การตรวจประเมินระดับฮาร์มอนิกเพื่อการต่อโหลดเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง

นายทวีชัย สกุลกิจไพบูลย์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

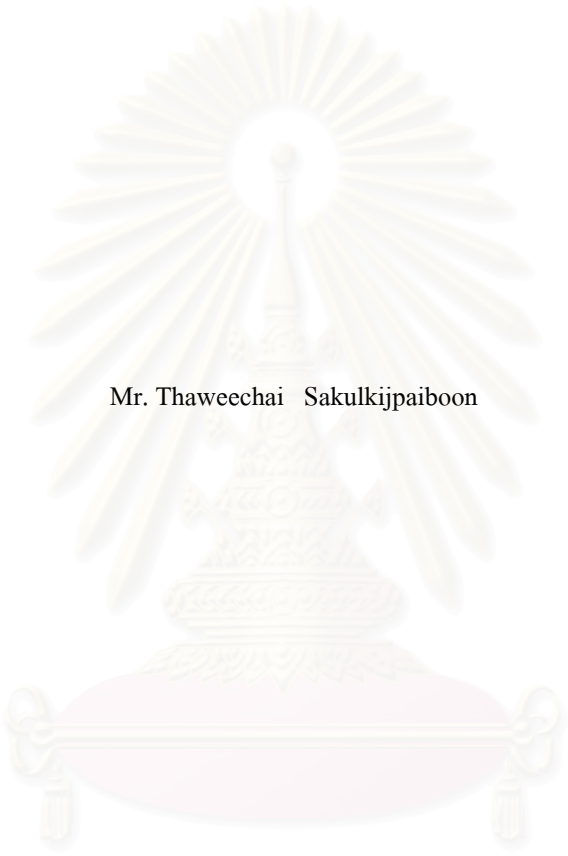
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1129-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE ASSESSMENT OF HARMONIC LEVEL FOR CONNECTION OF LOADS TO ELECTRIC POWER SYSTEMS

Mr. Thaweechai Sakulkijpaiboon



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-53-1129-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตรวจประเมินระดับฮาร์มอนิกเพื่อการต่อโหลดเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง
โดย	นายทวีชัย สกุลกิจไพบูลย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ไชยะ แช่มช้อย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

…….. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…… ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

……... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ไชยะ แช่มช้อย)

……กรรมการ
(อาจารย์ ดร.โสตถิพงศ์ พิชัยสวัสดิ์)

……กรรมการ
(นายพงษ์ศักดิ์ หาญบุญญานนท์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทวีชัย สกุลกิจไพบูลย์ : การตรวจประเมินระดับฮาร์มอนิกเพื่อการต่อโหลดเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง. (THE ASSESSMENT OF HARMONIC LEVEL FOR CONNECTION OF LOADS TO ELECTRIC POWER SYSTEMS) อ. ที่ปรึกษา : อ.ไชยะ แช่มช้อย, 130 หน้า. ISBN 974-53-1129-4.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นการตรวจประเมินระดับฮาร์มอนิกเพื่อการต่อโหลดเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังตามมาตรฐาน ENGINEERING RECOMMENDATION G 5/4 โดยแบ่งการประเมินเป็น 3 ขั้นตอน คือ ก) ขั้นตอนที่ 1 – ใช้ประเมินกับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันต่ำ, ข) ขั้นตอนที่ 2 – ใช้ประเมินกับผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีโหลดมากขึ้นที่จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันต่ำที่ไม่ผ่านการประเมินในขั้นตอนที่ 1 หรือใช้ประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันกลางต่ำกว่า 33 กิโลโวลต์, ค) ขั้นตอนที่ 3 – ใช้ประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันกลางหรือสูงกว่า ซึ่งทำการวิเคราะห์ผลโดยใช้แบบจำลองอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ที่เปลี่ยนค่าตามความถี่ฮาร์มอนิก ทั้งนี้ในการวิเคราะห์คำนึงถึงความสมดุลระหว่างระดับของรายละเอียดที่ต้องใช้ในการประเมินแต่ละขั้นตอนกับระดับความเสี่ยงที่จะเกิดแรงดันฮาร์มอนิกเกินขีดจำกัดที่ยอมรับได้อันเนื่องมาจากการเชื่อมต่อของผู้ใช้ไฟฟ้านั้น ผู้ใช้ไฟฟ้าต้องผ่านการประเมินในขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่ง จึงจะได้รับอนุญาตให้เชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าได้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้พัฒนาโปรแกรมเพื่อช่วยในการประเมิน เพื่อความรวดเร็วและแม่นยำในการประเมิน โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมานี้ สามารถใช้ประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าตามมาตรฐาน G 5/4 ได้ทั้ง 3 ขั้นตอน นอกจากนั้นยังมีส่วนของการแก้ปัญหาเบื้องต้นสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อเข้ากับระบบแรงดันต่ำที่ไม่ผ่านการประเมินในขั้นตอนที่ 2 ด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต _____

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ปีการศึกษา 2547

4570331821 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: ER G 5/4 / HARMONIC ASSESSMENT / PLANNING LEVEL / HARMONIC DISTORTION / THREE STAGE ASSESSMENT / HARMONIC

THAWEECHAI SAKULKIJPAIBOON : THE ASSESSMENT OF HARMONIC LEVEL FOR CONNECTION OF LOADS TO ELECTRIC POWER SYSTEMS. THESIS ADVISOR : CHAIYA CHAMCHOY, 130 pp. ISBN 974-53-1129-4.

This thesis empasizes on the assessment of harmonic level for connection of customer loads to electric power systems based on ENGINEERING RECOMMENDATION G5/4. The three stages assessment procedure comprising i) stage 1- low voltage connected equipment, ii) stage 2 – larger low voltage equipment not meeting stage 1 or medium voltage equipment connected at to less than 33 kV, and iii) stage 3 – equipment connected at medium voltage or higher where a full harmonic impedance model must be used. The procedure is applied for non-linear equipments considering the information required by the assessment process and the risk of connection. Consumers are allowed to connect to the system if only if its assessment results passes all the required stages. For the accuracy and speed of assessment, the assessment software has been developed. The developed software can assess consumers based on the G 5/4 standard. In addition, it can solve problems for low voltage connection which does not pass the second stage assessment.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Electrical engineering Student's signature _____

Field of study Electrical engineering Advisor's signature _____

Academic year 2004

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณา และความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ ไชยะ แช่มช้อย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิทยานิพนธ์ ตลอดจนชี้ให้เห็นข้อบกพร่องและแนวทางแก้ไข ต่าง ๆ นับตั้งแต่เริ่มต้นทำวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหาจนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนั้น ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ (ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์) คุณพงษ์ศักดิ์ หาญบุญญานนท์ (กรรมการ) และอาจารย์ดร.โสตถิพงศ์ พิชัยสวัสดิ์ (กรรมการ) ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไข และให้คำแนะนำ ในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา -มารดา และขอบคุณพี่ชายและน้องสาว ที่ได้ให้กำลังใจเสมอมา ตลอดจนเพื่อน ๆ พี่ น้อง ทุก ๆ คนที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

นโม ตสฺส ภควโต อรหโต สมฺมา สมฺพุทฺธสฺส
นโม ตสฺส ภควโต อรหโต สมฺมา สมฺพุทฺธสฺส
นโม ตสฺส ภควโต อรหโต สมฺมา สมฺพุทฺธสฺส
สถาบันวิทยบริการ
พุทธ์ สรณ์ คจฺฉามิ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ธมฺม์ สรณ์ คจฺฉามิ
สงฺฆ์ สรณ์ คจฺฉามิ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญภาพ ..... ฐ

บทที่

1. บทนำ 1
   - 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
   - 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
   - 1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2
   - 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
   - 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย 2
   - 1.6 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย 3
2. มาตรฐาน G 5/4 4
   - 2.1 วัตถุประสงค์ของมาตรฐาน G 5/4 4
   - 2.2 จุดเด่นของมาตรฐาน G 5/4 4
   - 2.3 การอยู่ร่วมกันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า 5
   - 2.4 ขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิก 6
     - 2.4.1 ขีดจำกัดระดับวางแผน 6
     - 2.4.2 ขีดจำกัดการอยู่ร่วมกันได้ 9
3. กระบวนการและขั้นตอนในการตรวจประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับการอนุญาตให้เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า 11
   - 3.1 การประเมินขั้นตอนที่1
     - 3.1.1 หลักพื้นฐาน 11
     - 3.1.2 โหลดไม่เป็นเชิงเส้นรวมหรือค่าพิกัดของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นมีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 16 แอมแปร์ต่อเฟส 11

บทที่ หน้า

3.1.3 โหลดไม่เป็นเชิงเส้นรวมหรือค่าพิกัดของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นมีขนาดมากกว่า 16 แอมแปร์ต่อเฟส 12
3.1.3.1 เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าหรือตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับ 12
3.1.3.1.ก อุปกรณ์ 1 เฟส 12
3.1.3.1.ข อุปกรณ์ 3 เฟส 12
3.1.3.2 โหลดไม่เป็นเชิงเส้นรวมหรือโหลดอื่นๆ 13
3.2 การประเมินขั้นตอนที่2 15
3.2.1 หลักพื้นฐาน 15
3.2.2 จุดต่อร่วมมีแรงดันฮาร์มอนิกเดิมน้อยกว่า 75 % ของขีดจำกัดแรงดันระดับวางแผน 15
3.2.2.1 โหลดประเภทเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าหรือตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส 15
3.2.2.2 การเชื่อมต่อเข้ากับระบบที่มีระดับความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกต่ำ(น้อยกว่า 75 % V_{plan}) 15
3.2.3 จุดต่อร่วมมีแรงดันฮาร์มอนิกเดิมมากกว่า 75 % ของขีดจำกัดแรงดันระดับวางแผน 17
3.2.3.1 กระบวนการในการประเมิน 17
3.2.3.2 การคำนวณความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกเนื่องมาจากกลุ่มโหลด (V_{hc}) 17
3.2.3.3 การคำนวณค่าพยากรณ์ความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก (V_{hp}) 19
3.2.3.4 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกในขั้นตอนที่ 2 19
3.3 การประเมินขั้นตอนที่3 20
3.3.1 หลักการทั่วไป 20
3.3.2 กระบวนการในการประเมิน 20
3.3.3 การคาดหมายความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น 21
3.3.3.1 การคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกเนื่องจากกลุ่มโหลดไม่เป็นเชิงเส้น 21
3.3.3.2 การรวมกันระหว่างแรงดันฮาร์มอนิกที่วัดได้(V_{hm}) และที่คำนวณได้(V_{hc}) 21
3.3.3.3 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกในขั้นตอนที่ 3 22
3.3.4 การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก 22

บทที่ หน้า

3.3.4.1 หลักการเบื้องต้น 22
3.3.4.2 แบบจำลองของอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก 24
3.3.4.2.1 โครงข่ายของระบบจ่ายไฟจากการไฟฟ้าที่ผู้ใช้ไฟฟ้าจะเชื่อมต่อ 24
3.3.4.2.2 หม้อแปลง 25
3.3.4.2.3 สายเคเบิล สายส่งจ่ายย่อย 26
3.3.4.2.4 โหลดแบบเชิงเส้น 26
3.3.4.2.5 คาปาซิเตอร์ของชุดปรับปรุงตัวประกอบกำลัง 27
3.3.4.2.6 เครื่องจักรกลไฟฟ้า 28
3.3.4.2.7 ชุดกรองฮาร์มอนิก 28
3.3.4.2.7.1 ตัวกรองฮาร์มอนิกปรับคลื่นเดี่ยว(Single Tuned Filter) ... 29
3.3.4.2.7.2 ตัวกรองผ่านสูง (High Pass Filter) 30
3.3.4.2.8 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก 31
3.4 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องในการประเมิน 31
3.4.1 มาตรฐาน IEC 61000 – 3 – 2 31
3.4.2 มาตรฐาน IEC 61000 – 3 – 4 34
3.5 การวัดแรงดันฮาร์มอนิก 36
4. การพัฒนาโปรแกรม 38
4.1 ส่วนข้อมูลที่ใช้ในการประเมิน 38
4.1.1 หน้าต่างมาตรฐาน G5/4 38
4.1.2 หน้าต่างมาตรฐาน IEC 61000-3-2 41
4.1.3 หน้าต่างมาตรฐาน IEC 61000-3-4 44
4.1.4 หน้าต่างข้อมูลรายละเอียดของอุปกรณ์ 47
4.2 ส่วนการประเมิน 48
4.2.1 ส่วนป้อนข้อมูลในขั้นตอนที่ 1 48
4.2.2 ส่วนป้อนข้อมูลในขั้นตอนที่ 2 53
4.2.3 ส่วนป้อนข้อมูลในขั้นตอนที่ 3 57
4.2.4 ส่วนป้อนข้อมูลในส่วนแก้ปัญหาสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันต่ำ 59

บทที่ หน้า

4.2.5 ส่วนแสดงผลตรวจสอบอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-4 61
4.2.6 ส่วนแสดงผลตรวจสอบกระแสฮาร์มอนิกรวมเทียบกับมาตรฐาน G5/4 62
4.2.7 ส่วนแสดงผลตรวจสอบแรงดันฮาร์มอนิกเทียบกับมาตรฐาน G 5/4 ในขั้นตอนที่ 2 62
4.2.8 ส่วนแสดงผลในการประเมินขั้นตอนที่ 3 63
4.2.9 ส่วนแสดงผลในการแก้ปัญหาสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันต่ำ 64
4.3 ส่วนรายงาน 65
5. การประเมินระดับฮาร์มอนิกเพื่อการต่อโหลดเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง 70
5.1 การเชื่อมต่อเข้ากับระบบแรงดันต่ำ (ตัวอย่างที่ 1) 70
5.2 การเชื่อมต่อเข้ากับระบบแรงดันต่ำ (ตัวอย่างที่ 2) 71
5.3 การเชื่อมต่อเข้ากับระบบแรงดันต่ำ (ตัวอย่างที่ 3) 74
5.4 การเชื่อมต่อเข้ากับระบบแรงดันกลาง (ตัวอย่างที่ 4) 75
5.5 การเชื่อมต่อเข้ากับระบบแรงดันกลาง (ตัวอย่างที่ 5) 76
5.6 การเชื่อมต่อเข้ากับระบบแรงดันกลาง (ตัวอย่างที่ 6) 78
5.7 การเชื่อมต่อเข้ากับระบบแรงดันสูง (ตัวอย่างที่ 7) 81
5.8 การเชื่อมต่อเข้ากับระบบแรงดันต่ำ (ตัวอย่างที่ 8) 84
6. สรุปและข้อเสนอแนะ 87
6.1 สรุปผลการวิจัย 87
6.2 ข้อเสนอแนะ 88
รายการอ้างอิง 89
ภาคผนวก 91
ภาคผนวก ก. ขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกที่ใช้ในการประเมินตามมาตรฐาน G 5/4 92
ภาคผนวก ข. ผลการประเมิน 96
ภาคผนวก ค. ตัวอย่างรายงานผลการประเมิน 118
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 130

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ค่าความผิดเพี้ยนรวม (THD) ของแรงดันฮาร์มอนิกที่ระดับแรงดันต่างๆ	6
2.2	เปรียบเทียบขีดจำกัดระดับวางแผนระหว่าง G 5/4 และ IEEE 519	6
2.3	ขีดจำกัดระดับวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงต่ำ (400 V)	7
2.4	ขีดจำกัดระดับวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงกลาง (6.6, 11, 20 kV)	7
2.5	ขีดจำกัดระดับวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงสูง (>20 และ < 145 kV)	8
2.6	ขีดจำกัดระดับวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงสูง (275 และ 400 kV)	8
2.7	ขีดจำกัดการอยู่ร่วมกันได้ของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงต่ำ (400 V)	9
2.8	ขีดจำกัดการอยู่ร่วมกันได้ของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงกลาง ($\leq$ 36.5 kV)	9
2.9	ขีดจำกัดการอยู่ร่วมกันได้ของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงสูง (> 66 และ < 132 kV)	10
2.10	ขีดจำกัดการอยู่ร่วมกันได้ของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงสูง (275 และ 400 kV)	10
3.1	ขีดจำกัดขนาดโหลดรวมของเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าและตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับ (สำหรับขั้นตอนที่1)	12
3.2	ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิก(แอมแปร์ต่อเฟส)จากระบบของผู้ใช้ไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (สำหรับขั้นตอนที่1)	13
3.3	ขีดจำกัดขนาดโหลดรวมของเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าและตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 3 เฟสที่อนุญาตให้เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าได้ (สำหรับขั้นตอนที่ 2)	15
3.4	พิกัดฟอลต์ ณ ระดับแรงดันต่างๆ	15
3.5	ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิก(แอมแปร์ต่อเฟส)จากระบบของผู้ใช้ไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (สำหรับขั้นตอนที่2)	16
3.6	ค่าของตัวชดเชยผลของ Low-order Parallel Resonance (k)	18
3.7	ค่าตัวประกอบการบวก(summation factor)	18
3.8	ขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมในขั้นตอนที่ 2	19

ตาราง หน้า

3.9 ขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ Class A 32
3.10 ขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ Class C (P > 25 W) 32
3.11 ขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ Class D (Class C : P $\leq$ 25 W) 33
3.12 ขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ ในขั้นตอนที่ 1 ($S_{equ} \leq S_{SC} / 33$) 35
3.13 ขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ ในขั้นตอนที่ 2 สำหรับโหลด1เฟส โหลดอินเตอร์เฟส และโหลดสามเฟสไม่สมดุล 35
3.14 ขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ ในขั้นตอนที่ 2 สำหรับโหลด สามเฟสสมดุล 36
5.1 รายละเอียดของอุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 1 70
5.2 ผลการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 1 71
5.3 รายละเอียดของอุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 2 72
5.4 รายละเอียดของอุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 3 73
5.5 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิม ณ จุดต่อร่วมสำหรับตัวอย่างที่ 3 74
5.6 รายละเอียดของอุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 4 75
5.7 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิม ณ จุดต่อร่วมสำหรับตัวอย่างที่ 5 76
5.8 รายละเอียดของอุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 5 77
5.9 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิม ณ จุดต่อร่วมสำหรับตัวอย่างที่ 6 78
5.10 รายละเอียดของอุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 6 79
5.11 ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับระบบตัวอย่างที่ 6 80
5.12 ผลการประเมินสำหรับระบบตัวอย่างที่ 6 81
5.13 ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับระบบตัวอย่างที่ 7 82
5.14 ข้อมูลโหลดไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับระบบตัวอย่างที่ 7 82
5.15 ข้อมูลแรงดันฮาร์มอนิกที่วัดได้ ณ จุดต่อร่วมสำหรับระบบตัวอย่างที่ 7 83
5.16 ผลการประเมินสำหรับระบบตัวอย่างที่ 7 83
5.17 ข้อมูลโหลดไม่เป็นเชิงเส้นของผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 8 84
5.18 แรงดันฮาร์มอนิกที่วัดได้ ณ จุดต่อร่วมสำหรับตัวอย่างที่ 8 85
5.19 ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับระบบตัวอย่างที่ 8 86
5.20 ผลการประเมินสำหรับระบบตัวอย่างที่ 8 86

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ		หน้า
2.1	การอยู่ร่วมกันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า	5
3.1	แผนผังแสดงขั้นตอนวิธีการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า	14
3.2	Harmonic Impedance – diagrammatically	17
3.3	ระบบโรงงานอุตสาหกรรมตัวอย่าง 4 บัส	22
3.4	วงจรสมมูลของระบบโรงงานอุตสาหกรรมตัวอย่าง 4 บัส	23
3.5	แบบจำลองตัวกรองฮาร์มอนิกปรับคลื่นเดี่ยว	29
3.6	แบบจำลองตัวกรองผ่านสูง	30
3.7	แผนภูมิในการแบ่งกลุ่มอุปกรณ์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 61000 - 3 - 2	33
3.8	ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดแรงดันฮาร์มอนิก	37
4.1	หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน G 5/4 ส่วนขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิก	39
4.2	หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน G 5/4 ส่วนขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิก	39
4.3	หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน G 5/4 ส่วนขนาดของอุปกรณ์ประเภทเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าและตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับ	40
4.4	หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน G 5/4 ส่วนค่า k-factor	40
4.5	หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน IEC 61000-3-2 ส่วนขีดจำกัด Class A	41
4.6	หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน IEC 61000-3-2 ส่วนขีดจำกัด Class B	42
4.7	หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน IEC 61000-3-2 ส่วนขีดจำกัด Class C	42
4.8	หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน IEC 61000-3-2 ส่วนขีดจำกัด Class D	43
4.9	หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน IEC 61000-3-2 ส่วนรายละเอียดอุปกรณ์ในแต่ละกลุ่ม	43
4.10	หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน IEC 61000-3-2 ส่วนการคำนวณ	44
4.11	หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน IEC 61000-3-4 ส่วนขีดจำกัดขั้นตอนที่ 1	45
4.12	หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน IEC 61000-3-4 ส่วนขีดจำกัดขั้นตอนที่ 2	45
4.13	หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน IEC 61000-3-4 ส่วนขีดจำกัดขั้นตอนที่ 2 (ต่อ)	46
4.14	หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน IEC 61000-3-4 ส่วนรายละเอียด	46
4.15	หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน IEC 61000-3-4 ส่วนการคำนวณ	47
4.16	หน้าต่างข้อมูลรายละเอียดอุปกรณ์	47
4.17	แผนภูมิแสดงส่วนป้อนข้อมูลทั้งหมด	48
4.18	แผนภูมิแสดงการทำงานในขั้นตอนที่ 1	49
4.19	หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินขั้นตอนที่ 1 กรณีโหลดรวมน้อยกว่า 16 แอมแปร์	50

ภาพประกอบ หน้า

4.20 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินขั้นตอนที่ 1 กรณีโหลดรวมมากกว่า 16 แอมแปร์ โดยโหลดเป็นเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าหรือตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับ1 เฟส 50
4.21 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินขั้นตอนที่ 1 กรณีโหลดรวมมากกว่า 16 แอมแปร์ โดยโหลดเป็นเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าหรือตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับ3 เฟส 51
4.22 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินขั้นตอนที่ 1 กรณีโหลดรวมมากกว่า 16 แอมแปร์ โดยโหลดเป็นเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าหรือตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับ1 เฟส และ 3 เฟสผสมกัน 51
4.23 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินขั้นตอนที่ 1 กรณีโหลดรวมมากกว่า 16 แอมแปร์ โดยโหลดเป็นโหลดประเภทอื่นๆ 52
4.24 ตัวเลือกอันดับฮาร์มอนิก 52
4.25 ส่วนนำเข้า ส่งข้อมูล โดยเก็บเป็นไฟล์ 52
4.26 หน้าต่างแสดงรายละเอียดของการป้อนข้อมูล 53
4.27 แผนภูมิแสดงการทำงานในขั้นตอนที่ 2 54
4.28 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินขั้นตอนที่ 2 กรณีโหลดเป็นเครื่องแปลงผัน กำลังไฟฟ้าหรือตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 55
4.29 ก หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินขั้นตอนที่ 2 กรณีโหลดอื่นๆ 55
4.29 ข หน้าต่างแสดงรายละเอียดการป้อนข้อมูล 56
4.30 หน้าต่างรับข้อมูลแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิมในระบบ(Vhm) 56
4.31 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินขั้นตอนที่ 2 ในกรณีไม่ผ่านการประเมินขั้นตอนที่ 1 56
4.32 แผนภูมิแสดงการทำงานในขั้นตอนที่ 3 57
4.33 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินขั้นตอนที่ 3 (หน้าหลัก) 58
4.34 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินขั้นตอนที่ 3 ใส่รายละเอียดระบบ 58
4.35 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินขั้นตอนที่ 3 ใส่รายละเอียดอุปกรณ์ 59
4.36 แผนภูมิแสดงการทำงานในส่วนการแก้ปัญหาสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันต่ำ 59
4.37 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินในส่วนการแก้ปัญหาสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันต่ำ(หน้าหลัก) 60
4.38 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินในส่วนการแก้ปัญหาสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันต่ำ ใส่ข้อมูลระบบ 60

ภาพประกอบ หน้า

4.39 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินในส่วนการแก้ปัญหาสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันต่ำ ใส่ข้อมูลโหลด 61
4.40 หน้าต่างแสดงผลตรวจสอบอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-4 61
4.41 หน้าต่างแสดงผลตรวจสอบกระแสฮาร์มอนิกรวมเทียบกับมาตรฐาน G5/4 62
4.42 หน้าต่างแสดงผลตรวจสอบแรงดันฮาร์มอนิกเทียบกับมาตรฐาน G5/4 สำหรับโหลดที่ต่อกับระบบแรงดันต่ำ 62
4.43 หน้าต่างแสดงผลตรวจสอบแรงดันฮาร์มอนิกเทียบกับมาตรฐาน G5/4 สำหรับโหลดที่ไม่ได้ต่อกับระบบแรงดันต่ำ 63
4.44 หน้าต่างแสดงผลการประเมินในขั้นตอนที่ 3 63
4.45 หน้าต่างแสดงผลการประเมินในขั้นตอนที่ 3 หน้าหลัก 64
4.46 หน้าต่างแสดงผลการประเมินในส่วนการแก้ปัญหาสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันต่ำ 64
4.47 หน้าต่างแสดงผลการประเมินในส่วนการแก้ปัญหาสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันต่ำ หน้าหลัก 65
4.48 หน้าแสดงรายละเอียดของผู้ใช้ไฟฟ้า 66
4.49 หน้าแสดงรายละเอียดในการผ่านการประเมิน..... 66
4.50 หน้าแสดงกราฟแรงดันฮาร์มอนิก 67
4.51 หน้าแสดง Single line diagram 67
4.52 หน้าแสดงรายละเอียดของระบบ หม้อแปลง สายส่ง 68
4.53 หน้าแสดงรายละเอียดโหลดของผู้ใช้ไฟฟ้า 68
4.54 หน้าแสดงรายละเอียดโหลดของผู้ใช้ไฟฟ้า(ต่อ) 69
5.1 ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 6 80
5.2 ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 7 81
5.3 ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 8 85

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาทางด้านคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality) เป็นปัญหาหนึ่งในระบบไฟฟ้ากำลัง ที่มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบันและส่งผลเสียต่อระบบไฟฟ้ากำลังโดยรวมเช่น สร้างความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า ลดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ ลดประสิทธิภาพในการทำงานของอุปกรณ์ เพิ่มกำลังไฟฟ้าสูญเสียในอุปกรณ์และระบบไฟฟ้า ทำให้อุปกรณ์ควบคุมและป้องกันในระบบไฟฟ้าทำงานผิดพลาด สร้างสัญญาณรบกวนต่อระบบไฟฟ้าสื่อสาร ฯลฯ หากไม่มีการควบคุมคุณภาพไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมก็จะส่งผลเสียหายต่อเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศ

ฮาร์มอนิกเป็นปัญหาทางด้านคุณภาพไฟฟ้าปัญหาหนึ่ง ที่กำลังทวีความรุนแรงมากขึ้นเรื่อยๆในระบบไฟฟ้า แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกมิใช่จำกัดอยู่เพียงเค่อุปกรณ์ที่ใช้กระแสไฟฟ้ามาก เช่น เตาหลอม เท่านั้น แต่ยังรวมถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกกำลังที่ใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า ตัวเรียงกระแส ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ เป็นต้น รวมถึงอุปกรณ์อำนวยความสะดวก เครื่องใช้ในสำนักงานอีกด้วย เมื่ออุปกรณ์เหล่านี้ทำงาน กระแสที่ไหลผ่านจะมีรูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ กล่าวคือมีความถี่อื่นที่ไม่ใช่ความถี่มูลฐานรวมอยู่ในรูปคลื่นปกติ เรียกว่าเกิดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก(Harmonic Distortion) ถ้ามีอุปกรณ์เหล่านี้ในระบบไฟฟ้ามาก ก็จะทำให้เกิดความผิดเพี้ยนมาก ทำให้คุณภาพไฟฟ้าลดลง

เพื่อไม่ให้ฮาร์มอนิกมีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ามากเกินไป จึงมีมาตรฐานที่มากำหนดให้ผู้ใช้ไฟฟ้าปล่อยฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบได้จำกัดค่าหนึ่งมาตรฐานนี้คือ มาตรฐาน G5/4 PLANNING LEVELS FOR HARMONIC VOLTAGE DISTORTION AND THE CONNECTION OF NON-LINEAR EQUIPMENT TO TRANSMISSION SYSTEM AND DISTRIBUTION NETWORK IN THE UNITED KINGDOM ออกบังคับใช้ในประเทศอังกฤษ เหตุที่ศึกษามาตรฐานนี้เพราะว่าการไฟฟ้าทั้งสามแห่งกำลังศึกษาและปรับเปลี่ยนมาตรฐานนี้ให้เหมาะสมกับประเทศไทย เพื่อประกาศใช้ต่อไปในอนาคต มาตรฐานนี้ใช้ในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหม่ที่จะเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า และผู้ใช้ไฟฟ้ารายเก่าที่จะเพิ่มอุปกรณ์ไฟฟ้าเข้าไป โดยจะประเมินว่าเมื่ออุปกรณ์เหล่านั้นเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแล้วจะสร้างฮาร์มอนิกออกมาเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้หรือไม่ ถ้าระดับฮาร์มอนิกไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ผ่านการประเมินสามารถเชื่อมต่อ

เข้ากับระบบไฟฟ้าได้ แต่ถ้าหากระดับฮาร์มอนิกเกินค่าที่กำหนดไว้ก็ไม่ผ่านการประเมินไม่สามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าได้หากไม่มีการแก้ไขปรับปรุงให้ระดับฮาร์มอนิกต่ำกว่าค่าที่กำหนดเอาไว้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1) เพื่อศึกษาหลักการและกระบวนการในการประเมินระดับฮาร์มอนิกเพื่อการต่อโหลดเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง
2) เพื่อพัฒนาโปรแกรมใช้ในการประเมินระดับฮาร์มอนิกเพื่อการต่อโหลดเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเฉพาะ harmonic เท่านั้น โดยไม่พิจารณา Sub harmonic, Inter harmonic, short bursts of harmonic voltage distortion และ voltage notching

การสร้างโปรแกรมเพื่อใช้ในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับการอนุญาตให้เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้านี้จะทำทั้งสามขั้นตอน โดยในขั้นตอนที่สามที่เป็นการวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิกนั้นแบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆ จะเป็นแบบจำลองอย่างง่าย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เครื่องมือช่วยหรือโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับการอนุญาตให้เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1) ศึกษาหลักการและกระบวนการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับการอนุญาตให้เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า
2) ศึกษามาตรฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ IEC 61000-2-2, IEC 61000-2-12, IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-4, IEEE 519
3) ศึกษาขั้นตอนและวิธีการเขียนโปรแกรม โดยใช้โปรแกรม Delphi 5
4) พัฒนาโปรแกรมเพื่อทำการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับการอนุญาตให้เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า
5) สรุปผลและเขียนวิทยานิพนธ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.6 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบทเป็นดังนี้

บทที่2 กล่าวถึงมาตรฐาน G5/4

บทที่3 อธิบายกระบวนการและขั้นตอนในการตรวจประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับการอนุญาตให้เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

บทที่4 การพัฒนาโปรแกรม

บทที่5 การประเมินระดับฮาร์มอนิกเพื่อการต่อโหลดเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง

บทที่6 สรุปและข้อเสนอแนะ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

มาตรฐาน G 5/4

ในอดีตนั้นได้ใช้มาตรฐาน G 5/3 [1] ในการควบคุมระดับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า และใช้มาตรฐาน BS 5406 [2] ในการควบคุมการแพร่กระแสฮาร์มอนิกจากอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดเล็กๆ ต่อมามีมาตรฐาน IEC-61000 [3] และมีการปรับปรุงพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ อีกทั้งข้อมูลต่างๆของระบบดีขึ้น มาตรฐานเดิมจึงไม่ทันสมัย จึงมีการปรับปรุงเป็นมาตรฐาน G 5/4 [4] ขึ้นมา ใช้ในการควบคุมระดับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า และใช้มาตรฐาน IEC-61000-3-2 [5], IEC-61000-3-4 [6], IEC-61000-3-12 [7] ในการควบคุมการแพร่กระแสฮาร์มอนิกจากอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดต่างๆ [8, 9]

2.1 วัตถุประสงค์ของมาตรฐาน G 5/4

มาตรฐาน G 5/4 ประกาศใช้ในประเทศอังกฤษเมื่อเดือนมีนาคม ค.ศ.2001 เพื่อใช้ประเมินค่าระดับความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกบนระบบไฟฟ้า เมื่อผู้ใช้ไฟฟ้ารายหนึ่งจะต่อระบบไฟฟ้าของตนเชื่อมกับระบบไฟฟ้ารวม และต้องแน่ใจว่าระบบไฟฟ้าของตนนั้นต้องไม่สร้างปัญหาเกี่ยวกับฮาร์มอนิกให้กับผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นๆที่ต่ออยู่ก่อนแล้ว

มาตรฐาน G 5/4 นี้ใช้กับผู้ใช้ไฟฟ้าทุกๆรายที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทที่อยู่อาศัย ธุรกิจ ร้านค้า สำนักงาน โรงงานอุตสาหกรรม [10] ผู้ใช้ไฟฟ้าในที่นี้รวมถึงผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหม่ที่จะเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า และผู้ใช้ไฟฟ้ารายเดิมที่จะเพิ่มอุปกรณ์ไฟฟ้าเข้าไปในระบบของตน

2.2 จุดเด่นของมาตรฐาน G 5/4

1) มาตรฐาน G 5/4 กำหนดขีดจำกัดระดับวางแผน(Planning level)สำหรับแรงดันฮาร์มอนิกและแนะนำขีดจำกัดการอยู่ร่วมกันได้สำหรับแรงดันฮาร์มอนิก และกำหนดค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของระบบไฟฟ้า ตั้งแต่ระดับแรงดัน 400 V ถึง 400 kV
2) ยังใช้การประเมินเป็น 3 ขั้นตอนแบบ G 5/3
3) ข้อมูลแบบจำลองฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์มีการปรับปรุงให้เหมาะสมกับสภาพระบบไฟฟ้ามากขึ้น
4) มีการใช้มาตรฐาน IEC 61000 เป็นต้นแบบแนวคิดในการกำหนดค่าขีดจำกัดระดับวางแผน

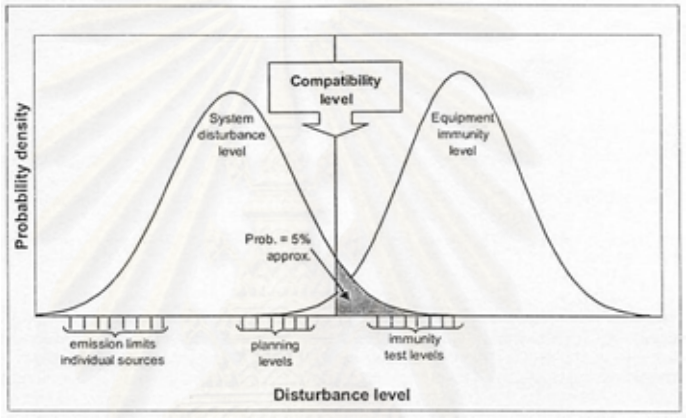
5) ประเมินความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมถึงฮาร์มอนิกอันดับที่ 50 (2500 Hz)

6) ระดับการแพร่ของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ลดลง

7) มีการใช้แผนภูมิภาพ(Flow chart) ช่วยผู้ใช้ในการประเมิน

2.3 การอยู่ร่วมกันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า [8]

การอยู่ร่วมกันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า(Electromagnetic Compatibility) คือการที่อุปกรณ์ไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าสามารถทำงานร่วมกันได้ แม้ว่าจะมีการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า(แบ่งเป็นเกิดจากการแผ่รังสี เช่น การรบกวนทางวิทยุ และเกิดจากการนำ เช่น ฮาร์มอนิก)เกิดขึ้นก็ตาม



รูปที่ 2.1 การอยู่ร่วมกันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงการอยู่ร่วมกันได้ทางไฟฟ้าแม่เหล็กนั้นจะมีปริมาณต่างๆที่เกี่ยวข้องดังนี้

- System disturbance level คือระดับสิ่งรบกวนภายในระบบ
- Equipment immunity level คือระดับความทนทานของอุปกรณ์
- Emission limit individual source คือสิ่งรบกวนที่สร้างมาจากอุปกรณ์แต่ละตัว
- Planning level คือระดับวางแผน
- Compatibility level คือระดับการอยู่ร่วมกันได้ของอุปกรณ์และระบบ
- Immunity test level คือระดับการทดสอบของอุปกรณ์

ฮาร์มอนิกซึ่งเป็นการรบกวนประเภทหนึ่งในระบบไฟฟ้า ถ้ามีฮาร์มอนิกมากเกินไปจะทำให้อุปกรณ์ที่ต่ออยู่ในบริเวณใกล้เคียงนั้นทำงานผิดพลาดจนไปถึงเกิดความเสียหายขึ้นมาได้ ข้อมูลขีดจำกัดระดับการอยู่ร่วมกันได้ของระบบมีการกำหนดไว้ในมาตรฐาน IEC 61000-2-2 [11] และ IEC 61000-2-12 [12] ส่วนข้อมูลขีดจำกัดระดับวางแผนนั้นมีการระบุไว้ใน มาตรฐาน G 5/4 จากรูปที่ 2.1 เห็นได้ว่าจะมีช่องว่าง(Margin) ระหว่างขีดจำกัดระดับวางแผนและขีดจำกัด

ระดับการอยู่ร่วมกันได้ ช่องว่างนี้มีไว้เพื่อป้องกันการเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์(Resonance) หรือโหลดเพิ่มขึ้นในอนาคต ดังมีข้อมูลแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าความผิดเพี้ยนรวม (THD_V) ของแรงดันฮาร์มอนิกที่ระดับแรงดันต่างๆ

Voltage Level	Compatibility Level	Planning Level	Margin
400 V	8 %	5 %	3 %
6.6 kV ถึง 20 kV	8 %	4 %	4 %
> 20 kV ถึง 36.5 kV	8 %	3 %	5 %
66 kV ถึง < 145 kV	5 %	3 %	2 %
275 kV และ 400 kV	3.5 %	3 %	0.5 %

2.4 ขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิก

มาตรฐาน G 5/4 ได้กำหนดค่าขีดจำกัดระดับวางแผนสำหรับแรงดันฮาร์มอนิกที่ระดับแรงดันไฟฟ้าระดับต่างๆ และใช้ค่าขีดจำกัดการอยู่ร่วมกันได้สำหรับแรงดันฮาร์มอนิก จาก IEC 61000-2-2 และ IEC 61000-2-12

2.4.1 ขีดจำกัดระดับวางแผน

เป็นขีดจำกัดที่วางแผนไว้ว่าโหลดรวมของระบบจะสร้างสิ่งรบกวน (ในที่นี้คือกระแสฮาร์มอนิก) ออกมาแล้วทำให้เกิดความผิดเพี้ยนในระบบได้ไม่เกินขีดจำกัดนี้ ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบขีดจำกัดระดับวางแผนระหว่าง มาตรฐาน G 5/4 และ มาตรฐาน IEEE 519 [13]

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบขีดจำกัดระดับวางแผนระหว่าง G 5/4 และ IEEE 519

Voltage Level	G5/4		IEEE 519	
	Indiv 5^{th}	THD	Indiv 5^{th}	THD
400 V	4.0 %	5.0 %	3.0 %	5.0 %
6.6 kV, 11 kV และ 20 kV	3.0 %	4.0 %	3.0 %	5.0 %
33 kV ถึง 69 kV	2.0 %	3.0 %	3.0 %	5.0 %
69 kV ถึง 161 kV	2.0 %	3.0 %	1.5 %	2.5 %
161 kV และ สูงกว่า	2.0 / 1.5 %	3.0 %	1.0 %	1.5 %

ตารางที่ 2.3-2.6 แสดงขีดจำกัดระดับวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละอันดับสำหรับระบบไฟฟ้าขนาดต่างๆ ตั้งแต่ระบบไฟฟ้าแรงต่ำไปจนถึงระบบไฟฟ้าแรงสูง

ตารางที่ 2.3 ขีดจำกัดระดับวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงต่ำ (400 V) [4]

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

ตารางที่ 2.4 ขีดจำกัดระดับวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงกลาง (6.6, 11, 20 kV) [4]

ฮาร์มอนิกอันดับคี่ ที่ไม่ใช่จำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกอันดับคี่ ที่เป็นจำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกอันดับคู่	
อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)	อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)	อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)
5	3.0	3	3.0	2	1.5
7	3.0	9	1.2	4	1.0
11	2.0	15	0.3	6	0.5
13	2.0	21	0.2	8	0.4
17	1.6	> 21	0.2	10	0.4
19	1.2			12	0.2
23	1.2			> 12	0.2
25	0.7				
> 25	0.2 + 0.2(25/h)				
ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (THD_V) = 4%					

ตารางที่ 2.5 ขีดจำกัดระดับวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงสูง (>20 และ < 145 kV) [4]

ฮาร์มอนิกอันดับคี่ ที่ไม่ใช่จำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกอันดับคี่ ที่เป็นจำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกอันดับคู่	
อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)	อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)	อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)
5	2.0	3	2.0	2	1.0
7	2.0	9	1.0	4	0.8
11	1.5	15	0.3	6	0.5
13	1.5	21	0.2	8	0.4
17	1.0	> 21	0.2	10	0.4
19	1.0			12	0.2
23	0.7			> 12	0.2
25	0.7				
> 25	0.2+0.5(25/h)				
ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (THD_V) = 3%					

ตารางที่ 2.6 ขีดจำกัดระดับวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงสูง (275 และ 400 kV) [4]

ฮาร์มอนิกอันดับคี่ ที่ไม่ใช่จำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกอันดับคี่ ที่เป็นจำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกอันดับคู่	
อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)	อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)	อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)
5	2.0	3	1.5	2	1.0
7	1.5	9	0.5	4	0.8
11	1.0	15	0.3	6	0.5
13	1.0	21	0.2	8	0.4
17	0.5	> 21	0.2	10	0.4
19	0.5			12	0.2
23	0.5			> 12	0.2
25	0.5				
> 25	0.2+0.3(25/h)				
ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (THD_V) = 3%					

2.4.2 ขีดจำกัดการอยู่ร่วมกันได้

ขีดจำกัดการอยู่ร่วมกันได้นี้เป็นขีดจำกัดสูงสุดที่อุปกรณ์ต่างๆ สามารถทำงานได้แม้ว่าจะมีสิ่งรบกวนอยู่ในระบบ จากตารางที่ 2.1 นั้นเห็นได้ว่าระหว่างขีดจำกัดระดับวางแผนและขีดจำกัดการอยู่ร่วมกันได้นั้นมีขอบ(margin)อยู่เล็กน้อยตั้งแต่ 0.5 – 5 % ขอบนี้มีไว้เผื่อให้โหลดที่อาจสร้างสิ่งรบกวนออกมาเกินกว่าขีดจำกัดระดับวางแผนอันเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆ อย่างไรก็ตามก็ยังไม่เกินขีดจำกัดการอยู่ร่วมกัน

ตารางที่ 2.7 ขีดจำกัดการอยู่ร่วมกันได้ของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงต่ำ (400 V) [4]

ฮาร์มอนิกอันดับคี่ ที่ไม่ใช่จำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกอันดับคี่ ที่เป็นจำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกอันดับคู่	
อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)	อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)	อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)
5	6.0	3	5.0	2	2.0
7	5.0	9	1.5	4	1.0
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3.0	21	0.2	8	0.5
17	2.0	21-45	0.2	10	0.5
19 - 49	2.27(17/h) – 0.27			10-50	0.25(10/h) + 0.25
ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (THD_V) = 8%					

ตารางที่ 2.8 ขีดจำกัดการอยู่ร่วมกันได้ของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงกลาง ($\leq$ 36.5 kV) [4]

ฮาร์มอนิกอันดับคี่ ที่ไม่ใช่จำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกอันดับคี่ ที่เป็นจำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกอันดับคู่	
อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)	อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)	อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)
5	6.0	3	5.0	2	2.0
7	5.0	9	1.5	4	1.0
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3.0	21	0.3	8	0.5
17	2.0	21-45	0.2	10	0.5
19 - 49	2.27(17/h) – 0.27			10-50	0.25(10/h) + 0.25
ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (THD_V) = 8%					

ตารางที่ 2.7 - 2.10 แสดงขีดจำกัดการอยู่ร่วมกันได้ของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าขนาดต่างๆ ตั้งแต่ระบบไฟฟ้าแรงต่ำไปจนถึงระบบไฟฟ้าแรงสูง

ตารางที่ 2.9 ขีดจำกัดการอยู่ร่วมกันได้ของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงสูง (> 66 และ < 132 kV) [4]

ฮาร์มอนิกอันดับคี่ ที่ไม่ใช่จำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกอันดับคี่ ที่เป็นจำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกอันดับคู่	
อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)	อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)	อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)
5	4.0	3	2.0	2	1.0
7	2.0	9	1.0	4	0.8
11	1.5	15	0.3	6	0.5
13	1.5	21	0.2	8	0.4
17	1.0	> 21	0.2	10	0.4
19	1.0			12	0.2
23	0.7			> 12	0.2
25	0.7				
> 25	0.2+0.5(25/h)				
ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (THD_V) = 5%					

ตารางที่ 2.10 ขีดจำกัดการอยู่ร่วมกันได้ของแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงสูง (275 และ 400 kV) [4]

ฮาร์มอนิกอันดับคี่ ที่ไม่ใช่จำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกอันดับคี่ ที่เป็นจำนวนเท่าของ 3		ฮาร์มอนิกอันดับคู่	
อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)	อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)	อันดับ	แรงดันฮาร์มอนิก (%)
5	3.0	3	1.7	2	1.0
7	1.5	9	0.5	4	0.8
11	1.0	15	0.3	6	0.5
13	1.0	21	0.2	8	0.4
17	0.5	> 21	0.2	10	0.4
19	0.5			12	0.2
23	0.5			> 12	0.2
25	0.5				
> 25	0.2+0.3(25/h)				
ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (THD_V) = 3.5%					

บทที่ 3

กระบวนการและขั้นตอนในการตรวจประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับการอนุญาตให้เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า

การประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าแบ่งวิธีการประเมินออกเป็น 3 ขั้นตอน วัตถุประสงค์ในการแบ่งการประเมินออกเป็นขั้นตอนนั้นก็เพื่อความสมดุลระหว่างระดับของรายละเอียดที่ต้องใช้ในการประเมินแต่ละขั้นตอนกับระดับความเสี่ยงที่จะเกิดแรงดันฮาร์มอนิกเกินขีดจำกัดที่ยอมรับได้อันเนื่องการเชื่อมต่อของผู้ใช้ไฟฟ้า [14]

การประเมินจะเริ่มพิจารณาจากทีละขั้นตอน หากผู้ใช้ไฟฟ้าไม่ผ่านการประเมินในขั้นตอนใดหรือไม่เข้าข่ายที่จะประเมินในขั้นตอนนั้นได้ ก็ให้ไปประเมินในขั้นตอนถัดไป ผู้ใช้ไฟฟ้าจะเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าได้จะต้องผ่านการประเมินในขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่ง

- **ขั้นตอนที่ 1** ใช้ประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าที่ต่อโหลดกับระบบไฟฟ้าแรงต่ำ
- **ขั้นตอนที่ 2** ใช้ประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าที่ต่อโหลดขนาดใหญ่กับระบบไฟฟ้าแรงต่ำที่ไม่ผ่านในขั้นตอนที่ 1 หรือผู้ใช้ไฟฟ้าที่ต่อโหลดกับระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง(< 33 kV)
- **ขั้นตอนที่ 3** ใช้ประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าที่ต่อโหลดแรงดันปานกลางหรือสูงกว่า

3.1 การประเมินขั้นตอนที่1

3.1.1 หลักพื้นฐาน

การประเมินในขั้นตอนที่ 1 นั้นใช้ประเมินกับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงต่ำ 230/400 V ,อุปกรณ์กำเนิดพลังงานไฟฟ้า และกลุ่มโหลดไฟฟ้าแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ต่ออยู่กับเครือข่ายระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ

ผู้ใช้ไฟฟ้าจะได้รับอนุญาตให้เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่อผ่านการประเมินในขั้นใดขั้นหนึ่งระหว่างเงื่อนไขใน 3.1.2 หรือ 3.1.3

ถ้าไม่ผ่านการประเมินในขั้นตอนที่ 1 หรือว่ามีความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันในระบบสูงอยู่แล้ว ต้องประเมินต่อไปในขั้นตอนที่ 2

3.1.2 โหลดไม่เป็นเชิงเส้นรวมหรือค่าพิกัดของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นมีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 16 แอมแปร์ต่อเฟส

อุปกรณ์ไฟฟ้า(อุปกรณ์ตัวเดียว)ที่มีพิกัดกระแสน้อยกว่าหรือเท่ากับ 16 แอมแปร์ต่อเฟส ถ้าผ่านมาตรฐาน IEC 61000-3-2 สามารถเชื่อมต่อกับระบบได้ โดยไม่ต้องประเมินในขั้นตอนถัดไป สำหรับกลุ่มโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่กระแสรวมกันแล้วน้อยกว่าหรือเท่ากับ 16 แอมแปร์ต่อเฟส

โหลดแต่ละตัวนั้นต้องผ่านมาตรฐาน IEC 61000-3-2 จึงจะสามารถเชื่อมต่อกับระบบได้ โดยไม่ต้องประเมินในขั้นตอนถัดไป

อุปกรณ์ไฟฟ้า(อุปกรณ์ตัวเดียว) 1 เฟสหรือ 3 เฟสประเภทเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า (Convertor), ตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Regulator) หรือเครื่องชาร์ตแบตเตอรี่อาจสามารถเชื่อมต่อกับระบบได้ โดยไม่ต้องประเมินในขั้นตอนถัดไป ถ้าอุปกรณ์เหล่านั้นถูกออกแบบมาโดยไม่มีการแพร่ของฮาร์มอนิกอันดับคู่

เมื่อมีการใช้โหลด 1 เฟสในระบบไฟฟ้าที่เป็นระบบ 3 เฟส ควรทำการแบ่งโหลดให้เฉลี่ยเท่าๆกันทั้ง 3 เฟส เพื่อให้ฮาร์มอนิกลำดับบวก(positive sequence)และลำดับลบ(negative sequence)มีโอกาศหักล้างกันเอง

3.1.3 โหลดไม่เป็นเชิงเส้นรวมหรือค่าพิกัดของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นมีขนาดมากกว่า 16 แอมแปร์ต่อเฟส

โหลดไม่เป็นเชิงเส้น(อุปกรณ์เดี่ยว)ถ้าผ่านมาตรฐาน IEC 61000-3-4 สามารถเชื่อมต่อกับระบบได้ โดยไม่ต้องประเมินในขั้นตอนถัดไป

3.1.3.1 เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าหรือตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับ

3.1.3.1.ก อุปกรณ์ 1 เฟส

เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าหรือตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ถ้าถูกออกแบบโดยไม่มีการแพร่ของฮาร์มอนิกอันดับคู่ สามารถเชื่อมต่อกับระบบได้ โดยไม่ต้องประเมินในขั้นตอนถัดไป ถ้าโหลดรวมมีขนาดไม่เกิน 5 kVA

3.1.3.1.ข อุปกรณ์ 3 เฟส

เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าหรือตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส สามารถเชื่อมต่อกับระบบได้ โดยไม่ต้องประเมินในขั้นตอนถัดไป ถ้าโหลดรวมมีขนาดไม่เกินค่าในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ขีดจำกัดขนาดโหลดรวมของเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าและตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับ (สำหรับขั้นตอนที่1) [4]

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (PCC)	เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าชนิด 3 เฟส		ตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 3 เฟส
	6 pulse (kVA)	12 pulse (kVA)	6 pulse thyristor (kVA)
400 V	12	50	14

3.1.3.2 โหลดไม่เป็นเชิงเส้นรวมหรือโหลดอื่นๆ

กลุ่มโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่มีขนาดกระแสรวมมากกว่า 16 แอมแปร์ต่อเฟสต้องสร้างกระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับออกมาไม่เกินค่าในตารางที่ 3.2 สำหรับอุปกรณ์เดี่ยวที่มีขนาดกระแสเกิน 16 แอมแปร์ต่อเฟสที่ไม่ผ่านมาตรฐาน IEC 61000-3-4 สามารถเชื่อมต่อกับระบบได้ ถ้าสร้างกระแสฮาร์มอนิกออกมาไม่เกินค่าในตารางที่ 3.2

ค่ากระแสในตารางที่ 3.2 นี้ต้องปรับปรุงแก้ค่าถ้าระดับฟอลต์ที่จุดต่อร่วมไม่เท่ากับค่าพิกัดฟอลต์ในตารางที่ 3.4 โดยทำการปรับค่าแบบเชิงเส้น

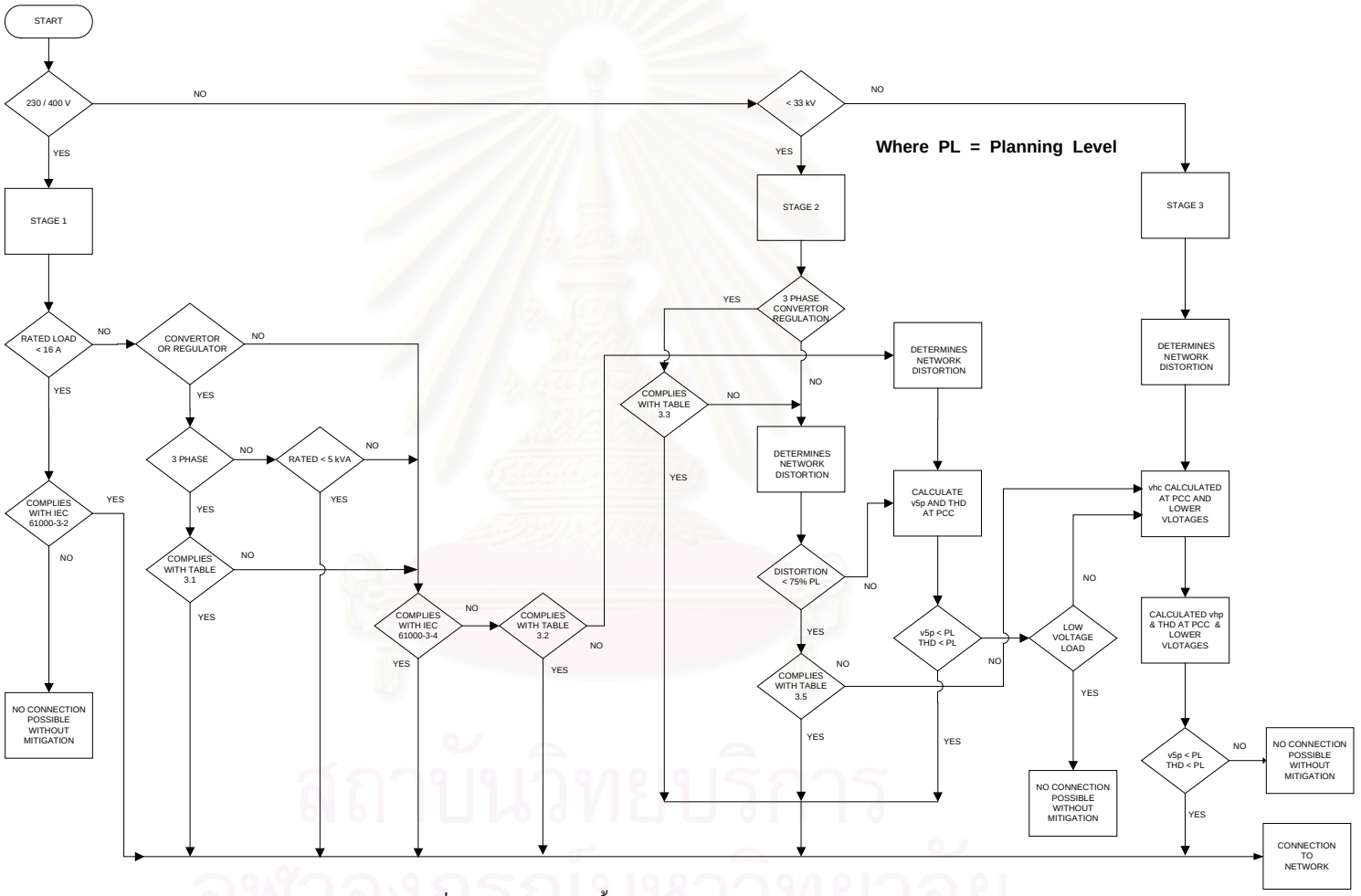
ตารางที่ 3.2 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิก (แอมแปร์ต่อเฟส) จากระบบของผู้ใช้ไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (สำหรับขั้นตอนที่1)

อันดับ	Ih (A.)	อันดับ	Ih (A.)	อันดับ	Ih (A.)	อันดับ	Ih (A.)
2	28.9	15	1.4	28	1.0	41	1.8
3	48.1	16	1.8	29	3.1	42	0.3
4	9.0	17	13.6	30	0.5	43	1.6
5	28.9	18	0.8	31	2.8	44	0.7
6	3.0	19	9.1	32	0.9	45	0.3
7	41.2	20	1.4	33	0.4	46	0.6
8	7.2	21	0.7	34	0.8	47	1.4
9	9.6	22	1.3	35	2.3	48	0.3
10	5.8	23	7.5	36	0.4	49	1.3
11	39.4	24	0.6	37	2.1	50	0.6
12	1.2	25	4.0	38	0.8		
13	27.8	26	1.1	39	0.4		
14	2.1	27	0.5	40	0.7		

หมายเหตุ - สำหรับฮาร์มอนิกที่อันดับต่ำกว่าหรือเท่ากับ 19 ยกเว้นอันดับที่ 3 และ 5 ให้มีได้ 2 อันดับที่สามารถเกินค่าในตารางได้ 10 % หรือ 0.5 แอมแปร์แล้วแต่ว่าค่าใดมากกว่ากัน

- สำหรับฮาร์มอนิกที่อันดับมากกว่า 19 ให้มีได้ 4 อันดับที่สามารถเกินค่าในตารางได้ 10 % หรือ 0.1 แอมแปร์แล้วแต่ว่าค่าใดมากกว่ากัน

- ที่มาของค่ากระแสในตารางสามารถดูได้ที่ภาคผนวก ก.



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนวิธีการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า [4]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 การประเมินขั้นตอนที่ 2

3.2.1 หลักพื้นฐาน

การประเมินขั้นตอนที่ 2 ใช้ประเมิน ผู้ใช้ไฟฟ้าที่ไม่ผ่านการประเมินขั้นตอนที่ 1 หรือผู้ใช้ไฟฟ้าที่ต่อกับระบบแรงดันน้อยกว่า 33kV.

3.2.2 จุดต่อร่วมมีแรงดันฮาร์มอนิกเดิมน้อยกว่า 75 % ของขีดจำกัดแรงดันระดับวางแผน

3.2.2.1 โหลดประเภทเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าหรือตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส

เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าหรือตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส สามารถเชื่อมต่อกับระบบได้ โดยไม่ต้องประเมินในขั้นตอนถัดไปถ้าโหลดรวมมีขนาดไม่เกินค่าในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ขีดจำกัดขนาดโหลดรวมของเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าและตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 3 เฟสที่อนุญาตให้เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าได้ (สำหรับขั้นตอนที่ 2) [4]

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (PCC)	เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าชนิด 3 เฟส		ตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 3 เฟส
	6 pulse (kVA)	12 pulse (kVA)	6 pulse thyristor (kVA)
6.6, 11, 20 และ 22 kV	130	250	150

3.2.2.2 การเชื่อมต่อเข้ากับระบบที่มีระดับความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกต่ำ(น้อยกว่า 75 % V_{plan})

เมื่อมีค่าระดับความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันน้อยกว่า 75 % ของขีดจำกัดแรงดันระดับวางแผน ผู้ใช้ไฟฟ้าสามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบได้ ถ้าโหลดรวมทั้งหมดสร้างกระแสฮาร์มอนิกออกมาแต่ละอันดับมีค่าไม่เกินในตารางที่ 3.5 (เมื่อทำการปรับแก้ค่าในตารางให้เหมาะกับระดับพิกัดฟอลต์ ณ จุดต่อร่วมแล้ว)

ตารางที่ 3.4 พิกัดฟอลต์ ณ ระดับแรงดันต่างๆ [4]

ระดับแรงดัน (kV)	พิกัดฟอลต์ (MVA)
0.4	10
6.6	60
11	100
20	182
22	200

ค่าพิกัดฟอลต์ในตารางที่ 3.4 ใช้ในการคำนวณหาค่าขีดจำกัดกระแสในตารางที่ 3.2 และ 3.5 (วิธีคิดดูได้ที่ภาคผนวก ก.) ถ้าพิกัดฟอลต์ ณ จุดต่อร่วมไม่เท่ากับค่าในตารางที่ 3.4 ต้องทำการปรับแก้ค่าด้วย เช่น พิกัดฟอลต์ ณ จุดต่อร่วม 8 MVA ที่ระดับแรงดัน 400 V เอาตัวปรับแก้ 0.8 (8/10) คูณกับค่ากระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับก่อนที่จะนำไปประเมิน

ตารางที่ 3.5 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิก(แอมแปร์ต่อเฟส)จากระบบของผู้ใช้ไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (สำหรับขั้นตอนที่2) [4]

อันดับ	6.6, 11 และ 20 kV	22 kV	อันดับ	6.6, 11 และ 20 kV	22 kV	อันดับ	6.6, 11 และ 20 kV	22 kV	อันดับ	6.6, 11 และ 20 kV	22 kV
2	4.9	3.3	15	0.3	0.3	28	0.2	0.2	41	0.4	0.4
3	6.6	4.4	16	0.4	0.4	29	0.8	0.8	42	0.1	0.1
4	1.6	1.6	17	3.3	2.0	30	0.1	0.1	43	0.4	0.4
5	3.9	2.6	18	0.2	0.3	31	0.7	0.7	44	0.2	0.2
6	0.6	0.6	19	2.2	1.8	32	0.2	0.2	45	0.1	0.1
7	7.4	5.0	20	0.3	0.3	33	0.1	0.1	46	0.2	0.2
8	0.9	0.9	21	0.1	0.1	34	0.2	0.2	47	0.3	0.3
9	1.8	1.5	22	0.3	0.3	35	0.6	0.6	48	0.1	0.1
10	1.4	1.4	23	1.8	1.1	36	0.1	0.1	49	0.3	0.3
11	6.3	4.7	24	0.1	0.1	37	0.5	0.5	50	0.1	0.1
12	0.2	0.2	25	1.0	1.0	38	0.2	0.2			
13	5.3	4.0	26	0.3	0.3	39	0.1	0.1			
14	0.5	0.5	27	0.1	0.1	40	0.2	0.2			

หมายเหตุ - สำหรับฮาร์มอนิกที่อันดับต่ำกว่าหรือเท่ากับ 19 ยกเว้นอันดับที่ 3 และ 5 ให้มีได้ 2 อันดับที่สามารถเกินค่าในตารางได้ 10 % หรือ 0.5 แอมแปร์แล้วแต่ว่าค่าใดมากกว่ากัน

- สำหรับฮาร์มอนิกที่อันดับมากกว่า 19 ให้มีได้ 4 อันดับที่สามารถเกินค่าในตารางได้ 10 % หรือ 0.1 แอมแปร์แล้วแต่ว่าค่าใดมากกว่ากัน

- ที่มาของค่ากระแสในตารางสามารถดูได้ที่ภาคผนวก ก.

3.2.3 จุดต่อร่วมมีแรงดันฮาร์มอนิกเดิมมากกว่า 75 % ของขีดจำกัดแรงดันระดับวางแผน

3.2.3.1 กระบวนการในการประเมิน

สำหรับโหลดเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าและตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับที่มีขนาดเกินค่าในตารางที่ 3.3 หรือ มีแรงดันฮาร์มอนิก ณ จุดต่อร่วมเดิมมากกว่า 75 % ของขีดจำกัดแรงดันระดับวางแผน กระบวนการประเมินจะเป็นดังนี้

- คำนวณความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกที่จะเกิดขึ้นจากโหลดใหม่
- ทำนายว่าจะมีผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นๆ หรือต่อระบบไฟฟ้าหรือไม่เมื่อทำการเชื่อมต่อเข้ากับระบบ

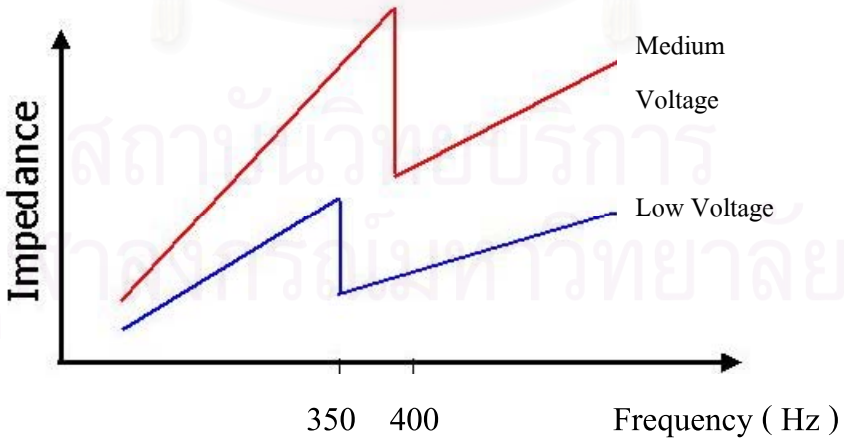
3.2.3.2 การคำนวณความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกเนื่องมาจากกลุ่มโหลด (V_{hc})

ความผิดเพี้ยนทางแรงดันมีสาเหตุมาจากกลุ่มโหลดที่จะต่อ ณ จุดต่อร่วมนั้นๆ โดยแรงดันฮาร์มอนิกสามารถคำนวณได้จากผลคูณระหว่างกระแสฮาร์มอนิกรวมในแต่ละอันดับและค่าอิมพีแดนซ์ ณ ความถี่นั้นๆ

อิมพีแดนซ์ของระบบ(Z_h) ณ ความถี่นั้นๆ มีความสัมพันธ์กับค่าอิมพีแดนซ์ ณ ความถี่มูลฐาน (50 Hz) และอันดับฮาร์มอนิกตามสมการที่ 3.1

$$Z_h = khZ_1 \qquad (3.1)$$

โดยค่า k เป็นตัวชดเชย ตัวปรับแก้ฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์ ได้มาจากการศึกษาปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ [15] ที่เกิดขึ้นในระบบจริงดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยค่า k มีค่าต่างกันแล้วแต่ช่วงความถี่มีค่าดังแสดงในตารางที่ 3.6



รูปที่ 3.2 Harmonic Impedance - diagrammatically

ตารางที่ 3.6 ค่าของตัวชดเชยผลของ Low-order Parallel Resonance (k) [4]

ระดับแรงดัน ที่จุดต่อร่วม (kV)	อันดับฮาร์มอนิก			
	$h \leq 7$	$h \leq 8$	$h > 7$	$h > 8$
0.4	1		0.5	
6.6, 11, 20 และ 22 kV		2		1

การคำนวณหาค่าแรงดันฮาร์มอนิก(V_{hc}) ในแต่ละอันดับฮาร์มอนิกหาได้จากสมการที่ 3.2

$$V_{hc} = \frac{I_h \cdot Z_h}{V_S / \sqrt{3}} \cdot 100 \quad \% \qquad (3.2)$$

หาอิมพีแดนซ์ของระบบที่ความถี่มูลฐาน(Z_1) จากความสัมพันธ์ $Z_1 = V_S^2 / \left(F \cdot 10^6\right)$ แทนค่า Z_1 ในสมการที่ 3.1 แล้วแทน Z_h ที่ได้ลงในสมการที่ 3.2 จะได้

$$V_{hc} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_h \, khV_s \cdot 100}{F \cdot 10^6} \quad \% \qquad (3.3)$$

เมื่อ V_{hc} คือ แรงดันฮาร์มอนิกที่ได้มาจากกลุ่มโหลดรวม (%)

I_h คือ กระแสฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับที่สร้างมาจากโหลดทั้งหมด (A)

k คือ ตัวชดเชยอิมพีแดนซ์ (จากตารางที่ 3.6)

h คือ อันดับฮาร์มอนิก (2-50)

V_S คือ แรงดันระหว่างสาย ณ จุดต่อร่วม (V_{l-l})

F คือ ค่าพิกัดฟอลต์ ณ จุดต่อร่วม (MVA)

ค่า I_h นั้นเป็นค่ากระแสฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับที่สร้างมาจากโหลดทั้งหมด ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3.4 โดยค่า α เป็นค่าตัวประกอบการบวก มีค่าแปรตามอันดับฮาร์มอนิกมีค่าดังในตารางที่ 3.7

$$I_h = \sqrt[\alpha]{\sum_i^n I_{h,i}^{\alpha}} \qquad (3.4)$$

ตารางที่ 3.7 ค่าตัวประกอบการบวก (summation factor) [15]

α	อันดับฮาร์มอนิก (h)
1	$h < 5$
1.4	$5 \leq h \leq 10$
2	$h > 10$

3.2.3.3 การคำนวณค่าพยากรณ์ความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก (V_{hp})

สำหรับฮาร์มอนิกแต่ละอันดับต้องคำนวณหาแรงดันฮาร์มอนิกพยากรณ์(V_{hp}) โดยหาได้จากการรวมกันระหว่างแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิม (V_{hm})โดยได้จากการวัด ณ จุดต่อร่วม และแรงดันฮาร์มอนิกที่ได้จากกลุ่มโหลด(V_{hc})ซึ่งได้มาจากการคำนวณในหัวข้อที่แล้ว โดยค่าแรงดันฮาร์มอนิกทั้งสามค่านั้น มีค่าเป็นเปอร์เซนต์ของแรงดันเฟส

ในการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกพยากรณ์นั้นคิดผลของมุมเฟสด้วย โดยจะมีการรวมกันแบบเชิงเส้น และการรวมกันแบบRMS

- การรวมกันแบบเชิงเส้นนั้นจะใช้กันฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และฮาร์มอนิกอันดับที่เป็นจำนวนเท่าของสาม โดยสมมติว่าแรงดันฮาร์มอนิกเหล่านั้นมีเฟสตรงกัน(In phase) แสดงดังสมการที่ 3.5

$$V_{hp} = V_{hm} + V_{hc} \qquad (3.5)$$

- การรวมกันแบบ RMS นั้นจะใช้กับฮาร์มอนิกอันดับอื่นๆที่เหลือ โดยสมมติว่าแรงดันฮาร์มอนิกเหล่านั้นมีเฟสต่างกัน 90° แสดงดังสมการที่ 3.6

$$V_{hp} = \sqrt{V_{hm}^2 + V_{hc}^2} \qquad (3.6)$$

ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม(Total Harmonic Distortion) หาได้จากสมการที่3.7

$$THD_V = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=50} V_{hp}^2} \qquad (3.7)$$

3.2.3.4 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกในขั้นตอนที่ 2

เมื่อมีความผิดเพี้ยนทางแรงดันฮาร์มอนิกอยู่ก่อนแล้วมากกว่า 75 % ในการประเมินนอกจากจะดูค่าแรงดันฮาร์มอนิก (V_{hp}) ในแต่ละอันดับฮาร์มอนิกไม่ให้เกินค่าขีดจำกัดแรงดันระดับวางแผน (V_{Plan}) แล้ว ยังต้องดูว่าแรงดันฮาร์มอนิกในอันดับที่ 5 ($V_{hp,5}$)และค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม(THD_V)นั้นมีค่าเกินตารางที่ 3.8 ด้วยหรือไม่ ถ้าไม่เกินถือว่าผ่านการประเมิน ถ้าเกินจะไม่สามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบได้ถ้าไม่มีการลดระดับฮาร์มอนิกก่อน

ตารางที่ 3.8 ขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมในการประเมินขั้นตอนที่ 2

ระดับแรงดัน ณ จุดต่อร่วม (kV)	ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม THD_V (%)	ขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ 5
0.4	5	4
6.6,11 และ 20	4	3
22	3	2

3.3 การประเมินขั้นตอนที่ 3

3.3.1 หลักการทั่วไป

การประเมินขั้นตอนที่ 3 นี้ใช้ประเมินกับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 33 กิโลโวลต์และสูงกว่า นอกจากนี้การประเมินขั้นตอนนี้เป็นการประเมินขั้นตอนสุดท้ายสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าที่ระดับแรงดันเหนือกว่าแรงดันต่ำ(400 โวลต์) และต่ำกว่า 33 กิโลโวลต์ ที่ไม่ผ่านการประเมินในขั้นตอนที่ 2

การประเมินในขั้นตอนนี้ต้องรู้ข้อมูลอิมพีแดนซ์ที่จุดต่อร่วม แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆ ในการคำนวณจะคิดถึงฮาร์มอนิกอันดับที่ 50 (2500 เฮิรตซ์)

การประเมินในขั้นตอนนี้นอกจากจะดูผล ณ จุดต่อร่วมแล้ว ยังดูผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับบัสข้างเคียงอีกด้วยว่าได้รับผลกระทบเป็นอย่างไร โดยจะดูบัสด้านแรงดันต่ำของผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นๆ ที่อยู่ใกล้เคียงกันว่าจะได้รับผลกระทบปัญหาจากฮาร์มอนิกคือปรากฏการณ์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม(series resonance) ปรากฏการณ์นี้คือมีปัญหาความเพี้ยนฮาร์มอนิกด้านแรงดันสูงอยู่ค่าๆหนึ่ง แล้วส่งปัญหามาถึงระบบแรงดันต่ำโดยผ่านหม้อแปลง จะเกิดการขยายแรงดันฮาร์มอนิกที่ด้านแรงต่ำขึ้นซึ่งส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าที่ต่อกับระบบแรงดันต่ำ

3.3.2 กระบวนการในการประเมิน

การประเมินในขั้นตอนนี้ประกอบด้วย

ก. วัดระดับแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิมในระบบ (V_{hm})

ข. คำนวณแรงดันฮาร์มอนิกที่จะเกิดขึ้นจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (V_{hc})

ค. ทำนายแรงดันฮาร์มอนิกที่จะเกิดขึ้น ณ จุดต่อร่วม (V_{hp}) โดยรวมผลที่ได้จาก ก. และ ข.

ผู้ใช้ไฟฟ้าจะผ่านการประเมินได้ถ้าผลในข้อ ค. ผ่าน กล่าวคือค่าความผิดเพี้ยนรวม (THD_v) และแรงดันฮาร์มอนิก(V_h) แต่ละอันดับ มีค่าน้อยกว่าขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกระดับวางแผน

3.3.3 การคาดหมายความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

3.3.3.1 การคำนวณแรงดันฮาร์มอนิกเนื่องจากกลุ่มโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

ในขั้นตอนที่ 2 นั้นการประเมินได้ใช้แบบจำลองอิมพีแดนซ์อย่างง่ายในการหาแรงดันฮาร์มอนิกที่จะเกิดจากกลุ่มโหลดไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งเป็นการหาแรงดันฮาร์มอนิกอย่างคร่าวๆ ในขั้นตอนที่ 3 นี้จะหาแรงดันฮาร์มอนิกที่จะเกิดจากกลุ่มโหลดไม่เป็นเชิงเส้นโดยคิดผลการไหลของกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าอย่างละเอียด โดยคิดถึงแบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆ ดังจะกล่าวในหัวข้อ 3.3.4

3.3.3.2 การรวมกันระหว่างแรงดันฮาร์มอนิกที่วัดได้(V_{hm}) และที่คำนวณได้(V_{hc})

จากหัวข้อ 3.3.3.1 ได้ค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่จะเกิดจากกลุ่มโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (V_{hc}) ณ จุดต่อร่วม หรือบัสอื่นๆที่สนใจ เมื่อนำมารวมกับแรงดันฮาร์มอนิกที่วัดได้ (V_{hm}) จะได้แรงดันฮาร์มอนิกที่ได้จากการทำนายที่จะเกิดขึ้น ณ จุดต่อร่วม (V_{hp})

หลักการในการรวมแรงดันฮาร์มอนิก

- สำหรับกรณีโหลดไม่สมดุลทั้งสามเฟส ให้เลือกเอาเฟสที่มีความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกสูงสุด
- ฮาร์มอนิกอันดับเดียว ที่ทำให้ผลรวมระหว่างแรงดันฮาร์มอนิกที่จะเกิดจากกลุ่มโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (V_{hc}) และแรงดันฮาร์มอนิกที่วัดได้ (V_{hm}) มีค่าสูงสุด ให้รวมกันแบบเชิงเส้น โดยสมมุติว่าแรงดันฮาร์มอนิกทั้งสองมีเฟสตรงกัน ดังสมการที่ 3.8

$$V_{hp} = V_{hm} + V_{hc} \qquad (3.8)$$

- ฮาร์มอนิกอันดับอื่นๆ สมมุติว่าแรงดันฮาร์มอนิกทั้งสองมีเฟสต่างกัน 90 องศา (ณ มุมเฟสนี้จะทำให้ค่า THD_v สูงสุด) กัน ดังสมการที่ 3.9

$$V_{hp} = \sqrt{V_{hm}^2 + V_{hc}^2} \qquad (3.9)$$

- และค่า THD_v หาได้ดังสมการที่ 3.10

$$THD_V = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=50} V_{hp}^2} \qquad (3.10)$$

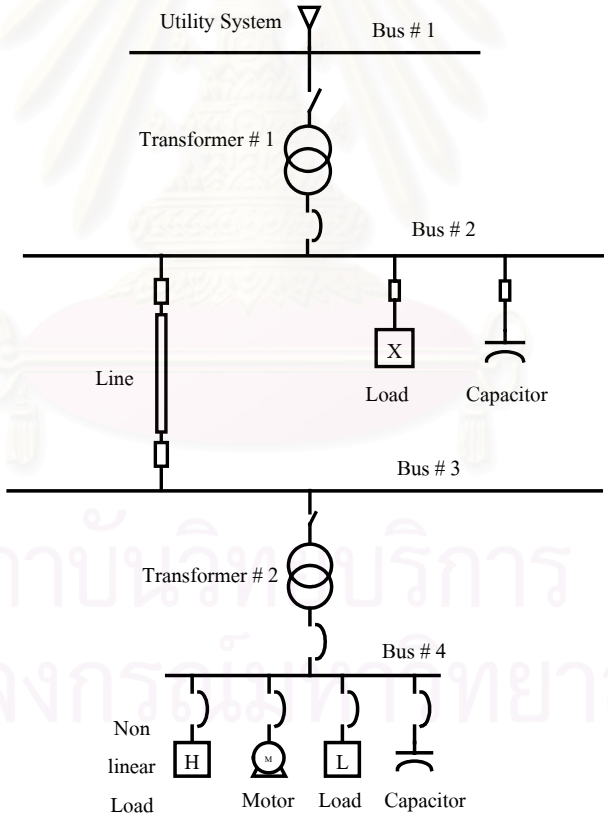
3.3.3.3 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกในขั้นตอนที่ 3

ค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่ได้จากการทำนาย (V_{hp}) ทุกอันดับฮาร์มอนิก และค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (THD_V) ณ จุดต่อร่วม และบัสที่เราสนใจต้องไม่เกินขีดจำกัดแรงดันระดับวางแผนดังแสดงแล้วในตารางที่ 3.3 – 3.6

3.3.4 การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

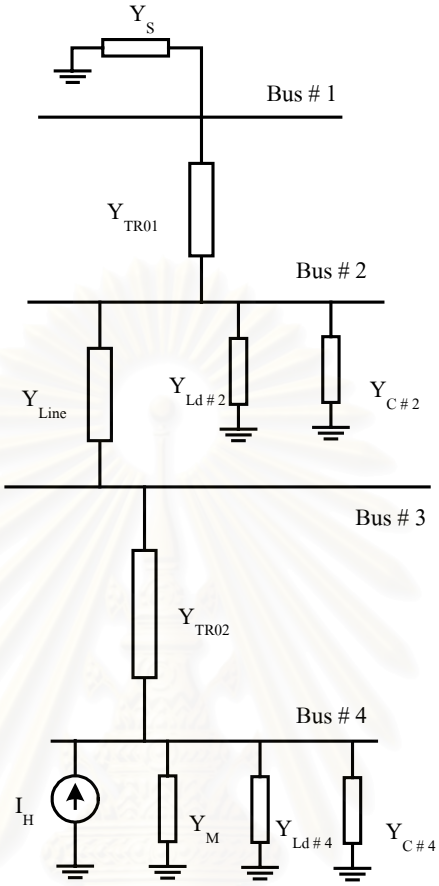
3.3.4.1 หลักการเบื้องต้น

สำหรับระบบขนาดใหญ่ๆ ที่มีหลายๆบัสนั้นในการวิเคราะห์จะใช้เมตริกซ์ความนำ (Admittance Matrix : Y_{BUS}) ในการวิเคราะห์หาแรงดันฮาร์มอนิก พิจารณาโรงงานอุตสาหกรรมตัวอย่าง 4 บัส



รูปที่ 3.3 ระบบโรงงานอุตสาหกรรมตัวอย่าง 4 บัส

จากรูปที่ 3.3 เมื่อเขียนเป็นวงจรสมมูลเพื่อใช้ในการสร้างเมตริกซ์ความนำจะได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลของระบบโรงงานอุตสาหกรรมตัวอย่าง 4 บัส

จากรูปที่ 3.4 เมื่อนำมาสร้าง Y_{BUS} โดยใช้ค่าความนำของแต่ละอุปกรณ์ ($Y = Z^{-1}$) ในแต่ละอันดับฮาร์มอนิกจะได้ดังสมการที่ 3.11

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} Y_S + Y_{TR01} & -Y_{TR01} & 0 & 0 \\ -Y_{TR01} & Y_{TR01} + Y_{Line} + Y_{LD2} + Y_{C2} & -Y_{Line} & 0 \\ 0 & -Y_{Line} & Y_{Line} + Y_{TR02} & -Y_{TR02} \\ 0 & 0 & -Y_{TR02} & Y_{TR02} + Y_M + Y_{LD4} + Y_{C4} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

จากเมตริกซ์ความนำที่ได้เมื่อทำการอินเวอร์สจะได้เมตริกซ์อิมพีแดนซ์ เมื่อนำเมตริกซ์อิมพีแดนซ์มาคูณกับเมตริกซ์กระแสฮาร์มอนิกที่อุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นฉีดเข้าบัสจะได้เมตริกซ์แรงดันฮาร์มอนิก ดังแสดงในสมการที่ 3.12

$$\left[V_h \right] = \left[Z_{h,bus} \right] \left[I_h \right] = \left[Y_{h,bus} \right]^{-1} \left[I_h \right] \quad (3.12)$$

เมื่อทำการคำนวณทุกๆอันดับฮาร์มอนิกโดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความนำของอุปกรณ์แต่ละตัว และค่ากระแสฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับ ก็สามารถนำค่าต่างๆนี้ไปใช้ในการประเมินว่าจะผ่านตามมาตรฐาน G5/4 หรือไม่ ดังแสดงแล้วในหัวข้อ 3.3.3.2

3.3.4.2 แบบจำลองของอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก [16, 17]

แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์มี

- โครงข่ายของระบบจ่ายไฟจากการไฟฟ้าที่ผู้ใช้ไฟฟ้าจะเชื่อมต่อ
- หม้อแปลง
- สายเคเบิล สายส่งจ่ายย่อย
- โหลดแบบเชิงเส้น
- คาปาซิเตอร์ของชุดปรับปรุงตัวประกอบกำลัง
- เครื่องจักรกลไฟฟ้า
- แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก
- ชุดกรองฮาร์มอนิก

แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองอย่างง่าย กล่าวคือไม่คิดผลของ Skin effect ซึ่งค่าต้านทานจะไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ และถือว่าระบบอยู่ในสภาวะสมดุล ค่าต่างๆเป็นค่าต่อเฟส

รายละเอียดของแบบจำลองที่ใช้มีดังนี้

3.3.4.2.1 โครงข่ายของระบบจ่ายไฟจากการไฟฟ้าที่ผู้ใช้ไฟฟ้าจะเชื่อมต่อ

จากจุดต่อร่วม(PCC) มองไปยังแหล่งจ่ายไฟจะแทนแบบจำลองด้วยอิมพีแดนซ์อนุกรมระหว่างค่าความต้านทาน กับค่ารีแอคแตนซ์ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานกับค่ารีแอคแตนซ์จะบอกมาในรูปของอัตาส่วน X / R (XR ratio)

ที่ความถี่ฮาร์มอนิก ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบจ่ายไฟมีค่าดังนี้

$$Zh_s = R1_S + jhX1_s \qquad (3.13)$$

เมื่อ Zh_S คือค่าอิมพีแดนซ์ที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ h ของระบบจ่ายไฟที่โรงงานต่ออยู่ (โอห์ม)

$R1_S$ คือค่าความต้านทานที่ความถี่มูลฐานของระบบจ่ายไฟที่โรงงานต่ออยู่ (โอห์ม)

$X1_S$ คือค่ารีแอคแตนซ์ที่ความถี่มูลฐานของระบบจ่ายไฟที่โรงงานต่ออยู่ (โอห์ม)

h คือเลขอันดับฮาร์มอนิก

ข้อมูลที่ต้องใช้ในการคำนวณหาแบบจำลอง มีพิกัดฟอลต์ ณ บัสนั้น(F) แรงดันที่บัสนั้น(V_{rms}) ค่าอัตราส่วน X / R โดยสามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังนี้

$$Z1_S = \frac{V_{rms}^2}{F}$$

$$R1_S = \frac{Z1_S}{\sqrt{1+(X/R)^2}} \qquad (3.14)$$

$$X1_S = \frac{Z1_S}{\sqrt{\frac{1}{(X/R)^2}+1}}$$

3.3.4.2.2 หม้อแปลง

แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าจะแทนแบบจำลองด้วยอิมพีแดนซ์อนุกรม ระหว่างค่าความต้านทาน กับค่ารีแอคแตนซ์

ที่ความถี่ฮาร์มอนิก ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าดังนี้

$$Zh_T = R1_T + jhX1_T \qquad (3.15)$$

เมื่อ Zh_T คือ ค่าอิมพีแดนซ์ที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ h ของหม้อแปลง (โอห์ม)

$R1_T$ คือ ค่าความต้านทานที่ความถี่มูลฐานของหม้อแปลง (โอห์ม)

$X1_T$ คือ ค่ารีแอคแตนซ์ที่ความถี่มูลฐานของหม้อแปลง (โอห์ม)

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาแบบจำลองมี แรงดันทั้งสองด้านของหม้อแปลง(U_{rT}) พิกัดของหม้อแปลง(S_{rT}) ค่าร้อยละอิมพีแดนซ์ (% Z) ค่ากำลังสูญเสีย โดยสามารถหาพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังนี้

$$Z_1 = \frac{pz}{100\%}\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}$$

$$R_1 = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \qquad (3.16)$$

$$X_1 = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2}$$

เมื่อ U_{rT} คือ แรงดันพิกัดของหม้อแปลงด้านแรงสูงหรือแรงต่ำ (kV)

I_{rT} คือ กระแสพิกัดของหม้อแปลงด้านแรงสูงหรือแรงต่ำ (A)

S_{rT} คือ กำลังปรากฏพิกัดของหม้อแปลง (MVA)

P_{krT} คือ กำลังสูญเสียในขดลวดของหม้อแปลงที่กระแสพิกัด (kW)

$_{pz}$ คือ ค่าร้อยละอิมพีแดนซ์ (%)

3.3.4.2.3 สายเคเบิล สายส่งจ่ายย่อย

ในงานวิจัยนี้แบบจำลองของสายเคเบิล สายส่งจ่าย เป็นแบบจำลองสายส่งระยะสั้น โดยมีอิมพีแดนซ์อนุกรมระหว่างค่าความต้านทาน กับค่ารีแอคแตนซ์

ที่ความถี่ฮาร์มอนิก ค่าอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลและสายส่งจ่ายย่อยมีค่าดังนี้

$$Zh_F = R1_F + jhX1_F \qquad (3.17)$$

เมื่อ Zh_F คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งจ่ายย่อย (โอห์ม)

$R1_F$ คือ ค่าความต้านทานที่ความถี่มูลฐานของสายส่งจ่ายย่อย (โอห์ม)

$X1_F$ คือ ค่ารีแอคแตนซ์ที่ความถี่มูลฐานของสายส่งจ่ายย่อย (โอห์ม)

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาแบบจำลองมี ค่าความต้านทานต่อกิโลเมตร ค่ารีแอคแตนซ์ต่อกิโลเมตร ความยาวของสายส่ง โดยสามารถหาพารามิเตอร์ต่างๆได้ดังนี้

$$R1_F = r \times L$$
$$X1_F = x \times L \qquad (3.18)$$

เมื่อ

r คือ ค่าความต้านทานต่อกิโลเมตร (โอห์มต่อกิโลเมตร)

x คือ ค่าความรีแอคแตนซ์ต่อกิโลเมตร (โอห์มต่อกิโลเมตร)

L คือ ความยาวของสายส่ง (กิโลเมตร)

3.3.4.2.4 โหลดแบบเชิงเส้น

ในงานวิจัยนี้แบบจำลองของโหลดแบบเชิงเส้นจะแทนอิมพีแดนซ์ขนานระหว่างค่าความต้านทาน กับค่ารีแอคแตนซ์

ที่ความถี่ฮาร์มอนิก ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดแบบเชิงเส้นมีค่าดังนี้

$$Zh_L = R1_L // jhX1_L \qquad (3.19)$$

เมื่อ $R1_L$ คือ ค่าความต้านทานของโหลดที่ความถี่มูลฐาน (โอห์ม)

$X1_L$ คือ ค่าความเหนี่ยวนำของโหลดที่ความถี่มูลฐาน (โอห์ม)

h คืออันดับของฮาร์มอนิก

Zh_L คือค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดเชิงเส้นที่ความถี่ฮาร์มอนิก (โอห์ม)

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาแบบจำลองมี แรงดันในสภาวะที่โหลดต่ออยู่ ค่ากำลังจริงของที่โหลด ค่ากำลังเสมือนของโหลด โดยสามารถหาพารามิเตอร์ต่างๆได้ดังนี้

$$R1_L = \left(\frac{V^2}{P}\right)$$
$$X1_L = j\left(\frac{V^2}{Q}\right) \qquad (3.20)$$

เมื่อ V คือ แรงดันในสภาวะที่โหลดต่ออยู่ (โวลต์)

P คือ ค่ากำลังจริงของโหลด (W)

Q คือ ค่ากำลังเสมือนของโหลด (VAr)

3.3.4.2.5 คาปาซิเตอร์ของชุดปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

สำหรับชุดคาปาซิเตอร์นี้ แบบจำลองแทนด้วยค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ (X_C) โดยไม่มีค่าความต้านทานต่ออยู่ด้วย

ที่ความถี่ฮาร์มอนิก ค่าอิมพีแดนซ์ของชุดคาปาซิเตอร์มีค่าดังนี้

$$Zh_C = -j\frac{X1_C}{h} \qquad (3.21)$$

เมื่อ Zh_C คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของชุดคาปาซิเตอร์ (โอห์ม)

$X1_C$ คือ ค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ ของชุดคาปาซิเตอร์ที่ความถี่มูลฐาน (โอห์ม)

h คืออันดับของฮาร์มอนิก

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาแบบจำลองมี แรงดันพิกัดของชุดคาปาซิเตอร์ ขนาดรวมของชุดคาปาซิเตอร์ โดยสามารถหาพารามิเตอร์ต่างๆได้ดังนี้

$$X1_C = -j\left(\frac{V_{rated}^2}{Q_C}\right) \qquad (3.22)$$

เมื่อ V_{rated} คือ แรงดันพิกัดของชุดคาปาซิเตอร์ (โวลต์)

Q_C คือ ขนาดรวมของชุดคาปาซิเตอร์ (ค่าพิกัดกำลังงานรีแอคทีฟของชุดคาปาซิเตอร์ : VAr)

3.3.4.2.6 เครื่องจักรกลไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ อิมพีแดนซ์ของมอเตอร์จะประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ส่วนของโรเตอร์และสเตเตอร์ แบบจำลองของมอเตอร์นี้แทนด้วยค่ารีแอกแตนซ์รวมทั้งในส่วนของโรเตอร์และสเตเตอร์อนุกรมกับค่าความต้านทาน

ที่ความถี่ฮาร์มอนิก ค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์มีค่าดังนี้

$$Zh_M = R1_M + jhX1_M \qquad (3.23)$$

เมื่อ Zh_M คือ ค่าอิมพีแดนซ์ที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ h ของมอเตอร์ (โอห์ม)

$R1_M$ คือ ค่าความต้านทานของมอเตอร์ที่ความถี่มูลฐาน (โอห์ม)

$X1_M$ คือ ค่ารีแอคแตนซ์ที่ความถี่มูลฐานของมอเตอร์ (โอห์ม)

h คืออันดับของฮาร์มอนิก

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหาแบบจำลองมี แรงดันพิกัดของมอเตอร์, พิกัดกำลังไฟฟ้า, ตัวประกอบกำลัง, ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ และอัตราส่วนของกระแสยึดหมุนต่อกระแสพิกัด(k) โดยสามารถหาพารามิเตอร์ต่างๆได้ดังนี้

$$S_M = \frac{P_M}{pf \times eff}$$

$$Z_M = \frac{V_M}{k \times S_M} \qquad (3.24)$$

สำหรับการประมาณค่า $R1_M/X1_M$ ให้ใช้ค่าดังนี้

- $R1_M/X1_M = 0.1$ $X1_M = 0.995Z_M$ สำหรับมอเตอร์แรงดันสูง ที่มีกำลังต่อคู่ของขั้ว $\geq$ 1 MW
- $R1_M/X1_M = 0.15$ $X1_M = 0.989Z_M$ สำหรับมอเตอร์แรงดันสูง ที่มีกำลังต่อคู่ของขั้ว $<$ 1 MW
- $R1_M/X1_M = 0.42$ $X1_M = 0.922Z_M$ สำหรับมอเตอร์แรงดันต่ำ

3.3.4.2.7 ชุดกรองฮาร์มอนิก [18]

ชุดกรองฮาร์มอนิกในงานวิจัยนี้เป็นชุดกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟเท่านั้น โดยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ประเภทคือ ตัวกรองฮาร์มอนิกปรับคลื่นเดี่ยว(Single Tuned Filter) และตัวกรองผ่านสูง (High Pass Filter) ซึ่งแบบจำลองของตัวกรองแต่ละชนิดจะต่างกัน

3.3.4.2.7.1 ตัวกรองฮาร์มอนิกปรับคลื่นเดี่ยว(Single Tuned Filter)

แบบจำลองตัวกรองฮาร์มอนิกปรับคลื่นเดี่ยว แสดงดังรูปที่ 3.5
ที่ความถี่ฮาร์มอนิก ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองฮาร์มอนิกปรับคลื่นเดี่ยวมีค่าดังนี้

$$Zh_{FT} = R1 + j\left(hX1_L - \frac{X1_C}{h} \right) \qquad (3.25)$$

เมื่อ Zh_{FT} คือ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ h ของตัวกรองฮาร์มอนิก (โอห์ม)

R1 คือ ค่าความต้านทานของตัวกรองฮาร์มอนิกที่ความถี่มูลฐาน (โอห์ม)

$X1_L$ คือ ค่ารีแอคแตนซ์ที่ความถี่มูลฐานของตัวกรองฮาร์มอนิก (โอห์ม)

$X1_C$ คือ ค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ที่ความถี่มูลฐานของตัวกรองฮาร์มอนิก (โอห์ม)

h คือ อันดับของฮาร์มอนิก

รูปที่ 3.5 แบบจำลองตัวกรองฮาร์มอนิกปรับคลื่นเดี่ยว

ข้อมูลที่ต้องใช้ในการหาแบบจำลองมี แรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ ขนาดกำลังงานรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุ จุดเรโซแนนซ์ของตัวกรองที่ปรับคลื่นไว้ ค่า Q – Factor โดยสามารถหาพารามิเตอร์ต่างๆได้ดังนี้

$$X_{C1} = \frac{V_{cr}^2}{Q_{cr}} \qquad (3.26)$$

$$X_{L1} = \frac{X_{C1}}{h_r^2}$$

$$R1 = \frac{h_r \times X_{L1}}{QF}$$

เมื่อ V_{cr} คือ แรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ (โวลต์)

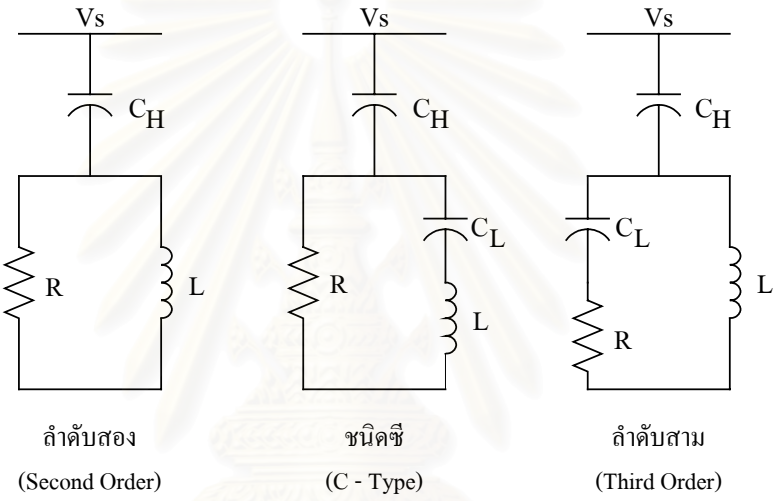
Q_{cr} คือ ขนาดกำลังงานรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุ (Var)

QF คือ ค่า Q – Factor ของตัวกรอง

h_r คือ จุดเรโซแนนซ์ของตัวกรองที่ปรับคลื่นไว้

3.3.4.2.7.2 ตัวกรองผ่านสูง (High Pass Filter)

แบบจำลองตัวกรองผ่านสูง แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แบบจำลองตัวกรองผ่านสูง

ในงานวิจัยนี้ใช้เฉพาะตัวกรองผ่านสูงประเภทลำดับสองเท่านั้น

ที่ความถี่ฮาร์มอนิก ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองผ่านสูงมีค่าดังนี้

$$Zh_{FT} = -j\frac{X1_C}{h} + \left(R1 \,//\, jhX1_L\right) \qquad (3.27)$$

เมื่อ Zh_{FT} คือ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ h ของตัวกรองฮาร์มอนิก (โอห์ม)

R1 คือ ค่าความต้านทานของตัวกรองฮาร์มอนิกที่ความถี่มูลฐาน (โอห์ม)

$X1_L$ คือ ค่ารีแอคแตนซ์ที่ความถี่มูลฐานของตัวกรองฮาร์มอนิก (โอห์ม)

$X1_C$ คือ ค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ที่ความถี่มูลฐานของตัวกรองฮาร์มอนิก (โอห์ม)

h คือ อันดับของฮาร์มอนิก

ในส่วนของการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เหมือนกัน ต่างกันที่ค่า R1 หาจากสมการ 3.28

$$R1 = \frac{QF}{h_r \times X_{L1}} \qquad (3.28)$$

3.3.4.2.8 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

แหล่งจ่ายฮาร์มอนิกได้แก่ อุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นทุกชนิด ที่สร้างกระแสไฟฟ้าออกมาไม่เป็นรูปคลื่นไซน์

ในงานวิจัยนี้สมมติให้แบบจำลองของแหล่งจ่ายฮาร์นิกเป็นแหล่งกำเนิดกระแส โดยจะฉีดกระแสฮาร์มอนิกเข้าบัสที่อุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นต่ออยู่

3.4 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องในการประเมิน

มาตรฐานที่เกี่ยวข้องในการประเมินมีมาตรฐาน IEC 61000 -3-2, IEC 61000 -3- 4 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่อกับระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ (ใช้ในขั้นตอนที่ 1)

3.4.1 มาตรฐาน IEC 61000 – 3 – 2

มาตรฐานนี้จะจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ที่จะไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้า โดยใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดกระแสไม่เกิน 16 แอมแปร์

ก. การจัดกลุ่มอุปกรณ์

มาตรฐานนี้จะทำการแบ่งประเภทอุปกรณ์เป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

Class A : อุปกรณ์ในกลุ่มนี้เป็นโหลดประเภท

- อุปกรณ์สามเฟสสมดุล
- อุปกรณ์หรี่แสงของโคมไฟฟ้าที่ใช้หลอดไส้
- เครื่องเสียง
- อุปกรณ์อื่นๆ ที่ไม่ถูกจัดอยู่ในอีกสามกลุ่มที่เหลือ

ขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ Class A แสดงในตารางที่ 3.9

Class B : อุปกรณ์ในกลุ่มนี้เป็นโหลดที่สามารถถือได้ในขณะใช้งานปกติ และใช้งานในช่วงเวลาสั้น

ขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ Class B เป็น 1.5เท่าของ Class A

ตารางที่ 3.9 ขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ Class A [5]

อันดับฮาร์มอนิก (h)	ขนาดกระแสสูงสุด (A.)
ฮาร์มอนิกอันดับเลขคี่	
3	2.30
5	1.14
7	0.77
9	0.40
11	0.33
13	0.21
$15 \leq h \leq 39$	0.15 * 15 / h
ฮาร์มอนิกอันดับเลขคู่	
2	1.08
4	0.43
6	0.30
$8 \leq h \leq 40$	0.23 * 8 / h

Class C : อุปกรณ์ในกลุ่มนี้เป็นโหลดประเภทอุปกรณ์ส่องสว่าง

ขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกของอุปกรณ์Class Cแสดงในตารงที่ 3.10, 3.11

ตารางที่ 3.10 ขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ Class C (P > 25 W) [5]

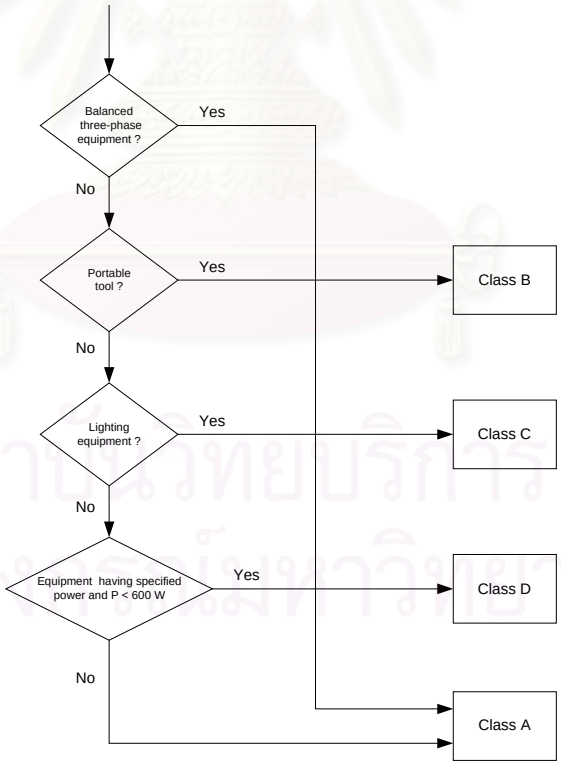
อันดับฮาร์มอนิก (h)	ขนาดกระแสสูงสุดมีค่าเป็นร้อยละของกระแสที่ความถี่มูลฐาน (%)
2	2
3	30* power factor
5	10
7	7
9	5
$11 \leq h \leq 39$	3

Class D : อุปกรณ์ในกลุ่มนี้เป็นโหลดประเภทที่รับกำลังไฟฟ้าแบบพิเศษ และมีกำลังไฟฟ้าจริงขาเข้าไม่เกิน 600 วัตต์ ตัวอย่างได้แก่ เครื่องคอมพิวเตอร์ โทรทัศน์

ตารางที่ 3.11 ขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ Class D (Class C : P $\leq$ 25 W) [5]

อันดับฮาร์มอนิก (h)	ขนาดกระแสสูงสุดต่อวัตต์ (mA / W) *** Class C	ขนาดกระแสสูงสุด (A.)
3	3.4	2.30
5	1.9	1.14
7	1.0	0.77
9	0.5	0.40
11	0.35	0.33
13 $\leq$ h $\leq$ 39	3.85 / h	ดูตารางที่ 3.9

จากการแบ่งกลุ่มอุปกรณ์ทั้ง 4 กลุ่ม เมื่อนำมาเขียนเป็นแผนภูมิได้ดังนี้



รูปที่ 3.7 แผนภูมิในการแบ่งกลุ่มอุปกรณ์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC 61000 – 3 - 2 [5]

3.4.2 มาตรฐาน IEC 61000 – 3 – 4

มาตรฐานนี้จะจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ที่จะไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้า โดยใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดกระแสเกิน 16 แอมแปร์ โดยมาตรฐานนี้แบ่งการประเมินเป็น 3 ขั้นตอน โดยต้องใช้พิกัดฟอลต์ ณ จุดที่โหลดจะติดตั้งในการคำนวณด้วย

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

$S_{SC} = MVA_{SC}$ หรือ V_n^2 / Z

$S_{equ} = U_p I_{equ}$ สำหรับอุปกรณ์ 1 เฟส

$S_{equ} = U_i I_{equ}$ สำหรับอุปกรณ์อินเตอร์เฟส

$S_{equ} = \sqrt{3}\, U_i I_{equ}$ สำหรับอุปกรณ์ 3 เฟสสมดุล

$S_{equ} = 3\, U_p I_{equ,MAX}$ สำหรับอุปกรณ์ 3 เฟสไม่สมดุล

$R_{sce} = S_{SC} / (3\, S_{equ})$ สำหรับอุปกรณ์ 1 เฟส

$R_{sce} = S_{SC} / (2\, S_{equ})$ สำหรับอุปกรณ์อินเตอร์เฟส

$R_{sce} = S_{SC} / S_{equ}$ สำหรับอุปกรณ์ 3 เฟส

เมื่อ S_{SC} คือ พิกัดฟอลต์สามเฟส ณ จุดต่อร่วม

V_n คือ แรงดันสาย(line voltage)

Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ ณ จุดต่อร่วม

U_p คือ แรงดันเฟส

U_i คือ แรงดันสาย

I_{equ} คือ พิกัดกระแสสมมูลของอุปกรณ์

S_{equ} คือ พิกัดกำลังไฟฟ้าปรากฏสมมูลของอุปกรณ์ไฟฟ้า

R_{sce} คือ อัตราส่วนพิกัดฟอลต์ต่อกำลังไฟฟ้าปรากฏสมมูลของอุปกรณ์

ดัชนีที่ใช้ในการประเมินมีดังนี้

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2} \qquad (3.29)$$

$$PWHD_i = \sqrt{\sum_{h=14}^{40} h \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2}$$

เมื่อ THD_i คือ ค่าความผิดเพี้ยนรวมของกระแสฮาร์มอนิก

$PWHD_i$ คือ ค่าความผิดเพี้ยนบางส่วนของกระแสฮาร์มอนิก

การประเมินขั้นตอนที่ 1

ใช้ข้อมูลในตารางที่ 3.12 ในการประเมิน โดยในขั้นตอนนี้ ค่า $R_{sce} \geq 33$

ตารางที่ 3.12 ขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ ในขั้นตอนที่ 1 ($S_{equ} \leq S_{SC} / 33$) [6]

อันดับฮาร์มอนิก (h)	I_h / I_1 (%)	อันดับฮาร์มอนิก (h)	I_h / I_1 (%)
3	21.6	21	≤ 0.6
5	10.7	23	0.9
7	7.2	25	0.8
9	3.8	27	≤ 0.6
11	3.1	29	0.7
13	2	31	0.7
15	0.7	≥ 33	0.6
17	1.2		
19	1.1	อันดับคู่	$\leq 8 / h$ หรือ ≤ 0.6

ตารางที่ 3.13 ขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ ในขั้นตอนที่ 2 สำหรับโหลด1เฟส โหลดอินเตอร์เฟส และโหลดสามเฟสไม่สมดุล [6]

$R_{sce,Min}$	ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิก (%)		I_h / I_1 (%)					
	THD	PWHD	I3	I5	I7	I9	I11	I13
66	25	25	23	11	8	6	5	4
120	29	29	25	12	10	7	6	5
175	33	33	29	14	11	8	7	6
250	39	39	34	18	12	10	8	7
350	46	46	40	24	15	12	9	8
450	51	51	40	30	20	14	12	10
600	57	57	40	30	20	14	12	10
สำหรับฮาร์มอนิกอันดับเลขคู่มีค่าไม่เกิน 16 / h % มีการประมาณค่าแบบเชิงเส้น(Linear interpolation) สำหรับค่า R_{sce} ที่อยู่ระหว่างกลาง								

การประเมินขั้นตอนที่ 2

ใช้ข้อมูลในตารางที่ 3.13 และ 3.14 ในการประเมิน โดยในขั้นตอนนี้ใช้ประเมินอุปกรณ์ที่ไม่ผ่านการประเมินในขั้นตอนแรก หรืออุปกรณ์ที่มีค่า $R_{sce} > 33$

ตารางที่ 3.14 ขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ ในขั้นตอนที่ 2 สำหรับโหลดสามเฟสสมดุล [6]

$R_{sce,Min}$	ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิก (%)		I_h / I_l (%)			
	THD	PWHD	I5	I7	I11	I13
66	16	25	14	11	10	8
120	18	29	16	12	11	8
175	25	33	20	14	12	8
250	35	39	30	18	13	8
350	48	46	40	25	15	10
450	58	51	50	35	20	15
600	70	57	60	40	25	18
สำหรับฮาร์มอนิกอันดับเลขคู่มีค่าไม่เกิน 16 / h % มีการประมาณค่าแบบเชิงเส้น(Linear interpolation) สำหรับค่า R_{sce} ที่อยู่ระหว่างกลาง						

การประเมินขั้นตอนที่ 3

ในขั้นตอนนี้ใช้ประเมินอุปกรณ์ที่ไม่ผ่านการประเมินในขั้นตอนที่สอง หรืออุปกรณ์ที่มีกระแสมากกว่า 75 แอมแปร์ โดยวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกถ้าติดตั้งโหลดเข้าไป พิจารณาแบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆด้วย โดยทำให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมไม่เกินค่าขีดจำกัดแรงดันระดับการอยู่ร่วมกันได้ดังแสดงแล้วในตารางที่ 3.7 – 3.10 ขั้นตอนนี้ไม่ได้ใช้ในงานวิจัยนี้

3.5 การวัดแรงดันฮาร์มอนิก

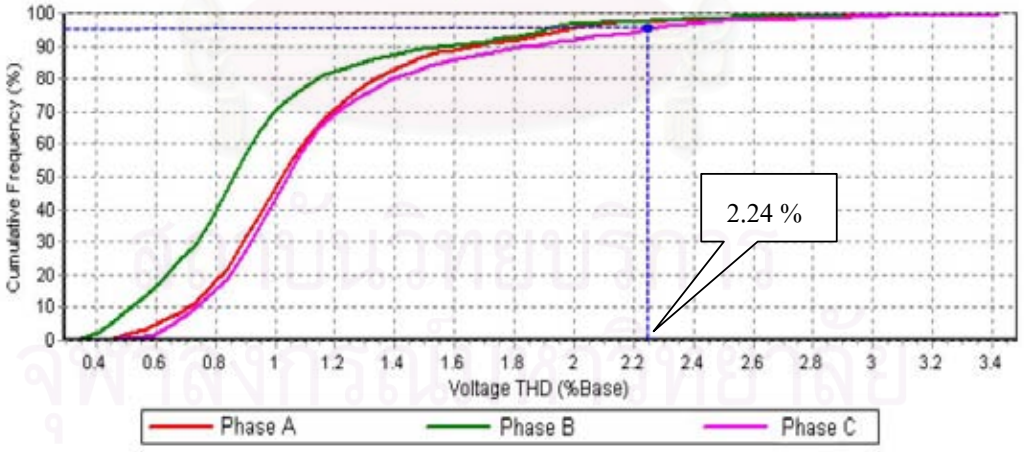
การวัดแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิมในระบบ(V_{hm}) นั้นใช้ในการประเมินขั้นตอนที่ 2 และขั้นตอนที่ 3 ในการวัดแรงดันฮาร์มอนิกนี้ให้วัดที่จุดต่อร่วมหรือวัดที่ด้านแรงดันต่ำใกล้กับจุดต่อร่วม โดยทำการเก็บข้อมูลทั้งแรงดันฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับ(V_h) และค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม(THD_V) เพื่อใช้ในการประเมินที่ซับซ้อนมากขึ้น

หลังจากทำการเชื่อมต่อโหลดเข้ากับระบบแล้วควรทำการวัดแรงดันฮาร์มอนิกอีกครั้ง เพื่อดูผลว่าโหลดที่เชื่อมต่อเข้าไปนั้นส่งผลต่อระบบไฟฟ้าโดยรวม ณ จุดนั้นอย่างไรบ้าง

การเปลี่ยนแปลงความผิดเพี้ยนด้านฮาร์มอนิกนั้นจะเปลี่ยนแปลงตลอดทั้งวัน (24ชั่วโมง) และระหว่างวันปกติ(วันจันทร์-วันศุกร์) วันหยุด(วันเสาร์-วันอาทิตย์ วันหยุดราชการ) ค่าที่ได้จะต่างกัน อย่างน้อยควรทำการตรวจวัด 1 สัปดาห์เพื่อให้ครอบคลุมทุกกรณี เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดต้องเป็นไปตามมาตรฐาน IEC 61000-4-7 [19] ข้อมูลที่ใช้ในการประเมินเป็นค่าสูงสุดที่ 95 เปอร์เซ็นต์ของค่า RMS โดยทำการวัดเฉลี่ยทุกๆ 10 นาทีสำหรับโหลดทั่วไป หรือวัดเฉลี่ยทุกๆ 3 วินาทีสำหรับโหลดที่มีค่าเปลี่ยนแปลงเร็วๆอยู่ตลอดเวลา(fluctuation load) เช่น เตาหลอมเหล็กแบบไฟฟ้า เครื่องเชื่อม ฯลฯ

สำหรับโหลดทั่วไปนำค่า V_{hm} 95 % รวมกับแรงดันฮาร์มอนิกที่คำนวณได้จากกลุ่มโหลด(V_{hc}) จะได้แรงดันฮาร์มอนิกพยากรณ์(V_{hp}) เรานำค่า V_{hp} นี้ไปประเมินเทียบกับขีดจำกัดแรงดันระดับวางแผนได้เลย สำหรับโหลดที่มีค่าเปลี่ยนแปลงเร็วๆอยู่ตลอดเวลา(fluctuation load) นำค่า V_{hm} 95 % รวมกับแรงดันฮาร์มอนิกที่คำนวณได้จากกลุ่มโหลด(V_{hc}) จะได้แรงดันฮาร์มอนิกพยากรณ์(V_{hp}) เรานำค่า V_{hp} ที่ได้หารด้วยตัวประกอบ k ก่อนแล้วจึงนำค่าที่ได้ไปประเมินเทียบกับขีดจำกัดแรงดันระดับวางแผน ค่าตัวประกอบ k [11, 12] หาได้ดังสมการ 3.30

$$k = 1.3 + 0.7\frac{(h-5)}{45} \qquad (3.30)$$



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดแรงดันฮาร์มอนิก

ในการประเมินจะใช้ข้อมูลของเฟสที่มีความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกสูงสุดในการประเมินจากตัวอย่างรูปที่ 3.8 จะเห็นได้ว่าข้อมูลเฟส C มีความผิดเพี้ยนมากสุด เอาค่าที่ 95 % ได้ค่า 2.24 % นำค่าที่ได้นี้ไปใช้ในการประเมินต่อไป

บทที่ 4

การพัฒนาโปรแกรม

จากหลักการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับการอนุญาตให้เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ถ้าคำนวณด้วยมือจะใช้เวลานานและอาจผิดพลาดได้ง่าย จึงได้มีการพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการประเมิน โดยได้ใช้โปรแกรมเดลไฟล์ (Delphi 5) ในการพัฒนา เขียนด้วยภาษาปาสคาล เป็นภาษาที่เขียนง่าย โปรแกรมเดลไฟล์นี้นอกจากจะคำนวณได้แล้วยังมีการแสดงกราฟฟิกที่สวยงามและง่ายในการพัฒนา

โครงสร้างของโปรแกรมแบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลัก คือ

- ส่วนข้อมูลที่ใช้ในการประเมิน
- ส่วนการประเมิน
- ส่วนรายงาน

4.1 ส่วนข้อมูลที่ใช้ในการประเมิน

ข้อมูลที่ใช้ในการประเมินมี มาตรฐาน G5/4 มาตรฐาน IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-4, ข้อมูลรายละเอียดของอุปกรณ์ ในส่วนของมาตรฐานนั้นจำเป็นเพราะโปรแกรมจะทำการดึงข้อมูลออกมาใช้ในส่วนการประเมิน ส่วนของข้อมูลรายละเอียดของอุปกรณ์นั้นก็แล้วแต่ผู้ใช้โปรแกรมว่าจะทำการบันทึกเพิ่มเข้าไปหรือไม่

4.1.1 หน้าต่างมาตรฐาน G5/4

ในส่วนของข้อมูลมาตรฐาน G5/4 นั้นมีด้วยกัน 4 หน้าต่างคือ

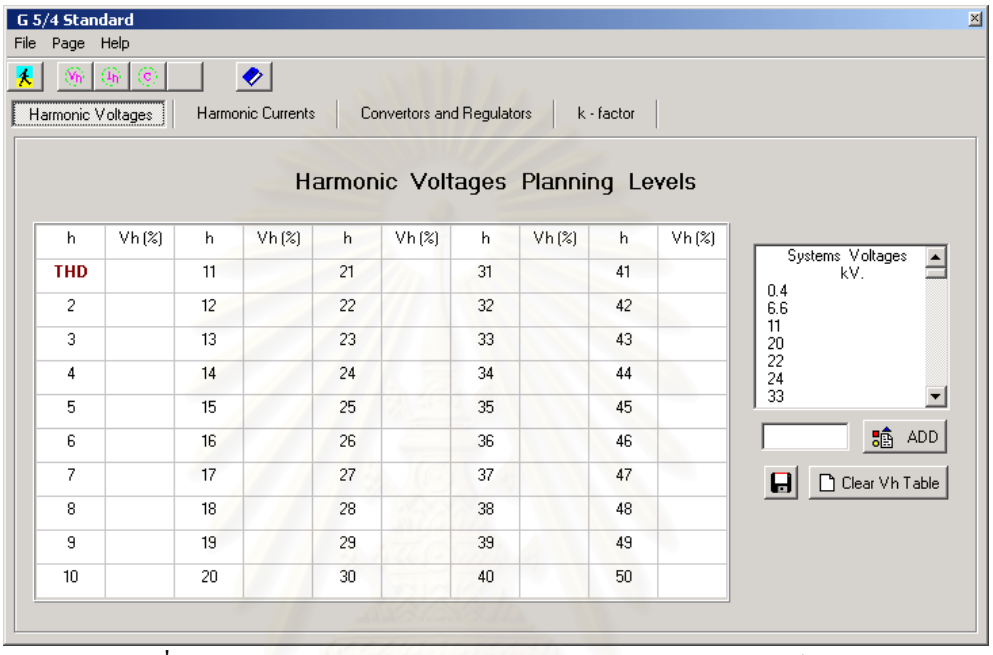
- ข้อมูลขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกระดับวางแผน

  มีการเพิ่มหรือลบข้อมูล ข้อมูลขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกระดับวางแผนที่ระดับแรงดันต่างๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.1
- ข้อมูลขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกที่ใช้ในการประเมินขั้นตอนที่ 2

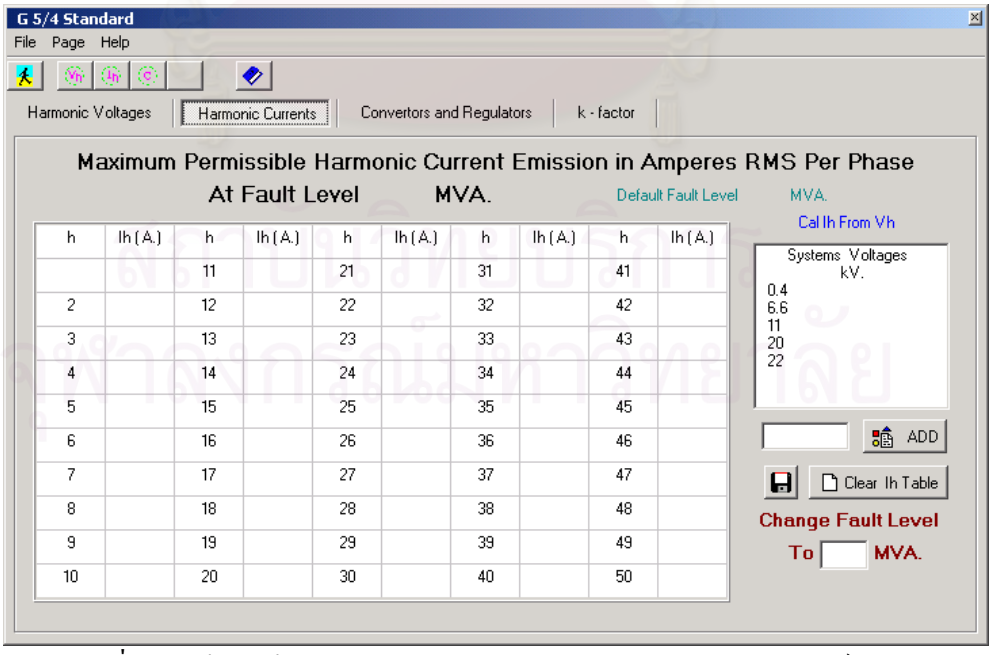
  มีการเพิ่มหรือลบข้อมูล ข้อมูลขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกที่ระดับแรงดันต่างๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.2
- ขนาดของอุปกรณ์ประเภทเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าและตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับ

  ทำการแก้ไข เปลี่ยนแปลงขนาดของอุปกรณ์ประเภทเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าและตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.3

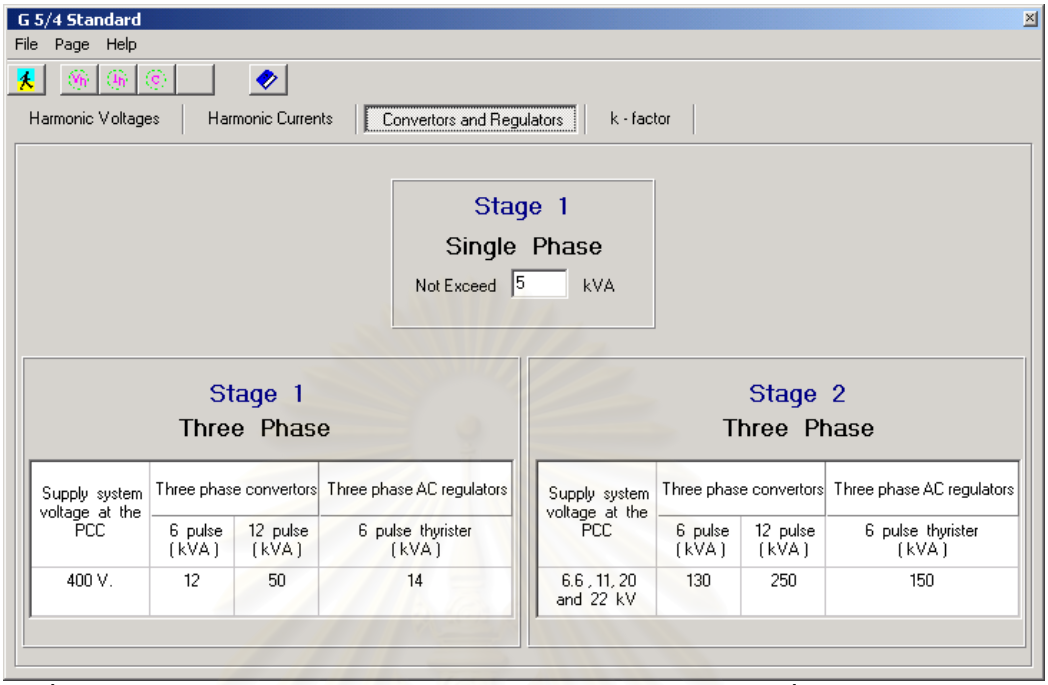
- ค่า k-factor ที่ใช้ในการประเมินขั้นตอนที่ 2
  ทำการแก้ไข เปลี่ยนแปลงค่า k-factor ที่ระดับแรงดันต่างๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.4



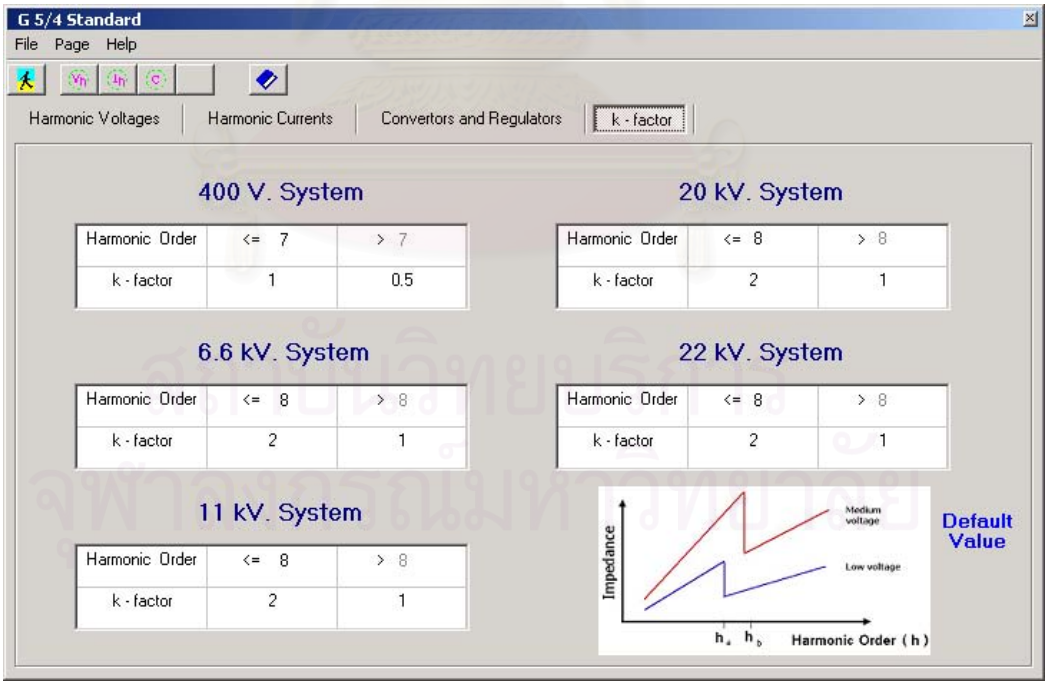
รูปที่ 4.1 หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน G 5/4 ส่วนขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิก



รูปที่ 4.2 หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน G 5/4 ส่วนขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิก



รูปที่ 4.3 หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน G 5/4 ส่วนขนาดของอุปกรณ์ประเภทเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าและตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 4.4 หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน G 5/4 ส่วนค่า k-factor

4.1.2 หน้าต่างมาตรฐาน IEC 61000-3-2

ในส่วนของข้อมูลมาตรฐาน IEC 61000-3-2 นั้นมีด้วยกัน 6 หน้าคือ

- ขีดจำกัด Class A

แสดงขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกของโหลด Class A ดังแสดงในรูปที่ 4.5

- ขีดจำกัด Class B

แสดงขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกของโหลด Class B ดังแสดงในรูปที่ 4.6

- ขีดจำกัด Class C

แสดงขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกของโหลด Class C ดังแสดงในรูปที่ 4.7

- ขีดจำกัด Class D

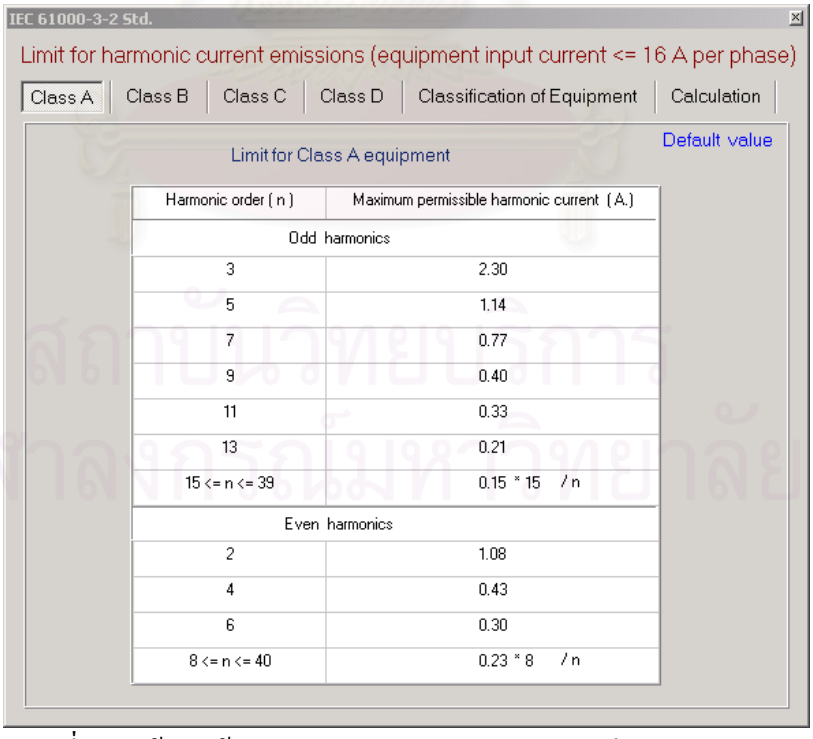
แสดงขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกของโหลด Class D ดังแสดงในรูปที่ 4.8

- รายละเอียดอุปกรณ์ในแต่ละกลุ่ม

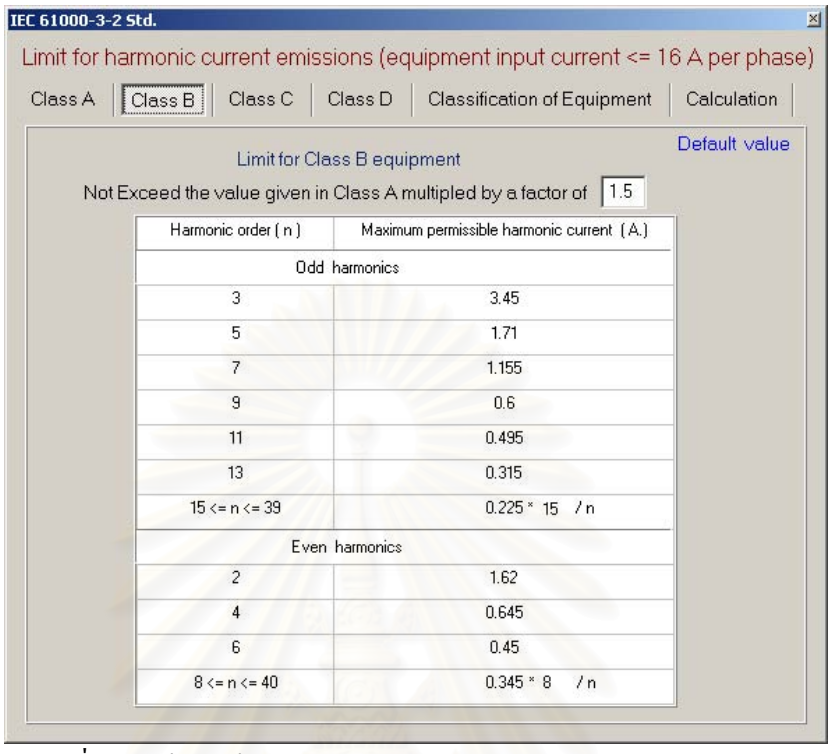
  บอกรายละเอียดว่าอุปกรณ์ในแต่ละกลุ่มมีอะไรบ้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.9

- ส่วนการคำนวณ

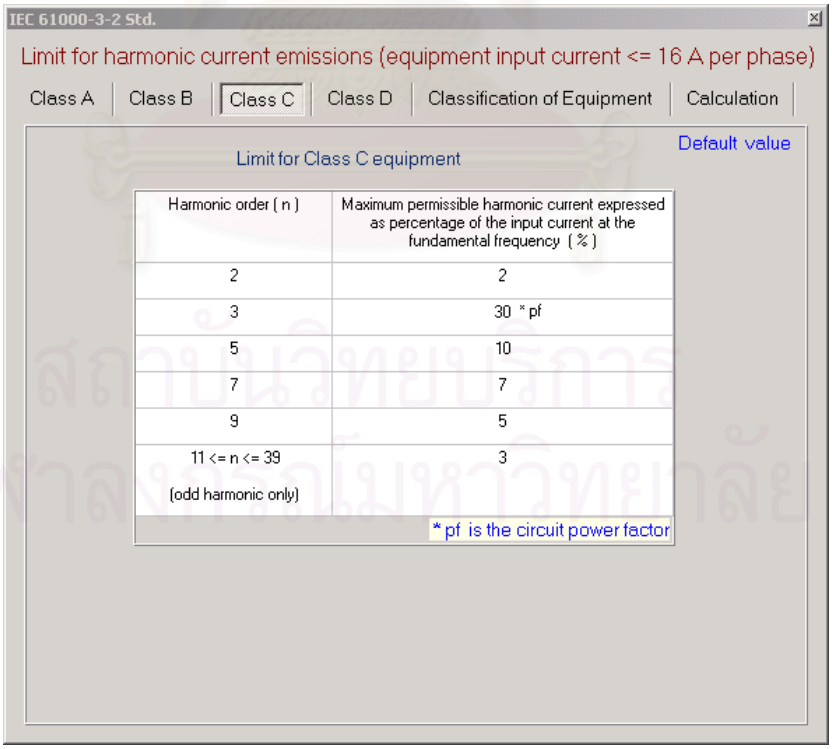
  ใช้คำนวณหาขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกของโหลดทุกๆกลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 4.10



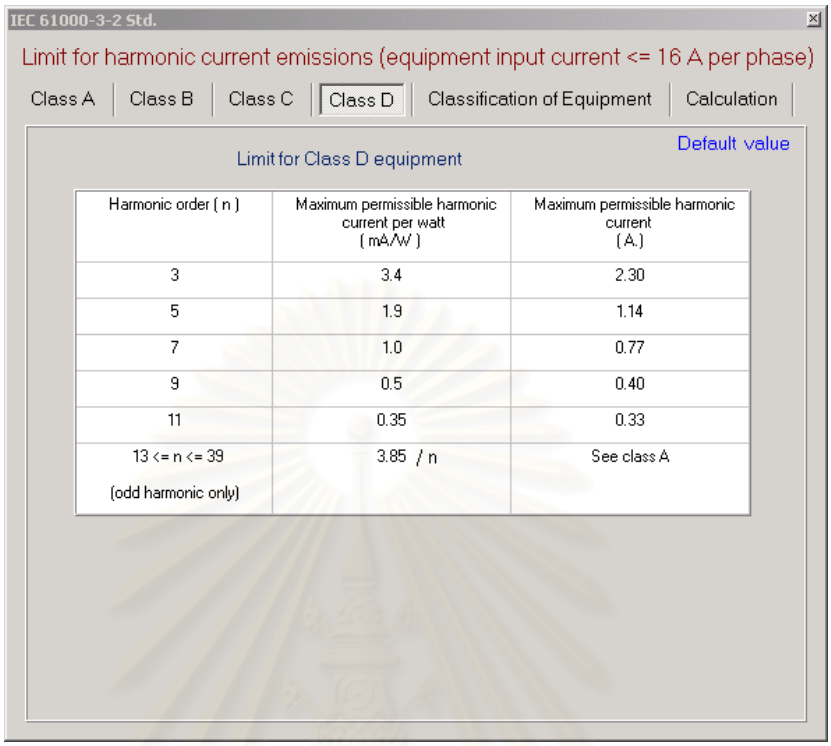
รูปที่ 4.5 หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน IEC 61000-3-2 ส่วนขีดจำกัด Class A



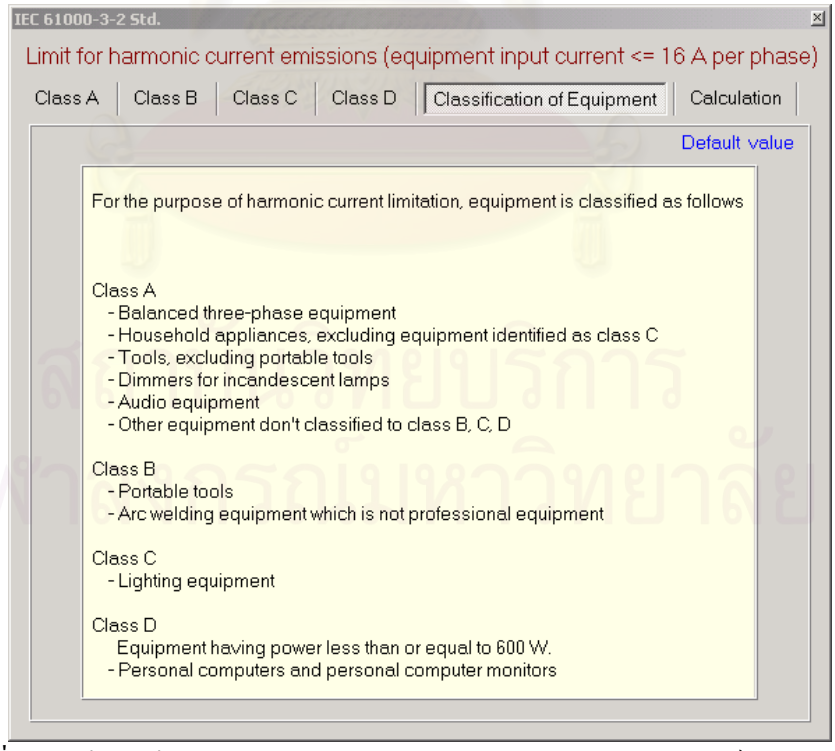
รูปที่ 4.6 หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน IEC 61000-3-2 ส่วนขีดจำกัด Class B



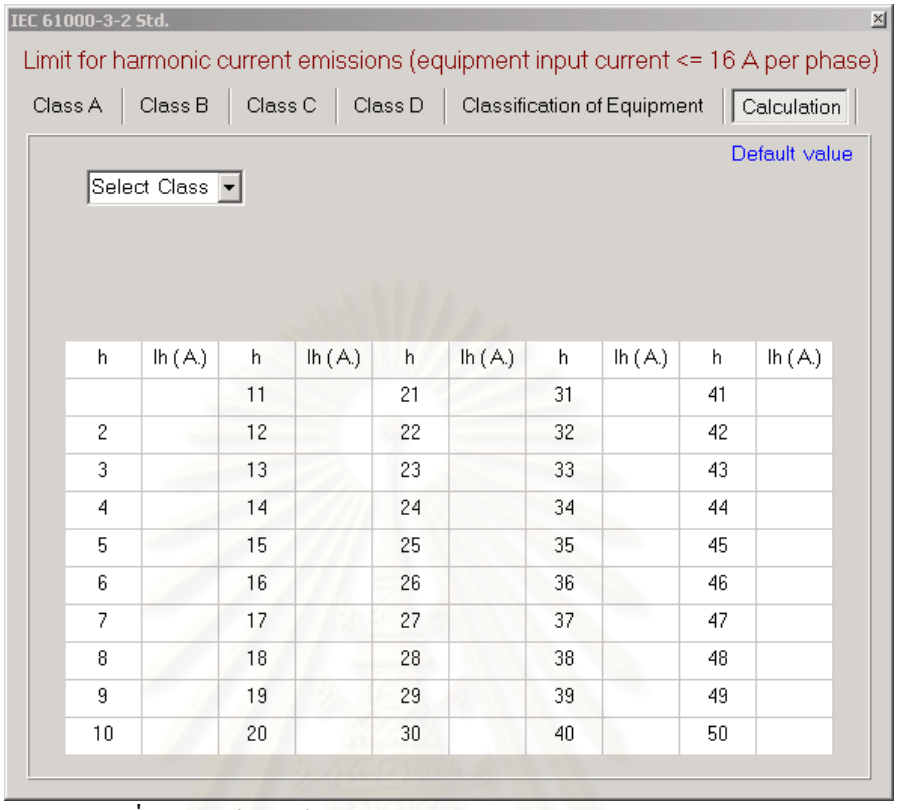
รูปที่ 4.7 หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน IEC 61000-3-2 ส่วนขีดจำกัด Class C



รูปที่ 4.8 หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน IEC 61000-3-2 ส่วนขีดจำกัด Class D



รูปที่ 4.9 หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน IEC 61000-3-2 ส่วนรายละเอียดอุปกรณ์ในแต่ละกลุ่ม



h	Ih (A.)	h	Ih (A.)	h	Ih (A.)	h	Ih (A.)	h	Ih (A.)
		11		21		31		41	
2		12		22		32		42	
3		13		23		33		43	
4		14		24		34		44	
5		15		25		35		45	
6		16		26		36		46	
7		17		27		37		47	
8		18		28		38		48	
9		19		29		39		49	
10		20		30		40		50	

รูปที่ 4.10 หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน IEC 61000-3-2 ส่วนการคำนวณ

4.1.3 หน้าต่างมาตรฐาน IEC 61000-3-4

ในส่วนของข้อมูลมาตรฐาน IEC 61000-3-4 นั้นมีด้วยกัน 5 หน้าคือ

- ขีดจำกัดในขั้นตอนที่ 1

แสดงขีดจำกัดที่ใช้ในการประเมินขั้นตอนที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.11

- ขีดจำกัดในขั้นตอนที่ 2 (1)

แสดงขีดจำกัดที่ใช้ในการประเมินขั้นตอนที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.12

- ขีดจำกัดในขั้นตอนที่ 2 (2)

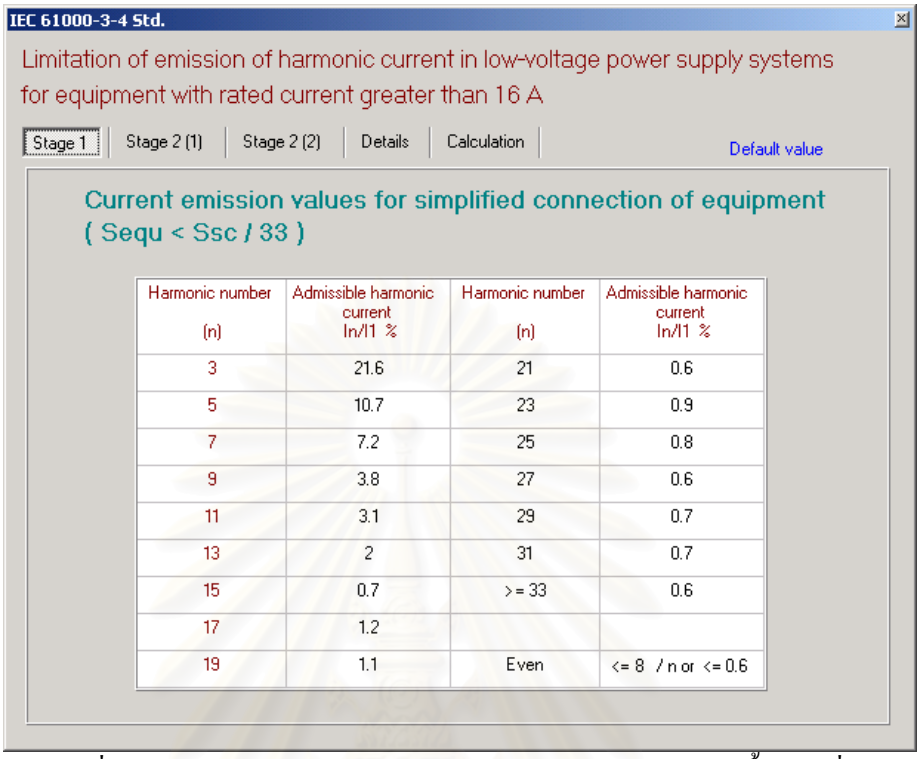
แสดงขีดจำกัดที่ใช้ในการประเมินขั้นตอนที่ 2 (ต่อ) ดังแสดงในรูปที่ 4.13

- รายละเอียด

รายละเอียดของพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.14

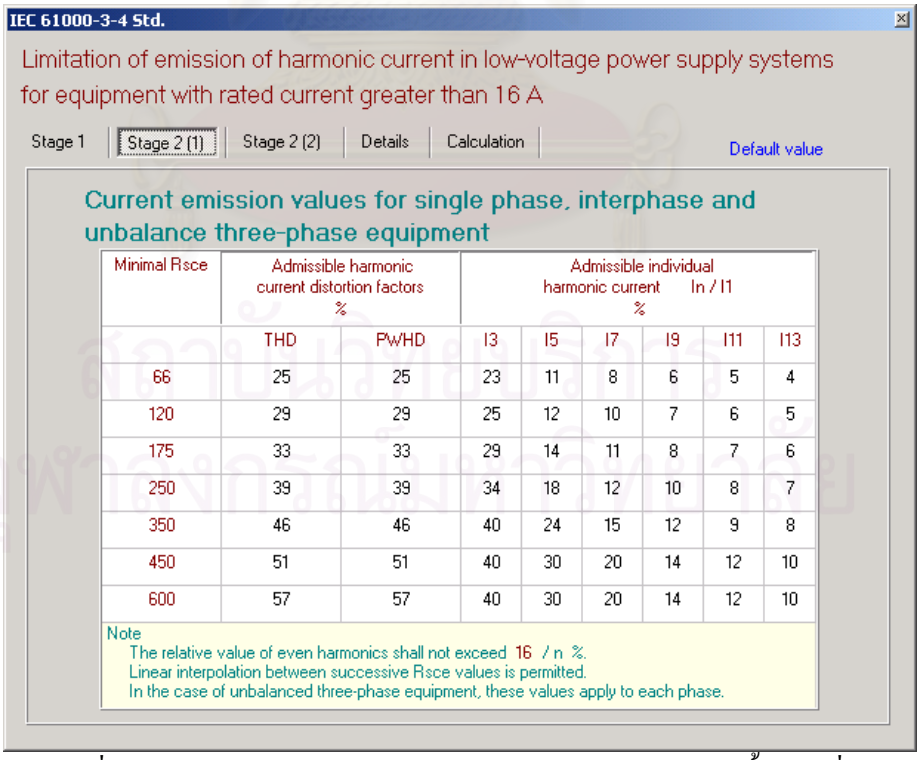
- ส่วนการคำนวณ

ใช้คำนวณหาขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกของโหลด ดังแสดงในรูปที่ 4.15



Harmonic number (n)	Admissible harmonic current In/I1 %	Harmonic number (n)	Admissible harmonic current In/I1 %
3	21.6	21	0.6
5	10.7	23	0.9
7	7.2	25	0.8
9	3.8	27	0.6
11	3.1	29	0.7
13	2	31	0.7
15	0.7	>= 33	0.6
17	1.2		
19	1.1	Even	<= 8 / n or <= 0.6

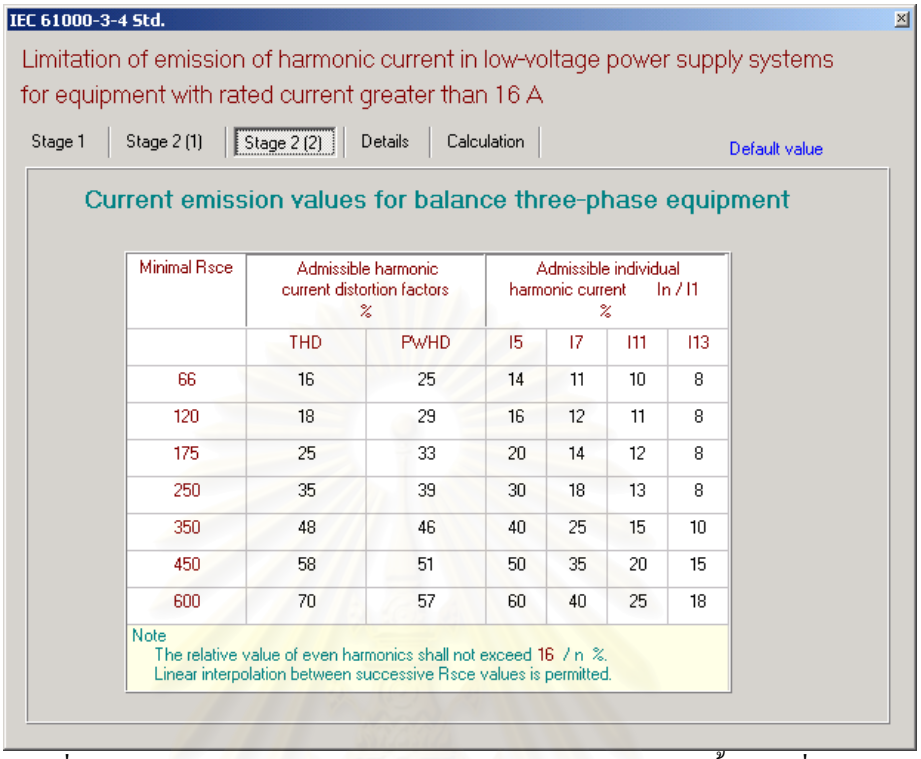
รูปที่ 4.11 หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน IEC 61000-3-4 ส่วนขีดจำกัดขั้นตอนที่ 1



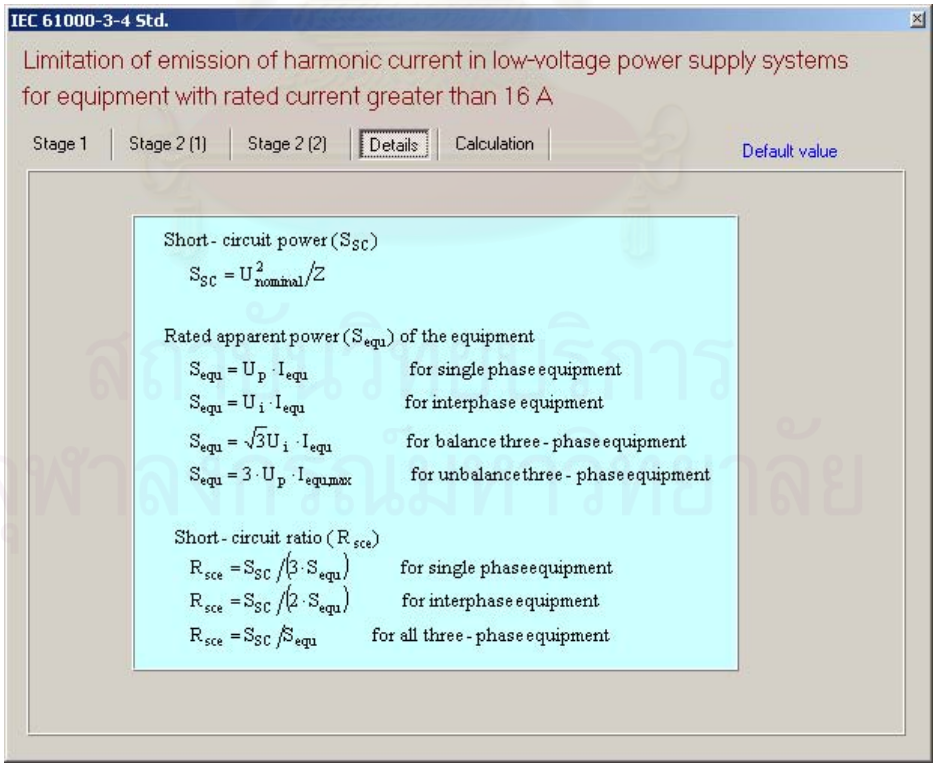
Minimal Rsce	Admissible harmonic current distortion factors %		Admissible individual harmonic current In / I1 %					
	THD	PWHD	I3	I5	I7	I9	I11	I13
66	25	25	23	11	8	6	5	4
120	29	29	25	12	10	7	6	5
175	33	33	29	14	11	8	7	6
250	39	39	34	18	12	10	8	7
350	46	46	40	24	15	12	9	8
450	51	51	40	30	20	14	12	10
600	57	57	40	30	20	14	12	10

Note
The relative value of even harmonics shall not exceed 16 / n %.
Linear interpolation between successive Rsce values is permitted.
In the case of unbalanced three-phase equipment, these values apply to each phase.

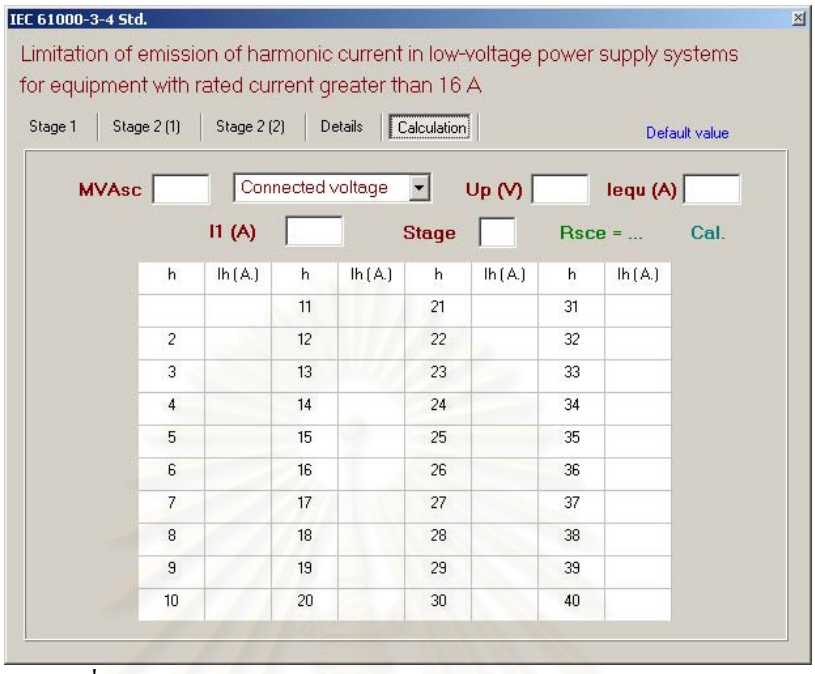
รูปที่ 4.12 หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน IEC 61000-3-4 ส่วนขีดจำกัดขั้นตอนที่ 2



รูปที่ 4.13 หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน IEC 61000-3-4 ส่วนขีดจำกัดขั้นตอนที่ 2 (ต่อ)



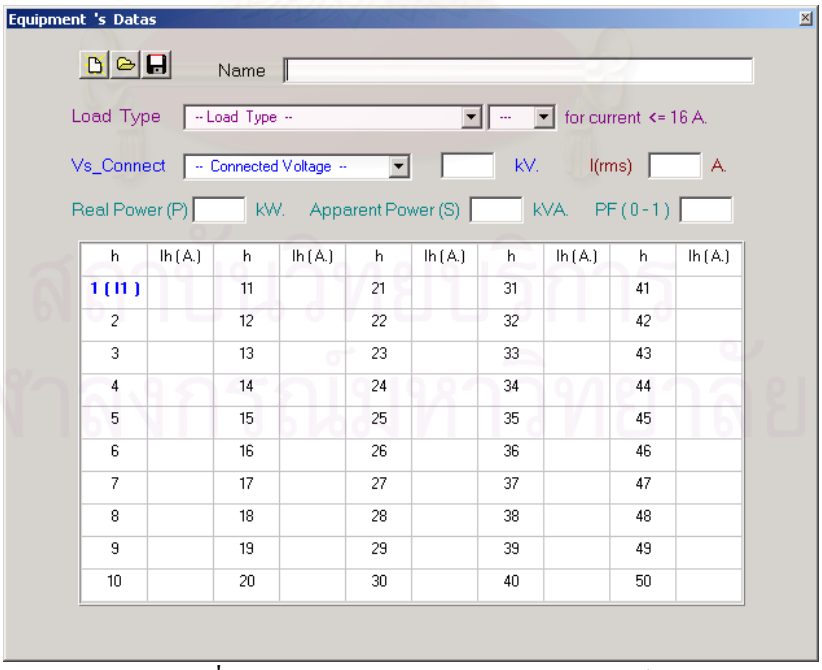
รูปที่ 4.14 หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน IEC 61000-3-4 ส่วนรายละเอียด



รูปที่ 4.15 หน้าต่างข้อมูลมาตรฐาน IEC 61000-3-4 ส่วนการคำนวณ

4.1.4 หน้าต่างข้อมูลรายละเอียดของอุปกรณ์

ในส่วนของข้อมูลรายละเอียดอุปกรณ์นั้นมีด้วยกัน 1 หน้าคือ หน้ารับข้อมูลต่างๆ ของอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 หน้าต่างข้อมูลรายละเอียดอุปกรณ์

4.2 ส่วนการประเมิน

ในส่วนการประเมินนั้นแบ่งได้เป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ

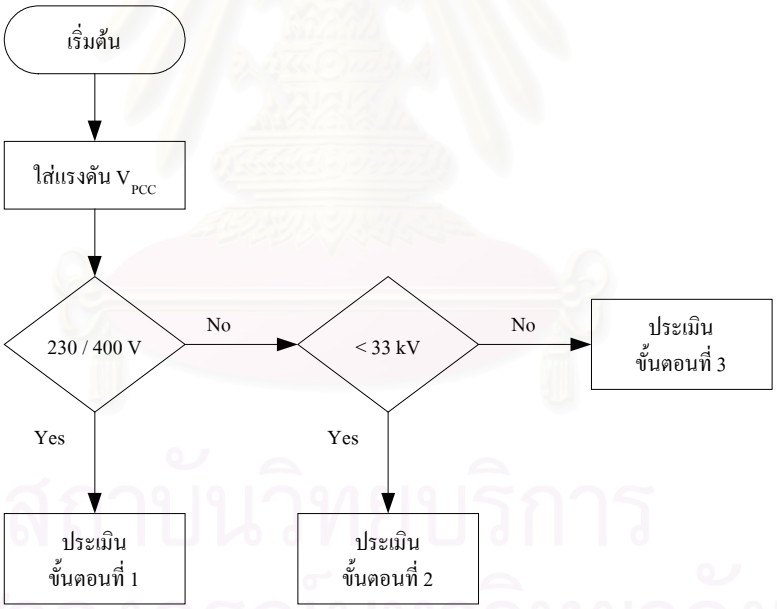
- ส่วนป้อนข้อมูล

  รับข้อมูลต่างๆ แล้วแต่ว่าประเมินในขั้นตอนใด ดังแสดงในรูปที่ 4.17

  - ขั้นตอนที่ 1
    - โหลดรวมไม่เกิน 16 แอมแปร์
    - โหลดรวมมากกว่า 16 แอมแปร์
  - ขั้นตอนที่2
  - ขั้นตอนที่ 3
  - ส่วนแก้ปัญหาสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันต่ำ

- ส่วนแสดงผล

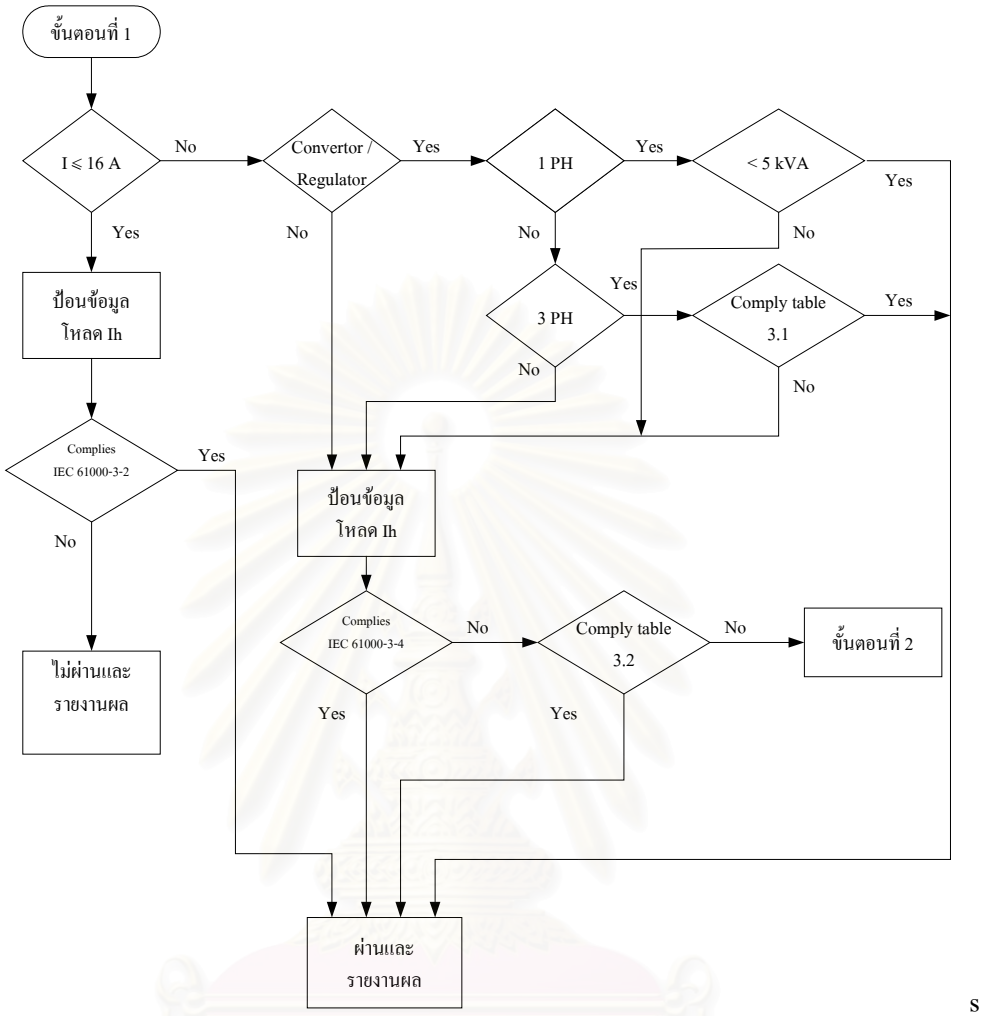
  แสดงผลการประเมินว่าผ่าน ไม่ผ่าน มีตาราง กราฟ หรือไปประเมินขั้นต่อไป



รูปที่ 4.17 แผนภูมิแสดงส่วนป้อนข้อมูลทั้งหมด

4.2.1 ส่วนป้อนข้อมูลในขั้นตอนที่ 1

โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในส่วนขั้นตอนที่ 1 สามารถเขียนเป็นแผนภูมิได้ดังรูปที่ 4.18

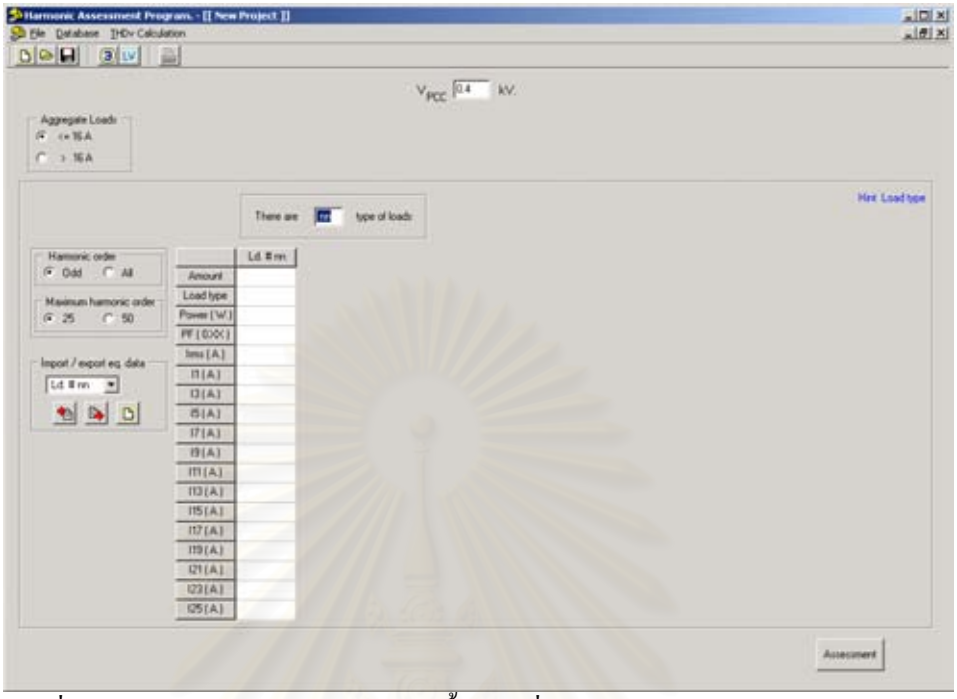


s

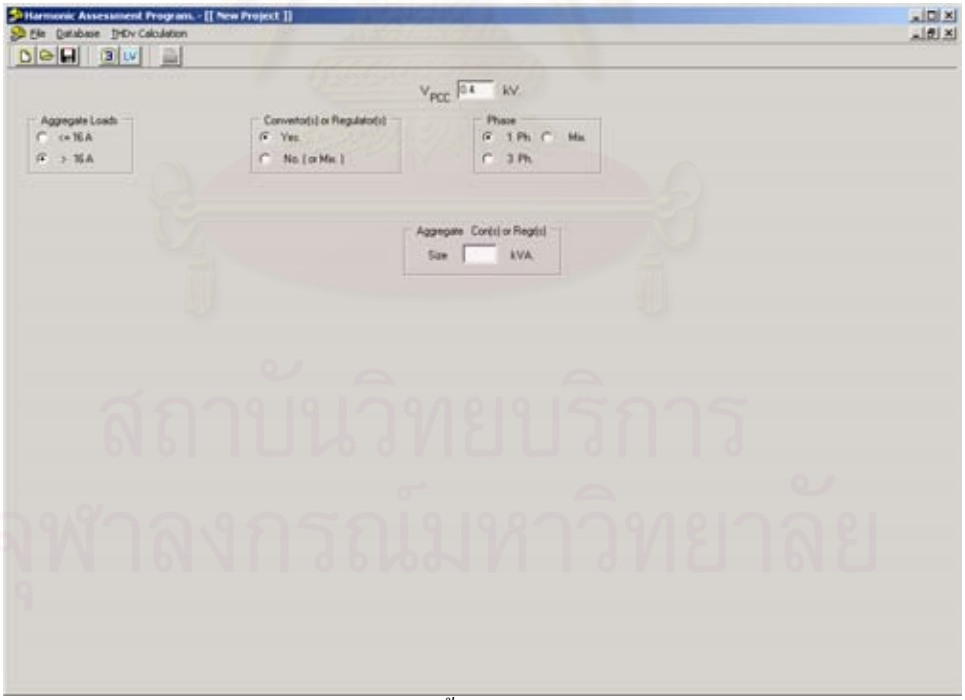
รูปที่ 4.18 แผนภูมิแสดงการทำงานในขั้นตอนที่ 1

ข้อมูลที่ใช้ในการประเมินขั้นตอนที่ 1 นี้มีหลายแบบ โดยมีดังนี้

- โหลดรวมไม่เกิน 16 แอมแปร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.19
- โหลดรวมมากกว่า 16 แอมแปร์
  - o โหลดเป็นเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าหรือตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 4.20
  - o โหลดเป็นเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าหรือตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 4.21
  - o โหลดเป็นเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าหรือตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส และ 3 เฟส ผสมกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.22
  - o โหลดประเภทอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.23

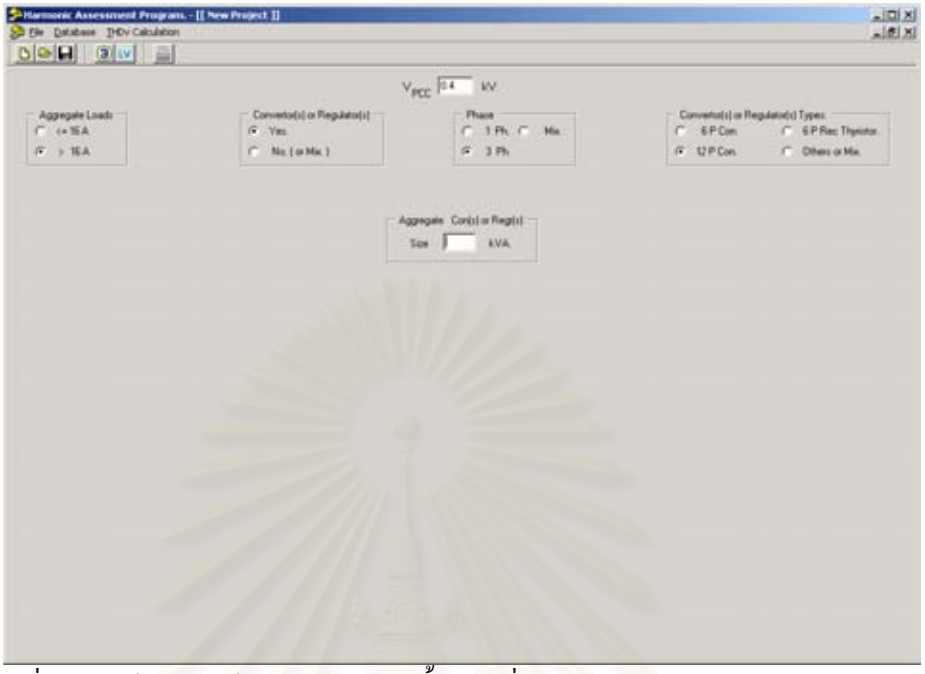


รูปที่ 4.19 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินขั้นตอนที่ 1 กรณีโหลดรวมไม่เกิน 16 แอมแปร์

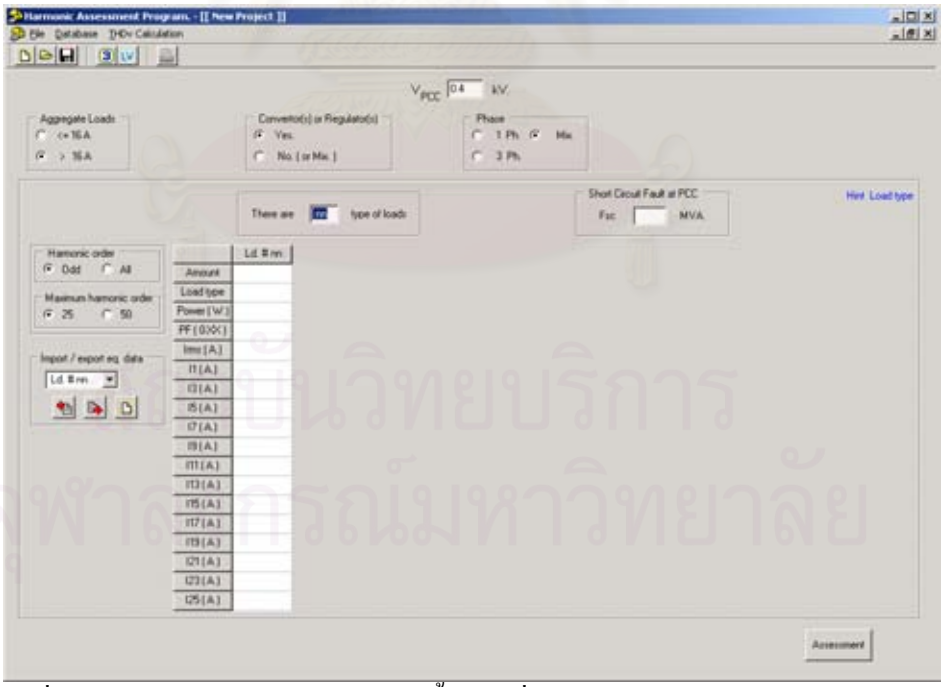


รูปที่ 4.20 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินขั้นตอนที่ 1 กรณีโหลดรวมมากกว่า 16 แอมแปร์ โดยโหลดเป็นเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าหรือตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับ1 เฟส

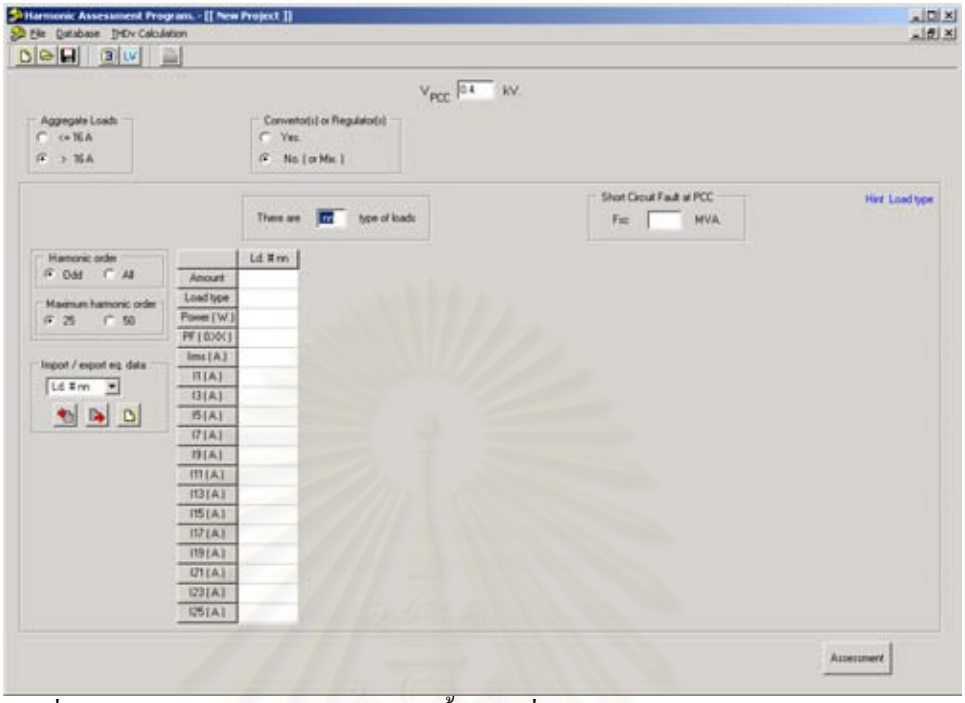
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.21 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินขั้นตอนที่ 1 กรณีโหลดรวมมากกว่า 16 แอมแปร์ โดยโหลดเป็นเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าหรือตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับ3 เฟส

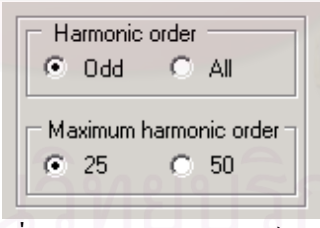


รูปที่ 4.22 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินขั้นตอนที่ 1 กรณีโหลดรวมมากกว่า 16 แอมแปร์ โดยโหลดเป็นเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าหรือตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับ1 เฟสและ 3 เฟสผสมกัน



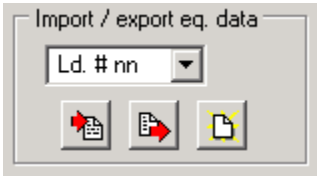
รูปที่ 4.23 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินขั้นตอนที่ 1 กรณีโหลดรวมมากกว่า 16 แอมแปร์ โดยโหลดเป็นโหลดประเภทอื่นๆ

ในการประเมินนี้จะให้ผู้ใช้โปรแกรมเลือกว่าจะประเมินถึงอันดับฮาร์มอนิกที่เท่าไร (25, 50) อีกทั้งยังให้เลือกได้อีกว่าจะประเมินทุกอันดับฮาร์มอนิกหรือเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับคี่เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ตัวเลือกอันดับฮาร์มอนิก

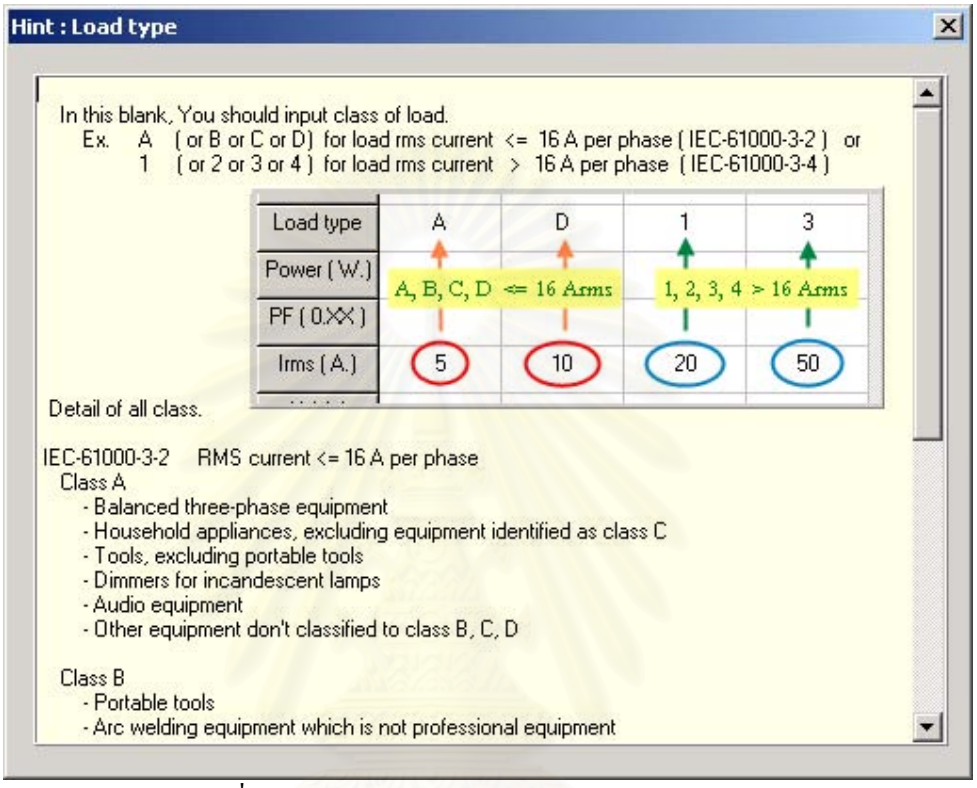
นอกจากนี้ผู้ใช้ยังสามารถดึงข้อมูลหรือส่งข้อมูลไปเก็บเป็นไฟล์เอาไว้ได้อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.25



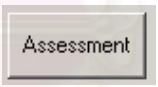
รูปที่ 4.25 ส่วนนำเข้า ส่งข้อมูล โดยเก็บเป็นไฟล์

ถ้าผู้ใช้ไม่เข้าใจวิธีการป้อนข้อมูลให้คลิกที่

แล้วจะปรากฏหน้าต่างแสดงวิธีการป้อนข้อมูลขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 หน้าต่างแสดงรายละเอียดของการป้อนข้อมูล

เมื่อผู้ใช้ป้อนข้อมูลครบถ้วนแล้วกดปุ่ม 

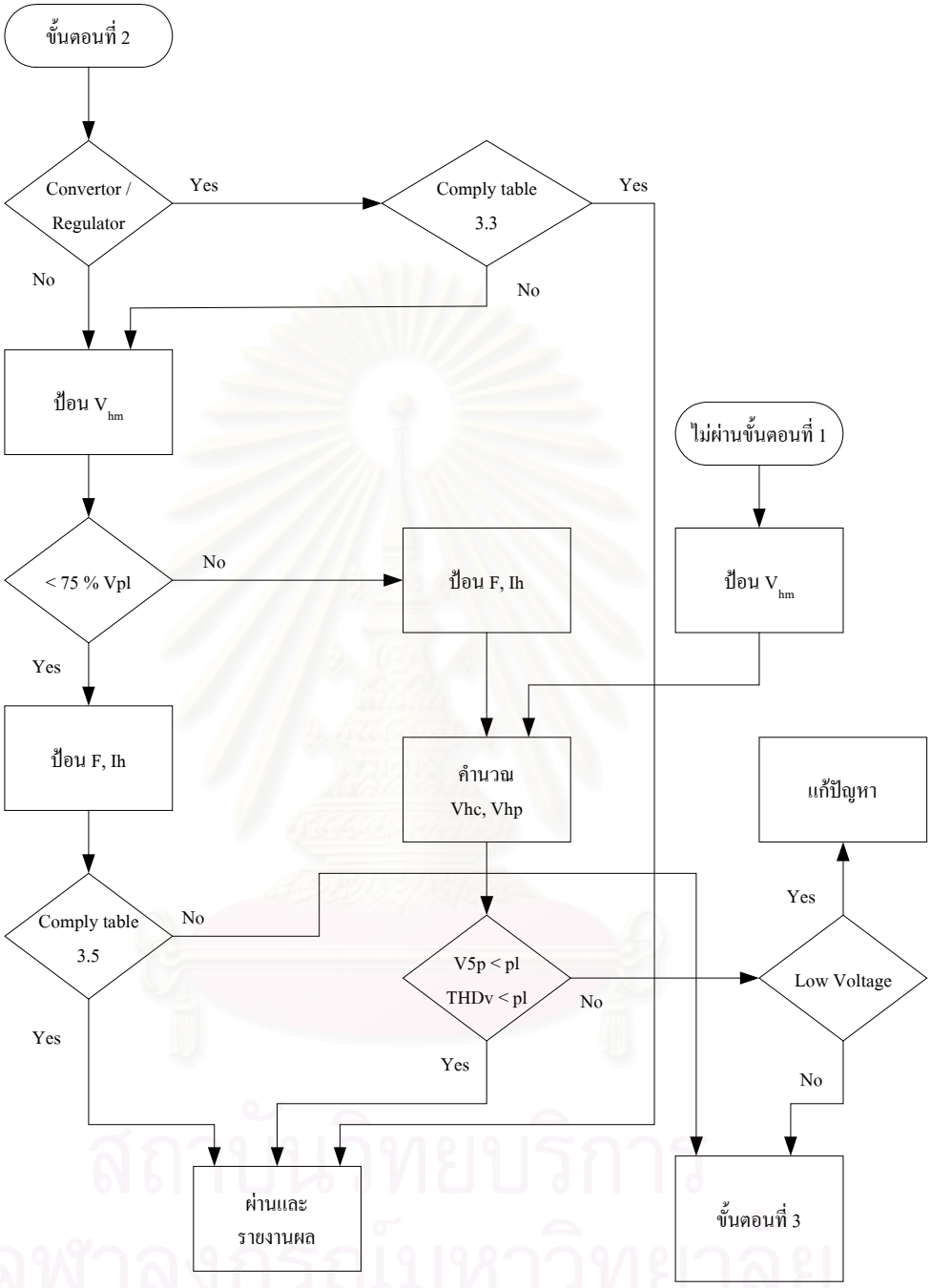
เพื่อคำนวณ จากนั้นโปรแกรมจะทำการแสดงผลการประเมินโดยแสดงข้อมูลเป็นตาราง กราฟ (รายละเอียดอยู่ในส่วนการแสดงผล อยู่ในหัวข้อต่อไป) โปรแกรมจะบอกว่าผ่านหรือไม่ผ่าน หรือต้องประเมินในขั้นที่ 2 ต่อไป

4.2.2 ส่วนป้อนข้อมูลในขั้นตอนที่ 2

โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในส่วนขั้นตอนที่ 2 สามารถเขียนเป็นแผนภูมิได้ดังรูปที่ 4.27

ข้อมูลที่ใช้ในการประเมินขั้นตอนที่ 2 นี้มีหลายแบบ โดยมีดังนี้

- โหลดเป็นเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าหรือตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 4.28
- โหลดอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.29
- โหลดที่ไม่ผ่านการประเมินในขั้นตอนที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.31



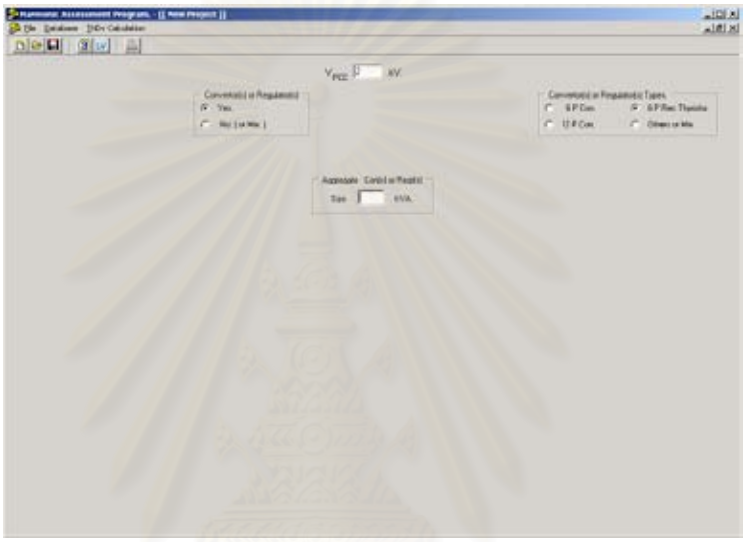
รูปที่ 4.27 แผนภูมิแสดงการทำงานในขั้นตอนที่ 2

ในกรณีแรงดัน ณ จุดต่อร่วมไม่ใช่แรงดันต่ำและแรงดันน้อยกว่า 33 กิโลโวลต์ ถ้าแรงดัน ณ จุดต่อร่วมนั้นมีค่าไม่เท่ากับแรงดันที่มีอยู่ในหน้าต่างรับข้อมูลมาตรฐาน G5/4 ก่อนป้อนข้อมูลจะมีหน้าต่างขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกระดับวางแผนขึ้นมาให้เลือกว่าจะใช้ค่าในตารางใด จากนั้นผู้ใช้จะใส่ข้อมูลแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิมในระบบ(Vhm)ดังแสดงในรูปที่ 4.30 แล้ว

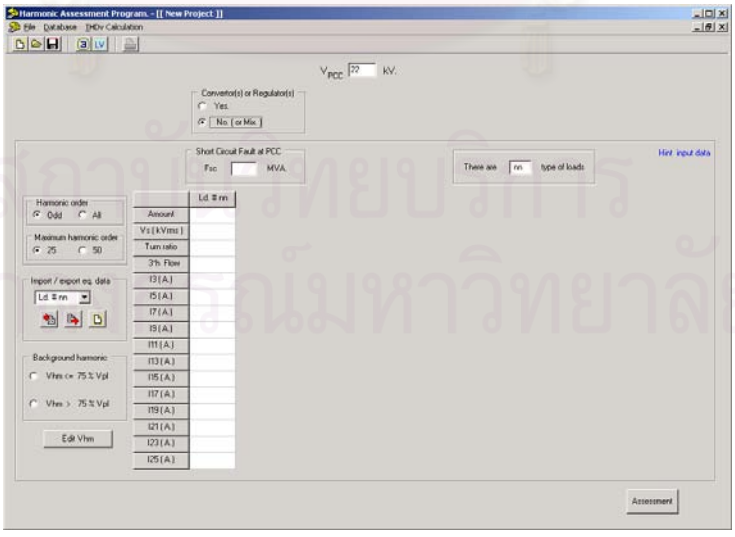
โปรแกรมจะทำการเช็คว่าแรงดันที่มีอยู่เดิมนั้นมากกว่าหรือน้อยกว่า 75 % ของขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกระดับวางแผน เพื่อเลือกว่าจะประเมินโดยดูกระแสฮาร์มอนิก(Vhm < 75 % Vpl) หรือประเมินโดยดูค่าแรงดันฮาร์มอนิก (Vhm > 75 % Vpl)

ถ้าผู้ใช้ไม่เข้าใจวิธีการป้อนข้อมูลให้คลิกที่

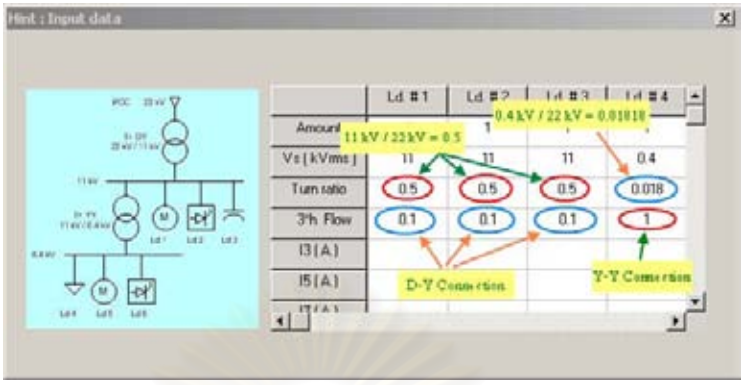
แล้วจะปรากฏหน้าต่างแสดงวิธีการป้อนข้อมูลขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 4.29 ข



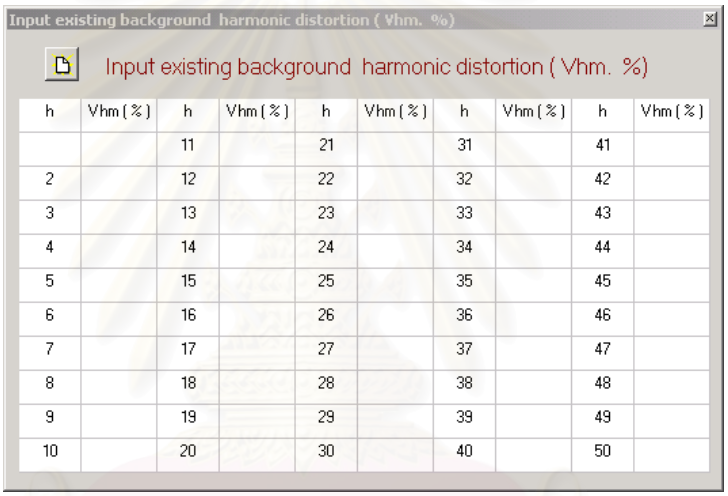
รูปที่ 4.28 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินขั้นตอนที่ 2 กรณีโหลดเป็นเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าหรือตัวคุมค่าไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส



รูปที่ 4.29 ก หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินขั้นตอนที่ 2 กรณีโหลดอื่นๆ

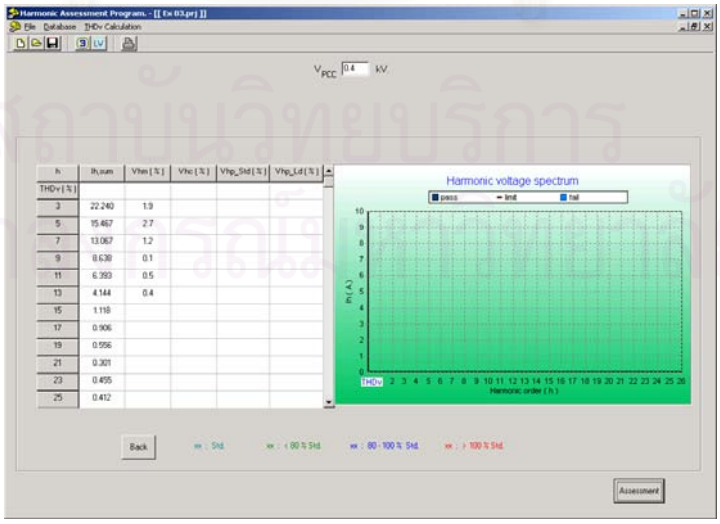


รูปที่ 4.29 ข หน้าต่างแสดงรายละเอียดของการป้อนข้อมูล



h	Vhm (%)	h	Vhm (%)	h	Vhm (%)	h	Vhm (%)	h	Vhm (%)
		11		21		31		41	
2		12		22		32		42	
3		13		23		33		43	
4		14		24		34		44	
5		15		25		35		45	
6		16		26		36		46	
7		17		27		37		47	
8		18		28		38		48	
9		19		29		39		49	
10		20		30		40		50	

รูปที่ 4.30 หน้าต่างรับข้อมูลแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิมในระบบ(Vhm)



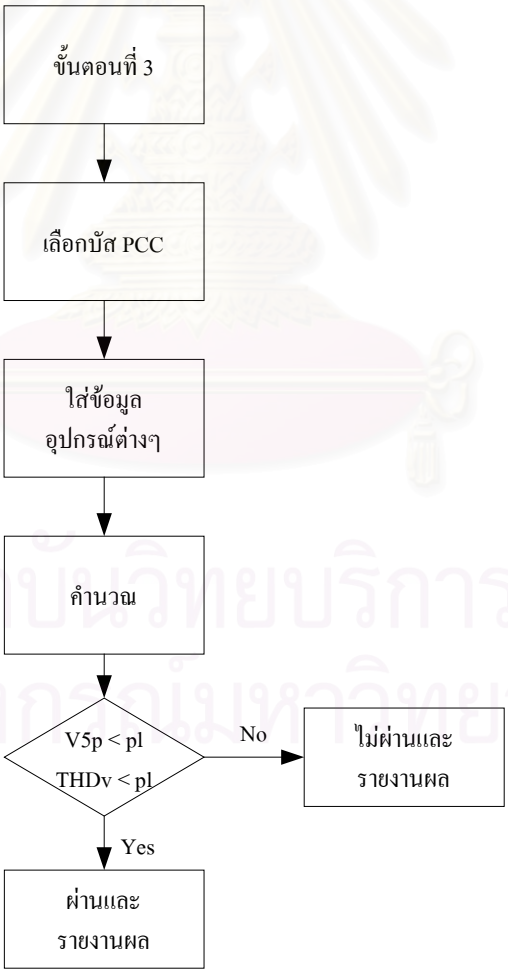
รูปที่ 4.31 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินขั้นตอนที่ 2 ในกรณีไม่ผ่านการประเมินขั้นตอนที่ 1

ในกรณีโหลดไม่ผ่านการประเมินขั้นตอนที่ 1 เมื่อมาสู่การประเมินขั้นตอนที่ 2 ผู้ใช้เพียงใส่ค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิมในระบบเท่านั้น เนื่องจากข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกได้ทำการวิเคราะห์หามาเรียบร้อยแล้วในการประเมินขั้นตอนที่ 1 จากนั้นก็กดปุ่ม Assessment เพื่อประเมิน ถ้าหากยังไม่ผ่านก็ไปสู่ส่วนการแก้ปัญหาซึ่งจะแสดงในหัวข้อ 4.2.4

สำหรับโหลดที่ไม่ใช่แรงดันต่ำก็เช่นเดียวกันคือเมื่อใส่ข้อมูลครบถ้วนแล้วก็กดปุ่ม Assessment เพื่อประเมิน โดยมีรายละเอียดเป็นตาราง กราฟแสดงออกมา ถ้าไม่ผ่านการประเมินก็ไปสู่การประเมินขั้นตอนที่ 3 ต่อไป

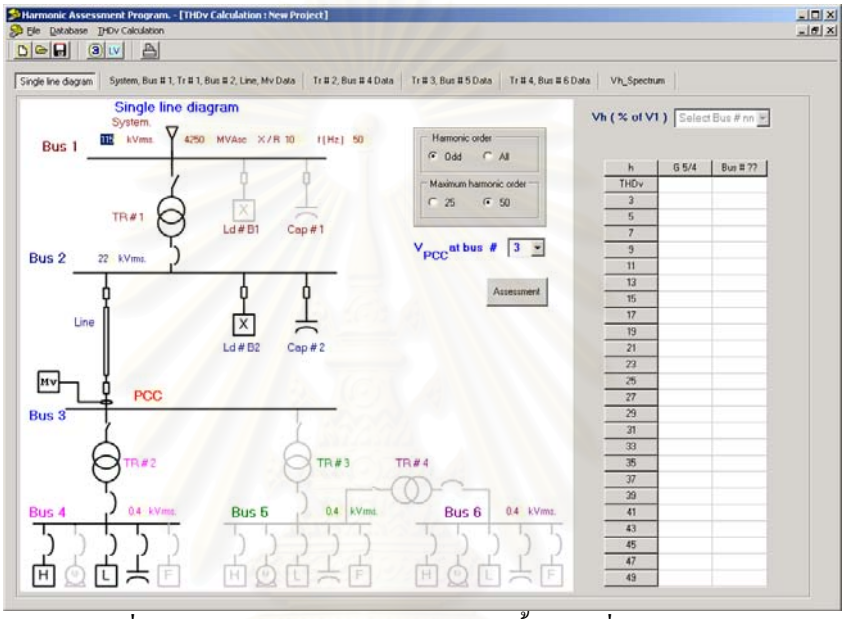
4.2.3 ส่วนป้อนข้อมูลในขั้นตอนที่ 3

โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในส่วนขั้นตอนที่ 3 สามารถเขียนเป็นแผนภูมิได้ดังรูปที่ 4.32

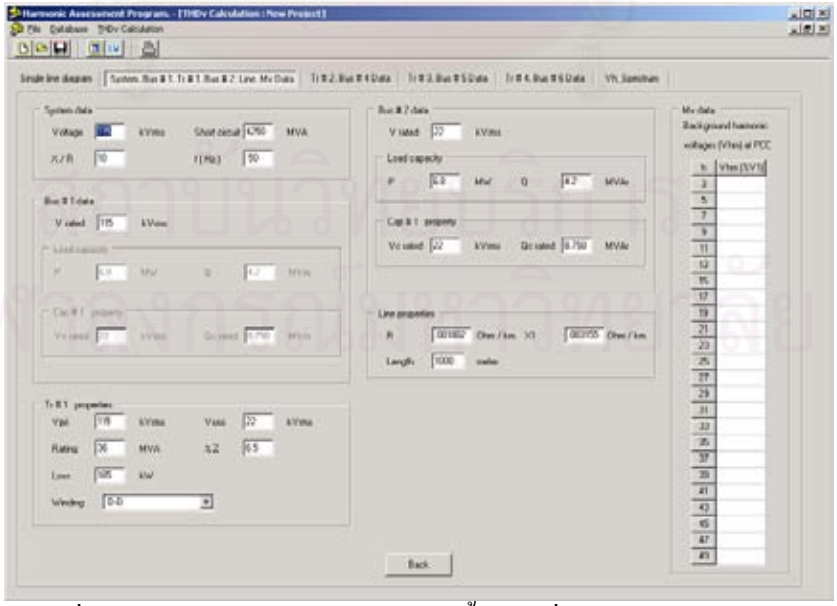


รูปที่ 4.32 แผนภูมิแสดงการทำงานในขั้นตอนที่ 3

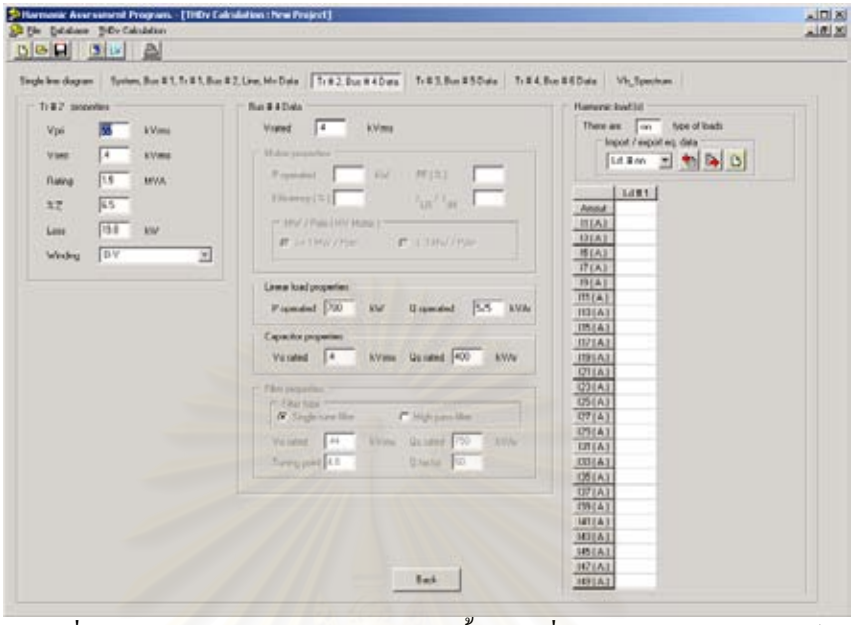
การประเมินขั้นตอนที่ 3 ในงานวิจัยนี้ พิจารณาระบบ 6 บัส ดังแสดงในรูปที่ 4.33 โดยให้ผู้ใช้โปรแกรมทำการเลือกว่าจะเอาบัสใดเป็น จุดต่อร่วม จากนั้นก็ใส่ข้อมูลต่างๆในหน้าหลักนี้ ถ้าไม่ต้องการให้อุปกรณ์ทำงาน ก็ทำการดับเบิ้ลคลิกที่เบรกเกอร์ของอุปกรณ์นั้นๆ ทำเช่นเดียวกันถ้าต้องการให้อุปกรณ์ทำงาน เมื่อจะป้อนข้อมูลของอุปกรณ์นั้นก็ให้ดับเบิ้ลคลิกที่รูปของอุปกรณ์นั้นๆ หรือไม่ก็เปลี่ยนหน้าไปยังหน้าที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 4.34, 4.35



รูปที่ 4.33 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินขั้นตอนที่ 3 (หน้าหลัก)



รูปที่ 4.34 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินขั้นตอนที่ 3 ใส่รายละเอียดระบบ

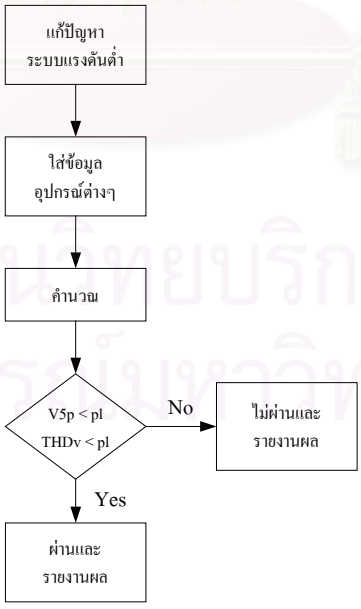


รูปที่ 4.35 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินขั้นตอนที่ 3 ใส่รายละเอียดอุปกรณ์

เมื่อใส่ข้อมูลครบถ้วนแล้วก็ให้กลับไปยังหน้าหลักเพื่อกดปุ่ม Assessment ในการประเมิน ซึ่งจะมีการแสดงผลออกมาเป็นตาราง กราฟ และบอกด้วยว่าบัสนั้นๆ ผ่านการประเมินตามมาตรฐาน G5/4 หรือไม่

4.2.4 ส่วนป้อนข้อมูลในส่วนแก้ปัญหาสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันต่ำ

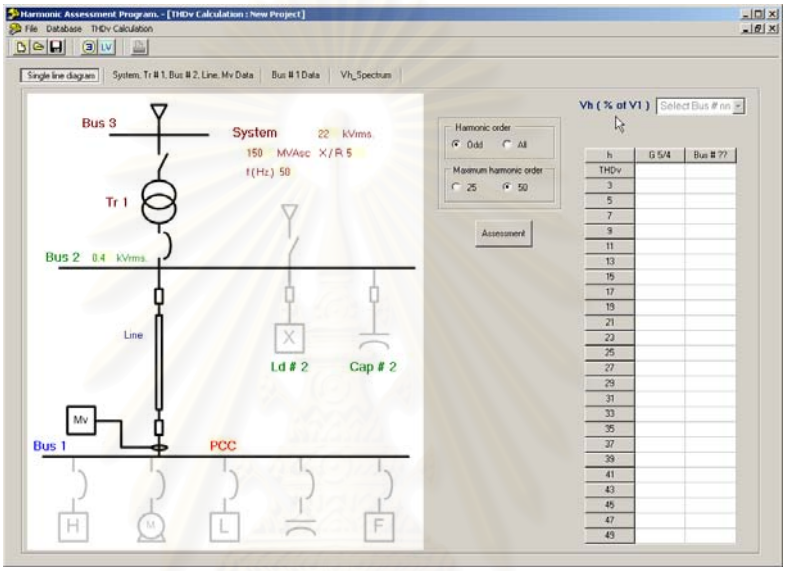
โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในส่วนนี้แสดงดังรูปที่ 4.36



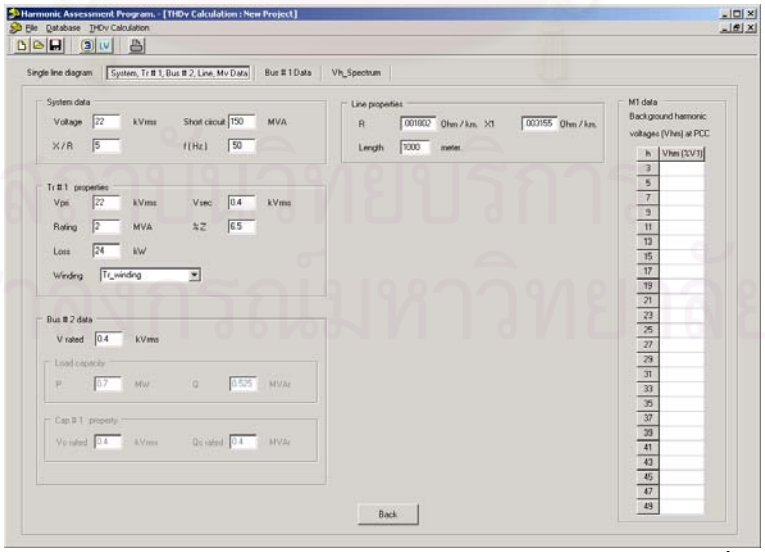
รูปที่ 4.36 แผนภูมิแสดงการทำงานในส่วนการแก้ปัญหาสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันต่ำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

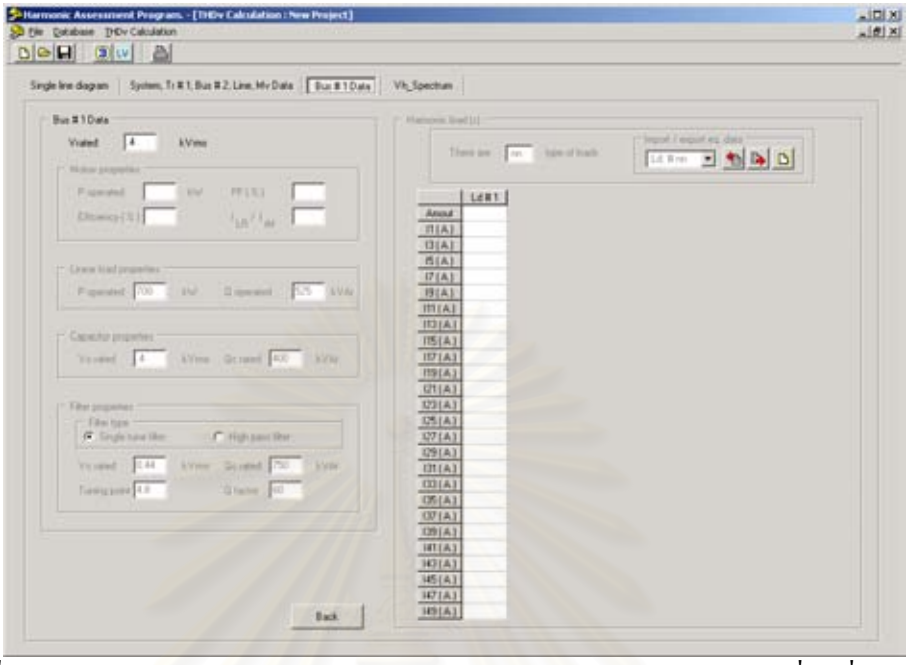
การประเมินในขั้นตอนนี้มีหน้าต่างหลักแสดงดังรูปที่ 4.37 โดยในขั้นตอนแรกให้ผู้ใช้เลือกว่าจะมองระบบส่งจ่ายไฟฟ้า ณ ระดับแรงดันเดียวกัน หรือมองไปถึงระบบจำหน่ายเลย จากนั้นก็ทำการป้อนข้อมูลของระบบ โหลดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.38 , 4.39 ให้เรียบร้อย เมื่อจะทำการประเมินก็กลับมายังหน้าหลักก่อน แล้วกดปุ่ม เพื่อประเมิน ซึ่งจะมีการแสดงผลออกมาเป็นตาราง กราฟ และบอกด้วยว่าบัสนั้นๆ ผ่านการประเมินตามมาตรฐาน G5/4 หรือไม่



รูปที่ 4.37 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินในส่วนการแก้ปัญหาสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันต่ำ(หน้าหลัก)



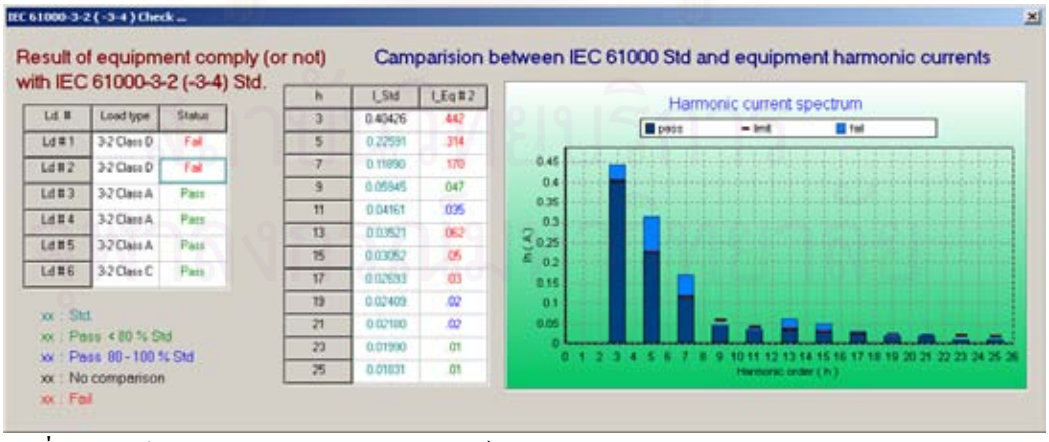
รูปที่ 4.38 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินในส่วนการแก้ปัญหาสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันต่ำ ใส่ข้อมูลระบบ



รูปที่ 4.39 หน้าต่างรับข้อมูลการประเมินในส่วนการแก้ปัญหาสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันต่ำ ใส่ข้อมูลโหลด

4.2.5 ส่วนแสดงผลตรวจสอบอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-4

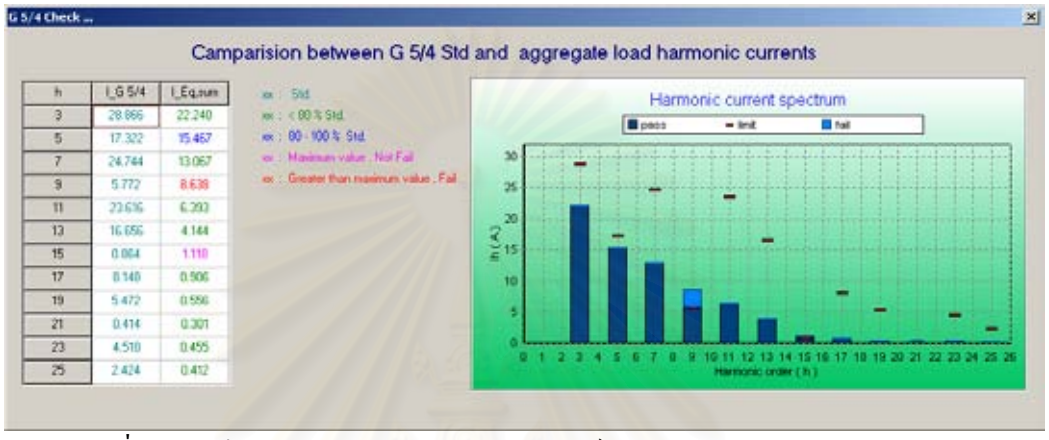
หน้าต่างนี้จะปรากฏเฉพาะการประเมินในขั้นตอนที่ 1 เท่านั้นโดยจะแสดงว่าอุปกรณ์แต่ละตัวผ่านหรือไม่ผ่าน โดยแสดงเป็นตารางและกราฟเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 หน้าต่างแสดงผลตรวจสอบอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-4

4.2.6 ส่วนแสดงผลตรวจสอบกระแสฮาร์มอนิกรวมเทียบกับมาตรฐาน G5/4

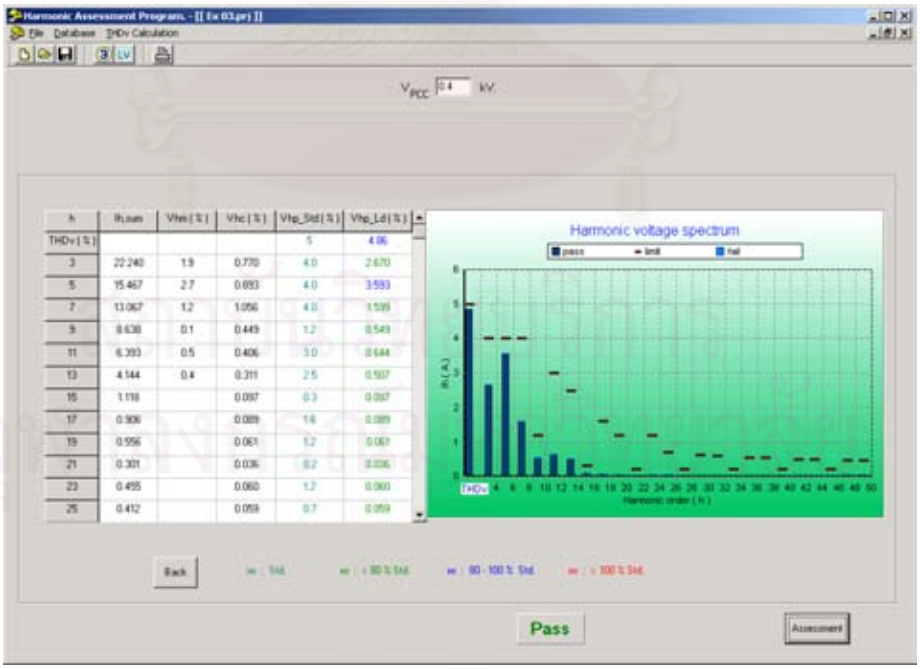
หน้าต่างนี้จะปรากฏในการประเมินในขั้นตอนที่ 1 และ 2 เท่านั้น โดยจะแสดงว่าโหลดรวมทั้งหมดสร้างกระแสฮาร์มอนิกออกมารวมกันผ่านหรือไม่ผ่านตามมาตรฐาน G5/4 โดยแสดงเป็นตารางและกราฟเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 4.41



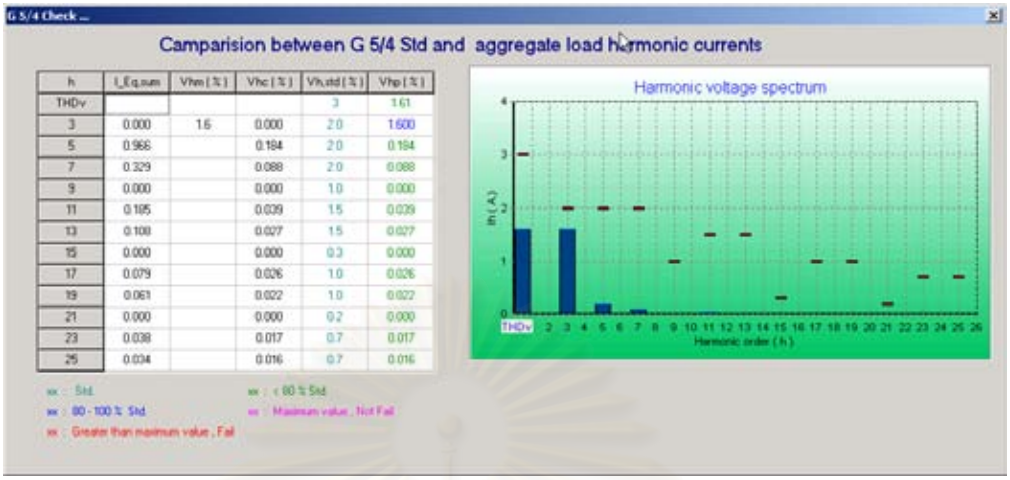
รูปที่ 4.41 หน้าต่างแสดงผลตรวจสอบกระแสฮาร์มอนิกรวมเทียบกับมาตรฐาน G5/4

4.2.7 ส่วนแสดงผลตรวจสอบแรงดันฮาร์มอนิกเทียบกับมาตรฐาน G 5/4 ในขั้นตอนที่ 2

การแสดงผลส่วนนี้มี 2 กรณีคือ กรณีโหลดต่อกับระบบแรงดันต่ำ และกรณีโหลดไม่ได้ต่อกับระบบแรงดันต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 4.42 และ 4.43 ตามลำดับ



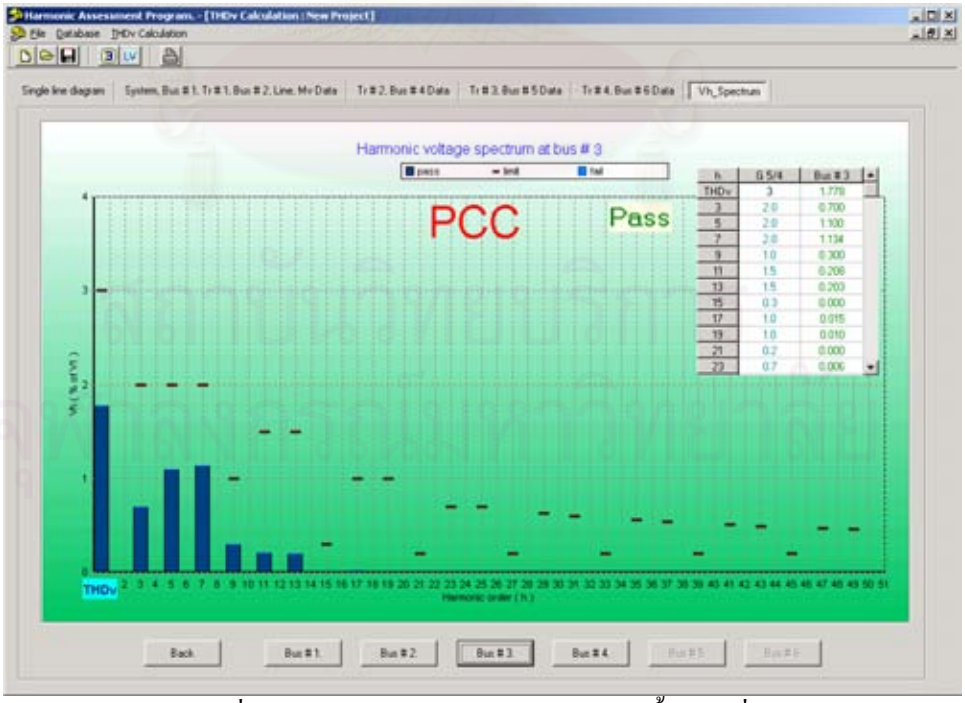
รูปที่ 4.42 หน้าต่างแสดงผลตรวจสอบแรงดันฮาร์มอนิกเทียบกับมาตรฐาน G5/4 สำหรับโหลดที่ต่อกับระบบแรงดันต่ำ



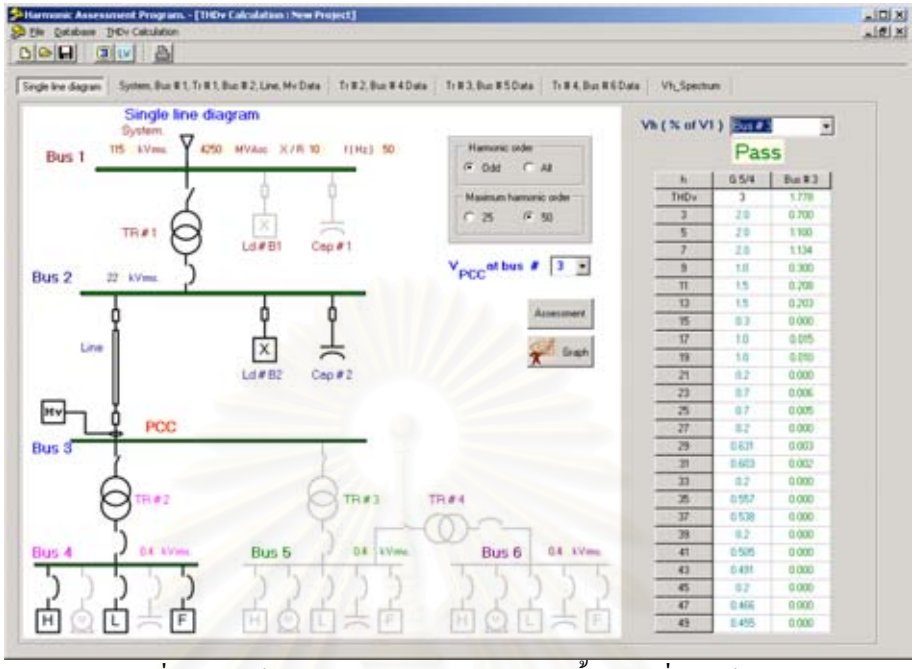
รูปที่ 4.43 หน้าต่างแสดงผลตรวจสอบแรงดันฮาร์มอนิกเทียบกับมาตรฐาน G5/4 สำหรับโหลดที่ไม่ได้ต่อกับระบบแรงดันต่ำ

4.2.8 ส่วนแสดงผลในการประเมินขั้นตอนที่ 3

แสดงผลเป็นตารางและกราฟ แล้วแต่ว่าผู้ใช้ไฟฟ้าสนใจที่บัสใด โดยคลิกไปที่บัสนั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.44 นอกจากนี้ที่หน้าจอหลักยังแสดงสีของบัสด้วยว่าเป็นสีอะไร โดยมีสีเขียว สีน้ำเงิน และสีแดงซึ่งเป็นการบอกสถานะความผิดเพี้ยนของแรงดัน ณ บัสนั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.45



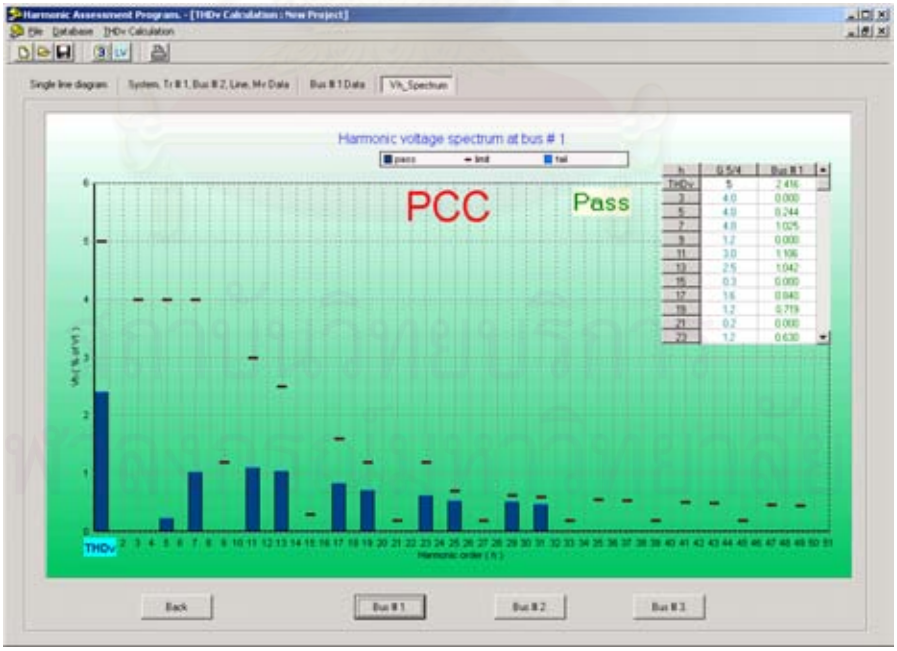
รูปที่ 4.44 หน้าต่างแสดงผลการประเมินในขั้นตอนที่ 3



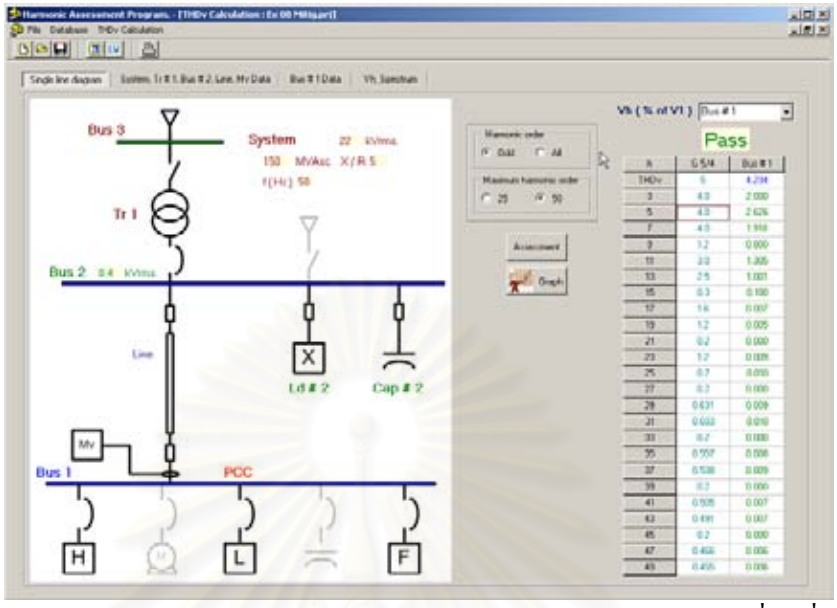
รูปที่ 4.45 หน้าต่างแสดงผลการประเมินในขั้นตอนที่ 3 หน้าหลัก

4.2.9 ส่วนแสดงผลในการแก้ปัญหาสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันต่ำ

การแสดงผลในส่วนนี้ก็ทำนองเดียวกันกับการแสดงผลในขั้นตอนที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 4.46และรูปที่ 4.47



รูปที่ 4.46 หน้าต่างแสดงผลการประเมินในส่วนการแก้ปัญหาสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันต่ำ



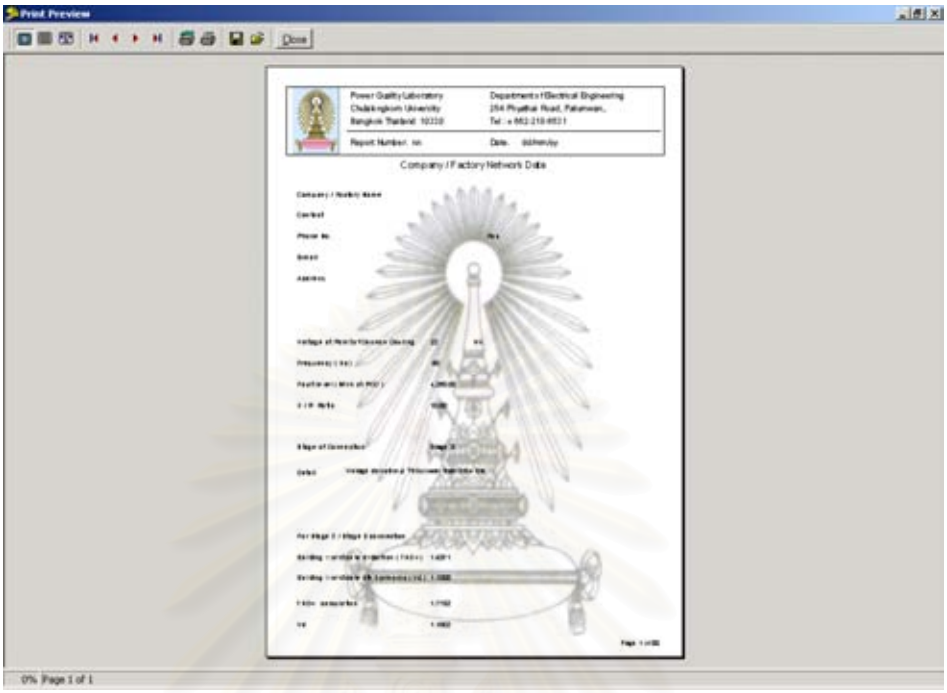
รูปที่ 4.47 หน้าต่างแสดงผลการประเมินในส่วนการแก้ปัญหาสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันต่ำ หน้าหลัก

4.3 ส่วนรายงาน

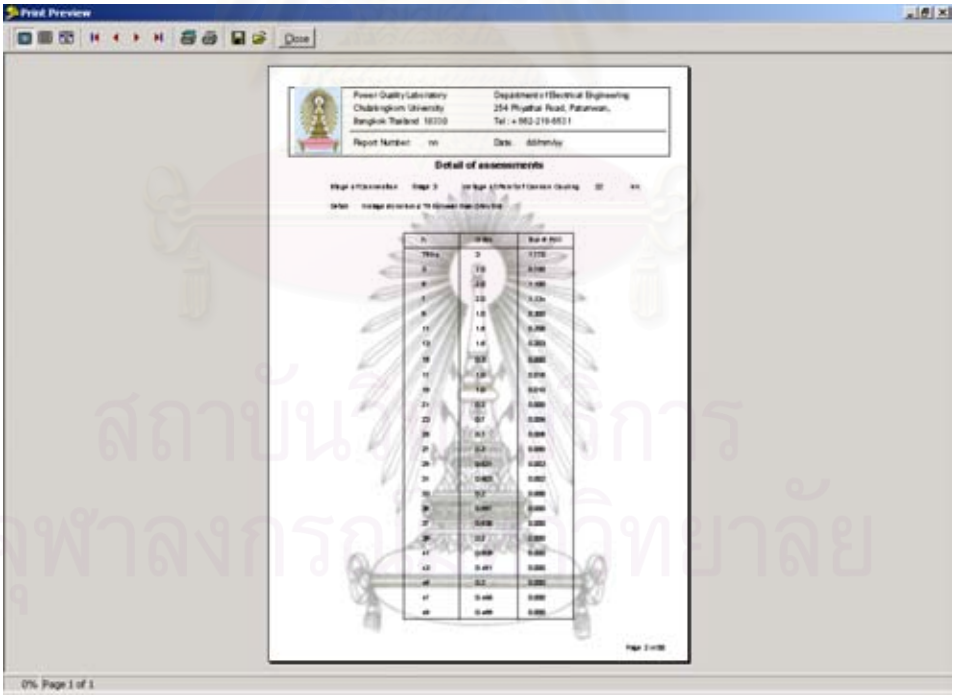
ในส่วนของรายงานนี้จะประกอบไปด้วย

- หน้าแสดงรายละเอียดของผู้ใช้ไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.48
- หน้าแสดงรายละเอียดว่าผ่านการประเมินขั้นตอนใด พร้อมทั้งตารางกระแสฮาร์มอนิก หรือตารางแรงดันฮาร์มอนิก ดังแสดงในรูปที่ 4.49
- หน้าแสดงกราฟกระแสฮาร์มอนิกหรือแรงดันฮาร์มอนิก ดังแสดงในรูปที่ 4.50
- หน้าแสดง Single line diagram มีเฉพาะการประเมินขั้นตอนที่ 3 และ การแก้ปัญหาสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันต่ำ เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.51
- หน้าแสดงรายละเอียดของระบบ หม้อแปลง สายส่งมีเฉพาะการประเมินขั้นตอนที่ 3 และ การแก้ปัญหาสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันต่ำ เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.52
- หน้าแสดงรายละเอียดโหลดของผู้ใช้ไฟฟ้า มีเฉพาะการประเมินขั้นตอนที่ 3 และ การแก้ปัญหาสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันต่ำ เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.53 และ รูปที่ 4.54

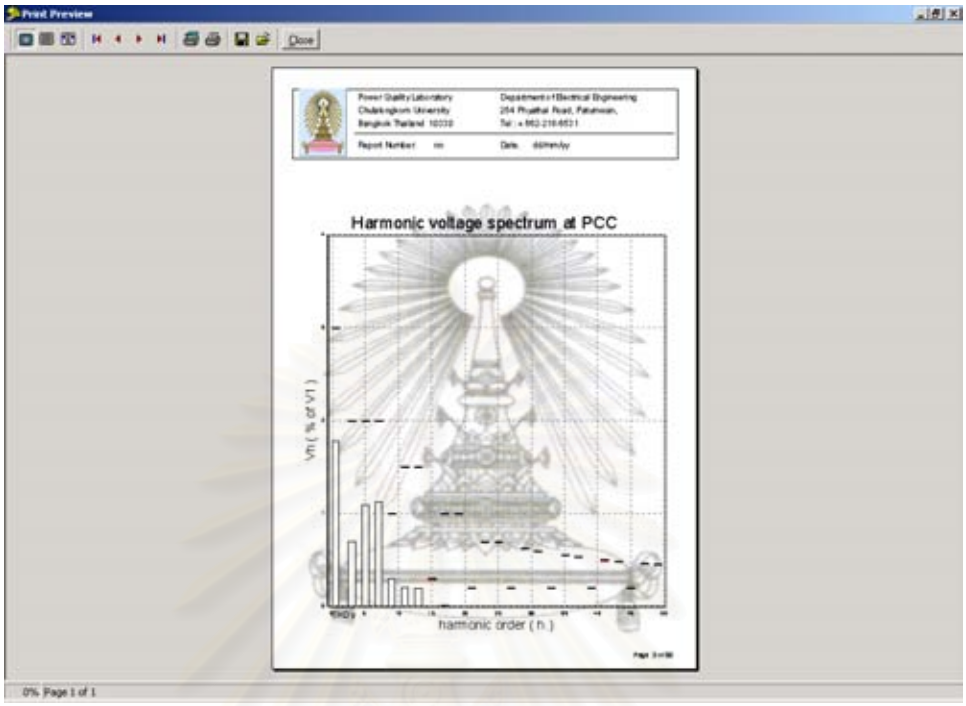
สามารถดูเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ค



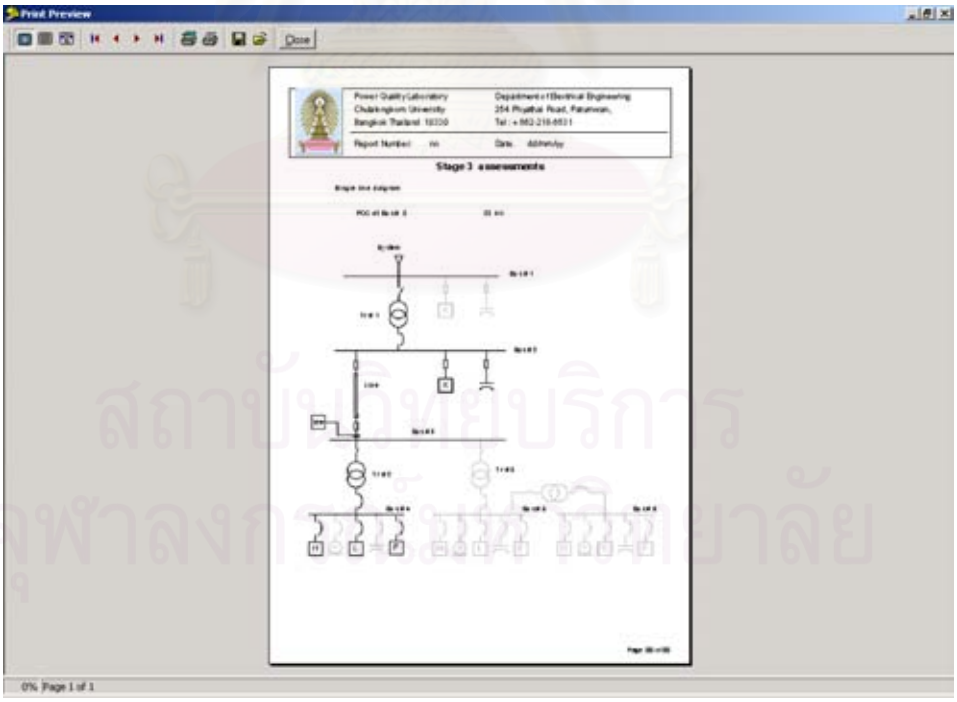
รูปที่ 4.48 หน้าแสดงรายละเอียดของผู้ใช้ไฟฟ้า



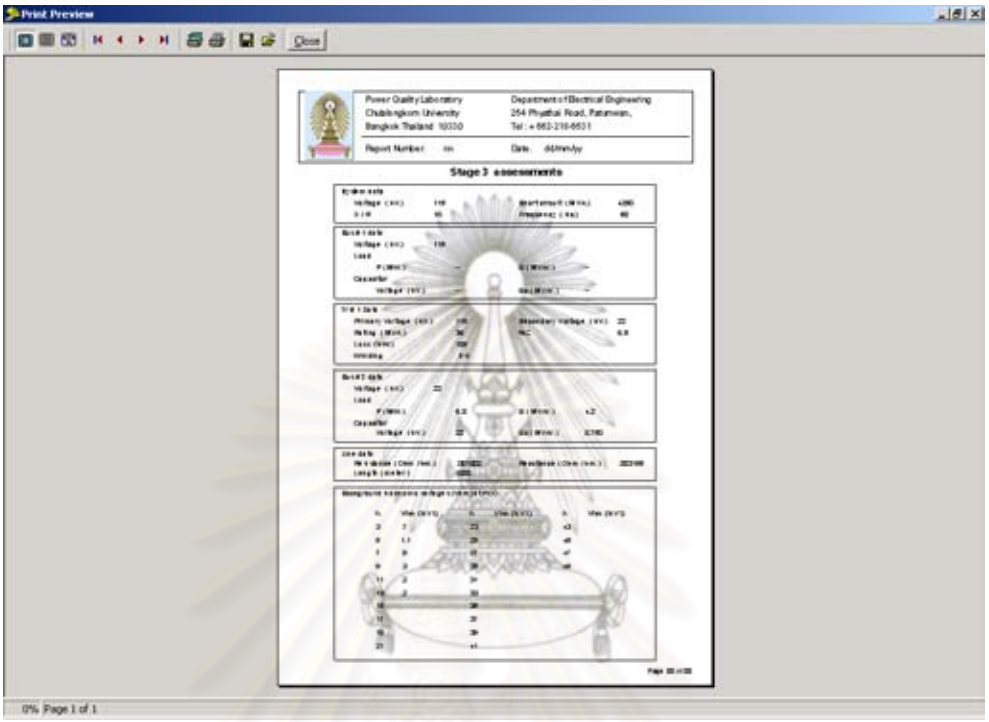
รูปที่ 4.49 หน้าแสดงรายละเอียดในการผ่านการประเมิน



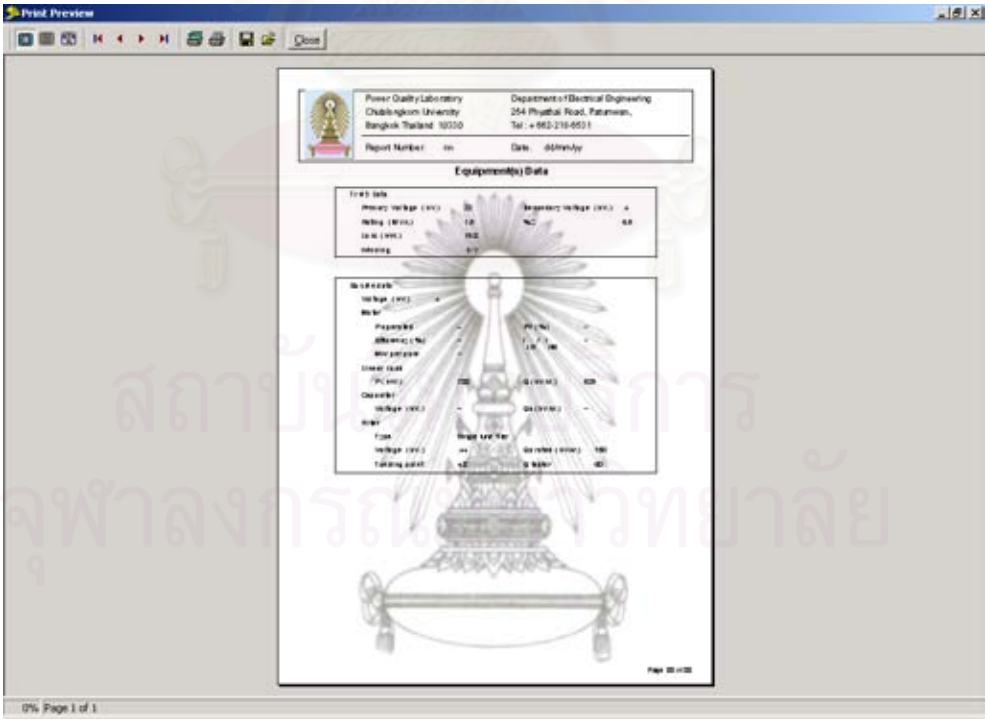
รูปที่ 4.50 หน้าแสดงกราฟแรงดันฮาร์มอนิก



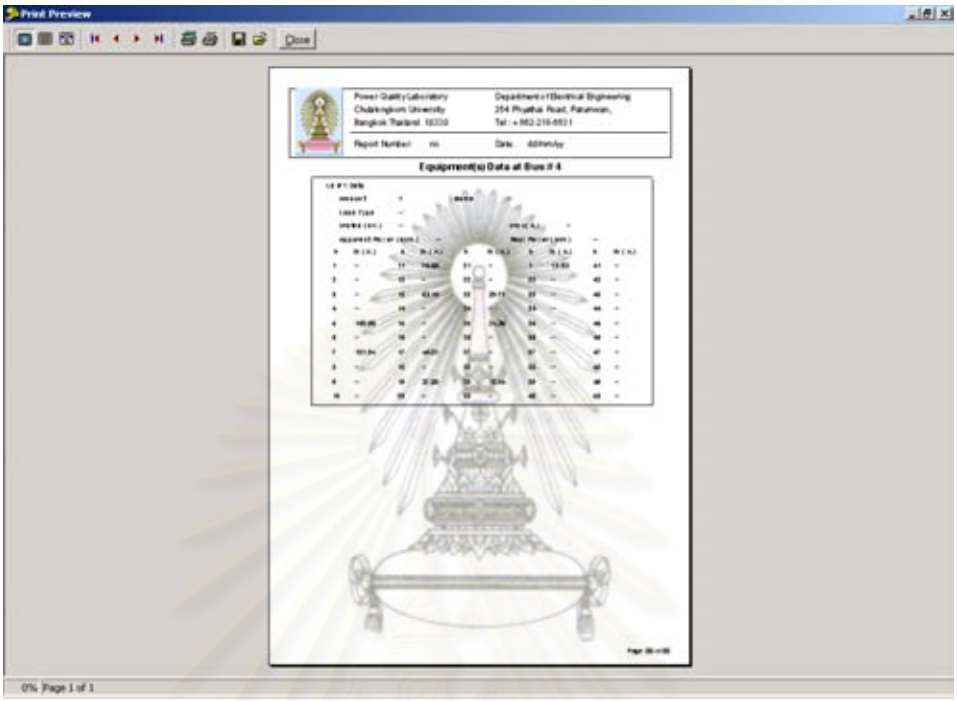
รูปที่ 4.51 หน้าแสดง Single line diagram



รูปที่ 4.52 หน้าแสดงรายละเอียดของระบบ หม้อแปลง สายส่ง



รูปที่ 4.53 หน้าแสดงรายละเอียดโหลดของผู้ใช้ไฟฟ้า



รูปที่ 4.54 หน้าแสดงรายละเอียดโหลดของผู้ใช้ไฟฟ้า(ต่อ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การประเมินระดับฮาร์มอนิกเพื่อการต่อโหลดเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง

บทนี้จะแสดงตัวอย่างการใช้ประโยชน์โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า โดยจะเลือกผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบ ณ แรงดันต่างๆ เพื่อแสดงถึงความสามารถของโปรแกรม

5.1 การเชื่อมต่อเข้ากับระบบแรงดันต่ำ(ตัวอย่างที่ 1)

ผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นที่อยู่อาศัย จะเชื่อมต่อเข้ากับระบบแรงดันต่ำ 230 โวลต์ 1 เฟสโดยมีอุปกรณ์ไฟฟ้าอยู่ 6 ประเภท รายละเอียดแสดงดังในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดของอุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟฟ้า[20] สำหรับตัวอย่างที่ 1

	คอมพิวเตอร์	โทรทัศน์	เครื่องเสียง	เตาอบ	เครื่องเล่นวีดีโอ	โคมไฟ
จำนวน	1	1	1	1	1	5
I_{rms}	0.918	0.781	0.318	7.19	0.162	0.514
กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	131	119	60	1531	30	54
I_1	0.611	0.524	0.265	6.98	0.138	0.512
อันดับฮาร์มอนิก	กระแสฮาร์มอนิก (แอมแปร์)					
3	0.52	0.442	0.148	1.5	0.078	0.042
5	0.369	0.314	0.087	0.69	0.028	0.008
7	0.198	0.17	0.035	0.27	0.006	0.007
9	0.051	0.047	0.007	0.17	0.011	0.003
11	0.046	0.035	0.024	0.09	0.004	0.002
13	0.08	0.062	0.006	0.07	0.002	0.002
15	0.05	0.05	0.003	0.04	0.002	0.003
17	0.03	0.03	0.002	0.03	0.001	0.001
19	0.04	0.02	0.002	0.02	0.001	0.001
21	0.02	0.02	0.002	0.02		0.002
23	0.02	0.01	0.001	0.01		0.001
25	0.02	0.01	0.001	0.01		0.001

เนื่องจากผู้ใช้ไฟฟ้าจะเชื่อมต่อเข้ากับระบบแรงดันต่ำ จึงเป็นการประเมินในขั้นตอนที่ 1 ตามมาตรฐาน G5/4 จากข้อมูลอุปกรณ์ที่มี ขั้นตอนแรกต้องทำการรวมกระแสโหลดทั้งหมดก่อน โดยหาจากผลรวมของขนาดกระแสพิกัดของอุปกรณ์แต่ละตัวคูณด้วยจำนวนของอุปกรณ์ ในตัวอย่างนี้ได้ขนาดกระแสรวม 11.94 แอมแปร์ เนื่องจากโหลดรวมน้อยกว่า 16 แอมแปร์ จึงประเมินโดยตรวจสอบว่าอุปกรณ์แต่ละตัวนั้นผ่านมาตรฐาน IEC 61000-3-2 หรือไม่ โดยเริ่มจากการแยกประเภทของโหลดเป็น Class A, B, C, D ในตัวอย่างที่ 1 นี้ คอมพิวเตอร์และโทรทัศน์เป็นโหลด Class D เครื่องเสียง, เตาอบ, เครื่องเล่นวีดีโอเป็นโหลด Class A โคมไฟเป็น Class C เนื่องจากหลอดไฟที่ใช้เป็นหลอดฟลูออเรสเซนต์

เมื่อทำการประเมินโดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา ผลการประเมินแสดงดังตารางที่ 5.2 (รายละเอียดกระแสฮาร์มอนิกดูเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ข) ปรากฏว่ามีอุปกรณ์ไม่ผ่านมาตรฐาน IEC 61000-3-2 อยู่ 2 ชนิดคือ คอมพิวเตอร์และโทรทัศน์ ถ้าตามเงื่อนไขการประเมินตามมาตรฐาน G5/4 ผู้ใช้ไฟฟ้ารายนี้ไม่สามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าได้ แต่ในความเป็นจริงก็แล้วแต่การไฟฟ้าจะพิจารณาว่าสมควรจะอนุญาตให้เชื่อมต่อเข้ากับระบบหรือไม่

ตารางที่ 5.2 ผลการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 1

โหลด	ประเภทตาม IEC 61000-3-2	ผลการประเมิน
คอมพิวเตอร์	Class D	ไม่ผ่าน
โทรทัศน์	Class D	ไม่ผ่าน
เครื่องเสียง	Class A	ผ่าน
เตาอบ	Class A	ผ่าน
เครื่องเล่นวีดีโอ	Class A	ผ่าน
โคมไฟ	Class C	ผ่าน

5.2 การเชื่อมต่อเข้ากับระบบแรงดันต่ำ(ตัวอย่างที่ 2)

ผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นโรงงานขนาดเล็ก จะเชื่อมต่อเข้ากับระบบแรงดันต่ำ 230/400 โวลต์ 3 เฟส ณ จุดต่อร่วมมีพิกัดฟอลต์ 10 MVA มีโหลดเป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ 2 ขนาด ข้อมูลโหลดแสดงดังตารางที่ 5.3

เนื่องจากผู้ใช้ไฟฟ้าจะเชื่อมต่อเข้ากับระบบแรงดันต่ำ เป็นการประเมินในขั้นตอนที่ 1 โหลดทั้งหมดเป็นเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า โดยเป็นโหลด 1 เฟสและ 3 เฟสปนกัน ก่อนอื่นทำการเฉลี่ยโหลดทั้งสามเฟสให้เท่ากัน ถ้าไม่เท่ากันก็นำข้อมูลในเฟสที่มีกระแสฮาร์มอนิกสูงสุดมาทำการประเมิน ในการประเมินจึงต้องหากระแสฮาร์มอนิกรวมที่อุปกรณ์ทั้งสองชนิดสร้างออกมา

ณ จุดต่อร่วม พิกัดฟอลต์มีค่า 10 MVA ดังนั้นจึงนำค่าขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกในตารางที่ 3.2 มาใช้ได้เลยไม่ต้องทำการปรับแก้

ตารางที่ 5.3 รายละเอียดของอุปกรณ์[10] ของผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 2

	VSD 1	VSD 2
จำนวน	5	2
ประเภทโหลด	1 เฟส	3 เฟส
ขนาด (kVA)	1.8	7
พิกัดกระแส (แอมแปร์)	8	10.74
I_1 (แอมแปร์)	4.37	9.9
อันดับฮาร์มอนิก	กระแสฮาร์มอนิก (แอมแปร์)	
3	3.78	-
5	3.41	3.7
7	2.91	1.6
9	2.33	-
11	1.72	0.8
13	1.17	0.5
15	0.7	-
17	0.35	0.4
19	0.2	0.2
21	0.21	-
23	0.23	0.1
25	0.2	0.1

เมื่อทำการประเมินโดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา ตอนแรกโปรแกรมจะทำการตรวจสอบว่าอุปกรณ์เหล่านี้ผ่านมาตรฐาน IEC 61000-3-2 หรือไม่ ผลปรากฏว่าอุปกรณ์ทั้งสองประเภทนี้ไม่ผ่านมาตรฐานดังกล่าว ต่อไปก็ตรวจสอบกระแสฮาร์มอนิกรวมที่อุปกรณ์ทั้งสองประเภทนี้สร้างขึ้นมาเทียบกับตารางที่ 3.2 ในการป้อนข้อมูลในการประเมินนั้นสำหรับโหลด VSD 1 นั้นเมื่อทำการเฉลี่ยโหลดทั้งสามเฟสแล้วจะได้ 2-2-1 เมื่อป้อนข้อมูลในโปรแกรมก็ป้อนข้อมูลโหลด VSD 1 มีจำนวน 2 ตัว เมื่อทำการประเมินปรากฏว่าไม่มีกระแสฮาร์มอนิกค่าใดมีค่าเกินกว่าที่มาตรฐาน G5/4 กำหนดไว้ (รายละเอียดกระแสฮาร์มอนิกดูเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ข) ผู้ใช้ไฟฟ้ารายนี้จึงผ่านการประเมินในขั้นตอนที่ 1 สามารถเชื่อมต่อระบบของตนเข้ากับระบบไฟฟ้าได้

ตารางที่ 5.4 รายละเอียดของอุปกรณ์[21] ของผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 3

	Power supply units	UPS units
จำนวน	3	2
ขนาด (kVA)	2.8	5
พิกัดกระแส (แอมแปร์)	12.5	21
I_1 (แอมแปร์)	12.48	11.05
อันดับฮาร์มอนิก	กระแสฮาร์มอนิก (แอมแปร์)	
3	0.42	10.49
5	0.205	9.38
7	0.155	7.93
9	0.11	5.24
11	0.07	4.52
13	0.04	2.93
15	0.025	0.79
17	0.02	0.64
19	0.04	0.39
21	0.03	0.21
23	0.025	0.32
25	0.02	0.29
27	0.035	< 0.1
29	0.04	< 0.1
31	0.04	< 0.1
33	0.025	< 0.1
35	0.025	< 0.1
37	0.015	< 0.1
39	0.04	< 0.1
41	0.03	< 0.1
43	0.015	< 0.1
45	0.015	< 0.1
47	0.02	< 0.1
49	0.02	< 0.1

5.3 การเชื่อมต่อเข้ากับระบบแรงดันต่ำ (ตัวอย่างที่ 3)

ผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นสำนักงานแห่งหนึ่ง จะเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ 1 เฟส ณ จุดต่อร่วมมีพิกัดฟอลต์ 6 MVA มีอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นสองประเภทดังแสดงในตารางที่ 5.4

ผู้ใช้ไฟฟ้าจะเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ ประเมินครั้งแรกด้วยการประเมินขั้นตอนที่ 1 โหลดรวมทั้งหมดมีกระแสมากกว่า 16 แอมแปร์ (79.5 แอมแปร์) จึงทำการตรวจสอบกระแสฮาร์มอนิกที่โหลดรวมทั้งหมดสร้างขึ้นมาเทียบกับขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน G 5/4 ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ณ จุดต่อร่วมมีพิกัดฟอลต์ 6 MVA ต้องทำการปรับค่ากระแสในตารางที่ 3.2 ด้วยตัวคูณ 0.6 (6 / 10) ก่อนนำไปใช้ในการประเมิน

เมื่อใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาประเมินผู้ใช้ไฟฟ้ารายนี้ ผลปรากฏว่ากระแสฮาร์มอนิกรวมในอันดับที่ 9 มีค่าสูงกว่าขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิก ส่วนกระแสฮาร์มอนิกรวมในอันดับที่ 15 นั้นแม้ว่าจะสูงกว่าขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกแต่ยังอยู่ในข้อกำหนดที่ว่ามีค่าสามารถเกินได้ 10 % หรือ 0.5 แอมแปร์ (รายละเอียดดูในภาคผนวก ข) จึงไม่ผ่านในการประเมินขั้นที่ 1 ต้องประเมินในขั้นที่ 2 ต่อไป โดยการประเมินขั้นตอนที่ 2 นี้ต้องเพิ่มข้อมูลแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิมในระบบ ดังแสดงในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิม ณ จุดต่อร่วมสำหรับตัวอย่างที่ 3

อันดับฮาร์มอนิก	แรงดันฮาร์มอนิก (V_{hm} : %)
3	1.9
5	2.7
7	1.2
9	0.1
11	0.5
13	0.4

เมื่อใส่ค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิมลงไปในโปรแกรม แล้วทำการประเมินผลปรากฏว่าไม่มีแรงดันฮาร์มอนิกอันดับใดเลยที่มีค่าสูงกว่าขีดจำกัดแรงดันระดับวางแผนสำหรับระบบแรงดัน 400 โวลต์ ตามมาตรฐาน G 5/4 (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมที่ภาคผนวก ข) ผู้ใช้ไฟฟ้ารายนี้จึงผ่านการประเมินในขั้นตอนที่ 2 ตามมาตรฐาน G 5/4 สามารถเชื่อมต่อระบบของตนเข้ากับระบบของการไฟฟ้าได้

5.4 การเชื่อมต่อเข้ากับระบบแรงดันกลาง (ตัวอย่างที่ 4)

ผู้ใช้ไฟฟ้าจะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ณ จุดต่อร่วมมีพิกัดฟอลต์ 55 MVA สมมติว่าแรงดันฮาร์มอนิก ณ จุดต่อร่วม(V_{hm})มีค่าน้อยกว่า 75 % ของขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกระดับวางแผน มีโหลดเป็นอุปกรณ์ประเภทเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าชนิด 6 พัลส์ 2 ชนิดดังแสดงในตารางที่ 5.6 โหลดทั้งหมดต่อกับแรงดันต่ำ 400 โวลต์ โดยผ่านหม้อแปลง 6.6 kV / 433 V

ตารางที่ 5.6 รายละเอียดของอุปกรณ์[21] ของผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 4

	Convertor # 1	Convertor # 2
จำนวน	5	1
ขนาด (kVA)	20	100
อันดับฮาร์มอนิก	กระแสฮาร์มอนิก (แอมแปร์)	
5	8.37	37.96
7	3.2	11.9
11	1.97	9.16
13	1.13	5.37
17	0.98	3.78
19	0.7	2.94
23	0.56	1.69
25	0.47	1.55
29	0.33	0.91
31	0.32	0.83
35	0.2	0.68
37	0.21	0.57
41	0.13	0.54
43	0.14	0.47
47	0.1	0.39
49	0.1	0.36

ผู้ใช้ไฟฟ้าจะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ซึ่งสูงกว่าแรงดันต่ำ 400 โวลต์ และน้อยกว่า 33 กิโลโวลต์ เป็นการประเมินในขั้นตอนที่ 2 โหลดทั้งหมดเป็นอุปกรณ์ประเภทเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าชนิด 6 พัลส์ มีขนาดรวม 200 kVA ซึ่งเกินกว่าที่มาตรฐาน G5/4

กำหนดไว้ (130 kVA) จึงต้องดูค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิมก่อน โดยในตัวอย่างนี้แรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิมนั้นมีค่าน้อยกว่า75 % ของขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกระดับวางแผน จึงประเมินโดยตรวจสอบค่ากระแสฮาร์มอนิกที่โหลดรวมทั้งหมดสร้างขึ้นมา เทียบกับขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกในตารางที่ 3.5 ณ จุดต่อร่วมนี้มีพิกัดฟอลต์ 55 MVA จึงต้องทำการปรับแก้ค่าในตารางที่ 3.5 ด้วยตัวคูณ 0.9167 (55 / 60) แล้วจึงนำค่าที่ปรับแก้แล้วนั้นไปใช้ในการประเมิน

เมื่อทำการประเมินโดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โดยใส่ค่าข้อมูลต่างๆ ลงไปในโปรแกรม แล้วทำการประเมินผลปรากฏว่าไม่มีกระแสฮาร์มอนิกอันดับใดเลยที่มีค่าสูงกว่าขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ ตามมาตรฐาน G 5/4 (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมที่ภาคผนวก ข) ผู้ใช้ไฟฟ้ารายนี้จึงผ่านการประเมินในขั้นตอนที่ 2 ตามมาตรฐาน G 5/4 สามารถเชื่อมต่อระบบของตนเข้ากับระบบของการไฟฟ้าได้

5.5 การเชื่อมต่อเข้ากับระบบแรงดันกลาง (ตัวอย่างที่ 5)

ผู้ใช้ไฟฟ้าจะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแรงดัน 22 กิโลโวลต์ ณ จุดต่อร่วมมีพิกัดฟอลต์ 150 MVA สมมติว่าแรงดันฮาร์มอนิก ณ จุดต่อร่วม(V_{hm})มีค่าดังตารางที่ 5.7 มีโหลดเป็นอุปกรณ์ประเภทเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า 3 ชนิดดังแสดงในตารางที่ 5.8 โหลดทั้งหมดต่อกับแรงดันต่ำ 400 โวลต์ โดยผ่านหม้อแปลง 22 kV / 400 V

ตารางที่ 5.7 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิม ณ จุดต่อร่วมสำหรับตัวอย่างที่ 5

อันดับฮาร์มอนิก	แรงดันฮาร์มอนิก (V_{hm} : %)
3	1
5	1.1
7	1.55
9	0.2
11	0.5
13	0.5
15	0.2

ผู้ใช้ไฟฟ้าจะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแรงดัน 22 กิโลโวลต์ ซึ่งสูงกว่าแรงดันต่ำ 400 โวลต์ และน้อยกว่า 33 กิโลโวลต์ เป็นการประเมินในขั้นตอนที่ 2 โหลดทั้งหมดเป็นอุปกรณ์ประเภทเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าหลายประเภทปนกัน จึงต้องดูค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิมก่อน โดยในตัวอย่างนี้แรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิมนั้นมีค่ามากกว่า 75 % ของขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอ

นิกระดับวางแผน กล่าวคือแรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 มีค่า1.55 % มากกว่า 1.50 % ($V_{p,7}$ = 2 %)จึงประเมินโดยตรวจสอบค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่จะเกิดขึ้น ณ จุดต่อร่วมโดยหาจากผลรวมระหว่างแรงดันฮาร์มอนิกที่โหลดรวมทั้งหมดสร้างขึ้นมา (V_{hc}) และแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิมในระบบ (V_{hm}) เทียบกับค่าขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกระดับวางแผนของระบบไฟฟ้าแรงดัน 22 กิโลโวลต์

ตารางที่ 5.8 รายละเอียดของอุปกรณ์[21] ของผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 5

	Convertor # 1	Convertor # 2	Convertor # 3
จำนวน	10	20	5
อันดับฮาร์มอนิก	กระแสฮาร์มอนิก (แอมแปร์)		
3	10.49		
5	9.38	8.37	37.96
7	7.93	3.2	11.9
9	6.24		
11	4.52	1.97	9.16
13	2.93	1.13	5.37
15	1.63		
17	0.72	0.98	3.78
19	0.44	0.7	2.94
21	0.57		
23	0.6	0.56	1.69
25	0.49	0.47	1.55
29		0.33	0.91
31		0.32	0.83
35		0.2	0.68
37		0.21	0.57
41		0.13	0.54
43		0.14	0.47
47		0.1	0.39
49		0.1	0.36

เมื่อทำการประเมินโดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โดยใส่ค่าข้อมูลต่างๆ ลงไปในโปรแกรม แล้วทำการประเมินผลปรากฏว่าไม่มีแรงดันฮาร์มอนิกอันดับใดเลยที่มีค่าสูงกว่าขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกระดับวางแผนสำหรับระบบแรงดัน 22 กิโลโวลต์ ตามมาตรฐาน G 5/4 (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมที่ภาคผนวก ข) ผู้ใช้ไฟฟ้ารายนี้จึงผ่านการประเมินในขั้นตอนที่ 2 ตามมาตรฐาน G 5/4 สามารถเชื่อมต่อระบบของตนเข้ากับระบบของการไฟฟ้าได้

5.6 การเชื่อมต่อเข้ากับระบบแรงดันกลาง (ตัวอย่างที่ 6)

ผู้ใช้ไฟฟ้าจะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแรงดัน 22 กิโลโวลต์ ณ จุดต่อร่วมมีพิกัดฟอลต์ 180 MVA สมมติว่าแรงดันฮาร์มอนิก ณ จุดต่อร่วม(V_{hm})มีค่าดังตารางที่ 5.9 มีโหลดเป็นอุปกรณ์ประเภทเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าชนิด 6 พัลส์ ดังแสดงในตารางที่ 5.10 โหลดทั้งหมดต่อกับแรงดันต่ำ 400 โวลต์ โดยผ่านหม้อแปลง 22 kV / 400 V

ตารางที่ 5.9 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิม ณ จุดต่อร่วมสำหรับตัวอย่างที่ 6

อันดับฮาร์มอนิก	แรงดันฮาร์มอนิก (V_{hm} : %)
3	0.7
5	1.1
7	0.9
9	0.3
11	0.2
13	0.2

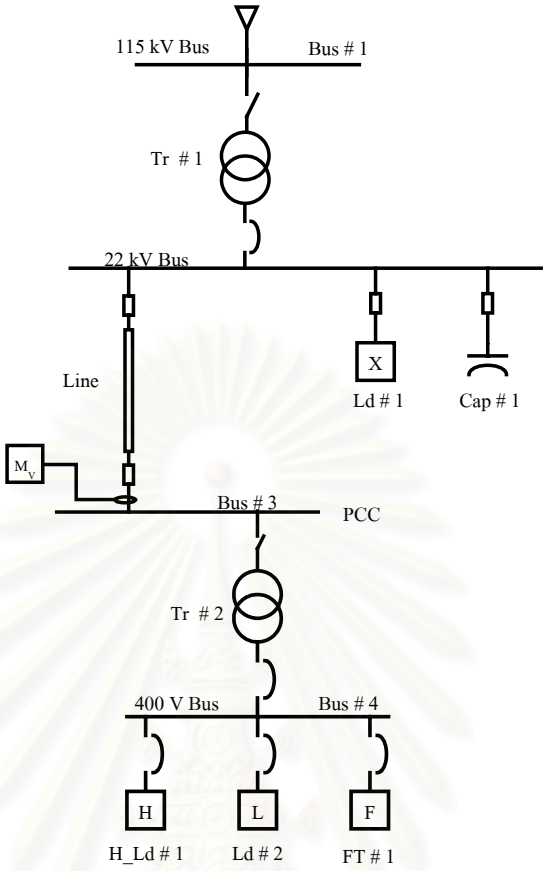
ผู้ใช้ไฟฟ้าจะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแรงดัน 22 กิโลโวลต์ ซึ่งสูงกว่าแรงดันต่ำ 400 โวลต์ และน้อยกว่า 33 กิโลโวลต์ เป็นการประเมินในขั้นตอนที่ 2 โหลดทั้งหมดเป็นอุปกรณ์ประเภทเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าชนิด 6 พัลส์ มีขนาด 625 kVA ซึ่งเกินกว่าที่มาตรฐาน G5/4 กำหนดไว้ (130 kVA) จึงต้องดูค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิมก่อน โดยในตัวอย่างนี้เมื่อทำการตรวจสอบปรากฏว่าแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิมนั้น มีค่าน้อยกว่า 75 % ของขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกระดับวางแผน จึงประเมินโดยตรวจสอบค่ากระแสฮาร์มอนิกที่โหลดรวมทั้งหมดสร้างขึ้นมาเทียบกับขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกในตารางที่ 3.5 ณ จุดต่อร่วมนี้มีพิกัดฟอลต์ 180 MVA จึงต้องทำการปรับแก้ค่าในตารางที่ 3.5 ด้วยตัวคูณ 0.9 (180 / 200) แล้วจึงนำค่าที่ปรับแก้แล้วนั้นไปใช้ในการประเมิน

ตารางที่ 5.10 รายละเอียดของอุปกรณ์[17] ของผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 6

	Convertor # 1
จำนวน	1
ขนาด (kVA)	625
I_1 (แอมแปร์)	902.11
อันดับฮาร์มอนิก	กระแสฮาร์มอนิก (แอมแปร์)
5	160.58
7	101.94
11	76.68
13	63.15
17	46.01
19	37.89
23	29.77
25	24.36
29	18.94
31	13.53

เมื่อทำการประเมินโดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โดยใส่ค่าข้อมูลต่างๆ ลงไปในโปรแกรม แล้วทำการประเมินผลปรากฏว่ามีกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 มีค่าสูงกว่าขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบแรงดัน 22 กิโลโวลต์ ตามมาตรฐาน G 5/4 (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมที่ภาคผนวก ข) ผู้ใช้ไฟฟ้ารายนี้จึงไม่ผ่านการประเมินในขั้นตอนที่ 2 ตามมาตรฐาน G 5/4 ต้องทำการประเมินในขั้นตอนที่ 3 ต่อไป โดยต้องเพิ่มข้อมูลรายละเอียดของระบบไฟฟ้า โหลดอื่นๆ เช่น โหลดเชิงเส้น ตัวเก็บประจุหรือตัวกรองฮาร์มอนิก ไดอะแกรมแสดงดังรูปที่ 5.1 ข้อมูลต่างๆแสดงในตารางที่ 5.11

เมื่อทำการประเมินในขั้นตอนที่ 3 โดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาผลปรากฏว่า ที่จุดต่อร่วม(บัสที่ 3) นั้นไม่มีแรงดันฮาร์มอนิกใดๆเลยที่เกินขีดจำกัดแรงดันระดับวางแผนตามมาตรฐาน G 5/4 และที่บัสแรงดันต่ำนั้น มีแรงดันฮาร์มอนิกบางอันดับที่เกินมาตรฐาน (อันดับฮาร์มอนิกที่ 25, 29, 31) ส่วนบัสอื่นๆที่อยู่ใกล้เคียงนั้น (บัส 1 และบัส 2) แรงดันฮาร์มอนิกที่คำนวณได้ไม่เกินมาตรฐาน G 5/4 ผลการประเมินดังแสดงในตารางที่ 5.12 (รายละเอียดเพิ่มเติมดูได้ที่ภาคผนวก ข) ผู้ใช้ไฟฟ้ารายนี้ผ่านการประเมินในขั้นตอนที่ 3 ตามมาตรฐาน G5/4



รูปที่ 5.1 ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 6

ตารางที่ 5.11 ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับระบบตัวอย่างที่ 6

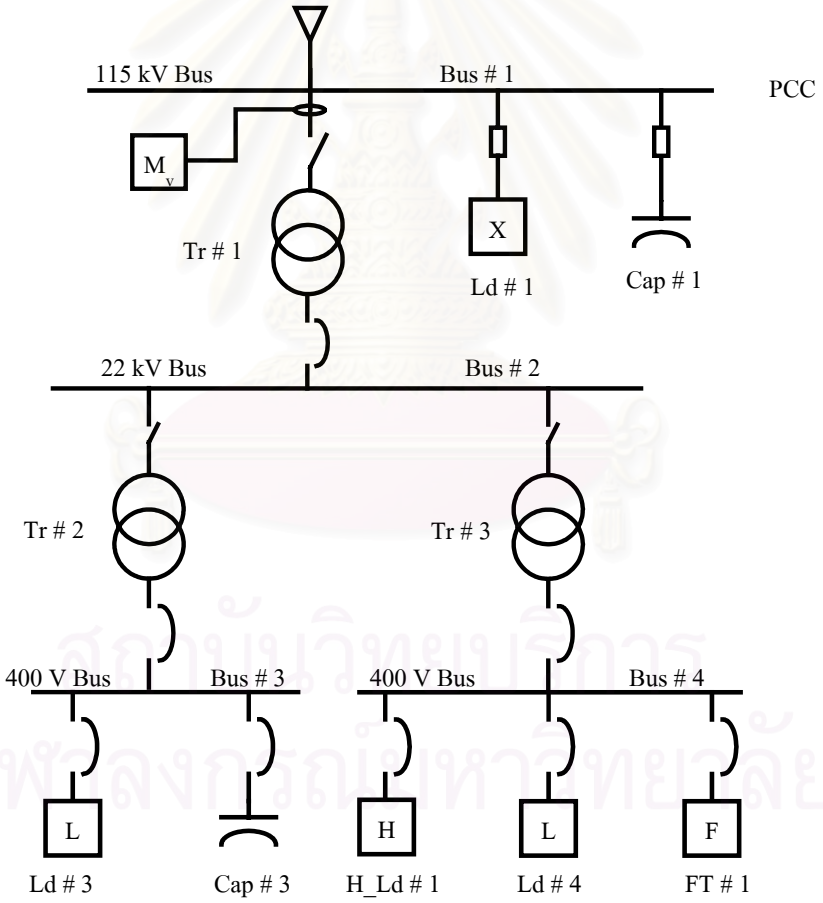
System	Tr # 1	Ld # 1	Cap # 1
115 kV, 50 Hz MVASC = 4250 X / R = 10	115 kV / 22 kV 36 MVA %Z = 6.5 % Loss = 185 kW	22 kV P = 6.8 MW Q = 4.2 MVAr	22 kV 8750 kVAr
Line	**Tr # 2**	**Ld # 2**	**FT # 1**
r = 0.001802 Ohm / km x = 0.003155 Ohm / km Length = 1000 meter	22 kV / 400 V 1.5 MVA %Z = 6.5 % Loss = 19.8 kW	400 V P = 700 kW Q = 525 kVAr	Single tune filter V_{cr} = 440 V Q_{cr} = 750 kVAr tuned point = 4.8 Q Factor = 60

ตารางที่ 5.12 ผลการประเมินสำหรับระบบตัวอย่างที่ 6

บัส	$V_{5_G5/4}$	V_5	$THD_{V_G5/4}$	THD_V
1	2.0	0.213	3.0	0.316
2	2.0	1.100	3.0	1.778
3 (PCC)	2.0	1.100	3.0	1.778
4	4.0	0.277	5.0	3.359

5.7 การเชื่อมต่อเข้ากับระบบแรงดันสูง (ตัวอย่างที่ 7)

ผู้ใช้ไฟฟ้าจะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแรงดัน 115 กิโลโวลต์ โดยมีไดอะแกรมของระบบดังรูปที่ 5.2 และข้อมูลต่างๆดังตารางที่ 5.13 - 5.15



รูปที่ 5.2 ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 7

ตารางที่ 5.13 ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับระบบตัวอย่างที่ 7

System	Tr # 1	Tr # 2	Tr #3
115 kV, 50 Hz MVASC = 4250 X / R = 10	115 kV / 22 kV 36 MVA %Z = 6.5 % Loss = 185 kW	22 kV / 400 V 1.5 MVA %Z = 6.5 % Loss = 19.8 kW	22 kV / 400 V 2 MVA %Z = 6.5 % Loss = 24 kW
Ld # 1	Cap # 1		
115 kV P = 30 MW Q = 22 MVAr	115 kV 15 MVAr		
Ld # 3	Cap # 3	Ld # 4	FT # 1
400 V P = 1000 kW Q = 750 kVAr	400 V 400 kVAr	400 V P = 560 kW Q = 420 kVAr	Single tune filter V_{cr} = 440 V Q_{cr} = 720 kVAr tuned point = 4.8 Q Factor = 60

ตารางที่ 5.14 ข้อมูลโหลดไม่เป็นเชิงเส้น[17, 21] สำหรับระบบตัวอย่างที่ 7

	6P # 1	6P # 2
จำนวน	1	1
ขนาด (kVA)	625	500
อันดับฮาร์มอนิก	กระแสฮาร์มอนิก (แอมแปร์)	
5	160.58	138.56
7	101.94	95.26
11	76.68	52.68
13	63.15	41.13
17	46.01	25.26
19	37.89	19.49
23	29.77	14.43
25	24.36	11.55
29	18.94	10.1
31	13.53	8.66

ผู้ใช้ไฟฟ้ารายนี้เป็นโรงงานขนาดใหญ่ โหลดที่ต่ออยู่กับบัสที่ 1 นั้นเป็นโหลดรวมทั้งหมด ณ จุดต่อร่วมนั้นก่อนที่จะมีผู้ใช้ไฟฟ้ารายนี้เชื่อมต่อเพิ่มเข้าไป ผู้ใช้ไฟฟ้ารายนี้มีโหลดอยู่ที่แรงดัน 400 โวลต์ โหลดไม่เป็นเชิงเส้นต่ออยู่ที่บัส 4 ที่บัสอื่นๆ เป็นโหลดเชิงเส้น ชุดปรับปรุงตัวประกอบกำลัง(ชุดคาปาซิเตอร์)

เนื่องจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมานี้มีส่วนของสายส่งด้วย แต่ในตัวอย่างนี้ไม่มีสายส่งในการใช้งานโปรแกรมก็ป้อนค่าความยาวของสายส่งเท่ากับศูนย์ โปรแกรมก็สามารถคำนวณต่อไปได้

ตารางที่ 5.15 ข้อมูลแรงดันฮาร์มอนิกที่วัดได้ ณ จุดต่อร่วมสำหรับระบบตัวอย่างที่ 7

อันดับฮาร์มอนิก	แรงดันฮาร์มอนิก (V_{hm} : %)
3	0.2
5	0.8
7	0.7
9	0.1
11	0.3
13	0.2
15	0.07

เมื่อใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาประเมินผู้ใช้ไฟฟ้ารายนี้ ผลปรากฏว่าทุกบัสยกเว้นบัสที่ 4 ระดับแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าน้อยกว่าขีดจำกัดแรงดันระดับวางแผน (รายละเอียดดูได้เพิ่มเติมที่ภาคผนวก ข) ในบัสที่ 4 นั้นมีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นต่ออยู่ แม้จะติดตั้งชุดกรองฮาร์มอนิกแล้วก็ตามแต่ที่ฮาร์มอนิกอันดับสูงๆ บางอันดับ (อันดับที่ 19, 25, 29 และ 31) ค่าแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าสูงกว่าขีดจำกัดแรงดันระดับวางแผน ทั้งนี้เนื่องจากชุดกรองฮาร์มอนิกนั้นออกแบบมาเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 โดยเฉพาะ ฮาร์มอนิกอันดับข้างเคียงก็ถูกกรองให้ลดลงไปด้วย ผู้ใช้ไฟฟ้ารายนี้ผ่านการประเมินในขั้นตอนที่ 3 สามารถเชื่อมต่อระบบของตนเข้ากับระบบของการไฟฟ้าได้

ตารางที่ 5.16 ผลการประเมินสำหรับระบบตัวอย่างที่ 7

บัส	$V_{5_G5/4}$	V_5	$THD_{V_G5/4}$	THD_V
1 (PCC)	2.0	0.803	3.0	1.149
2	2.0	0.026	3.0	0.210
3	4.0	0.039	5.0	0.243
4	4.0	0.423	5.0	3.675

5.8 การเชื่อมต่อเข้ากับระบบแรงดันต่ำ (ตัวอย่างที่ 8)

ผู้ใช้ไฟฟ้าจะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ 3 เฟส 230/400โวลต์ ณ จุดต่อร่วม มีพิกัดฟอลต์ 7 MVA โดยมีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นดังแสดงในตารางที่ 5.17

ผู้ใช้ไฟฟ้าจะเชื่อมต่อเข้ากับระบบแรงดันต่ำ จึงเริ่มด้วยการประเมินในขั้นตอนที่ 1 โหลดเป็นเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าชนิด 6 พัลส์ มีขนาดรวม 100 kVA (เกิน 12 kVA) จึงตรวจสอบค่ากระแสฮาร์มอนิกรวมที่โหลดทั้งหมดสร้างออกมา

เมื่อใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาผลปรากฏว่า กระแสรวมฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 มีค่าสูงกว่าขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิก(รายละเอียดดูในภาคผนวก ข) ผู้ใช้ไฟฟ้ารายนี้ไม่ผ่านการประเมินขั้นตอนที่ 1 จึงต้องประเมินในขั้นตอนที่ 2 ต่อไป โดยใส่ค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิมเข้าไปในโปรแกรม ดังแสดงในตารางที่ 5.18

ตารางที่ 5.17 ข้อมูลโหลดไม่เป็นเชิงเส้น[21] ของผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 8

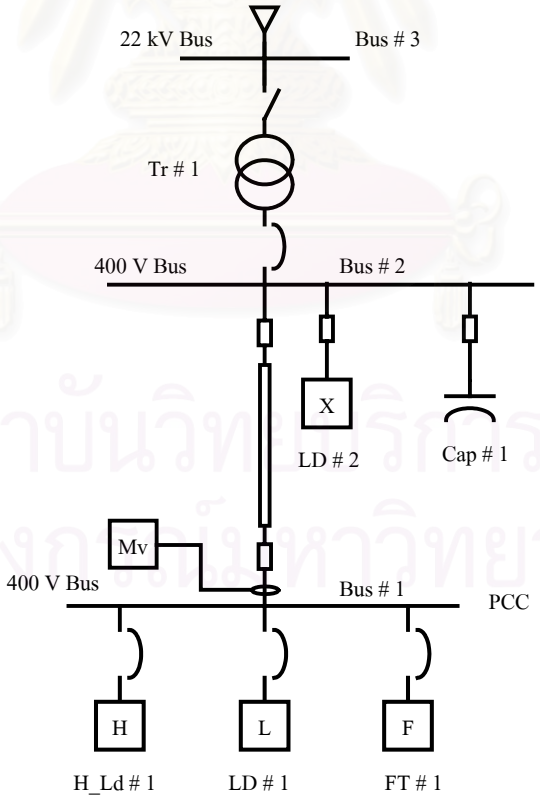
Convertor 6 P			
จำนวน		5	
ขนาด (kVA)		20	
อันดับฮาร์มอนิก	กระแสฮาร์มอนิก (แอมแปร์)	อันดับฮาร์มอนิก	กระแสฮาร์มอนิก (แอมแปร์)
5	8.37	29	0.33
7	3.2	31	0.32
11	1.97	35	0.2
13	1.13	37	0.21
17	0.98	41	0.13
19	0.7	43	0.14
23	0.56	47	0.1
25	0.47	49	0.1

เมื่อป้อนค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิมเข้าไปแล้วทำการประเมินผลปรากฏว่าค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม($THD_V = 5.12\ \%$) มีค่ามากกว่าค่ามาตรฐาน ($THD_{V,pl} = 5\ \%$) และไม่มีแรงดันฮาร์มอนิกใดเลย มีค่าเกินขีดจำดัดแรงดันระดับวางแผน(รายละเอียดดูในภาคผนวก ข) ผู้ใช้ไฟฟ้ารายนี้ไม่ผ่านการประเมินในขั้นตอนที่ 2 ไม่สามารถทำการเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าได้ ถ้าหากไม่ทำการแก้ไขให้แรงดันฮาร์มอนิกลดลง (โดยการติดตัวกรองฮาร์มอนิก)

ในโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้ได้มีส่วนแก้ไขสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อเข้ากับระบบแรงดันต่ำด้วย(ดังแสดงในรูปที่ 4.37 – 4.39) โดยการคำนวณคล้ายๆกับการคำนวณในการประเมินขั้นตอนที่ 3 โดยต้องทราบข้อมูลโหลดต่างๆ ของผู้ใช้ไฟฟ้า ไดอะแกรมของระบบ ณ จุดต่อร่วมนั้นๆ ในกรณีตัวอย่างที่ 8 นี้ มีไดอะแกรมแสดงดังรูปที่ 5.3 และมีข้อมูลต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.19

ตารางที่ 5.18 แรงดันฮาร์มอนิกที่วัดได้ ณ จุดต่อร่วม สำหรับตัวอย่างที่ 8

อันดับฮาร์มอนิก	แรงดันฮาร์มอนิก (V_{hm} : %)
3	2.0
5	2.5
7	1.9
9	0.8
11	1.3
13	1
15	0.1



รูปที่ 5.3 ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าสำหรับตัวอย่างที่ 8

ตารางที่ 5.19 ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับระบบตัวอย่างที่ 8

System	Tr # 1	FT # 1
22 kV, 50 Hz MVASC = 150 X / R = 5	22 kV / 400 V 2 MVA %Z = 6.5 % Loss = 24 kW	Single tune filter V_{cr} = 440 V Q_{cr} = 240 kVAr tuned point = 4.8 Q Factor = 60
Line	Cap # 1	
r = 0.001802 x = 0.003155 Length = 500 m.	400 V 400 kVAr	
Ld # 1	Ld #2	
400 V P = 400 kW Q = 300 kVAr	400 V P = 960 kW Q = 720 kVAr	

เมื่อทำการป้อนข้อมูลต่างๆ ให้เรียบร้อยแล้วทำการประเมิน ผลปรากฏว่า ไม่มีบัสใดเลยที่มีแรงดันฮาร์มอนิกสูงเกินกว่าค่าขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกระดับวางแผน (รายละเอียดดูในภาคผนวก ข) ผู้ใช้ไฟฟ้ารายนี้จึงสามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าได้ โดยผ่านการประเมินขั้นที่ 2 โดยทำการแก้ไขระบบของตนเองแล้ว ดังแสดงในตารางที่ 5.20

ตารางที่ 5.20 ผลการประเมินสำหรับระบบตัวอย่างที่ 8

บัส	$V_{5_G5/4}$	V_5	$THD_{V_G5/4}$	THD_V
1(PCC)	4.0	2.626	5.0	4.234
2	4.0	2.607	5.0	4.223
3	2.0	0.049	3.0	0.107

ตัวอย่างรายงานสามารถดูได้ในภาคผนวก ค. โดยเป็นรายงานที่ได้จากการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าดังได้แสดงมาแล้ว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาหลักการและกระบวนการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าสำหรับการอนุญาตให้เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าตามมาตรฐาน G 5/4 โดยมาตรฐานนี้ออกมาเพื่อประเมินค่าระดับความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกที่ผู้ใช้ไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า กระบวนการประเมินนี้แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน เพื่อความสมดุลระหว่างระดับรายละเอียดที่ต้องใช้ในการประเมินแต่ละขั้นตอนกับระดับความเสี่ยงที่จะเกิดแรงดันฮาร์มอนิกเกินขีดจำกัดที่ยอมรับได้อันเนื่องมาจากการเชื่อมต่อของผู้ใช้ไฟฟ้า การประเมินขั้นตอนที่ 1 นั้นใช้ประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อโหลดกับระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ การประเมินขั้นตอนที่ 2 ใช้ประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อโหลดกับระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำที่ไม่ผ่านในการประเมินในขั้นตอนที่ 1 หรือผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (< 33 kV) การประเมินขั้นตอนที่ 3 ใช้ประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลางหรือสูงกว่า ในงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะฮาร์มอนิกเท่านั้น ไม่รวม Sub harmonic, Inter harmonic, short burst of harmonic voltage distortion และ voltage notching

การประเมินนี้ถ้าหากคำนวณด้วยมือจะต้องใช้เวลานานและมีความผิดพลาดได้ง่าย จึงพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณ ทำให้การประเมินมีความแม่นยำมากขึ้น และยังใช้เวลาในการประเมินไม่นาน โปรแกรมนี้พัฒนาด้วยโปรแกรมเดลไฟล์ 5 เป็นโปรแกรมที่ใช้ง่ายในการพัฒนา และมีการแสดงผลเป็นกราฟฟิกได้สวยงาม อีกทั้งยังง่ายต่อการออกแบบให้โปรแกรมสามารถโต้ตอบกับผู้ใช้ได้อย่างสะดวก

โปรแกรมที่พัฒนานี้นอกจากจะใช้ประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแล้วยังใช้วิเคราะห์การแก้ปัญหาเบื้องต้นในกรณีที่ผู้ใช้ไฟฟ้าจะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันต่ำแต่ไม่ผ่านการประเมินในขั้นตอนที่ 2 การแก้ปัญหาก็คือการวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิกในระบบเมื่อระบบของผู้ใช้ไฟฟ้ามีการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกโดยการติดตั้งชุดกรองฮาร์มอนิก เมื่อวิเคราะห์ก็สามารถคาดเดาแรงดันฮาร์มอนิกที่จะเกิดขึ้นได้ ณ จุดต่อร่วม และนำค่าที่ได้ไปประเมินว่าผ่านมาตรฐานหรือไม่

โปรแกรมที่พัฒนานี้ยังมีส่วนของผลรายงานการประเมิน ซึ่งเมื่อประเมินแล้วก็สามารถนำรายงานที่ได้นี้แจ้งให้ผู้ใช้ไฟฟ้าทราบได้ว่าระบบของผู้ใช้ไฟฟ้านั้นจะสามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าได้หรือไม่

6.2 ข้อเสนอแนะ

โปรแกรมที่ได้มานี้ยังสามารถพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ จึงได้เสนอแนวทางในการพัฒนาต่อไป

- ในส่วนของข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกของโหลดนั้นในโปรแกรมนี้ต้องป้อนค่ากระแสฮาร์มอนิก ซึ่งในการปฏิบัติแล้วไม่สามารถได้ค่ากระแสฮาร์มอนิกของโหลดทุกประเภทได้ ถ้าพัฒนาในส่วนของการประมาณค่ากระแสฮาร์มอนิกในทางทฤษฎีของอุปกรณ์แต่ละประเภทแล้วจะทำให้โปรแกรมนี้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
- ในส่วนการประเมินในขั้นตอนที่ 3 ในงานวิจัยนี้ใช้ระบบไฟฟ้า 6 บัสในการประเมิน ถ้าผู้ใช้ไฟฟ้ามีบัสมากหรือระบบไฟฟ้ามีความซับซ้อน ผลการประเมินที่ได้นั้นจะมีความถูกต้องลดลง ถ้าพัฒนาให้รองรับระบบที่ซับซ้อนได้โปรแกรมจะมีประสิทธิภาพมากขึ้น
- เช่นเดียวกับหัวข้อข้างต้น กล่าวคือในส่วนของการแก้ปัญหาสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำแต่ไม่ผ่านการประเมินในขั้นตอนที่ 2 นั้น ในงานวิจัยนี้ใช้ระบบอย่างง่าย 3 บัส ในการวิเคราะห์ถ้าพัฒนาให้รองรับระบบที่ซับซ้อนได้โปรแกรมจะมีประสิทธิภาพมากขึ้น
- มาตรฐาน IEC 61000-3-12 พึ่งประกาศใช้ โดยใช้จำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ที่มีพิกัดกระแส 16 – 75 แอมแปร์ ถ้าเพิ่มมาตรฐานนี้เข้าไปในการประเมินขั้นตอนที่ 1 ในส่วนที่โหลดไม่เป็นเชิงเส้นรวมมีขนาดกระแสมากกว่า 16 แอมแปร์ จะทำให้โปรแกรมมีประสิทธิภาพมากขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Engineering Recommendation G 5/3, The Electricity Council Chief Engineer Conference "Limits for Harmonics in The United Kingdom Electricity Supply System, 1976.
2. BS 5406, Disturbances in supply systems caused by household appliances and similar electrical equipment, 1988.
3. IEC 61000, Electromagnetic compatibility (EMC)
4. Engineering Recommendation G 5/4, Planning levels for harmonic voltage distortion and the connection of non-linear equipment to transmission systems and distribution networks in the United Kingdom, 2001.
5. IEC 61000-3-2, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current <= 16A per phase), 2001.
6. IEC 61000-3-4, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-4: Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A, 1998.
7. IEC 61000-3-12, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-12: Limits - Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current >16 A and <=75 A per phase, 2004.
8. Wilson Xu. Comparisons and comment on harmonic standards IEC 1000-3-6 and IEEE Std. 519. Harmonics and Quality of Power,2000. Proceedings. Ninth International Conference on , Volume : 1, Oct 2000 : 260-263.
9. Joint harmonics working group . Technical Workshop on Harmonic Standard ER G5/4. Hong Kong : The Dept of Electrical Engineering,HK PolyU, 2002.
10. GAMBICA. A GAMBICA Technical Guide. A guide to EA Engineering Recommendation G5/4, London , 2001.
11. IEC 61000-2-2, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-2: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems, 2002.
12. IEC 61000-2-12, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-12: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public medium-voltage power supply systems, 2003.

13. IEEE 519, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 1992.
14. คณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า, ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม (ฉบับร่าง), 2546.
15. IEC 61000-3-6, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems, 1996.
16. เรวัต สุวรรณไพรัตน์. การวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรมโดยคำนึงถึงความถูกต้องของแบบจำลองฮาร์มอนิก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
17. ปานทอง ถินสถิตย์. การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
18. ไชยะ แช่มช้อย, และ พีรยุทธ แสงศิลป์. เอกสารประกอบการสัมมนา เรื่อง Harmonic Filter Design. ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลังร่วมกับภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
19. IEC 61000-4-7, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto, 2002.
20. ทรงศักดิ์ มะระประเสริฐศักดิ์. การประมาณค่ากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากเครื่องใช้ไฟฟ้าแบบไม่เป็นเชิงเส้นในผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทบ้านพักอาศัย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
21. Engineering Technical Report 122 (Draft 4.6.3), Guide to the application of Engineering Recommendation G5/4 in the assessment of harmonic voltage distortion and connection of non-linear equipment to the Electricity Supply System in the UK, 2002.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ก.1 ขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกที่ใช้ในการประเมินตามมาตรฐาน G 5/4 [20]

ขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกระดับวางแผนถูกใช้เป็นหลักในการหาขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิก

ขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกในตารางที่ 3.2 และ 3.5 ถูกใช้ในการประเมินขั้นตอนที่ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยคิดจาก

- ค่าพิกัดฟอลต์อ้างอิงเป็นค่าพิกัดฟอลต์ที่ระดับแรงดันต่างๆ ดังแสดงในตารางที่3.4
- สมมุติว่า ณ จุดต่อร่วมหนึ่ง มีผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่ 4 รายต่ออยู่กับระบบ สำหรับการประเมินสำหรับระบบแรงดัน 6.6 kV – 33 kV นั้น จะต้องมีระดับแรงดันฮาร์มอนิกเดิมน้อยกว่า 75 % ของขีดจำกัดแรงดันระดับวางแผน

การคำนวนหาขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกในตารางที่ 3.2 และ 3.5 นั้นใช้ความสัมพันธ์ของฮาร์มอนิกอิมพีแดนซ์ ดังแสดงในหัวข้อ 3.2.3.2

จากสมการที่ (3.3) $V_{hc} = \dfrac{\sqrt{3} \cdot I_h \, khV_s \cdot 100}{F \cdot 10^6}$ % โดย

V_{hc} คือ แรงดันฮาร์มอนิกที่ได้มาจากกลุ่มโหลดรวม (%)

I_h คือ กระแสฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับที่สร้างมาจากโหลดทั้งหมด (A)

k คือ ตัวชดเชยอิมพีแดนซ์

h คือ อันดับฮาร์มอนิก (2-50)

V_S คือ แรงดันระหว่างสาย ณ จุดต่อร่วม ($V_{l\text{-}l}$)

F คือ ค่าพิกัดฟอลต์ ณ จุดต่อร่วม (MVA)

เมื่อย้ายสมการหาค่า I_h จะได้

$$I_h = \frac{V_h \cdot F \cdot 10^4}{\sqrt{3} \cdot khV_s} \quad A \qquad (ก.1)$$

เนื่องจากสมมติฐานเบื้องต้นกำหนดว่า ณ จุดต่อร่วมมีผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่ 4 ราย จากสมการ ก.1 จึงปรับปรุงโดยเพิ่มตัวปรับแก้ γ เข้าไป จะได้

$$I_h = \gamma \cdot \frac{V_h \cdot F \cdot 10^4}{\sqrt{3} \cdot khV_s} \quad A \qquad (ก.2)$$

โดยค่า γ แบ่งเป็น 2 กรณีคือ

1. Linear addition ใช้สำหรับอันดับฮาร์มอนิกที่น้อยกว่า 5 และอันดับฮาร์มอนิกที่เป็นจำนวนเต็มเท่าของ 3
2. RMS addition ใช้สำหรับอันดับฮาร์มอนิกที่เหลือ

ค่า γ ในแต่ละระดับแรงดันก็ไม่เท่ากันอีกแล้วแต่กรณี ดังจะได้แสดงต่อไป

ก.2 ขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบแรงดัน 400 โวลต์

จากสมการ ก.2 จากสมมุติฐานว่ามีผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่ 4 รายเชื่อมต่อ ณ จุดต่อร่วมเดียวกัน ดังนั้นสำหรับฮาร์มอนิกในอันดับที่ต้องรวมกันแบบ Linear addition จะใช้ค่า γ = 0.25 ($\gamma + \gamma + \gamma + \gamma = 1$; $\gamma = 1/4 = 0.25$) และสำหรับฮาร์มอนิกในอันดับที่ต้องรวมกันแบบ RMS addition จะใช้ค่า γ = 0.50 ($\sqrt{\gamma^2 + \gamma^2 + \gamma^2 + \gamma^2} = 1$; $\gamma = \sqrt{1/4} = 0.5$) และแทนค่าพิกัดฟอลต์ 10 MVA จะได้ค่าพิกัดกระแสฮาร์มอนิกดังแสดงในตารางที่ ก.1

ตารารงที่ ก.1 ขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงดัน 400 โวลต์

อันดับฮาร์มอนิก	ขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกระดับวางแผน (%)	ค่า γ	ค่า k-factor	ขีดจำกัดกระแส Linear addition (A.)	ขีดจำกัดกระแส RMS addition (A.)
2	1.6	0.25	1	28.9	
3	4	0.25	1	48.1	
4	1	0.25	1	9.0	
5	4	0.25	1	28.9	
6	0.5	0.25	1	3.0	
7	4	0.50	1		41.2
8	0.4	0.50	0.5		7.2
9	1.2	0.25	0.5	9.6	
10	0.4	0.50	0.5		5.8
11	3	0.50	0.5		39.4
12	0.2	0.25	0.5	1.2	
13	2.5	0.50	0.5		27.8
...	...	...	...	...	...

ในการประเมินนั้นค่าพิกัดกระแสฮาร์มอนิกต้องทำการปรับแก้ตามค่าพิกัดฟอลต์ ณ จุดต่อร่วมด้วย เช่น ถ้า ณ จุดต่อร่วมมีระดับฟอลต์ 8 MVA ก็เอา 8 / 10 = 0.8 คูณค่าในตารางที่ ก.1 ก่อนแล้วจึงนำไปใช้ในการประเมิน

ก.3 ขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์

จากสมการ ก.2 จากสมมุติฐานว่ามีผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหญ่ 4 รายเชื่อมต่อ ณ จุดต่อร่วมเดียวกัน โดยต้องวัดระดับแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิมก่อน ต้องมีค่าน้อยกว่า 75 % ของขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกระดับวางแผน จึงจะใช้ขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกในการประเมิน (ถ้าแรงดันฮาร์มอนิกที่มีอยู่เดิม มากกว่า 75 % ในการประเมินจะคำนวนหาแรงดันฮาร์มอนิกที่จะเกิดขึ้น โดยใช้แบบจำลองอิมพีแดนซ์อย่างง่าย) ดังนั้นสำหรับฮาร์มอนิกในอันดับที่ต้องรวมกันแบบ Linear addition จะใช้ค่า $\gamma = 0.25$ ($\gamma + \gamma + \gamma + \gamma = 1$; $\gamma = 1 / 4 = 0.25$) และสำหรับฮาร์มอนิกในอันดับที่ต้องรวมกันแบบ RMS addition จะใช้ค่า $\gamma = 0.66$ (มากกว่า 0.5 เพราะว่าในขั้นตอนนี้ต้องมีการวัดระดับแรงดันฮาร์มอนิก และยังต้องน้อยกว่า 75 % ของขีดจำกัดแรงดันระดับวางแผน) และแทนค่าพิกัดฟอลต์ 60 MVA จะได้ค่าพิกัดกระแสฮาร์มอนิกดังแสดงในตารางที่ ก.2

ตารารงที่ ก.2 ขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์

อันดับฮาร์มอนิก	ขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกระดับวางแผน (%)	ค่า γ	ค่า k-factor	ขีดจำกัดกระแส Linear addition (A.)	ขีดจำกัดกระแส RMS addition (A.)
2	1.5	0.25	2	4.9	
3	3	0.25	2	6.6	
4	1	0.25	2	1.6	
5	3	0.25	2	3.9	
6	0.5	0.25	2	0.5	
7	3	0.66	2		7.4
8	0.4	0.66	2		0.9
9	1.2	0.25	1	1.7	
10	0.4	0.66	1		1.4
11	2	0.66	1		6.3
...	...	...	...	...	...

ในการประเมินนั้นค่าพิกัดกระแสฮาร์มอนิกต้องทำการปรับแก้ตามค่าฟอลต์ ณ จุดต่อร่วมด้วย

ก.4 ขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบแรงดัน 11, 20, 22 กิโลโวลต์

คิดเหมือนการคิดขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ โดยใช้ค่า $\gamma = 0.25$ สำหรับฮาร์มอนิกในอันดับที่ต้องรวมกันแบบ Linear addition และใช้ค่า $\gamma = 0.66$ สำหรับฮาร์มอนิกในอันดับที่ต้องรวมกันแบบ RMS addition แล้วแทนพิกัดฟอลต์ 100, 182, 200 MVA ตามลำดับ จะได้ข้อมูลขีดจำกัดการแพร่กระแสฮาร์มอนิกดังแสดงในตารางที่ 3.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

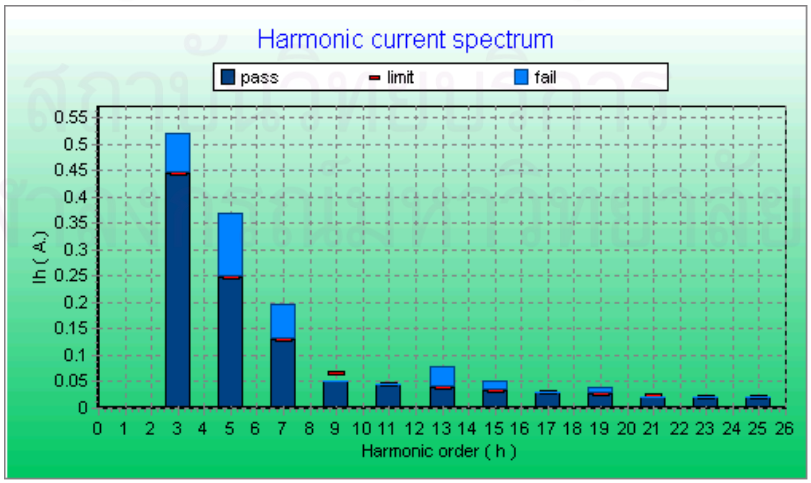
ภาคผนวก ข

ผลการประเมิน

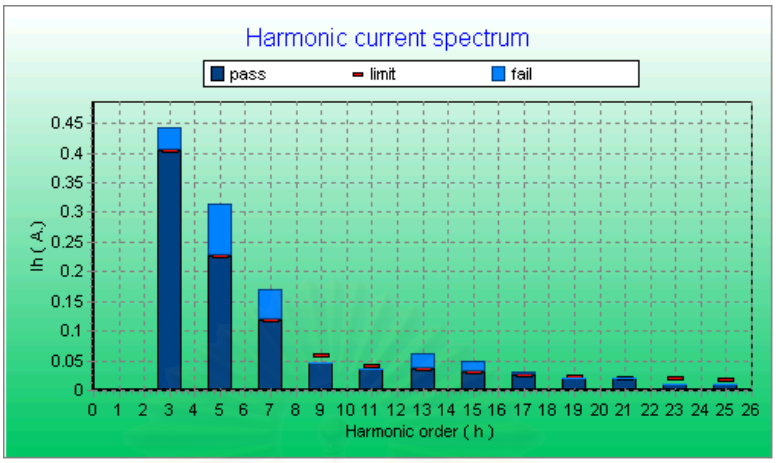
ตารางที่ ข.1 รายละเอียดกระแสฮาร์มอนิก(แอมแปร์)ในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 1

h	คอมพิวเตอร์		โทรทัศน์		เครื่องเสียง		เตาอบ		เครื่องเล่นวีดีโอ		โคมไฟ	
	I_Std	I_Eq	I_Std	I_Eq	I_Std	I_Eq	I_Std	I_Eq	I_Std	I_Eq	I_Std	I_Eq
3	0.446	***0.520 ****	0.404	***0.442 ****	2.300	0.148	2.300	1.500	2.300	0.078	0.077	0.042
5	0.249	***0.369 ****	0.226	***0.314 ****	1.140	0.087	1.140	0.690	1.140	0.028	0.051	0.008
7	0.131	***0.198 ****	0.119	***0.170 ****	0.770	0.035	0.770	0.270	0.770	0.006	0.036	0.007
9	0.066	0.051	0.059	0.047	0.400	0.007	0.400	0.170	0.400	0.011	0.026	0.003
11	0.046	0.046	0.042	0.035	0.330	0.024	0.330	0.090	0.330	0.004	0.015	0.002
13	0.039	***0.080 ****	0.035	***0.062 ****	0.210	0.006	0.210	0.070	0.210	0.002	0.015	0.002
15	0.034	***0.050 ****	0.031	***0.050 ****	0.150	-	0.150	0.040	0.150	0.002	0.015	0.003
17	0.030	0.030	0.027	***0.030 ****	0.132	-	0.132	0.030	0.132	0.001	0.015	0.001
19	0.027	***0.040 ****	0.024	0.020	0.118	-	0.118	0.020	0.118	0.001	0.015	0.001
21	0.024	0.020	0.022	0.020	0.107	-	0.107	0.020	0.107	-	0.015	0.002
23	0.022	0.020	0.020	0.010	0.098	-	0.098	0.010	0.098	-	0.015	0.001
25	0.020	0.020	0.018	0.010	0.090	-	0.090	0.010	0.090	-	0.015	0.001

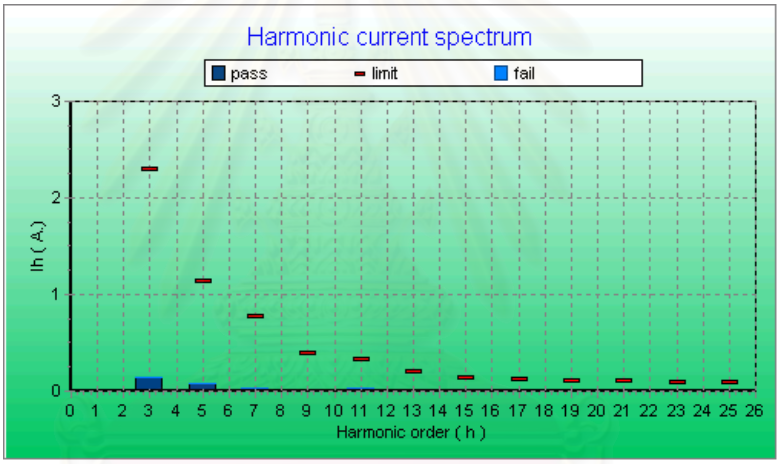
* ค่ากระแสฮาร์มอนิกเกินค่ามาตรฐาน IEC 61000 –3-2



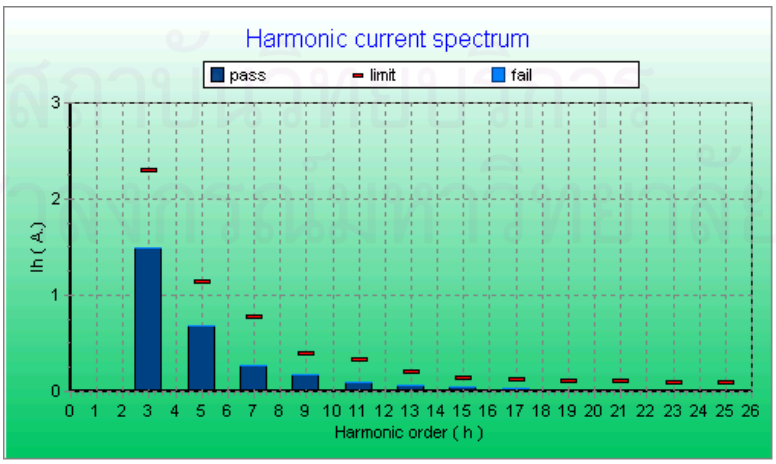
ภาพที่ ข.1 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกของคอมพิวเตอร์เทียบกับมาตรฐาน IEC 61000-3-2



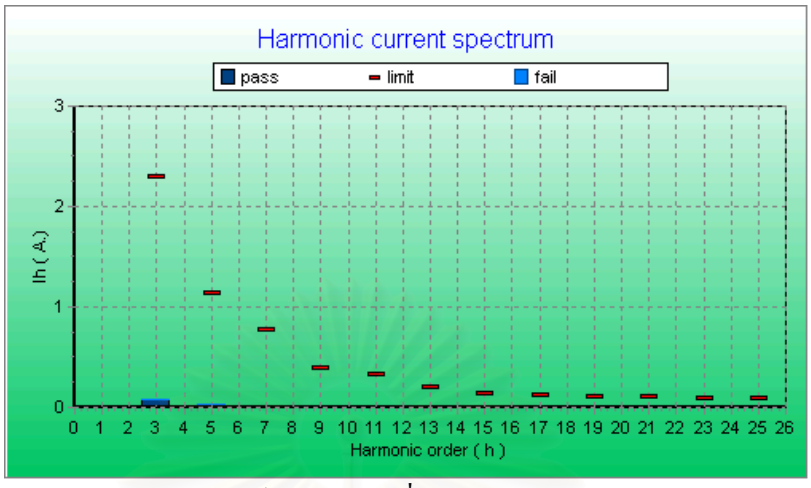
ภาพที่ ข.2 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกของโทรทัศน์เทียบกับมาตรฐาน IEC 61000-3-2



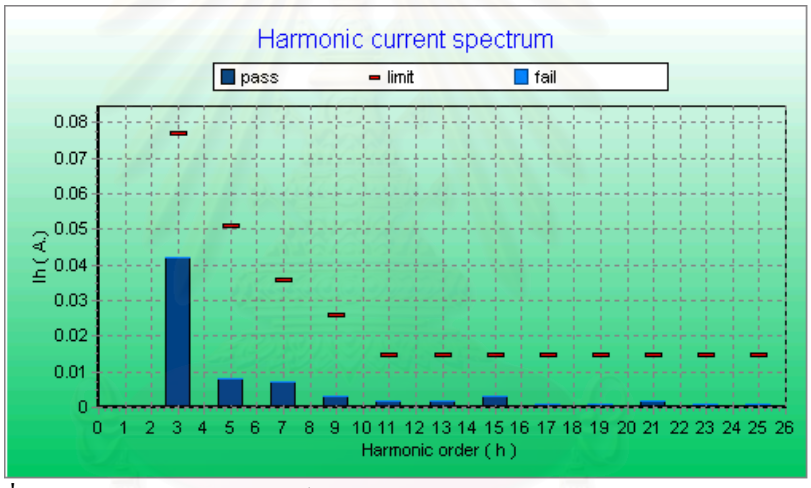
ภาพที่ ข.3 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกของเครื่องเสียงเทียบกับมาตรฐาน IEC 61000-3-2



ภาพที่ ข.4 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกของเตาอบเทียบกับมาตรฐาน IEC 61000-3-2



ภาพที่ ข.5 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกของเครื่องเล่นวีดีโอเทียบกับมาตรฐาน IEC 61000-3-2

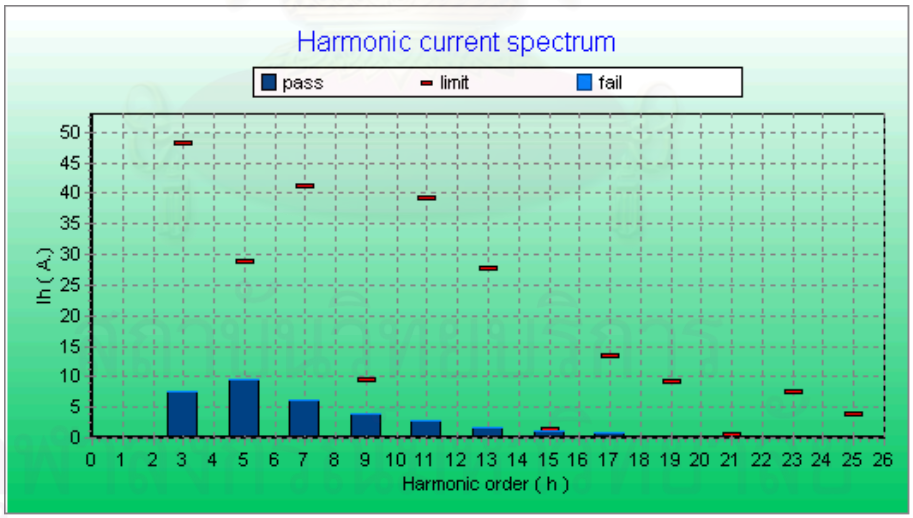


ภาพที่ ข.6 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกของโคมไฟเทียบกับมาตรฐาน IEC 61000-3-2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.2 รายละเอียดกระแสฮาร์มอนิก(แอมแปร์)ในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 2

h	I_G 5/4	I_Eq,sum
3	48.11	7.56
5	28.87	9.573
7	41.24	6.173
9	9.62	3.823
11	39.36	2.683
13	27.76	1.799
15	1.44	0.99
17	13.58	0.752
19	9.12	0.4
21	0.69	0.297
23	7.53	0.355
25	4.04	0.316



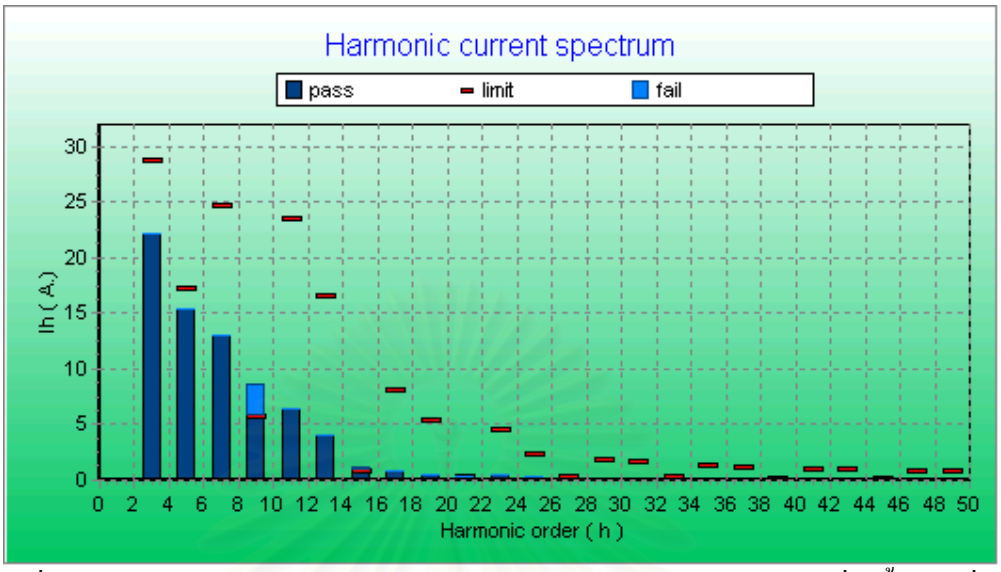
ภาพที่ ข.7 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกรวมเทียบกับมาตรฐาน G 5/4 ในตัวอย่างที่ 2

ตารางที่ ข.3 รายละเอียดกระแสฮาร์มอนิก(แอมแปร์)ในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 3 (การประเมินขั้นตอนที่ 1)

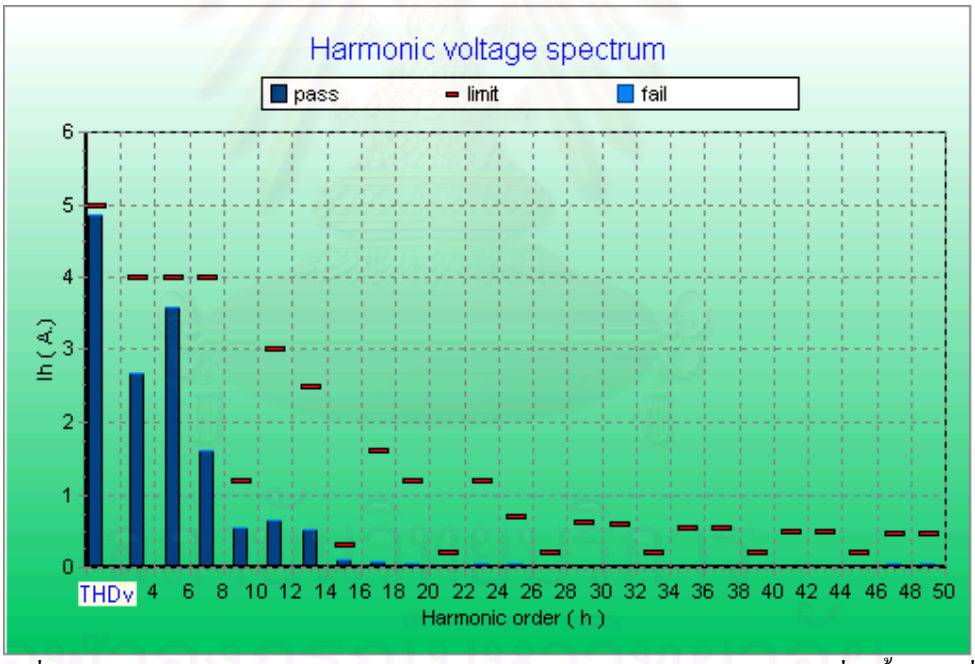
อันดับฮาร์มอนิก	I_G 5/4 Scale by 0.6	I_Eq,sum
3	28.866	22.24
5	17.322	15.467
7	24.744	13.067
9	5.772	***8.638 ****
11	23.616	6.393
13	16.656	4.144
15	0.864	***1.118 *****
17	8.148	0.906
19	5.472	0.556
21	0.414	0.301
23	4.518	0.455
25	2.424	0.412
27	0.318	0.154
29	1.884	0.157
31	1.686	0.157
33	0.264	0.148
35	1.38	0.148
37	1.26	0.144
39	0.222	0.157
41	1.068	0.151
43	0.99	0.144
45	0.192	0.144
47	0.858	0.146
49	0.804	0.146

* ค่ากระแสฮาร์มอนิกเกินค่าขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิก

** ค่ากระแสฮาร์มอนิกเกินค่าขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิก แต่อยู่ในช่วงที่สามารถเกินได้ 10 % หรือ 0.5 แอมแปร์



ภาพที่ ข.8 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกรวมเทียบกับมาตรฐาน G 5/4 ในตัวอย่างที่ 3 ขั้นตอนที่ 1



ภาพที่ ข.9 เปรียบเทียบแรงดันฮาร์มอนิกรวมเทียบกับมาตรฐาน G 5/4 ในตัวอย่างที่ 3 ขั้นตอนที่ 2

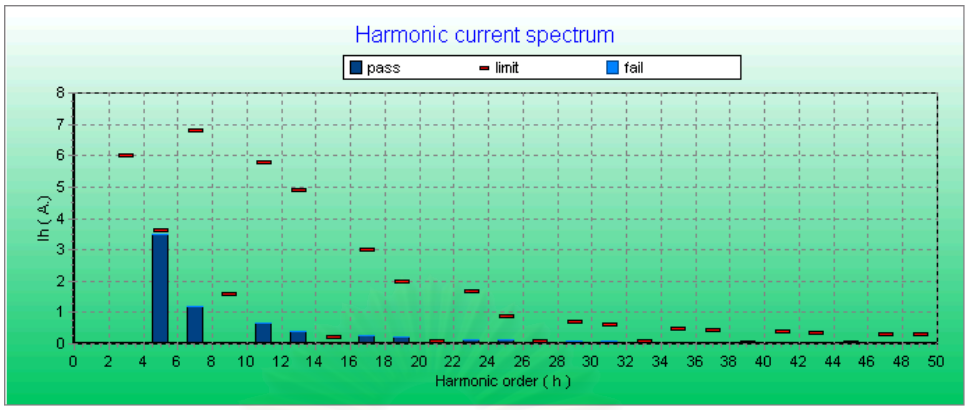
ตารางที่ ข. 4 รายละเอียดแรงดันฮาร์มอนิกในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 3
(การประเมินขั้นตอนที่ 2)

h	Ih,sum (A.)	Vhm (%)	Vhc (%)	Vhp_Std (%)	Vhp_Ld (%)
THDv (%)				5	4.86
3	22.24	1.9	0.77	4	2.67
5	15.467	2.7	0.893	4	3.593
7	13.067	1.2	1.056	4	1.599
9	8.638	0.1	0.449	1.2	0.549
11	6.393	0.5	0.406	3	0.644
13	4.144	0.4	0.311	2.5	0.507
15	1.118		0.097	0.3	0.097
17	0.906		0.089	1.6	0.089
19	0.556		0.061	1.2	0.061
21	0.301		0.036	0.2	0.036
23	0.455		0.06	1.2	0.06
25	0.412		0.059	0.7	0.059
27	0.154		0.024	0.2	0.024
29	0.157		0.026	0.631	0.026
31	0.157		0.028	0.603	0.028
33	0.148		0.028	0.2	0.028
35	0.148		0.03	0.557	0.03
37	0.144		0.031	0.538	0.031
39	0.157		0.035	0.2	0.035
41	0.151		0.036	0.505	0.036
43	0.144		0.036	0.491	0.036
45	0.144		0.037	0.2	0.037
47	0.146		0.04	0.466	0.04
49	0.146		0.041	0.455	0.041

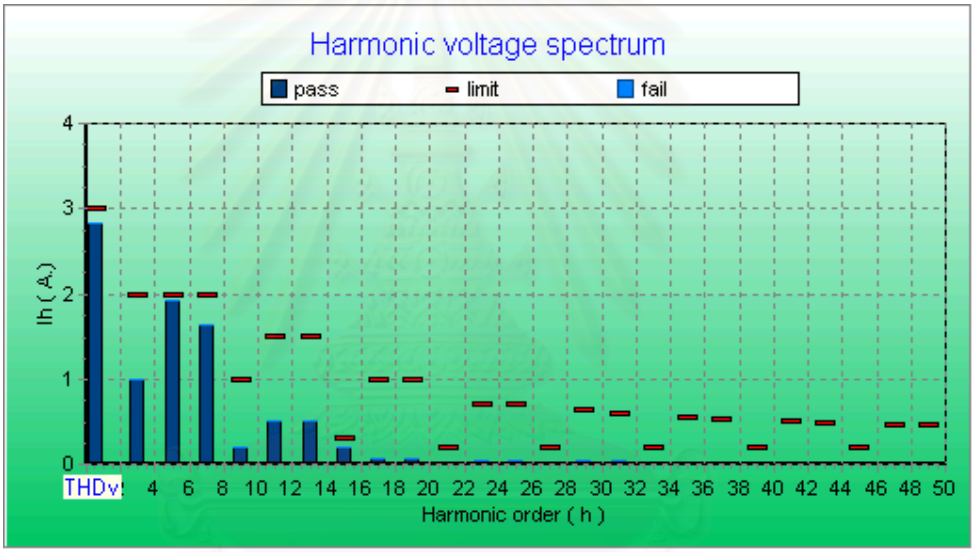
ตารางที่ ข.5 รายละเอียดกระแสฮาร์มอนิก(แอมแปร์)ในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 4 (การประเมินขั้นตอนที่ 2)

h	I_G 5/4	I_Eq,sum
3	6.013	0
5	3.612	3.487
7	6.802	1.186
9	1.604	0
11	5.775	0.667
13	4.886	0.389
15	0.238	0
17	2.988	0.287
19	2.007	0.218
21	0.11	0
23	1.659	0.138
25	0.889	0.123
27	0.092	0
29	0.687	0.077
31	0.614	0.072
33	0.073	0
35	0.504	0.053
37	0.458	0.048
39	0.064	0
41	0.394	0.04
43	0.367	0.037
45	0.055	0
47	0.312	0.029
49	0.293	0.028

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ ข.10 รายละเอียดกระแสฮาร์มอนิกในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 4



ภาพที่ ข.11 รายละเอียดแรงดันฮาร์มอนิกในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

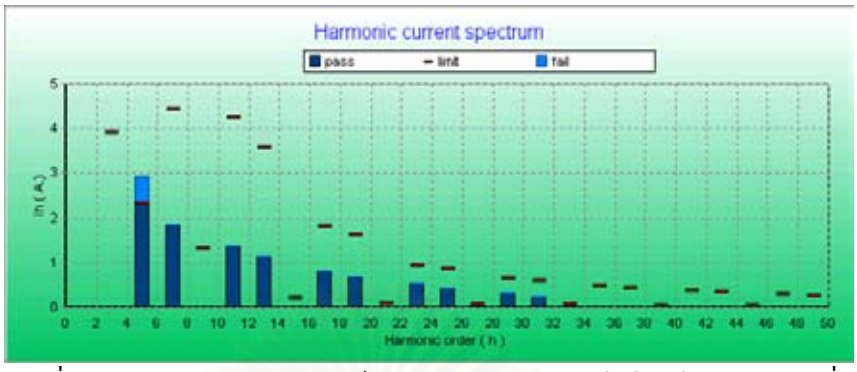
ตารางที่ ข.6 รายละเอียดกระแสฮาร์มอนิก(แอมแปร์)ในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 5 (การประเมินขั้นตอนที่ 2)

h	I_Eq,sum	Vhm (%)	Vhc (%)	Vh,std (%)	Vhp (%)
THDv (%)				3	2.83
3	0	1	0	2	1
5	3.266	1.1	0.83	2	1.93
7	1.414	1.55	0.503	2	1.630
9	0	0.2	0	1	0.2
11	0.481	0.5	0.134	1.5	0.518
13	0.291	0.5	0.096	1.5	0.509
15	0	0.2	0	0.3	0.2
17	0.178		0.077	1	0.077
19	0.135		0.065	1	0.065
21	0		0	0.2	0
23	0.089		0.052	0.7	0.052
25	0.079		0.05	0.7	0.05
27	0		0	0.2	0
29	0.046		0.034	0.631	0.034
31	0.043		0.034	0.603	0.034
33	0		0	0.2	0
35	0.032		0.028	0.557	0.028
37	0.029		0.027	0.538	0.027
39	0		0	0.2	0
41	0.024		0.025	0.505	0.025
43	0.022		0.024	0.491	0.024
45	0		0	0.2	0
47	0.018		0.021	0.466	0.021
49	0.017		0.021	0.455	0.021

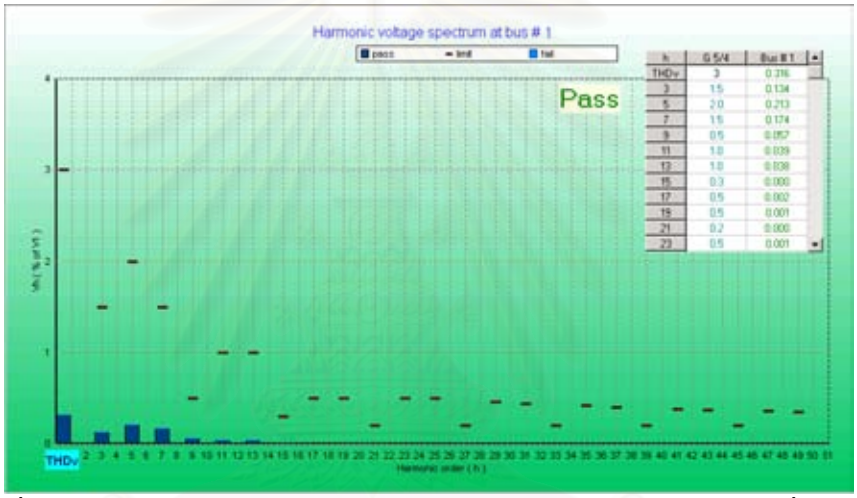
ตารางที่ ข.7 รายละเอียดกระแสฮาร์มอนิก(แอมแปร์)ในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 6 (การประเมินขั้นตอนที่ 2)

h	I_G 5/4	I_Eq,sum
3	3.933	0
5	2.358	***2.919 ****
7	4.455	1.853
9	1.314	0
11	4.248	1.394
13	3.6	1.148
15	0.234	0
17	1.836	0.836
19	1.638	0.689
21	0.108	0
23	0.945	0.541
25	0.873	0.443
27	0.09	0
29	0.675	0.344
31	0.603	0.246
33	0.072	0
35	0.495	0
37	0.45	0
39	0.063	0
41	0.387	0
43	0.36	0
45	0.054	0
47	0.306	0
49	0.288	0

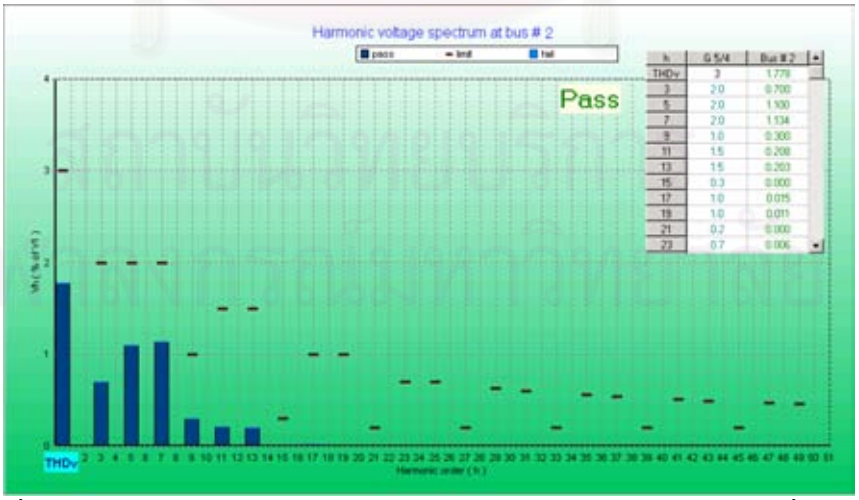
* ค่ากระแสฮาร์มอนิกเกินค่าขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิก



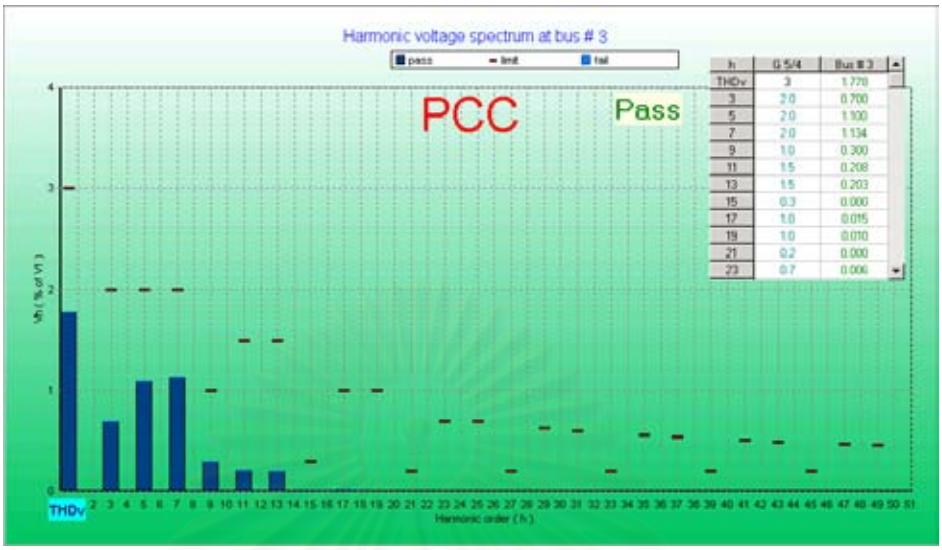
ภาพที่ ข.10 รายละเอียดกระแสฮาร์มอนิกในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 6 (การประเมินขั้นตอนที่ 2)



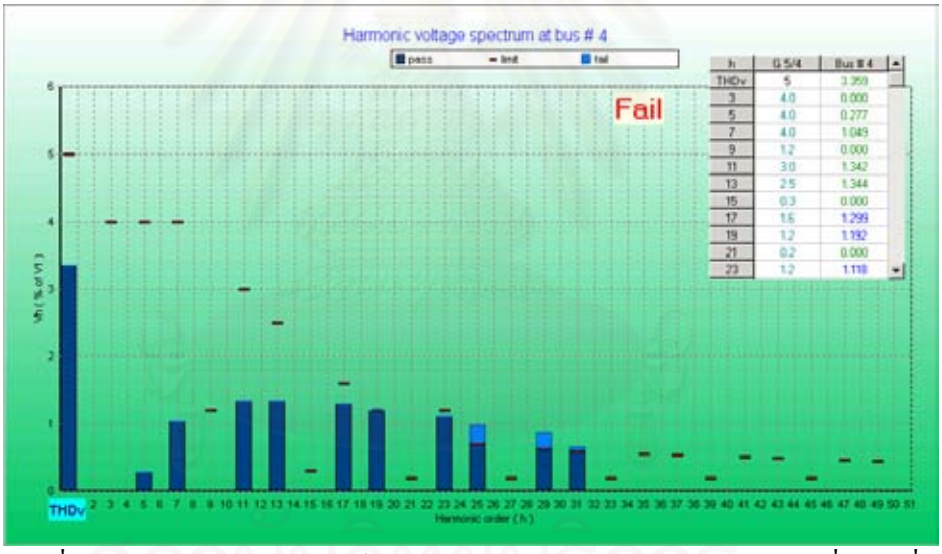
ภาพที่ ข.11 รายละเอียดแรงดันฮาร์มอนิกในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 6 บัสที่ 1 (การประเมินขั้นตอนที่ 3)



ภาพที่ ข.12 รายละเอียดแรงดันฮาร์มอนิกในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 6 บัสที่ 2 (การประเมินขั้นตอนที่ 3)



ภาพที่ ข.13 รายละเอียดแรงดันฮาร์มอนิกในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 6 บัสที่ 3 (การประเมินขั้นตอนที่ 3)



ภาพที่ ข.14 รายละเอียดแรงดันฮาร์มอนิกในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 6 บัสที่ 4 (การประเมินขั้นตอนที่ 3)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.8 รายละเอียดแรงดันฮาร์มอนิก(%)ในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 6 (การประเมินขั้นตอนที่ 3)

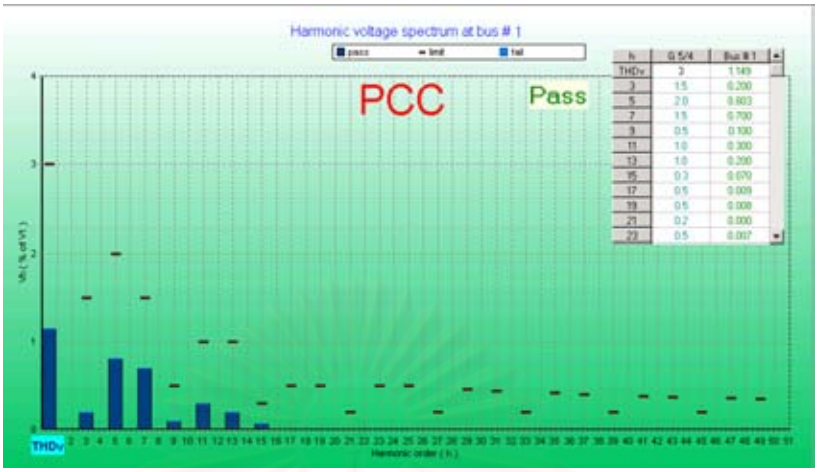
h	G 5/4	Bus # 1	G 5/4	Bus # 2	G 5/4	Bus # 3	G 5/4	Bus # 4
THDv	3	0.316	3	1.778	3	1.778	5	3.359
3	2	0.134	2	0.7	2	0.7	4	0
5	2	0.213	2	1.1	2	1.1	4	0.277
7	2	0.174	2	1.134	2	1.134	4	1.049
9	1	0.057	1	0.3	1	0.3	1.2	0
11	1.5	0.039	1.5	0.208	1.5	0.208	3	1.342
13	1.5	0.038	1.5	0.203	1.5	0.203	2.5	1.344
15	0.3	0	0.3	0	0.3	0	0.3	0
17	1	0.002	1	0.015	1	0.015	1.6	1.299
19	1	0.001	1	0.011	1	0.01	1.2	1.192
21	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0
23	0.7	0.001	0.7	0.006	0.7	0.006	1.2	1.118
25	0.7	0.001	0.7	0.005	0.7	0.005	0.7	***0.984 ** **
27	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0
29	0.631	0	0.631	0.003	0.631	0.003	0.631	***0.866 ** **
31	0.603	0	0.603	0.002	0.603	0.002	0.603	***0.652 ** **
33	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0
35	0.557	0	0.557	0	0.557	0	0.557	0
37	0.538	0	0.538	0	0.538	0	0.538	0
39	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0
41	0.505	0	0.505	0	0.505	0	0.505	0
43	0.491	0	0.491	0	0.491	0	0.491	0
45	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0
47	0.466	0	0.466	0	0.466	0	0.466	0
49	0.455	0	0.455	0	0.455	0	0.455	0

* ค่าแรงดันฮาร์มอนิกเกินค่าขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกระดับวางแผน

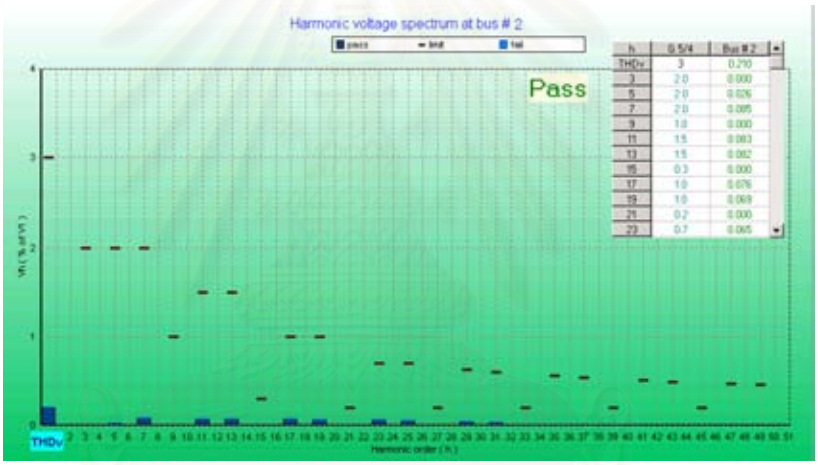
ตารางที่ ข.9 รายละเอียดแรงดันฮาร์มอนิก(%)ในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 7 (การประเมินขั้นตอนที่ 3)

h	G 5/4	Bus # 1	G 5/4	Bus # 2	G 5/4	Bus # 3	G 5/4	Bus # 4
THDv	3	1.149	3	0.210	5	0.243	5	3.675
3	1.5	0.200	2	0.000	4	0.000	4	0.000
5	2	0.803	2	0.026	4	0.039	4	0.423
7	1.5	0.700	2	0.085	4	0.223	4	1.403
9	0.5	0.100	1	0.000	1.2	0.000	1.2	0.000
11	1	0.300	1.5	0.083	3	0.073	3	1.495
13	1	0.200	1.5	0.082	2.5	0.043	2.5	1.460
15	0.3	0.070	0.3	0.000	0.3	0.000	0.3	0.000
17	0.5	0.009	1	0.076	1.6	0.019	1.6	1.346
19	0.5	0.008	1	0.069	1.2	0.013	1.2	***1.221 ****
21	0.2	0.000	0.2	0.000	0.2	0.000	0.2	0.000
23	0.5	0.007	0.7	0.065	1.2	0.008	1.2	1.141
25	0.5	0.007	0.7	0.057	0.7	0.006	0.7	***1.006 ****
27	0.2	0.000	0.2	0.000	0.2	0.000	0.2	0.000
29	0.459	0.006	0.631	0.052	0.631	0.004	0.631	***0.917 ****
31	0.442	0.005	0.603	0.042	0.603	0.003	0.603	0.728
33	0.2	0.000	0.2	0.000	0.2	0.000	0.2	0.000
35	0.414	0.000	0.557	0.000	0.557	0.000	0.557	0.000
37	0.403	0.000	0.538	0.000	0.538	0.000	0.538	0.000
39	0.2	0.000	0.2	0.000	0.2	0.000	0.2	0.000
41	0.383	0.000	0.505	0.000	0.505	0.000	0.505	0.000
43	0.374	0.000	0.491	0.000	0.491	0.000	0.491	0.000
45	0.2	0.000	0.2	0.000	0.2	0.000	0.2	0.000
47	0.36	0.000	0.466	0.000	0.466	0.000	0.466	0.000
49	0.353	0.000	0.455	0.000	0.455	0.000	0.455	0.000

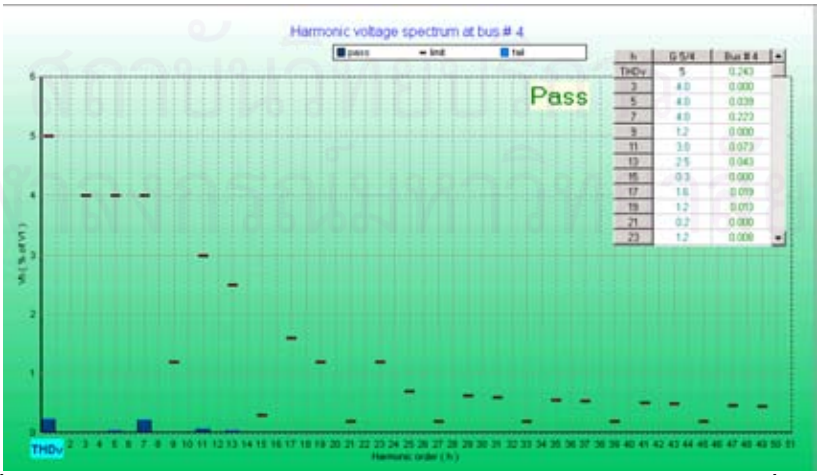
* ค่าแรงดันฮาร์มอนิกเกินค่าขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกระดับวางแผน



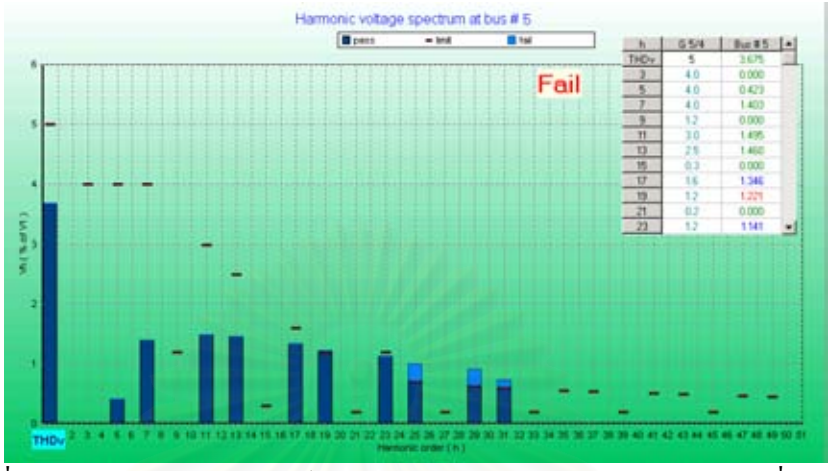
ภาพที่ ข.15 รายละเอียดแรงดันฮาร์มอนิกในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 7 บัสที่ 1



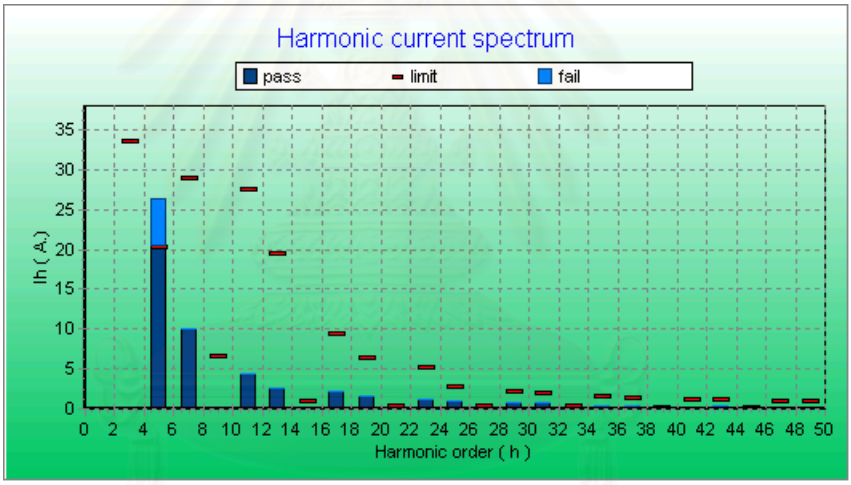
ภาพที่ ข.16 รายละเอียดแรงดันฮาร์มอนิกในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 7 บัสที่ 2



ภาพที่ ข.18 รายละเอียดแรงดันฮาร์มอนิกในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 7 บัสที่ 3



ภาพที่ ข.19 รายละเอียดแรงดันฮาร์มอนิกในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 7 บัสที่ 4



ภาพที่ ข.20 รายละเอียดกระแสฮาร์มอนิกในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 8 (การประเมินขั้นตอนที่ 1)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.10 รายละเอียดกระแสฮาร์มอนิก(แอมแปร์)ในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 8 (การประเมินขั้นตอนที่ 1)

h	I_G 5/4	I_Eq,sum
3	33.677	0
5	20.209	***26.423 ****
7	28.868	10.102
9	6.734	0
11	27.552	4.405
13	19.432	2.527
15	1.008	0
17	9.506	2.191
19	6.384	1.565
21	0.483	0
23	5.271	1.252
25	2.828	1.051
27	0.371	0
29	2.198	0.738
31	1.967	0.716
33	0.308	0
35	1.61	0.447
37	1.47	0.47
39	0.259	0
41	1.246	0.291
43	1.155	0.313
45	0.224	0
47	1.001	0.224
49	0.938	0.224

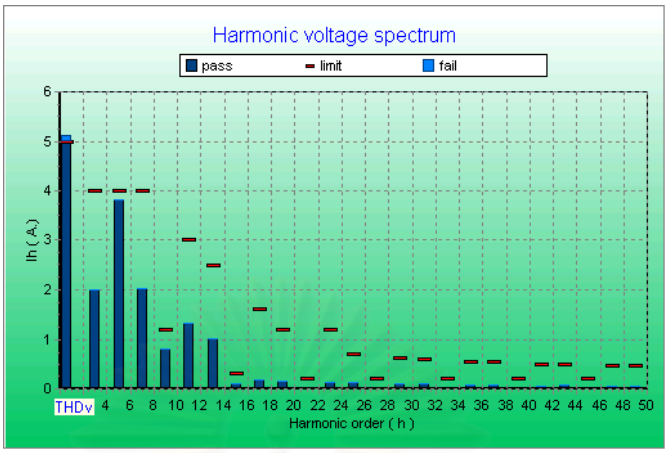
* ค่ากระแสฮาร์มอนิกเกินค่าขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

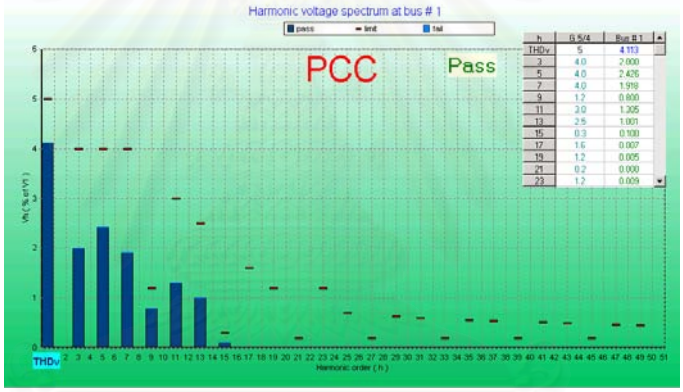
ตารางที่ ข.11 รายละเอียดแรงดันฮาร์มอนิก(%)ในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 8 (การประเมินขั้นตอนที่ 2)

h	Ih,sum	Vhm (%)	Vhc (%)	Vhp_Std (%)	Vhp_Ld (%)
THDv (%)				5	***5.12 ****
3	0	2	0	4	2
5	26.423	2.5	1.308	4	3.808
7	10.102	1.9	0.7	4	2.025
9	0	0.8	0	1.2	0.8
11	4.405	1.3	0.24	3	1.322
13	2.527	1	0.163	2.5	1.013
15	0	0.1	0	0.3	0.1
17	2.191		0.184	1.6	0.184
19	1.565		0.147	1.2	0.147
21	0		0	0.2	0
23	1.252		0.143	1.2	0.143
25	1.051		0.13	0.7	0.13
27	0		0	0.2	0
29	0.738		0.106	0.631	0.106
31	0.716		0.11	0.603	0.11
33	0		0	0.2	0
35	0.447		0.077	0.557	0.077
37	0.47		0.086	0.538	0.086
39	0		0	0.2	0
41	0.291		0.059	0.505	0.059
43	0.313		0.067	0.491	0.067
45	0		0	0.2	0
47	0.224		0.052	0.466	0.052
49	0.224		0.054	0.455	0.054

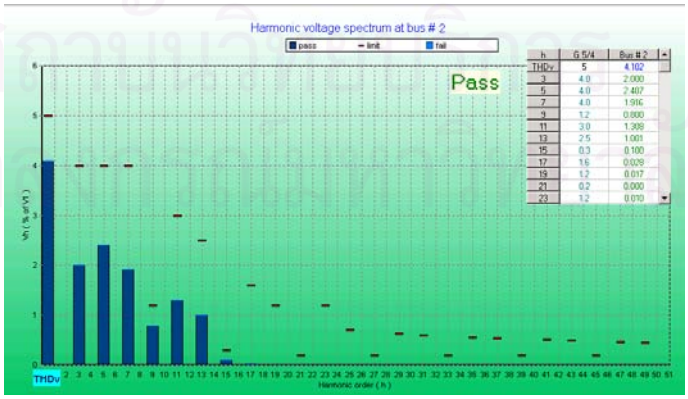
* ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมมีค่าเกินที่กำหนดไว้



ภาพที่ ข.21 รายละเอียดแรงดันฮาร์มอนิกในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 8
(การประเมินขั้นตอนที่ 2)



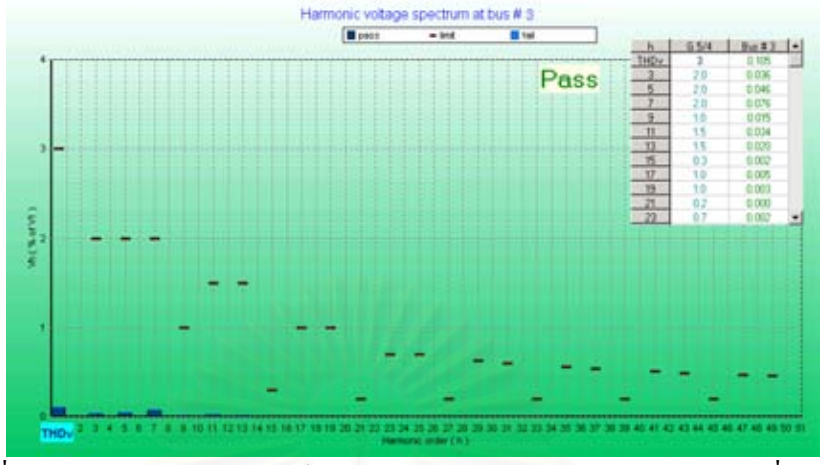
ภาพที่ ข.22 รายละเอียดแรงดันฮาร์มอนิกในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 8 บัสที่ 1
(การประเมินขั้นตอนปรับปรุง)



ภาพที่ ข.23 รายละเอียดแรงดันฮาร์มอนิกในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 8 บัสที่ 2
(การประเมินขั้นตอนปรับปรุง)

ตารางที่ ข.12 รายละเอียดแรงดันฮาร์มอนิก(%)ในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 8 (การประเมินขั้นตอนปรับปรุง)

h	G 5/4	Bus # 1	G 5/4	Bus # 2	G 5/4	Bus # 3
THDv	5	4.234	5	4.223	3	0.107
3	4.0	2	4.0	2	2.0	0.036
5	4.0	2.626	4.0	2.607	2.0	0.049
7	4.0	1.918	4.0	1.916	2.0	0.076
9	1.2	0.8	1.2	0.8	1.0	0.015
11	3.0	1.305	3.0	1.308	1.5	0.034
13	2.5	1.001	2.5	1.001	1.5	0.02
15	0.3	0.1	0.3	0.1	0.3	0.002
17	1.6	0.007	1.6	0.028	1.0	0.005
19	1.2	0.005	1.2	0.017	1.0	0.003
21	0.2	0	0.2	0	0.2	0
23	1.2	0.009	1.2	0.01	0.7	0.002
25	0.7	0.01	0.7	0.008	0.7	0.001
27	0.2	0	0.2	0	0.2	0
29	0.631	0.009	0.631	0.005	0.631	0.001
31	0.603	0.01	0.603	0.004	0.603	0.001
33	0.2	0	0.2	0	0.2	0
35	0.557	0.008	0.557	0.002	0.557	0
37	0.538	0.009	0.538	0.002	0.538	0
39	0.2	0	0.2	0	0.2	0
41	0.505	0.007	0.505	0.001	0.505	0
43	0.491	0.007	0.491	0.001	0.491	0
45	0.2	0	0.2	0	0.2	0
47	0.466	0.006	0.466	0.001	0.466	0
49	0.455	0.006	0.455	0.001	0.455	0



ภาพที่ ข.24 รายละเอียดแรงดันฮาร์มอนิกในการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 8 บัสที่ 3 (การประเมินขั้นตอนปรับปรุง)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างรายงานผลการประเมิน

เป็นตัวอย่างรายงานที่ได้จากการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าตัวอย่างที่ 2 และตัวอย่างที่ 6 ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Power Quality Laboratory
Chulalongkorn University
Bangkok Thailand 10330

Department of Electrical Engineering
254 Phyathai Road, Patumwan,
Tel : + 662-218-6531

Report Number. Example # 2 Date. April 30 2005

Company / Factory Network Data

Company / Factory Name Example # 2

Contact Example # 2

Phone No. Example # 2 **Fax.** Example # 2

E-mail Example # 2

Address Example # 2

Voltage at Point of Connon Couling 0.4 **kV.**

Frequency (Hz) 50

Fault level (MVA at PCC) 10.00

X / R Ratio

Stage of Connection Stage 1

Detail Aggregate currents lower than G5/4 Std

Power Quality Laboratory
Chulalongkorn University
Bangkok Thailand 10330

Department of Electrical Engineering
254 Phyathai Road, Patumwan,
Tel : + 662-218-6531

Report Number. Example # 2 Date. April 30 2005

Detail of assessments

Stage of Connection Stage 1 **Voltage at Point of Connon Couling** 0.4 **kV.**

Detail Aggregate currents lower than G5/4 Std

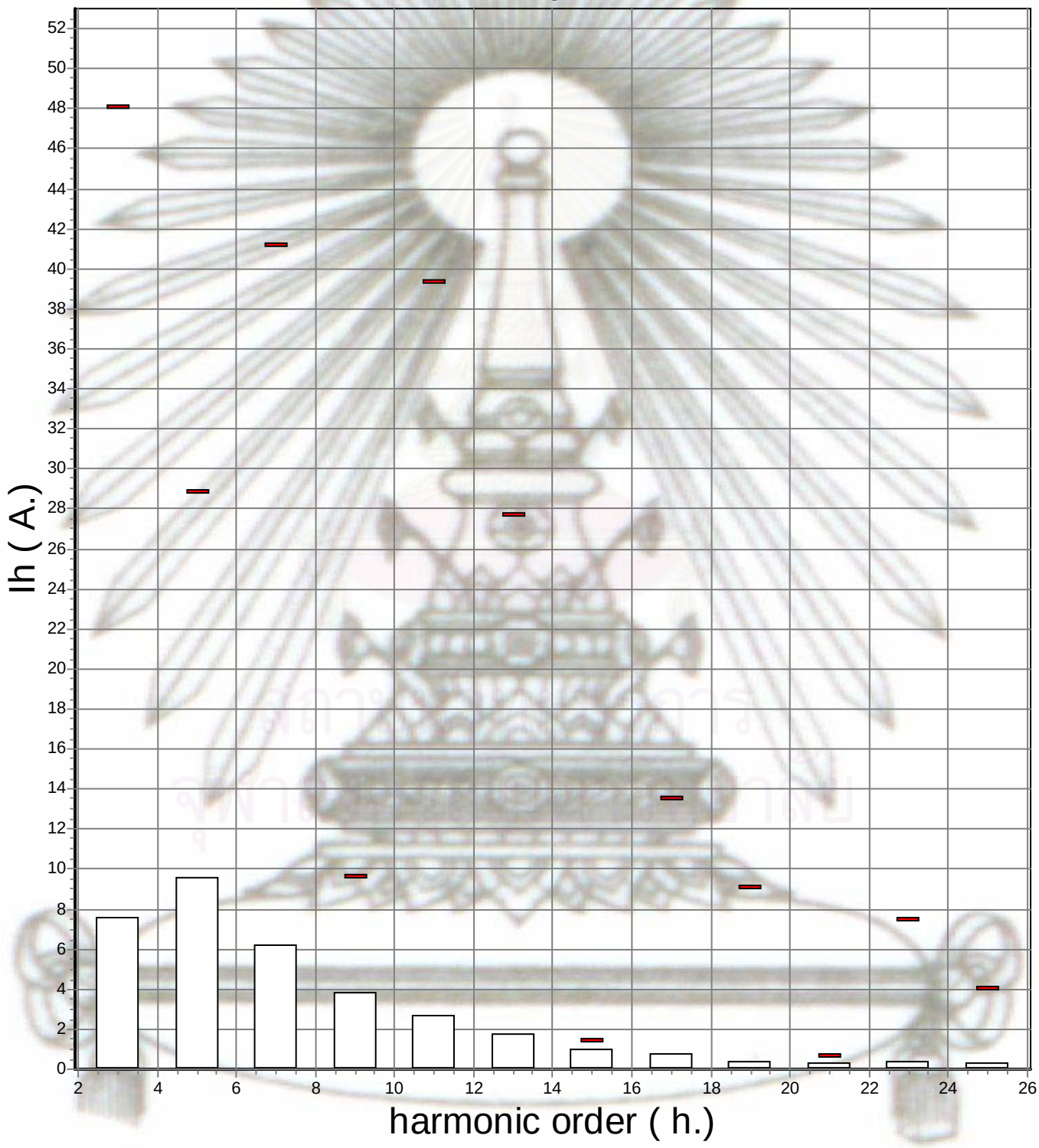
h	I_G 5/4	Bus # PCC
3	48.110	7.560
5	28.870	9.573
7	41.240	6.173
9	9.620	3.823
11	39.360	2.683
13	27.760	1.799
15	1.440	0.990
17	13.580	0.752
19	9.120	0.400
21	0.690	0.297
23	7.530	0.355
25	4.040	0.316

Power Quality Laboratory
Chulalongkorn University
Bangkok Thailand 10330

Department of Electrical Engineering
254 Phyathai Road, Patumwan,
Tel : + 662-218-6531

Report Number. Example # 2 Date. April 30 2005

Harmonic current spectrum at PCC



Power Quality Laboratory
Chulalongkorn University
Bangkok Thailand 10330

Department of Electrical Engineering
254 Phyathai Road, Patumwan,
Tel : + 662-218-6531

Report Number. nn Date. dd/mm/yy

Equipment(s) Data

Ld # 1 Data

Amount 2 **Name** Equipment # 1

Load Type IEC 61000-3-2 Class A

Vrated (kV.) -- **Irms (A.)** 8

Apparent Power (kVA.) -- **Real Power (kW.)** --

h	Ih (A.)	h	Ih (A.)	h	Ih (A.)	h	Ih (A.)	h	Ih (A.)
1	--	11	1.72	21	.21	1	--	41	--
2	--	12	--	22	--	32	--	42	--
3	3.78	13	1.17	23	.23	33	--	43	--
4	--	14	--	24	--	34	--	44	--
5	3.41	15	0.7	25	.2	35	--	45	--
6	--	16	--	26	--	36	--	46	--
7	2.91	17	0.35	27	--	37	--	47	--
8	--	18	--	28	--	38	--	48	--
9	2.33	19	0.2	29	--	39	--	49	--
10	--	20	--	30	--	40	--	50	--

Ld # 2 Data

Amount 2 **Name** Equipment # 2

Load Type --

Vrated (kV.) -- **Irms (A.)** --

Apparent Power (kVA.) -- **Real Power (kW.)** --

h	Ih (A.)	h	Ih (A.)	h	Ih (A.)	h	Ih (A.)	h	Ih (A.)
1	9.9	11	.8	21	--	1	--	41	--
2	--	12	--	22	--	32	--	42	--
3	--	13	.5	23	.1	33	--	43	--
4	--	14	--	24	--	34	--	44	--
5	3.7	15	--	25	.1	35	--	45	--
6	--	16	--	26	--	36	--	46	--
7	1.6	17	.4	27	--	37	--	47	--
8	--	18	--	28	--	38	--	48	--
9	--	19	.2	29	--	39	--	49	--
10	--	20	--	30	--	40	--	50	--

Power Quality Laboratory
Chulalongkorn University
Bangkok Thailand 10330

Department of Electrical Engineering
254 Phyathai Road, Patumwan,
Tel : + 662-218-6531

Report Number. Example # 6 Date. April 30 2005

Company / Factory Network Data

Company / Factory Name Example # 6

Contact Example # 6

Phone No. Example # 6 **Fax.** Example # 6

E-mail Example # 6

Address Example # 6

Voltage at Point of Connon Couling	22	**kV.**
Frequency (Hz)	50	
Fault level (MVA at PCC)	4,250.00	
X / R Ratio	10.00	
Stage of Connection	Stage 3	
Detail	Voltage distortion $ THDv lower than G5/4 Std	

For Stage 2 / Stage 3 connection

Existing worst case distortion (THDv)	1.6371
Existing worst case 5th harmonic (V5)	1.1000
THDv calculation	1.7782
V5	1.1002

Power Quality Laboratory
Chulalongkorn University
Bangkok Thailand 10330

Department of Electrical Engineering
254 Phyathai Road, Patumwan,
Tel : + 662-218-6531

Report Number. Example # 6 Date. April 30 2005

Detail of assessments

Stage of Connection Stage 3 **Voltage at Point of Connon Couling** 22 **kV.**

Detail Voltage distortion $ THDv lower than G5/4 Std

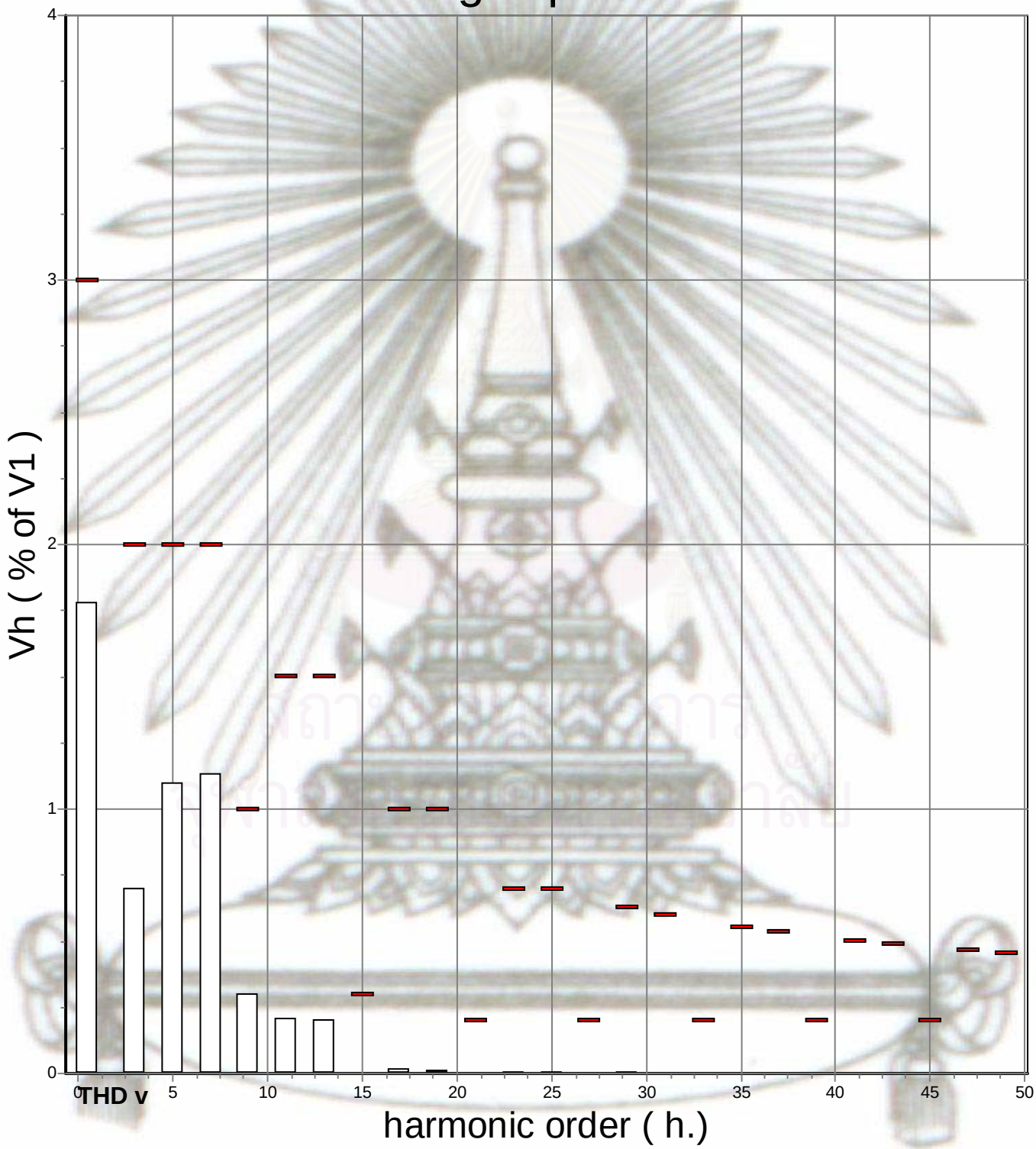
h	G 5/4	Bus # PCC
THDv	3	1.778
3	2.0	0.700
5	2.0	1.100
7	2.0	1.134
9	1.0	0.300
11	1.5	0.208
13	1.5	0.203
15	0.3	0.000
17	1.0	0.015
19	1.0	0.010
21	0.2	0.000
23	0.7	0.006
25	0.7	0.005
27	0.2	0.000
29	0.631	0.003
31	0.603	0.002
33	0.2	0.000
35	0.557	0.000
37	0.538	0.000
39	0.2	0.000
41	0.505	0.000
43	0.491	0.000
45	0.2	0.000
47	0.466	0.000
49	0.455	0.000

Power Quality Laboratory
Chulalongkorn University
Bangkok Thailand 10330

Department of Electrical Engineering
254 Phyathai Road, Patumwan,
Tel : + 662-218-6531

Report Number. Example # 6 Date. April 30 2005

Harmonic voltage spectrum at PCC



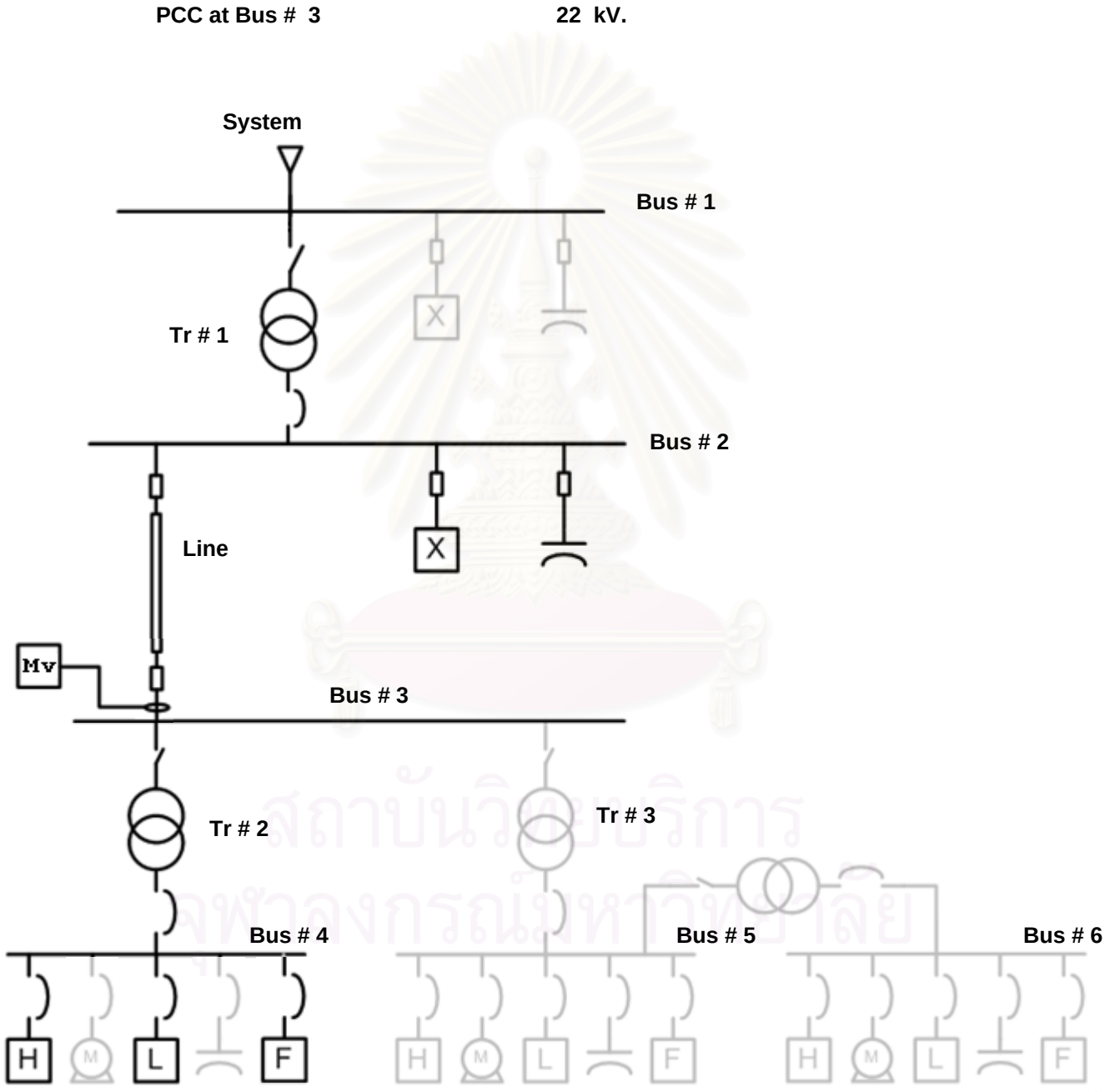
Power Quality Laboratory
Chulalongkorn University
Bangkok Thailand 10330

Department of Electrical Engineering
254 Phyathai Road, Patumwan,
Tel : + 662-218-6531

Report Number. Example # 6 Date. April 30 2005

Stage 3 assessments

Single line daigram



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Power Quality Laboratory
Chulalongkorn University
Bangkok Thailand 10330

Department of Electrical Engineering
254 Phyathai Road, Patumwan,
Tel : + 662-218-6531

Report Number. Example # 6 Date. April 30 2005

Stage 3 assessments

System data

Voltage (kV.)	115	**Short circuit (MVA.)**	4250
X / R	10	**Frequency (Hz.)**	50

Bus # 1 data

Voltage (kV.)	115		
Load			
P (MW.)	--	**Q (MVAr.)**	--
Capacitor			
Voltage (kV.)	--	**Qc (MVAr.)**	--

Tr # 1 Data

Primary Voltage (kV.)	115	**Secondary Voltage (kV.)**	22
Rating (MVA.)	36	**% Z**	6.5
Loss (kW.)	185		
Winding	D-D		

Bus # 2 data

Voltage (kV.)	22		
Load			
P (MW.)	6.8	**Q (MVAr.)**	4.2
Capacitor			
Voltage (kV.)	22	**Qc (MVAr.)**	8.750

Line data

Resistance (Ohm / km.)	.001802	**Reactance (Ohm / km.)**	.003155
Length (meter)	1000		

Background harmonic voltages (Vhm) at PCC

h	Vhm (%V1)	h	Vhm (%V1)	h	Vhm (%V1)
3	.7	23		43	
5	1.1	25		45	
7	.9	27		47	
9	.3	29		49	
11	.2	31			
13	.2	33			
15		35			
17		37			
19		39			
21		41			

Power Quality Laboratory
Chulalongkorn University
Bangkok Thailand 10330

Department of Electrical Engineering
254 Phyathai Road, Patumwan,
Tel : + 662-218-6531

Report Number. Example # 6 Date. April 30 2005

Equipment(s) Data

Tr # 2 Data

Primary Voltage (kV.)	22	**Secondary Voltage (kV.)**	.4
Rating (MVA.)	1.5	**% Z**	6.5
Loss (kW.)	19.8		
Winding	D-Y		

Bus # 4 data

Voltage (kV.) .4

Motor

P operated	--	**PF (%)**	--
Efficiency (%)	--	**I_{LR} / I_{rM}**	--
MW per pole	--		

Linear Load

P (kW.)	700	**Q (kVAr.)**	525

Capacitor

Voltage (kV.)	--	**Qc (kVAr.)**	--

Filter

Type	Single tune filter		
Voltage (kV.)	.44	**Qc rated (kVAr.)**	750
Tunding point	4.8	**Q factor**	60

Power Quality Laboratory
Chulalongkorn University
Bangkok Thailand 10330

Department of Electrical Engineering
254 Phyathai Road, Patumwan,
Tel : + 662-218-6531

Report Number. Example # 6 Date. April 30 2005

Equipment(s) Data at Bus # 4

Ld # 1 Data

Amount 1 **Name** Equipment # 1

Load Type --

Vrated (kV.) -- **Irms (A.)** --

Apparent Power (kVA.) -- **Real Power (kW.)** --

h	Ih (A.)	h	Ih (A.)	h	Ih (A.)	h	Ih (A.)	h	Ih (A.)
1	--	**11**	76.68	**21**	--	**1**	13.53	**41**	--
2	--	**12**	--	**22**	--	**32**	--	**42**	--
3	--	**13**	63.15	**23**	29.77	**33**	--	**43**	--
4	--	**14**	--	**24**	--	**34**	--	**44**	--
5	160.58	**15**	--	**25**	24.36	**35**	--	**45**	--
6	--	**16**	--	**26**	--	**36**	--	**46**	--
7	101.94	**17**	46.01	**27**	--	**37**	--	**47**	--
8	--	**18**	--	**28**	--	**38**	--	**48**	--
9	--	**19**	37.89	**29**	18.94	**39**	--	**49**	--
10	--	**20**	--	**30**	--	**40**	--	**50**	--

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายทวีชัย สกุลกิจไพบูลย์ เกิดวันที่ 17 มิถุนายน พ.ศ. 2523 ที่อำเภอเมือง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2544 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย