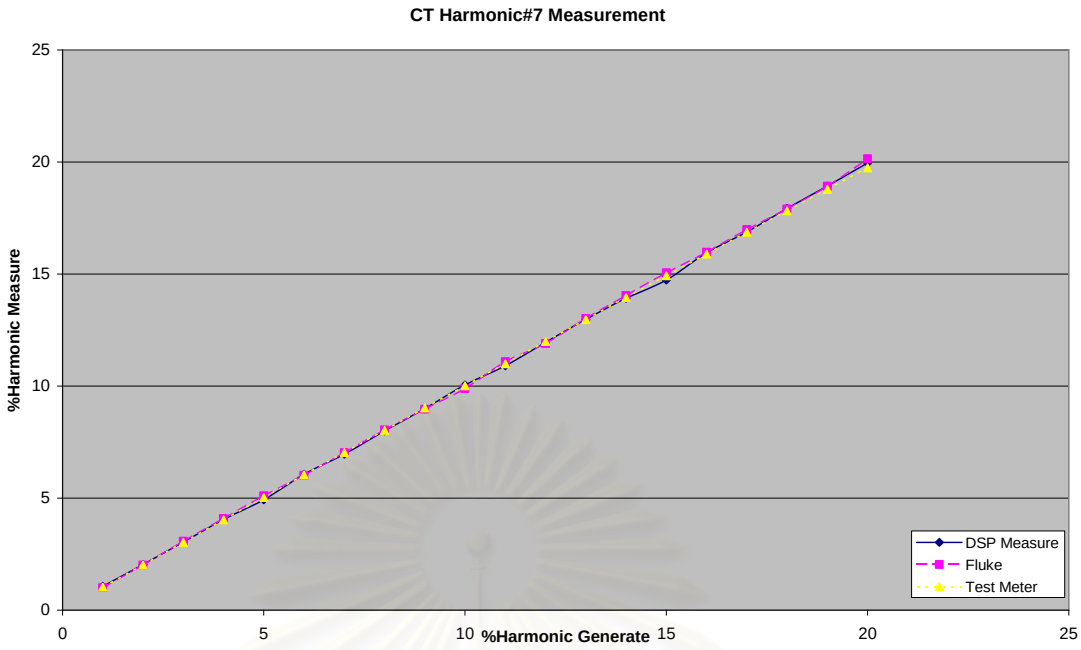
รูปที่ 5-21 การวัดฮาร์มอนิกส์ในสัญญาณกระแสไฟฟ้าสลับที่ทางเข้าชิพ A/D ADS8364



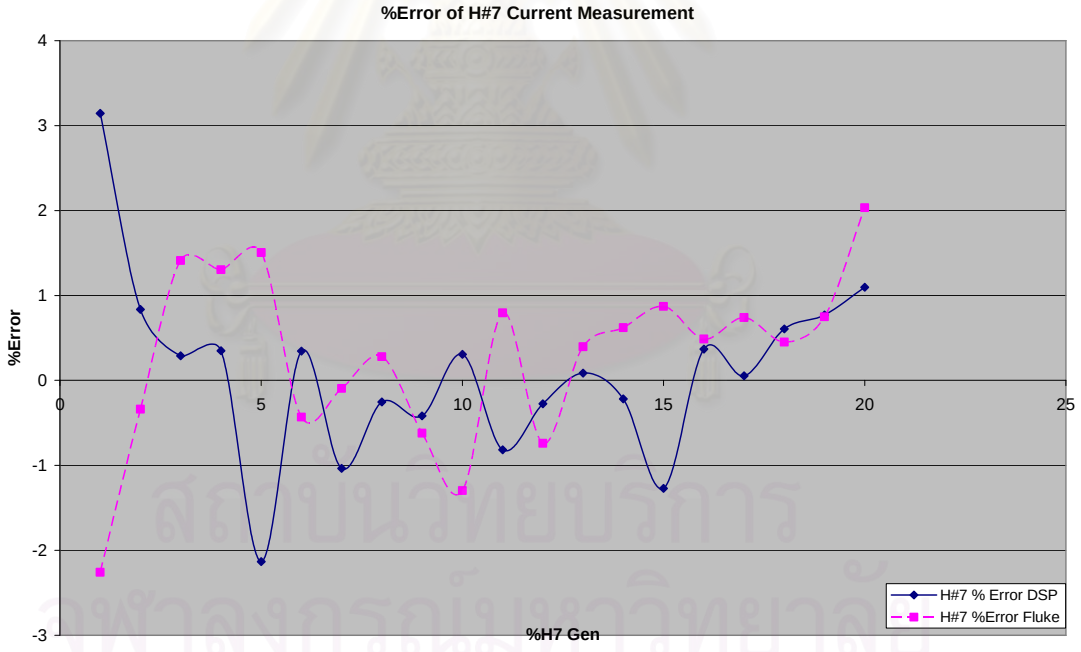
รูปที่ 5-22 กราฟแสดงผลการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ 2



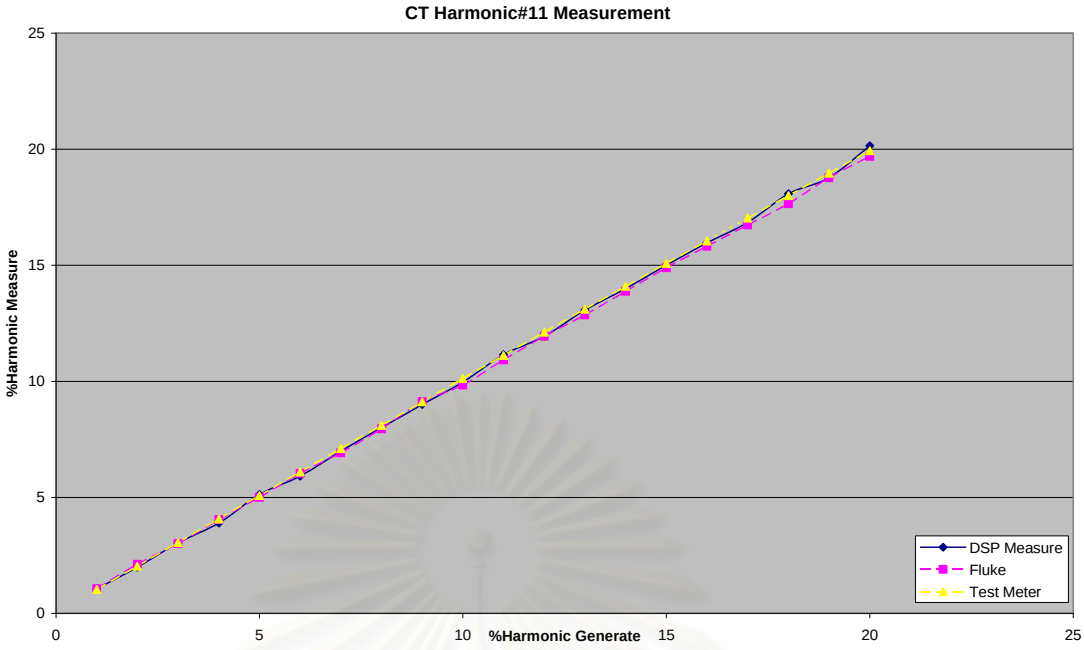
รูปที่ 5-23 กราฟแสดงค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ 2



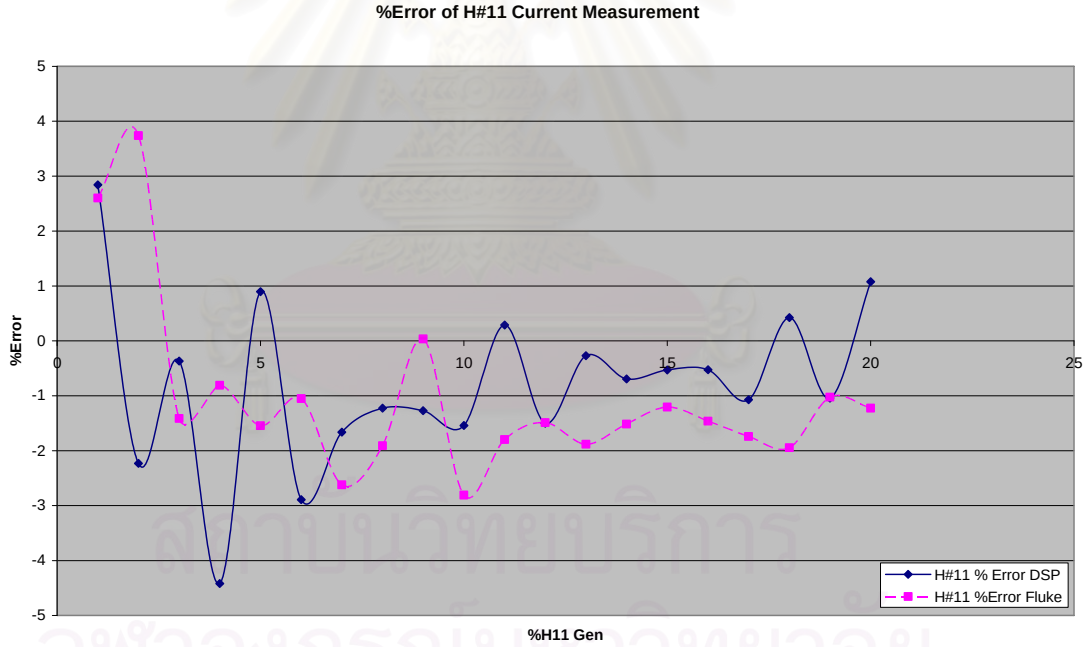
รูปที่ 5-24 กราฟแสดงผลการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 7



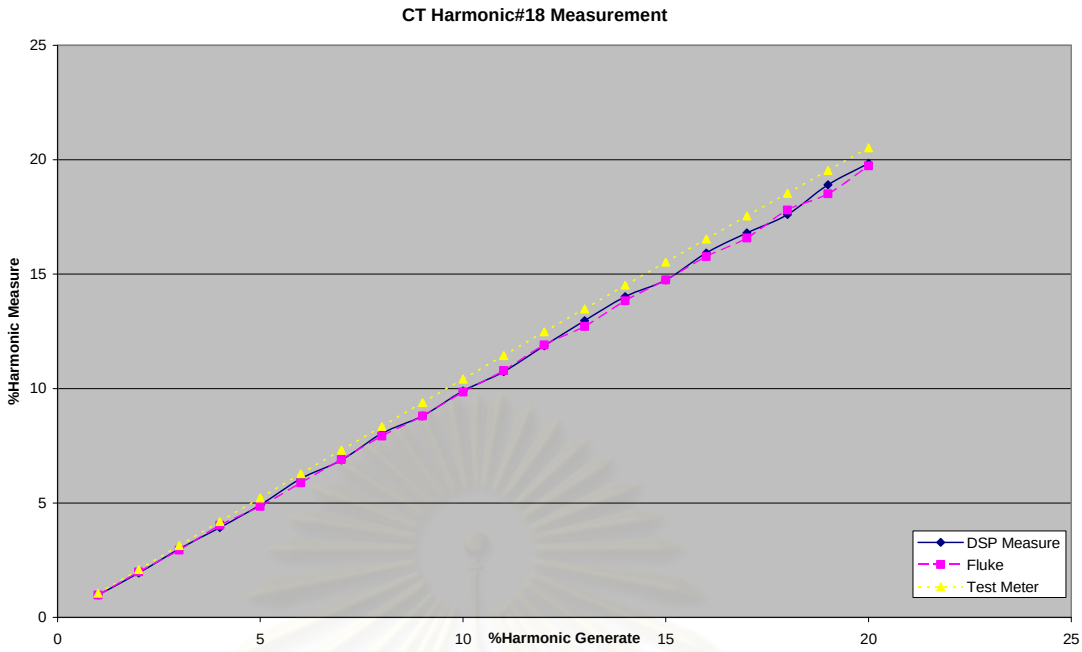
รูปที่ 5-25 กราฟแสดงค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ 7



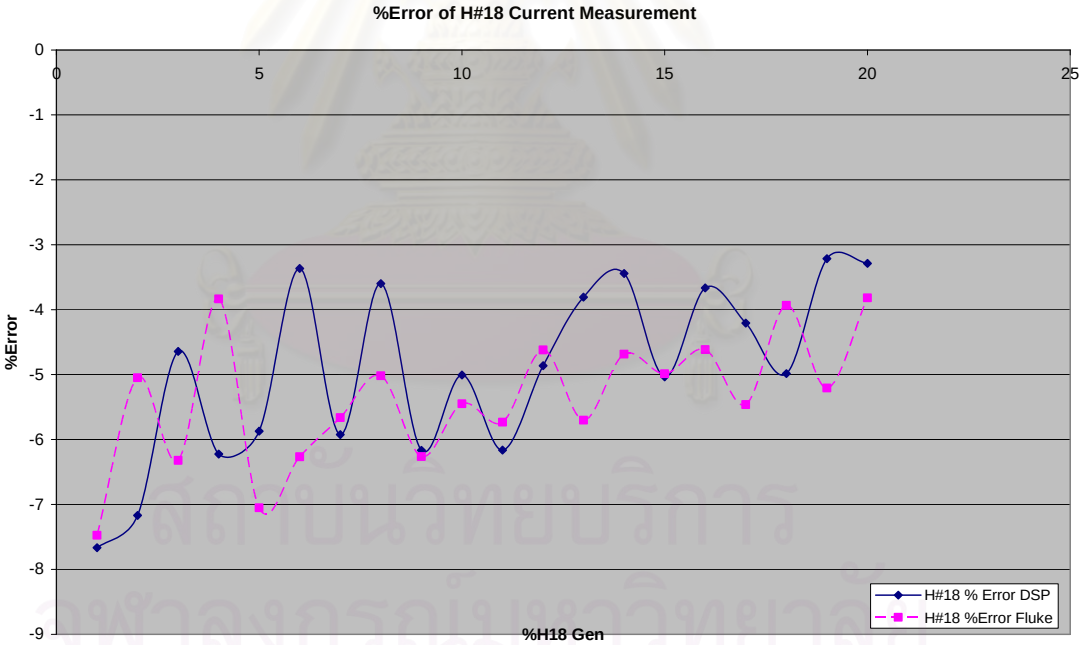
รูปที่ 5-26 กราฟแสดงผลการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ 11



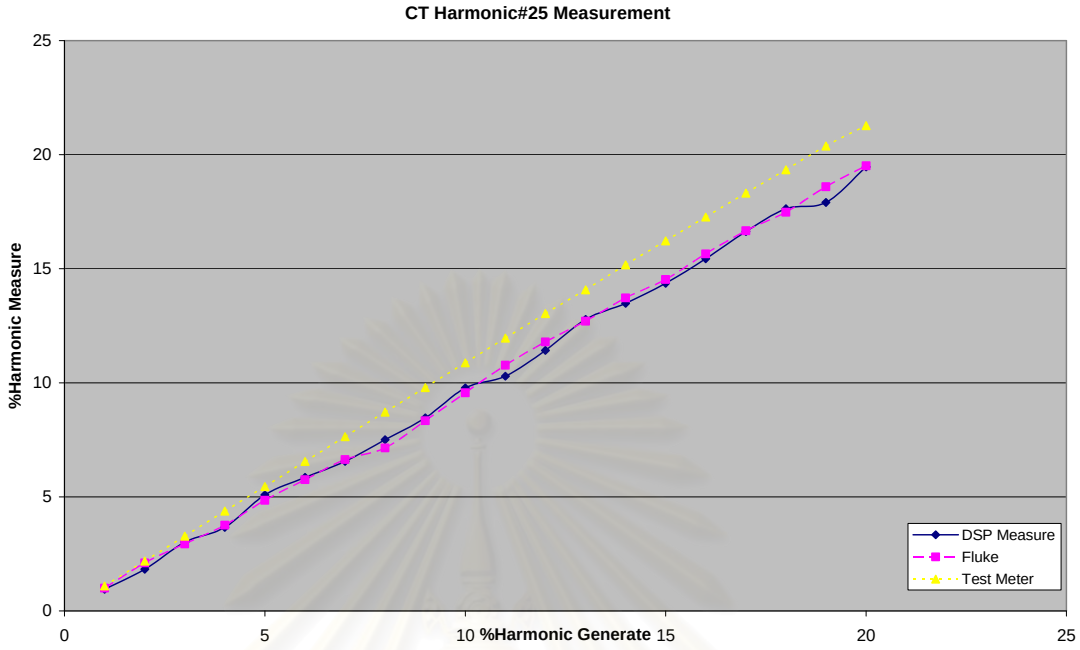
รูปที่ 5-27 กราฟแสดงค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ 11



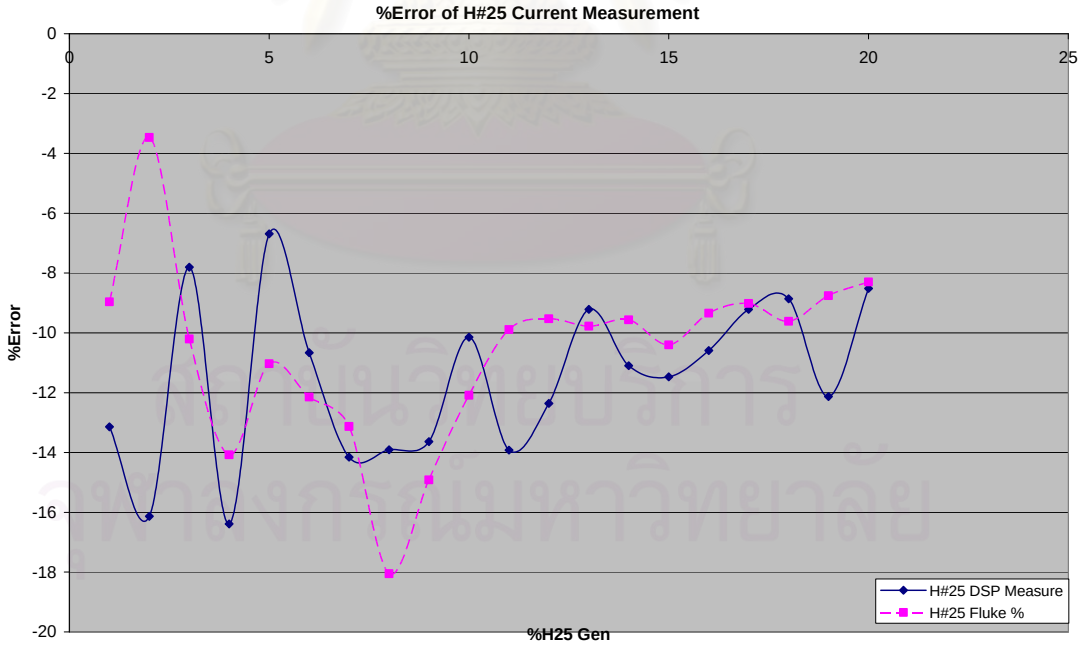
รูปที่ 5-28 กราฟแสดงผลการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ18



รูปที่ 5-29 กราฟแสดค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ 18



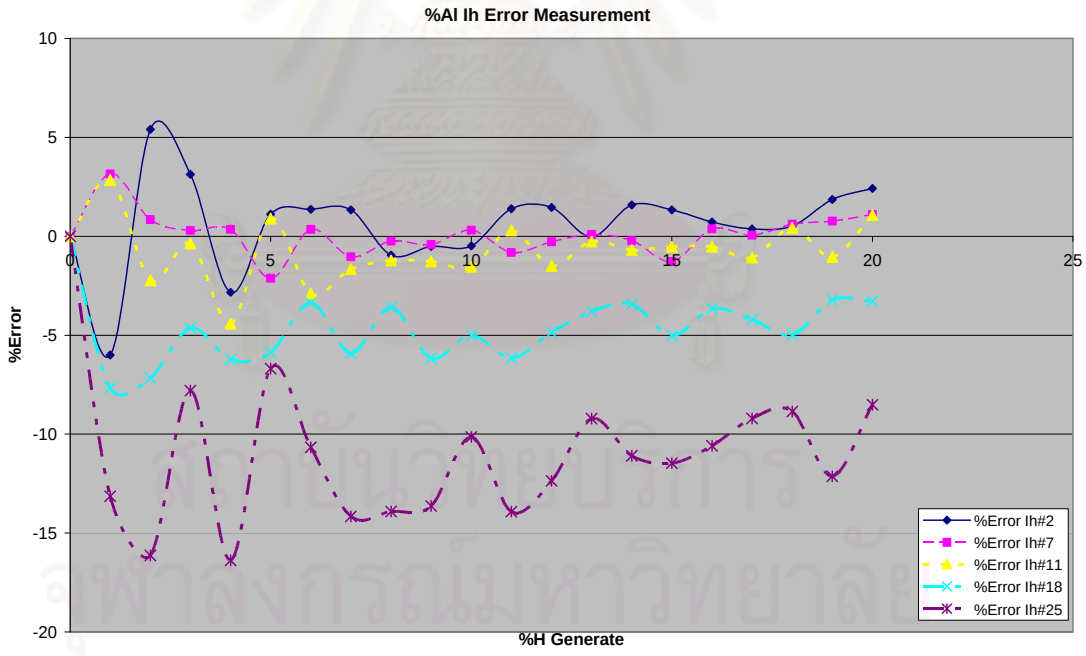
รูปที่ 5-30 กราฟแสดงผลการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ 25



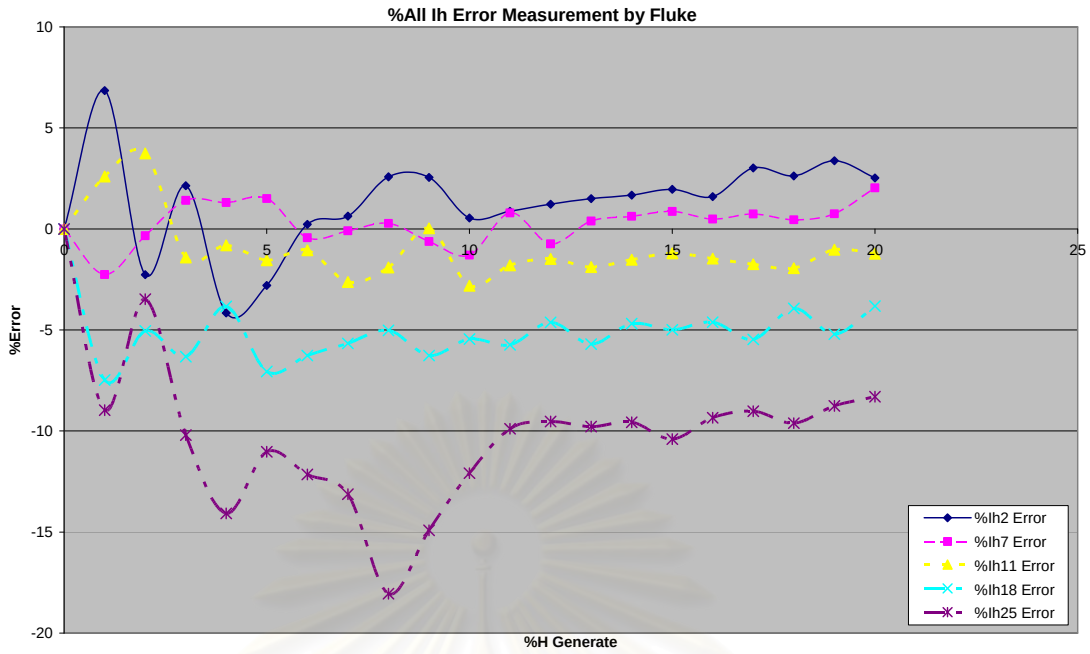
รูปที่ 5-31 กราฟแสดงค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ 25

จากการทดสอบวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์ในกระแสไฟฟ้าสลับ ผลของหม้อแปลงกระแสที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ของสัญญาณจะไม่ส่งผลต่อการวัดฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2 ถึง 17 เห็นได้จากกราฟในรูปที่ 5-22 ถึง รูปที่ 5-27 ปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่วัดได้จากเครื่องวัดคุณภาไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น, Fluke 199C และมิเตอร์อ้างอิงมีค่าใกล้เคียงกัน ผลของหม้อแปลงกระแสที่มีต่อความถี่สัญญาณ จะทำให้การวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์จากเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าและมิเตอร์อ้างอิงมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นตั้งแต่ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 18 ขึ้นไป ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดจะมีค่ามากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5-28 ถึง รูปที่ 5-31

หากไม่คิดถึงผลของหม้อแปลงกระแส พิจารณาเฉพาะผลการวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์จากเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้ากับ Fluke 199C ผลการวัดจะมีค่าใกล้เคียงกันตลอดเวลา จะเห็นได้ชัดเจนเมื่อนำค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดฮาร์มอนิกส์ในกระแสสลับที่ได้จากเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าและเครื่องวัด Fluke 199C มาวาดกราฟรวมกัน ดังแสดงในรูปที่ 5-32และ รูปที่ 5-33 มีค่าความคลาดเคลื่อนและแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคล้ายกัน แสดงว่าอัลกอลริธึม FFT Radix-2 ที่ใช้ในเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าสามารถวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์อันดับต่างๆในสัญญาณได้ใกล้เคียงกับเครื่องวัด Fluke 199C



รูปที่ 5-32 กราฟเปรียบเทียบค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 5-33 กราฟเปรียบเทียบค่า%ความคลาดเคลื่อนในการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ของเครื่องวัด Fluke 199C

5.2. การทดสอบวิเคราะห์หาทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์

การทดสอบในส่วนนี้จะนำอัลกอลริธึมหาทิศทางแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ด้วยวิธีพิจารณาจากเครื่องหมาย CI และ วิธีพิจารณากำลังไฟฟ้าจริงขณะนั้นมาทดสอบหาทิศทาง $\left(\overline{p_h}\right)$ มาใช้และเปรียบเทียบผลการทดสอบ โดยจะแบ่งวงจรทดสอบออกเป็น 2 กรณีดังนี้

1. แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อยู่ทางด้านผู้ใช้ไฟฟ้า
2. แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อยู่ทางด้านแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า

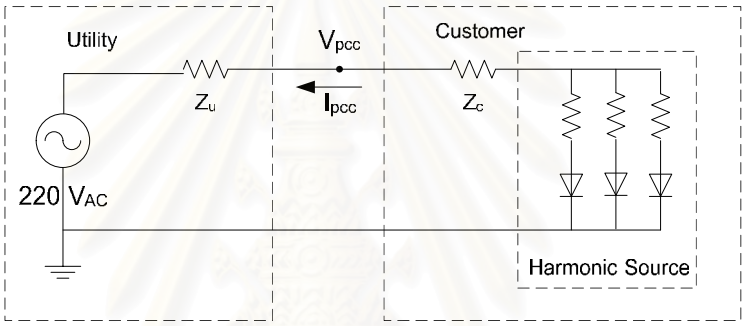
โดยมีข้อกำหนดเพิ่มเติมดังนี้

1. จากการนิยามดัชนี $CI = 2\frac{Q}{I^2}$ เครื่องหมายของ CI จะเปลี่ยนตามเครื่องหมายของ Q ที่หามาได้ ดังนั้นการทดสอบหาทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์โดยพิจารณาเครื่องหมายของ CI จะพิจารณาเฉพาะเครื่องหมายของ Q วัดได้ ณ จุดวัด
2. จากการทดลองวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์ของแหล่งกำเนิดของแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า (ในการทดลองนี้คือเต้าเสียบไฟบ้าน 220 AC) ปริมาณฮาร์มอนิกส์ในสัญญาณแรงดันมีน้อยมาก ทำให้มุมเฟสที่หาได้จากการทำ FFT มีค่าไม่แน่นอนส่งผลให้เครื่องหมายของ Q_h ใดๆที่คำนวณได้ ณ จุดวัดขณะจ่ายโหลด มีทิศสลับไปมาระหว่างบวกกับ

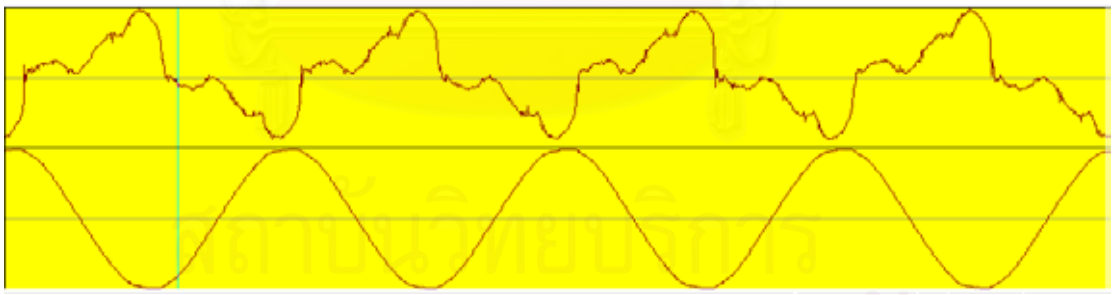
ลบ ทำให้ไม่สามารถนำเครื่องหมายของ Q มาพิจารณาทิศของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ได้ ดังนั้นเครื่องหมายของ CI ที่ใช้พิจารณาจะเป็นเครื่องหมายของ Q_h รวมที่ตัด Q_1 ที่ความถี่หลักมูลออกไปแล้ว

5.2.1. กรณีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อยู่ทางด้านผู้ใช้ไฟฟ้า

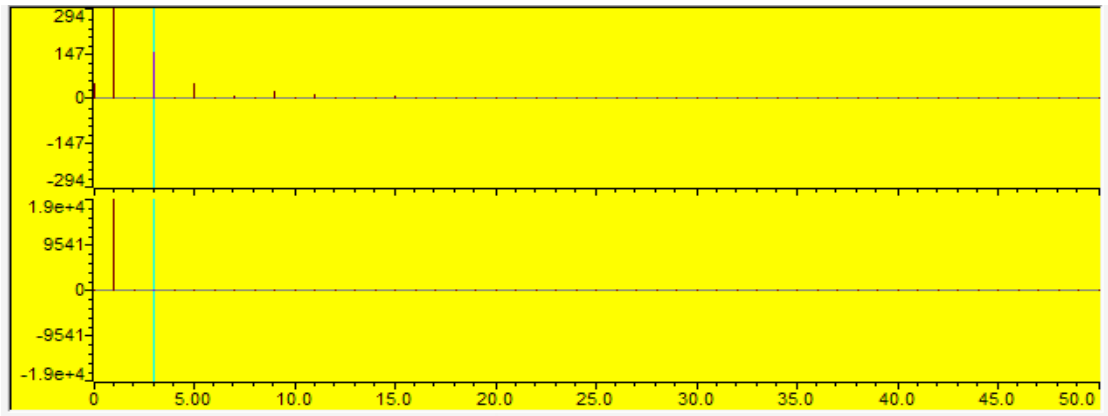
วงจรที่ใช้ทดสอบในกรณีนี้เป็นดังรูปที่ 5-34 เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าจะถูกติดตั้งตรงจุดเชื่อมต่อระหว่างแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า (ในการทดลองนี้คือเต้าเสียบไฟบ้าน 220 AC) โหลดที่นำมาใช้ทดสอบ เป็นโหลดที่ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์ในกระแสดังนี้ หลอดไฟทังเสตนที่ต่ออยู่กับสวิตช์ไฟสูงไฟต่ำ (Dimmer Switch), หลอดไฟเรืองแสง (Fluorescent Lamp), โทรทัศน์, จอคอมพิวเตอร์แอลซีดี และเครื่องสำรองไฟ (UPS) จะได้รูปคลื่นและฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสและแรงดันดังรูปที่ 5-35 ถึงรูปที่ 5-40



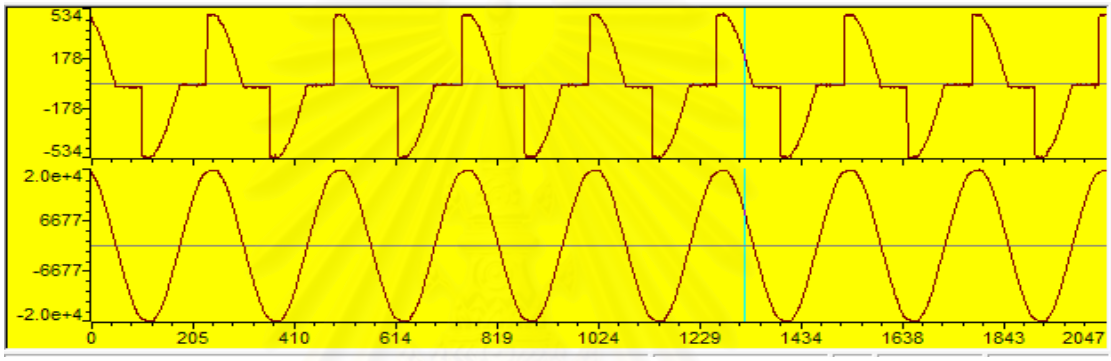
รูปที่ 5-34 วงจรทดสอบกรณีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อยู่ทางด้านผู้ใช้ไฟฟ้า



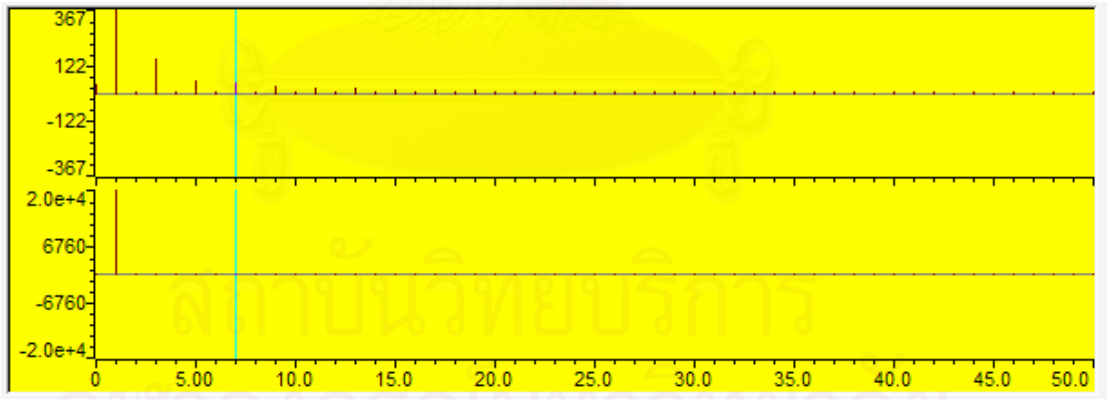
รูปที่ 5-35 รูปคลื่นกระแสและแรงดัน กรณีจ่ายโหลดเครื่องสำรองไฟ



รูปที่ 5-36 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสและแรงดัน กรณีจ่ายโหลดเครื่องสำรองไฟ



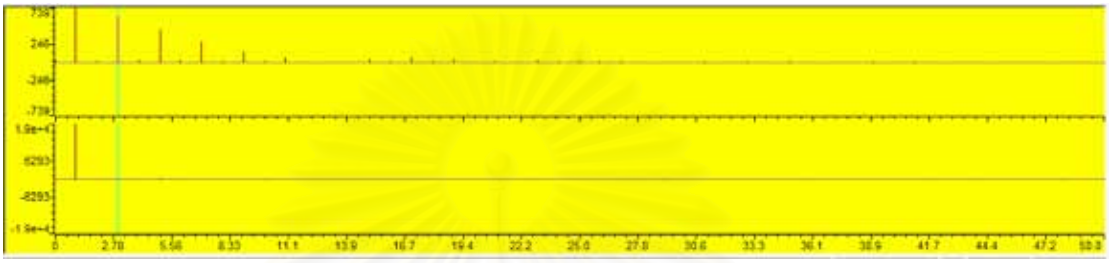
รูปที่ 5-37 รูปคลื่นกระแสและแรงดัน กรณีจ่ายโหลดหลอดไฟทังเสตนที่ต่ออยู่กับสวิตช์ไฟสูงไฟต่ำ



รูปที่ 5-38-ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสและแรงดัน กรณีจ่ายโหลด

หลอดไฟทังเสตนที่ต่ออยู่กับสวิตช์ไฟสูงไฟต่ำ

รูปที่ 5-39 รูปคลื่นกระแสและแรงดัน กรณีจ่ายโหลดหลอดไฟเรืองแสง, จอแอลซีดี และ โทรทัศน์



รูปที่ 5-40 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสและแรงดัน กรณีจ่ายโหลดหลอดไฟเรืองแสง, จอแอลซีดี และ โทรทัศน์

เพื่อพิจารณาเครื่องหมายของ $\overline{p_h}$ และ Q_h ที่คำนวณได้ ณ จุดวัดจะเป็นดังตารางที่ 5.1

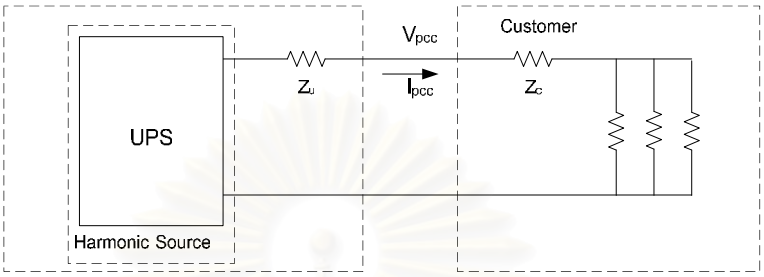
โหลด	เครื่องหมาย $\overline{p_h}$	เครื่องหมาย Q_h
เครื่องสำรองไฟ	-	+
หลอดไฟที่ต่ออยู่กับสวิตช์ไฟสูงไฟต่ำ	-	-
หลอดไฟเรืองแสง, จอแอลซีดี และ โทรทัศน์	-	+

ตารางที่ 5.1 ตารางแสดงเครื่องหมาย $\overline{p_h}$ และ Q_h กรณีแหล่งจ่าย 220V AC

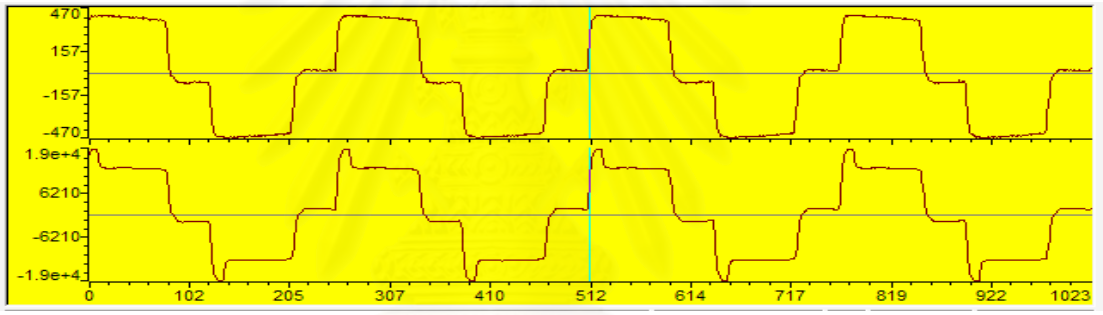
เครื่องหมาย $\overline{p_h}$ ที่ได้จากการทดลองนี้ทั้ง 3 กรณี มีค่าเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่าแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อยู่ทางด้านผู้ใช้ไฟฟ้า ตรงตามวงจรทดสอบ เมื่อพิจารณาเครื่องหมาย Q_h ที่ได้จากการทดลองกรณีโหลดเป็นเครื่องสำรองไฟและหลอดไฟเรืองแสง, จอแอลซีดี และ โทรทัศน์ มีเครื่องหมายเป็นบวก แสดงว่าแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อยู่ทางด้านผู้ใช้ไฟฟ้า เมื่อทดลองใช้โหลดเป็นหลอดไฟทังเสตนที่ต่ออยู่กับสวิตช์ไฟสูงไฟต่ำ จะได้เครื่องหมายเป็นลบ ซึ่งอยู่ในกรณีไม่สามารถสรุปได้ว่าแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์มาจากทิศทางไหนตามนิยามของการพิจารณาเครื่องหมาย CI

5.2.2. กรณีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อยู่ทางด้านแหล่งจำหน่ายไฟ

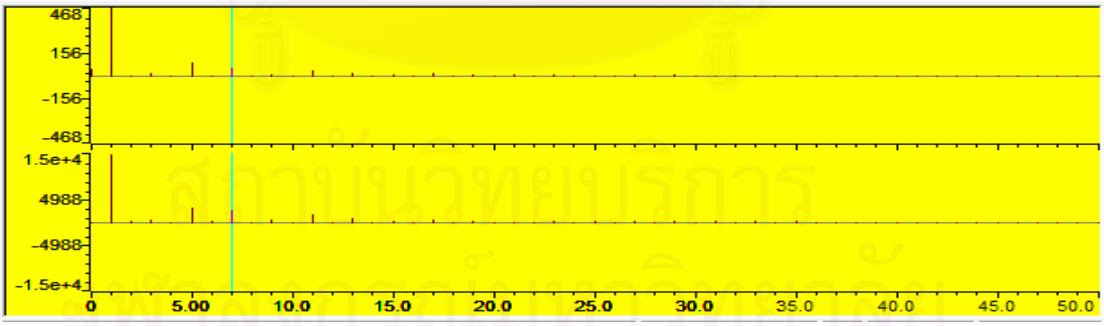
วงจรที่ใช้ทดสอบในกรณีนี้เป็นดังแสดงในรูปที่ 5-41 เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าจะถูกติดตั้งตรงจุดเชื่อมต่อระหว่างแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า (ในการทดลองนี้คือเครื่องจ่ายไฟสำรอง UPS) โหลดที่นำมาใช้ทดสอบ คือ หลอดไฟทังเสตน จะได้รูปคลื่นและฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสและแรงดันดังรูปที่ 5-42 และ รูปที่ 5-43



รูปที่ 5-41 วงจรทดสอบกรณีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อยู่ทางด้านแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า



รูปที่ 5-42 รูปคลื่นกระแสและแรงดัน กรณี UPS จ่ายโหลดหลอดไฟทังเสตน



รูปที่ 5-43 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสและแรงดัน กรณี UPS จ่ายโหลดหลอดไฟทังเสตน

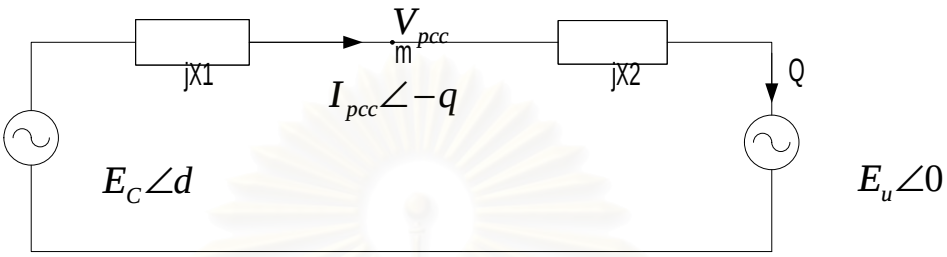
เพื่อพิจารณาเครื่องหมายของ $\overline{p_h}$ และ Q_h ที่คำนวณได้ ณ จุดวัดจะเป็นดังตารางที่ 5.2

โหลด	เครื่องหมาย $\overline{p_h}$	เครื่องหมาย Qh
เครื่องสำรองไฟ	+	-

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงเครื่องหมาย $\overline{p_h}$ และ Q_h กรณีแหล่งจ่ายเป็นเครื่องสำรองไฟ

เครื่องหมาย $\overline{p_h}$ ที่ได้จากการทดลองนี้เป็นบวก แสดงว่าแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อยู่ทางด้านแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า ขณะที่ Q_h ได้เครื่องหมายเป็นลบ จะอยู่ในกรณีที่ไม่สามารถสรุปได้ว่าแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์มาจากทิศทางไหนตามนิยามของการพิจารณาเครื่องหมาย CI

5.2.3. วิเคราะห์ผลการใช้อัลกอลริธึมวิเคราะห์หาทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์



รูปที่ 5-44 วงจรประกอบการพิจารณา Q สำหรับการวิเคราะห์ อัลกอลริธึม CI

จากวงจรในรูปที่ 5-44 Q ที่นิยามสำหรับหาเครื่องหมายของดัชนี $CI = 2\frac{Q}{I^2}$ เป็น Q ที่ไหลเข้าแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า ในขณะที่ Q_m เป็นกำลังเสมือนที่วัดได้ ณ จุดวัด m ซึ่งคำนวณหาได้ดังสมการ (5.2) ถึงสมการ (5.7)

$$E_u = u_{pcc} - I_{pcc}Z_u = u_{pcc} - I_{pcc}X_2 \tag{5.2}$$

$$V_{pcc} = \frac{X_1}{X_1 + X_2}E_u\angle 0 + \frac{X_2}{X_1 + X_2}E_u\angle d \tag{5.3}$$

กำหนดให้ $X_1+X_2 = X$

$$I_{pcc} = I\angle(-q) = \frac{E_c\angle d - E_u}{jX} = \frac{E_c \sin d - j(E_c \cos d - E_u)}{X} \tag{5.4}$$

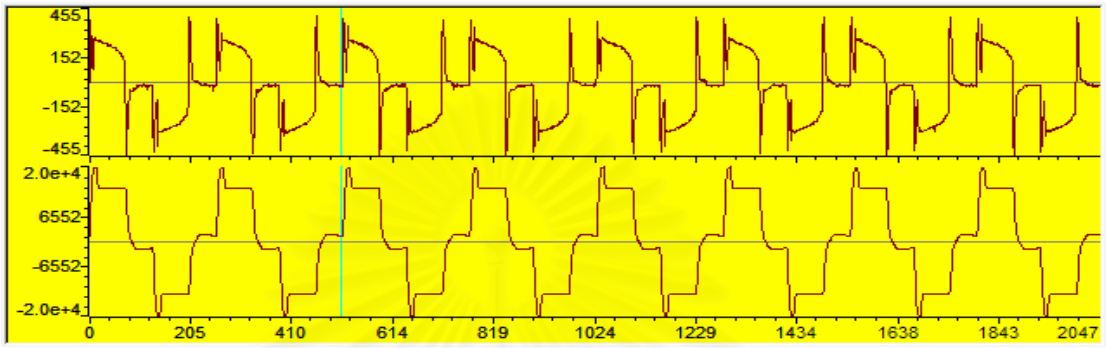
$$\begin{aligned} S = P_m + jQ_m &= V_{pcc}\cdot I_{pcc}^* \\ &= \left[\frac{X_1}{X_1 + X_2}E_u\angle 0 + \frac{X_2}{X_1 + X_2}E_u\angle d\right]\cdot\left[\frac{E_c \sin d - j(E_c \cos d - E_u)}{X}\right] \end{aligned} \tag{5.5}$$

$$P_m = \cdot\left[\frac{E_c \cdot E_u \sin d}{X}\right] \tag{5.6}$$

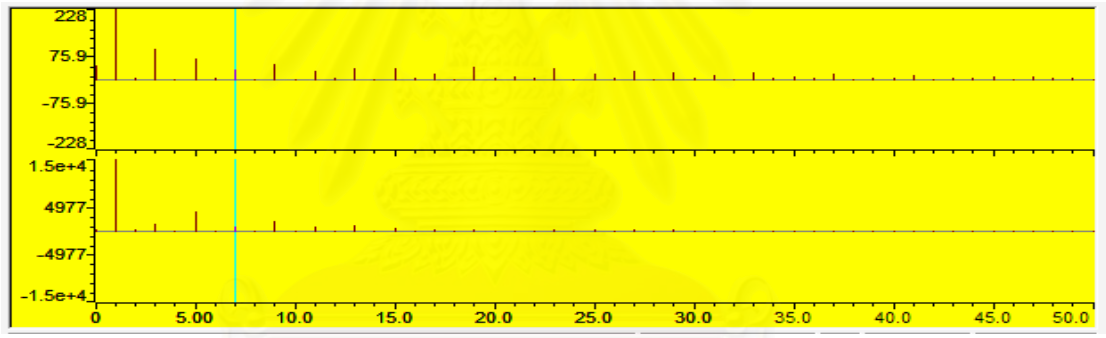
$$Q_m = X_1\frac{E_u\cdot(E_c\cos d - E_u)}{X^2} + X_2\frac{E_c\cdot(E_c - E_u\cos d)}{X^2} \tag{5.7}$$

Q_m ที่หาได้จากสมการ (5.7) จะเป็นบวกหรือลบไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของ E_u และ E_c อย่างเดียว ยังขึ้นอยู่กับค่า X_1 และ X_2 ดังนั้นการใช้ Q_m มาพิจารณาหาทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ ไม่สามารถใช้ได้ ซึ่งเป็น Q คนละค่ากับที่ใช้ในการนิยาม CI ดังนั้น CI จึงไม่สามารถนำมาใช้ในการพิจารณาหาแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์กรณีใช้เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าวัดที่จุดเดียว

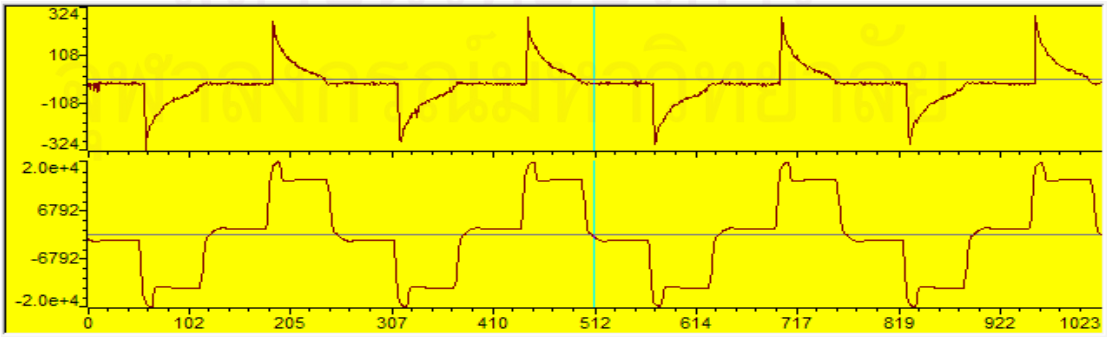
การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดโดยพิจารณาจาก $\overline{p_h}$ สามารถบอกทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ได้ในกรณีที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์มาจากทิศใดทิศหนึ่งโดยเฉพาะ หากทดลองใช้วิธีนี้วิเคราะห์หากรณีที่แหล่งกำเนิดสร้างแรงดันฮาร์มอนิกส์และโหลดเป็นโหลดที่มีความสัมพันธ์ของแรงดันกับกระแสไม่เป็นเชิงเส้น จะได้รูปคลื่นและฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสและแรงดันดังรูปที่ 5-45 ถึง รูปที่ 5-48



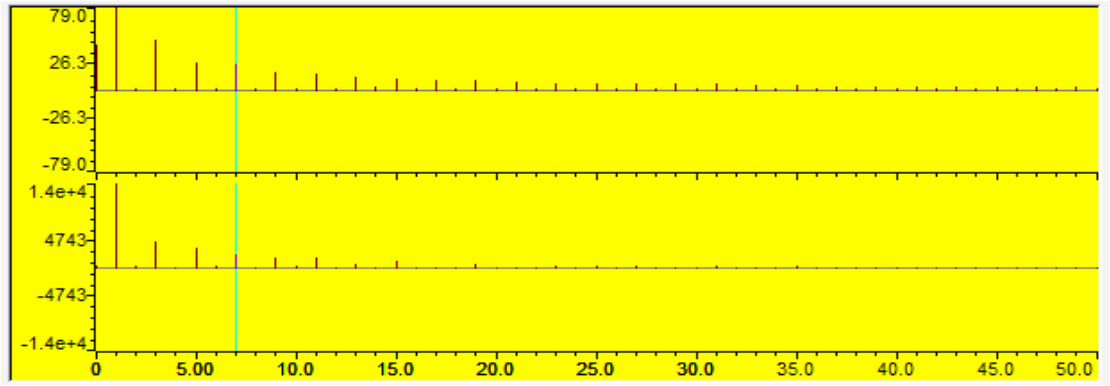
รูปที่ 5-45 รูปคลื่นกระแสและแรงดัน กรณี UPS จ่ายโหลดจอคอมพิเตอร์แอลซีดี



รูปที่ 5-46 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสและแรงดัน กรณี UPS จ่ายโหลดจอคอมพิวเตอร์แอลซีดี



รูปที่ 5-47 รูปคลื่นกระแสและแรงดัน กรณี UPS จ่ายโหลดหลอดไฟเรืองแสง



รูปที่ 5-48 ฮาร์มอนิกส์สเปกตรัมของกระแสและแรงดัน กรณี UPS จ่ายโหลดหลอดไฟเรืองแสง

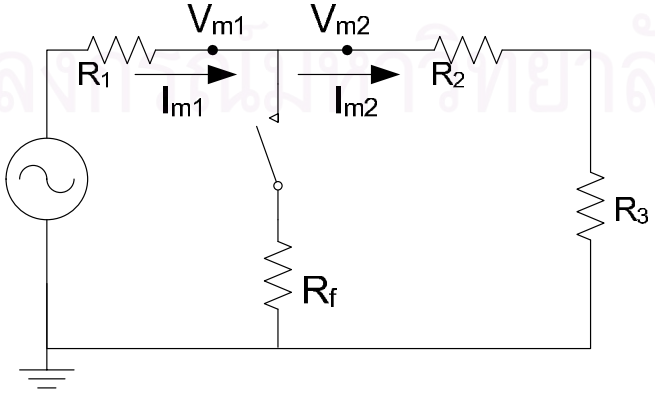
โหลด	เครื่องหมาย $\overline{p_h}$	เครื่องหมาย Q_h
จอคอมพิวเตอร์แอลซีดี	+	-
หลอดไฟเรืองแสง	+	-

ตารางที่ 5.3 ตารางแสดงเครื่องหมาย $\overline{p_h}$ และ Q_h กรณีแหล่งจ่ายUPS จ่ายโหลดไม่เชิงเส้น

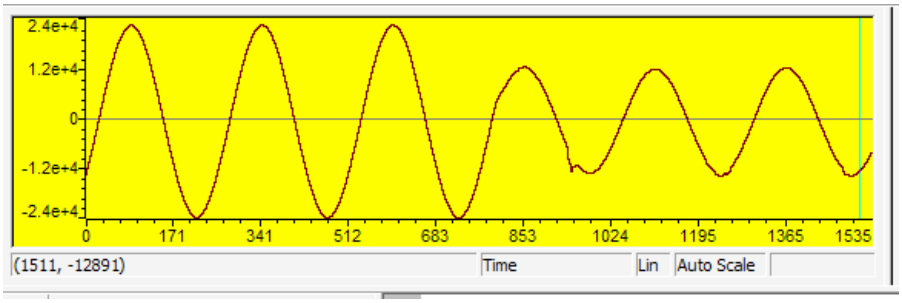
เครื่องหมาย $\overline{p_h}$ ที่ได้จากการทดลองทั้งสองเป็นบวก แสดงว่าแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อยู่ทางด้านแหล่งจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งไม่จริงตามวงจรที่ทดสอบซึ่งมีหล่งกำเนิดสร้างแรงดันฮาร์มอนิกส์และโหลดเป็นโหลดที่มีความสัมพันธ์ของแรงดันกับกระแสไม่เป็นเชิงเส้น

5.3. การทดสอบวิเคราะห์และหาทิศของแหล่งกำเนิดแรงดันตกชั่วขณะ

แรงดันตกชั่วขณะที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า จำลองโดยการสับสวิตช์ความต้านทาน R_f เข้าไปในระบบ โดยมีค่า $R_1 = 27\Omega$, $R_2 = 20\Omega$ และ $R_3 = 20\Omega$ ดังแสดงในรูปที่ 5-49 ส่งผลทำให้แรงดันที่จุดวัด M1 และ M2 ตกลงดังรูปที่ 5-50



รูปที่ 5-49 วงจรทดสอบวิเคราะห์และหาทิศทางของแหล่งกำเนิดแรงดันตกชั่วขณะ

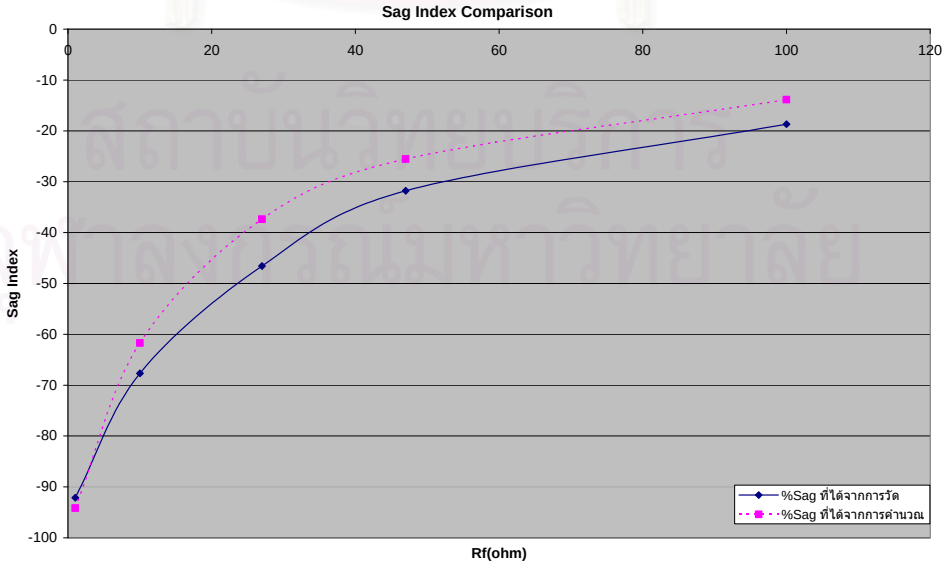


รูปที่ 5-50 รูปคลื่นการเกิดแรงดันตกชั่วขณะที่จุดวัด M1 และ M2

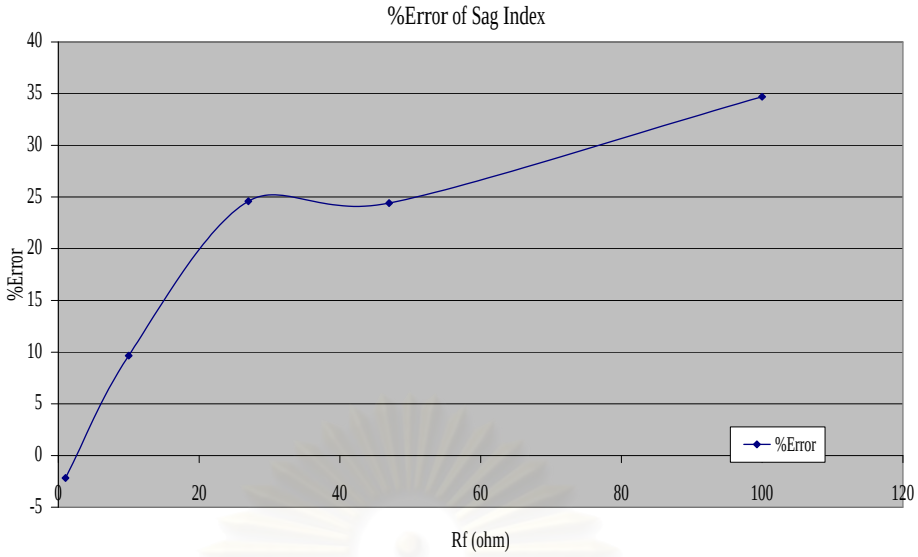
เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า R_f ในวงจรทดสอบ จะส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสที่จุดวัด M_1 และ M_2 ดังแสดงในตารางที่ 5.4 และรูปที่ 5-51 โดยค่าความผิดพลาดแสดงได้ได้ดังกราฟในรูปที่ 5-52

Rf (ohm)	%Sag จากการวัด	%Sag จากการคำนวณ	%ความผิดพลาด
1	-92.11	-94.16	-2.17
10	-67.68	-61.71	9.67
27	-46.58	-37.38	24.59
47	-31.77	-25.54	24.41
100	-18.70	-13.88	34.70

ตารางที่ 5.4 ตารางเปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแรงดันจากเครื่องวัดกับการคำนวณ

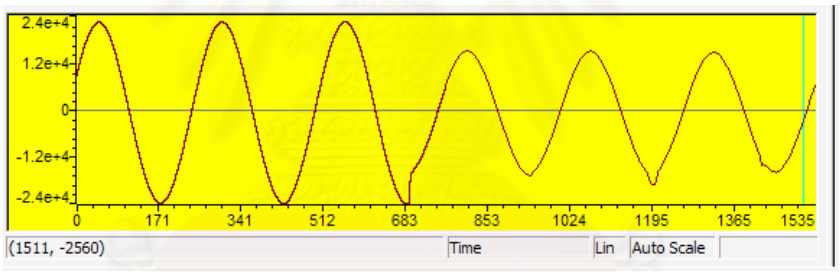


รูปที่ 5-51 กราฟเปรียบทียบร้อยละการเปลี่ยนแปลงแรงดัน

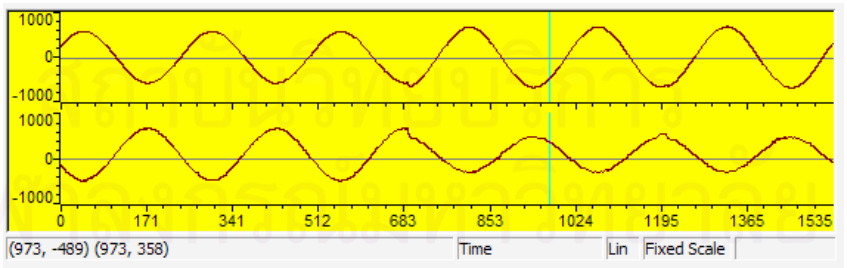


รูปที่ 5-52 กราฟค่า%ความผิดพลาดในการวัดดัชนีแรงดันตกชั่วขณะ

จากกราฟค่าความผิดพลาดของการวัดในรูปที่ 5-52 ค่าความผิดพลาดในการวัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความต้าน R_f เข้าไปในวงจรทดสอบ หรือมองได้ว่า ถ้าการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตกมีค่ามากขึ้น ความผิดพลาดในการวิเคราะห์แรงดันตกจะน้อยลง



(a)



(b)

รูปที่ 5-53 รูปคลื่นการเกิดแรงดันตกชั่วขณะและการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่จุดวัด M1 และ M2

ในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ ส่งผลให้แรงดันที่จุดวัด M_1 และ M_2 ตกลงดังรูปที่ 5-53a กระแสที่ไหลผ่านจุดวัด M_1 จะเพิ่มขึ้นในขณะที่กระแสที่จุดวัด M_2 จะลดลงดังแสดงในรูปที่ 5-53b

เมื่อนำค่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน RMS และกระแส RMS ไปคำนวณหา $Z_e = \frac{\Delta V}{\Delta I}$ แล้ว พิจารณาเครื่องหมาย จะได้ผลดังตารางที่ 5.5

Rf (ohm)	Sign (Ze-M_1)	Sign (Ze-M_2)
1	-	+
10	-	+
27	-	+
47	-	+
100	-	+

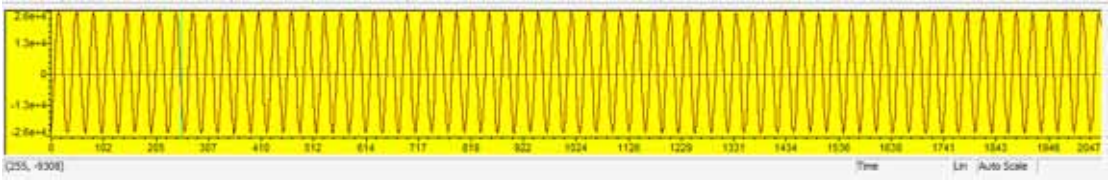
ตารางที่ 5.5 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์เครื่องหมาย Z_eที่จุดวัด M_1 และ M_2

จากการพิจารณาทิศทางของแหล่งกำเนิดแรงดันตกชั่วขณะ ด้วยการพิจารณาเครื่องหมาย Z_e ที่จุดวัด M_1 ขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะ R_f จะอยู่ทางด้านขวาของจุดวัด เปรียบเสมือนว่า แหล่งกำเนิดแรงดันตกชั่วขณะอยู่ทางด้านขวาของจุดวัด (Downstream) เครื่องหมาย Z_e ที่ได้จากจุดวัดนี้จะเป็นลบ ที่จุดวัด M_2 ขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะ R_f จะอยู่ทางด้านซ้ายของจุดวัด เปรียบเสมือนว่า แหล่งกำเนิดแรงดันตกชั่วขณะอยู่ทางด้านซ้ายของจุดวัด (Upstream) เครื่องหมาย Z_e ที่ได้จากจุดวัดนี้จะเป็นบวก ซึ่งตรงตามผลการวัดในตารางที่ 5.5

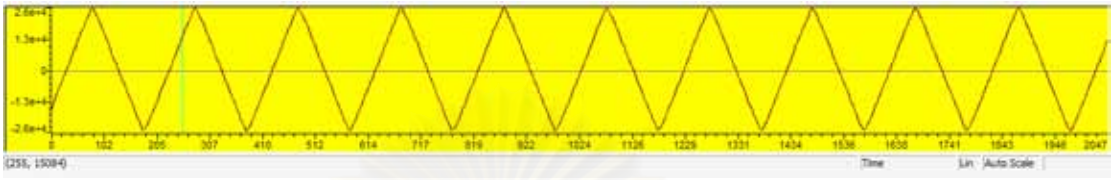
5.4. การทดสอบวัดการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะที่เกิดในช่วงความถี่ต่ำ

เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ใช้ชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล ที่มีอัตราสุ่มสัญญาณสูงสุดที่ 250 ksps เป็นตัวสุ่มสัญญาณเข้ามาเพื่อประมวลผล การทดสอบในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการตรวจจับสัญญาณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะในช่วงความถี่ต่ำ

การทดลองส่วนแรกจะทดสอบความสามารถในการสุ่มสัญญาณสร้างขึ้นจากเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ช่วงความถี่ 0 - 7 kHz และนำผลการสุ่มสัญญาณมาแสดงผลเป็นรูปคลื่นดังแสดงในรูปที่ 5-54 ถึงรูปที่ 5-56



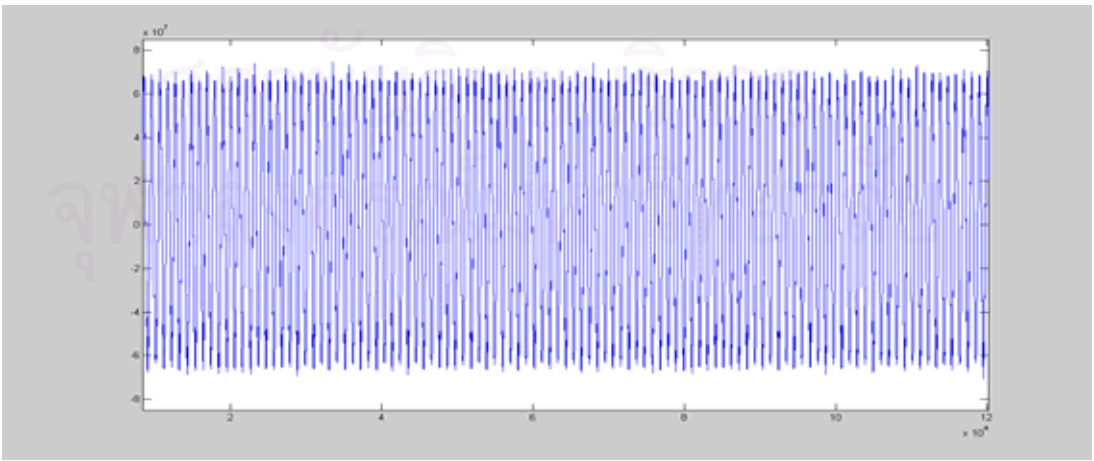
รูปที่ 5-54 การสุ่มจับสัญญาณไซน์แกว่งที่ความถี่ 7 kHz



รูปที่ 5-55 การสุ่มจับสัญญาณสามเหลี่ยมแกว่งที่ความถี่ 2 kHz

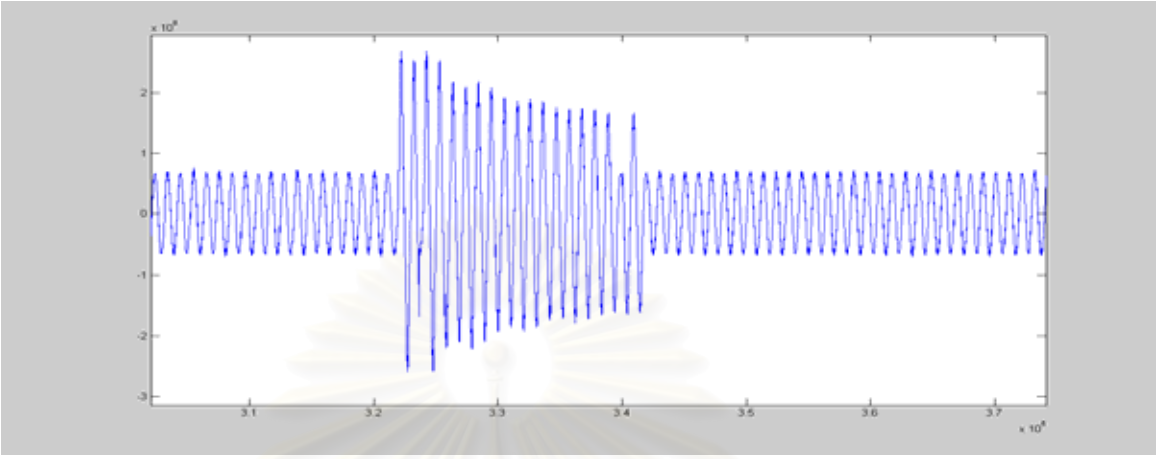
รูปที่ 5-56 การสุ่มจับสัญญาณสี่เหลี่ยมแกว่งที่ความถี่ 2 kHz

การทดสอบในส่วนต่อมาจะเป็นการทดลองวัดสัญญาณกระแสขณะเกิดการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะ การจับบันทึกรูปคลื่นทำโดยการตั้งอัตราการสุ่มของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าให้มีอัตราสุ่มสัญญาณเท่ากับ 102.4 ksps และตั้งเวลาให้บันทึกสัญญาณกระแสสลับของระบบทดลองในช่วงเวลา 1 นาที โดยระบบทดลองประกอบไปด้วยหลอดไฟและสว่านมือ ในสภาวะปกติระบบจะจ่ายกระแสให้กับหลอดไฟอย่างเดียว ซึ่งได้รูปคลื่นดังแสดงในรูปที่ 5-57

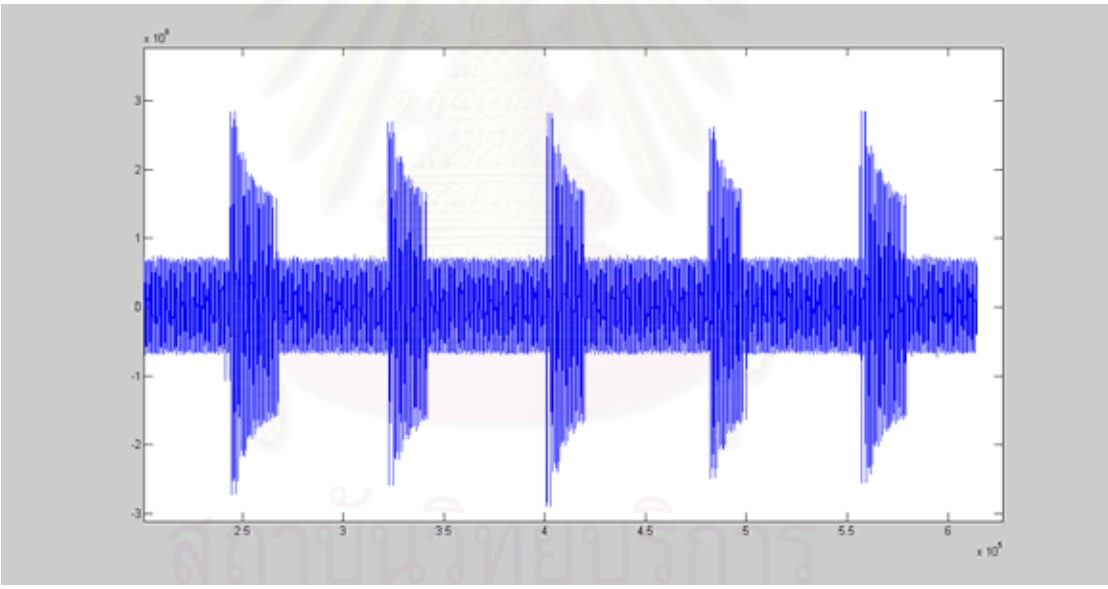


รูปที่ 5-57 สัญญาณกระแสของหลอดไฟ ขณะไม่เดินเครื่องสว่านมือ

การเกิดการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะในสัญญาณกระแสสลับที่วัด ทำโดยการเดินเครื่องสว่านมือ เปรียบเสมือนการเดินเครื่องมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งกินกระแสสูงในช่วงเริ่มต้นเดินเครื่อง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะในช่วงความถี่ต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 5-58 และรูปที่ 5-59



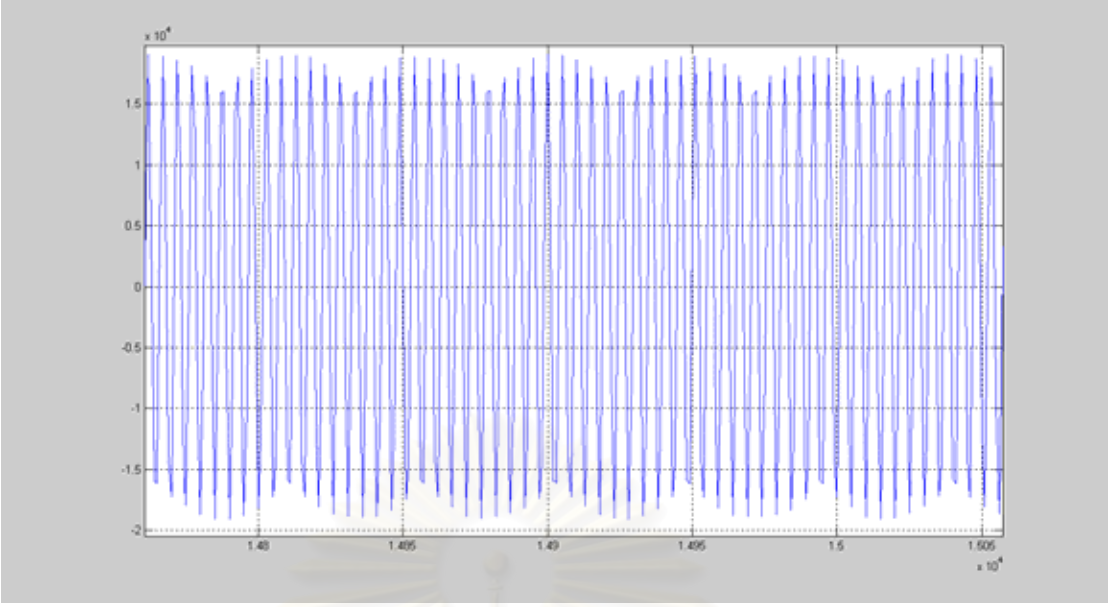
รูปที่ 5-58 สัญญาณกระแส ขณะเดินเครื่องสว่านมือ



รูปที่ 5-59 สัญญาณกระแสขณะเดินเครื่องสว่านมือหลายครั้ง

5.5. การทดสอบวิเคราะห์ไฟกะพริบ

ในการทดสอบวิเคราะห์ไฟกะพริบ จะใช้เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ดึงสัญญาณแรงดันเข้ามาแล้วส่งมายังโปรแกรมประสานกราฟิกกับผู้ใช้บนคอมพิวเตอร์ เพื่อดูลักษณะรูปคลื่นในช่วง 10 นาที สัญญาณที่สุ่มเข้ามาจะมีอัตราการชักตัวอย่าง 256 sample/sec ดังแสดงรูปที่ 5-60



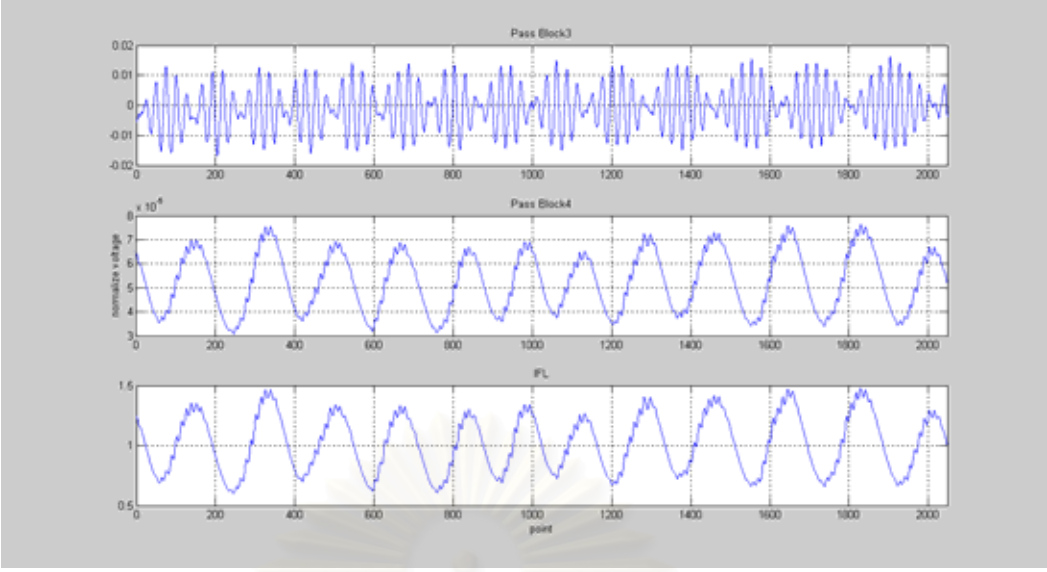
(b)

รูปที่ 5-60 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดัน 220VAC ในช่วงเวลา 10 นาที

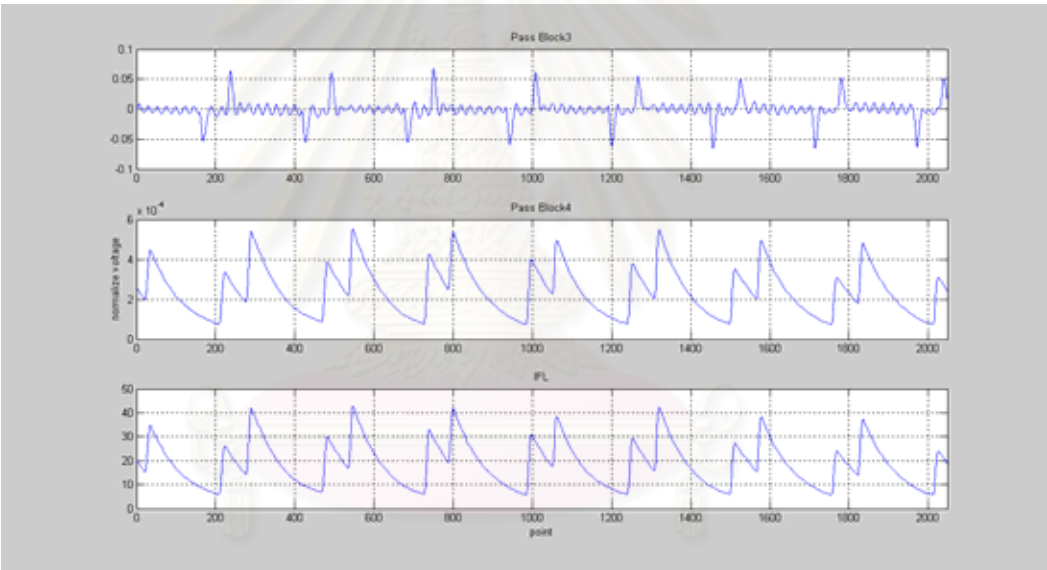
หลังจากที่สุ่มสัญญาณครบ 10 นาที ข้อมูลแรงดันที่สุ่มได้จะถูกนำไปผ่านตัวกรอง (Filter) ตามมาตรฐาน IEC61000-4-15 ดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2-17 เพื่อหาระดับการเกิดไฟกะพริบ (Instantaneous Flicker Level, IFL) .ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทดลองวัด IFL จากแหล่งกำเนิดแรงดัน 2 แหล่งได้แก่ แรงดันสลับ 220 V จากเต้าเสียบไฟบ้าน และแรงดันสลับ 220 V ขณะเดินเครื่องเป่าลมร้อนที่ส่งผลให้หลอดไฟทังเสตนเกิดการกะพริบ จะได้รูปคลื่นเมื่อผ่านตัวกรองต่างๆ เป็นดังแสดงในรูปที่ 5-61 และ รูปที่ 5-62 หลังจากนั้นข้อมูลระดับการเกิดไฟกะพริบ (IFL) จะถูกนำไปคำนวณทางสถิติเพื่อหาค่า P0.1, P1S, P3S P10S, P50S ตามลำดับ สุดท้ายจะคำนวณหาค่า P_{st} ของการทดลองตามตารางที่ 5.6 โดยผลการวัดดัชนี P_{st} จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า Dranetz ดังแสดงในตารางที่ 5.6

การทดลอง	P_{st} (PQM)	P_{st} (Dranetz)
วัดแรงดันจากเต้าเสียบ 220 AC	0.7396	0.671
วัดแรงดันจากเต้าเสียบขณะเดินเครื่องเป่าลมร้อน	4.0680	3.890

ตารางที่ 5.6 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์หาดัชนีไฟกะพริบ P_{st}



รูปที่ 5-61 รูปคลื่นแรงดัน 220VAC ที่ผ่านตัวกรองตามมาตรฐาน IEC61000-4-15

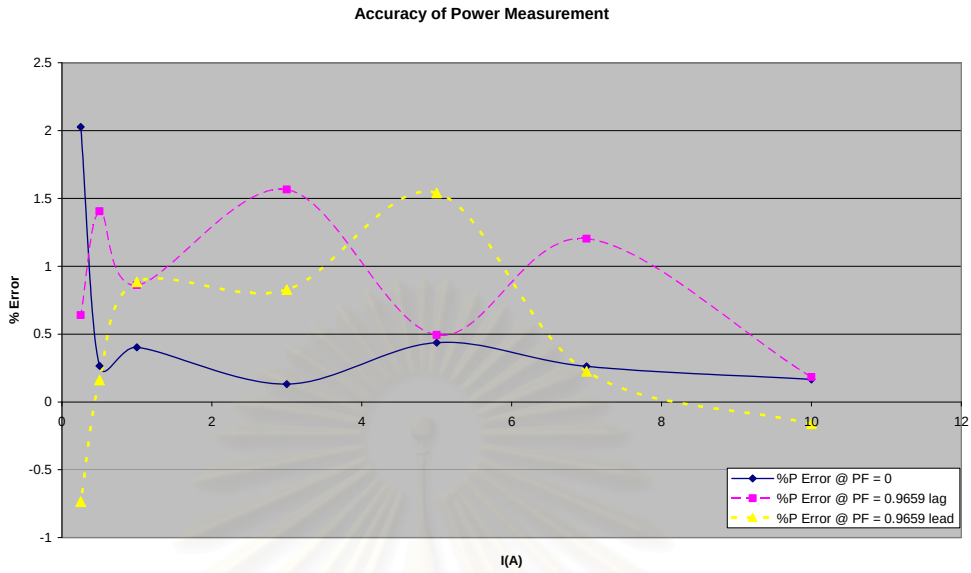


รูปที่ 5-62 รูปคลื่นแรงดัน 220VAC ขณะจ่ายโหลดเครื่องเป่าลมร้อน ที่ผ่านตัวกรองตามมาตรฐาน IEC61000-4-15

5.6. การทดสอบวิเคราะห์พารามิเตอร์อื่น ๆ

พารามิเตอร์อื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการวัดคุณภาพไฟฟ้าได้แก่ กำลังจริง (P), กำลังเสมือน (Q), กำลังปรากฏ (S) และตัวประกอบกำลัง (Power Factor) จะทำการทดสอบตามวงจรในรูปที่ 5-4 โดยนำค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้ามาหาค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับมิเตอร์อ้างอิงที่มุมเฟสต่างๆ และปรับขนาดกระแสระหว่าง 0 – 10 A ที่แรงดัน 220 Vrms

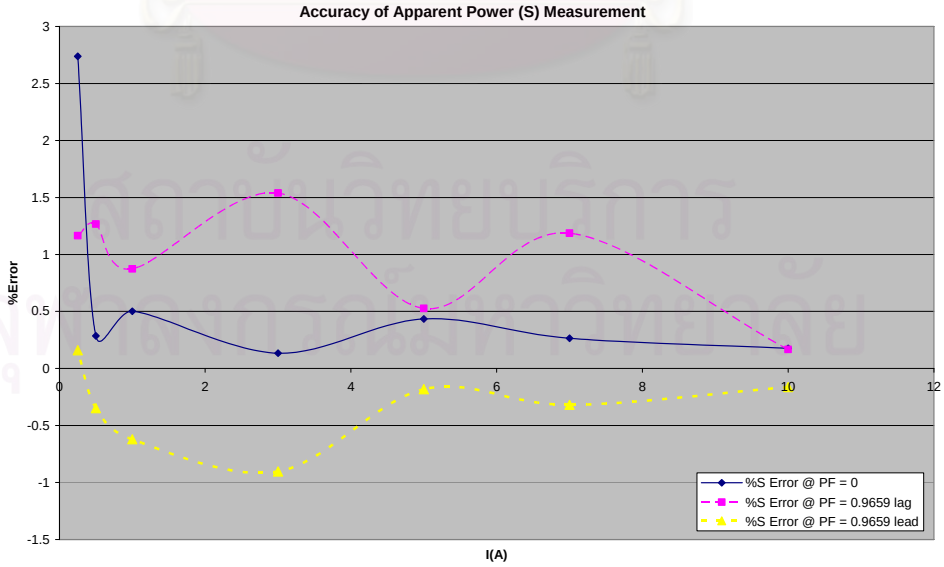
5.6.1. การทดสอบวัดกำลังจริง



รูปที่ 5-63 กราฟเปรียบเทียบค่า%ความผิดพลาดในการวัดกำลังจริง

จากกราฟผลการทดลองในรูปที่ 5-63 ร้อยละความผิดพลาดในการวัดกำลังจริง (P) เมื่อเปลี่ยนมุมเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสจากมุม 15^0 นำ (0.9659 Lead) เป็น 15^0 ตาม (0.9659 lag) มีค่าอยู่ระหว่าง –1% ถึง 2%

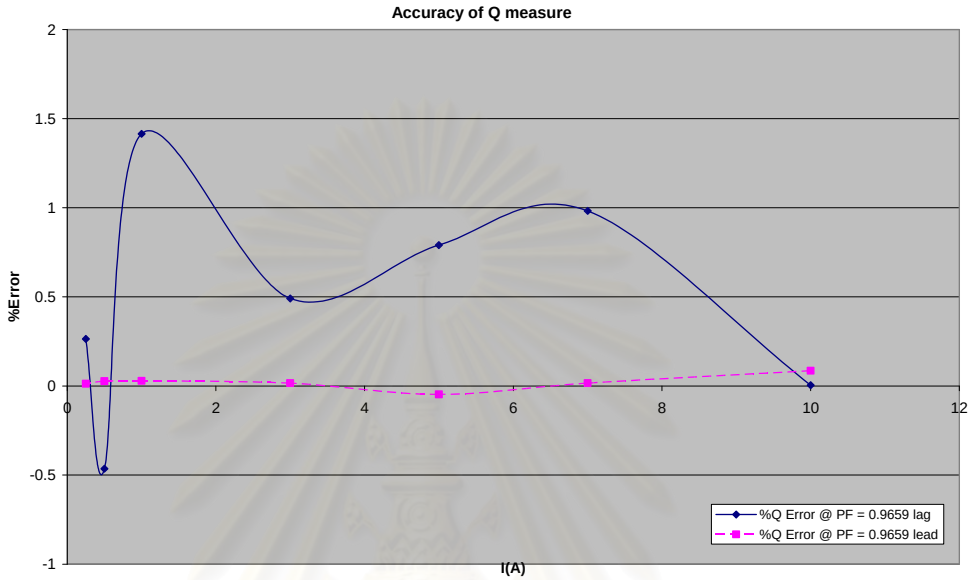
5.6.2. การทดสอบวัดกำลังปรากฏ



รูปที่ 5-64 กราฟเปรียบเทียบค่า%ความผิดพลาดในการวัดกำลังปรากฏ

จากกราฟผลการทดสอบวัดกำลังปรากฏ (S) ในรูปที่ 5-64 เมื่อเปลี่ยนมุมเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสจากมุม 15^0 นำ (0.9659 Lead) เป็น 15^0 ตาม (0.9659 lag) มีค่าอยู่ระหว่าง –1% ถึง 3%

5.6.3. การทดสอบวัดกำลังเสมือน

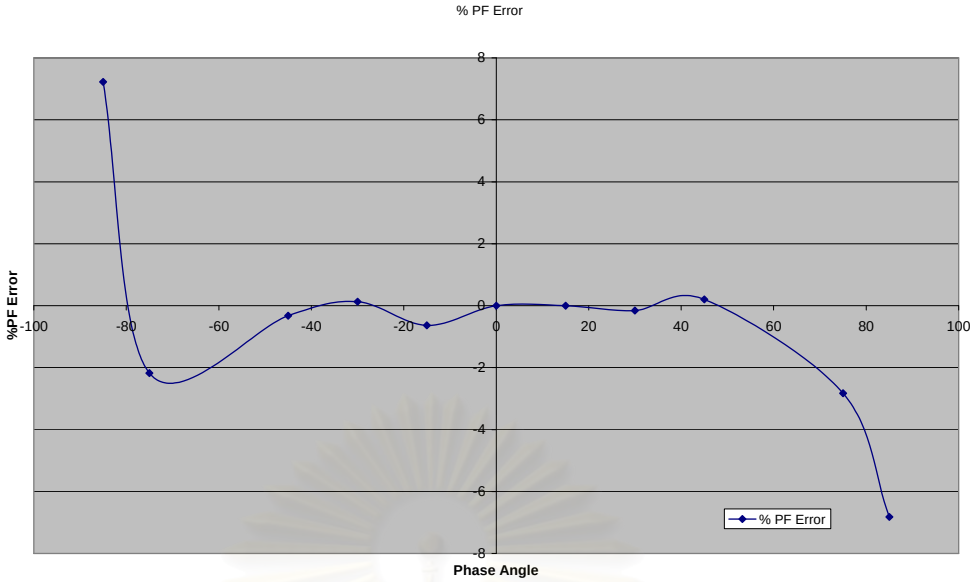


รูปที่ 5-65 กราฟเปรียบเทียบค่า%ความผิดพลาดในการวัดกำลังเสมือน

การทดสอบวัดค่ากำลังเสมือน (Q) เมื่อเปลี่ยนมุมเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสจากมุม 15^0 นำ เป็น 15^0 ตาม ดังแสดงในกราฟรูปที่ 5-65 ที่มุมเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสเป็น 15^0 นำ (0.9659 Lead) ค่าร้อยละความผิดพลาดในการวัดกำลังเสมือนจะมีค่าอยู่ระหว่าง -0.05% - 0.01% และที่มุมเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสเป็น 15^0 ตาม (0.9659 lag) ค่าร้อยละความผิดพลาดในการวัดกำลังเสมือนมีค่าอยู่ระหว่าง -0.5% - 1.414%

5.6.4. การทดสอบวัดตัวประกอบกำลัง

สำหรับการทดสอบวัดตัวประกอบกำลัง จะตั้งเครื่องจ่ายโหลดพลังงานไฟฟ้าเสมือนจ่ายกระแส 10 A และแรงดัน 220 V โดยเปลี่ยนมุมเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสในช่วงระหว่างมุม 85^0 นำ ถึง 85^0 ตาม จากนั้นใช้เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นวัดค่าตัวประกอบกำลังเทียบกับมิเตอร์อ้างอิง และนำผลการวัดมาหาค่าความคลาดเคลื่อนได้ดังกราฟในรูปที่ 5-66



รูปที่ 5-66 กราฟค่า%ความผิดพลาดในการวัดตัวประกอบกำลัง

จะเห็นได้ว่า ที่มุมเฟสระหว่างแรงดันกับกระแส เป็น -85^0, -75^0, 75^0, และ 85^0 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการวัดจะมีค่ามากคือ ประมาณ 7 % เนื่องจากค่าตัวประกอบกำลังที่มุมเฟสนี้มีค่าใกล้ศูนย์มาก จึงทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการวัดค่าตัวประกอบกำลังมีค่าสูง ส่วนการวัดที่มุมเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสในช่วง -45^0 ถึง 45^0 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมีค่าอยู่ระหว่าง -0.6% - 0.2 %

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1. ข้อสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ รายละเอียดการออกแบบและพัฒนาสร้างเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่เพิ่มความสามารถในการตรวจจับทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ โดยใช้อัลกอลริธึมหาทิศทางแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ด้วยวิธี CI เปรียบเทียบกับวิธีพิจารณาเครื่องหมายของกำลังจริงขณะนั้น $\overline{p_h}$ และหาทิศทางแหล่งกำเนิดแรงดันตกชั่วขณะโดยใช้วิธีการพิจารณาเครื่องหมายของความต้านทานขณะไม่เกิดการรบกวน โครงสร้างฮาร์ดแวร์หลักของเครื่องประกอบด้วย ชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล TMS320C6711 เป็นหน่วยประมวลผลหลักสำหรับคำนวณหาพารามิเตอร์ทางคุณภาพไฟฟ้า, ชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล ADS8364, ไมโครคอนโทรเลอร์ Atmega128 ควบคุมการติดต่อระหว่างผู้ใช้กับเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า และโปรแกรมกราฟิกประสานกับผู้ใช้ที่ติดต่อกับเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าผ่านมอดูล UART พารามิเตอร์ทางคุณภาพไฟฟ้าที่ทดลองวัดออกมาได้แก่ ปริมาณฮาร์มอนิกส์ในสัญญาณแรงดันไฟฟ้าสลับและกระแสไฟฟ้าสลับ, ดัชนีแรงดันตกชั่วขณะ, กำลังจริง (P), กำลังเสมือน (Q), กำลังปรากฏ (S) และตัวประกอบกำลัง (PF)

ส่วนประกอบของชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล TMS320C6711 ที่ทำให้กระบวนการทำงานของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าเป็นได้อย่างต่อเนื่องคือ มอดูล EDMA ภายในชิพทำหน้าที่ควบคุม การไหลของข้อมูลที่สุ่มเข้ามาโดยชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล ADS8364, การส่งข้อมูลที่ผ่านการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ทางคุณภาพไฟฟ้า, และการส่งข้อมูลไปแสดงผลภายนอกชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล

จากการทดสอบการทำงานของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น ปริมาณฮาร์มอนิกส์ในสัญญาณแรงดันสลับที่วิเคราะห์ออกมาได้มีค่าใกล้เคียงและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าที่ตั้งจากเครื่องจ่ายโหลดพลังงานไฟฟ้าเสมือนและมิเตอร์อ้างอิง เนื่องจากผลของหม้อแปลงกระแสที่มีต่อความถี่ของสัญญาณที่วัด ทำให้การวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์ในสัญญาณกระแสสลับนั้นมีความแม่นยำในช่วงฮาร์มอนิกส์อันดับ 2-17 ส่วนการวัดพารามิเตอร์ กำลังจริง (P), กำลังเสมือน (Q), และกำลังปรากฏ (S) เมื่อเปลี่ยนมุมเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสไป ความแม่นยำในการวัดอยู่ในช่วง -1% ถึง 2% สำหรับการวัดค่าตัวประกอบกำลัง (PF) ความแม่นยำในการวัดจะอยู่ในช่วง -0.6% ถึง 0.2 %

ในส่วนของการทดสอบอัลกอลริธึมสำหรับหาทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ ได้ทดลองใช้อัลกอลริธึมที่พิจารณาจากเครื่องหมายของ $\overline{p_h}$ และ Q_h ตามวิธี CI ในกรณีของ $\overline{p_h}$ จะให้ผลการพิจารณาแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ได้ถูกต้องในกรณีที่ฮาร์มอนิกส์มีแหล่งกำเนิดอยู่เฉพาะทิศใดทิศหนึ่งเท่านั้น ส่วนการใช้ Q_h มาพิจารณาหาทิศทางของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกนั้น ไม่สามารถสรุปทิศทางได้ ณ จุดวัดเดียวเนื่องจากเครื่องหมาย Q_h ที่ใช้เป็นคนละจุดกับ Q ที่นิยามในดัชนี CI ส่วนของการทดสอบหาทิศทางแหล่งกำเนิดแรงดันตกชั่วขณะนั้นสามารถหาทิศทางได้ถูกต้องตามนิยามของการพิจารณาเครื่องหมายของ Z_e ซึ่งได้ทดสอบในกรณีที่แหล่งกำเนิดแรงดันตกชั่วขณะอยู่ทางซ้ายและทางขวาของจุด ภายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังได้แสดงตัวอย่างการสุ่มสัญญาณที่ช่วงความถี่ 0-7 kHz เพื่อทดสอบความสามารถในการสุ่มสัญญาณของชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอลและทดลองบันทึกรูปคลื่นกระแสขณะเริ่มเดินเครื่องสว่านมือเป็นเวลา 1นาที โดยตั้งอัตราสุ่มสัญญาณไว้ที่ 102.4 ksps สำหรับการทดสอบวัดดัชนีไฟกะพริบ ได้ทดสอบการเก็บสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากไฟบ้าน 220V AC และแรงดันไฟฟ้าขณะจ่ายโหลดเครื่องลมร้อนที่ส่งผลให้เกิดไฟกะพริบ เพื่อดูกรอบรูปคลื่นในช่วง 10 นาที และสัญญาณที่มากล้ำ (Modulate) กับสัญญาณหลัก 50 Hz จะเห็นได้ว่าดัชนีไฟกะพริบ P_{st} มีค่าเพิ่มขึ้นตามการกระเพื่อมของแหล่งกำเนิดแรงดันที่วัดและมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้โดยเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า Dranetz

6.2. ข้อเสนอแนะ

1. หม้อแปลงกระแสที่ใช้วัดปริมาณฮาร์มอนิกส์ในสัญญาณกระแสไฟฟ้าสลับ มีข้อจำกัดในการวัดสัญญาณฮาร์มอนิกส์อันดับที่สูงกว่า 18 การเลือกใช้หม้อแปลงกระแสที่มีคุณสมบัติวัดสัญญาณที่ความถี่สูงๆ จะเพิ่มประสิทธิภาพในการวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์ในสัญญาณกระแสไฟฟ้าสลับ ให้สามารถวัดสัญญาณฮาร์มอนิกส์อันดับสูงๆได้
2. การเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์แรงดันตกชั่วขณะ ทำได้โดยการเพิ่มช่วงการเก็บสัญญาก่อนเกิดและระหว่างเกิดแรงดันตกชั่วขณะให้มากขึ้นเช่น เปลี่ยนจาก 3 cycle เป็น 15 cycle เพื่อให้ได้ช่วงสัญญาณที่คงที่หลังเกิดแรงดันตกชั่วขณะ และปรับช่วงเวลาในการหาค่าแรงดัน RMS ให้มากกว่า 1 cycle
3. การเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์ดัชนีไฟกะพริบนั้น ควรจะต้องทดสอบวัดกับรูปคลื่นแรงดันที่มีการกล้ำของสัญญาณที่แน่นอนเพิ่มเติม

4. การนำเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าไปวัดกับระบบไฟฟ้าจริง จะต้องออกแบบวงจรป้องกันและวงจรภาครับแรงดันของเครื่องวัดเพิ่มเติม เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพระบบไฟฟ้าที่นำไปวัด
5. เพื่อให้การทำงานของโปรแกรมทุกส่วนทำงานได้พร้อมกัน จะต้องจัดโครงสร้างโปรแกรมทั้งหมดให้สามารถบันทึกลงหน่วยความจำแบบ Flash Rom บนบอร์ดทดลองชิพประมวลสัญญาณดิจิตอล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

[1] IEC 61000-4-30 Std. "Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods". 2003.

[2] Alexander Kusko and Marct T.Thomson. "Power Quality in Electrical Power Systems". USA: McGraw-Hill. 2007

[3] IEEE 1159-1995 Std. "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality". 1995.

[4] C. Sankaran. "Power Quality". USA: CRC Press. 2000

[5] Jos Arrilllaga. "Power System Harmonics". England: John Wiley & Son, 2003

[6] Roger C. Dugan, Mark F. Magranaghan, Surya Santoso, and H. Wayne Beaty. "Electrical Power Systems Quality 2nd ed". USA :McGraw-Hill. 2002

[7] Angelo Baggini. "Handbook of Power Quality". England: John Wiley & Sons. 2000.

[8] A, Moreno Munoz. "Power Quality Mitigation Technologies in a Distributed Environment". London: Springer. 2007.

[9] Rulph Chassaing, "DSP Applications Using C and the TMS320C6x DSK". Canada: John Wiley & Sons. 2002.

[10] Chun Li, Wilsun Xu, and Thavatchai Tayjasanant. A Critical Impedance-Based Method for Identifying Harmonic Sources. IEEE Transactions on Power Delivery. 19,2 (April 2004): 671-678

[11] Toshihiko Tanaka, and Hirofumi Akagi. A New Method of Harmonic Power Detection Based on the Instantaneous Active Power in Three Phase Circuits. IEEE Transactions on Power Delivery. 10,4 (October 1995): 1737-1741

[12] Thavatchai Tayjasanant, Chun Li, and Wilsun Xu. A Resistance Sign-Based Method for Voltage Sag. IEEE Transactions on Power Delivery. 20,4 (October 2005): 2544-2551

[13] IEC 61000-4-15 Std. "Testing and measurement techniques-Section 15: Flickermeter-Functional and design specifications". 2003.

[14] Texas Instrument. "TMS320C6711 Floating-Point Digital Signal Processors" [Online]. Available from: www.ti.com [November, 2005]

[15] Atmel Corporation. "ATmega128 8-bit Microcontroller with 128K Bytes In-System Programmable Flash" [Online]. Available form: www.atmel.com/literature [November 2004]

[16] Texas Instrument. "ADS8364 Analog to Digital Converters" [Online]. Available from: www.ti.com [August, 2006]

[17] Dallas Semiconductor . "DS1307 64 x 8 Seruak Real-Time Clock" [Online].Available from: www.maxim-ic.com/TechSupport [April, 2004].

[18] Fairchaild Semiconductor. "MM74C922 16-Key Encoder" [Online]. Available from: www.fairchildsemi.com [January, 1999]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

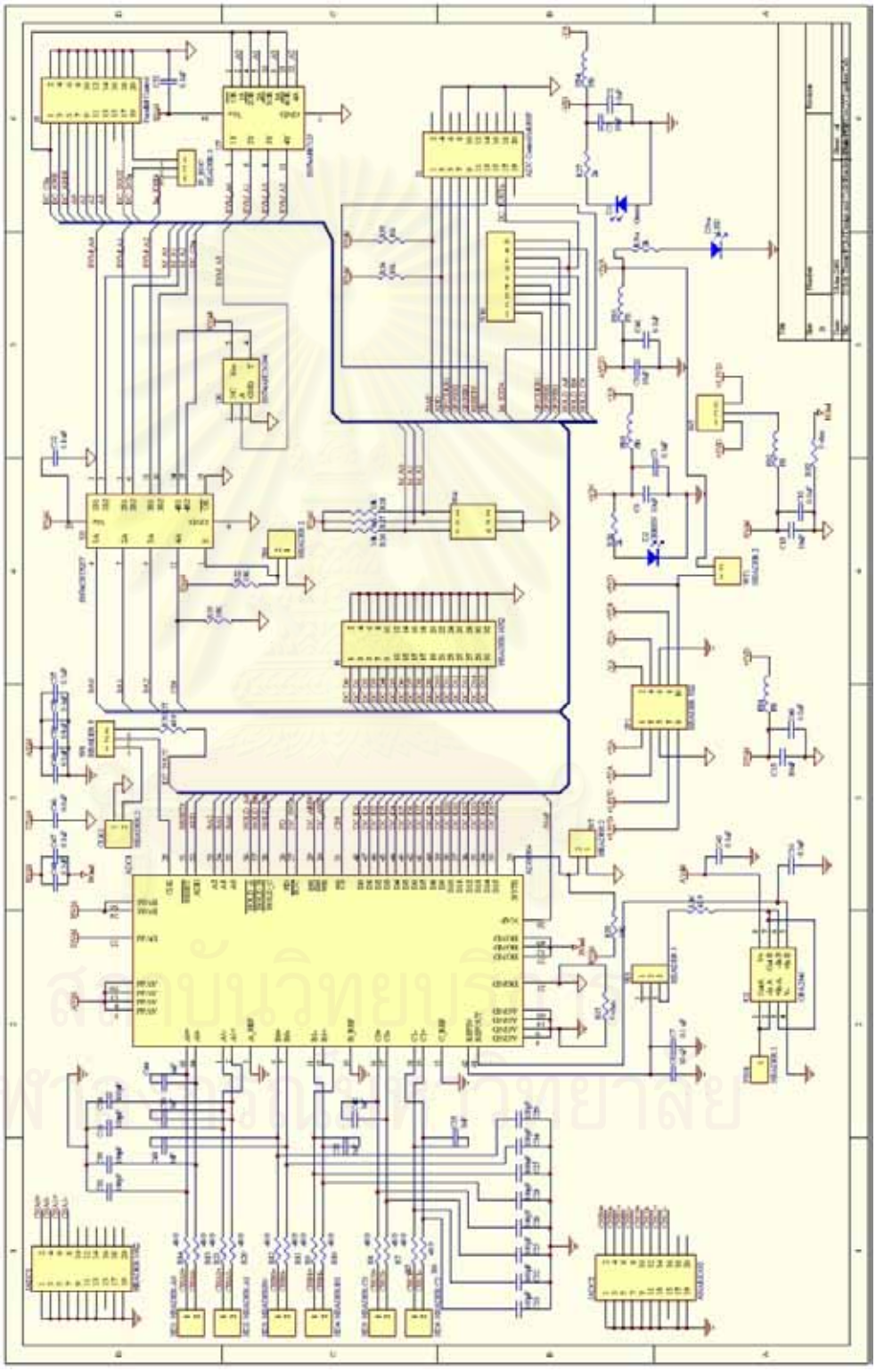
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

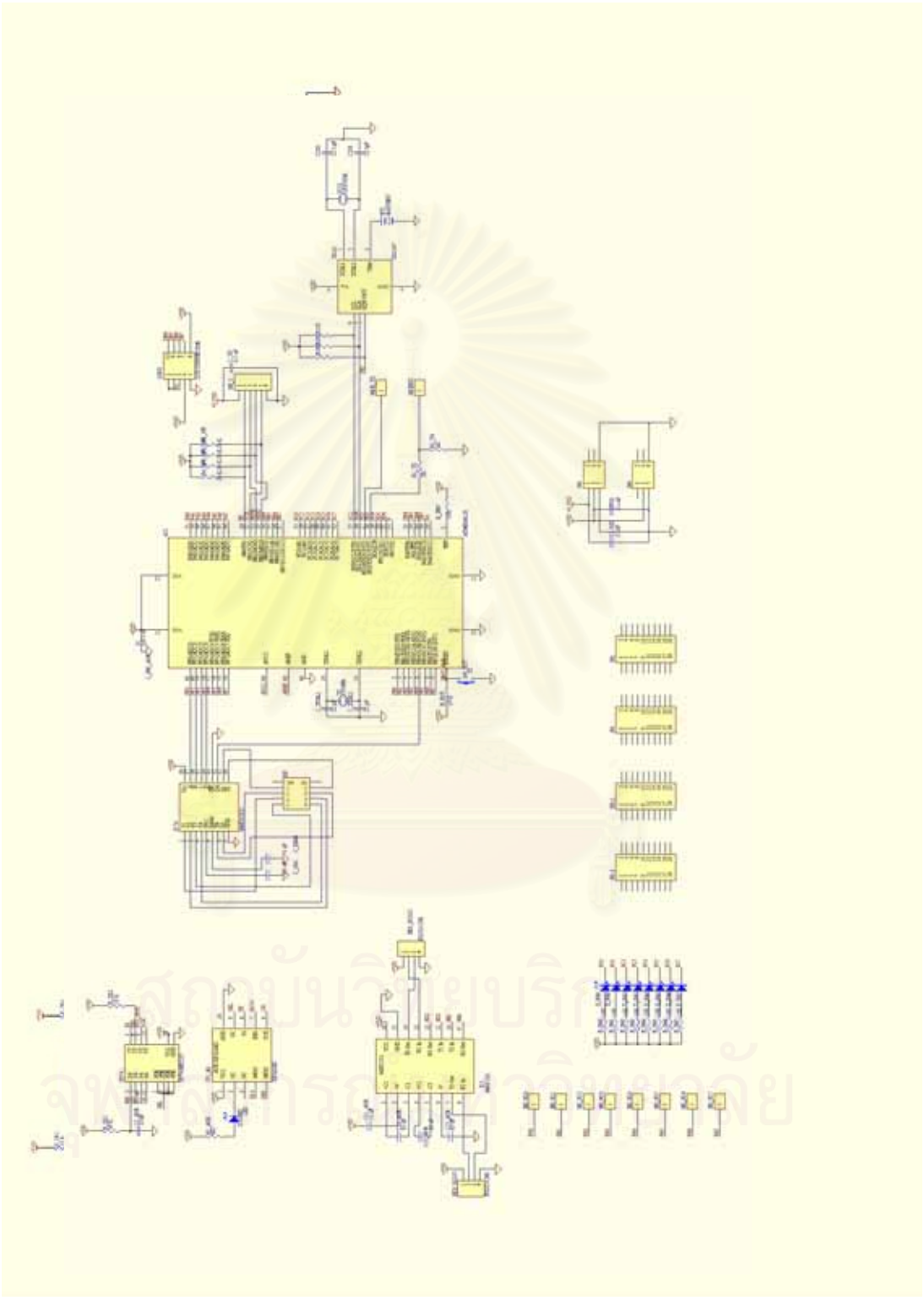
ภาคผนวก ก

รูปวงจรซึ่งออกแบบสำหรับงานวิจัยนี้

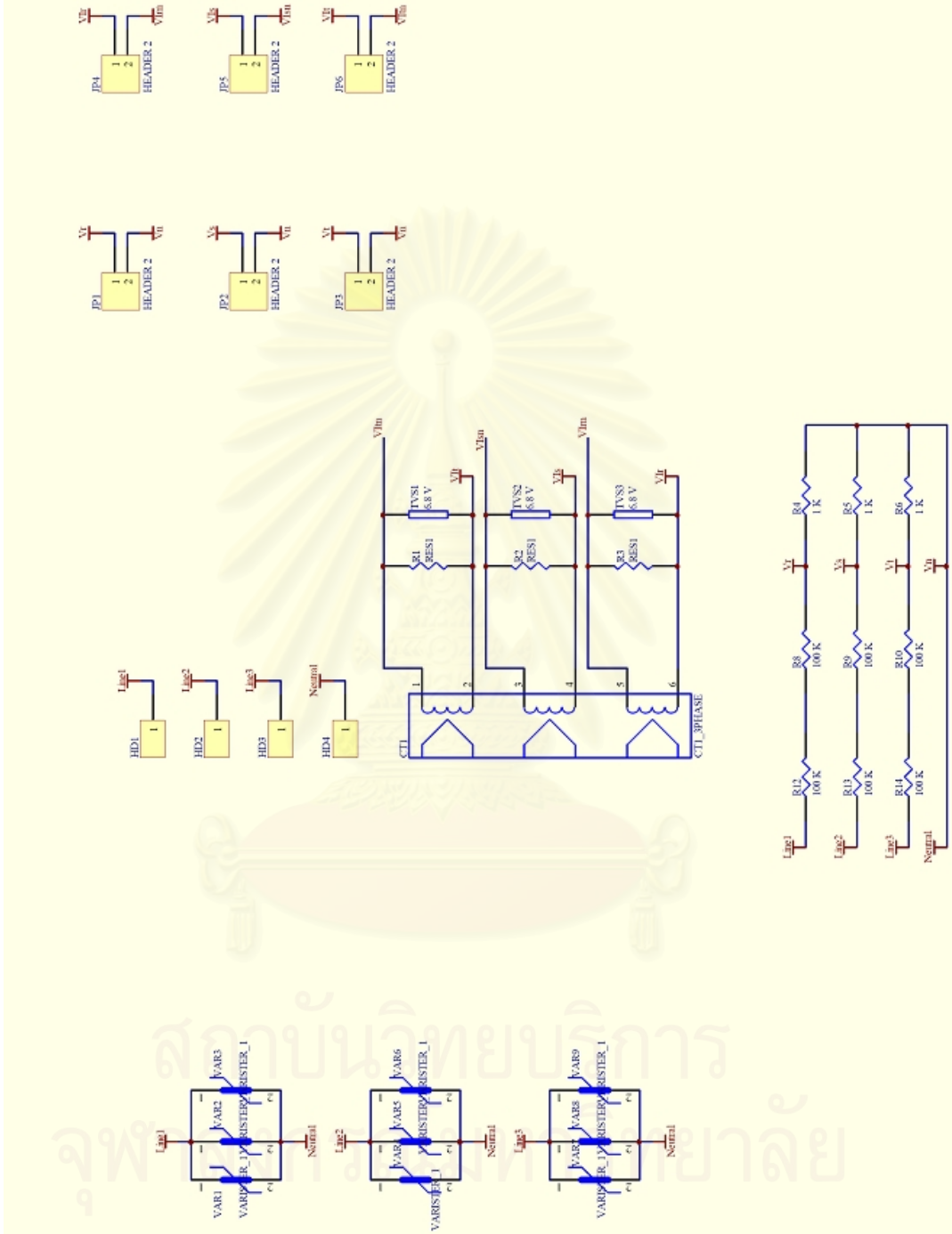
วงจรบอร์ดชิพแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิตอล ADS8364



วงจรบอร์ด ATMEGA128



วงจรบอร์ดปรับขนาดสัญญาณ



ภาคผนวก ข

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การพัฒนาต้นแบบเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าโดยใช้ชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล TMS302C6713

Development of a Power Quality Meter Prototype base on TMS320C6713 Digital Signal Processor

สกลพงษ์ บุรฉะวิทย์ และ เกริก ลีลารัศมี
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330
โทร 0-2218-6488 โทรสาร 0-2218-6488 E-mail: Sakonpong@hotmail.com, Ekachai.L@chula.ac.th

บทคัดย่อ

เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า เป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการเก็บข้อมูลและลักษณะของปัญหาคุณภาพไฟฟ้าซึ่งมีอยู่หลายช่วงเวลาตามมาตรฐาน IEEE 1159-1995 [1] บทความนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาต้นแบบเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าโดยใช้ชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล TMS320C6713 ซึ่งมีจุดเด่นคือเป็นชิพประมวลผลแบบ floating point ประมวลผลที่สัญญาณนาฬิกาความถี่ 225 MHz สำหรับวัดวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าของสัญญาณที่รุ่มเข้ามาจากระบบไฟฟ้าโดยใช้ชิพแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอล ADS8364 มีช่องสัญญาณ 6 ช่อง ความละเอียด 16 บิต มีอัตราชักค่าสัญญาณที่ 250 kSPS ทำงานพร้อมกัน ในส่วนการทดลองใช้ชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอลนี้ จะดูผลการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าจากชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอลโดยใช้โปรแกรม Matlab GUI เชื่อมต่อกับบอร์ด TMS320C6713 DSK ผ่าน Realtime Data Exchange

คำสำคัญ: เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า, การประยุกต์ชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล

Abstract

Power Quality Meter is an important tool for logging power quality problem data that has variety of occurring time as describe in IEEE 1159-1995 standards [1]. In this paper we will present the development of power quality meter base on TMS320C6713 floating point digital signal processor that runs at 225 MHz clock frequency. The data acquisition part use an ADS8364 analog to digital converter that has 16 bit resolution and 6 independent input channels that can simultaneously be sampled at 250 kSPS. The demonstration of using this digital signal processor to analyze power quality will use Matlab GUI program connects with TMS320C6713 DSK via RTDX (Realtime Data Exchange).

Keywords: Power Quality Meter, Power Quality Instrument, Digital Signal Processing Application

1. บทนำ

คุณภาพไฟฟ้า (Power Quality) ตามมาตรฐาน IEC และ IEEE คือคุณลักษณะของกระแส แรงดัน และความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าในสภาวะปกติ ที่ไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานผิดพลาดหรือเกิดการเสียหาย และอาจหมายถึง คำต่างๆที่ระบุว่าแรงดัน กระแส และความถี่ของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า มีความคลาดเคลื่อนจากค่าปกติ ทั้งขนาดและรูปร่างมากน้อยเพียงใด โดยจะเห็นได้ว่าตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 1980 คุณภาพไฟฟ้านับเป็นประเด็นที่มีความสำคัญมากขึ้นเรื่อยๆ สาเหตุ [2] มาจาก

- การนำอุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลง (Sensitive Load) หรือโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Load) มาใช้มากขึ้น โดยเฉพาะโหลดใหม่ๆที่เกิดขึ้นมา มีการนำไมโครโปรเซสเซอร์มาใช้ในการควบคุม และมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นส่วนประกอบอยู่มาก เช่น อุปกรณ์ที่ถูกควบคุมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์, Programmable Logic Controller (PLC)
- ระบบไฟฟ้าในปัจจุบันมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีการเชื่อมต่อกันเป็นเครือข่าย (Network) ถ้าส่วนใดส่วนหนึ่งของระบบมีปัญหาคุณภาพไฟฟ้า อาจส่งผลถึงจุดอื่นๆ

การแก้ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสมนั้น ขึ้นอยู่กับ *การได้ข้อมูลที่มีความสำคัญ* (Meaningful data) ในบริเวณที่*เหมาะสม* และ*ช่วงเวลาที่เหมาะสม* (Expedient time frame) ดังนั้น ***เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า*** จึงเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญมากในการเก็บข้อมูลและบอกลักษณะของปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า

เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า เป็นเครื่องมือที่ใช้เก็บข้อมูลและบอกลักษณะของปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งมีอยู่หลายประเภทและถูกสร้างขึ้นตามปัญหาคุณภาพไฟฟ้า การใช้งานแต่ละประเภทขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์หรือปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โครงสร้างโดยทั่วไปของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนคือ

1. ส่วนเก็บสัญญาณ (Data Acquisition)

PE-41

2. ส่วนประมวลผลและเก็บบันทึก

รูปที่ 1. โครงสร้างโดยทั่วไปของเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า

2.2 การวิเคราะห์ความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ [6]

ความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Distortion) คือการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นทางไฟฟ้า (Power Waveform) ไปจากรูปคลื่นสัญญาณไซน์ (Sine Wave) เกิดจากการรวมกันของค่าความถี่หลักมูล (Fundamental) และฮาร์โมนิกส์อื่นๆ โดยมีอัลกอลิธึมในการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องดังนี้

2.2.1 อัลกอริธึมที่ใช้วิเคราะห์ความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์

การวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณไฟฟ้าที่สุ่มเข้ามา ซึ่งเป็นสัญญาณที่อ้างอิงบนโดเมนเวลา $f[n]$ จะต้องเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณที่อ้างอิงบนโดเมนความถี่โดยใช้อัลกอริธึม DFT (Discrete Fourier Transform) ดังสมการ (1) และเขียนในรูปสมการเมตริกซ์ดังสมการ (2) และ (3) ซึ่งใช้การคูณทั้งหมด 2^N ครั้ง

$$C_k = \frac{2}{N}\sum_{n=0}^{N} f[n]e^{\frac{-j2\pi kn}{n}} = \frac{2}{N}\sum_{n=0}^{N} f[n]W^{kn} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ C_{N-1} \end{bmatrix} = \frac{2}{N}\begin{bmatrix} W^{(0,0)} & W^{(0,1)} & \cdots & 1 \\ W^{(1,0)} & W^{(1,1)} & \cdots & W^{(1,(N-1))} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ W^{((N-1),0)} & W^{((N-1),1)} & \cdots & W^{((N-1),(N-1))} \end{bmatrix}_{N\times N} \begin{bmatrix} f[0] \\ f[1] \\ \cdot \\ \cdot \\ f[N-1] \end{bmatrix}_{N\times 1} \quad (2)$$

$$[C_{N\times 1}] = \frac{2}{N}[W_{N\times N}][f_{N\times 1}] \quad (3)$$

ถ้ากระจายเมตริกซ์ $[W_N] = [W_1]\cdot[W_2]\cdot\ldots\cdot[W_L]$ โดยที่ $L = \log_2 N$ และ [W1], [W2], ..., [WL] เป็นในเมตริกซ์ที่มีเทอมไม่เป็นศูนย์อยู่สองตัวในแต่ละแถว จะทำให้การคำนวณสมการ (3) เร็วขึ้นกว่าเดิม โดยใช้การคูณ $\frac{N}{2}\log N$ ครั้งซึ่งเรียกอัลกอริธึมนี้ว่า FFT (Fast Fourier Transform) โดยอัลกอริธึมนี้มีอยู่หลายวิธีเช่น FFT Radix-2, FFT-Radix-4 ซึ่งสามารถอ่านได้จาก [4, 6]

2.2.2 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับฮาร์โมนิกส์

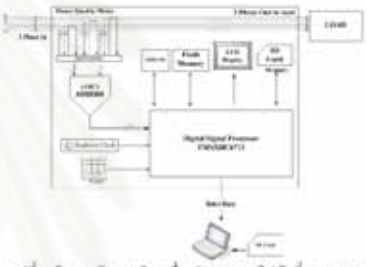
- ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์เฉพาะ (Individual Harmonic Distortion, IHD) คืออัตราส่วนระหว่างค่า RMS ของส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Component) ต่อค่า RMS ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล (Fundamental Component) เทียบเป็นร้อยละ

- ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวม (Total Harmonic Distortion, THD) คืออัตราส่วนระหว่างค่ารากที่สองของผลบวกกำลังสอง (Root-Sum-Square) ของค่า rms ของส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Component) กับค่า rms ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล (Fundamental Component) เทียบเป็นร้อยละดังแสดงในสมการ (4) และ (5)

$$\mathrm{THD}_{voltage} = \frac{\sqrt{(V_2^2 + V_3^2 + \ldots)}}{V_1} \quad (4)$$

$$\mathrm{THD}_{current} = \frac{\sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + \ldots)}}{I_1} \quad (5)$$

3. การออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า



รูปที่ 2. โครงสร้างภายในเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่ออกแบบ

ต้นแบบเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่ออกแบบและสร้างขึ้นนั้น มีโครงสร้างภายในดังรูปที่ 2 สามารถแบ่งรายละเอียดออกเป็นส่วนฮาร์ดแวร์และซอฟแวร์ดังนี้

3.1 ส่วนประกอบฮาร์ดแวร์

เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าที่ออกแบบประกอบไปด้วยฮาร์ดแวร์ส่วนต่างๆดังนี้

- ชิพประมวลสัญญาณดิจิตอล (Digital Signal Processors) TMS320C6713 [4] ประมวลผลที่ความเร็ว 225 MHz. มีโครงสร้างหน่วยความจำภายในแบบ L1/L2 (4K-Byte L1P Program Cache, 4K-Byte L1D Data Cache, 256k-Byte L2 Memory), ช่องสัญญาณ แบบ Enhanced Direct-Memory Access (EDMA) 16 ช่องสัญญาณ เป็นชิพแบบ Floating Point ทำงานคำสั่งได้ถึง 1350 MFLOPS (million floating point operation per second), 18000 MIPS (million instructions per second), ไทม์เมอร์ 32 บิต 2 ชุด, พอร์ต I2C จำนวน 2 พอร์ต, พอร์ต McBSP (Multichannel Buffer Serial Port) 2 พอร์ต, โมดูล GPIO 16 ขา

- ชิพแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอล ADS8364 [5] เป็นชิพที่มีช่องสัญญาณ 6 ช่องสัญญาณทำงานพร้อมกันและเป็นอิสระต่อกัน ทำให้สามารถวิเคราะห์สัญญาณแรงดันและกระแสของระบบไฟฟ้า 3 เฟสได้, มีอัตราสุ่มสัญญาณ 250 kSPS ทำให้สามารถวิเคราะห์สารโมนิกส์ในสัญญาณได้ถึงอันดับที่ 50 และสามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดที่เกิดในช่วงความถี่ต่ำไม่เกิน 5 kHz ซึ่งมีระดับแรงดันอยู่ระหว่าง 0-4 pu. เวลาในการแปลงข้อมูลไปจนถึงการส่งข้อมูลต่อหนึ่งครั้งใช้เวลา 4 μ s การส่งข้อมูลเป็นแบบขนาน (Parallel Interface) ติดต่อกับชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอลผ่านทาง EMIF (External Memory Interface)

- หม้อแปลงกระแส ความแม่นยำ 0.1% กระแสพิกัด 10 A

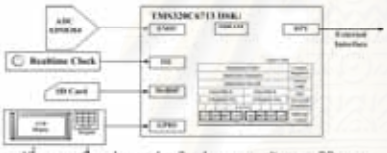
- บอร์ดปรับเครื่องไขสัญญาณ (Signal Conditioning Board) เป็นบอร์ดที่ต้องออกแบบขึ้นมาเพื่อปรับขนาดสัญญาณที่จะวัดให้เหมาะสม ก่อนส่งเข้าไปยังชิพแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอล

- สัญญาณนาฬิกาเวลาจริง-DS1307 เชื่อมต่อกับชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอลแบบ I2C

- หน่วยความจำรหัส SD Card เชื่อมต่อด้วย SPI Protocol ผ่านทาง McBSP (Multichannel Buffer Serial Port) ของชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล

- จอ LCD

การเชื่อมต่อระหว่างชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอลกับอุปกรณ์อื่นๆโดยสรุปแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3. การเชื่อมต่อระหว่าง ชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล TMS320C6713 กับอุปกรณ์อื่น ในเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า

รูปที่ 4. บอร์ด TMS320C6713 DSK และ บอร์ด ADS8364 ที่สร้างขึ้น

3.2 รายละเอียดส่วนซอฟแวร์

ลักษณะในรูปที่ 5 ซอฟแวร์ที่โปรแกรมลงภายในชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล TMS320C6713 จะควบคุมการทำงานในส่วนต่างๆดังนี้

1. รับสัญญาณเวลา (Time Stamp) จากเรียลไทม์คล็อกโมดูล

2. รับสัญญาณดิจิตอลแรงดันและกระแสที่วัด จากชิพแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล ADS8364

3. คำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆทางคุณภาพไฟฟ้า

4. ส่งข้อมูลที่คำนวณได้หลังจากคำนวณได้ไปบันทึกยัง SD Card และส่งสัญญาณคำสั่งและข้อมูลเพื่อแสดงผลข้อมูลบนจอ LCD

5. ส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์

รูปที่ 5. ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมภายในชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล TMS320C613

พารามิเตอร์ที่จะทำการวัดและแสดงผลจะแบ่งได้เป็นสองส่วนคือ

1. ส่วนที่อยู่บนตัวเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า เป็นข้อมูลที่สามารถแสดง ผลการวิเคราะห์ออกมาเป็นตัวเลข ประกอบไปด้วยข้อมูลแรงดัน, กระแส, RMS, ตัวประกอบกำลัง, กำลังจริง, กำลังเสมือน, กำลังปรากฏ, พลังงาน, Flicker-P_{st}, P_{LT}, แรงดันและกระแส สารโมนิกส์, THD_F, THD_C

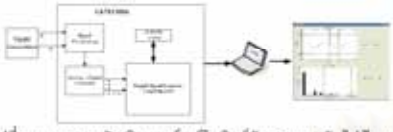
2. ส่วนที่อยู่บนคอมพิวเตอร์ เป็นส่วนที่แสดงผลข้อมูลออกมาเป็นรูปคลื่นแรงดันและกระแสที่บันทึกไว้ ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ GUI ที่เขียนขึ้น ดังนี้

4. การทดลองวิเคราะห์คุณภาพของสัญญาณ

4.1 การวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและการแสดงผลการวิเคราะห์สารโมนิกส์ด้วยโปรแกรม GUI

การทดสอบขั้นต้นของการออกแบบและสร้างต้นแบบเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า จะนำเสนอการใช้บอร์ดทดลองชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล วิเคราะห์ระดับสารโมนิกส์ในสัญญาณแรงดันที่สร้างขึ้นจากเครื่องกำเนิดสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งมีระดับสารโมนิกส์ที่รู้ค่าแน่นอน โดยบอร์ดทดลองจะส่งข้อมูลที่วิเคราะห์ได้ไปยังโปรแกรม GUI

ที่เขียนขึ้นบนโปรแกรม Matlab ผ่านทาง RTDX (Realtime Data Exchange) [3] ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อกันระหว่างชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอลกับคอมพิวเตอร์ (PC Host) ผ่านทาง JTAG (Joint Test Action Group) เพื่อแสดงผลออกมา



รูปที่ 6. การทดลองวัด, วิเคราะห์สเปกตรัมสัญญาณแรงดันไฟฟ้า และส่งไปแสดงผลบนโปรแกรม Matlab GUI

รูปที่ 7. ผลการวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมในโปรแกรม Matlab GUI และ จากเครื่อง Fluke Scopemeter 199C

4.2 ตารางเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สเปกตรัม

ในส่วนนี้จะแสดงผลการเปรียบเทียบระดับสเปกตรัมที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวัด FLUKE 119C SCOPEMETER ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาระดับสเปกตรัมในสัญญาณ ออกมาได้ถึงสเปกตรัมลำดับที่ 13 กับเครื่องต้นแบบเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า

ลำดับสเปกตรัมที่	% จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ	% ที่วัดจาก FLUKE 199C	% ที่วัดจากต้นแบบเครื่องวัด
1	100	100	100
5	18.24	18.4	23.03
7	11.90	12.2	15.67
11	5.73	4.99	5.405
13	4.01	4.49	7.452
17	1.93	-	1.335
19	1.944	-	2.574

5. สรุป

จากปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่มีอยู่หลายช่วงเวลา และหลายสถานที่ เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าจำเป็นจะต้องมีความสามารถในการเก็บข้อมูล, และมีความยืดหยุ่นในการปรับปรุงฟังก์ชั่นสำหรับในการวิเคราะห์ ชิพประมวลผลสัญญาณดิจิตอล TMS320C6713 เป็นหน่วยประมวลผลหลักของเครื่องที่ออกแบบ โครงสร้างภายในของชิพสามารถปรับเปลี่ยนและเพิ่มฟังก์ชั่นการทำงาน เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าดังกล่าวได้อย่างดี และการใช้ชิพแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอล ADS8364 ซึ่งมีความละเอียด 16 บิตและมีอัตราชักค่าสัญญาณที่ 250 kSPS สามารถแปลงสัญญาณได้ 6 ช่องสัญญาณพร้อมกัน จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า 3 เฟสได้และครอบคลุมช่วงปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] IEEE Std 1159-1995, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality".

[2] Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H" Wayne Beaty, "Electrical Power Systems Quality Second Edition", McGraw Hill, pp. 1-42. 2004.

[3] Ralph Chassaing, "Wiley Digital Signal Processing and Applications with the C6713 and C6416 DSK", Wiley-Interscience, pp. 302-321, pp. 208-247. 2005.

[4] TMS320C6713 Floating-Point Digital Signal Processor, [online]. Available from: http://www.ti.com, [2001, December].

[5] ADS8364 Analog to Digital Converters, [online], Available from: http://www.ti.com, [2002, June].

[6] Jos Arrillaga, Neville R. Watson, "Power System Harmonics Second Edition", John Wiley & Sons, pp. 17-38. 2003.

สกลพงษ์ บุวพะวิทย์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สนใจงานวิจัยด้านการออกแบบระบบสมองกลฝังตัว

เอกชัย ลีลารัศมี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2517 ในปี พ.ศ. 2519 ถึง พ.ศ. 2525 ได้รับทุนอานันทมหิดล เพื่อไปศึกษาต่อในระดับปริญญาโท และเอก ณ University of California at Berkeley ประเทศสหรัฐอเมริกา ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย งานวิจัยที่สนใจคือ โปรแกรมจำลองการทำงานของวงจรไฟฟ้า, การสังเคราะห์เสียงภาษาไทย, ระบบคำบรรยายในเครื่องโทรทัศน์ และการออกแบบวงจรรวม

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสกลพงษ์ บูรณะวิทย์ เกิดวันที่ 15 ตุลาคม พ.ศ.2530 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2550

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย