การวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม
โดยคำนึงถึงความถูกต้องของแบบจำลองฮาร์มอนิก

นายเรวัต สุวรรณไพรัตน์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2545
ISBN 974-17-1207-3
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HARMONIC FLOW ANALYSIS IN INDUSTRIAL FACTORY WITH VALID HARMONIC MODEL CONSIDERATION

Mr. Rawat Suwanpirat

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 2002

ISBN 974-17-1207-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรมโดยคำนึงถึงความถูกต้องของแบบจำลองฮาร์มอนิก
โดย	นายเรวัต สุวรรณไพรัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ไชยะ แช่มช้อย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ไชยะ แช่มช้อย)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

..... กรรมการ
(นายพงษ์ศักดิ์ หาญบุญญานนท์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เรวัต สุวรรณไพรัตน์ : การวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรมโดยคำนึงถึงความถูกต้องของแบบจำลองฮาร์มอนิก (HARMONIC FLOW ANALYSIS IN INDUSTRIAL FACTORY WITH VALID HARMONIC MODEL CONSIDERATION) อาจารย์ที่ปรึกษา : อ. ไชยะ แช่มช้อย, 166 หน้า. ISBN 974-17-1207-3

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรม โดยที่คำนึงถึงความเหมาะสมของแบบจำลองของอุปกรณ์และลำดับฮาร์มอนิกที่ต้องการวิเคราะห์โดยสามารถวิเคราะห์ได้ทั้ง 24 ชั่วโมง วิธีการวิเคราะห์อาศัยการสร้างเมตริกซ์ความนำและสมมติแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเป็นแหล่งกระแสฮาร์มอนิกฉีดเข้าบัสที่ต่ออยู่

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมานี้ สามารถใช้วิเคราะห์หาแรงดันฮาร์มอนิกของบัสแต่ละบัสซึ่งใช้เปรียบเทียบกับมาตรฐานได้ นอกจากนั้นยังสามารถวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านไปยังอุปกรณ์และจุดต่อร่วม หาอิมพีแดนซ์สมมูลเพื่อวิเคราห์เรโซแนนซ์ทั้งแบบขนานและแบบอนุกรม และผลกระทบจากแหล่งฮาร์มอนิกที่ต้องการ โดยสามารถเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ได้เป็นเวลาต่อเนื่อง 24 ชั่วโมงพร้อมเสนอผลได้ด้วยกราฟ 3 มิติ

นอกจากนี้ โปรแกรมยังสามารถวิเคราะห์ผลจากการเปลี่ยนแปลงโหลด การติดตั้งอุปกรณ์ใหม่เพิ่ม การนำอุปกรณ์ที่ต่อใช้งานออกจากระบบ การเปลี่ยนแปลงจำนวนชุดของคาปาซิเตอร์ที่ต่อใช้งาน การติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิก และ การติดตั้งแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเพิ่ม เป็นต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต _____

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ปีการศึกษา 2545

4370469621 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: HARMONICS ANALYSIS / HARMONIC MODEL / HARMONICS IN INDUSTRIAL
RAWAT SUWANPIRAT: HARMONIC FLOW ANALYSIS IN INDUSTRIAL FACTORY WITH VALID HARMONIC MODEL CONSIDERATION: CHAIYA CHAMCHOY, 166 pp.
ISBN 974-17-1207-3

This thesis emphasizes on harmonic flow analysis in industrial power system by using harmonic frequency dependent model for system components and equipments. The analysis runs for 24 hrs a day to evaluate harmonic flow variation. Admittance matrix method and harmonic sources defined as harmonic current sources inject harmonic current to connected bus are used in this analysis.

The significant capability of the developed program is that it is able to analyze harmonic voltage at each bus which can be compared with harmonic limits, harmonic current flow through any equipments and the point of common coupling, equivalent impedance for parallel and series resonance analysis, effect of identify harmonic source and also compare 24 hour analysis result in three-dimension graph.

In addition, this program can analyze the effect of load changing, additional devices to industrial system, removing devices from industrial system, change of capacitor, installation of harmonic filter and adding harmonic source.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Electrical engineering Student's signature _____

Field of study Electrical engineering Advisor's signature _____

Academic year 2002

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์ไชยะ แช่มช้อย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา โดยได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆของการทำวิทยานิพนธ์มาด้วยดีตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขจนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนั้น ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณคณะกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วยผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์ รองศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ และคุณพงษ์ศักดิ์ หาญบุญญานนท์ ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

อนึ่ง เนื่องจากทุนการศึกษาในระดับปริญญามหาบัณฑิตส่วนหนึ่ง ได้รับการสนับสนุนจากสมาคมนิสิตเก่า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย ที่ได้เล็งเห็นความสำคัญต่อการพัฒนาการศึกษาในวิชาชีพวิศวกรรมไฟฟ้า ซึ่งเป็นการวางรากฐานที่สำคัญอันจะนำไปสู่การพัฒนาประเทศไทย อย่างแท้จริง

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา – มารดาที่ได้ให้กำลังใจเสมอมา และทุกๆท่านที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เรวัต สุวรรณไพรัตน์

30 กันยายน 2545

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฎ

สารบัญภาพ..... ด

บทที่

1. บทนำ..... 1

1.1 แนวเหตุผล..... 1

1.2 วัตถุประสงค์..... 2

1.3 ขอบเขตโครงการวิทยานิพนธ์..... 2

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน..... 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์..... 3

2. การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโดยการใช้เมตริกซ์ความนำและแบบจำลองฮาร์มอนิก..... 5

2.1 การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกด้วยเมตริกซ์ความนำ..... 5

2.2 แบบจำลองของอุปกรณ์ไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมที่ความถี่ฮาร์มอนิก..... 7

2.2.1 โครงข่ายของระบบจ่ายไฟจากการไฟฟ้าที่โรงงานต่ออยู่ 8

2.2.2 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า..... 8

2.2.3 แบบจำลองของมอเตอร์..... 10

2.2.4 แบบจำลองของโหลดเชิงเส้น..... 13

2.2.5 แบบจำลองของตัวเก็บประจุ..... 16

2.2.6 แบบจำลองของตัวกรองฮาร์มอนิก..... 17

2.2.7 แบบจำลองของสายเคเบิลและสายส่ง..... 20

2.2.7.1 แบบจำลองของสายส่งระยะสั้น 21

2.2.7.2 แบบจำลองของสายเคเบิล 21

2.2.8 แบบจำลองของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก..... 23

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

3. ข้อมูลขั้นตอนและผลที่ต้องการในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม... 26

3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม 26

3.1.1 แรงดันฮาร์มอนิกจากแหล่งจ่ายและกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิด.. 26

3.1.2 ข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลองฮาร์มอนิก..... 29

3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบโรงงานอุตสาหกรรม..... 32

3.3 ผลที่ต้องการจากการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรรม..... 35

3.3.1 แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส..... 35

3.3.2 กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์..... 35

3.3.3 การหาเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel resonance)..... 37

3.3.4 การหาเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series resonance)..... 39

3.3.5 การหากระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งฮาร์มอนิกที่สนใจ..... 40

4. การพัฒนาโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม..... 41

4.1 ส่วนที่ใช้สร้างไดอะแกรมในระบบไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรม..... 41

4.1.1 การสร้างไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรม..... 42

4.1.2 ตัวอย่างการสร้างไดอะแกรม..... 43

4.2 ส่วนรับข้อมูลของอุปกรณ์แต่ละตัว..... 44

4.2.1 ระบบจ่ายไฟที่โรงงานต่ออยู่..... 45

4.2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า..... 46

4.2.3 โหลดมอเตอร์..... 46

4.2.4 โหลดเชิงเส้น..... 47

4.2.5 ชุดคาปาซิเตอร์..... 47

4.2.6 ตัวกรองฮาร์มอนิก..... 48

4.2.7 สายส่งย่อยหรือสายเคเบิล..... 48

4.2.8 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก..... 49

4.2.9 บัส..... 49

4.3 ส่วนการแสดงผล..... 50

4.3.1 การแสดงผลที่หน้าจอสร้างไดอะแกรม..... 50

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

4.3.2 การแสดงผลทั้งหมด..... 51

4.3.3 การแสดงผลเปรียบเทียบ 58

5. ผลของแบบจำลองฮาร์มอนิกต่อการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก..... 62

5.1 ผลของแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าต่อการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก..... 62

5.2 ผลของแบบจำลองของโหลดเชิงเส้นต่อการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก..... 67

5.3 ผลของแบบจำลองของสายส่งย่อยหรือสายเคเบิลต่อการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก... 71

6. มาตรฐานฮาร์มอนิก..... 82

6.1 มาตรฐาน IEEE Std 519-1992..... 83

6.1.1 แนวปฏิบัติสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้า..... 83

6.1.2 แนวปฏิบัติสำหรับการไฟฟ้า..... 85

6.2 มาตรฐาน IEC 61000 Series of Standards..... 85

6.2.1 มาตรฐาน IEC 61000-2-2 : 1990..... 86

6.2.2 มาตรฐาน IEC 61000-2-4 : 1994..... 86

6.3 มาตรฐาน G.5/4-2001..... 88

6.4 มาตรฐาน EN 50160 – 1994..... 94

6.5 ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม.... 96

6.5.1 ค่าจำกัดของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิก..... 96

6.5.2 วิธีการประเมิน..... 97

6.5.3 การบังคับใช้..... 98

7. ตัวอย่างการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม.....101

7.1 ตัวอย่างที่ 1.....101

7.1.1 ระบบยังไม่ต่อคาปาซิเตอร์และตัวกรองฮาร์มอนิก.....102

7.1.2 ระบบต่อคาปาซิเตอร์แต่ไม่ต่อตัวกรองฮาร์มอนิก.....107

7.1.3 ระบบต่อตัวกรองฮาร์มอนิกแทนคาปาซิเตอร์เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง.....116

7.2 ตัวอย่างที่ 2.....124

7.3 ตัวอย่างที่ 3.....127

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

7.4 ตัวอย่างที่ 4.....139

8. สรุปและข้อเสนอแนะ.....145

รายการอ้างอิง.....148

ภาคผนวก.....150

ประวัติผู้เขียน.....166

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่

2.1 ค่า $\tan\psi_1$ เทียบกับ S_n 10

2.2 แบบจำลองของอุปกรณ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ 24

3.1 ขนาดของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ แบบอุดมคติ..... 28

3.1 ขนาดของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ แบบอุดมคติ..... 28

4.1 สัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่ใช้ในโปรแกรม..... 42

5.1 ข้อมูลเบื้องต้นของอุปกรณ์ไฟฟ้า 63

5.2 ข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกจาก คอนเวอร์เตอร์ 63

5.3(ก) แรงดันฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์เมื่อเปลี่ยนแบบจำลองของหม้อแปลง ที่บัส 1... 63

5.3(ข) แรงดันฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์เมื่อเปลี่ยนแบบจำลองของหม้อแปลง ที่บัส 2... 64

5.4(ก) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์เมื่อเลือกแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า
เป็นแบบ typical transformer model และ ไม่คิดผลของความต้านทานทางผิว..... 65

5.4(ข) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์เมื่อเลือกแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า
เป็นแบบ typical transformer model และ คิดผลของความต้านทานทางผิว..... 65

5.4(ค) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์เมื่อเลือกแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า
เป็นแบบ CIGRE transformer model..... 66

5.5(ก) แรงดันฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์เมื่อเปลี่ยนแบบจำลองของโหลด ที่บัส 1..... 68

5.5(ข) แรงดันฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์เมื่อเปลี่ยนแบบจำลองของโหลด ที่บัส 2..... 68

5.6(ก) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์เมื่อเลือกแบบจำลองของโหลดเชิงเส้น
เป็นแบบ parallel load model และ ไม่คิดผลของความต้านทานทางผิว..... 69

5.6(ข) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์เมื่อเลือกแบบจำลองของโหลดเชิงเส้น
เป็นแบบ parallel load model และ คิดผลของความต้านทานทางผิว..... 69

5.6(ค) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์เมื่อเลือกแบบจำลองของโหลดเชิงเส้น
เป็นแบบ CIGRE load model 70

5.7 ข้อมูลเพิ่มเติมของอุปกรณ์ไฟฟ้า..... 72

5.8(ก) แรงดันฮาร์มอนิกที่ได้จากการวิเคราะห์เมื่อเปลี่ยนแบบจำลอง
จำลองของสายส่งย่อยหรือสายเคเบิล ที่บัส 1..... 73

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

5.8(ข) แรงดันฮาร์มอนิกที่ได้จากการวิเคราะห์เมื่อเปลี่ยนแบบจำลอง
จำลองของสายส่งย่อยหรือสายเคเบิล ที่บัส 2..... 74

5.8(ค) แรงดันฮาร์มอนิกที่ได้จากการวิเคราะห์เมื่อเปลี่ยนแบบจำลอง
จำลองของสายส่งย่อยหรือสายเคเบิล ที่บัส 3..... 75

5.9(ก) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์เมื่อเลือกแบบจำลองจำลองของสายส่งย่อย
หรือสายเคเบิลเป็นแบบอนุกรม ไม่คิดความต้านทานตามผิว..... 76

5.9(ข) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์เมื่อเลือกแบบจำลองจำลองของสายส่งย่อย
หรือสายเคเบิลเป็นแบบอนุกรม คิดความต้านทานตามผิว..... 77

5.9(ค) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์เมื่อเลือกแบบจำลองจำลองของสายส่งย่อย
หรือสายเคเบิลเป็นแบบ pi model และ ไม่คิดความต้านทานตามผิว..... 78

5.9(ง) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์เมื่อเลือกแบบจำลองจำลองของสายส่งย่อย
หรือสายเคเบิลเป็นแบบ pi model และ คิดความต้านทานตามผิว 79

5.10 ความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมที่บัสต่างๆ
เมื่อเปลี่ยนแบบจำลองของสายส่งย่อยหรือสายเคเบิล..... 80

5.11 ความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมที่บัสต่างๆ
เมื่อเปลี่ยนแบบจำลองของสายส่งย่อยหรือสายเคเบิล..... 80

6.1 ค่าจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกตาม IEEE Std.519-1992 83

6.2 ค่าจำกัดของแรงดันฮาร์มอนิกตาม IEEE Std.519-1992 85

6.3 ค่าจำกัดของระดับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับแรงดันต่ำ (415/240 volt)..... 86

6.4 ค่าจำกัดของระดับฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับ (ไม่รวม ฮาร์มอนิกที่เป็นพหุคูณของ 3). 87

6.5 ค่าจำกัดของระดับฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับ (ฮาร์มอนิกที่เป็นพหุคูณของ 3 ลำดับคี่) 87

6.6 ค่าจำกัดของแรงดันฮาร์มอนิกผิดเพี้ยนรวม (THD)..... 88

6.7 ค่าจำกัดของระดับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับแรงดันต่ำ 400 V..... 89

6.8 ค่าจำกัดของระดับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับแรงดัน 6.6 kV. , 11 kV. และ 20 kV.... 89

6.9 ค่าจำกัดของระดับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับแรงดัน มากกว่า 20 kV.
และ น้อยกว่า 145 kV..... 90

6.10 ค่าจำกัดของระดับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับแรงดัน 275 kV. และ 400 kV..... 90

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

6.11 ขนาดใหญ่ที่สุดของคอนเวอร์เตอร์(converter) และ เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าสลับ (AC regulator) ในระบบไฟ 3 เฟส แต่ละตัวภายใต้ค่าจำกัดของ ขั้นตอนที่ 1..... 91

6.12 ค่าจำกัดกระแส(Irms)มากที่สุดที่สำหรับจุดรวมโหลด (aggregate loads) และ อุปกรณ์ ที่มีพิกัดกระแสมากกว่า 16 แอมแปร์ต่อเฟส ภายใต้ข้อจำกัดของ ขั้นตอนที่ 1..... 91

6.13 ขนาดใหญ่ที่สุดของคอนเวอร์เตอร์(converter) และ เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าสลับ (AC regulator) แต่ละตัวภายใต้ค่าจำกัดของ ขั้นตอนที่ 2..... 92

6.14 ค่าจำกัดกระแส(Irms/ph) มากที่ยอมให้ผู้ใช้ไฟฟ้าปล่อยเข้าสู่ระบบไฟฟ้า ภายใต้ข้อจำกัดของขั้นตอนที่ 2..... 93

6.15 ค่าจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ถึงลำดับที่ 25 แสดงเป็นค่าร้อยละ ของแรงดัน ระบบ(U_n.) ($U_n \leq 1000$ V.)..... 94

6.16 ค่าจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ถึงลำดับที่ 25 แสดงเป็นค่าร้อยละ ของแรงดัน ระบบ(U_n.). (1 kV. < $U_c \leq$ 35 kV.)..... 95

6.17 การเปรียบเทียบค่าจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกจากมาตรฐานจำนวน 5 ฉบับ..... 96

6.18 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อร่วม *(PCC)..... 96

6.19 ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆ ใดๆที่จุดต่อร่วม(PCC) (รวมทั้งระดับความเพี้ยนที่มีอยู่เดิม)..... 96

6.20 ขนาดสูงสุดของอุปกรณ์ประเภทคอนเวอร์เตอร์(convertor) และ เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าสลับ(Ac regulator) ตามขั้นตอนที่ 1..... 97

7.1(ก) ข้อมูลเบื้องต้นของระบบไฟฟ้า,หม้อแปลงไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก..... 102

7.1(ข) ข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกจาก คอนเวอร์เตอร์..... 102

7.2 ข้อมูลเบื้องต้นของโหลดเชิงเส้น..... 102

7.3(ก) แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อเปลี่ยนขนาดของโหลดเชิงเส้น..... 103

7.3(ข) แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 2 ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อเปลี่ยนขนาดของโหลดเชิงเส้น.....104

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

7.4(ก) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้ขนาดของโหลดเชิงเส้น1000 kVA (เครื่องหมายลบแสดง ทิศกระแสไหลเข้าบัส หรือบัสแรงสูง)..... 105
7.4(ข) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้ขนาดของโหลดเชิงเส้น1300 kVA (เครื่องหมายลบแสดง ทิศกระแสไหลเข้าบัส หรือบัสแรงสูง)..... 105
7.4(ค) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้ขนาดของโหลดเชิงเส้น1700 kVA (เครื่องหมายลบแสดง ทิศกระแสไหลเข้าบัส หรือบัสแรงสูง)..... 106
7.4(ง) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้ขนาดของโหลดเชิงเส้น2000 kVA (เครื่องหมายลบแสดง ทิศกระแสไหลเข้าบัส หรือบัสแรงสูง)..... 106
7.5(ก) สรุปแรงดันผิดเพี้ยนรวมในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 1 107
7.5(ข) สรุปกระแสผิดเพี้ยนรวมในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 1 107
7.6 เปรียบเทียบผลของโปรแกรมในการหากำลังรีแอคทีฟเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง..... 108
7.7(ก) แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อเปลี่ยนขนาดของโหลดเชิงเส้น และ ต่อคาปาซิเตอร์..... 109
7.7(ข) แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 2 ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อเปลี่ยนขนาดของโหลดเชิงเส้น และ ต่อคาปาซิเตอร์..... 110
7.8(ก) กระแสฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้ขนาดของของโหลดเชิงเส้น 1000 kVAและคาปาซิเตอร์ 10 ชุด (เครื่องหมายลบแสดง ทิศกระแสไหลเข้าบัส หรือบัสแรงสูง) 111
7.8(ข) กระแสฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้ขนาดของของโหลดเชิงเส้น 1300 kVAและคาปาซิเตอร์ 11 ชุด (เครื่องหมายลบแสดง ทิศกระแสไหลเข้าบัส หรือบัสแรงสูง) 111

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

7.8(ค)กระแสฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้ขนาดของ
ของโหลดเชิงเส้น 1700 kVAและคาปาซิเตอร์ 13 ชุด
(เครื่องหมายลบแสดง ทิศกระแสไหลเข้าบัส หรือบัสแรงสูง) 112
7.8(ง) กระแสฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้ขนาดของ
ของโหลดเชิงเส้น 2000 kVAและคาปาซิเตอร์ 14 ชุด
(เครื่องหมายลบแสดง ทิศกระแสไหลเข้าบัส หรือบัสแรงสูง) 112
7.9(ก)สรุปแรงดันผิดเพี้ยนรวมในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 1
เมื่อติดตั้งชุด คาปาซิเตอร์..... 113
7.9(ข)สรุปกระแสผิดเพี้ยนรวมในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 1
เมื่อติดตั้งชุด คาปาซิเตอร์..... 113
7.10 เปรียบเทียบผลของโปรแกรมในการหากำลังรีแอคทีฟ
เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง 116
7.11(ก) แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1
1 เมื่อเปลี่ยนขนาดของโหลดเชิงเส้น และ ตัวกรองดีจูน..... 117
7.11(ข) แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 2 ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1
1 เมื่อเปลี่ยนขนาดของโหลดเชิงเส้น และ ตัวกรองดีจูน..... 118
7.12(ก)กระแสฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้ขนาดของ
ของโหลดเชิงเส้น 1000 kVAและตัวกรองดีจูน 9 ชุด
(เครื่องหมายลบแสดง ทิศกระแสไหลเข้าบัส หรือบัสแรงสูง) 119
7.12(ข)กระแสฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้ขนาดของ
ของโหลดเชิงเส้น 1300 kVAและตัวกรองดีจูน 10 ชุด
(เครื่องหมายลบแสดง ทิศกระแสไหลเข้าบัส หรือบัสแรงสูง) 119
7.12(ค)กระแสฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้ขนาดของ
ของโหลดเชิงเส้น 1700 kVAและตัวกรองดีจูน 12 ชุด
(เครื่องหมายลบแสดง ทิศกระแสไหลเข้าบัส หรือบัสแรงสูง) 120

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

7.12(ง)กระแสฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้ขนาดของ
ของโหลดเชิงเส้น 2000 kVAและตัวกรองดีจูน 13 ชุด
(เครื่องหมายลบแสดง ทิศกระแสไหลเข้าบัส หรือบัสแรงสูง) 120

7.13(ก) สรุปแรงดันผิดเพี้ยนรวมในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 1
เมื่อติดตั้งชุดตัวกรองฮาร์มอนิกดีจูนแทนชุดคาปาซิเตอร์..... 121

7.13(ข) สรุปกระแสผิดเพี้ยนรวมในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 1
เมื่อติดตั้งชุดตัวกรองฮาร์มอนิกดีจูนแทนชุดคาปาซิเตอร์..... 121

7.14(ก) ข้อมูลเบื้องต้นของระบบไฟฟ้า,หม้อแปลงไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก..... 124

7.14(ข) ข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกจาก คอนเวอร์เตอร์ทั้งสองตัว..... 125

7.15 แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 2..... 125

7.16 กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์ ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 2..... 126

7.17 กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าตัวกรองฮาร์มอนิก ที่มาจากแหล่งกำเนิดในโรงงานที่ 2. 127

7.18(ก)ข้อมูลเบื้องต้นของระบบไฟฟ้า,หม้อแปลงไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 3..... 128

7.18(ข)ข้อมูลโหลดเชิงเส้น 24 ชั่วโมง, PF = 08 lagging 128

7.19(ก)แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 3..... 129

7.19(ข)กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์ ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 3..... 130

7.20(ก)แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 3
เมื่อใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแทนคาปาซิเตอร์.....134

7.20(ก) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์ ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 3
เมื่อใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแทนคาปาซิเตอร์..... 135

7.21(ก) ข้อมูลเบื้องต้นของระบบไฟฟ้า,หม้อแปลงไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก.....139

7.21(ข) ข้อมูลของสาย..... 139

7.21(ค) ข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกจาก คอนเวอร์เตอร์..... 140

7.21(ง) ข้อมูลเบื้องต้นโหลดเชิงเส้นและมอเตอร์..... 140

7.21(จ) ข้อมูลโหลดเชิงเส้นตัวที่ 1(Ln_Load 1)..... 140

7.22(ก) สรุปแรงดันผิดเพี้ยนรวมในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 4.....141

7.22(ข) สรุปกระแสผิดเพี้ยนรวมในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 4..... 141

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ตัวอย่างระบบโรงงานอุตสาหกรรม	5
2.2	วงจรสมมูลจากรูปที่ 2.1 เพื่อสร้างเมตริกซ์ความนำ	6
2.3	แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าตาม CIGRE	9
2.4	แสดงแบบจำลองของอินดัคชั่นมอเตอร์	11
2.5	วงจรสมมูลของโหลดแบบอนุกรม	13
2.6	วงจรสมมูลโหลดแบบขนาน	14
2.7	วงจรสมมูลของโหลดเสนอโดย CIGRE	15
2.8	แบบจำลองของตัวเก็บประจุ	16
2.9	การใช้ชุดตัวเก็บประจุมาทำเป็นตัวกรองฮาร์มอนิก	17
2.10	แบบจำลองของตัวกรองฮาร์มอนิกปรับคลื่นเดี่ยว	18
2.11	แบบจำลองของตัวกรองผ่านสูง	20
2.12	แบบจำลองของสายส่งระยะสั้น	21
2.13	แบบจำลองของสายเคเบิล	21
3.1	วงจรของคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ 3 เฟส	27
3.2	รูปคลื่นกระแสของคอนเวอร์เตอร์แบบอุดมคติ	27
3.3	ขั้นตอนการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม	34
3.4	ทิศทางของกระแสปกติเมื่อเทียบกับแรงดัน	36
3.5	ตัวอย่างวงจรในโรงงานอุตสาหกรรม	37
3.6	อิมพีแดนซ์ที่แหล่งกระแสฮาร์มอนิกมองเห็น	38
3.7	อิมพีแดนซ์สมมูลแสดงความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (f_r)	39
3.8	อิมพีแดนซ์ที่แหล่งแรงดันฮาร์มอนิกทางด้านแหล่งจ่ายมองเห็น	40
4.1	ตัวอย่างไดอะแกรมของโรงงานขนาดเล็ก	43
4.2	ตัวอย่างไดอะแกรมของโรงงานอุตสาหกรรมที่มีหลายบัส	44
4.3	แบบฟอร์มรับข้อมูลของระบบจ่ายไฟที่โรงงานต่ออยู่และ แบบฟอร์มรับข้อมูลความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกด้านแรงดัน	45
4.4	แบบฟอร์มรับข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.5 แบบฟอร์มรับข้อมูลของโหลดมอเตอร์..... 46
4.6 แบบฟอร์มรับข้อมูลของโหลดเชิงเส้น..... 47
4.7 แบบฟอร์มรับข้อมูลของชุดคาปาซิเตอร์..... 47
4.8 แบบฟอร์มรับข้อมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก..... 48
4.9 แบบฟอร์มรับข้อมูลของสายส่งย่อยหรือสายเคเบิล..... 48
4.10 แบบฟอร์มรับข้อมูลของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก..... 49
4.11 แบบฟอร์มรับข้อมูลของบัส..... 49
4.12 การแสดงผลที่หน้าจอ..... 51
4.13 การแสดงผลของแรงดันฮาร์มอนิกในรูปตาราง..... 52
4.14 การแสดงผลของแรงดันฮาร์มอนิกในรูปสเปกตรัม..... 52
4.15 การแสดงผลของแรงดันฮาร์มอนิกในรูปสเปกตรัม 3 มิติ..... 53
4.16 การแสดงผลของกระแสฮาร์มอนิกในรูปตาราง..... 54
4.17 การแสดงผลของกระแสฮาร์มอนิกในรูปสเปกตรัม..... 54
4.18 การแสดงผลของกระแสฮาร์มอนิกในรูปสเปกตรัม 3 มิติ..... 55
4.19 การแสดงผลของอิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส..... 56
4.20 การแสดงผลของอิมพีแดนซ์สมมูลที่บัสแบบพื้นผิว 3 มิติ..... 56
4.21 การแสดงผลของอิมพีแดนซ์สมมูลเพื่อวิเคราะห์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม..... 57
4.22 การแสดงผลของอิมพีแดนซ์สมมูลเพื่อวิเคราะห์เรโซแนนซ์
แบบอนุกรมเป็นพื้นผิว 3 มิติ..... 57
4.23 การแสดงผลแบบเปรียบเทียบแรงดันฮาร์มอนิกแบบตาราง..... 59
4.24 การแสดงผลแบบเปรียบเทียบแรงดันฮาร์มอนิกแบบสเปกตรัม..... 59
4.25 การแสดงผลแบบเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกแบบตาราง..... 60
4.26 การแสดงผลแบบเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกแบบสเปกตรัม..... 60
4.27 การแสดงผลแบบเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิก
เฉพาะที่มาจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่เลือกแบบตาราง..... 61
4.27 การแสดงผลแบบเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิก
เฉพาะที่มาจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่เลือกแบบสเปกตรัม..... 61

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.1 ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์ฮาร์มอนิก เมื่อเปลี่ยนแบบจำลองหม้อแปลง..... 62

5.2 วงจรสมมูลของไดอะแกรมรูปที่ 5.1..... 66

5.3 ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์ฮาร์มอนิก เมื่อเปลี่ยนแบบสายส่งย่อยหรือสายเคเบิล..... 71

5.4 วงจรสมมูลของไดอะแกรม รูปที่ 5.3..... 80

6.1 แผนผังแสดงวิธีการบังคับใช้ข้อกำหนดของการไฟฟ้า..... 100

7.1 ไดอะแกรมของโรงงานสำหรับตัวอย่างที่ 1..... 101

7.2 อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส 2 เมื่อโหลดมีขนาด 1000 kVA, คาปาซิเตอร์ 10 ชุด..... 114

7.3 อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส 2 เมื่อโหลดมีขนาด 1300 kVA, คาปาซิเตอร์ 11 ชุด..... 114

7.4 อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส 2 เมื่อโหลดมีขนาด 1700 kVA, คาปาซิเตอร์ 13 ชุด..... 114

7.5 อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส 2 เมื่อโหลดมีขนาด 2000 kVA, คาปาซิเตอร์ 14 ชุด..... 114

7.6 ขนาดของกระแสในอุปกรณ์ เมื่อโหลดมีขนาด 1000 kVA, คาปาซิเตอร์ 10 ชุด..... 115

7.7 ขนาดของกระแสในอุปกรณ์ เมื่อโหลดมีขนาด 1300 kVA, คาปาซิเตอร์ 11 ชุด..... 115

7.8 ขนาดของกระแสในอุปกรณ์ เมื่อโหลดมีขนาด 1700 kVA, คาปาซิเตอร์ 13 ชุด..... 115

7.9 ขนาดของกระแสในอุปกรณ์ เมื่อโหลดมีขนาด 2000 kVA, คาปาซิเตอร์ 14 ชุด..... 115

7.10 อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส 2 เมื่อโหลดมีขนาด 1000 kVA, ดีจูน 9 ชุด..... 122

7.11 อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส 2 เมื่อโหลดมีขนาด 1300 kVA, ดีจูน 10 ชุด..... 122

7.12 อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส 2 เมื่อโหลดมีขนาด 1700 kVA, ดีจูน 12 ชุด..... 122

7.13 อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส 2 เมื่อโหลดมีขนาด 2000 kVA, ดีจูน 13 ชุด..... 122

7.14 ขนาดของกระแสในอุปกรณ์ เมื่อโหลดมีขนาด 1000 kVA, ดีจูน 9 ชุด..... 123

7.15 ขนาดของกระแสในอุปกรณ์ เมื่อโหลดมีขนาด 1300 kVA, ดีจูน 10 ชุด..... 123

7.16 ขนาดของกระแสในอุปกรณ์ เมื่อโหลดมีขนาด 1700 kVA, ดีจูน 12 ชุด..... 123

7.17 ขนาดของกระแสในอุปกรณ์ เมื่อโหลดมีขนาด 2000 kVA, ดีจูน 13 ชุด..... 123

7.18 ไดอะแกรมของโรงงานสำหรับตัวอย่างที่ 2..... 124

7.19 ไดอะแกรมของโรงงานสำหรับตัวอย่างที่ 3..... 128

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

7.20 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดกับที่ไหลเข้าอุปกรณ์
เมื่อโหลดมีขนาด 125 kVA, ในตัวอย่างที่ 3..... 131

7.21 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดกับที่ไหลเข้าอุปกรณ์
เมื่อโหลดมีขนาด 225 kVA, ในตัวอย่างที่ 3..... 131

7.22 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดกับที่ไหลเข้าอุปกรณ์
เมื่อโหลดมีขนาด 375 kVA, ในตัวอย่างที่ 3..... 132

7.23 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดกับที่ไหลเข้าอุปกรณ์
เมื่อโหลดมีขนาด 1250 kVA, ในตัวอย่างที่ 3..... 132

7.24 อิมพีแดนซ์สมมูลเพื่อวิเคราะห์การเกิด series resonance
เมื่อโหลดมีขนาด 125 kVA, ในตัวอย่างที่ 3..... 132

7.25 อิมพีแดนซ์สมมูลเพื่อวิเคราะห์การเกิด series resonance
เมื่อโหลดมีขนาด 225 kVA, ในตัวอย่างที่ 3..... 133

7.26 อิมพีแดนซ์สมมูลเพื่อวิเคราะห์การเกิด series resonance
เมื่อโหลดมีขนาด 375 kVA, ในตัวอย่างที่ 3..... 133

7.27 อิมพีแดนซ์สมมูลเพื่อวิเคราะห์การเกิด series resonance
เมื่อโหลดมีขนาด 1250 kVA, ในตัวอย่างที่ 3..... 133

7.28 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดกับที่ไหลเข้าอุปกรณ์
เมื่อโหลดมีขนาด 125 kVA, และใช้ดีจูนแทนคาปาซิเตอร์ ในตัวอย่างที่ 3..... 136

7.29 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดกับที่ไหลเข้าอุปกรณ์
เมื่อโหลดมีขนาด 225 kVA, และใช้ดีจูนแทนคาปาซิเตอร์ ในตัวอย่างที่ 3..... 136

7.30 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดกับที่ไหลเข้าอุปกรณ์
เมื่อโหลดมีขนาด 375 kVA, และใช้ดีจูนแทนคาปาซิเตอร์ ในตัวอย่างที่ 3..... 137

7.31 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดกับที่ไหลเข้าอุปกรณ์
เมื่อโหลดมีขนาด 1250 kVA, และใช้ดีจูนแทนคาปาซิเตอร์ ในตัวอย่างที่ 3..... 137

7.32 อิมพีแดนซ์สมมูลเพื่อวิเคราะห์การเกิด series resonance
เมื่อโหลดมีขนาด 125 kVA และใช้ดีจูนแทนคาปาซิเตอร์ ในตัวอย่างที่ 3..... 137

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

7.33 อิมพีแดนซ์สมมูลเพื่อวิเคราะห์การเกิด series resonance เมื่อโหลดมีขนาด 225 kVA และใช้ดีจูนแทนคาปาซิเตอร์ ในตัวอย่างที่ 3..... 138

7.34 อิมพีแดนซ์สมมูลเพื่อวิเคราะห์การเกิด series resonance เมื่อโหลดมีขนาด 375 kVA และใช้ดีจูนแทนคาปาซิเตอร์ ในตัวอย่างที่ 3..... 138

7.35 อิมพีแดนซ์สมมูลเพื่อวิเคราะห์การเกิด series resonance เมื่อโหลดมีขนาด 1250 kVA และใช้ดีจูนแทนคาปาซิเตอร์ ในตัวอย่างที่ 3..... 138

7.36 ไดอะแกรมของโรงงานในตัวอย่างที่ 4..... 139

7.37 สเปกตรัมแรงดันของฮาร์มอนิกที่บัส 1 เป็นเปอร์เซ็นต์ และเทียบกับค่ามาตรฐาน IEEE 519-1992..... 142

7.38 สเปกตรัม 3 มิติของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 1 เป็นเปอร์เซ็นต์ และเทียบกับค่ามาตรฐาน IEEE 519-1992..... 142

7.39 อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส 1..... 142

7.40 อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส 2..... 143

7.41 อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส 3..... 143

7.42 อิมพีแดนซ์สมมูล 3 มิติ แสดงเป็นรายชั่วโมง 24 ชั่วโมง ที่บัส 3..... 143

7.43 อิมพีแดนซ์สมมูลแบบอนุกรม ที่จุดต่อร่วม..... 143

7.44 อิมพีแดนซ์สมมูลแบบอนุกรม แสดงเป็นรายชั่วโมง 24 ชั่วโมง ที่จุดต่อร่วม..... 144

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

โรงงานอุตสาหกรรมมีปัญหาเรื่องฮาร์มอนิกมากขึ้นเพราะมีการใช้อุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกมากขึ้น แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกมิใช่จำกัดอยู่เพียงเค่อุปกรณ์ที่ใช้กระแสไฟฟ้ามาก เช่น เตาหลอม เท่านั้น แต่ยังรวมถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกกำลังที่ใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้า ตัวเรียงกระแส ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ เป็นต้น การใช้อุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกกำลังเหล่านี้ทำให้กระบวนการผลิตมีคุณภาพมากยิ่งขึ้น แต่กระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์เหล่านี้จะมีรูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ กล่าวคือมีความถี่อื่นที่ไม่ใช่ความถี่มูลฐานรวมอยู่ในรูปคลื่นปกติ ซึ่งเรียกว่าเกิดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก (Harmonic Distortion) ถ้ามีการใช้อุปกรณ์เหล่านี้มากในระบบไฟฟ้าก็จะทำให้เกิดความผิดเพี้ยนมาก ทำให้คุณภาพไฟฟ้าลดน้อยลง เกิดปัญหาจากฮาร์มอนิกตามมาคืออาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหายหรือทำงานผิดพลาด แต่ ฮาร์มอนิกจะมีผลมากกับชุดปรับปรุงตัวประกอบกำลังที่ใช้คาปาซิเตอร์ (Capacitor Bank) เพราะอิมพีแดนซ์ของชุดปรับปรุงตัวประกอบกำลังจะมีค่าน้อยที่ความถี่สูง ดังนั้นกระแสฮาร์มอนิกจะไหลเข้าชุดปรับ ปรุงตัวประกอบกำลังมากตามกฎการแบ่งกระแส

นอกจากนี้กระแสฮาร์มอนิกบางส่วนจะไหลกลับเข้าไปในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าและโรงงานอื่นที่อยู่ข้างเคียงซึ่งอาจมีปริมาณมากเกินกว่าข้อกำหนดของการไฟฟ้า ที่กำหนดให้ผู้ใช้ไฟฟ้าปล่อยฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบได้จำกัดค่าหนึ่ง ถึงแม้ว่าข้อกำหนดนี้จะได้ประกาศใช้แต่การไฟฟ้าทั้ง 3 แห่งกำลังร่วมกันพิจารณาทบทวนข้อกำหนดและหาแนวทางในการออกเป็นกฎเกณฑ์มาตรฐานที่ เหมาะสมสำหรับประเทศไทย

1.1 แนวเหตุผล

การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรมจะทำให้ทราบถึงผลกระทบของฮาร์มอนิกที่เกิดจากอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นที่มีอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของกระแสฮาร์มอนิกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด การติดตั้งอุปกรณ์ใหม่ การปลดอุปกรณ์ออกจากระบบ การติดตั้งชุดตัวประกอบกำลัง การติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกและการเพิ่มอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก วิธีการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกจะนำแนวคิดการหาการไหลของ

กระแสในระบบไฟฟ้าที่เป็นโครงข่าย (Network) มาประยุกต์ โดยการสร้างเมตริกซ์ความนำ และให้แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเป็นแหล่งกระแสฉีดเข้าบัสที่ต่ออยู่ ทั้งนี้ในการสร้างเมตริกซ์ความนำจะเริ่มจากการเลือกแบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆที่เหมาะสมกับความถี่ฮาร์มอนิกที่ต้องการศึกษา เช่น ที่ความถี่สูงก็ควรจะคิดผลของความต้านทานตามผิว (Skin Effect) เป็นต้น

อย่างไรก็ตามเพื่อให้สามารถทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากการเปลี่ยนของระบบไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องจึงคิดว่ามีการเปลี่ยนแปลงทุกชั่วโมง ดังนั้นการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิกจะทำทั้งหมด 24 ครั้งในหนึ่งวัน ส่วนข้อมูลของการเปลี่ยนแปลงโหลดได้จากข้อมูลการทำงานที่ผ่านมาหรือเป็นค่าที่สมมติก่อนการที่จะเปลี่ยนแปลงจริงเพื่อดูผลจากฮาร์มอนิกก่อน เป็นการป้องกันความเสียหายแก่ระบบหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าได้

ดังนั้นผลงานที่ได้จากการทำวิทยานิพนธ์ จะทำให้เกิดความเข้าใจลักษณะการไหลของฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรมและที่ไหลออกไปยังจุดต่อร่วม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมหรือการคาดการเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด

1.2 วัตถุประสงค์

1) เพื่อศึกษาลักษณะการไหลของกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าโรงงานอุตสาหกรรม
2) เพื่อสร้างแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์ฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าโรงงานอุตสาหกรรม
3) เพื่อศึกษาความแตกต่างของผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรมเมื่อใช้แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างกัน
4) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าโรงงานอุตสาหกรรมกับค่าจำกัดตามมาตรฐานฮาร์มอนิก

1.3 ขอบเขตโครงการวิทยานิพนธ์

การสร้างโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้น มีขอบเขตดังนี้

1) แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้พิจารณาให้ระบบอยู่ในสภาวะที่สมดุล (Balance Load) จึงคำนวณเป็นค่าต่อเฟสได้
2) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่ใช้จะคิดเฉพาะฮาร์มอนิก (Harmonic) ไม่คิดผลของอินเตอร์ฮาร์มอนิก (Interharmonic)
3) พิจารณาผลการต่อขดลวดของหม้อแปลง ซึ่งจะมีผลต่อการไหลของกระแสฮาร์มอนิก โดยบางลำดับจะไหลผ่านหม้อแปลงไม่ได้

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1) วิเคราะห์และพิจารณาแบบจำลองของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สำคัญที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมให้มากชนิดและมีแบบเพียงพอ
2) พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิก
3) ศึกษาผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเมื่อใช้แบบจำลองต่างๆกัน
4) เปรียบเทียบปริมาณฮาร์มอนิกที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับค่ามาตรฐานต่างๆ
5) สรุปและประเมินผลการทำงาน
6) เขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จะได้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสภาวะสมดุล โดยโปรแกรมจะมีแบบจำลองให้เลือกเพียงพอต่อการศึกษาฮาร์มอนิกและสามารถวิเคราะห์ผลได้ 24 ชั่วโมง เพื่อที่จะทราบผลล่วงหน้าของการติดตั้งหรือเลิกติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า รวมทั้งอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก จะได้แก้ไขหรือป้องกันต่อไป

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบทเป็นดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้เมตริกซ์ความนำและแบบจำลองของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม

บทที่ 3 กล่าวถึงข้อมูลที่จำเป็นของแบบจำลองของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สร้างขึ้นในแบบต่างๆ รวมถึงขั้นตอนในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรมและผลที่ต้องการจากการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

บทที่ 4 กล่าวถึงการพัฒนาโปรแกรมเพื่อช่วยสำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม เริ่มจากแนวคิด โครงสร้างของโปรแกรม ส่วนป้อนข้อมูลและส่วนแสดงผล

บทที่ 5 กล่าวถึงผลของการเลือกแบบจำลองของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่างกันต่อการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

บทที่ 6 กล่าวถึงมาตรฐานทางด้านฮาร์มอนิกที่ควรศึกษา เช่น IEEE Std 519-1992, G5/4-2001,EN 50160-1994, IEC 61000 series และข้อกำหนดของประเทศไทย

บทที่ 7 กล่าวถึงตัวอย่างการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรมด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โดยจะพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ผลของความถี่ที่มีต่อแบบจำลองที่ต่างกัน การเปลี่ยนแปลงของขนาดคาปาซิเตอร์ โหลด รวมทั้งผลการวิเคราะห์เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟมีแรงดันฮาร์มอนิก

บทที่ 8 เป็นข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

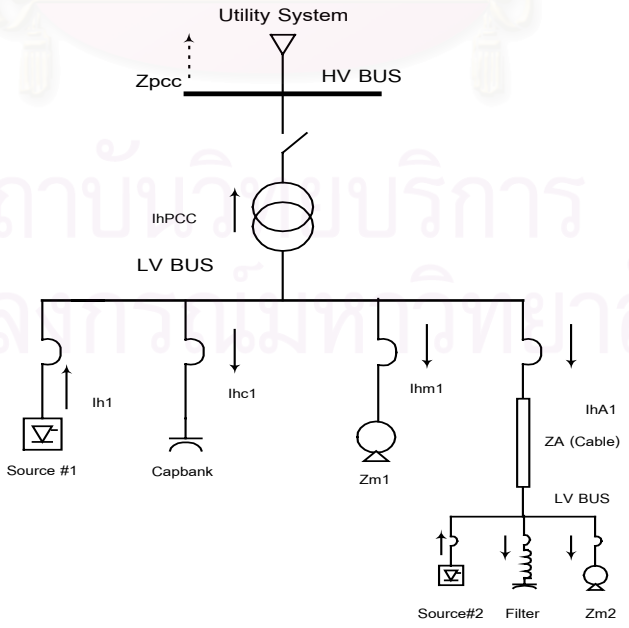
บทที่ 2

การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโดยการใช้เมตริกซ์ความนำและแบบจำลองฮาร์มอนิก

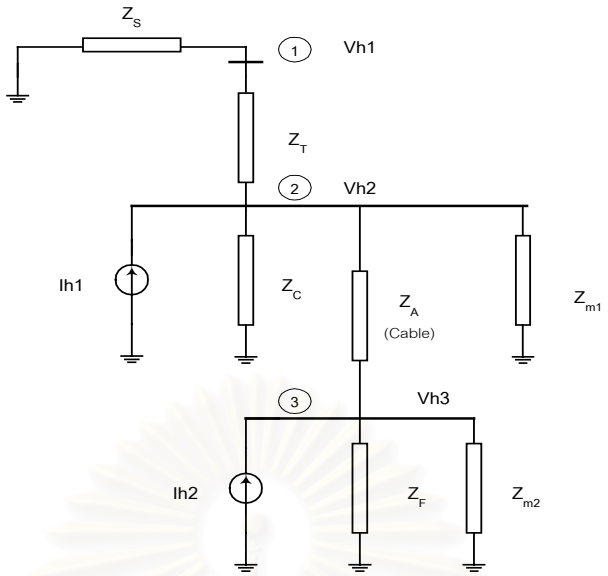
ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็กการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจะใช้การวิเคราะห์ด้วยการสร้างวงจรสมมูล แต่ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางหรือขนาดใหญ่การวิเคราะห์ด้วยวิธีดังกล่าวจะทำได้ยุ่งยากและเสียเวลามาก จึงมีการนำความรู้เรื่องการคำนวณโหลดโฟลว์ในระบบโครงข่ายมาประยุกต์ใช้ คือ การสร้างเมตริกซ์ความนำ (Y_{BUS}) ซึ่งมีข้อดีที่การวิเคราะห์ทำได้สะดวกและรวดเร็วขึ้น นอกจากนี้ ถ้ามีแหล่งฮาร์มอนิกหลายแหล่งหรือมีความผิดเพี้ยนทางด้านแรงดันสูงก็นำหลักการของทฤษฎีทับซ้อน (Superposition) มาใช้ร่วมได้

2.1 การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกด้วยเมตริกซ์ความนำ[4,16]

การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโดยการใช้เมตริกซ์ความนำเริ่มด้วยการสร้างเมตริกซ์ความนำ (Y_{BUS}) ของระบบก่อน ทำได้โดยแทนอุปกรณ์ต่างๆด้วยแบบจำลองที่ความถี่ฮาร์มอนิก และ แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกจะแทนด้วยแหล่งกำเนิดกระแสฉีด (Injected current) เข้าบัสที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่ ตัวอย่าง ระบบไฟฟ้าโรงงานอุตสาหกรรมแสดงดังรูปที่ 2.1 และ เขียนวงจรสมมูลเพื่อสร้างเมตริกซ์ความนำได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างระบบโรงงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลจากรูปที่ 2.1 เพื่อสร้างเมตริกซ์ความนำ

จากวงจรสมมูลสามารถสร้างเมตริกซ์ความนำ $[Y_{BUS}]$ ได้โดยการแทนค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์แต่ละส่วนของระบบดังสมการที่ (2.1)

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_S}+\frac{1}{Z_T} & -\frac{1}{Z_T} & 0 \\ -\frac{1}{Z_T} & \frac{1}{Z_T}+\frac{1}{Z_C}+\frac{1}{Z_{M1}}+\frac{1}{Z_A} & -\frac{1}{Z_A} \\ 0 & -\frac{1}{Z_A} & \frac{1}{Z_A}+\frac{1}{Z_F}+\frac{1}{Z_{M2}} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

จากสมการ [I] = [Y][V] เมื่อนำมาเขียนกระจายในรูปเมตริกซ์จะได้ดังสมการที่ (2.2) และ เมื่อทราบค่า [Ih] และ $[Y_{BUS}]$ จะหาแรงดันฮาร์มอนิกที่ทุกบัสได้ดังสมการที่ (2.3)

$$\begin{bmatrix} 0 \\ Ih1 \\ Ih2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_S}+\frac{1}{Z_T} & -\frac{1}{Z_T} & 0 \\ -\frac{1}{Z_T} & \frac{1}{Z_T}+\frac{1}{Z_C}+\frac{1}{Z_{M1}}+\frac{1}{Z_A} & -\frac{1}{Z_A} \\ 0 & -\frac{1}{Z_A} & \frac{1}{Z_A}+\frac{1}{Z_F}+\frac{1}{Z_{M2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vh1 \\ Vh2 \\ Vh3 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\begin{bmatrix} Vh1 \\ Vh2 \\ Vh3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_S}+\frac{1}{Z_T} & -\frac{1}{Z_T} & 0 \\ -\frac{1}{Z_T} & \frac{1}{Z_T}+\frac{1}{Z_C}+\frac{1}{Z_{M1}}+\frac{1}{Z_A} & -\frac{1}{Z_A} \\ 0 & -\frac{1}{Z_A} & \frac{1}{Z_A}+\frac{1}{Z_F}+\frac{1}{Z_{M2}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ Ih1 \\ Ih2 \end{bmatrix} \qquad (2.3)$$

เมื่อได้แรงดันฮาร์มอนิกที่ทุกบัสแล้ว สามารถหาการไหลของกระแสฮาร์มอนิกผ่านอุปกรณ์ต่างๆได้ เช่น

$$Ih_{Cable} = \frac{Vh2 - Vh3}{Z_{hA}} \qquad (2.4)$$

จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิกด้วยวิธีการสร้างเมตริกซ์ความนำสะดวกและรวดเร็ว แต่การจะสร้างเมตริกซ์ความนำที่ความถี่ฮาร์มอนิกได้จะต้องทราบค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกก่อน ดังนั้นจึงได้มีการสร้างและศึกษาแบบจำลองของอุปกรณ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิก

2.2 แบบจำลองของอุปกรณ์ไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมที่ความถี่ฮาร์มอนิก

แบบจำลองของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์มอนิกแต่ละอุปกรณ์มีการสร้างขึ้นมาหลายแบบตามลักษณะการใช้งาน หรือ ตามมาตรฐานต่างๆ การใช้แบบจำลองที่ถูกต้องกับการใช้งานจริงจึงเป็นตัวชี้วัดความถูกต้องของผลการวิเคราะห์นั้น วิทยานิพนธ์นี้ได้รวบรวมแบบจำลองของอุปกรณ์ที่มีการเสนอและเป็นที่ยอมรับมาส่วนหนึ่งเพื่อใช้ในการพัฒนาโปรแกรม โดยอุปกรณ์ที่ควรพิจารณาแบบจำลองในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรมคือ

2.2.1 โครงข่ายของระบบจ่ายไฟจากการไฟฟ้าที่โรงงานต่ออยู่

2.2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า

2.2.3 คาปาซิเตอร์ของชุดปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

2.2.4 ชุดตัวกรองฮาร์มอนิก

2.2.5 มอเตอร์ไฟฟ้า

2.2.6 โหลดเชิงเส้น

2.2.7 สายเคบิลหรือสายส่งย่อย

2.2.8 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

แบบจำลองที่พิจารณาจะถือว่าระบบอยู่ในสภาวะสมดุล ดังนั้นค่าต่างๆจะเป็นค่าต่อเฟส

2.2.1 โครงข่ายของระบบจ่ายไฟจากการไฟฟ้าที่โรงงานต่ออยู่[16,17]

การศึกษาเรื่องฮาร์มอนิกจะจำลองระบบไฟฟ้าด้วยอิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมระหว่างความต้านทานกับค่ารีแอคแตนซ์ ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์จะกำหนดในรูปของอัตราส่วน X/R (XR ratio) โดยที่ความถี่ฮาร์มอนิกค่าหนึ่งนั้น ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบจ่ายไฟมีค่าดังนี้

$$Zh_S = R1_S + jhX1_S \tag{2.5}$$

เมื่อ Zh_S คือค่าอิมพีแดนซ์ที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h ของระบบจ่ายไฟที่โรงงานต่ออยู่

$R1_S$ คือค่าความต้านทานที่ความถี่มูลฐานของระบบจ่ายไฟที่โรงงานต่ออยู่

$X1_S$ คือค่ารีแอคแตนซ์ที่ความถี่มูลฐานของระบบจ่ายไฟที่โรงงานต่ออยู่

h คือเลขลำดับฮาร์มอนิก

ข้อมูลที่ได้จากการไฟฟ้าเพื่อนำมาสร้างแบบจำลอง จะเป็นค่ากระแสลัดวงจรที่จุดต่อร่วมและ X/R ratio โดยหาอิมพีแดนซ์ได้จากสมการ

$$Isc = \frac{MVAsc}{\sqrt{3} * Vrms(low\,voltage)}$$

$$Z1_S = \frac{Vrms(low\,voltage)/\sqrt{3}}{Isc}$$

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

$$X1_S = \frac{Z1_S}{\sqrt{\frac{1}{(X/R)^2}+1}} \tag{2.6}$$

2.2.2 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า[1,2,16]

หม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นหม้อแปลงขนาดปานกลางมีพิกัดน้อยกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในระบบส่งกำลังไฟฟ้า การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าส่วนใหญ่จะทำงานต่ำกว่ากำลังพิกัด ดังนั้นการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม จึงจำลอง หม้อแปลงไฟฟ้าด้วยค่าอิมพีแดนซ์ที่ประกอบด้วยค่าของความต้านทานต่ออนุกรมกับค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหล (Leakage reactance) ถ้าไม่คิดผลของ Skin effect จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์มอนิกมีค่าเป็น

$$Zh_T = R1_T + jhX1_T \tag{2.7}$$

เมื่อ Zh_T คือ ค่าอิมพีแดนซ์ที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h ของหม้อแปลง

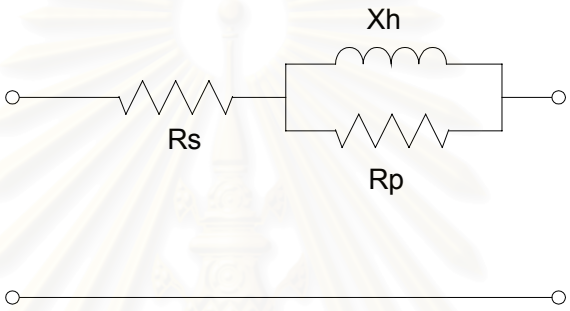
$R1_T$ คือ ค่าความต้านทานที่ความถี่มูลฐานของหม้อแปลง

$X1_T$ คือ ค่ารีแอคแตนซ์ที่ความถี่มูลฐานของหม้อแปลง

เมื่อมีการคิดผลของ Skin effect นั้นค่าความต้านทานที่ความถี่ฮาร์มอนิกจะเปลี่ยนไปแต่ค่ารีแอคแตนซ์จะเหมือนเดิม ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์มอนิกมีค่าเป็น

$$Zh_T = R1_T\sqrt{h} + jhX1_T \tag{2.8}$$

มีการเสนอแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าอีกแบบหนึ่งโดย CIGRE ดังนี้



รูปที่ 2.3 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าตาม CIGRE

จากแบบจำลองของหม้อแปลงตาม CIGRE ดังรูปที่ 2.3 จะเห็นว่า เราสามารถแทนได้ด้วยค่าความต้านทาน R_S อนุกรมอยู่กับส่วนรวมของค่าความเหนี่ยวนำ X_h ที่ขนานอยู่กับค่าความต้านทาน R_p โดยที่ให้ X_1 คือ Leakage Reactance ของหม้อแปลงที่ความถี่มูลฐานซึ่ง X_1 สามารถคำนวณได้จากข้อมูลพิกัดของหม้อแปลง ดังนี้

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{\mu_{kr}}{100\%}\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \\ R_1 &= \frac{\mu_{Rr}}{100\%}\frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \\ X_1 &= \sqrt{Z_1^2 - R_1^2} \end{aligned} \tag{2.9}$$

เมื่อ

U_{rT} คือ แรงดันพิกัดของหม้อแปลงด้านแรงสูงหรือแรงต่ำ

I_{rT} คือ กระแสพิกัดของหม้อแปลงด้านแรงสูงหรือแรงต่ำ

S_{rT} คือ กำลังปรากฏพิกัดของหม้อแปลง

P_{krT} คือ กำลังสูญเสียทั้งหมดในขดลวดของหม้อแปลงที่กระแสพิกัด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

μ_{kr} คือ แรงดันลัดวงจรพิกัด เป็นเปอร์เซ็นต์

μ_{Rr} คือ แรงดันโอห์มมิก (Ohmic Voltage) พิกัดคิดเป็นเปอร์เซ็นต์

ดังนั้นจะได้ว่า

$$X_h = hX_1 \quad ; \quad R_s = \frac{X_1}{\tan\psi_1} \quad ; \quad R_p = 10\, X_1 \tan\psi_1$$

(2.10)

โดย $\tan\psi_1$ มีค่าดังนี้

S_n (MVA)	$\tan\psi_1$
1	2
10	10
100	32

ตารางที่ 2.1 ค่า $\tan\psi_1$ เทียบกับ S_n

จากตารางที่ 2.1 ข้างบนสามารถที่จะแทนได้ด้วยสมการดังนี้

$$\tan\psi_1 = \exp[\, 0.693 + 0.796 \ln S_n - 0.0421 (\ln S_n)^2 \,] \qquad (2.11)$$

โดยที่ S_n คือ ขนาดกำลังพิกัดของหม้อแปลง (MVA)

2.2.3 แบบจำลองของมอเตอร์[2,3]

ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ ซึ่งอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์จะประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ในส่วนของ โรเตอร์ และสเตเตอร์ สำหรับในที่นี้จะแทนแบบจำลองของมอเตอร์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกด้วยค่ารีแอคแตนซ์รวมทั้งของโรเตอร์และสเตเตอร์ ต่ออนุกรมกับค่าความต้านทาน ตามแบบจำลองของ IEC909 ดังนั้นอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะหาได้จากสมการที่ 2.12

$$Zh_M = R1_M + jhX1_M$$

$$Z1_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \qquad (2.12)$$

เมื่อ Zh_M คือค่าอิมพีแดนซ์ที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h ของมอเตอร์

U_{rM} คือค่าแรงดันพิกัดของมอเตอร์

I_{rM} คือค่ากระแสพิกัดของมอเตอร์

S_{rM} คือกำลังปรากฏพิกัดของมอเตอร์

I_{LR}/I_{rM} คืออัตราส่วนของกระแสยึดโรเตอร์ต่อกระแสพิกัดของมอเตอร์

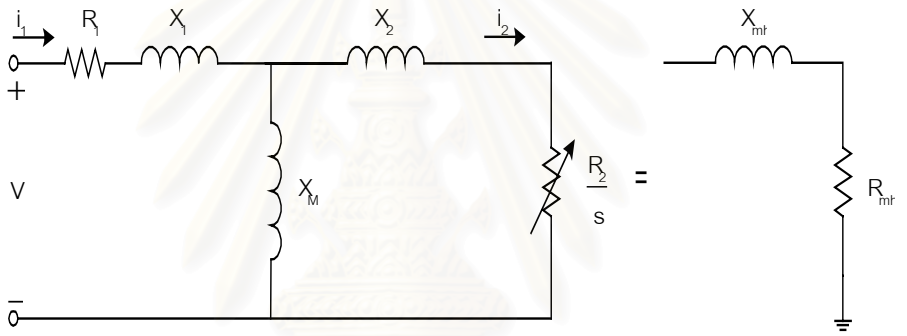
สำหรับค่าโดยประมาณของ $R1_M/X1_M$ ให้ใช้ค่าดังนี้

$R1_M/X1_M = 0.1, X1_M = 0.995\,Z1_M$ สำหรับมอเตอร์แรงดันสูงที่มีกำลังคู่ของขั้ว ≥ 1 MW

$R1_M/X1_M = 0.15,\ X1_M = 0.989\,Z1_M$ สำหรับมอเตอร์แรงดันสูงที่มีกำลังคู่ของขั้ว <1 MW

$R1_M/X1_M = 0.42,\ X1_M = 0.922\,Z1_M$ สำหรับกลุ่มของมอเตอร์แรงดันต่ำ

ถ้าสร้างแบบจำลองให้ละเอียดมากขึ้นจะได้ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งไม่คิดแมกนีไตซ์อิมพีแดนซ์



รูปที่ 2.4 แสดงแบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากรูปอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์แสดงดังสมการ

$$Z_{Mh}(\omega) = R_{Mh} + jX_{Mh} \tag{2.13}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>ที่ความถี่มูลฐาน (h=1)</u>

$$X_{M1} = X_1 + X_2 = X_B$$

$$R_{M1} = R_1 + \frac{R_2}{S} = R_B\left(a + \frac{b}{S}\right) \tag{2.14}$$

เมื่อ R_B คือค่าความต้านทานของมอเตอร์ตอนล็อกโรเตอร์

R_1 คือค่าความต้านทานสเตเตอร์สัมพันธ์กับ R_B ด้วยค่าคงที่ a (ประมาณ 0.45)

R_2 คือค่าความต้านทานโรเตอร์สัมพันธ์กับ R_B ด้วยค่าคงที่ b (ประมาณ 0.55)

X_B คือค่ารีแอคแตนซ์ของมอเตอร์ตอนล็อกโรเตอร์

$$S = \text{Slip} = \frac{\omega_S - \omega_r}{\omega_S} \tag{2.15}$$

<u>ที่ความถี่ฮาร์มอนิก</u>

$$X_{Mh} = h * X_B$$
$$R_{Mh} = R_B\left(a * k_a + \frac{b}{S_h} * k_b\right) \tag{2.16}$$

เมื่อ k_a ,k_b คือค่าคงที่เพื่อปรับผลของความต้านทานตามผิว(Skin Effect) ของสเตเตอร์และโรเตอร์ ตามลำดับ

S_h คือสลิปปรากฏ(Apparent Slip)

$$S_h = \frac{\pm h\omega_s - \omega_r}{\pm h\omega_s} \tag{2.17}$$
$$S_h \approx 1 - \frac{\omega_r}{h\omega_s} \quad \text{สำหรับฮาร์มอนิกลำดับบวก}$$
$$S_h \approx 1 + \frac{\omega_r}{h\omega_s} \quad \text{สำหรับฮาร์มอนิกลำดับลบ}$$

การประมาณค่า k_a ,k_b จะเป็นแบบเอ็กโปแนนเชียล(Exponential) แสดงดังสมการ 2.18

$$k_a = h^{\alpha}$$
$$k_b = (\pm h - 1)^{\alpha} \tag{2.18}$$

ที่ค่า α=0.5 เขียนสมการที่ 2.16 ใหม่ได้เป็น

$$R_{Mh} = R_B\left[a\sqrt{h} + \left(\frac{\pm h * b\sqrt{\pm h - 1}}{\pm h - 1}\right)\right] \tag{2.19}$$

2.2.4 แบบจำลองของโหลดเชิงเส้น[1,2,16,17,]

โหลดเชิงเส้นคืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนกัน การสร้างแบบจำลองสามารถแทนได้ด้วย ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำมาต่อขนานหรืออนุกรมกัน

การจำลองโหลดประเภทนี้เพื่อศึกษาเรื่องฮาร์มอนิกสามารถทำได้โดยใช้ความรู้จากการคำนวณโหลดโฟล์วที่ความถี่มูลฐานมาประยุกต์ใช้และมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้เหมาะสมต่อการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศึกษาเรื่องฮาร์มอนิกที่มีหลายความถี่ จากการศึกษาสามารถแบ่งแบบจำลองของโหลดเชิงเส้นเป็นสี่แบบคือ

1) แบบตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

การหาค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำจะทำได้ยากเพราะแรงดันตกคร่อมไม่เท่ากันดังนั้นการต่อแบบนี้จะได้ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำจากการวัดหรือจากผู้ผลิต การสร้างแบบจำลองจะได้ดังรูปที่ 2.5

โหลดแบบอนุกรม
(Series Load Model)

รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของโหลดแบบอนุกรม

และเขียนสมการได้ คือ

$$Zh_L = R1_L + jhX1_L \tag{2.20}$$

$R1_L$ คือค่าความต้านทานของโหลดที่ความถี่มูลฐาน

$X1_L$ คือค่าความเหนี่ยวนำของโหลดที่ความถี่มูลฐาน

h คือลำดับของฮาร์มอนิก

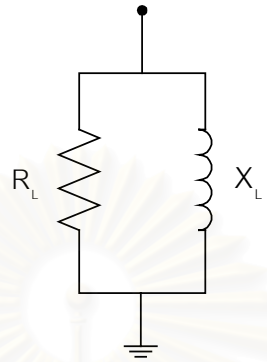
Zh_L คือค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดเชิงเส้นที่ความถี่ฮาร์มอนิก

จากสมการที่ 2.20 ไม่ได้คิดผลของความต้านทานที่ผิวตามความถี่(Skin Effect) ถ้าคิดผลของความต้านทานตามผิวด้วยสมการจะเปลี่ยนเป็นสมการที่ 2.21 ค่า $\sqrt{h}$ อาจเป็น $0.6\sqrt{h}$ ได้

$$Zh_L = \sqrt{h}R1_L + jhX1_L \tag{2.21}$$

2) แบบตัวต้านทานต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำ

การจำลองโหลดเชิงเส้นแบบนี้เป็นที่นิยมเพราะสมเหตุผลและง่ายต่อการสร้างแบบจำลอง ข้อมูลที่ต้องการคือ ค่ากำลังจริง (P)ค่ากำลังรีแอคทีฟ(Q)และแรงดันที่ใช้งาน แบบจำลองแสดงดังรูปที่ 2.6



โหลดแบบขนาน
(Parallel Load Model)

รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลโหลดแบบขนาน

หาค่าอิมพีแดนซ์ได้ดังสมการที่ 2.22

$$R1_L = \left(\frac{V^2}{P}\right)$$
$$X1_L = j\left(\frac{V^2}{Q}\right) \qquad (2.22)$$
$$Zh_L = R1_L // hX1_L$$

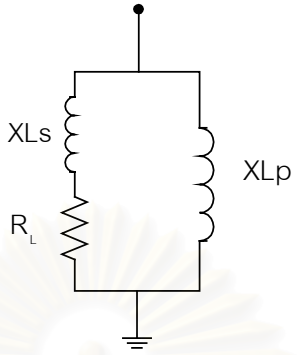
3) แบบตัวต้านทานต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำและคิดผลของความต้านทานตามผิว

ถ้าคิดความต้านทานตามผิวด้วยการหาค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนไป ได้มีการศึกษาถึงสมการที่เหมาะสมโดยเพิ่มตัวแปรทางความถี่เข้าไปในสมการ ได้สมการใหม่ ดังนี้

$$Zh_L = \sqrt{h}R1_L // hX1_L \qquad (2.23)$$

4) แบบตัวต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำและขนานกับตัวเหนี่ยวนำ

แบบจำลองนี้จะคิดผลของความต้านทานตามผิวด้วยโดยมีตัวแปรทางความถี่เพิ่มมา แบบจำลองนี้เสนอโดย CIGRE แสดงได้ดังรูปที่ 2.7



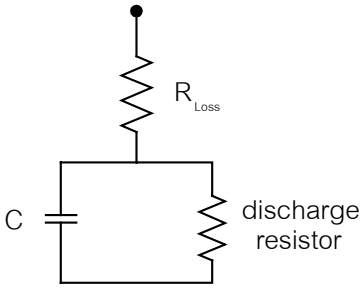
รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของโหลดเสนอโดย CIGRE

หาค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำได้ดังสมการที่ 2.24

$$R1_L = \left(\frac{V^2}{P}\right)$$
$$X1_{LS} = j0.073hR1_L \qquad (2.24)$$
$$X1_{LP} = j\left(\frac{hR1_L}{6.7(Q/P) - 0.74}\right)$$

2.2.5 **แบบจำลองของตัวเก็บประจุ** (Capacitor)[8]

แบบจำลองโดยทั่วไปของตัวเก็บประจุคือค่ารีแอคแตนซ์ แต่ถ้าคิดความสูญเสียจาก ไดอิเลกติกของตัวเก็บประจุจะนำความต้านทานมาอนุกรมด้วยในแบบจำลอง นอกจากนี้ตัวเก็บประจุจะมีการคายประจุ จึงเปรียบเสมือนมีความต้านทานขนาดใหญ่ต่อขนานอยู่กับตัวเก็บประจุ แต่เนื่องจากเวลาการคายประจุจะนาน เวลาคงตัวมาก(RC มีค่ามาก) ความต้านทานที่ต่อขนานมีขนาดใหญ่หน่วยเป็นเมกกะโอห์มจึงละเลยได้ วงจรสมมูลแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แบบจำลองของตัวเก็บประจุ

หาค่ารีแอคแตนซ์ได้ดังนี้

$$X_C = -\frac{j}{h\omega C} \tag{2.25}$$

เมื่อ X_C คือ ค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h

C คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ของตัวเก็บประจุ

h คือ เลขลำดับฮาร์มอนิก

แต่ถ้ากำหนดด้วยค่าพิกัดของกำลังงานรีแอคทีฟของตัวเก็บประจุและค่าแรงดันพิกัดจะหาค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ได้ดังนี้

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

$$Xh_C = -j\left(\frac{X1_C}{h}\right) \tag{2.26}$$

เมื่อ $X1_C$ คือ ค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่ความถี่มูลฐาน

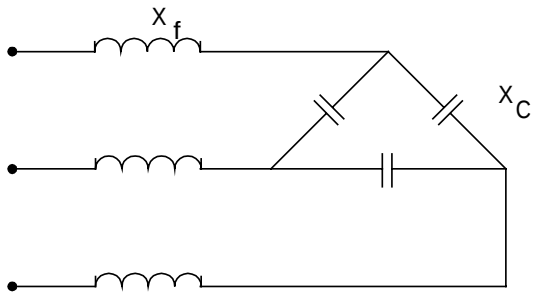
V_{rated} คือ แรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ

Q_C คือ ค่าพิกัดกำลังงานรีแอคทีฟของตัวเก็บประจุ

Xh_C คือ ค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่ความถี่ฮาร์มอนิก

2.2.6 แบบจำลองของตัวกรองฮาร์มอนิก[15]

ตัวกรองฮาร์มอนิกมี 2 ชนิด คือแบบพาสซีพ (Passive Filters) และแบบแอคทีฟ (Active Filters) แต่ที่จะสร้างแบบจำลองคือแบบพาสซีพ ซึ่งประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุและตัวต้านทาน ดังรูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างการนำตัวเก็บประจุมาทำเป็นตัวกรองฮาร์มอนิก



รูปที่ 2.9 การใช้ชุดตัวเก็บประจุมาทำเป็นตัวกรองฮาร์มอนิก

หน้าที่ของตัวกรองฮาร์มอนิกที่สำคัญมีสองอย่างคือให้กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟที่ความถี่มูลฐานทำให้ตัวประกอบกำลังดีขึ้นและกรองกระแสฮาร์มอนิก ชนิดของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีพมีหลายแบบเช่น

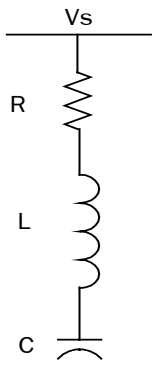
1) ตัวกรองปรับคลื่นเดี่ยว(Single Tuned Filter)
2) ตัวกรองผ่านสูง (High Pass Filter)
3) ตัวกรองปรับคลื่นคู่ (Double Tuned Filter)
4) ตัวกรองปรับคลื่นคู่ผ่านสูง(Double Tuned High Pass Filter)
5) ตัวกรองปรับคลื่นสามยอด(Triple Tuned Filter)
6) ตัวกรองปรับคลื่นต่อเนื่อง(Continuously Tuned Filter)

วงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกที่นิยมใช้แสดงได้ดังนี้

1) ตัวกรองฮาร์มอนิกปรับคลื่นเดี่ยว(Single Tuned Filter)

มีวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.10 จะเห็นว่ามีโครงสร้างที่ง่ายมีส่วนประกอบเพียงตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ส่วนค่าความต้านทานเป็นความต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงมีการสูญเสียน้อยเมื่อใช้งานและต้องการการบำรุงรักษาต่ำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตัวกรองปรับคลื่นเดี่ยว
(Single Tuneed)

รูปที่ 2.10 แบบจำลองของตัวกรองฮาร์มอนิกปรับคลื่นเดี่ยว

จากวงจรสมมูลสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์รวมของตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยวดังนี้

$$Z_F = R + j\left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)$$

$$Z_F = R + j\left(\frac{4\pi^2 f^2 LC - 1}{2\pi fC}\right) \qquad (2.27)$$

มีความถี่เรโซแนนซ์ (f_r)

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad (2.28)$$

ตัวกรองฮาร์มอนิกปรับคลื่นเดี่ยวมีใช้สองแบบคือ แบบดีจูน(Detuned Filter)และ แบบจูน(Tuned Filter)โดยแบ่งตามความถี่ปรับคลื่น(tuned frequency) มีความเหมือนและความ แตกต่างกันดังนี้

1. ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบดีจูน(Detuned Filter) จะปรับค่าอินดัคทีฟรีแอคแตนซ์ให้เกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมกับค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ ที่ความถี่ต่ำกว่าลำดับฮาร์มอนิกที่ต่ำสุดที่มีในระบบ เช่นถ้าในระบบมีฮาร์มอนิกลำดับต่ำสุดคือลำดับที่ 5 จะปรับให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมที่ลำดับฮาร์มอนิกที่ 3.78 หรือ 4.08 เป็นต้น
2. ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบจูน(Tuned Filter) จะปรับค่าอินดัคทีฟรีแอคแตนซ์ให้เกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมกับค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ ที่ต่ำกว่าลำดับฮาร์มอนิกที่ต้องการกรองเล็กน้อย เช่นถ้าต้องการกรองฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 จะปรับให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมที่ฮาร์มอนิก

ลำดับที่ 4.7-4.8 เป็นต้น การใช้งานของตัวกรองแบบจูนจะต้องติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกลำดับต่ำสุดก่อนเสมอ เช่น ถ้าต้องการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกแบบจูนลำดับที่ 7 ต้องติดตั้งตัวกรองลำดับ ที่ 5 ก่อน

การหาลำดับฮาร์มอนิกที่เกิดการเรโซแนนซ์ (h) หาได้จากความสัมพันธ์ของค่าอินดัคทีฟรีแอคแตนซ์(X_L)กับค่าคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์(X_C) ดังนี้

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \qquad ; \qquad X_L = \frac{X_C}{h^2} \tag{2.29}$$

ความสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิกกำหนดด้วยค่า Q-Factor ดังนี้

$$Q_F = 2\pi f_r \left(\frac{\text{พลังงานสะสมสูงสุด}}{\text{กำลังงานสูญเสียเฉลี่ย}} \right)$$

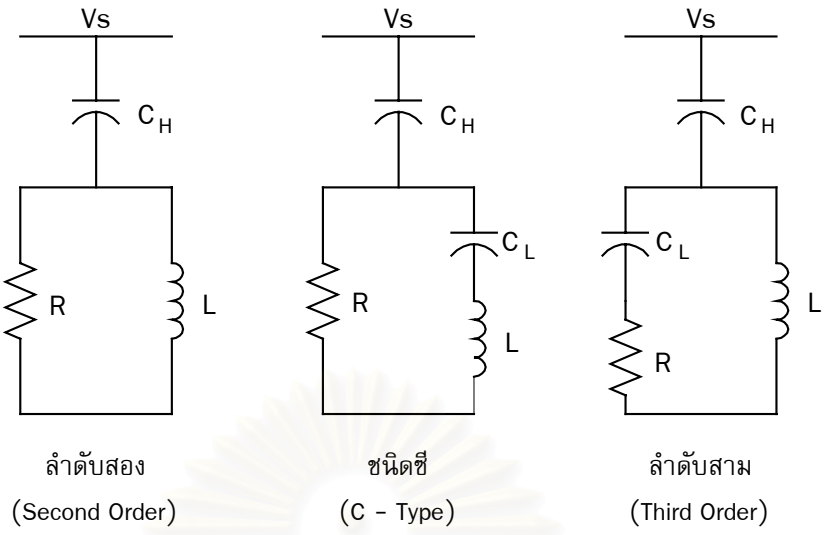
$$Q_F = \frac{2\pi f_r L}{R} \tag{2.30}$$

เมื่อ R คือ ความต้านทานของตัวกรอง ดังนั้นเมื่อรู้ค่า Q_F ของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวจะสามารถหาค่าความต้านทานได้ ส่วนค่าความเหนี่ยวนำและค่าความเก็บประจุหาได้ดังสมการที่ 2.31และเพื่อนำไปหาอิมพีแดนซ์รวมของตัวกรองตามสมการที่ 2.27

$$C = \frac{Q_{Cr}}{2\pi f V_{Cr}^2} \qquad L = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 C} \tag{2.31}$$

2) ตัวกรองผ่านสูง (High Pass Filter)

ตัวกรองผ่านสูงใช้สำหรับกรองฮาร์มอนิกลำดับสูง โดยเพิ่มค่าความต้านทานหน่วงเพื่อลดค่า Q-Factor หรือเพิ่มค่าความกว้างแถบของการกรองให้กว้างขึ้น ตัวกรองผ่านสูงลำดับสองจะกรองกระแสฮาร์มอนิกที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ตัดมุมของตัวกรอง ไม่เหมาะกับการกรองกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับต่ำๆ เพราะจะเกิดการสูญเสียที่ความถี่มูลฐานในตัวต้านทานหน่วงมาก เพื่อแก้ปัญหานี้จึงเพิ่มตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำและตั้งให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่มูลฐาน เพื่อให้กระแสไหลผ่านตัวต้านทานน้อย เรียกตัวกรองผ่านสูงแบบนี้ว่าตัวกรองผ่านสูงชนิดซี (C-Type) หรือต่อตัวเก็บประจุอนุกรมกับตัวต้านทานเพื่อให้มีอิมพีแดนซ์มากกระแสที่ความถี่มูลฐานไหลได้น้อย เรียกว่าตัวกรองผ่านสูงลำดับสาม ตัวกรองผ่านสูงมีแบบจำลองของแต่ละแบบแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แบบจำลองของตัวกรองผ่านสูง

$$C_H = \frac{Q_{CH}}{2\pi f * V_{CH}^2}$$

$$L = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 C_H}$$

$$R = Q_F * 2\pi f_r * L$$

$$C_L = \frac{1}{(2\pi f_1)^2 L} \qquad (2.32)$$

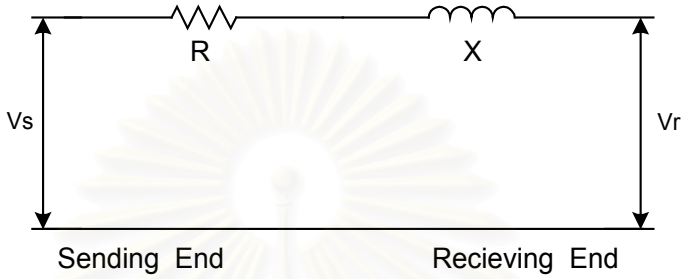
เมื่อเปรียบเทียบตัวกรองฮาร์มอนิกผ่านสูงกับตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวแล้ว พบว่า ตัวกรองแบบผ่านสูงมีข้อดีคือมีประสิทธิภาพสูงในการกรองกระแสฮาร์มอนิกได้หลายๆ ลำดับพร้อมกัน มีความไวต่ำต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความเก็บประจุและความถี่ แต่ก็มีข้อเสียคือถ้าต้องการผลการกรองเท่ากับตัวกรองปรับคลื่นเดี่ยวต้องใช้พิกัดขององค์ประกอบสูงกว่า และมีความต้านทานเป็นส่วนประกอบทำให้มีการสูญเสียมากกว่า

2.2.7 **แบบจำลองของสายเคเบิลและสายส่ง**[1,2,5]

สายส่งที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมักเป็นสายส่งระยะสั้นหรือสายเคเบิล ดังนั้นการสร้างแบบจำลองจึงพิจารณาแบบจำลองของสายส่งระยะสั้นและแบบจำลองของสายเคเบิล ซึ่งข้อมูลของสายหาได้จากการไฟฟ้าหรือบริษัทผู้ผลิต แบบจำลองแสดงได้ดังนี้

2.2.7.1 แบบจำลองของสายส่งระยะสั้น

สายเคเบิลหรือสายส่งย่อยที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมจะมีขนาดสั้นมากเมื่อเทียบกับสายส่งของระบบจ่าย ดังนั้นจึงไม่คิดผลของค่าคาปาซิแตนซ์ของสายส่ง แบบจำลองของสายส่งจึงประกอบด้วย ค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำอนุกรมกัน ดังรูปที่ 2.12 และถ้าไม่คิดผลของปรากฏการณ์ทางผิว แบบจำลองของสายส่งจะแสดงได้ดังสมการ 2.33



รูปที่ 2.12 แบบจำลองของสายส่งระยะสั้น

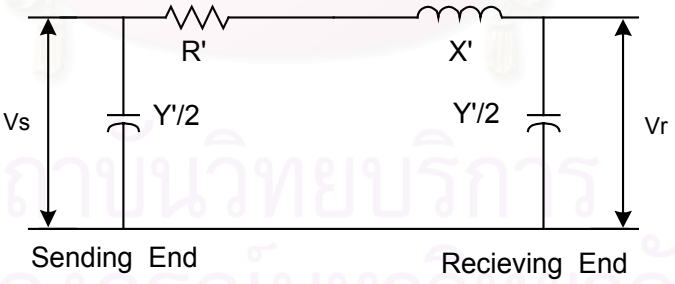
$$Zh_A = R1_A + jhX1_A \qquad (2.33)$$

เมื่อ Zh_A คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่ง

$R1_A$ คือ ค่าความต้านทานที่ความถี่มูลฐานของสายส่ง

$X1_A$ คือ ค่ารีแอคแตนซ์ที่ความถี่มูลฐานของสายส่ง

2.2.7.2 แบบจำลองของสายเคเบิล



รูปที่ 2.13 แบบจำลองของสายเคเบิล

จากรูปที่ 2.13 สายเคเบิลซึ่งมีความต้านทาน (R) และความเหนี่ยวนำ (X) ต่อแบบอนุกรม และมี ตัวเก็บประจุ (C) ต่อแบบขนาน โดย

$$Z = R + jX \qquad Y = j\omega C \qquad (2.34)$$

ได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$Z' = \frac{Z\sinh\sqrt{YZ}}{\sqrt{YZ}} \qquad \frac{Y'}{2} = \frac{Y\tanh\frac{\sqrt{YZ}}{2}}{\sqrt{YZ}} \tag{2.35}$$

ในกรณีที่คิดผลของ Skin Effect ด้วย ค่าความต้านทาน R_h จะหาจากค่าความต้านทาน ที่ 50 Hz (R_1) โดยเทียบมาจากค่าความต้านทานไฟตรง (R_{dc}) ดังนี้

$$R_{dc} = \frac{R_1 - 0.004398L}{0.938} \quad ; \quad x = 0.3545\sqrt{\frac{h}{R_{dc}/L}} \tag{2.36}$$

เมื่อ L คือความยาวของสายส่ง เป็น กิโลเมตร

หาก $x \leq 2.4$ จะได้

$$R_h = R_{dc}\,(\,0.035x^2 + 0.938\,) \tag{2.37}$$

หาก $x > 2.4$ จะได้

$$R_h = R_{dc}\,(0.35x + 0.3\,) \tag{2.38}$$

ถ้าคิดผลของกระแสไหลวนเมื่อเป็นสายเคเบิลแบบแกนเดียว(Single Core Cable) หรือ H-Type เคเบิล ค่าความต้านทานที่ลำดับฮาร์มอนิกจะมีค่าเพิ่มขึ้น และค่ารีแอกแตนซ์จะลดลง

$$R_h^{'} = R_h + p * R_S$$
$$X_h^{'} = X_h - p * X_{Sh} = h * X_1 - p * (h * X_{S1}) \tag{2.39}$$

เมื่อ p คือ ค่าคงที่

$$p = \frac{1}{1+\left(\frac{R_S}{h * X_{S1}}\right)^2}$$

R_S คือ ค่าความต้านทานฉนวนหุ้ม (Sheath)

X_{S1} คือ ค่าอิมพีแดนซ์ลำดับบวกของฉนวนหุ้ม หาได้จากระยะการจัดวางของแกนเคเบิล(Geometric mean distance: s) และ รัศมีของฉนวนหุ้ม (r_S) ดังสมการที่ 2.40

$$X_{S1} = \lambda * \omega_1 * L_{S1} = \lambda * \omega_1 * 2 * 10^{-4} * \ln\frac{s}{r_S} \tag{2.40}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อาจจะประมาณค่า $(s/r_S)=2$ ได้ ดังนั้น

$$p = \frac{1}{1+\frac{526}{h^2}R_S}$$

และที่ลำดับฮาร์มอนิกสูงๆ ค่า p มีแนวโน้มเข้าใกล้หนึ่ง ดังนั้น สมการที่ 2.39 เขียนใหม่ได้เป็น

$$R_h^{'} = R_h + R_S$$

$$X_h^{'} = L * \omega * 2 * 10^{-4} * \ln(\frac{r_S}{r}) \qquad (2.41)$$

ข้อมูลของสายที่ต้องการทราบเพื่อหาค่าแบบจำลองจะเป็นค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์ซึ่งจะบอกมาเป็น โอห์มต่อเมตรหรือต่อกิโลเมตร ดังนั้นจึงต้องทราบความยาวสายด้วย

2.2.8 แบบจำลองของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก[13,17]

แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก จะจำลองให้เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกต่ออยู่กับบัสที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่ โดยข้อมูลของกระแสจะได้จากทางทฤษฎี จากผู้ผลิตหรือจากการวัดจริง ในกรณีที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ามีความผิดเพี้ยนของแรงดันมาก่อน ซึ่งถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์มอนิกที่มาจากด้านจ่ายไฟ ข้อมูลของแรงดันผิดเพี้ยนของแรงดันที่แหล่งจ่ายได้จากการตรวจวัดก่อนที่จะต่อระบบของโรงงานเข้ากับระบบจ่ายของการไฟฟ้าหรืออาจเป็นค่าที่สมมติขึ้น เพื่อศึกษาถึงผลกระทบเมื่อแหล่งจ่ายมีความผิดเพี้ยนอยู่แล้ว เมื่อนำมาคำนวณในระบบของโรงงานจะทำการเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์มอนิกเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก ดังสมการที่ 2.42

$$Ih_S = \frac{Vh_S}{Zh_S} \qquad (2.42)$$

เมื่อ Ih_S คือ กระแสฮาร์มอนิกเนื่องจากแหล่งจ่าย

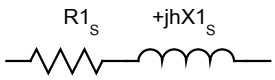
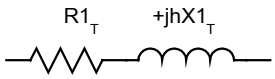
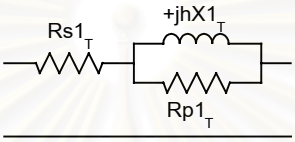
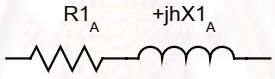
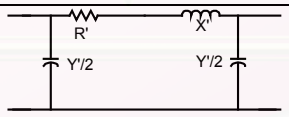
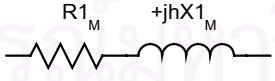
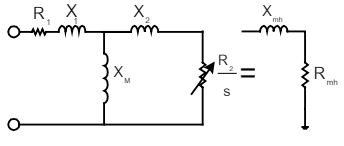
Vh_S คือ แรงดันผิดเพี้ยนของแหล่งจ่ายก่อนที่โรงงานจะต่อเข้ากับแหล่งจ่าย

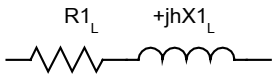
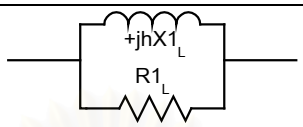
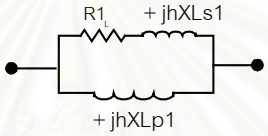
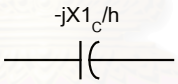
Zh_S คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายที่ความถี่ฮาร์มอนิก

แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆที่กล่าวมาสำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบโรงงานอุตสาหกรรมสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 แบบจำลองของอุปกรณ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

Equipment	*Model*	***ลักษณะการใช้โมเดล***
Source impedance (Zh_S)		■ ไม่คิดผลของคาปาซิเตอร์ที่ระบบจ่าย
Transformer (Zh_T)	 Simple model	■ ใช้ได้โดยทั่วไป
	 CIGRE model	■ ค่าของ R_S และ R_P ต้องสอดคล้องกับสมการ $90 < \frac{U_N^2}{S_N R_S} < 110$ $13 < \frac{S_N R_P}{U_N^2} < 30$
Cable or Line (Zh_A)	 Line model	■ ใช้กับสายระยะสั้น ■ ควรคิดผลของความต้านทานตามผิวที่ลำดับสูงกว่าลำดับที่ 25
	 Cable model	■ ควรใช้กับสายยาวเกิน 150 เมตรเพราะคาปาซิแตนซ์ของสายจะมีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ ■ คิดผลของความต้านทานตามผิวเหมือน Line Model
Motor Load (Zh_M)	 IEC model	■ ใช้กันโดยทั่วไป เพราะสามารถใช้ข้อมูลตามขนาดของมอร์เตอร์ในการสร้างโมเดล
	 Willey model	■ ควรทราบข้อมูลการผลิตของมอร์เตอร์และค่า slip จากการใช้งาน

Equipment	*Model*	
Linear Load (Zh_L)	 Series model	■ ใช้เมื่อต้องการวิเคราะห์อย่างง่ายเมื่อทราบค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์
	 Parallel model	■ นิยมใช้กันทั่วไป โดยคิดให้ค่ากำลังจริงใช้โดยความต้านทานและกำลังจินตภาพใช้โดยรีแอคแตนซ์
	 CIGRE model	■ โมเดลนี้ได้มาจากการวัดที่ medum voltage จึงควรใช้กับโหลดที่ใช้กับแรงดันปานกลาง ■ ควรใช้วิเคราะห์ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 - 20
Capacitor (Zh_C)		■ อาจคิดผลของความต้านทานในไดอิเล็กตริกด้วย
Harmonic filter (Single tuned and High pass)	ดูรูปที่ 2.10 และ รูปที่ 2.11	--

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ข้อมูล ขั้นตอนและผลที่ต้องการ ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม

การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของฮาร์มอนิกต่ออุปกรณ์ภายในโรงงาน เมื่อนำอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกเข้ามาใช้ หรือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด เช่น การติดตั้งมอเตอร์ การติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิก หรือ การปลดโหลดเพื่อทำการซ่อมบำรุง นอกจากต้องพิจารณาผลที่เกิดกับอุปกรณ์ในโรงงานแล้วยังต้องนำผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับมาตรฐานหรือข้อกำหนดของการไฟฟ้า การวิเคราะห์จะให้ผลถูกต้องเมื่อใช้ข้อมูลที่ถูกต้องเพื่อทำการวิเคราะห์ ข้อมูลที่ต้องการมีดังนี้

3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม

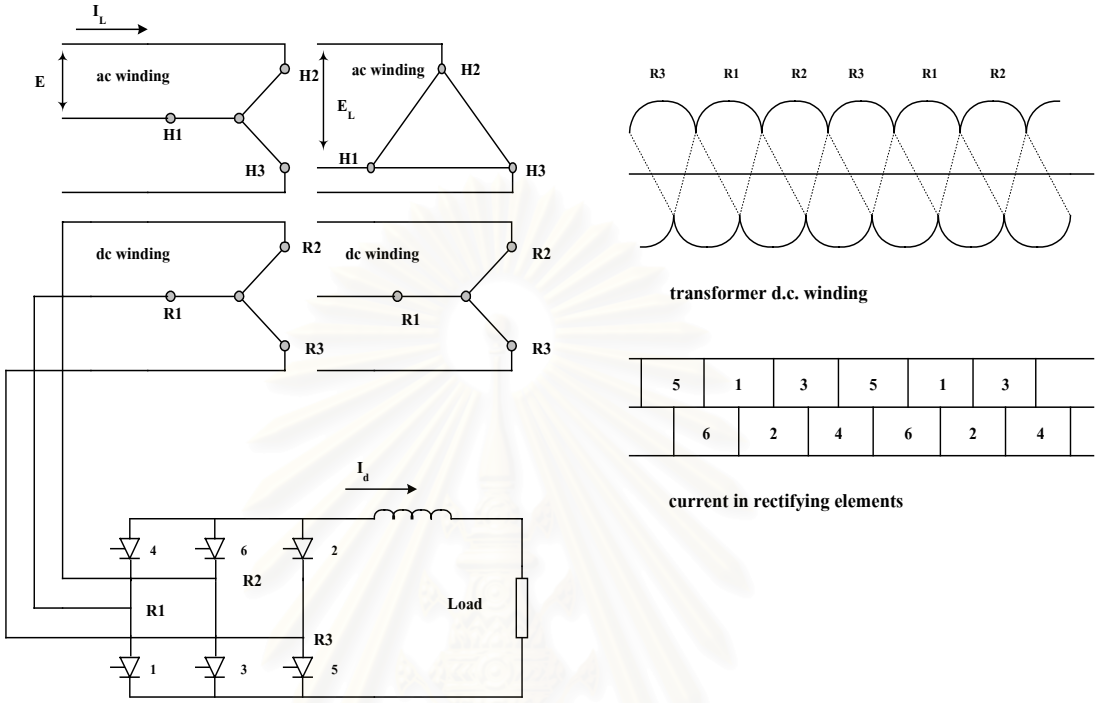
3.1.1 แรงดันฮาร์มอนิกจากแหล่งจ่ายและกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิด

เราสามารถทราบแรงดันฮาร์มอนิกจากแหล่งจ่ายได้จากการตรวจวัดก่อนที่จะต่อระบบของโรงงานเข้ากับระบบจ่ายไฟฟ้าหรือได้จากการสมมติค่าขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบของแรงดันฮาร์มอนิกที่มีต่อระบบโรงงาน สำหรับแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกอาจได้จากข้อมูลของผู้ผลิตอุกรณ์ ได้จากการประเมินตามทฤษฎีสำหรับอุปกรณ์ที่สามารถประเมินได้หรือได้จากการตรวจวัดจริงเพื่อได้ค่าที่แน่นอนเพราะอาจมีความคลาดเคลื่อนเมื่อใช้งานจริงและนอกจากจะได้กระแสและแรงดันฮาร์มอนิกแล้วยังสามารถวิเคราะห์รูปคลื่นได้ว่ามีฮาร์มอนิกลำดับใดปนอยู่ซึ่งความถูกต้องของการวัดขึ้นอยู่กับ ลักษณะการวัด เช่น ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องวัดและความแม่นยำของเครื่องวัด อุปกรณ์ส่วนใหญ่ที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกประเมินหากระแสฮาร์มอนิกยาก ส่วนอุปกรณ์ที่สามารถประเมินหากระแสฮาร์มอนิกได้ เช่น เครื่องแปลงผันกำลังแบบสถิต(convertor)

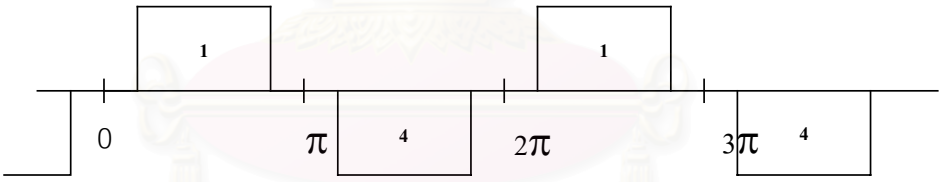
ตัวอย่างการประเมินค่ากระแสฮาร์มอนิกจากเครื่องแปลงผันกำลังแบบสถิต(convertor)

เครื่องแปลงผันกำลังแบบสถิตหรือคอนเวอร์เตอร์ เป็นวงจรเรียงกระแส โดยมีชุดเรียงกระแสเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เช่น ไทริสเตอร์ ไดโอด เพื่อจะจ่ายโหลดกระแสตรง การทำงานของคอนเวอร์เตอร์จะทำให้กระแสทางด้านเข้าคอนเวอร์เตอร์มีความผิดเพี้ยนทางด้านฮาร์มอนิก การประเมินค่ากระแสฮาร์มอนิกจากคอนเวอร์เตอร์จะพิจารณารูปคลื่นที่เกิดขึ้น สำหรับ

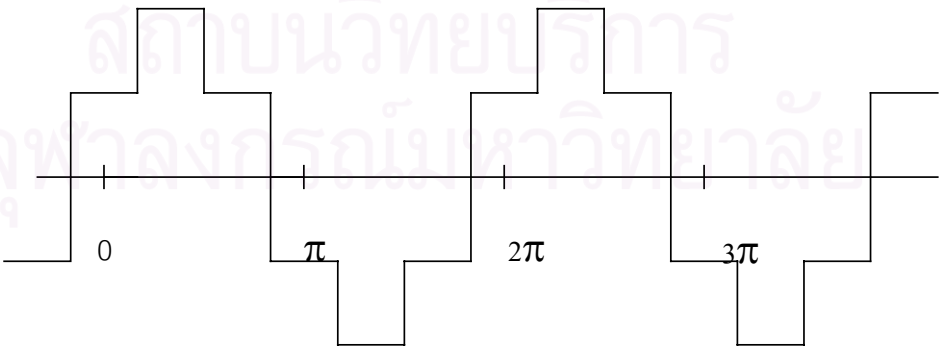
คอนเวอร์เตอร์แบบอุดมคติแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่คอนเวอร์เตอร์จะมีความราบเรียบดังแสดงในรูปที่ 3.2 เพราะส่วนใหญ่แล้วคอนเวอร์เตอร์แบบอุดมคติจะสมมติว่ามีค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ขนาดใหญ่ทางด้านโหลด



รูปที่ 3.1 วงจรของคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ 3 เฟส



(ก) รูปคลื่นกระแสของคอนเวอร์เตอร์แบบอุดมคติ เมื่อต่อหม้อแปลง แบบ วาย-วาย (Wye-Wye)



(ข) รูปคลื่นกระแสของคอนเวอร์เตอร์แบบอุดมคติ เมื่อต่อหม้อแปลง แบบ เดลตา-วาย (Delta-Wye)

รูปที่ 3.2 รูปคลื่นกระแสของคอนเวอร์เตอร์แบบอุดมคติ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูเรียร์กระแสทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ รูปคลื่นกระแสในรูปที่ 3.2 (ก) เมื่อหม้อแปลงต่อแบบ วาย-วาย เขียนได้ดังสมการที่ (3.1)

$$I_L = \frac{\sqrt{2}I_1}{\pi}\left\{\begin{array}{l}\sin(\omega t)-\frac{1}{5}\sin(5\omega t)-\frac{1}{7}\sin(7\omega t)+\frac{1}{11}\sin(11\omega t)\\ +\frac{1}{13}\sin(13\omega t)+\ldots+\frac{2}{\sqrt{3}}\cos(\frac{h\pi}{6})\frac{1}{h}\sin(h\omega t)+\ldots\end{array}\right\} \quad (3.1)$$

และถ้าหม้อแปลงต่อแบบ เดลตา-วาย จะเขียนสมการของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับได้ ดังสมการที่(3.2)

$$I_L = \frac{\sqrt{2}I_1}{\pi}\left\{\begin{array}{l}\sin(\omega t)+\frac{1}{5}\sin(5\omega t)+\frac{1}{7}\sin(7\omega t)+\frac{1}{11}\sin(11\omega t)\\ +\frac{1}{13}\sin(13\omega t)+\ldots+\frac{2}{\sqrt{3}}\cos(\frac{h\pi}{6})\frac{1}{h}\sin(h\omega t)+\ldots\end{array}\right\} \quad (3.2)$$

ดังนั้นการประเมินกระแสฮาร์มอนิกจากคอนเวอร์เตอร์แบบอุดมคติกล่าวได้ดังนี้

องค์ประกอบของลำดับฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น เป็นฮาร์มอนิกเฉพาะตัว (Characteristic harmonic) และขนาดของกระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับมีค่าดังนี้

$$h = kP \pm 1 \quad (3.3)$$

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (3.4)$$

และ $$I_1 \approx \frac{\sqrt{6}I_d}{\pi} \quad (3.5)$$

เมื่อ h = เลขลำดับฮาร์มอนิก

k = เลขจำนวนเต็มบวกใดๆ k = 1,2,3,4,…

p = จำนวนพัลส์ของคอนเวอร์เตอร์

I_h = ขนาดกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h

I_1 = ขนาดกระแสของคอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่มูลฐาน

I_d = ขนาดกระแสไฟตรงทางด้านขาออกของคอนเวอร์เตอร์(ค่าเฉลี่ย)

ตารางที่ 3.1 ขนาดของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ แบบอุดมคติ

ลำดับฮาร์มอนิก (h)	***I_h (% of I_1)***	***ลำดับฮาร์มอนิก (h)***	***I_h (% of I_1)***
5	20.00	25	4.00
7	14.29	.	.
11	9.09	.	.
13	7.69	.	.
17	5.88	.	.
19	5.26	$6k \pm 1$	100/h

3.1.2 ข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลองฮาร์มอนิก

จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นในบทที่ 2 อุปกรณ์แต่ละตัวอาจมีแบบจำลองแบบเดียวหรือหลายแบบ เพราะฉะนั้นข้อมูลของอุปกรณ์แต่ละตัวของแต่ละแบบจำลองจะมีข้อมูลที่ต้องการต่างกัน นอกจากนี้การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก ถ้าทำการวิเคราะห์ตลอดทั้งวันจะได้เห็นการเปลี่ยนแปลงของฮาร์มอนิกและแนวโน้ม แต่เพื่อความสะดวกจะคิดเป็น 24 ชั่วโมง เพราะฉะนั้นจึงต้องการข้อมูลบางอย่างทั้ง 24 ชั่วโมง แต่ข้อมูลที่มีค่าคงที่ตลอดก็ต้องการเพียงค่าเดียว ข้อมูลต่าง ๆ แบ่งเป็นดังนี้

1) แหล่งจ่ายไฟของการไฟฟ้า

ต้องการข้อมูลดังนี้

- แรงดันของระบบ (System voltage: kV)
- ความถี่ของระบบ (System Frequency: Hz)
- ค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรที่จุดต่อ (MVA short circuit)
- อัตราส่วนของค่ารีแอคแตนซ์ต่อค่าความต้านทาน (X/R ratio)

2) หม้อแปลงไฟฟ้า

มี 2 แบบจำลอง ต้องการข้อมูลที่เหมือนกัน ดังนี้

- แรงดันพิกัดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง (Primary voltage: kV)
- แรงดันพิกัดด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง (Secondary voltage: kV)
- ค่าพิกัดกำลังของหม้อแปลง (MVA rating)
- กำลังสูญเสียในขดลวดหม้อแปลง (Load Loss)
- แรงดันลัดวงจรพิกัด เป็นร้อยละ (% Impedance: %Z)
- แรงดันขณะทำงาน (Operating voltage)
- การต่อขดลวด (Winding connection)

ข้อมูลเพิ่มเติมของ แบบจำลองของ CIGRE คือ

- แรงดันโอห์มมิกพิกัด เป็นเปอร์เซ็นต์ (Ohmic voltage)

3) โหลดมอเตอร์

มี 2 แบบจำลอง ข้อมูลที่ต้องการของแบบจำลองของ IEC909 คือ

- แรงดันพิกัดของมอเตอร์ (Voltage rated: kV)
- ค่ากำลังจริงของมอเตอร์ (Active power: kW)*

- ประสิทธิภาพของมอเตอร์ (Efficiency: %)*
- ตัวประกอบกำลัง (Power factor: %)
- อัตราส่วนของกระแสยึดโรเตอร์ต่อกระแสพิกัดของมอเตอร์ (Lock rotor current per rated current)
- ชนิดของมอเตอร์(มอเตอร์แรงดันสูงหรือมอเตอร์แรงดันต่ำ)

ข้อมูลที่ต้องการของแบบจำลองมอเตอร์โดย Wiley

เนื่องจากแบบจำลองนี้นำมาจากการออกแบบมอเตอร์ ดังนั้นแบบจำลองจึงประกอบด้วยค่าความต้านทานและรีแอคทีพอิมพีแดนซ์ทั้งทางด้านสเตเตอร์และโรเตอร์ ดังนี้

- ความต้านทานทางด้านสเตเตอร์ (Stator resistance: ohm)
- ความต้านทานทางด้านโรเตอร์ (Rotor resistance: ohm)
- อินดักทีฟรีแอคแตนซ์ทางด้านสเตเตอร์ (Stator reactance: ohm)
- อินดักทีฟรีแอคแตนซ์ทางด้านโรเตอร์ (Rotor reactance: ohm)
- ค่าสลิปมอเตอร์ (Slip: 0 -1)*

4) โหลดเชิงเส้น

มี 3 แบบจำลอง ข้อมูลที่ต้องการเหมือนกันคือ

- แรงดันขณะทำงาน (Operating voltage: kV)

ข้อมูลที่ต้องการของแบบจำลองแบบอนุกรม คือ

- ความต้านทานอนุกรม (Series resistance: ohm)*
- อินดักทีฟรีแอคแตนซ์อนุกรม (Series reactance: ohm)*

ข้อมูลที่ต้องการของแบบจำลองแบบขนานและแบบจำลองของ CIGRE คือ

- ค่ากำลังจริง (Active power: kW)*
- ค่ากำลังจินตภาพ (Reactive power: kVar)*

5) ชุดคาปาซิเตอร์ที่ใช้ปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

มีแบบจำลองเดียว ข้อมูลที่ต้องการ คือ

- แรงดันพิกัด (Voltage rated: kV)
- ค่ากำลังรีแอคทีฟต่อชุด (Reactive power per step: kVar)
- จำนวนชุด
- ค่าความต้านทานในคาปาซิเตอร์(ถ้าคิด)

6) ตัวกรองฮาร์มอนิก

มี 3 ชนิด แต่ละชนิดมีแบบจำลองเดียว คือ

ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบ ดีจูน

ข้อมูลที่ต้องการคือ

- แรงดันพิกัดของคาปาซิเตอร์ (Rating voltage: kV)
- ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟพิกัดต่อชุด (Rating reactive power per step: kVar)
- จำนวนชุดที่ติดตั้ง (Number of step)
- จุดปรับตั้งความถี่ที่ต้องการกรอง (Tuning point)
- ค่า Q Factor

ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบจูนและแบบผ่านสูง(High pass filter)

ข้อมูลที่ต้องการคือ

- แรงดันพิกัดของคาปาซิเตอร์ (Rating voltage: kV)
- ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟพิกัด (Rating reactive power: kVar)
- จุดปรับตั้งความถี่ที่ต้องการกรอง (Tuning point)
- ค่า Q Factor

7) สายส่งย่อยหรือสายเคเบิล

ข้อมูลที่ต้องการร่วมกันของสายส่งย่อยและสายเคเบิล คือ

- ความยาวของสาย (Length: km)
- ความต้านทานของสาย (โอห์ม ต่อ กิโลเมตร)
- อินดักทีฟรีแอคแตนซ์ ที่ 50 Hz (โอห์ม ต่อ กิโลเมตร)
- คาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์ ที่ 50 Hz (เม็กกะโอห์ม กิโลเมตร)

ข้อมูลเพิ่มเติมของสายเคเบิล คือ

- ความต้านทานของฉนวน (Sheath resistance: ohm)
- ระยะการจัดเรียงสาย (Geometric mean distance: m)
- ขนาดรัศมีของฉนวน (Sheath radius: m)

*(*) คือ ข้อมูลที่ต้องการ 24 ค่า*

เมื่อได้ข้อมูลของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่ในระบบแล้ว เนื่องจากแบบจำลองแต่ละแบบเหมาะสมกับความถี่ฮาร์มอนิกต่างกัน เช่น การคิดผลของความต้านทานทางผิว (Skin effect) จะคิดที่ความถี่สูงกว่าฮาร์มอนิกลำดับ 25 แต่มักไม่คิดที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับต่ำ ดังนั้นการพัฒนาโปรแกรมจึงต้องคำนึง ถึงความจริงนี้ การเลือกแบบจำลองของอุปกรณ์จึงต้องเลือกความถี่ที่

เหมาะสมด้วย จากนั้นจะนำมาคำนวนหาค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์นั้นๆ เนื่องจาก ในระบบโรงงานอาจมีระดับแรงดันหลายระดับ ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการคำนวณ จึงคิดเป็นค่าต่อหน่วย (Per unit: p.u.) โดยในขั้นต้นจะคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่มูลฐานก่อน จากนั้นจะคำนวณที่ความถี่ฮาร์มอนิกโดยให้คิดถึงลำดับฮาร์มอนิกที่ 49 ขั้นตอนการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบโรงงานอุตสาหกรรมแบ่งเป็นดังนี้

3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบโรงงานอุตสาหกรรม

การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม ต้องทราบวงจรของระบบไฟฟ้าและข้อมูลของอุปกรณ์ที่ใช้งาน แต่เนื่องจากระบบไฟฟ้าของแต่ละโรงงานแตกต่างกันดังนั้นการพัฒนาโปรแกรมจึงต้องมีส่วนที่แทนวงจรในระบบไฟฟ้าได้ การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกสำหรับระบบโรงงานอุตสาหกรรมมีขั้นตอนที่พิจารณาดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 รับค่าวงจรระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรม (Single Line Diagram) เนื่องจากแบบวงจรไฟฟ้าจะประกอบด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าทุกอย่างที่ต่ออยู่ แต่อุปกรณ์บางอย่างไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก เช่น อุปกรณ์ป้องกัน จึงไม่ต้องนำมาพิจารณา หรือ อุปกรณ์บางอย่างมีจำนวนมากไม่เหมาะที่จะเขียนทุกตัวจึงต้องมีการรวมโหลดให้เป็นกลุ่ม เช่น โหลดแสงสว่าง ถ้าไม่คิดว่าเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกจะสมมติให้เป็นโหลดเชิงเส้น

ขั้นตอนที่ 2 แทนค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ เพื่อแปลงเป็นค่าอิมพีแดนซ์แทนอุปกรณ์นั้นในวงจรสมมูล โดยเลือกความถี่ฮาร์มอนิกให้เหมาะสมกับแบบจำลองที่เลือก จะได้วงจรสมมูลถึงลำดับฮาร์มอนิกที่ 49

ขั้นตอนที่ 3 แปลงค่าอิมพีแดนซ์ของทุกอุปกรณ์ที่ได้ให้เป็นค่าอิมพีแดนซ์ต่อหนึ่งหน่วย (Zh p.u)

ขั้นตอนที่ 4 จากวงจรสมมูล นำค่าอิมพีแดนซ์ต่อหนึ่งหน่วยที่ความถี่ฮาร์มอนิก มาสร้างเมตริกซ์ความนำ (Y_{BUS})

ขั้นตอนที่ 5 แปลงแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรมทุกแหล่งให้เป็นแหล่งกระแสฮาร์มอนิก ถ้ามีแรงดันผิดเพี้ยนที่มาจากแหล่งจ่ายให้แปลงแรงดันฮาร์มอนิกให้เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าที่บัสที่การไฟฟ้าจ่ายมา เมื่อได้แหล่งกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดแล้วให้แปลงเป็นค่าต่อหนึ่งหน่วย(Ih p.u.) ดังนั้นจะได้เมตริกซ์กระแสไหลเข้า [Ih]

ขั้นตอนที่ 6 หาค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆ(เป็นค่าต่อหนึ่งหน่วย) ทุกความถี่ ได้จากสมการ

$$[Vh] = [Y_{BUS}]^{-1}[Ih] \qquad (3.6)$$

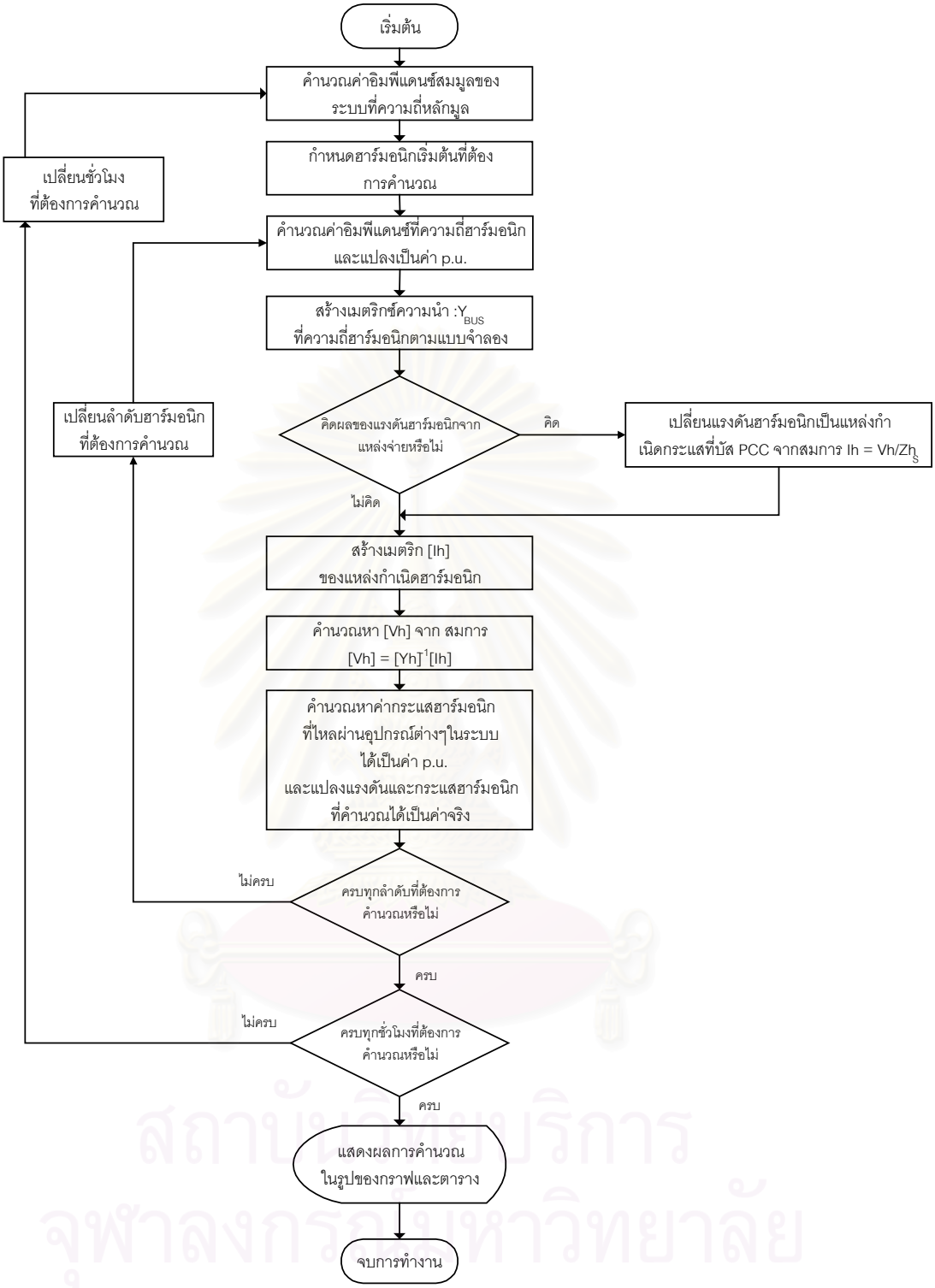
ขั้นตอนที่ 7 หากระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในอุปกรณ์ต่างๆ(เป็นค่าต่อหนึ่งหน่วย)ทุกความถี่ ได้เมื่อนำอิมพีแดนซ์ต่อหนึ่งหน่วย(Zh p.u.)ของอุปกรณ์นั้นมาหารผลต่างของแรงดันฮาร์มอนิกระหว่างบัสที่อุปกรณ์นั้นต่ออยู่

ขั้นตอนที่ 8 แปลงค่าแรงดันดันฮาร์มอนิกที่บัสและกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์จากขั้นตอนที่ 6 และ 7 ให้เป็นค่าจริง

ขั้นตอนที่ 9 ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 ถึง ขั้นตอนที่ 8 จนครบ 24 ชั่วโมงตามต้องการ

ขั้นตอนการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกทั้งหมดแสดงได้ดังรูปที่ 3.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม

3.3 ผลที่ต้องการจากการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรรม

3.3.2 แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส

แรงดันฮาร์มอนิกได้จากการขั้นตอนการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในรูปที่ 3.3 แรงดันฮาร์มอนิกที่ได้จะทราบถึงลำดับฮาร์มอนิกที่ 49 และมีทั้งหมด 24 ชุดแทนแต่ละชั่วโมงในหนึ่งวัน การเปรียบเทียบกับแรงดันพิกัดของอุปกรณ์จะใช้แรงดันประสิทธิผล(V_{rms})หาได้ดังสมการที่ 3.7

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{1}^{49} Vh^2} \qquad (3.7)$$

3.3.3 กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์

กระแสฮาร์มอนิกที่ได้จะมี 24 ชุดและแต่ละชุดมีถึงลำดับฮาร์มอนิกที่ 49 เหมือนของแรงดันฮาร์มอนิก การหากระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์หาได้โดยถ้าอุปกรณ์นั้นต่อระหว่างบัสให้นำผลต่างของแรงดันฮาร์มอนิกของทั้งสองบัสหารด้วยอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์นั้นดังสมการที่3.8 อุปกรณ์ที่ต่อระหว่างบัส คือ สายส่งย่อยหรือสายเคเบิล และหม้อแปลง

$$I_h = \left(\frac{Vh_1 - Vh_2}{Zh} \right) \qquad (3.8)$$

ถ้าอุปกรณ์นั้นต่อกับบัสให้นำแรงดันฮาร์มอนิกหารด้วยอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์นั้นดังสมการที่3.9 อุปกรณ์ที่ต่อที่บัส เช่น โหลดเชิงเส้น คาปาซิเตอร์และตัวกรองฮาร์มอนิก เป็นต้น

$$I_h = \left(\frac{Vh}{Zh} \right) \qquad (3.9)$$

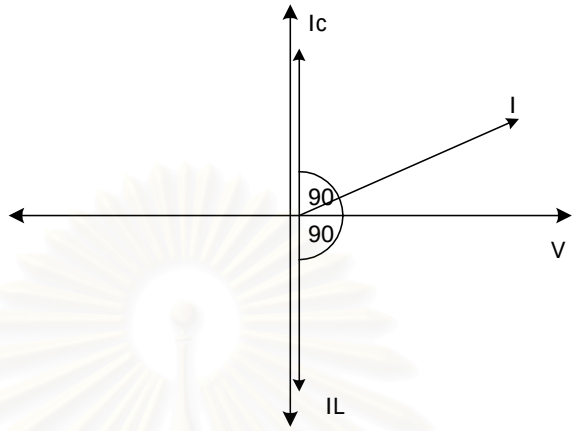
ค่ากระแสประสิทธิผล (I_{rms}) หาได้ดังสมการที่ 3.10

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{1}^{49} Ih^2} \qquad (3.10)$$

การหาทิศทางของกระแสฮาร์มอนิกว่าไหลเข้าหรือไหลออกจากบัสหาได้จากคุณลักษณะของกระแสจากโหลดปกติ ถ้าเป็นโหลดปกติจะรับแรงดันจากบัสดังนั้นกระแสจะไหลออกจากบัส มุมของกระแสเมื่อเทียบกับมุมของแรงดันจะอยู่ระหว่าง -90 องศาและ 90 องศาดังรูปที่ 3.4 กระแสของคาปาซิเตอร์จะนำหน้าแรงดันอยู่ 90 องศา กระแสของตัวเหนี่ยวนำอย่างเดียวจะตามหลังแรงดันอยู่ 90 องศาและกระแสของโหลดปกติที่ประกอบด้วยค่าความต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

และตัวเก็บประจุรวมกันเมื่อเทียบกับแรงดันจะอยู่ระหว่าง -90 และ 90 องศา ดังนั้นถ้ามุมของกระแสเมื่อเทียบกับแรงดันไม่อยู่ในช่วงดังกล่าวแสดงว่ากระแสนั้นจะไหลเข้าบัสและถ้าเป็นอุปกรณ์ที่ต่ออยู่ที่บัสแสดงว่าอุปกรณ์นั้นเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก



รูปที่ 3.4 ทิศทางของกระแสปกติเมื่อเทียบกับแรงดัน

เมื่อได้ค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆและกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆแล้วก็จะนำไปเทียบกับพิกัดของอุปกรณ์ว่าจะเกิดการทำงานผิดพลาดหรือเกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ได้หรือไม่ นอกจากนี้ยังนำแรงดันฮาร์มอนิกไปเทียบกับมาตรฐานที่การไฟฟ้าใช้แต่การเปรียบเทียบต้องใช้ดัชนีความผิดเพี้ยนรวมเป็นตัวเปรียบเทียบ ดัชนีความผิดเพี้ยนรวมแบ่งเป็น ความผิดเพี้ยนรวมทางด้านแรงดันและความผิดเพี้ยนรวมทางด้านกระแส หาได้ดังนี้

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{2}^{49} Vh^2}}{V1} \times 100\% \qquad (3.11)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{2}^{49} Ih^2}}{I1} \times 100\% \qquad (3.12)$$

เมื่อ THDv คือ ค่าความผิดเพี้ยนทางด้านแรงดันฮาร์มอนิกรวม

THD_I คือ ค่าความผิดเพี้ยนทางด้านกระแสฮาร์มอนิกรวม

Vh คือ แรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่บัสต่างๆ

V1 คือ แรงดันที่ความถี่มูลฐาน ที่บัสต่างๆ

Ih คือ กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h

I1 คือ กระแสที่ความถี่มูลฐาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

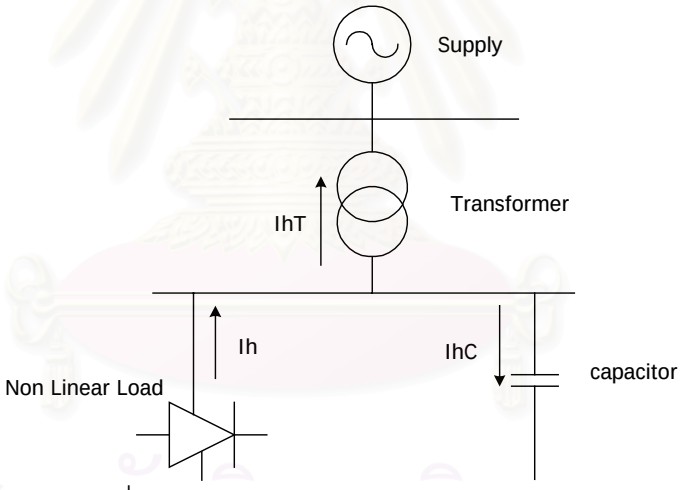
แต่บางมาตรฐาน เช่น IEEE 519-1992 จะไม่ใช้ค่า THD_I แต่จะใช้ค่า TDD ซึ่งหาได้ดังนี้

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{2}^{\infty} Ih^2}}{I_L} \times 100\% \qquad (3.13)$$

เมื่อ I_L คือ กระแสในช่วงความต้องการสูงสุด (Maximum demand load current)

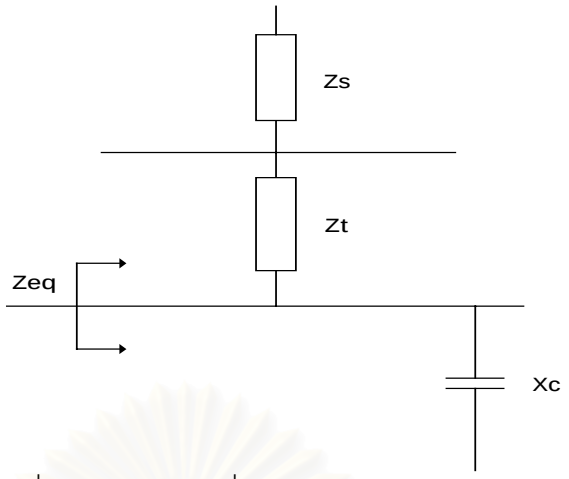
ความเสียหายร้ายแรงจากฮาร์มอนิกคือการเกิดการขยายจากเรโซแนนซ์แบบขนานและการขยายแรงดันฮาร์มอนิกจากเรโซแนนซ์แบบอนุกรม ดังนั้นถ้าทราบว่าจะเกิดการเรโซแนนซ์หรือไม่จะช่วยป้องกันการเกิดจริงได้ การวิเคราะห์จุดเรโซแนนซ์ทั้งสองชนิดหาได้โดยหา Impedance scans ดังนี้

3.3.4 **การหาเรโซแนนซ์แบบขนาน** (Parallel resonance)



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างวงจรในโรงงานอุตสาหกรรม

จากรูปที่ 3.5 เป็นตัวอย่างวงจรในโรงงานอย่างง่ายเพื่ออธิบายการเกิดเรโซแนนซ์ การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานคือการที่กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าบัสแล้วเกิดการขยายนั่นคือค่าอิมพีแดนซ์สมมูล (Z_{eq}) ที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเห็นทำให้เกิดการขยายกระแส



รูปที่ 3.6 อิมพีแดนซ์ที่แหล่งกระแสฮาร์มอนิกมองเห็น

การหาอิมพีแดนซ์สมมูล(Z_{eq}) ในวงจรสมมูลรูปที่ 3.6 ทำได้ง่ายๆ คือ

$$Z_{eq} = \frac{Xc * (Zs + Zt)}{Xc + (Zs + Zt)} \quad (3.14)$$

แต่ถ้าวงจรสมมูลยุ่งยากกว่านี้การหาอิมพีแดนซ์สมมูล(Z_{eq}) ทำได้โดยสังเกตจากสมการการหาแรงดันที่บัสใดๆ ดังสมการที่ 3.15

$$V_i = Z_{i1}I_1 + Z_{i2}I_2 + \ldots + Z_{ii}I_i + \ldots + Z_{in}I_n \quad (3.15)$$

เมื่อ V_i คือ แรงดันที่บัส i

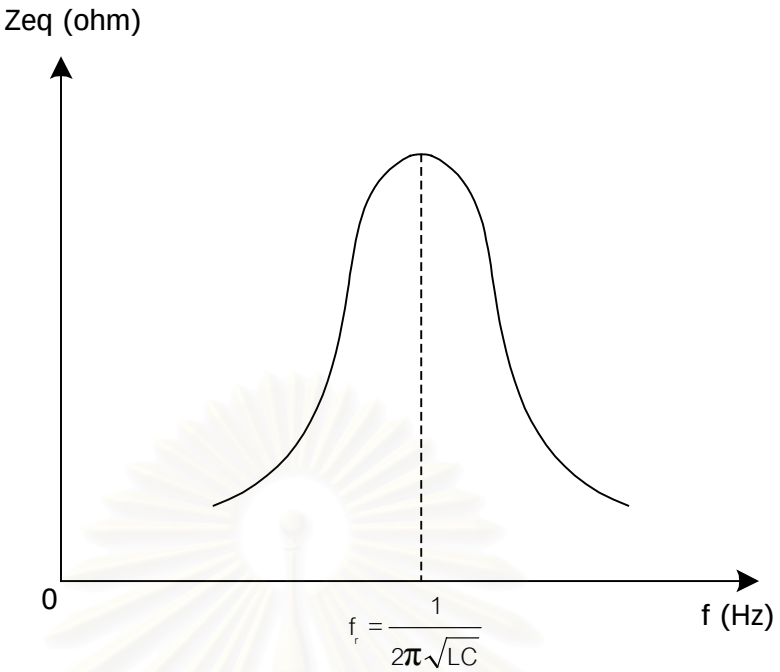
I_i คือ กระแสที่ไหลเข้าบัส i

Z_{in} คือ อิมพีแดนซ์ระหว่างบัส i และบัส n

ดังนั้น ถ้าฉีดกระแสขนาดหนึ่งหน่วย(p.u.) เข้าที่บัส i เพียงบัสเดียวสมการที่ 3.15 จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$V_i = Z_{ii} \quad (3.16)$$

อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัสใดๆจึงสามารถหาได้จากค่าแรงดันที่บัสนั้นเมื่อฉีดกระแส 1 หน่วยเข้าที่บัสนั้นเพียงบัสเดียวและถ้าคิดที่ความถี่อื่นๆด้วย จะได้กราฟของค่าอิมพีแดนซ์สมมูลที่ลำดับฮาร์มอนิกต่างๆเพื่อใช้วิเคราะห์สภาวะการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานได้ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 อิมพีแดนซ์สมมูลแสดงความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (f_r)

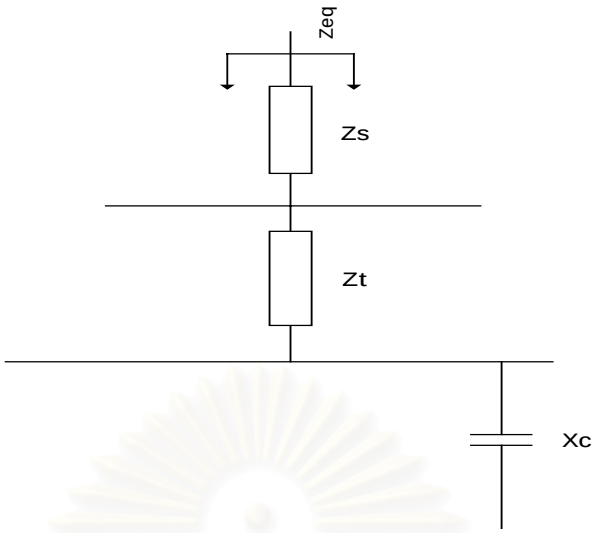
3.3.5 การหาเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series resonance)

การหาอิมพีแดนซ์สมมูลที่แหล่งจ่ายมองเห็นดังรูปที่ 3.8 หาได้โดยสมการที่ 3.17

$$Z_{eq} = Xc + (Zs + Zt) \qquad (3.17)$$

ถ้าวงจรสมมูลยุ่งยากขึ้นจะมีวิธีการหาอิมพีแดนซ์สมมูล ได้ 2 วิธี คือ

1. **การหาโดยการรวมวงจรสมมูล** ถ้าคำนวณด้วยมือจะยุ่งยากและเสียเวลามากแต่ถ้าเขียนโปรแกรมเพื่อช่วยคำนวณต้องมีฟังก์ชั่นที่เหมาะสมเพราะต้องคำนวณวงจรสมมูลที่แตกต่างกัน
2. **การหาโดยการรวมค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายทีหลัง** คือคิดเหมือนการหาอิมพีแดนซ์สมมูลจากการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานที่บัสรับไฟเข้าโดยที่ยังไม่รวมเอาอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมาคำนวณ เมื่อได้อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัสรับไฟแล้วก็นำอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมาอนุกรม



รูปที่ 3.8 อิมพีแดนซ์ที่แหล่งแรงดันฮาร์มอนิกทางด้านแหล่งจ่ายมองเห็น

แต่เนื่องจากข้อมูลของอุปกรณ์ไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงค่าทุกชั่วโมง ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์สมมูลจึงมีทั้งหมด 24 ค่าในหนึ่งวัน การนำเสนอพร้อมกันเพื่อเปรียบเทียบจะทำให้ทราบช่วงเวลาหรือลักษณะโหลดที่มีแนวโน้มทำให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ทั้งเรโซแนนซ์แบบขนานและแบบอนุกรม

3.3.6 การหากระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งฮาร์มอนิกที่สนใจ

แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรมอาจมีได้หลายแหล่ง ดังนั้นแม้จะทราบปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์แต่ก็ไม่ทราบว่ามาจากแหล่งไหนบ้างและมีปริมาณมากน้อยเท่าไร การทราบว่ากระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์มาจากแหล่งที่สนใจปริมาณเท่าไรจะช่วยให้ทราบถึงผลกระทบของแหล่งกำเนิดนั้นต่ออุปกรณ์ทำให้หาทางแก้ไขเฉพาะจุดได้ดีขึ้น วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณฮาร์มอนิกที่มาจากแหล่งที่สนในทำได้คล้ายกับขั้นตอนในรูปที่ 3.3 แต่จะคิดแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเพียงแหล่งเดียวเท่านั้น เช่น ถ้ามีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกหนึ่งแหล่งและมีความผิดเพี้ยนทางด้านแรงดันที่ระบบไฟฟ้าก่อนการต่อกับระบบโรงงาน ถ้าเลือกแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเป็นความผิดเพี้ยนด้านแรงดันที่ระบบไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิก ก็จะทราบถึงผลของความผิดเพี้ยนด้านแรงดันที่ระบบไฟฟ้าต่อการไหลของฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นต้น

นอกจากนี้ยังทราบถึงการขยายกระแสที่ลำดับอาร์มอนิกแต่ละลำดับเพราะถ้ากระแสที่ไหลเข้าอุปกรณ์ลำดับใดมีค่ามากกว่ากระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งจ่ายแสดงว่ามีการขยายกระแสฮาร์มอนิก

บทที่ 4

การพัฒนาโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม

การพัฒนาโปรแกรมจะเลือกใช้โปรแกรม delphi 5 เพราะเป็นโปรแกรมเชิงวัตถุที่พัฒนาให้ติดต่อกับผู้ใช้ง่ายและเป็นโปรแกรมที่มีขีดความสามารถดีมีรูปแบบไม่ซับซ้อน โครงสร้างของโปรแกรมที่พัฒนาจะประกอบด้วย ส่วนที่ใช้สร้างไดอะแกรมในระบบไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรม ส่วนรับข้อมูลของแต่ละอุปกรณ์และส่วนแสดงผล โดยโปรแกรมที่จะพัฒนาจะต้องสามารถหาการไหลของกระแสฮาร์มอนิกได้ตลอดทั้งวัน คิดเป็น 1 ครั้งในหนึ่งชั่วโมง รวมเป็น 24 ครั้ง เพื่อที่จะทราบการไหลของกระแสฮาร์มอนิกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดได้ โครงสร้างของโปรแกรมแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ

4.1 ส่วนที่ใช้สร้างไดอะแกรมในระบบไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรม

เนื่องจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างกันจะมีการต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าและไดอะแกรมในระบบ ไฟฟ้าแตกต่างกัน ดังนั้นการทำงานของส่วนนี้จึงควรสร้างไดอะแกรมไฟฟ้าได้ตรงกับ ไดอะแกรมจริงของโรงงาน ไม่ควรกำหนดจำนวนบัส การต่ออุปกรณ์ในแต่ละบัสแล้วให้ผู้ใช้เลือกเปิดใช้งาน เพราะในไดอะแกรมจริงอาจมีจำนวนบัสมากกว่าที่กำหนดไว้และการต่ออุปกรณ์อาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ การพัฒนาโปรแกรมในส่วนนี้จึงสร้างสัญลักษณ์แทนอุปกรณ์ไฟฟ้าและแหล่งจ่ายไฟจากการไฟฟ้าขึ้นเพื่อให้ผู้ใช้โปรแกรมสร้างไดอะแกรมของระบบโรงงานเอง สัญลักษณ์ที่สร้างขึ้นจะใช้แทน

- แหล่งจ่ายไฟจากการไฟฟ้า
- หม้อแปลงไฟฟ้า
- โหลดมอเตอร์
- โหลดเชิงเส้นทั่วไป
- ชุดคาปาซิเตอร์ที่ใช้ปรับปรุงตัวประกอบกำลัง
- ตัวกรองฮาร์มอนิก
- สายส่งย่อยหรือสายเคเบิล
- แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก
- บัส

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซึ่งอุปกรณ์ที่กล่าวมานี้มีใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมโดยทั่วไปหรือได้จากการรวมโหลดขนาดเล็ก เช่น โหลดเชิงเส้นอาจได้จากโหลดในสำนักงานรวมกันขึ้นกับการพิจารณาของผู้ใช้โปรแกรม สัญลักษณ์ที่ใช้แทนอุปกรณ์ที่กล่าวข้างต้นแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่ใช้ในโปรแกรม

 แหล่งจ่ายไฟ	 *หม้อแปลง*
 โหลดเชิงเส้น	 *มอเตอร์โหลด*
 ตัวกรองฮาร์มอนิก	 *แหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก*
 ชุดปรับปรุงตัวประกอบกำลัง	 *บัสบาร์*
 สายส่งย่อยหรือสายเคเบิล	

แต่เนื่องจากอุปกรณ์ชนิดเดียวกันจะมีสัญลักษณ์เหมือนกันดังนั้นการจะจำแนกได้ว่าเป็นตัวที่ต้องการหรือไม่ จึงมีการสร้างชื่อเริ่มต้นให้เมื่อมีการใช้อุปกรณ์ตัวนั้น เช่น ถ้าเป็น โหลดมอเตอร์จะให้ชื่อเริ่มต้นว่า motor1,motor2,... เป็นต้น แต่ชื่อนี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ภายหลัง ดังนั้นถึงแม้ว่าจะมีอุปกรณ์ชนิดเดียวกันหลายตัวก็สามารถจำแนกได้

4.1.1 การสร้างไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรม

การสร้างไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมทำได้โดย

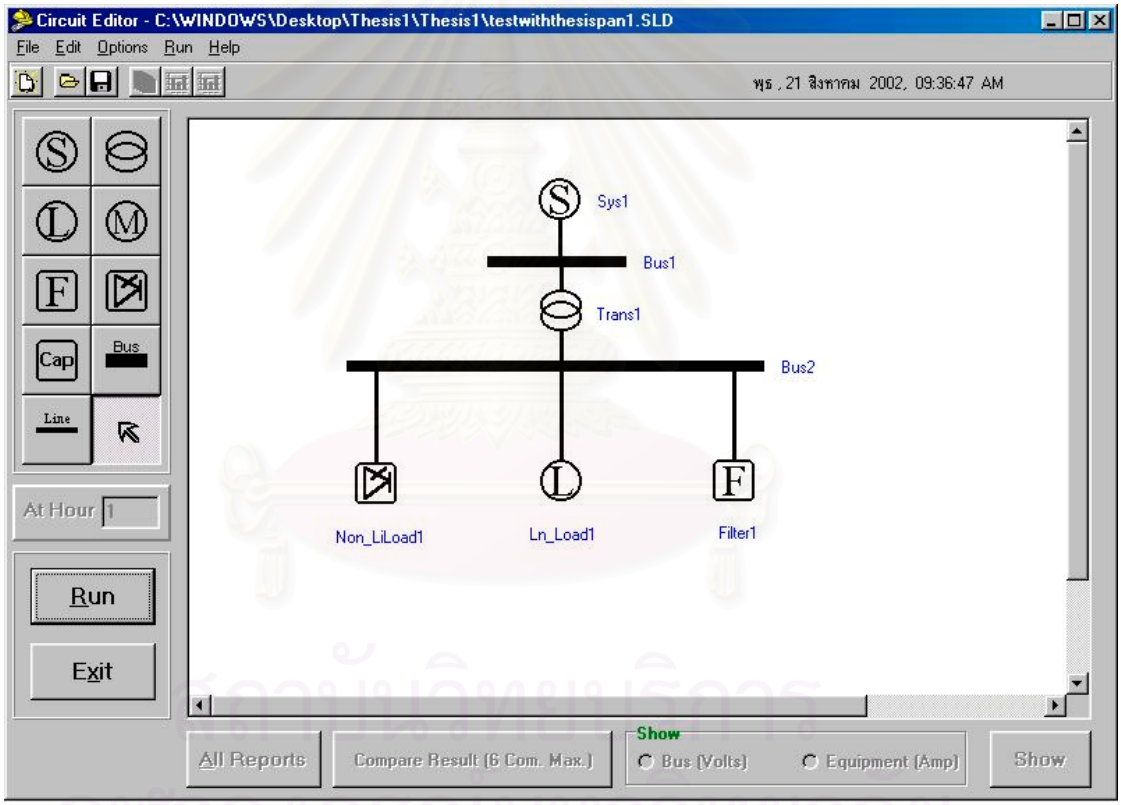
1)การนำสัญลักษณ์มาวาง คลิกเลือกสัญลักษณ์ของอุปกรณ์ที่ต้องการจากนั้นลากเมาส์(โดยที่ยังคลิกค้างไว้อยู่)มายังบริเวณที่ใช้สำหรับการสร้างไดอะแกรม แล้วปล่อยเมาส์ก็จะได้สัญลักษณ์ของอุปกรณ์ขึ้น

2)การเชื่อมต่ออุปกรณ์ อุปกรณ์จะเชื่อมต่อได้กับบัสเท่านั้น ดังนั้นถ้าจะเชื่อมต่ออุปกรณ์จะต้องมีบัสวางอยู่ก่อนแล้ว การต่ออุปกรณ์กับบัสทำได้โดยคลิกที่สัญลักษณ์แทนสายส่งย่อยหรือ

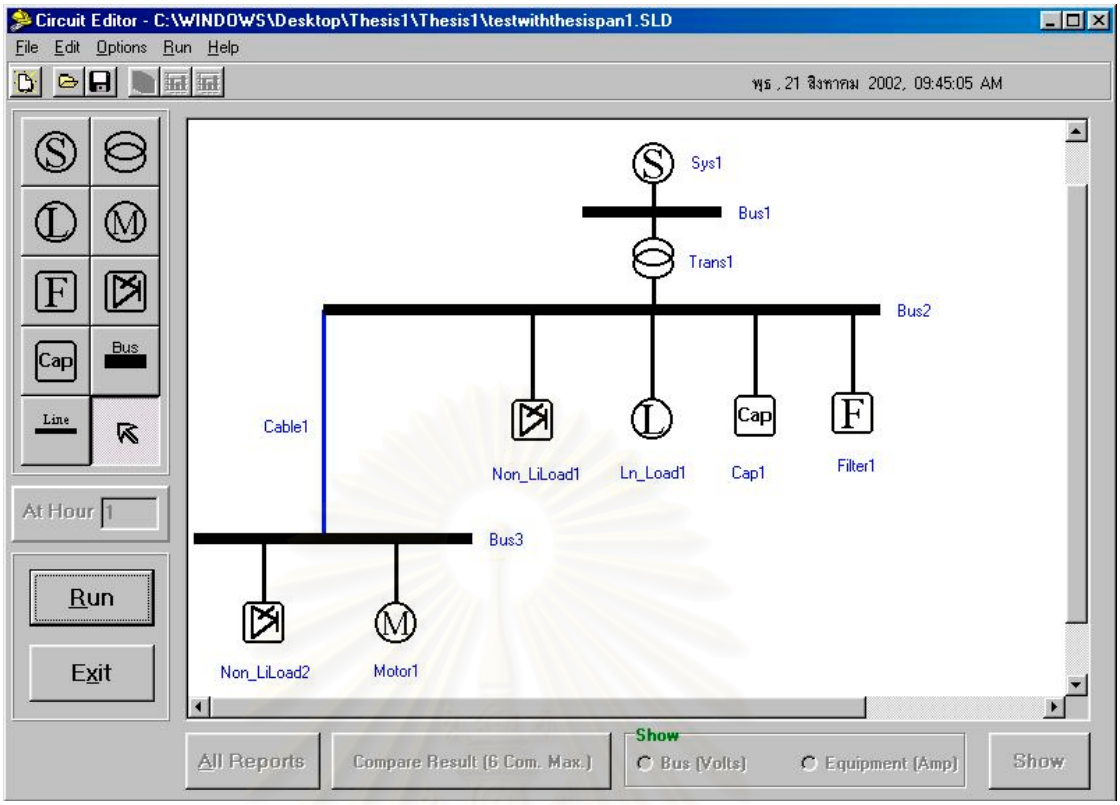
สายเคเบิล (Line) แล้วคลิกที่อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการแล้วคลิกที่บัสที่ต้องการให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่อหรืออาจสลับกันก็ได้โดยที่คลิกที่บัสก่อนแล้วค่อยคลิกที่อุปกรณ์ทีหลัง สายที่ต่อระหว่างอุปกรณ์ไฟฟ้าและบัสถือว่ามีขนาดสั้นมากมีอิมพีแดนซ์น้อยเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ไฟฟ้า ดังนั้นจึงไม่คิดค่าอิมพีแดนซ์ สำหรับการเชื่อมต่อระหว่างบัสกับบัสถือว่าเป็นสายส่งย่อยหรือสายเคเบิลดังนั้นจึงคิดค่าอิมพีแดนซ์ การสังเกตว่าจะคิดค่าอิมพีแดนซ์หรือไม่นั้นสังเกตโดย สายที่ต่ออุปกรณ์ไฟฟ้ากับบัสไม่คิดค่าอิมพีแดนซ์จะเป็นสีดำ ส่วนสายที่ต่อระหว่างบัสกับบัสคิดค่าอิมพีแดนซ์จะมีสีน้ำเงิน

4.1.2 ตัวอย่างการสร้างไดอะแกรม

ตัวอย่างการสร้างไดอะแกรมแสดงดังรูปที่ 4.1 เป็นไดอะแกรมของโรงงานขนาดเล็กที่มีบัสหลักเพียงบัสเดียว รูปที่ 4.2 เป็นไดอะแกรมของโรงงานที่มีหลายบัส



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างไดอะแกรมของโรงงานขนาดเล็ก



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างไดอะแกรมของโรงงานอุตสาหกรรมที่มีหลายบัส

4.2 ส่วนรับข้อมูลของอุปกรณ์แต่ละตัว

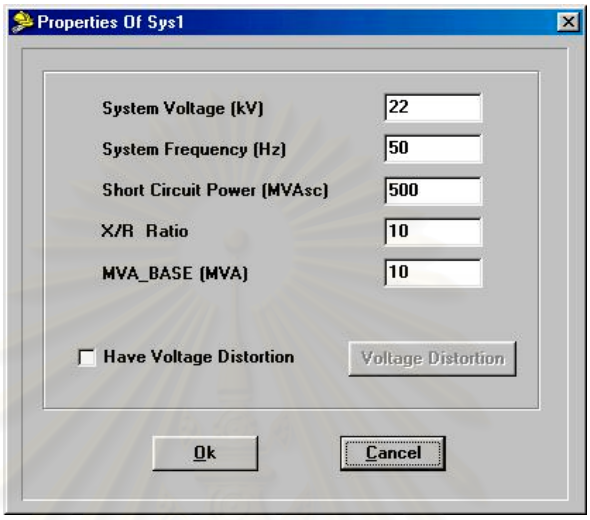
เนื่องจากอุปกรณ์ชนิดเดียวกันที่ใช้อาจมีหลายตัวในคราวเดียวกันและไม่ทราบว่ามีจำนวนเท่าไร ดังนั้นแบบฟอร์มการรับข้อมูลจึงเป็นแบบเดียวกันแต่ต่างกันที่ชื่อของอุปกรณ์จะทำให้อุปกรณ์เดียวกันได้ข้อมูลที่มีรูปแบบเดียวกัน การรับข้อมูลของอุปกรณ์ต่างๆทำได้ 2 วิธีคือ

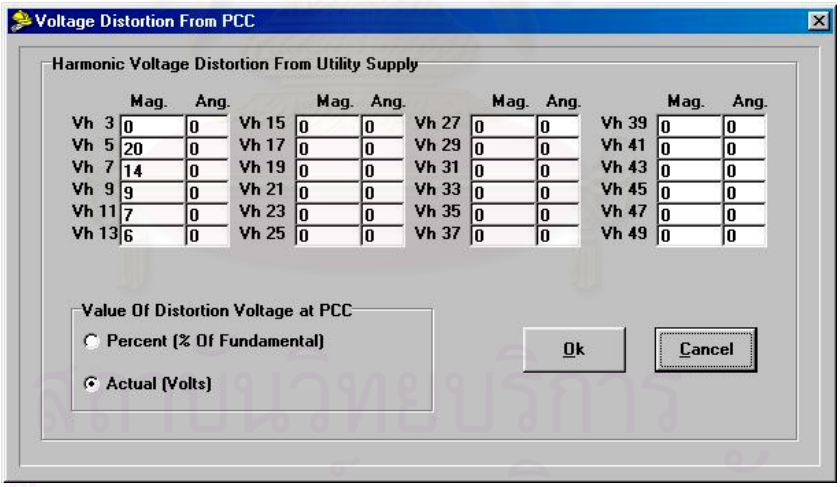
1) การคลิกขวาที่อุปกรณ์แล้วเลือก property
2) การดับเบิลคลิกที่ชื่อของอุปกรณ์

สำหรับแบบฟอร์มการรับข้อมูลของอุปกรณ์และแหล่งจ่ายไฟจะมีข้อมูลที่จำเป็นในการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ตามที่แสดงไว้ในบทที่ 3 และมีแบบจำลองให้ผู้ใช้งานได้เลือก แบบฟอร์มต่างๆแสดงได้ดังนี้

4.2.1 ระบบจ่ายไฟที่โรงงานต่ออยู่

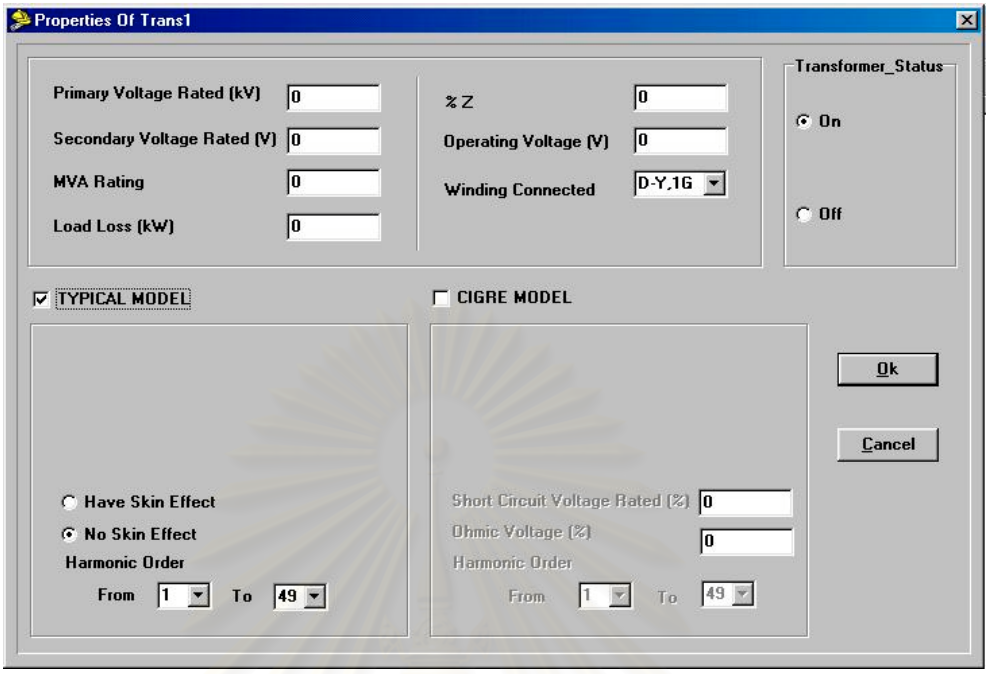
ถ้ามีการผิดเพี้ยนทางด้านแรงดันที่แหล่งจ่าย ให้เลือกที่ Have voltage distortion แล้วปุ่ม Voltage Distortion จะแสดงขึ้นเมื่อคลิกจะได้แบบฟอร์มสำหรับการป้อนค่าความผิดเพี้ยนทางแรงดัน





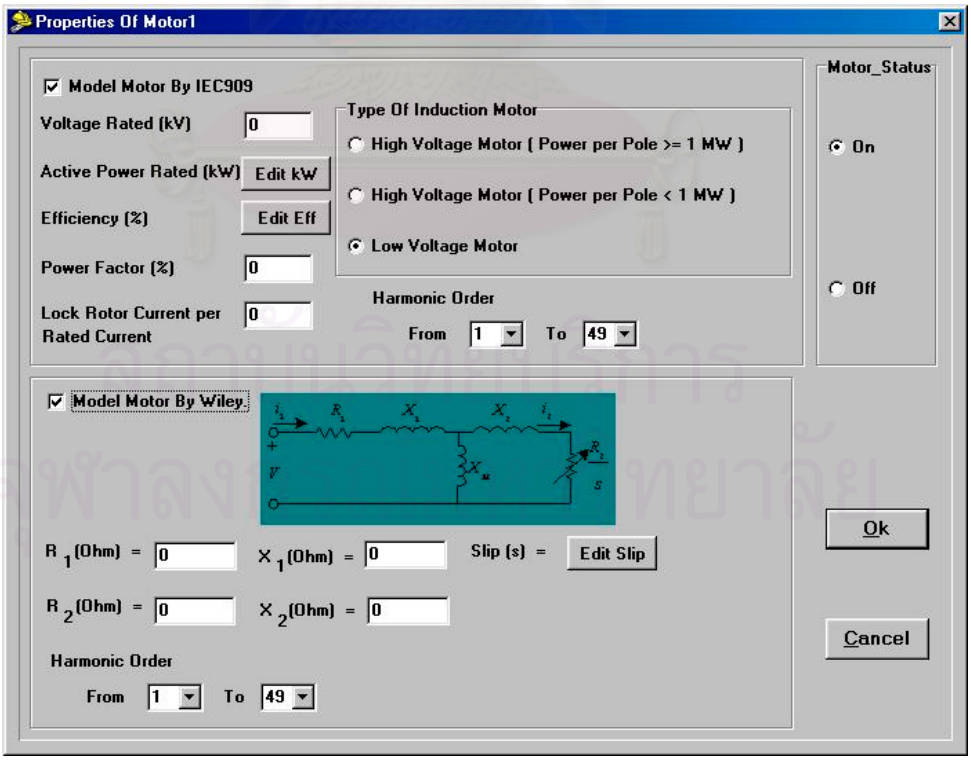
รูปที่ 4.3 แบบฟอร์มรับข้อมูลของระบบจ่ายไฟที่โรงงานต่ออยู่และแบบฟอร์มรับข้อมูลความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกด้านแรงดัน

4.2.2 หม้อแปลงไฟฟ้า



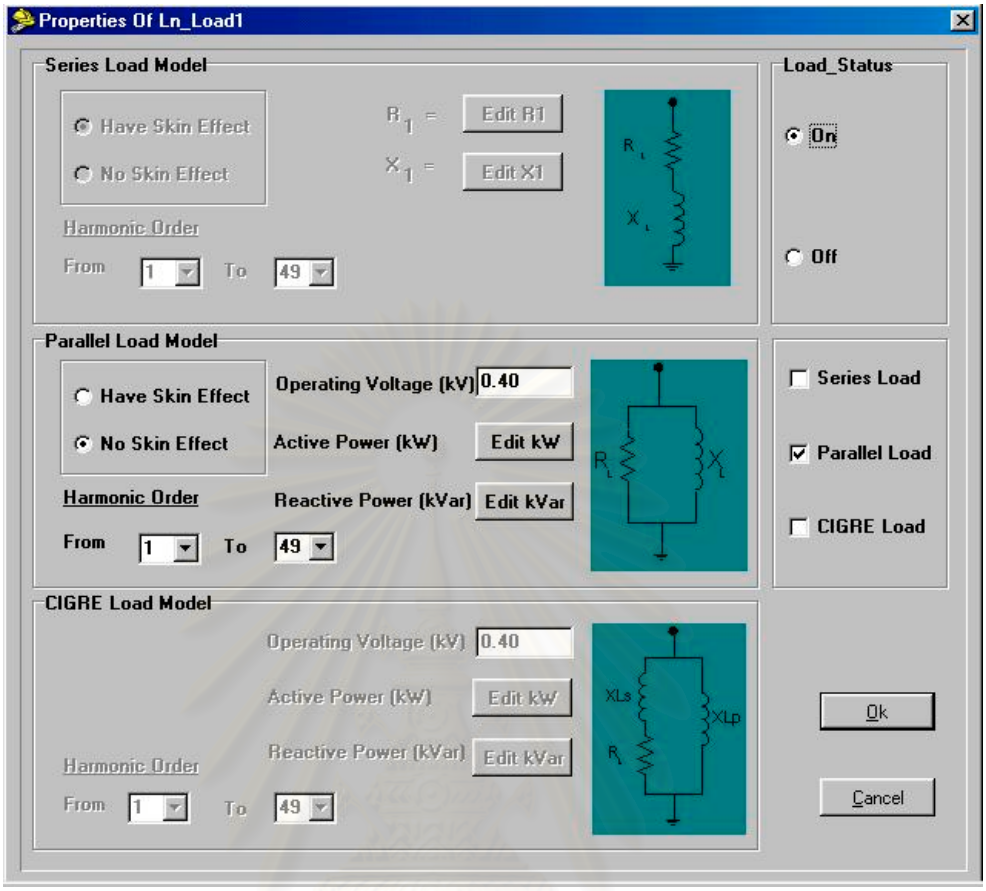
รูปที่ 4.4 แบบฟอร์มรับข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า

4.2.3 โหลดมอเตอร์



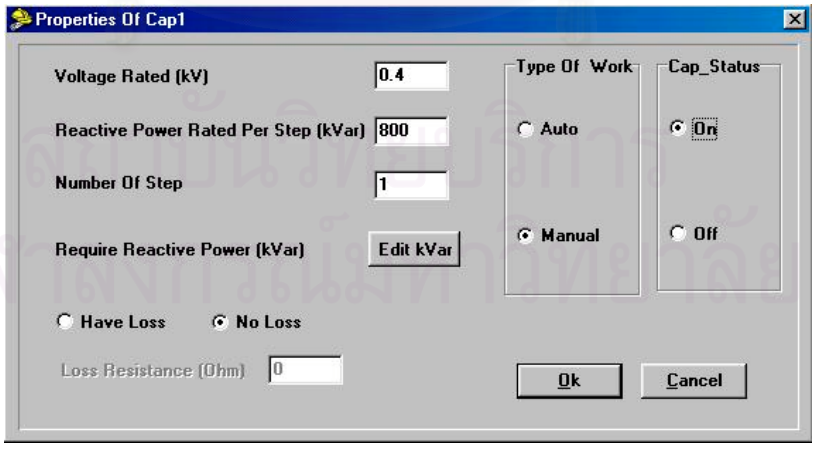
รูปที่ 4.5 แบบฟอร์มรับข้อมูลของโหลดมอเตอร์

4.2.4 โหลดเชิงเส้น



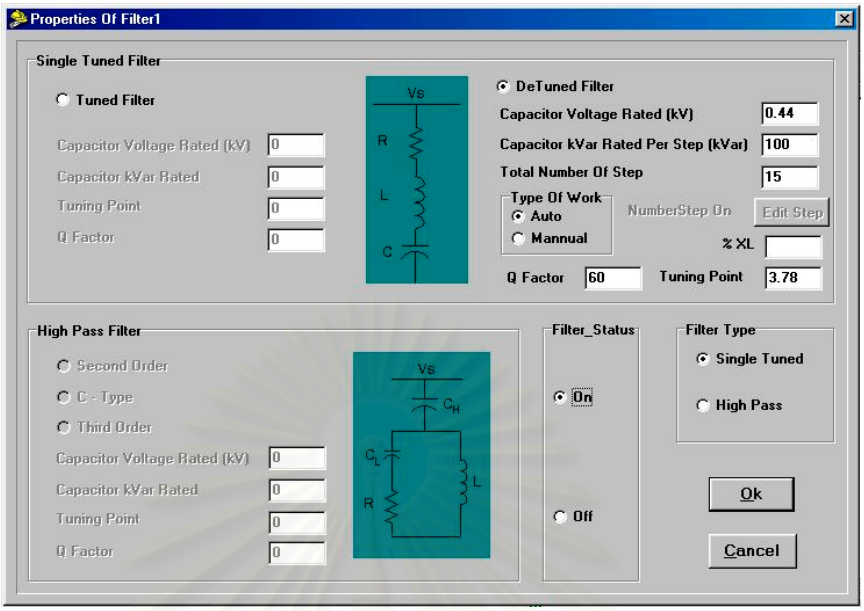
รูปที่ 4.6 แบบฟอร์มรับข้อมูลของโหลดเชิงเส้น

4.2.5 ชุดคาปาซิเตอร์



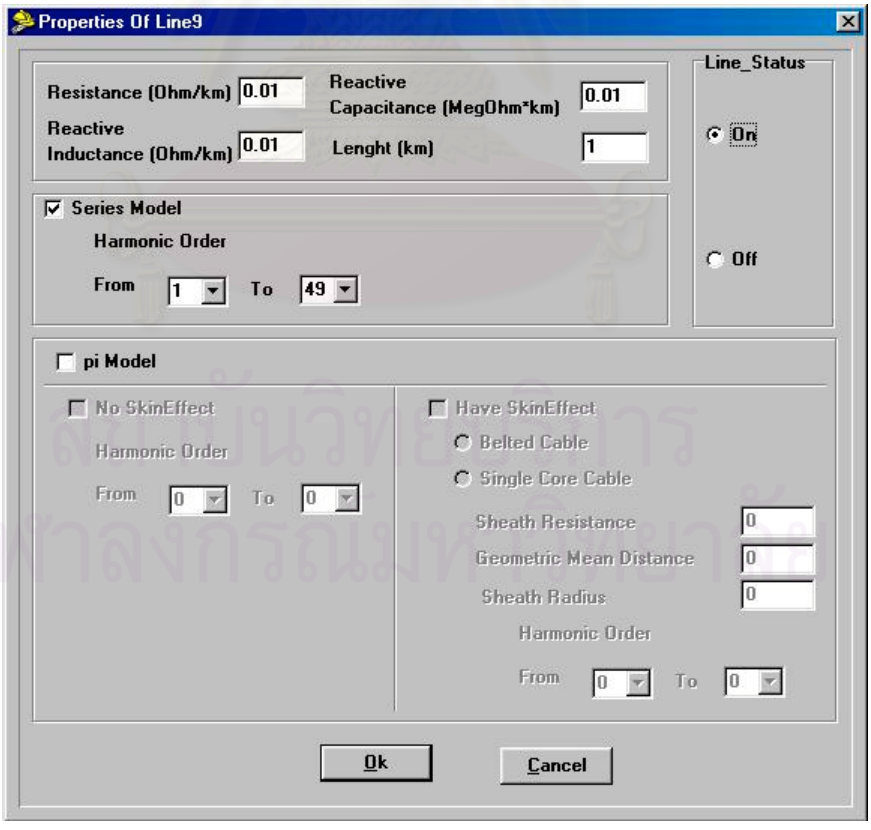
รูปที่ 4.7 แบบฟอร์มรับข้อมูลของชุดคาปาซิเตอร์

4.2.6 ตัวกรองฮาร์มอนิก



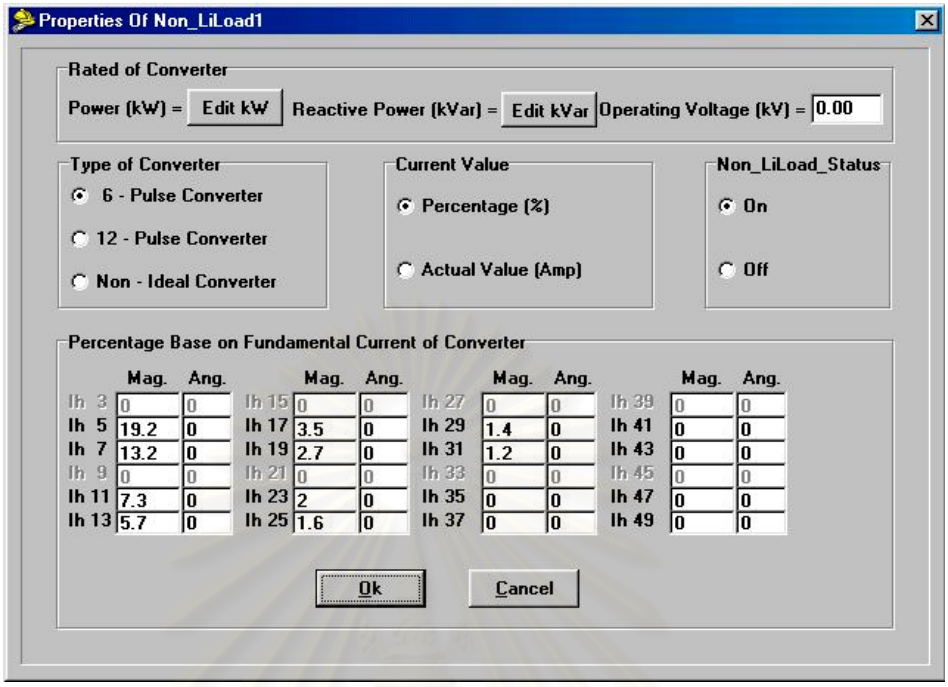
รูปที่ 4.8 แบบฟอร์มรับข้อมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก

4.2.7 สายส่งย่อยหรือสายเคเบิล



รูปที่ 4.9 แบบฟอร์มรับข้อมูลของสายส่งย่อยหรือสายเคเบิล

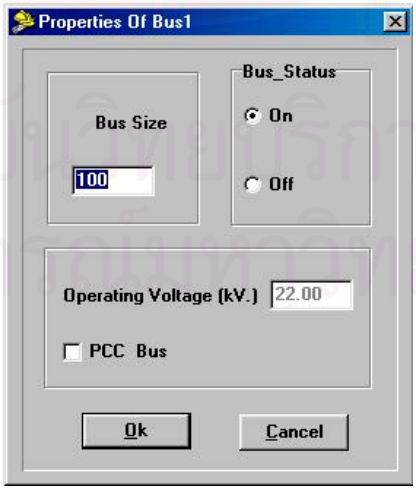
4.2.8 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก



รูปที่ 4.10 แบบฟอร์มรับข้อมูลของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

4.2.9 บัส

การวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่พัฒนาขึ้นนี้ จำเป็นต้องเลือกบัสที่เป็น PCC บัส เพื่อกำหนดระดับแรงดันที่ความถี่มูลฐานของบัสนี้ให้คงที่และเป็นค่าเริ่มต้นเพื่อคำนวณหาแรงดันที่ความถี่มูลฐานของบัสอื่น



รูปที่ 4.11 แบบฟอร์มรับข้อมูลของบัส

4.3 ส่วนการแสดงผล

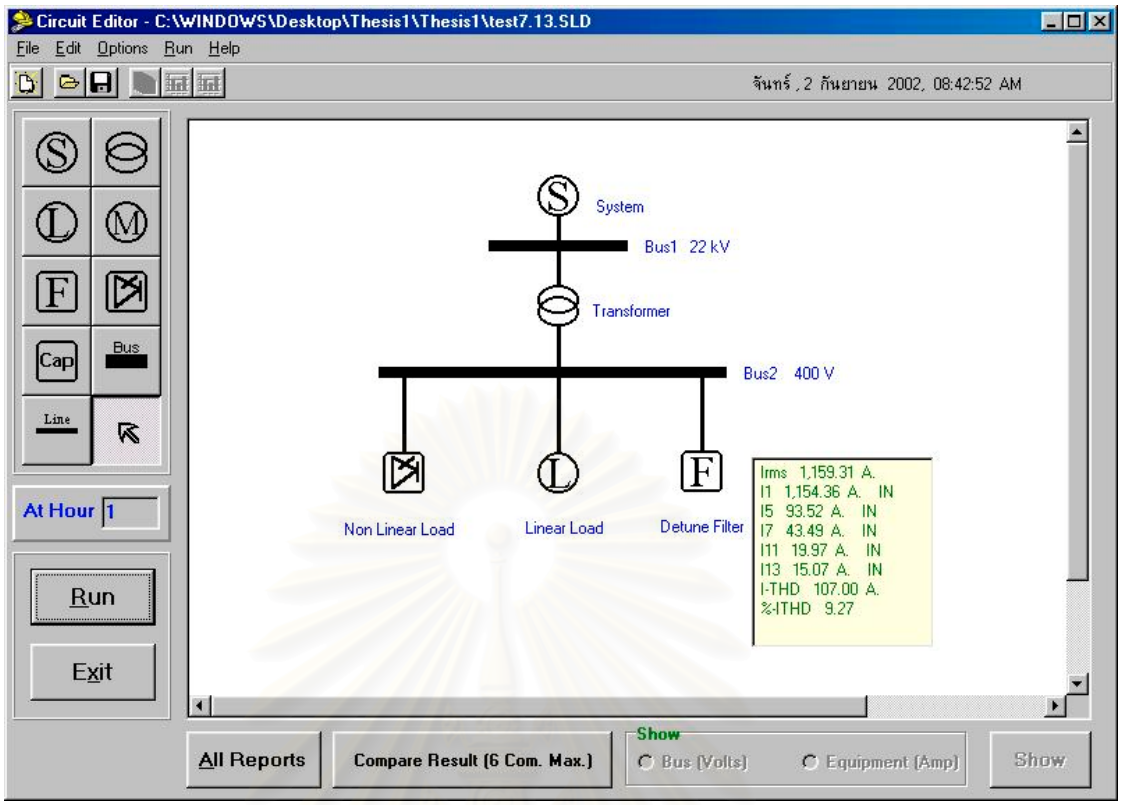
ผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมจะแสดงอยู่ในรูปของตาราง กราฟและกราฟ 3 มิติ ของแรงดันฮาร์มอนิกที่บันต่างๆ กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆที่ต่อกับระบบ ทั้งแบบฮาร์มอนิกแต่ละลำดับและความผิดเพี้ยนรวม เพื่อประเมินถึงพิกัดของอุปกรณ์ ว่าจะทนกับผลกระทบนี้ได้หรือไม่ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานหรือข้อบังคับ ในรูปของกราฟและกราฟ 3 มิติ ส่วนการศึกษาเกี่ยวกับสภาวะการเกิดเรโซแนนซ์ดูได้จาก อิมพีแดนซ์สมมูลแต่ละบัส การแสดงผลแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะคือ

4.3.1 การแสดงผลที่หน้าจอสร้างไดอะแกรม

เป็นการแสดงผลอย่างคร่าวๆ เพื่อดูปริมาณฮาร์มอนิกที่มีในอุปกรณ์นั้น การแสดงผลนี้จะแยกเป็นการแสดงค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสและการแสดงกระแสฮาร์มอนิกที่อุปกรณ์อื่นที่ไม่ใช่บัส โดยการแสดงผลจะประกอบด้วย

1) ค่าประสิทธิผล (rms)
2) ค่าที่ความถี่มูลฐาน
3) ค่าที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5
4) ค่าที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 7
5) ค่าที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 11
6) ค่าที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 13
7) ค่าความผิดเพี้ยนรวม

หากต้องการดูการแสดงผลที่หน้าจอทำได้โดยนำเมาส์คลิกที่ชื่อของอุปกรณ์นั้นตามต้องการ และหากต้องการจะปิดการแสดงผลส่วนนี้ทำได้โดยนำเมาส์คลิกที่บริเวณที่ว่างอื่นที่ไม่อยู่ในขอบเขตของชื่อของอุปกรณ์ การแสดงผลของกระแสฮาร์มอนิกที่หน้าจอนี้ยังทราบทิศทางการไหลของกระแสฮาร์มอนิกว่าไหลเข้าอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือถ้าไหลออกก็จะเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก นอกจากนี้ถ้ามีความผิดเพี้ยนของแรงดันที่แหล่งจ่ายอยู่ก่อนต่อระบบไฟของโรงงานเข้ากับระบบจ่ายของการไฟฟ้า จะทำให้ทราบว่ากระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าโรงงานหรือโรงงานจ่ายกระแสฮาร์มอนิกเข้าระบบ ตัวอย่างการแสดงผลที่หน้าจอแสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การแสดงผลที่หน้าจอ

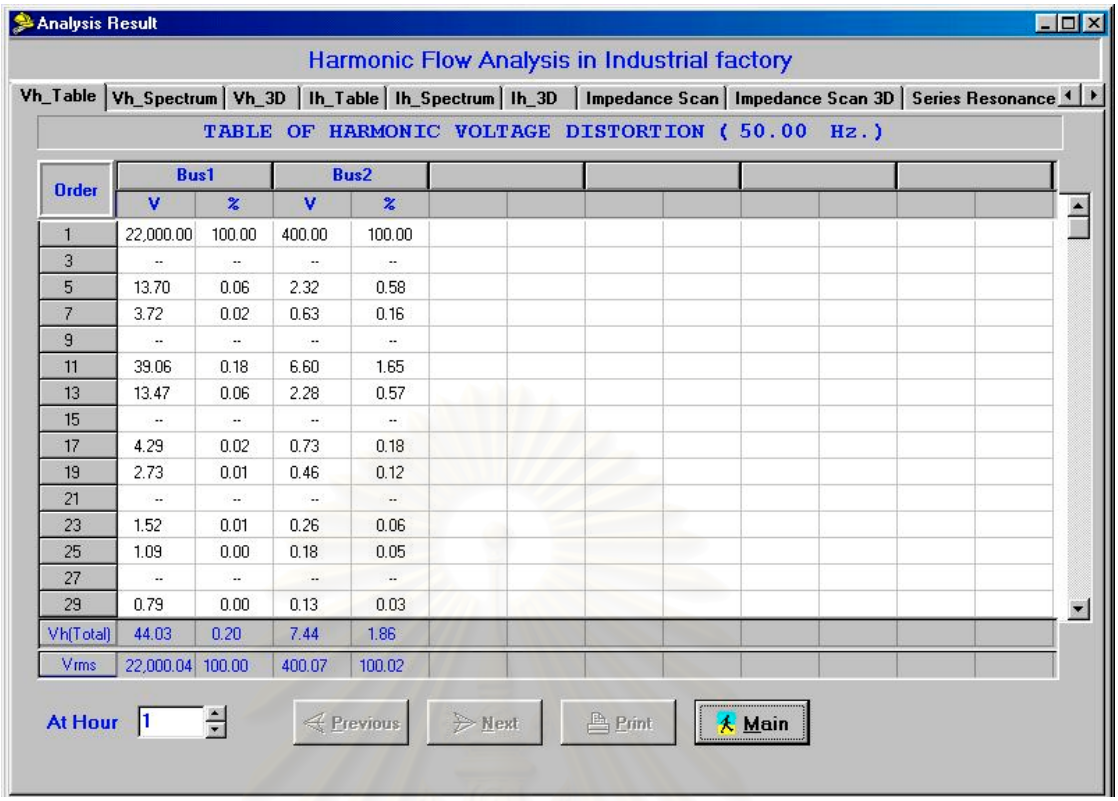
4.3.2 การแสดงผลทั้งหมด

การแสดงผลการคำนวณทั้งหมดแบ่งเป็นการแสดงผลของ 3 ปริมาณ คือ แรงดันที่บัส กระแสที่ไหลเข้าอุปกรณ์และอิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส

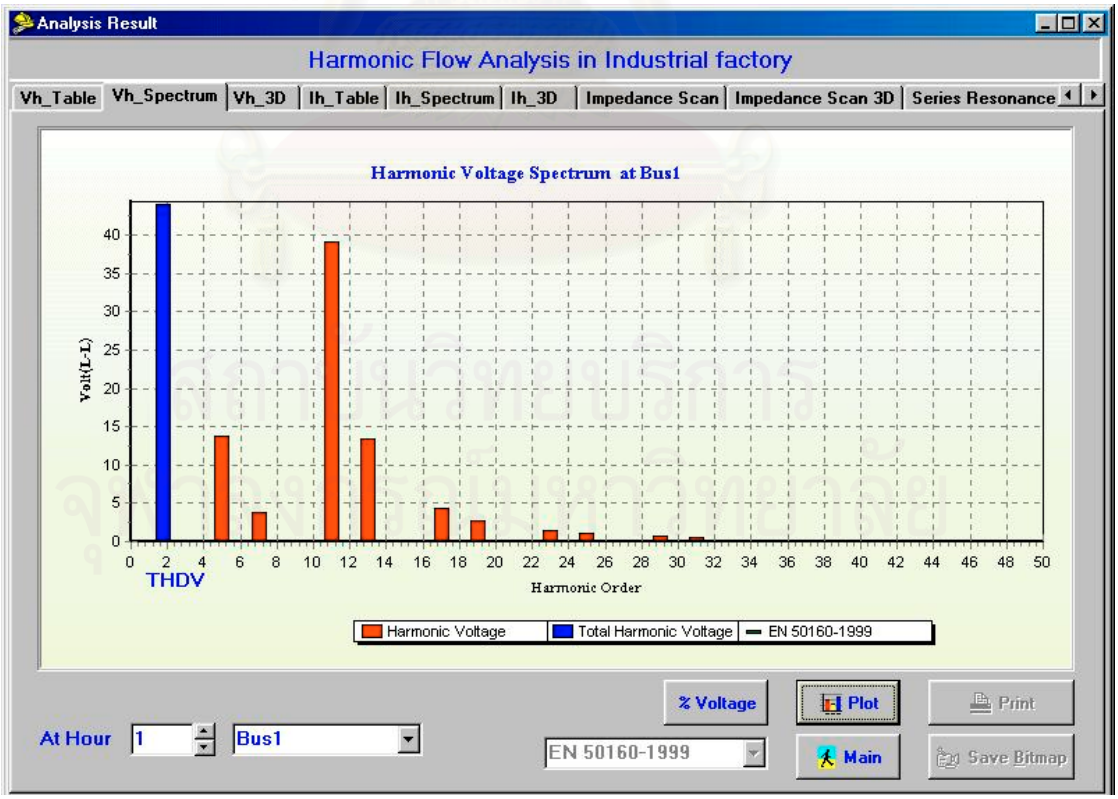
1) การแสดงผลของแรงดันฮาร์มอนิก

แรงดันฮาร์มอนิกจะแสดงอยู่ใน 3 ลักษณะคือ

1.1) แสดงเป็นตาราง แสดงแรงดันฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับ ความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและค่าแรงดันประสิทธิผล (V_{rms}) แสดงทั้งแรงดันฮาร์มอนิกจริง(โวลต์)และแสดงเป็นค่าของเปอร์เซ็นต์ของค่าที่ความถี่มูลฐาน การแสดงค่าทำได้โดยเลือกบัสที่ต้องการและเนื่องจากการคำนวณทำทั้งหมด 24 ชั่วโมง ดังนั้นต้องเลือกชั่วโมงที่ต้องการด้วย การแสดงผลแรงดันฮาร์มอนิกแบบตารางแสดงดังรูปที่ 4.13



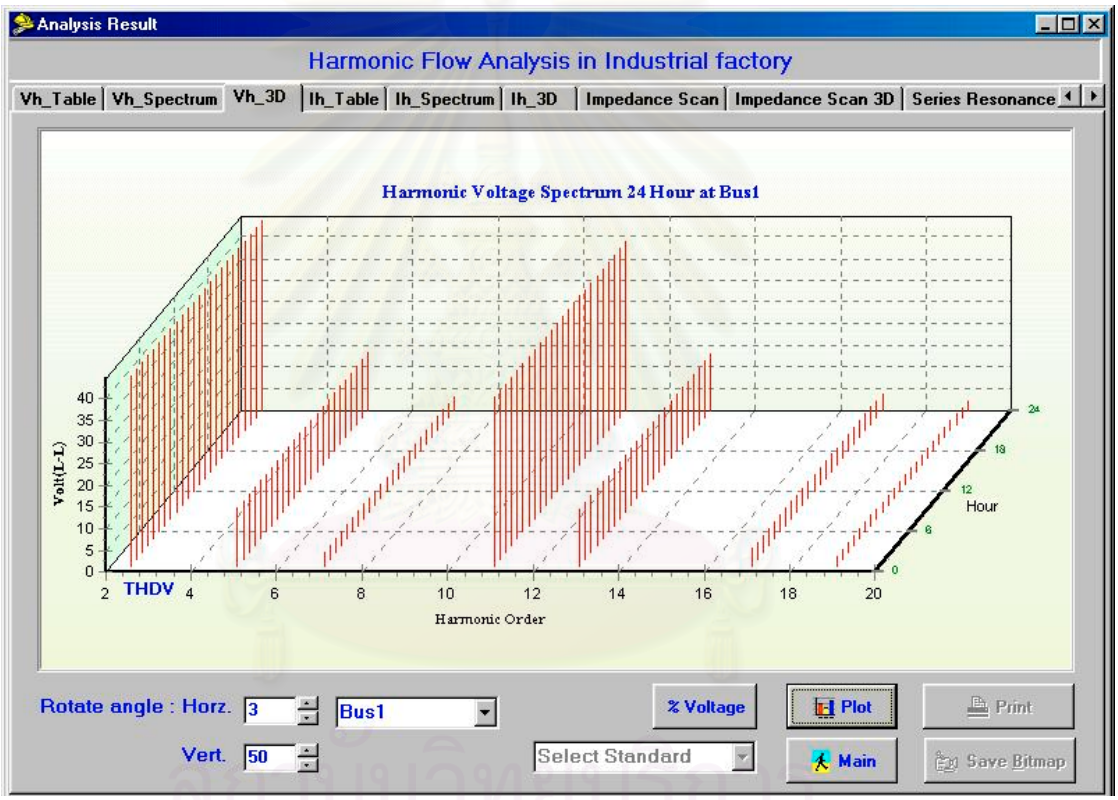
รูปที่ 4.13 การแสดงผลของแรงดันฮาร์มอนิกในรูปตาราง



รูปที่ 4.14 การแสดงผลของแรงดันฮาร์มอนิกในรูปสเปกตรัม

1.2) แสดงเป็นสเปกตรัม จากการแสดงผลในรูปของตารางนำค่ามาแสดงเป็นสเปกตรัมเพื่อให้เห็นภาพชัดเจนขึ้น โดยที่ข้อมูลของแรงดันฮาร์มอนิกที่แสดงยังคงเดิมและเพิ่มการเปรียบเทียบกับมาตรฐานต่างๆเพื่อดูว่าระดับแรงดันฮาร์มอนิกเกินค่ามาตรฐานหรือไม่ การแสดงแรงดันฮาร์มอนิกในรูปสเปกตรัมเปรียบเทียบกับมาตรฐานแสดงดังรูปที่ 4.14

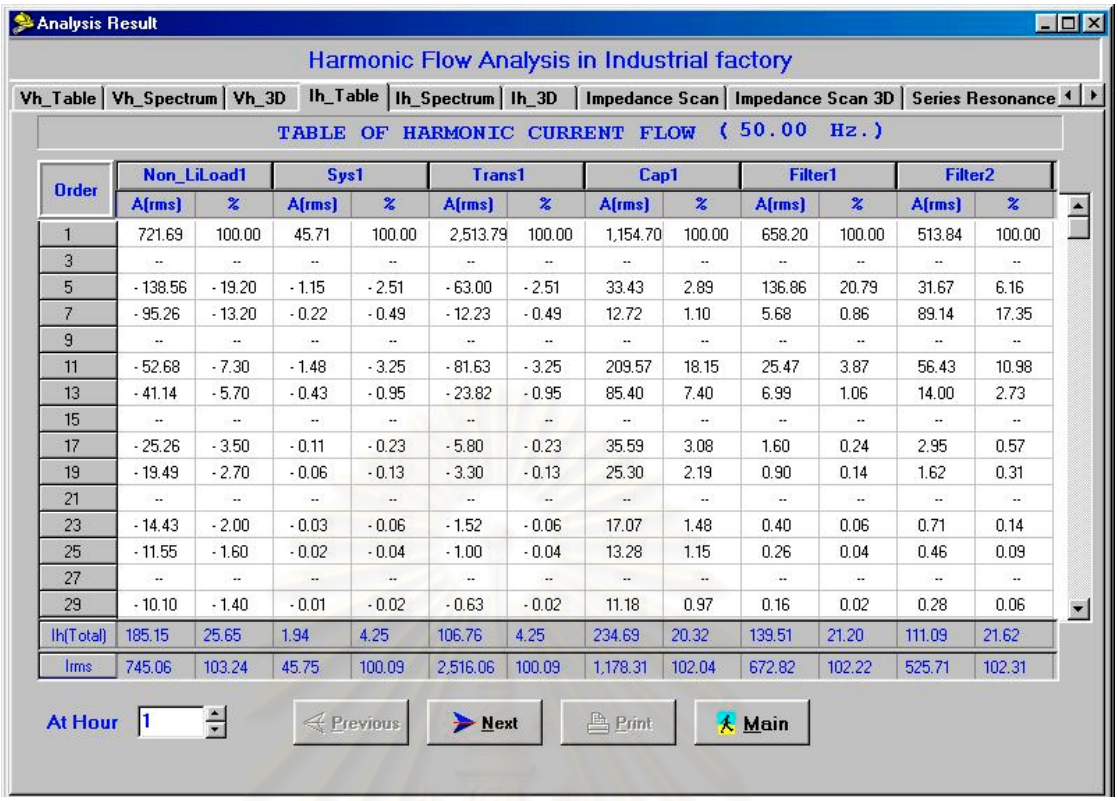
1.3) แสดงเป็นสเปกตรัม 3 มิติ การแสดงเป็นสเปกตรัมแสดงได้เพียงครั้งละ 1 ชั่วโมง เพื่อให้เห็นภาพการเปลี่ยนแปลงของแรงดันฮาร์มอนิกทั้ง 24 ชั่วโมง จึงนำมาแสดงไว้ในรูป 3 มิติ ทั้งนี้ยังคงเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานได้เหมือนเดิม การแสดงแรงดันฮาร์มอนิกในรูปสเปกตรัม 3 มิติเปรียบเทียบกับมาตรฐานแสดงดังรูปที่ 4.15



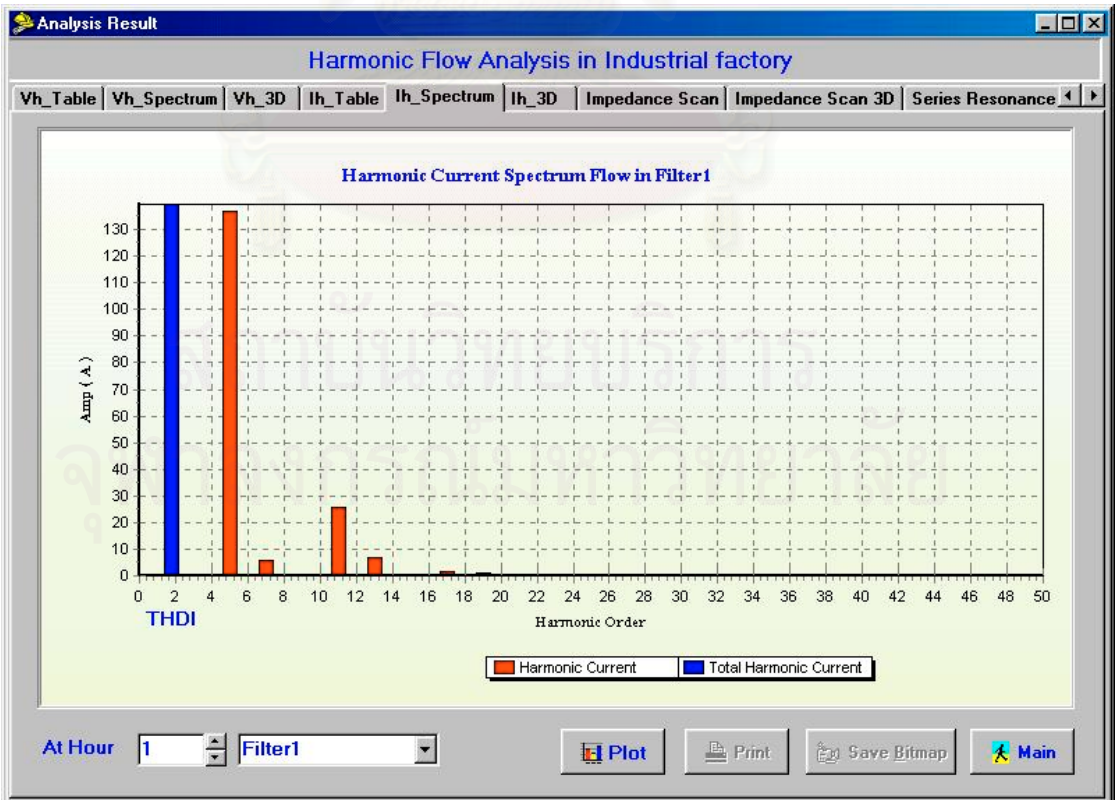
รูปที่ 4.15 การแสดงผลของแรงดันฮาร์มอนิกในรูปสเปกตรัม 3 มิติ

2) การแสดงผลของกระแสฮาร์มอนิก

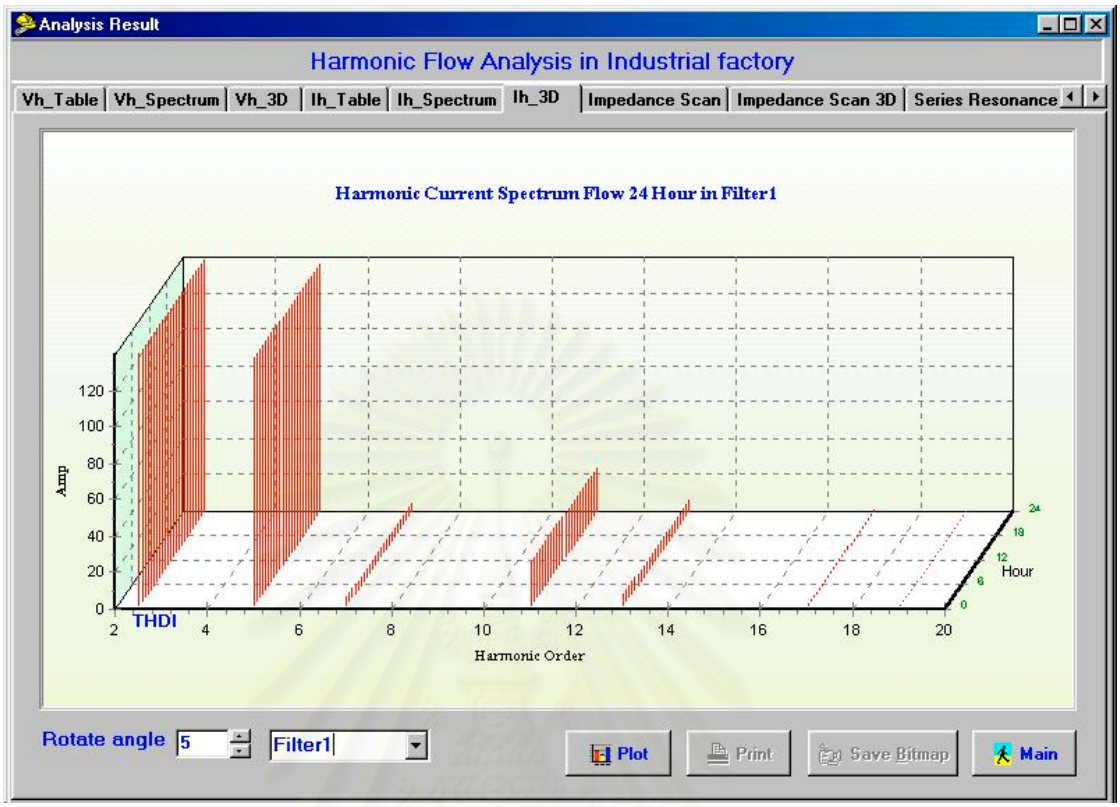
การแสดงผลกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ แบ่งเป็น 3 ลักษณะเหมือนการแสดงผลแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส ต่างกันตรงที่การแสดงผลของกระแสฮาร์มอนิกไม่มีการเปรียบเทียบกับมาตรฐาน นอกจากนี้กระแสฮาร์มอนิกที่เป็นลบแสดงว่ากระแสไหลเข้าบัสเป็นบวกแสดงว่ารับกระแสฮาร์มอนิก ตัวอย่างการแสดงผลของกระแสฮาร์มอนิกแสดงดังรูปที่ 4.16-4.18



รูปที่ 4.16 การแสดงผลของกระแสฮาร์มอนิกในรูปตาราง



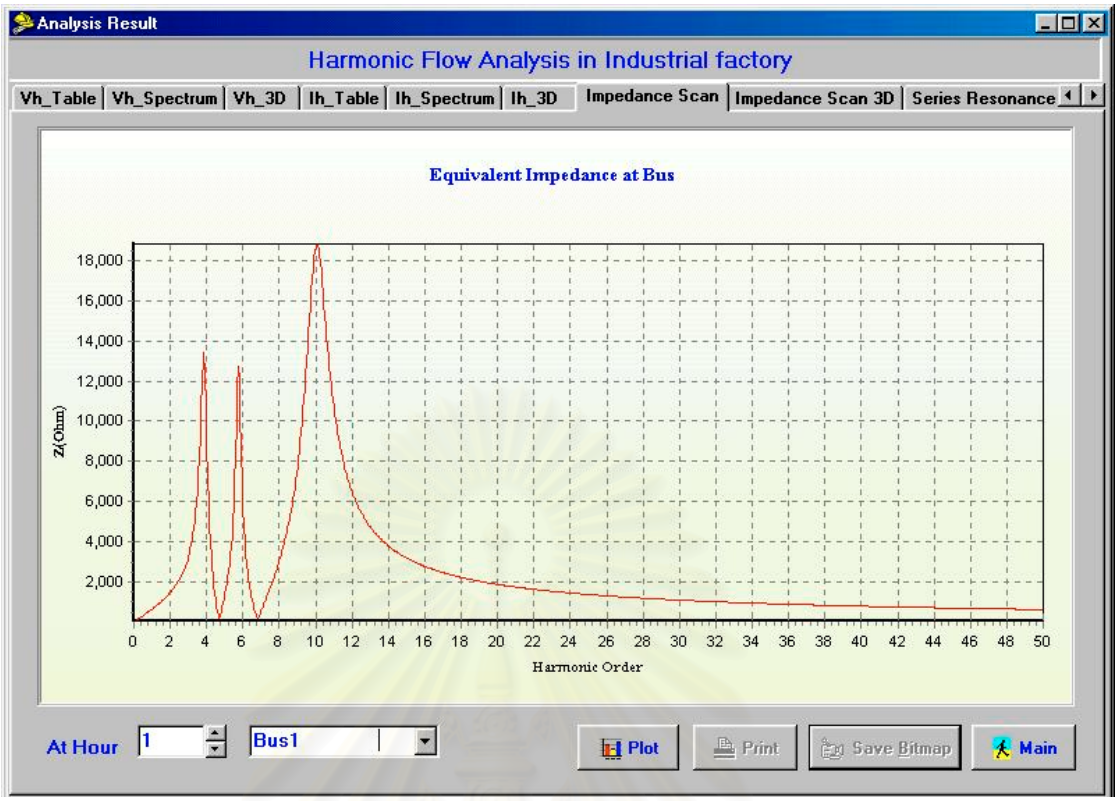
รูปที่ 4.17 การแสดงผลของกระแสฮาร์มอนิกในรูปสเปกตรัม



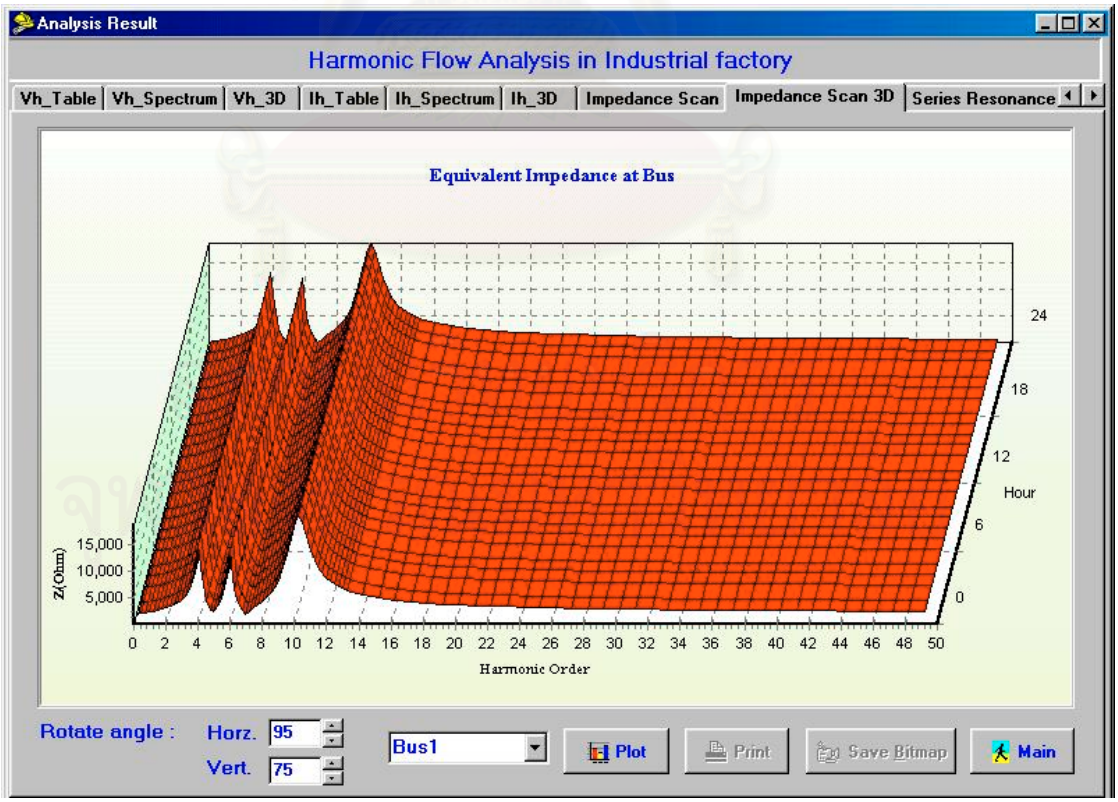
รูปที่ 4.18 การแสดงผลของกระแสฮาร์มอนิกในรูปสเปกตรัม 3 มิติ

3) การแสดงผลของอิมพีแดนซ์สมมูล

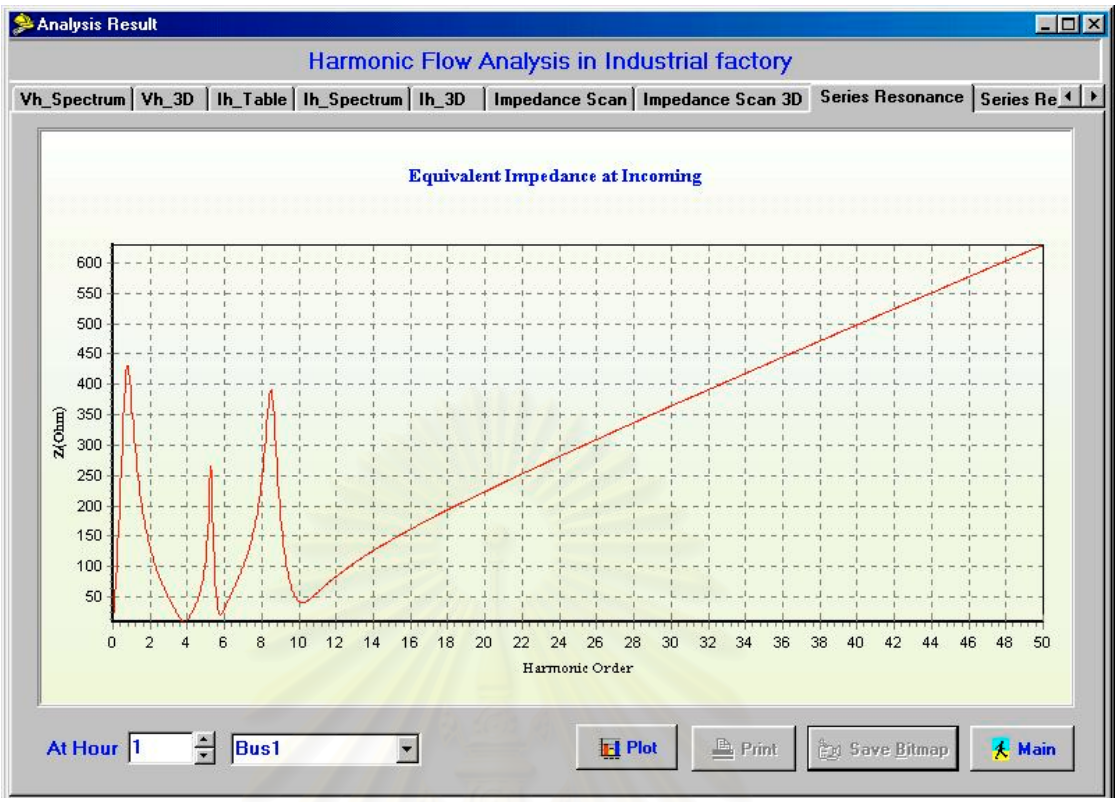
อิมพีแดนซ์สมมูลช่วยในการวิเคราะห์การเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ซึ่งแบ่งเป็น การเรโซแนนซ์แบบขนาน(Parallel resonance) และ การเรโซแนนซ์แบบอนุกรม(Series resonance) การแสดงผลจะแสดงสองลักษณะคือ แบบกราฟเส้นและแบบกราฟพื้นผิว 3 มิติ โดยที่การแสดงผลแบบกราฟเส้นจะแสดงอิมพีแดนซ์สมมูลของบัสที่เลือกในชั่วโมงที่ต้องการ ส่วนการแสดงผลแบบกราฟพื้นผิว 3 มิติจะแสดงอิมพีแดนซ์สมมูลของบัสในทุกชั่วโมง ทำให้เห็นภาพการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์สมมูลได้ดีขึ้น ตัวอย่างการแสดงผลของอิมพีแดนซ์สมมูลเพื่อวิเคราะห์สภาวะเรโซแนนซ์แสดงดังรูปที่ 4.19-4.22



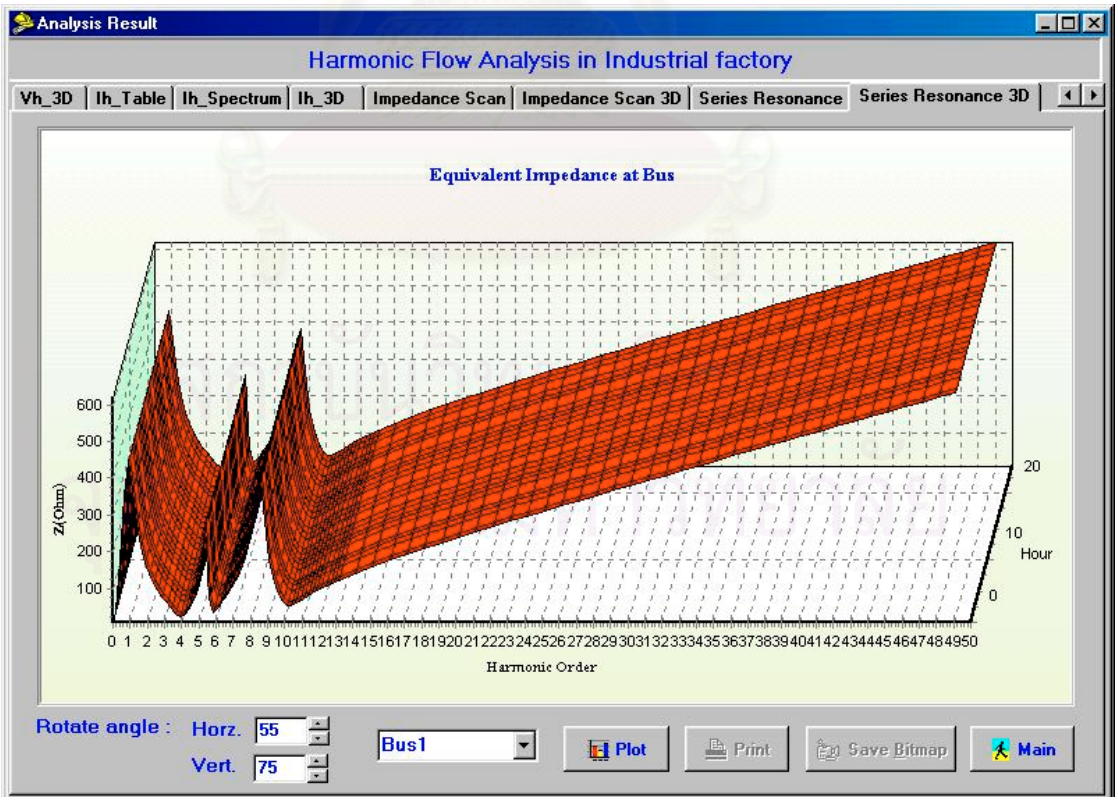
รูปที่ 4.19 การแสดงผลของอิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส



รูปที่ 4.20 การแสดงผลของอิมพีแดนซ์สมมูลที่บัสแบบพื้นผิว 3 มิติ



รูปที่ 4.21 การแสดงผลของอิมพีแดนซ์สมมูลเพื่อวิเคราะห์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม



รูปที่ 4.22 การแสดงผลของอิมพีแดนซ์สมมูลเพื่อวิเคราะห์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมเป็นพื้นผิว 3 มิติ

4.3.3 การแสดงผลเปรียบเทียบ

การแสดงผลแบบเปรียบเทียบจะช่วยให้ทราบว่าอุปกรณ์ใดมีความผิดเพี้ยนมากกว่ากัน โดยแสดงในรูปของตารางและสเปกตรัม การแสดงผลแบบเปรียบเทียบแบ่งเป็น

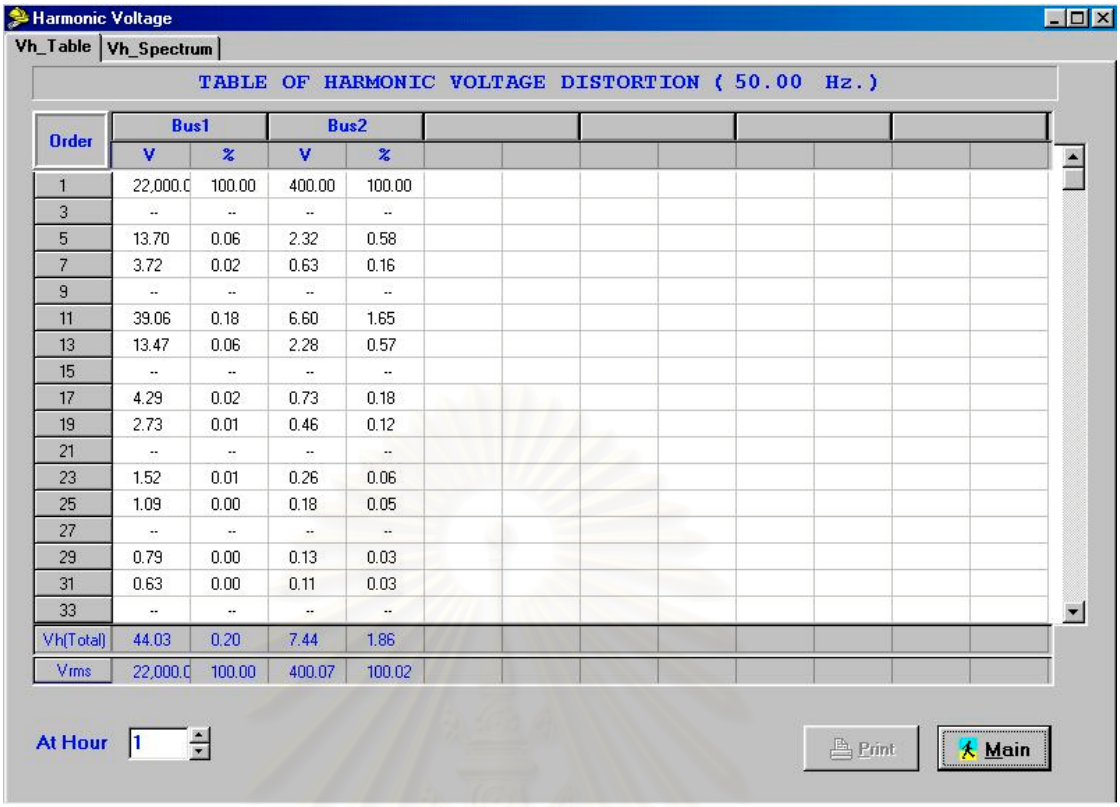
1) การเปรียบเทียบแรงดันฮาร์มอนิก

การเปรียบเทียบแรงดันฮาร์มอนิกที่มีค่าจริง(โวลต์) จะไม่มีความหมายถ้าบัสที่เปรียบเทียบกันมีระดับแรงดันเบสไม่เท่ากัน ดังนั้นการเปรียบเทียบแรงดันจึงแสดงทั้งค่าจริงและค่าเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อแสดงในตารางและเลือกได้ว่าจะเปรียบเทียบค่าจริงหรือเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อแสดงเป็นสเปกตรัม ตัวอย่างการเปรียบเทียบแรงดันฮาร์มอนิกแสดงดังรูปที่ 4.23-4.24

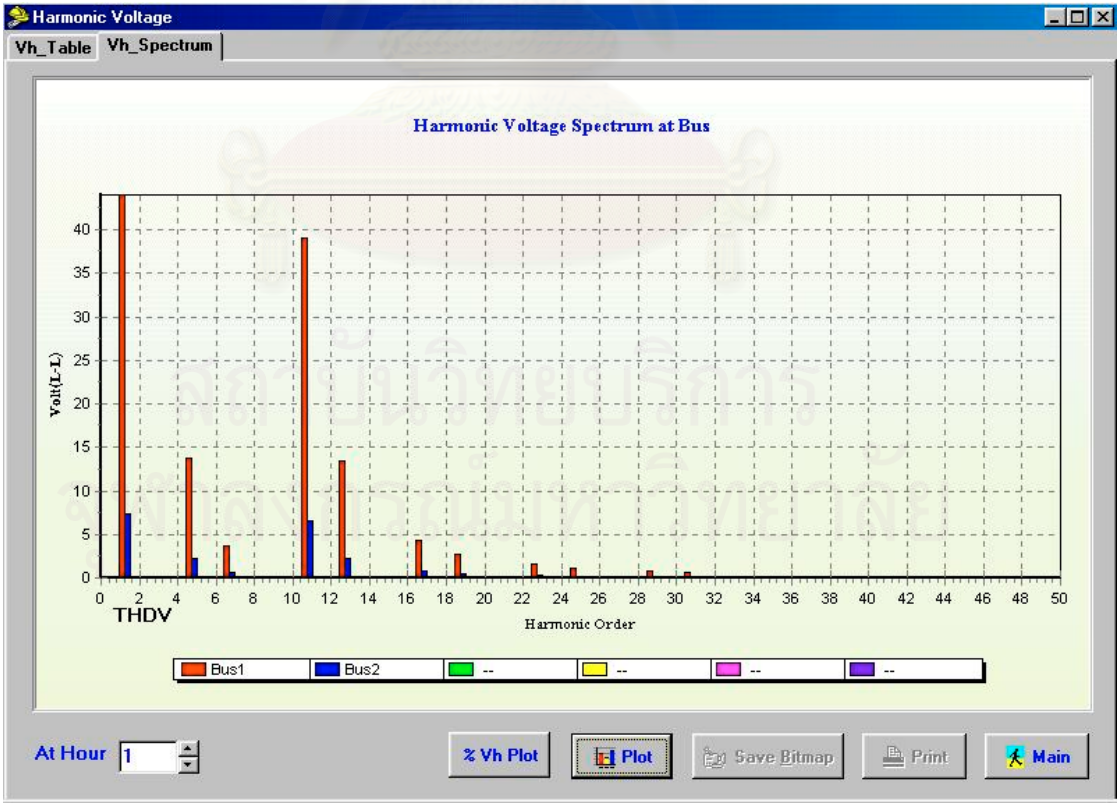
2) การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิก

การเปรียบเทียบกระแสนิยมเปรียบเทียบเป็นค่าจริง(แอมแปร์) การแสดงผลในตารางจะแสดงทั้งค่าจริงและค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ ส่วนการแสดงผลในรูปสเปกตรัมจะแสดงเฉพาะค่าจริง โดยจะแสดงกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดที่ไหลผ่านอุปกรณ์ที่เลือก หากต้องการทราบค่ากระแสว่ามาจากแหล่งกำเนิดกระแสแหล่งหนึ่งมีค่าเป็นเท่าใด ทำได้โดยเริ่มต้นจากการเลือกอุปกรณ์ เริ่มจากการเลือกแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่ต้องการเพียงแหล่งเดียวแล้วเลือกอุปกรณ์ที่ต้องการทราบว่ามีกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งนั้นเท่าใด การแสดงผลจะเป็นค่ากระแสจริงจากแหล่งฮาร์มอนิกนั้นและค่าคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกนั้น ตัวอย่างการเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกแสดงดังรูปที่ 4.25-4.28

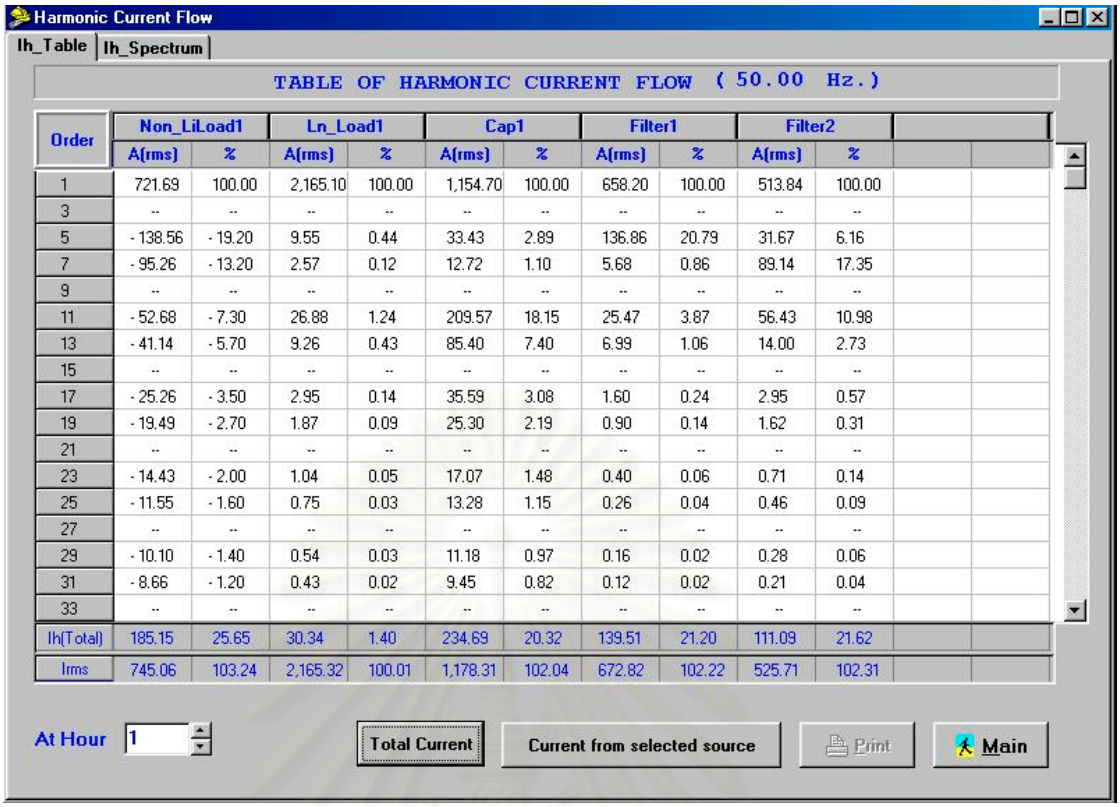
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.23 การแสดงผลแบบเปรียบเทียบแรงดันฮาร์มอนิกแบบตาราง

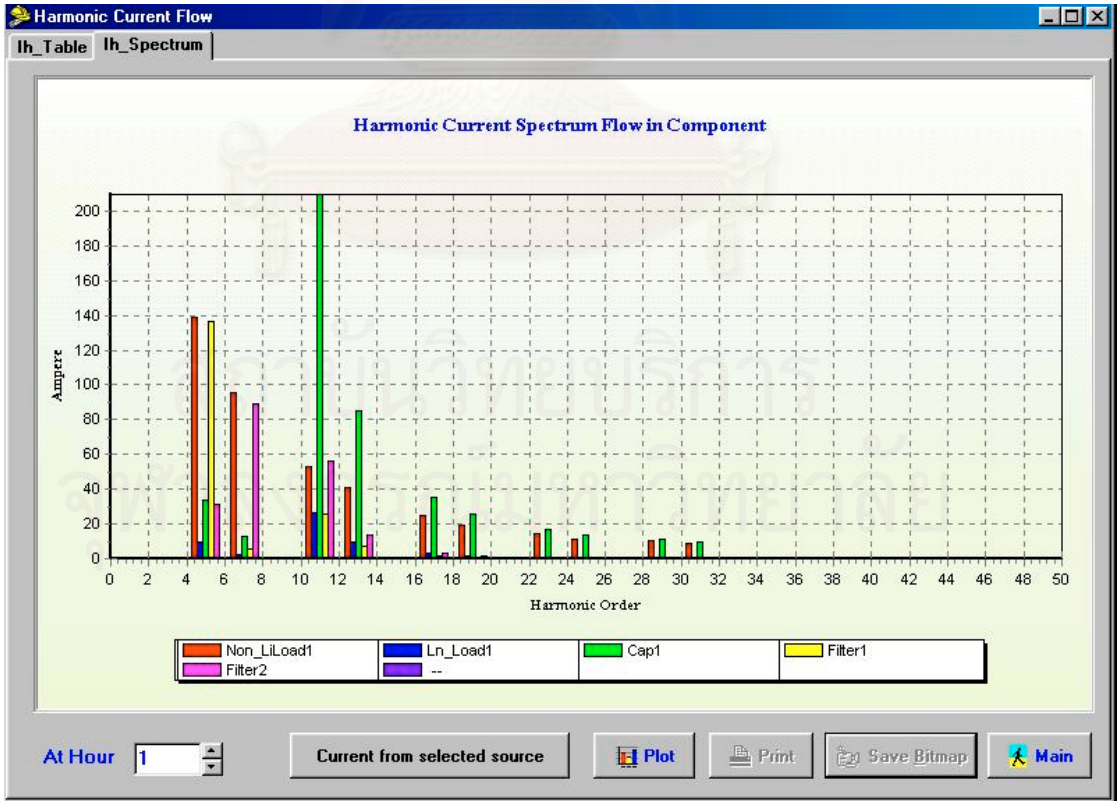


รูปที่ 4.24 การแสดงผลแบบเปรียบเทียบแรงดันฮาร์มอนิกแบบสเปกตรัม

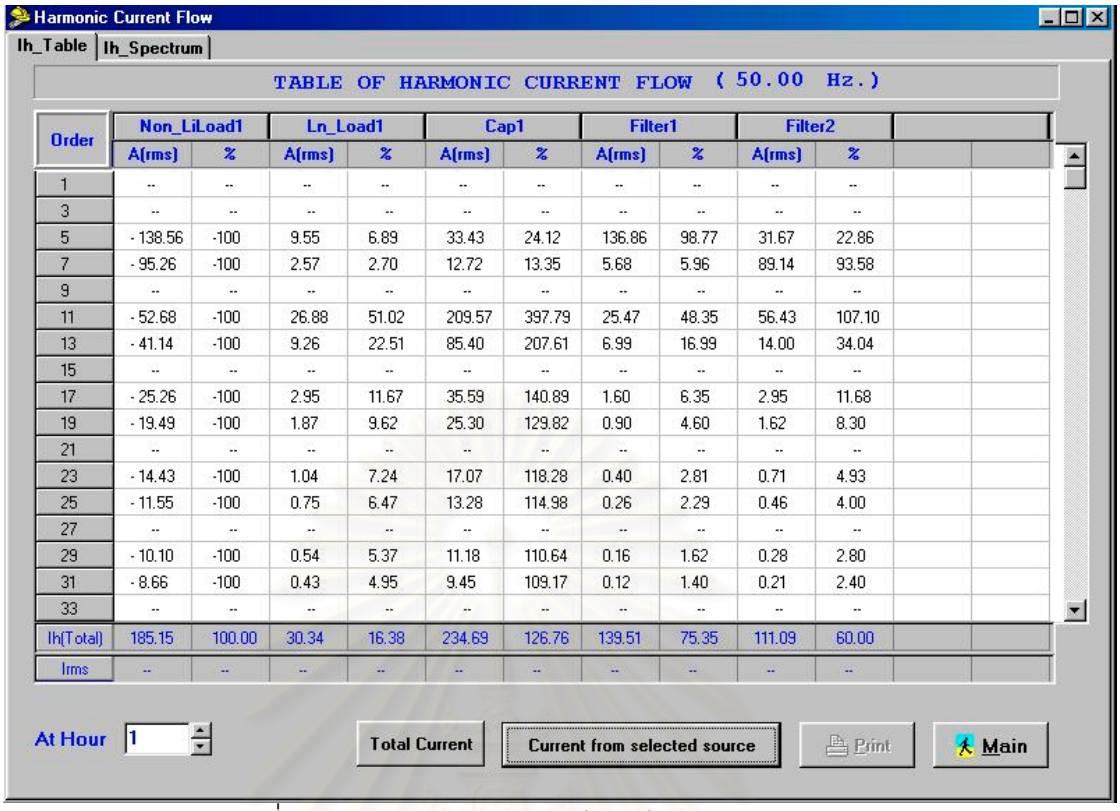


Order	Non_LiLoad1		Ln_Load1		Cap1		Filter1		Filter2	
	A(rms)	%	A(rms)	%	A(rms)	%	A(rms)	%	A(rms)	%
1	721.69	100.00	2,165.10	100.00	1,154.70	100.00	658.20	100.00	513.84	100.00
3	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
5	- 138.56	- 19.20	9.55	0.44	33.43	2.89	136.86	20.79	31.67	6.16
7	- 95.26	- 13.20	2.57	0.12	12.72	1.10	5.68	0.86	89.14	17.35
9	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
11	- 52.68	- 7.30	26.88	1.24	209.57	18.15	25.47	3.87	56.43	10.98
13	- 41.14	- 5.70	9.26	0.43	85.40	7.40	6.99	1.06	14.00	2.73
15	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
17	- 25.26	- 3.50	2.95	0.14	35.59	3.08	1.60	0.24	2.95	0.57
19	- 19.49	- 2.70	1.87	0.09	25.30	2.19	0.90	0.14	1.62	0.31
21	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
23	- 14.43	- 2.00	1.04	0.05	17.07	1.48	0.40	0.06	0.71	0.14
25	- 11.55	- 1.60	0.75	0.03	13.28	1.15	0.26	0.04	0.46	0.09
27	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
29	- 10.10	- 1.40	0.54	0.03	11.18	0.97	0.16	0.02	0.28	0.06
31	- 8.66	- 1.20	0.43	0.02	9.45	0.82	0.12	0.02	0.21	0.04
33	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Ih(Total)	185.15	25.65	30.34	1.40	234.69	20.32	139.51	21.20	111.09	21.62
Irms	745.06	103.24	2,165.32	100.01	1,178.31	102.04	672.82	102.22	525.71	102.31

รูปที่ 4.25 การแสดงผลแบบเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกแบบตาราง

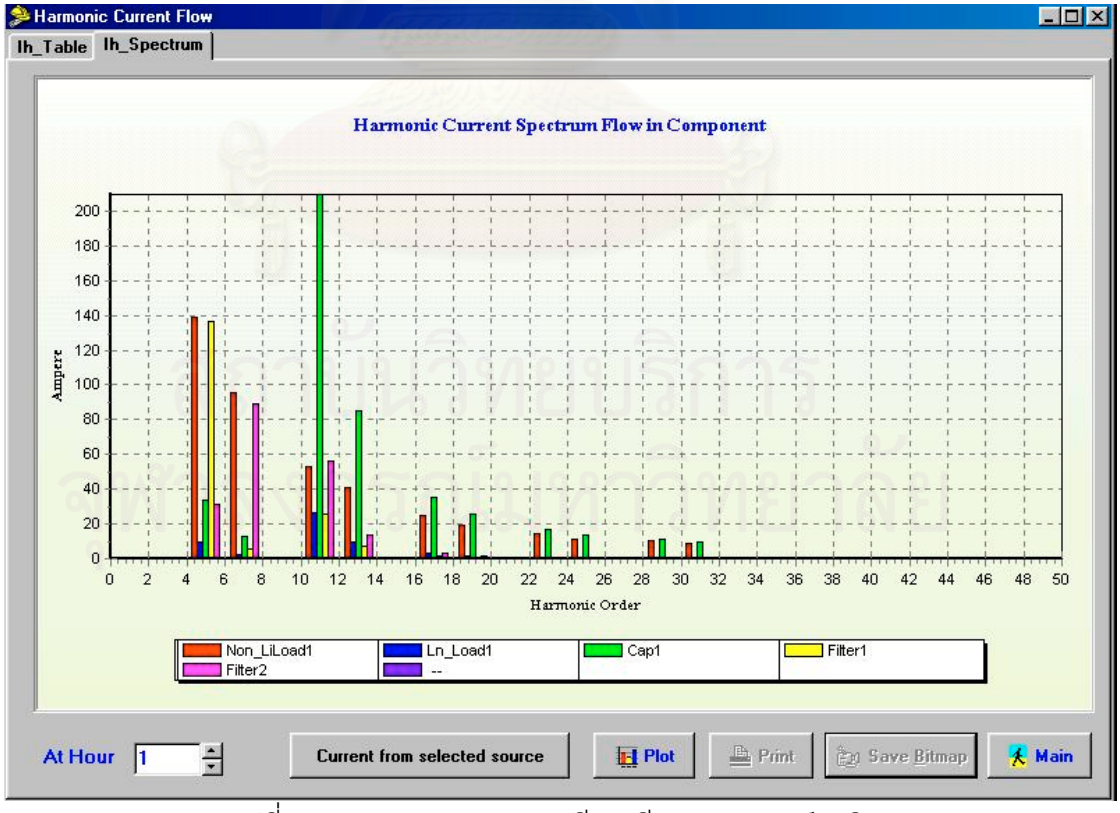


รูปที่ 4.26 การแสดงผลแบบเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกแบบสเปกตรัม



Order	Non_LiLoad1		Ln_Load1		Cap1		Filter1		Filter2	
	A(rms)	%	A(rms)	%	A(rms)	%	A(rms)	%	A(rms)	%
1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
3	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
5	- 138.56	-100	9.55	6.89	33.43	24.12	136.86	98.77	31.67	22.86
7	- 95.26	-100	2.57	2.70	12.72	13.35	5.68	5.96	89.14	93.58
9	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
11	- 52.68	-100	26.88	51.02	209.57	397.79	25.47	48.35	56.43	107.10
13	- 41.14	-100	9.26	22.51	85.40	207.61	6.99	16.99	14.00	34.04
15	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
17	- 25.26	-100	2.95	11.67	35.59	140.89	1.60	6.35	2.95	11.68
19	- 19.49	-100	1.87	9.62	25.30	129.82	0.90	4.60	1.62	8.30
21	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
23	- 14.43	-100	1.04	7.24	17.07	118.28	0.40	2.81	0.71	4.93
25	- 11.55	-100	0.75	6.47	13.28	114.98	0.26	2.29	0.46	4.00
27	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
29	- 10.10	-100	0.54	5.37	11.18	110.64	0.16	1.62	0.28	2.80
31	- 8.66	-100	0.43	4.95	9.45	109.17	0.12	1.40	0.21	2.40
33	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Ih(Total)	185.15	100.00	30.34	16.38	234.69	126.76	139.51	75.35	111.09	60.00
Irms	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

รูปที่ 4.27 การแสดงผลแบบเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิก
เฉพาะที่มาจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่เลือกแบบตาราง



รูปที่ 4.28 การแสดงผลแบบเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิก
เฉพาะที่มาจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่เลือกแบบสเปกตรัม

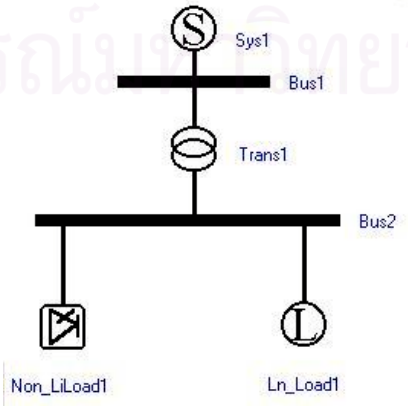
บทที่ 5

ผลของแบบจำลองฮาร์มอนิกต่อการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรมจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในบทที่ 4 จะพบว่าโปรแกรมได้จัดเตรียมให้ผู้ใช้สามารถสร้างไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าโรงงานอุตสาหกรรมได้ตามต้องการ และ ได้จัดเตรียมแบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆไว้ให้ผู้ใช้เลือก แต่แบบจำลองที่ได้จัดเตรียมไว้ได้มาจากหลายแนวความคิด การจะตัดสินว่าแบบจำลองไหนถูกหรือแบบจำลองไหนผิดทำได้ยาก บทนี้จึงทำการศึกษาถึงผลการเลือกแบบจำลองแต่ละแบบต่อการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก เพื่อแสดงถึงความแตกต่างในแต่ละแบบจำลอง แต่ถ้าหากนำไดอะแกรมอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นต่อเป็นไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าโรงงานพร้อมกันแล้วเลือกใช้แบบจำลองแต่ละอุปกรณ์เปลี่ยนไปที่ละแบบจะมีความแตกต่างกันถึง 32 กรณี จึงได้เลือกวิเคราะห์เฉพาะบางกรณีที่สำคัญ

5.1 ผลของแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าต่อการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ได้จัดเตรียมไว้มี 2 แบบจำลองคือ อิมพีแดนซ์ประกอบด้วยความต้านทานอนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ(typical Model) และ อิมพีแดนซ์ประกอบด้วยความต้านทานอนุกรมกับการขนานกันของความต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำ(CIGRE Model) (แสดงในตารางที่ 2.1) การวิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแปลงแบบจำลองจะทำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าเล็กๆ ดังรูปที่ 5.1 เพื่อให้เห็นถึงผลการเปลี่ยนแปลงของแบบจำลองของหม้อแปลงโดยเฉพาะ อุปกรณ์อื่นจะใช้แบบจำลองเดิม



รูปที่ 5.1 ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเมื่อเปลี่ยนแบบจำลองหม้อแปลง

จากรูปที่ 5.1 เป็นไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าของโรงงานที่สร้างขึ้นจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ข้อมูลของอุปกรณ์ทั้งหมดแสดงในตารางที่ 5.1 ข้อมูลของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.2 โดยสมมติให้แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเป็นคอนเวอร์เตอร์

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลเบื้องต้นของอุปกรณ์ไฟฟ้า

System	Transformer rating	Linear load	SPC 6 Pulses
22 kV,50 Hz	22 kV/400 V	Total load	1250 kVA
MVA_{SC} = 500	2.5 MVA	1000 kVA	Power factor
X/R = 10	%Z = 6,Loss 25 kW	Pf=0.8 Lagging	0.8 Lagging

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกจาก คอนเวอร์เตอร์

Harm Order (h)	Mag (%of I_1)	Harm Order (h)	Mag (%of I_1)
5	19.2	19	2.7
7	13.2	23	2.0
11	7.3	25	1.6
13	5.7	29	1.4
17	3.5	31	1.2

การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจากไดอะแกรมที่สร้างขึ้นจะเลือกแบบจำลองของโหลดเชิงเส้นเป็นแบบขนานคงเดิมตลอด แต่จะเปลี่ยนแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าและดูผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3(ก) แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 1 จากการวิเคราะห์เมื่อเปลี่ยนแบบจำลองของหม้อแปลง

Order (h)	Typical Transformer Model (No skin effect)		Typical Transformer Model (with skin effect)		CIGRE Transformer Model	
	kV	%	kV	%	kV	%
1	22.00	100	22.00	100	22.00	100
5	0.053	0.24	0.053	0.24	0.053	0.24
7	0.051	0.23	0.051	0.23	0.051	0.23
11	0.043	0.20	0.043	0.20	0.043	0.20
13	0.040	0.18	0.040	0.18	0.039	0.18

Order (h)	Typical Transformer Model (No skin effect)		Typical Transformer Model (with skin effect)		CIGRE Transformer Model	
	kV	%	kV	%	kV	%
17	0.031	0.14	0.031	0.14	0.031	0.14
19	0.026	0.12	0.026	0.12	0.026	0.12
23	0.023	0.10	0.023	0.10	0.022	0.11
25	0.020	0.09	0.019	0.09	0.019	0.09
29	0.019	0.09	0.019	0.09	0.018	0.09
31	0.017	0.08	0.017	0.08	0.016	0.08
THDv	0.110	0.50	0.1095	0.50	0.1087	0.49
V_{rms}	22.00	100	22.00	100	22.00	100

ตารางที่ 5.3(ข) แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 2 จากการวิเคราะห์เมื่อเปลี่ยนแบบจำลองของหม้อแปลง

Order (h)	Typical Transformer Model (No skin effect)		Typical Transformer Model (with skin effect)		CIGRE Transformer Model	
	V	%	V	%	V	%
1	384.68	100	384.68	100	386.47	100
5	12.46	3.24	12.48	3.25	12.59	3.26
7	11.90	3.09	11.95	3.11	12.02	3.11
11	10.15	2.64	10.21	2.65	10.22	2.64
13	9.26	2.41	9.32	2.42	9.30	2.41
17	7.23	1.88	7.30	1.90	7.22	1.87
19	6.14	1.60	6.20	1.61	6.11	1.58
23	5.33	1.38	5.38	1.40	5.25	1.36
25	4.55	1.18	4.59	1.19	4.47	1.16
29	4.44	1.16	4.49	1.17	4.32	1.12
31	3.99	1.04	4.03	1.05	3.87	1.00
THDv	25.70	6.68	25.84	6.72	25.78	6.67
V_{rms}	385.54	100.22	385.55	100.23	387.33	100.22

ตารางที่ 5.4(ก) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์เมื่อเลือกแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นแบบ typical transformer model และ ไม่คิดผลของความต้านทานทางผิว

Order (h)	Harmonic Source		System(HV)		Transformer(LV)		Linear Load	
	A	%(of I1)	A	%(of I1)	A	%(of I1)	A	%(of I1)
1	1876.1	100	57.94	100	3186.4	100	1500.8	100
5	-360.2	-19.20	-6.38	-11.02	-351.0.	-11.02	39.40	2.63
7	-247.6	-13.20	-4.36	-7.53	-240.0	-7.53	37.50	2.50
11	-136.9	-7.30	-2.37	-4.10	-130.6	-4.10	31.94	2.13
13	-106.9	-5.70	-1.83	-3.17	-100.9	-3.17	29.15	1.94
17	-65.66	-3.50	-1.10	-1.89	-60.37	-1.89	22.80	1.52
19	-50.65	-2.70	-0.83	-1.44	-45.89	-1.44	19.36	1.29
23	-37.52	-2.00	-0.60	-1.03	-32.89	-1.03	16.80	1.12
25	-30.02	-1.60	-0.47	-0.81	-25.89	-0.81	14.35	0.96
29	-26.26	-1.40	-0.40	-0.68	-21.77	-0.68	14.02	0.93
31	-22.51	-1.20	-0.33	-0.57	-18.30	-0.57	12.59	0.84
THDi	481.3	25.65	8.46	14.60	465.09	14.60	81.03	5.40
I_{rms}	1936.8	103.24	58.55	101.06	3220.2	101.06	1503.0	100.15

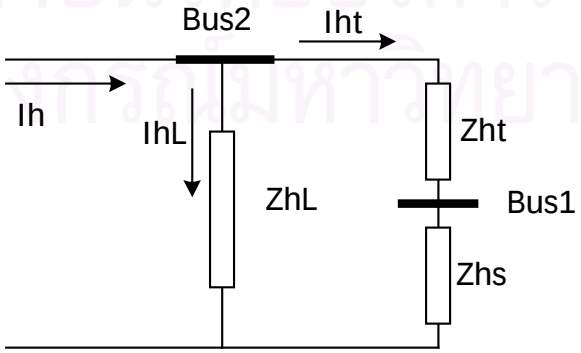
ตารางที่ 5.4(ข) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์เมื่อเลือกแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นแบบ typical transformer model และ คิดผลของความต้านทานทางผิว

Order (h)	Harmonic Source		System(HV)		Transformer(LV)		Linear Load	
	A	%(of I1)	A	%(of I1)	A	%(of I1)	A	%(of I1)
1	1876.1	100	57.94	100	3186.4	100	1500.8	100
5	-360.2	-19.20	-6.36	-10.97	-349.6	-10.97	39.32	2.62
7	-247.6	-13.20	-4.34	-7.49	-238.7	-7.49	37.35	2.49
11	-136.9	-7.30	-2.36	-4.07	-129.6	-4.07	31.75	2.12
13	-106.9	-5.70	-1.82	-3.14	-100.1	-3.14	28.94	1.93
17	-65.66	-3.50	-1.09	-1.88	-59.82	-1.88	22.60	1.51
19	-50.65	-2.70	-0.83	-1.43	-45.45	-1.43	19.19	1.28
23	-37.52	-2.00	-0.59	-1.02	-32.56	-1.02	16.64	1.11
25	-30.02	-1.60	-0.47	-0.80	-25.58	-0.80	14.21	0.95
29	-26.26	-1.40	-0.39	-0.68	-21.55	-0.68	13.88	0.92
31	-22.51	-1.20	-0.33	-0.57	-18.11	-0.57	12.46	0.83
THDi	481.3	25.65	8.41	14.52	462.74	14.52	80.57	5.37
I_{rms}	1936.8	103.24	58.54	101.05	3219.8	101.05	1503.0	100.14

ตารางที่ 5.4(ค) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์เมื่อเลือกแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นแบบ CIGRE transformer Model

Order (h)	Harmonic Source		System(HV)		Transformer(LV)		Linear Load	
	A	%(of I1)	A	%(of I1)	A	%(of I1)	A	%(of I1)
1	1867.4	100	57.62	100	3169.2	100	1493.9	100
5	-358.5	-19.20	-6.36	-11.03	-349.6	-11.03	39.36	2.63
7	-246.5	-13.20	-4.34	-7.53	-238.6	-7.53	37.39	2.50
11	-136.3	-7.30	-2.35	-4.08	-129.2	-4.08	31.68	2.12
13	-106.4	-5.70	-1.81	-3.14	-99.47	-3.14	28.81	1.93
17	-65.36	-3.50	-1.07	-1.87	-59.11	-1.87	22.35	1.50
19	-50.42	-2.70	-0.81	-1.41	-44.76	-1.41	18.90	1.27
23	-37.35	-2.00	-0.58	-1.00	-31.83	-1.00	16.25	1.09
25	-29.88	-1.60	-0.45	-0.79	-24.91	-0.79	13.82	0.92
29	-26.14	-1.40	-0.38	-0.66	-20.83	-0.66	13.38	0.90
31	-22.41	-1.20	-0.32	-0.55	-17.44	-0.55	11.96	0.80
THDi	479.07	25.65	8.40	14.58	462.16	14.58	80.09	5.36
I_{rms}	1927.9	103.24	58.23	101.06	3202.7	101.06	1496.1	100.14

จากการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเมื่อเปลี่ยนแบบจำลองของหม้อแปลงจาก แบบทั่วไปไม่คิดผลของความต้านทานตามผิว(typical transformer model No skin effect) เป็นแบบทั่วไปและคิดผลของความต้านทานตามผิวด้วย(typical transformer model with skin effect) พบว่าความผิดเพี้ยนทางด้านแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 1 ลดลง และ ความผิดเพี้ยนทางด้านแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 2 เพิ่มขึ้น อธิบายได้จากวงจรสมมูลของไดอะแกรมดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 วงจรสมมูลของไดอะแกรมรูปที่ 5.1

จากวงจรสมมูลเมื่อเปลี่ยนแบบจำลองโดยคิดค่าความต้านทานตามผิวด้วยจะทำให้อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเพิ่มขึ้น อิมพีแดนซ์รวมที่บัส 2 จึงเพิ่มขึ้น เมื่อกระแสฮาร์มอนิกเท่าเดิมแต่อิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 2 จึงมากขึ้น ส่วนที่บัส 1 จากกฎการแบ่งไหลของกระแสเมื่ออิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงมากขึ้นกระแสฮาร์มอนิกจึงไหลไปทางโหลดมากขึ้น (Ih_L มากขึ้น) จึงทำให้แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 1 ลดลง

สำหรับการไหลของกระแสฮาร์มอนิกเมื่ออิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเพิ่มขึ้นทำให้กระแสไหลเข้าหม้อแปลงน้อยลงแต่จะไหลผ่านโหลดเชิงเส้นมากขึ้นดังตารางที่ 5.4(ก) และ 5.4(ข)

การวิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแบบจำลองของหม้อแปลงเป็นแบบ CIGRE transformer model จะใช้การพิจารณาในลักษณะเดียวกัน คือ การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง จากตารางที่ 5.3(ก)และ 5.3(ข) พบว่าแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 1 และ บัส 2 ลดลง แสดงว่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเมื่อใช้แบบจำลองแบบ CIGRE load model มีค่าลดลง และส่งผลให้กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านหม้อแปลงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความผิดเพี้ยนทางด้านแรงดันที่บัส 2 ลดลงจึงทำให้กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าโหลดเชิงเส้นลดลงด้วย ดังในตารางที่ 5.6(ค)

5.2 ผลของแบบจำลองของโหลดเชิงเส้นต่อการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

แบบจำลองของโหลดเชิงเส้นที่ได้จัดเตรียมไว้มี 3 แบบ ถ้าคิดผลของความต้านทานตามผิวด้วยจะมีทั้งหมด 5 แบบ แต่เนื่องจากแบบจำลองโหลดเชิงเส้นแบบอนุกรมต้องการข้อมูลโหลดโดยเฉพาะ ดังนั้นจึงจะแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองของโหลดเชิงเส้นแบบขนานทั้งที่คิดความต้านทานตามผิวและไม่คิด(parallel load model) และ แบบจำลองโหลดเชิงเส้นที่เสนอโดย CIGRE (CIGRE load model) การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจะใช้ไดอะแกรมเดิมดังรูปที่ 5.1 และใช้แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบ typical model ไม่คิดผลของความต้านทานตามผิว โดยจะเปลี่ยนแบบจำลองของโหลดเชิงเส้นเป็นดังที่กล่าวมา ผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกแสดงดังตารางที่ 5.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.5(ก) แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 1 ที่ได้จากการวิเคราะห์เมื่อเปลี่ยนแบบจำลองของโหลด

Order (h)	Parallel Load Model (No skin effect)		Parallel Load Model (With skin effect)		CIGRE Load Model	
	kV	%	kV	%	kV	%
1	22.00	100	22.00	100	22.00	100
5	0.053	0.24	0.054	0.24	0.048	0.22
7	0.051	0.23	0.052	0.23	0.045	0.20
11	0.043	0.20	0.045	0.20	0.037	0.17
13	0.040	0.18	0.041	0.19	0.034	0.15
17	0.031	0.14	0.033	0.15	0.026	0.12
19	0.026	0.12	0.029	0.13	0.022	0.10
23	0.023	0.10	0.026	0.12	0.020	0.09
25	0.020	0.09	0.022	0.10	0.017	0.08
29	0.019	0.09	0.023	0.10	0.017	0.08
31	0.017	0.08	0.021	0.09	0.016	0.07
THDv	0.110	0.50	0.113	0.52	0.096	0.44
V_{rms}	22.00	100	22.00	100	22.00	100

ตารางที่ 5.5(ข) แรงดันฮาร์มอนิกที่ที่บัส 2 ที่ได้จากการวิเคราะห์เมื่อเปลี่ยนแบบจำลองของโหลด

Order (h)	Parallel Load Model (No skin effect)		Parallel Load Model (With skin effect)		CIGRE Load Model	
	V	%	V	%	V	%
1	384.68	100	384.68	100	384.68	100
5	12.46	3.24	12.57	3.27	11.26	2.93
7	11.90	3.09	12.09	3.14	10.56	2.75
11	10.15	2.64	10.50	2.73	8.74	2.27
13	9.26	2.41	9.68	2.52	7.91	2.06
17	7.23	1.88	7.77	2.02	6.16	1.60
19	6.14	1.60	6.69	1.74	5.25	1.36
23	5.33	1.38	6.00	1.56	4.62	1.20
25	4.55	1.18	5.21	1.36	3.99	1.04
29	4.44	1.16	5.29	1.37	4.01	1.04
31	3.99	1.04	4.84	1.26	3.66	0.95
THDv	25.70	6.68	26.98	7.01	22.57	5.87
V_{rms}	385.54	100.22	385.63	100.25	385.35	100.17

ตารางที่ 5.6(ก) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์เมื่อเลือกแบบจำลองของโหลดเชิงเส้นเป็นแบบ parallel load model และ ไม่คิดผลของความต้านทานทางผิว

Order (h)	Harmonic Source		System(HV)		Transformer(LV)		Linear Load	
	A	%(of I1)	A	%(of I1)	A	%(of I1)	A	%(of I1)
1	1876.1	100	57.94	100	3186.4	100	1500.8	100
5	-360.2	-19.20	-6.38	-11.02	-351.0.	-11.02	39.40	2.63
7	-247.6	-13.20	-4.36	-7.53	-240.0	-7.53	37.50	2.50
11	-136.9	-7.30	-2.37	-4.10	-130.6	-4.10	31.94	2.13
13	-106.9	-5.70	-1.83	-3.17	-100.9	-3.17	29.15	1.94
17	-65.66	-3.50	-1.10	-1.89	-60.37	-1.89	22.80	1.52
19	-50.65	-2.70	-0.83	-1.44	-45.89	-1.44	19.36	1.29
23	-37.52	-2.00	-0.60	-1.03	-32.89	-1.03	16.80	1.12
25	-30.02	-1.60	-0.47	-0.81	-25.89	-0.81	14.35	0.96
29	-26.26	-1.40	-0.40	-0.68	-21.77	-0.68	14.02	0.93
31	-22.51	-1.20	-0.33	-0.57	-18.30	-0.57	12.59	0.84
THDi	481.3	25.65	8.46	14.60	465.09	14.60	81.03	5.40
I_{rms}	1936.8	103.24	58.55	101.06	3220.2	101.06	1503.0	100.15

ตารางที่ 5.6(ข) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์เมื่อเลือกแบบจำลองของโหลดเชิงเส้นเป็นแบบ parallel load model และ คิดผลของความต้านทานทางผิว

Order (h)	Harmonic Source		System(HV)		Transformer(LV)		Linear Load	
	A	%(of I1)	A	%(of I1)	A	%(of I1)	A	%(of I1)
1	1876.1	100	57.94	100	3186.4	100	1500.8	100
5	-360.2	-19.20	-6.42	-11.09	-353.3	-11.09	18.50	1.23
7	-247.6	-13.20	-4.42	-7.62	-242.9	-7.62	14.82	0.99
11	-136.9	-7.30	-2.44	-4.21	-134.2	-4.21	10.13	0.67
13	-106.9	-5.70	-1.90	-3.29	-104.8	-3.29	8.56	0.57
17	-65.66	-3.50	-1.17	-2.02	-64.27	-2.02	5.98	0.40
19	-50.65	-2.70	-0.90	-1.56	-49.27	-1.56	4.86	0.32
23	-37.52	-2.00	-0.67	-1.15	-36.68	-1.15	3.95	0.26
25	-30.02	-1.60	-0.53	-0.92	-29.33	-0.92	3.29	0.22
29	-26.26	-1.40	-0.47	-0.80	-25.64	-0.80	3.09	0.21
31	-22.51	-1.20	-0.40	-0.69	-21.97	-0.69	2.74	0.18
THDi	481.3	25.65	8.58	14.81	471.96	14.81	29.00	1.93
I_{rms}	1936.8	103.24	58.57	101.09	3221.2	101.09	15.01.1	100.02

ตารางที่ 5.6(ค) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์เมื่อเลือกแบบจำลองของโหลดเชิงเส้นเป็นแบบ CIGRE Load Model

Order (h)	Harmonic Source		System(HV)		Transformer(LV)		Linear Load	
	A	%(of I1)	A	%(of I1)	A	%(of I1)	A	%(of I1)
1	1876.1	100	57.94	100	3186.4	100	1500.8	100
5	-360.2	-19.20	-5.76	-9.93	-316.6	-9.93	51.75	3.45
7	-247.6	-13.20	-3.86	-6.66	-212.2	-6.66	42.53	2.83
11	-136.9	-7.30	-2.03	-3.51	-111.8	-3.51	29.14	1.94
13	-106.9	-5.70	-1.56	-2.68	-85.55	-2.68	24.23	1.61
17	-65.66	-3.50	-0.93	-1.60	-50.94	-1.60	16.12	1.07
19	-50.65	-2.70	-0.71	-1.22	-38.84	-1.22	12.76	0.85
23	-37.52	-2.00	-0.51	-0.89	-28.28	-0.89	9.79	0.65
25	-30.02	-1.60	-0.41	-0.71	-22.47	-0.71	7.93	0.53
29	-26.26	-1.40	-0.35	-0.61	-19.47	-0.61	7.07	0.47
31	-22.51	-1.20	-0.30	-0.52	-16.62	-0.52	6.10	0.41
THDi	481.3	25.65	7.52	12.98	413.66	12.98	81.19	5.41
I_{rms}	1936.8	103.24	58.42	100.84	3213.2	100.84	1503.0	100.15

จากการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเมื่อเปลี่ยนแบบจำลองของโหลดจาก โหลดแบบขนานไม่คิดผลของความต้านทานตามผิว เป็นโหลดแบบขนานและคิดผลของความต้านทานตามผิวด้วย พบว่าความผิดเพี้ยนทางด้านแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 1 และ บัส 2 เพิ่มขึ้น อธิบายได้จากวงจรสมมูลของไดอะแกรมดังรูปที่ 5.2

จากวงจรสมมูลเมื่อเปลี่ยนแบบจำลองโดยคิดค่าความต้านทานตามผิวด้วยจะทำให้อิมพีแดนซ์ของโหลดเชิงเส้นเพิ่มขึ้น อิมพีแดนซ์รวมที่บัส 2 จึงเพิ่มขึ้น เมื่อกระแสฮาร์มอนิกเท่าเดิมแต่อิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 2 จึงมากขึ้น ส่วนที่บัส 1 จากกฎการแบ่งไหลของกระแสเมื่ออิมพีแดนซ์ของโหลดเชิงเส้นมากขึ้นกระแสฮาร์มอนิกจึงไหลไปทางแหล่งจ่ายมากขึ้น (Ih_t มากขึ้น) จึงทำให้แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 1 เพิ่มขึ้น

สำหรับการไหลของกระแสฮาร์มอนิกเมื่ออิมพีแดนซ์ของโหลดเชิงเส้นเพิ่มขึ้นทำให้กระแสไหลเข้าโหลดเชิงเส้นน้อยลงแต่จะไหลผ่านหม้อแปลงและแหล่งจ่ายไฟมากขึ้นดังตารางที่ 5.6(ก) และ 5.6(ข)

การวิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแบบจำลองของโหลดเชิงเส้นเป็นแบบ CIGRE load model จะใช้การพิจารณาในลักษณะเดียวกัน คือ การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอิมพีแดนซ์ของโหลด

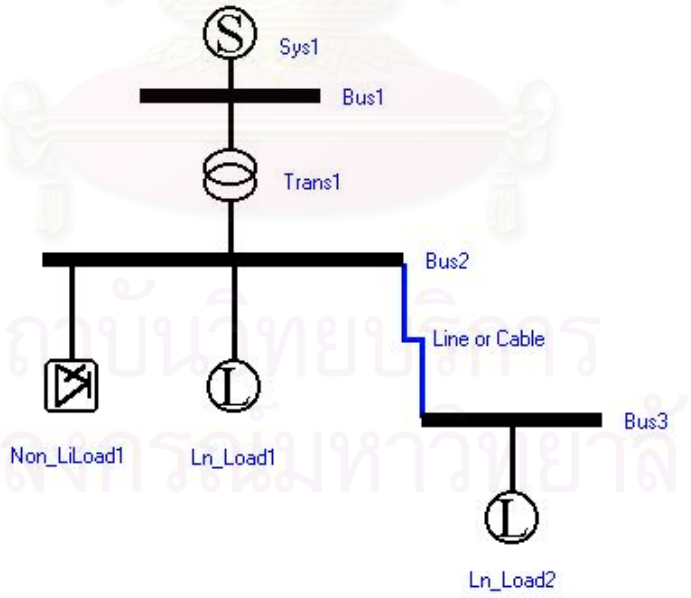
เชิงเส้น จากตารางที่ 5.5(ก)และ 5.5(ข) พบว่าแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 1 และ บัส 2 ลดลง แสดงว่าอิมพีแดนซ์ของโหลดเชิงเส้นเมื่อใช้แบบจำลองแบบ CIGRE load model มีค่าลดลง และ ส่งผลให้กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านโหลดเชิงเส้นมีค่าเพิ่มขึ้น ดังในตารางที่ 5.6(ค)

จากผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเมื่อใช้แบบจำลองของโหลดเชิงเส้นแบบ CIGRE load model ตรงกับเอกสารอ้างอิงที่ 1 ที่กล่าวว่า แบบจำลอง CIGRE load model เหมาะที่จะใช้วิเคราะห์ ฮาร์มอนิกในช่วงลำดับที่ 5-20

5.3 ผลของแบบจำลองของสายส่งย่อยหรือสายเคเบิลต่อการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

แบบจำลองของสายส่งย่อยหรือสายเคเบิลที่ได้จัดเตรียมไว้มี 2 แบบ แต่ถ้าคิดผลของความต้านทานตามผิวด้วยจะมีทั้งหมด 4 แบบ จะแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองสายส่งย่อยหรือสายเคเบิลทั้ง 4 แบบคือ แบบอนุกรมทั้งที่คิดความต้านทานตามผิวและไม่คิด(series model) และ แบบ pi model ทั้งที่คิดความต้านทานตามผิวและไม่คิด การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจะใช้ไดอะแกรมดังรูปที่ 5.3 และใช้แบบจำลองของอุปกรณ์อื่นคงที่ โดยจะเปลี่ยนแบบจำลองของสายส่งย่อยหรือสายเคเบิลทั้งที่คิดความต้านทานตามผิวและไม่คิดดังที่กล่าวมา

ระบบไฟฟ้าที่จะใช้ทำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก จะสร้างไดอะแกรมเพิ่มเติมจากไดอะแกรมในรูปที่ 5.1 ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเมื่อเปลี่ยนแบบสายส่งย่อยหรือสายเคเบิล

ตารางที่ 5.7(ก) ข้อมูลเบื้องต้นของอุปกรณ์ไฟฟ้า

System	Transformer rating	Linear load #1	SPC 6 Pulses
22 kV,50 Hz	22 kV/400 V	Total load	1250 kVA
MVA_{SC} = 500	3.5 MVA	1000 kVA	Power factor
X/R = 10	%Z = 6,Loss 50 kW	Pf=0.8 Lagging	0.8 Lagging

ตารางที่ 5.7(ข) ข้อมูลเบื้องต้นของสาย

Line or Cable	Linear load # 2
R 0.001 Ohm/km X_L 0.002 Ohm/km	Total load 800 kVA
X_C 0.005 MOhm*km Length 0.2 km	Pf=0.8 Lagging

ข้อมูลของอุปกรณ์ไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ 5.7(ก) และ 5.7(ข) ผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกแสดงดังตารางที่ 5.8-5.9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.8(ก) แรงดันฮาร์มอนิกที่ที่บัส 1 ได้จากการวิเคราะห์เมื่อเปลี่ยนแบบจำลองของสายส่งย่อยหรือสายเคเบิล

Order (h)	Series Line Model (No skin effect)		Series Line Model (With skin effect)		Series Cable Model (No skin effect)		Series Cable Model (With skin effect)	
	kV	%(of V1)	kV	%(of V1)	kV	%(of V1)	kV	%(of V1)
1	22	100	22	100	22	100	22	100
5	0.053	0.24	0.053	0.24	0.053	0.24	0.053	0.24
7	0.050	0.23	0.050	0.23	0.050	0.23	0.050	0.23
11	0.042	0.19	0.042	0.19	0.042	0.19	0.042	0.19
13	0.038	0.17	0.038	0.17	0.038	0.17	0.038	0.17
17	0.029	0.13	0.029	0.13	0.029	0.13	0.029	0.13
19	0.025	0.11	0.025	0.11	0.025	0.11	0.025	0.11
23	0.021	0.10	0.021	0.10	0.021	0.10	0.021	0.10
25	0.018	0.08	0.018	0.08	0.018	0.08	0.018	0.08
29	0.017	0.08	0.017	0.08	0.017	0.08	0.017	0.08
31	0.015	0.07	0.015	0.07	0.015	0.07	0.015	0.07
THDv	0.1061	0.48	0.1061	0.48	0.1061	0.48	0.1062	0.48
V_{rms}	22	100	22	100	22	100	22	100

ตารางที่ 5.8(ข) แรงดันฮาร์มอนิกที่ที่บัส 2 ได้จากการวิเคราะห์เมื่อเปลี่ยนแบบจำลองของสายส่งย่อยหรือสายเคเบิล

Order (h)	Series Line Model (No skin effect)		Series Line Model (With skin effect)		Series Cable Model (No skin effect)		Series Cable Model (With skin effect)	
	V	%(of V1)	V	%(of V1)	V	%(of V1)	V	%(of V1)
1	384.27	100	384.27	100	384.27	100	384.30	100
5	8.96	2.33	8.97	2.33	8.97	2.33	8.97	2.33
7	8.53	2.22	8.53	2.22	8.53	2.22	8.54	2.22
11	7.19	1.87	7.19	1.87	7.19	1.87	7.20	1.87
13	6.51	1.69	6.51	1.69	6.51	1.69	6.52	1.70
17	5.00	1.30	5.00	1.30	5.00	1.30	5.01	1.30
19	4.20	1.09	4.20	1.09	4.20	1.09	4.21	1.10
23	3.57	0.93	3.57	0.93	3.57	0.93	3.58	0.93
25	3.02	0.79	3.02	0.79	3.02	0.79	3.03	0.79
29	2.89	0.75	2.89	0.75	2.89	0.75	2.91	0.76
31	2.57	0.67	2.57	0.67	2.57	0.67	2.59	0.67
THDv	18.08	4.70	18.08	4.71	18.08	4.70	18.10	4.71
V_{rms}	384.69	100.11	384.69	100.11	384.69	100.11	384.73	100.11

ตารางที่ 5.8(ค) แรงดันฮาร์มอนิกที่ที่บัส 3 ได้จากการวิเคราะห์เมื่อเปลี่ยนแบบจำลองของสายส่งย่อยหรือสายเคเบิล

Order (h)	Series Line Model (No skin effect)		Series Line Model (With skin effect)		Series Cable Model (No skin effect)		Series Cable Model (With skin effect)	
	V	%(of V1)	V	%(of V1)	V	%(of V1)	V	%(of V1)
1	382.81	100	382.81	100	382.81	100	382.81	100
5	8.93	2.33	8.92	2.33	8.92	2.33	8.80	2.31
7	8.49	2.22	8.48	2.22	8.49	2.22	8.35	2.19
11	7.15	1.87	7.14	1.87	7.15	1.87	7.01	1.84
13	6.47	1.69	6.46	1.69	6.47	1.69	6.33	1.66
17	4.96	1.30	4.95	1.30	4.96	1.30	4.84	1.27
19	4.17	1.09	4.16	1.09	4.17	1.09	4.06	1.07
23	3.54	0.92	3.53	0.92	3.54	0.92	3.44	0.92
25	2.99	0.78	2.98	0.78	2.99	0.78	2.91	0.76
29	2.86	0.75	2.85	0.75	2.86	0.75	2.77	0.73
31	2.54	0.66	2.53	0.66	2.54	0.66	2.56	0.65
THDv	17.97	4.69	17.94	4.69	17.97	4.70	17.62	4.60
V_{rms}	383.23	100.11	383.23	100.11	383.23	100.11	382.97	100.11

ตารางที่ 5.9(ก) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์เมื่อเลือกแบบจำลองของสายส่งย่อยหรือสายเคเบิลเป็นแบบอนุกรม ไม่คิดความต้านทานตามผิว

Order (h)	Harmonic Source	System(HV)	Transformer(LV)	Linear Load # 1	Linear Load # 2	Line or Cable
	A	A	A	A	A	A
1	1878.05	78.83	4335.7	1502.4	1206.55	1206.55
5	-360.59	-6.30	-346.73	28.36	22.76	22.76
7	-247.91	-4.29	-235.88	26.85	21.54	21.54
11	-137.10	-2.30	-126.55	.22.55	18.08	18.08
13	-107.05	-1.76	-96.94	20.40	16.35	16.35
17	-65.73	-1.03	-56.91	15.65	12.53	12.53
19	-50.71	-0.78	-42.81	13.16	10.53	10.53
23	-37.56	-0.55	-30.05	11.18	8.93	8.93
25	-30.05	-0.42	-23.37	9.45	7.54	7.54
29	-26.29	-0.35	-19.30	9.05	7.20	7.20
31	-22.54	-0.29	-16.06	8.05	6.40	6.40
THDi	481.82	8.30	456.53	56.82	45.53	45.53
I_{rms}	1938.91	79.27	4359.72	1503.55	1207.41	1207.41

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.9(ข) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์เมื่อเลือกแบบจำลองของสายส่งย่อยหรือสายเคเบิลเป็นแบบอนุกรม คิดความต้านทานตามผิวด้วย

Order (h)	Harmonic Source	System(HV)	Transformer(LV)	Linear Load # 1	Linear Load # 2	Line or Cable
	A	A	A	A	A	A
1	1878.05	78.83	4335.7	1502.4	1206.55	1206.55
5	-360.59	-6.30	-346.74	28.36	22.73	22.73
7	-247.91	-4.29	-235.89	26.85	21.51	21.51
11	-137.10	-2.30	-126.57	.22.55	18.05	18.05
13	-107.05	-1.76	-96.96	20.40	16.32	16.32
17	-65.73	-1.04	-56.93	15.65	12.50	12.50
19	-50.71	-0.78	-42.83	13.16	10.50	10.50
23	-37.56	-0.55	-30.07	11.18	8.90	8.90
25	-30.05	-0.43	-23.39	9.45	7.52	7.52
29	-26.29	-0.35	-19.31	9.05	7.18	7.18
31	-22.54	-0.29	-16.08	8.06	6.38	6.38
THDi	481.82	8.30	456.57	56.83	45.46	45.46
I_{rms}	1938.91	79.27	4359.72	1503.55	1207.41	1207.41

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.9(ค) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์เมื่อเลือกแบบจำลองของสายส่งย่อยหรือสายเคเบิลเป็นแบบ pi model ไม่คิดความต้านทานตามผิว

Order (h)	Harmonic Source	System(HV)	Transformer(LV)	Linear Load # 1	Linear Load # 2	Line or Cable
	A	A	A	A	A	A
1	1878.05	78.83	4335.7	1502.4	1206.55	1206.55
5	-360.59	-6.30	-346.73	28.36	22.76	22.76
7	-247.91	-4.29	-235.88	26.85	21.54	21.54
11	-137.10	-2.30	-126.56	.22.55	18.08	18.08
13	-107.05	-1.76	-96.94	20.40	16.35	16.35
17	-65.73	-1.03	-56.91	15.65	12.53	12.53
19	-50.71	-0.78	-42.82	13.16	10.53	10.53
23	-37.56	-0.55	-30.06	11.18	8.93	8.93
25	-30.05	-0.42	-23.37	9.45	7.54	7.54
29	-26.29	-0.35	-19.30	9.05	7.21	7.21
31	-22.54	-0.29	-16.06	8.06	6.40	6.40
THDi	481.82	8.30	456.54	56.82	45.54	45.54
I_{rms}	1938.91	79.27	4359.72	1503.55	1207.41	1207.41

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.9(ง) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์เมื่อเลือกแบบจำลองของสายส่งย่อยหรือสายเคเบิลเป็นแบบ pi model คิดความต้านทานตามผิว

Order (h)	Harmonic Source	System(HV)	Transformer(LV)	Linear Load # 1	Linear Load # 2	Line or Cable
	A	A	A	A	A	A
1	1878.05	78.98	4335.7	1502.3	1206.55	1206.55
5	-360.59	-6.30	-346.77	28.35	22.69	22.69
7	-247.91	-4.29	-235.94	26.85	21.43	21.43
11	-137.10	-2.30	-126.64	.22.56	17.92	17.92
13	-107.05	-1.76	-97.04	20.42	16.18	16.18
17	-65.73	-1.04	-57.02	15.68	12.37	12.37
19	-50.71	-0.78	-42.82	13.18	10.38	10.38
23	-37.56	-0.55	-30.16	11.21	8.79	8.79
25	-30.05	-0.43	-23.47	9.48	7.42	7.42
29	-26.29	-0.35	-19.40	9.09	7.08	7.08
31	-22.54	-0.29	-16.16	8.09	6.29	6.29
THDi	481.82	8.30	456.68	56.87	45.16	45.16
I_{rms}	1938.91	79.41	4347.73	1503.45	1208.86	1208.86

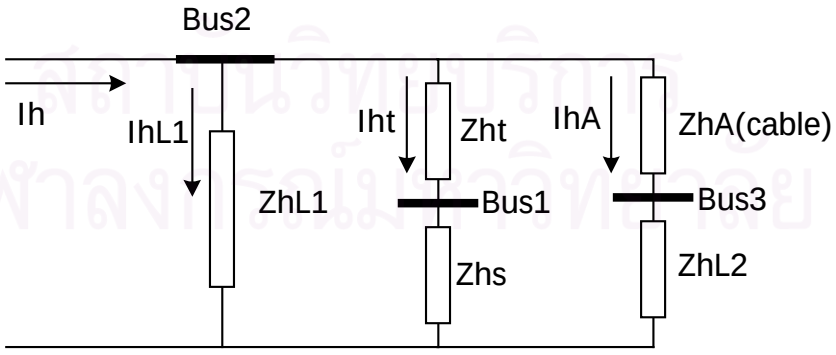
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.10 ความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมที่บัสต่างๆ เมื่อเปลี่ยนแบบจำลองของสายส่งย่อยหรือสายเคเบิล

Line or Cable model	THD_V					
	Bus 1		Bus 2		Bus 3	
	V	%(of V1)	V	%(of V1)	V	%(of V1)
Series No Skin effect	106.1	0.48	18.08	4.70	17.97	4.69
Series with Skin effect	106.1	0.48	18.09	4.71	17.94	4.69
Pi model No Skin effect	106.1	0.48	18.08	4.70	17.97	4.70
Pi model with Skin effect	106.2	0.48	18.10	4.71	17.62	4.60

ตารางที่ 5.11 ความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมที่อุปกรณ์ต่างๆ เมื่อเปลี่ยนแบบจำลองของสายส่งย่อยหรือสายเคเบิล

Line or Cable model	THD_I					
	Harm Source	System	Trans	Load 1	Load 2	Cable
	A	A	A	A	A	A
Series No Skin effect	481.82	8.30	456.53	56.82	45.53	45.53
Series with Skin effect	481.82	8.30	456.57	56.83	45.46	45.46
Pi model No Skin effect	481.82	8.30	456.54	56.82	45.54	45.54
Pi model with Skin effect	481.82	8.30	456.68	56.87	45.16	45.16



รูปที่ 5.4 วงจรสมมูลของไดอะแกรม รูปที่ 5.3

จากผลของการเปลี่ยนแปลงแบบจำลองของสายส่งย่อยหรือสายเคเบิลต่อการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกพบว่าการเปลี่ยนแบบจำลองไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกมากนัก อาจเป็นเพราะสายสั้นเกินไปทำให้อิมพีแดนซ์ของสายมีค่าน้อย จึงส่งผลกระทบต่อระบบรวมน้อย แต่อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ทำให้เห็นแนวโน้มของผลการเปลี่ยนแบบจำลองของสายส่งหรือสายเคเบิลในวงจรสมมูลรูปที่ 5.4 พบว่าถ้าอิมพีแดนซ์ของสายส่งย่อยหรือสายเคเบิลมีค่าเพิ่มขึ้นความผิดเพี้ยนทางด้านแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 1 และที่บัส 2 จะเพิ่มขึ้น แต่ที่บัส 3 จะลดลง ส่งผลให้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่อที่บัส 1 และ ที่บัส 2 จะมีความผิดเพี้ยนทางด้านกระแสมากขึ้นและอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่อที่บัส 3 จะมีความผิดเพี้ยนทางด้านกระแสลดลง

ดังนั้น จากตารางความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม(ตารางที่ 5.10) และ ตารางความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม(ตารางที่ 5.11) จะสรุปความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งย่อยหรือสายเคเบิลจากแบบจำลองที่ต่างกัน ได้ตามลำดับจากค่าอิมพีแดนซ์น้อยไปมาก คือ

1. แบบจำลองแบบอนุกรม ไม่คิดค่าความต้านทานตามผิว(Series model, No skin effect) และ แบบจำลองแบบ pi model ไม่คิดค่าความต้านทานตามผิว(pi model, No skin effect)
2. แบบจำลองแบบอนุกรม คิดค่าความต้านทานตามผิว(Series model, With skin effect)
3. แบบจำลองแบบ pi model คิดค่าความต้านทานตามผิว(pi model, With skin effect)

การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจะคิดผลของความต้านทานตามผิวของสายหรือไม่นั้นต้องพิจารณาหลายองค์ประกอบ เช่น ชนิดของสายว่าเป็นสายส่งย่อย สายเคเบิลหรือสายเคเบิลใต้ดิน ขนาดพื้นที่หน้าตัดของสาย เป็นต้น แต่มีผู้เสนอไว้ว่าควรจะคิดความต้านทานตามผิวที่ความถี่ฮาร์มนิกลำดับที่ 25 ขึ้นไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

มาตรฐานฮาร์มอนิก

การผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกถ้าเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าอาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานผิดพลาดหรือถ้ามีปริมาณฮาร์มอนิกมากจะทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหายได้ เพราะอุปกรณ์ไฟฟ้ารับกระแสหรือแรงดันเกินพิกัด โดยเฉพาะกรณีเกิดสภาวะเรโซแนนซ์จะมีความเสียหายรุนแรงมาก ปัญหาทางด้านฮาร์มอนิกมีมากขึ้นเพราะมีการใช้อุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกมากขึ้น จึงมีการออกข้อกำหนดทางด้านฮาร์มอนิกเพื่อจำกัดปริมาณฮาร์มอนิกที่ผู้ใช้ไฟฟ้าปล่อยเข้ามาในระบบไฟฟ้าและมีการพัฒนาข้อกำหนดเรื่อยมาจนกลายเป็นมาตรฐานที่ใช้ในหลายประเทศ เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกาประกาศใช้มาตรฐาน IEEE Std.519 ตั้งแต่ปี 1981 และมีการพัฒนาเรื่อยมา ฉบับที่ใช้ปัจจุบันคือ IEEE Std.519-1992 ประเทศอังกฤษ ประกาศใช้มาตรฐาน G.5/3-1976 ในปี 1976 ฉบับปัจจุบันมีการปรับปรุง เป็น G.5/4-2001 สำหรับประเทศไทย คณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยผู้แทนจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ) การไฟฟ้านครหลวง (กฟน) และ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ) ได้ร่วมกันจัดทำ ข้อกำหนดกฎเกณฑ์เกี่ยวกับฮาร์มอนิกและแรงดันกระเพื่อม สำหรับธุรกิจอุตสาหกรรมและบ้านอยู่อาศัย โดยอ้างอิงจากมาตรฐานสากล เช่น มาตรฐาน IEC มาตรฐานของประเทศอังกฤษ (G.5/3) และ มาตรฐานของประเทศออสเตรเลีย (SECWA)

มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิก จะกำหนดค่าจำกัดของฮาร์มอนิกไว้เป็น 2 ลักษณะ คือ ค่าจำกัดแรงดันฮาร์มอนิก และค่าจำกัดกระแสฮาร์มอนิก มาตรฐานที่สำคัญมีดังนี้

มาตรฐาน	*ค่าจำกัดแรงดันฮาร์มอนิก*	*ค่าจำกัดกระแสฮาร์มอนิก*
IEEE 519 – 1992	กำหนด	กำหนด
IEC 61000-2-2 – 1990	กำหนด	ไม่กำหนด
IEC 61000-2-4 – 1994	กำหนด	ไม่กำหนด
IEC 61000-3-6 - 1996	กำหนด	ไม่กำหนด
G 5/4 – 2001	กำหนด	กำหนด
EN 50160 – 1994	กำหนด	ไม่กำหนด
ข้อกำหนดประเทศไทย	กำหนด	กำหนด

6.1 มาตรฐาน IEEE Std 519-1992

มาตรฐานฉบับนี้เป็นมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา ประกาศใช้ตั้งแต่ปี 1981 และมีการปรับปรุงเรื่อยมา มีชื่อเต็มว่า IEEE Recommended Practices and Requirement for Harmonic Control in Electricity Supply System และ มีบางประเทศนำไปประยุกต์ใช้เป็นมาตรฐานของประเทศตัวเองด้วย

รายละเอียดของมาตรฐานในส่วนของค่าจำกัดระดับความผิดเพี้ยนของกระแสหรือแรงดันฮาร์มอนิกนั้น จะทำการประเมินที่จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling: PCC) โดยแบ่งแนวปฏิบัติออกเป็น 2 แนว คือ

6.1.1 แนวปฏิบัติสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้า

ผู้ใช้ไฟฟ้าที่รับไฟจากการไฟฟ้าจะต้องไม่ปล่อยฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบมากกว่าขีดจำกัดของมาตรฐานที่กำหนด โดยใช้ดัชนีวัดความผิดเพี้ยน 2 ตัว คือ ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม(Total Demand Distortion : TDD) และ กระแสฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับ (Individual Harmonic Current Distortion : Ih) ค่าจำกัดจะจำแนกตามระดับแรงดันที่จุดต่อร่วม และ ขนาดของกระแสลัดวงจร(I_{SC})ต่อกระแสในช่วงที่มีความต้องการสูงสุด(I_L) แสดงดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ค่าจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกตาม IEEE Std.519-1992

$V_n \leq 69$ kV						
I_{SC}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
$69\text{ kV} < V_n \leq 161\text{ kV}$						
< 20*	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	1.25	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

$V_n > 161$ kV						
I_{SC}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≤ 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0

ความหมายและข้อมูลเพิ่มเติมจากตารางที่ 6.1

1) อุปกรณ์ที่เป็นต้นกำเนิดกำลังไฟฟ้าจะถูกจำกัดค่ากระแสฮาร์มอนิกให้เป็นไปตามตารางที่ 6.1 โดยไม่คำนึงถึงค่า I_{SC}/I_L
2) I_{SC} คือ ค่ากระแสลัดวงจรที่จุดต่อร่วม
3) I_L คือ กระแสที่ทั้งโรงงานใช้ในช่วงที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดเฉลี่ยในช่วง 15 หรือ 30 นาที แต่ถ้าข้อมูลไม่เพียงพอจะคำนวณได้จาก ค่าเฉลี่ยของกระแสย้อนหลังในรอบ 1 ปี แต่ถ้าเป็นผู้ขอใช้ไฟฟ้ารายใหม่ จะประมาณได้จากการทำนายลักษณะโหลดล่วงหน้า
4) ค่าในตารางที่ 6.1 เป็นค่าจำกัดของฮาร์มอนิกที่เป็นลำดับคี่ จะหาค่าจำกัดของลำดับคู่ได้โดยคิดเป็น ร้อยละ 25 ของลำดับคี่ที่ติดกันและมากกว่าลำดับคู่นั้น เช่น ค่าจำกัดของฮาร์มอนิกลำดับที่ 6 จะมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 25 ของค่าจำกัดของฮาร์มอนิกลำดับที่ 7
5) ฮาร์มอนิกที่ไม่ใช่ฮาร์มอนิกเฉพาะตัว (Non-Characteristic Harmonic) ให้มีค่าน้อยกว่า ร้อยละ 25 ของค่าจำกัดในตารางที่ 6.1
6) ถ้าโหลดที่ เป็นต้นกำเนิดฮาร์มอนิกประกอบด้วย คอนเวอร์เตอร์ที่มีจำนวนพัลส์ (q) มากกว่า 6 พัลส์ ค่าจำกัดในตารางให้เพิ่มขึ้นด้วยตัวประกอบการคูณ $\sqrt{q/6}$ เช่น ถ้าแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเป็น คอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์ (q = 12) ค่าจำกัดของฮาร์มอนิกเฉพาะตัวในตารางที่ 6.1 จะเพิ่มขึ้นด้วยตัวคูณ $\sqrt{2}$
7) กระแสผิดเพี้ยน ต้องไม่มีผลของส่วนประกอบไฟตรง (DC offset)
8) นิยามของ TDD $= \dfrac{\sqrt{\sum_{2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\%$ (6.1)

จากตารางค่าจำกัดกระแสฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 พบว่าจะยอมให้ผู้ใช้ไฟฟ้าปล่อยกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบได้มากหรือน้อยขึ้นกับแรงดันของระบบไฟฟ้าและขนาดของกระแสโหลด เช่น ถ้าผู้ใช้ไฟฟ้ามีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับระบบจะยอมให้มีค่าจำกัดได้สูงกว่า(คิดเป็นร้อยละ)ผู้ใช้ไฟขนาดใหญ่เมื่ออยู่ที่ระบบเดียวกัน

6.1.2 แนวปฏิบัติสำหรับการไฟฟ้า

การไฟฟ้าจะกำหนดค่าจำกัดของแรงดันฮาร์มอนิก เพื่อกำหนดคุณภาพของกำลังไฟฟ้า โดยกำหนดความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วม (PCC) และใช้ดัชนีชี้วัด 2 ตัว คือ แรงดันฮาร์มอนิกผิดเพี้ยนรวม (Total harmonic distortion : THDv) และ แรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ (Individual harmonic voltage : Vh) การไฟฟ้าจะพยายามรักษาระดับแรงดันผิดเพี้ยนที่จุดต่อร่วมด้วยการจำกัดค่ากระแสฮาร์มอนิกจากผู้ใช้ไฟฟ้า (ดังตารางที่ 6.1) และค่าจำกัดของแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมจะแบ่งตามระดับแรงดันดังตารางที่ 6.2 ซึ่งค่าจำกัดนี้เป็นสภาวะแรงดันปกติ ถ้าเป็นสภาวะการใช้งานในช่วงเวลาสั้นๆ ของการเริ่มเดินเครื่องจักรหรือสภาวะผิดปกติ ค่าจำกัดของแรงดันฮาร์มอนิก สามารถเพิ่มได้อีก 50% จากค่าที่กำหนดในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ค่าจำกัดระดับแรงดันฮาร์มอนิก ตาม IEEE Std.519-1992

Bus Voltage At PCC (V_n)	*Individual Harmonic Voltage Distortion (%)*	*Total Voltage Distortion - THDv (%)*
$V_n \leq 69$ kV	3.0	5.0
69 kV $< V_n \leq$ 161 kV	1.5	2.5
$V_n >$ 161 kV	1.0	1.5

**High-voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for a user*

6.2 มาตรฐาน IEC 61000 Series of Standards

มาตรฐานของ IEC ถือเป็นมาตรฐานสากลที่หลายประเทศยอมรับ มีมาตรฐานเกี่ยวกับหลายเรื่อง รวมทั้งในเรื่องข้อกำหนดคุณภาพกำลังไฟฟ้าทางด้านฮาร์มอนิกจะมีอยู่ในมาตรฐาน IEC 61000-2-2 : 1990 (Compatibility levels for individual harmonic voltages in low voltage networks)และ IEC 61000-2-4 : 1994 (Compatibility levels for individual harmonic voltage in 3 classes of environments)

6.2.1 **มาตรฐาน** IEC 61000-2-2 : 1990

ข้อกำหนดทางด้านฮาร์มอนิกของมาตรฐาน IEC 61000-2-2:1990 ใช้กับระบบแรงดันต่ำไม่เกิน 240 โวลต์ สำหรับระบบ 1 เฟส และไม่เกิน 415 โวลต์ สำหรับระบบ 3 เฟส โดยกำหนดค่าความผิดเพี้ยนด้านแรงดันรวม (THDv) ไม่เกิน 8 % สำหรับค่าความผิดเพี้ยนแต่ละลำดับ(V_h) จะกำหนดค่าจำกัดโดยขึ้นกับลำดับของแรงดันฮาร์มอนิก ดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ค่าจำกัดของระดับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับแรงดันต่ำ (415/240 volt)

Odd harmonics (non-multiple of 3)		*Odd harmonics (multiple of 3)*		*Even harmonics*	
Harmonic order (h)	*Harmonic voltage (%)*	*Harmonic order (h)*	*Harmonic voltage (%)*	*Harmonic order (h)*	*Harmonic voltage (%)*
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	> 21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	0.2+0.5x25/h				

6.2.2 **มาตรฐาน** IEC 61000-2-4 : 1994

เป็นมาตรฐานที่ใช้กับระบบไฟฟ้าที่จ่ายไฟให้กับโรงงานอุตสาหกรรมทั้งจุดต่อร่วม(PCC) และจุดที่อยู่ภายในระบบโรงงานหรือจุดติดตั้งอุปกรณ์(IPC: In-Plant of coupling) แต่ไม่รวมระบบไฟฟ้าในเรือ ในเครื่องบินและบนฐานนอกชายฝั่ง(non – public networks) โดยแบ่งระบบออกเป็น 3 Class ดังนี้

Class 1 สำหรับจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ที่ไวต่อสิ่งรบกวนจากระบบไฟฟ้า (Very sensitive to disturbances) เช่น เครื่องมือวัดของห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์ป้องกันในระบบสื่อสารหรือคอมพิวเตอร์

Class 2 ระบบไฟฟ้าที่จ่ายไฟฟ้าให้กับโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปทั้งที่ PCC และ IPC

Class 3 ระบบไฟฟ้าที่จ่ายไฟฟ้าให้กับโรงงานอุตสาหกรรมที่มีอุปกรณ์ที่สร้างสิ่งรบกวนในระบบไฟฟ้าได้ง่าย เช่น เครื่องเชื่อม มอเตอร์ขนาดใหญ่ที่มีการสตาร์ทอยู่บ่อยๆและการทำงานของโหลดเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

ค่าจำกัดของมาตรฐาน IEC 61000-2-4-1994 ทั้งทางด้านกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกแสดงดังตารางที่ 6.4 ถึงตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.4 ค่าจำกัดของระดับฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับ (ไม่รวม ฮาร์มอนิกที่เป็นพหุคูณของ 3)

Order h	*Class 1 U_h(%)*	*Class 2 U_h(%)*	*Class 3 U_h(%)*	*Order h*	*Class 1 U_h(%)*	*Class 2 U_h(%)*	*Class 3 U_h(%)*
5	3	6	8	2	2	2	3
7	3	5	7	4	1	1	1.5
11	3	3.5	5	6	0.5	0.5	1
13	3	3	4.5	8	0.5	0.5	1
17	2	2	4	10	0.5	0.5	1
19	1.5	1.5	4	>10	0.2	0.2	1
23	1.5	1.5	3.5				
25	1.5	1.5	3.5				
>25	0.2+12.5/h	0.2+12.5/h	$5x\sqrt{11/h}$				

ตารางที่ 6.5 ค่าจำกัดของระดับฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับ (ฮาร์มอนิกที่เป็นพหุคูณของ 3 ลำดับคี่)

Order h	*Class 1 U_h (%)*	*Class 2 U_h (%)*	*Class 3 U_h (%)*
3	3	5	6
9	1.5	1.5	2.5
15	0.3	0.3	2
21	0.2	0.2	1.75
>21	0.2	0.2	1

ตารางที่ 6.6 ค่าจำกัดของแรงดันฮาร์มอนิกผิดเพี้ยนรวม (THD)

Total harmonic distortion (THD)	*Class 1*	*Class 2*	*Class 3*
	5 %	8 %	10 %

จากตารางค่าจำกัดของ IEC 1000-2-4-1994 จะเห็นได้ว่าค่าจำกัดนั้นจะขึ้นกับประเภทของ Class และมีค่าลดลงเมื่อลำดับฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้น และจะเห็นได้ว่า มาตรฐาน IEC นั้น จะกำหนดค่าจำกัดไปถึงจุดที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่อใช้งานอยู่

6.3 มาตรฐาน G.5/4-2001

มาตรฐาน G.5/4-2001 (Planning Levels for Harmonic Voltage Distortion and The Connection of Nonlinear Equipment to Transmission Systems and Distribution Networks in The United Kingdom) กำหนดค่าจำกัดของฮาร์มอนิกตามระดับแรงดัน โดยแบ่งแรงดันออกเป็น 4 กลุ่มคือ

แรงดัน 400 V. กำหนดค่าจำกัด THD ≤ 5.0 % สำหรับค่า V_h จะกำหนดค่าจำกัดโดยขึ้นกับลำดับของแรงดันฮาร์มอนิก ดังรายละเอียดในตารางที่ 6.7

แรงดัน 6.6 kV. , 11 kV. และ 20 kV. เรียก Final Distribution Systems กำหนดค่าจำกัด THD ≤ 4 % สำหรับค่า V_h จะกำหนดค่าจำกัดโดยขึ้นกับลำดับของแรงดันฮาร์มอนิก ดังรายละเอียดในตารางที่ 6.8

แรงดันสูงกว่า 20 kV. ถึงต่ำกว่า 145 kV. เรียก Primary Distribution Systems และ Sub-transmission Systems กำหนดค่าจำกัด THD ≤ 3 % สำหรับค่า V_h จะกำหนดค่าจำกัดโดยขึ้นกับลำดับของแรงดันฮาร์มอนิก ดังรายละเอียดในตารางที่ 6.9

แรงดัน 275 kV. และ 400 kV. เรียก Transmission Systems กำหนดค่าจำกัด THD ≤ 3 % สำหรับค่า V_h จะกำหนดค่าจำกัดโดยขึ้นกับลำดับของแรงดันฮาร์มอนิก ดังรายละเอียดในตารางที่ 6.10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.7 ค่าจำกัดของระดับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับแรงดันต่ำ 400 V

Odd Harmonics Non - multiples of 3		Odd Harmonics Multiples of 3		Even Harmonics	
Order , h	Harmonic voltage (%	Order , h	Harmonic voltage (%	Order , h	Harmonic voltage (%
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				
The total harmonic distortion (THD) level is 5 %.					

ตารางที่ 6.8 ค่าจำกัดของระดับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับแรงดัน 6.6 kV. , 11 kV. และ 20 kV.

Odd Harmonics Non - multiples of 3		Odd Harmonics Multiples of 3		Even Harmonics	
Order , h	Harmonic voltage (%)	Order , h	Harmonic voltage (%)	Order , h	Harmonic voltage (%)
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 + 0.5×25/h				
The total harmonic distortion (THD) level is 4 %.					

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.9 ค่าจำกัดของระดับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับแรงดัน มากกว่า 20 kV. และ น้อยกว่า 145 kV.

Odd Harmonics Non - multiples of 3		Odd Harmonics Multiples of 3		Even Harmonics	
Order , h	Harmonic voltage (%)	Order , h	Harmonic voltage (%)	Order , h	Harmonic voltage (%)
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				
The total harmonic distortion (THD) level is 3 %.					

ตารางที่ 6.10 ค่าจำกัดของระดับแรงดันฮาร์มอนิกสำหรับแรงดัน 275 kV. และ 400 kV.

Odd Harmonics Non - multiples of 3		Odd Harmonics Multiples of 3		Even Harmonics	
Order , h	Harmonic voltage (%)	Order , h	Harmonic voltage (%)	Order , h	Harmonic voltage (%)
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				
The total harmonic distortion (THD) level is 3 %.					

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ส่วนข้อกำหนดทางด้านกระแสฮาร์มอนิกมาตรฐานนี้แบ่งการพิจารณาออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 ใช้กับระบบแรงดันต่ำ 230/400 V. โดยไม่ต้องพิจารณาเรื่องปัญหาจากฮาร์มอนิกหากติดตั้งอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC 61000-3-2 และ IEC 61000-3-4 หากเป็น คอนเวอร์เตอร์ (Converters) หรือ เครื่องแปลงไฟฟ้าสลับ(AC Regulators) 3 เฟส ต้องมีขนาดไม่เกินที่กำหนดในตารางที่ 6.11 หากเป็น ศูนย์รวมโหลด (Aggregate Loads) และอุปกรณ์ อื่น ๆ ที่มีขนาดใหญ่กว่า 16 แอมแปร์./เฟส ต้องมีกระแสฮาร์มอนิกไม่เกินค่าที่ระบุในตารางที่ 6.12

ตารางที่ 6.11 ขนาดใหญ่ที่สุดของคอนเวอร์เตอร์(converter) และ เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าสลับ (AC regulator) ในระบบไฟ 3 เฟส แต่ละตัวภายใต้ค่าจำกัดของ ขั้นตอนที่ 1

Supply System Voltage at The PCC	Three Phase Convertors		Three Phase AC Regulators
	6 Pulse (kVA)	12 Pulse (kVA)	6 Pulse Thyristor
400 V.	12	50	14

ตารางที่ 6.12 ค่าจำกัดกระแส(Irms)มากที่สุดที่สำหรับจุดรวมโหลด (aggregate loads) และอุปกรณ์ที่มีพิกัดกระแสมากกว่า 16 แอมแปร์ต่อเฟส ภายใต้ข้อจำกัดของ ขั้นตอนที่ 1

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

ขั้นตอน 2 ใช้กับระบบแรงดันสูงพิกัดแรงดันต่ำกว่า 33 kV. หากเป็น คอนเวอร์เตอร์ (Converters) หรือ เครื่องแปลงไฟฟ้าสลับ(AC Regulators) 3 เฟส ต้องมีขนาดไม่เกินที่กำหนดใน ตารางที่ 6.13 สำหรับกระแสฮาร์มอนิกจากผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายต้องไม่เกินค่าที่กำหนดในตารางที่ 6.14

ตารางที่ 6.13 ขนาดใหญ่ที่สุดของคอนเวอร์เตอร์(converter) และ เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าสลับ (AC regulator) แต่ละตัวภายใต้ค่าจำกัดของ ขั้นตอนที่ 2

Supply System Voltage at The PCC	Three Phase Convertors Ratings in kVA		Three Phase AC Regulators Ratings in kVA.
	6 Pulse	12 Pulse	6 Pulse Thyristor
6.6 ,11 , 20 and 22 kV.	130	250*	150

ขั้นตอน 3 หากไม่สามารถจำกัดกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่ระบบตามที่กำหนดใน ขั้นตอนที่ 2 ได้ ต้องทำการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าทางด้านฮาร์มอนิกอย่างละเอียด ก่อนที่จะได้รับอนุญาติจากการไฟฟ้า ให้ใช้ไฟฟ้าได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.14 ค่าจำกัดกระแส(Irms/ph) มากที่ยอมให้ผู้ใช้ไฟฟ้าปล่อยเข้าสู่ระบบไฟฟ้า ภายใต้ข้อจำกัดของขั้นตอนที่ 2

Harmonic Order	PCC on 6.6,11 or 20 kV. systems	PCC on 22 kV. systems	Harmonic Order	PCC on 6.6,11 or 20 kV. systems	PCC on 22 kV. systems
2	4.9	3.3	27	0.1	0.1
3	6.6	4.4	28	0.2	0.2
4	1.6	1.3	29	0.8	0.8
5	3.9	2.6	30	0.1	0.1
6	0.6	0.6	31	0.7	0.7
7	7.4	5.0	32	0.2	0.2
8	0.9	0.9	33	0.1	0.1
9	1.8	1.5	34	0.2	02
10	1.4	1.4	35	0.6	0.6
11	6.3	4.7	36	0.1	0.1
12	0.2	0.2	37	0.5	0.5
13	5.3	4.0	38	0.2	0.2
14	0.5	0.5	39	0.1	0.1
15	0.3	0.3	40	0.2	0.2
16	0.4	0.4	41	0.4	0.4
17	3.3	2.0	42	0.1	0.1
18	0.2	0.3	43	0.4	0.4
19	2.2	1.8	44	0.2	0.2
20	0.3	0.3	45	0.1	0.1
21	0.1	0.1	46	0.2	0.2
22	0.3	0.3	47	0.3	0.3
23	1.8	1.1	48	0.1	0.1
24	0.1	0.1	49	0.3	0.3
25	1.0	1.0	50	0.1	0.1
26	0.3	0.3			

The 6.6 , 11 or 20 kV. column is relevant to final distribution systems ; the 22 kV. column is relevant to primary distribution systems.

With the exception of the third and fifth harmonic orders any two emission currents up to and including the nineteenth order may exceed the limit values by 10% or 0.5 A, whichever is the greater. For harmonic orders greater than the nineteenth any four emission currents may exceed the giver values by 10% or 0.1 A, whichever is the greater.

These limits are based on the typical fault levels given in table 9 of G5/4 – 2001

6.4 มาตรฐาน EN 50160 – 1994

แบ่งระดับแรงดันออกเป็น 2 กลุ่ม คือระบบแรงดันต่ำไม่เกิน 1000 โวลต์. และระบบแรงดันปานกลาง สูงกว่า 1 กิโลโวลต์. จนถึง 35 กิโลโวลต์. ทั้ง 2 กลุ่มกำหนดให้ค่าจำกัดความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม(THDV) ไม่เกิน 8 % ส่วน ความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ(V_hจะกำหนดค่าจำกัดโดยขึ้นกับลำดับของฮาร์มอนิก ดังรายละเอียดในตารางที่ 6.15 และตารางที่ 6.16 ตามลำดับ (ปัจจุบันค่าจำกัดของทั้ง 2 กลุ่มมีค่าเท่ากัน)

ตารางที่ 6.15 ค่าจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ถึงลำดับที่ 25 แสดงเป็นค่าร้อยละของแรงดัน ระบบ(U_n.) ($U_n \leq 1000$ V.)

Odd harmonic				Even harmonic	
Non- Multiples of 3		Multiples of 3			
Order , h	Relative voltage	Order , h	Relative voltage	Order , h	Relative voltage
5	6 %	3	5 %	2	2 %
7	5 %	9	1.5 %	4	1 %
11	3.5 %	15	0.5 %	6 … 24	0.5 %
13	3 %	21	0.5 %		
17	2 %				
19	1.5 %				
23	1.5 %				
25	1.5 %				

Note : No values are given for harmonics of order higher than 25 , as they are usually small, but largely unpredictable due to resonance effects.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.16 ค่าจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ถึงลำดับที่ 25 แสดงเป็นค่าร้อยละของแรงดัน ระบบ(U_n.). (1 kV. < $U_c \leq$ 35 kV.)

Odd harmonic				Even harmonic	
Non - Multiples of 3		Multiples of 3			
Order , h	Relative voltage	Order , h	Relative voltage	Order , h	Relative voltage
5	6 %	3	5 % *	2	2 %
7	5 %	9	1.5 %	4	1 %
11	3.5 %	15	0.5 %	6 … 24	0.5 %
13	3 %	21	0.5 %		
17	2 %				
19	1.5 %				
23	1.5 %				
25	1.5 %				

* Depending on the network design the value for the third harmonic order can be substantially lower.

เมื่อเปรียบเทียบมาตรฐานที่กล่าวมา สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.17

ตารางที่ 6.17 การเปรียบเทียบค่าจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกจากมาตรฐานจำนวน 5 ฉบับ

IEEE 519 - 1992				IEC 61000-2-2-1990				IEC 61000-2-4-1994					G 5/4 - 2001				EN 50160 - 1994			
V_S	%	% V_h		V_S	%	% V_h		Class	%	% V_h			V_S	%	% V_h		V_S	%	% V_h	
(kV.)	THD	Odd	Even	(kV.)	THD	Odd	Even		THD	Odd	Even	Inter	(kV.)	THD	Odd	Even	(kV.)	THD	Odd	Even
Dist.	5.0	3.0	3.0	0.415	8.0	T6.3	T6.3	1	5.0	T6.4	T6.4	T6.4	0.4	5	T6.7	T6.7	≤1.0	8.0	T6.15	T6.15
≤ 69								2	8.0	T6.5	T6.5	T6.5	6.6,	4	T6.8	T6.8	>1-35	8.0	T6.16	T6.16
Sub	2.5	1.5	1.5										11,20							
Trans								3	10.0	T6.6	T6.6	T6.6								
>69													>20	3	T6.9	T6.9				
to													to							
161													<145							
Trans	1.5	1.0	1.0										275,	3	T6.10	T6.10				
> 161													400							

หมายเหตุ T6.2 , T6.3 , … หมายถึง ตารางที่ 6.2 , ตารางที่ 6.3 , …

6.5 ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม

เป็นข้อกำหนดที่การไฟฟ้าทั้งสามแห่งตั้งคณะทำงานขึ้นเพื่อปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าในส่วนของคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่เกี่ยวกับเรื่องฮาร์มอนิก

6.5.1 ค่าจำกัดของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิก

มาตรฐานอ้างอิงที่ข้อกำหนดนี้นำมาใช้ในส่วนของค่าจำกัดจะอ้างอิงมาจากมาตรฐานของประเทศอังกฤษ G.5/3-1976 :Engineering Recommendation แต่ได้รวมระดับแรงดันที่มีใช้จริงในประเทศไทยเข้าไปด้วย ดังตารางที่ 6.18 และ 6.19 ซึ่งเป็นขีดจำกัดของกระแส และ แรงดันตามลำดับ ดังนั้นวิธีการประเมินจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนตามมาตรฐาน G.5/3-1976

*ตารางที่ 6.18 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อร่วม *(PCC)*

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่	*อันดับฮาร์มอนิกและขีดจำกัดกระแส (A rms)*																	
จุดต่อร่วม(kV)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0.400	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	16	5	5	5	6	4	6
11 and 12	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1
22 , 24 and 33	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1	1
69	8.8	5.9	4.3	7.3	3.3	4.9	2.3	1.6	1.6	4.9	1.6	4.3	1.6	1	1	1.6	1	1
115 and above	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1

- ยอมให้นำค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 10 หรือ 0.5 A (ค่าที่มากกว่าค่าใดค่าหนึ่ง) มาใช้กับขีดจำกัดของกระแสแต่ละอันดับได้ไม่เกิน 2 อันดับ

ตารางที่ 6.19 ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อร่วม (PCC) (รวมทั้งระดับความเพี้ยนที่มีอยู่เดิม)

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (kV)	ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน (%)	ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดัน แต่ละลำดับ (%)	
		ลำดับคี่	ลำดับคู่
0.400	5	4	2
11 , 12 , 22 and 24	4	3	1.75
33	3	2	1
69	2.45	1.63	0.82
115 and above	1.5	1	0.5

6.5.2 วิธีการประเมิน

ขีดจำกัดความเพี้ยนของแรงดันที่เกิดจากฮาร์มอนิก แบ่งการพิจารณาออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอนที่ 1

1) อุปกรณ์ไฟฟ้า 3 เฟส

อุปกรณ์ประเภทคอนเวอร์เตอร์(convertor) หรือ เครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าสลับ(Ac regulator) ไม่เกิน 1 ตัว ที่จะนำเข้าระบบแรงดัน 0.400,11 และ 12 กิโลโวลต์ หากมีขนาดไม่เกินตารางที่ 6.20 สามารถนำเข้าระบบได้โดยไม่ต้องพิจารณาในส่วนของฮาร์มอนิก แต่ถ้ามีอุปกรณ์หลายตัวให้พิจารณาใน ขั้นตอนที่ 2

ตารางที่ 6.20 ขนาดสูงสุดของอุปกรณ์ประเภทคอนเวอร์เตอร์(convertor)และเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าสลับ(Ac regulator) ตามขั้นตอนที่ 1

ระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม (kV)	Converters 3 เฟส			A.C. Regulators 3 เฟส	
	3-Pulse (kVA)	6-Pulse (kVA)	12-Pulse (kVA)	6-Thyristor (kVA)	3-Thyristor/ 3- Diode (kVA)
0.415	8	12	-	14	10
6.6 and 11	85	130	250*	150	100

2) อุปกรณ์ไฟฟ้า 1 เฟส

- เครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไปหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีค่าตามมาตรฐาน EN 500006 สามารถติดตั้งเข้าระบบได้
- อุปกรณ์ประเภทคอนเวอร์เตอร์(convertor)และเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าสลับ (Ac regulator) ที่สารถนำเข้าระบบได้ โดยอุปกรณ์ต้องมีขนาดตามที่กำหนดคือ ไม่เกิน 5 กิโลโวลต์แอมแปร์ ที่แรงดัน 230 โวลต์ อุปกรณ์ประเภทคอนเวอร์เตอร์หรือเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าสลับที่สร้างกระแสฮาร์มอนิกทั้งอันดับคู่และอันดับคี่จะไม่อนุญาตให้นำเข้าระบบและหากมีการติดตั้งอุปกรณ์ประเภทคอนเวอร์เตอร์หรือเครื่องแปลงผันกำลังไฟฟ้าสำหรับไฟ 1 เฟส อยู่แล้วแต่ตองการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มขึ้น อนุญาตให้ทำได้หากมีการติดตั้งที่เฟสอื่น ทั้งนี้เพื่อทำให้เกิดการสมดุลของอุปกรณ์ประเภทไม่เชิงเส้น แต่หากต้องการติดตั้งอุปกรณ์กว่าหนึ่งตัวต่อเฟส ให้พิจารณาตามขั้นตอนที่ 2

2. ขั้นตอนที่ 2

1) อุปกรณ์ไฟฟ้า 3 เฟส

อุปกรณ์ที่มีขนาดเกินของเขตจำกัดในขั้นตอนที่ 1 สามารถนำเข้าระบบได้ก็ต่อเมื่อ

- ระบบของผู้ใช้ไฟฟ้าจะต้องไม่สร้างกระแสฮาร์มอนิก(Harmonic Current) ที่จุด PCC เกินค่าขีดจำกัดในตารางที่ 6.18
- ค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่จุด PCC ก่อนที่จะต่อเชื่อมโหลดใหม่จะต้องมีค่าไม่เกิน 75% ของค่าขีดจำกัดในตารางที่ 6.19
- ค่า Shot Circuit Level ต้องไม่ต่ำมาก

2) อุปกรณ์ไฟฟ้า 1 เฟส

อุปกรณ์ที่เกินขีดจำกัดในขั้นตอนที่ 1 ไม่อนุญาตให้ต่อเข้ากับระบบ

3. ขั้นตอนที่ 3

อุปกรณ์ประเภทโหลดไม่เชิงเส้นที่ไม่ผ่านการพิจารณาตาม ขั้นตอนที่ 2 หรือที่จุด PCC ของระบบมีค่าแรงดันฮาร์มอนิก(Harmonic Voltege) เกิน 75% ของค่าในตารางที่ 6.19 ก่อนที่จะต่อโหลดใหม่เพิ่ม การพิจารณาการอนุญาต ให้ต่อเข้ากับระบบได้หรือไม่นั้น จะประเมินในขั้นตอนที่ 3 โดยผู้ใช้ไฟฟ้ายังคงต่อโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นเข้ากับระบบได้ หลังจากได้ทำการศึกษาวิเคราะห์กระแสและแรงดันฮาร์มอนิกในสภาพที่เกิดขึ้นปัจจุบัน และมีการจำลองผลที่จะเกิดขึ้นในอนาคต เมื่อต่อโหลดใหม่เพิ่มอย่างละเอียด โดยผู้ใช้ไฟฟ้าจะได้รับอนุญาต ให้ต่ออุปกรณ์เข้ากับระบบได้หากผลการศึกษาวิเคราะห์ได้ว่าระดับแรงดัน ฮาร์มอนิกที่จุดใดๆในระบบไฟฟ้ามีค่าไม่เกินค่าที่กำหนดในตารางที่ 6.19

6.5.3 การบังคับใช้

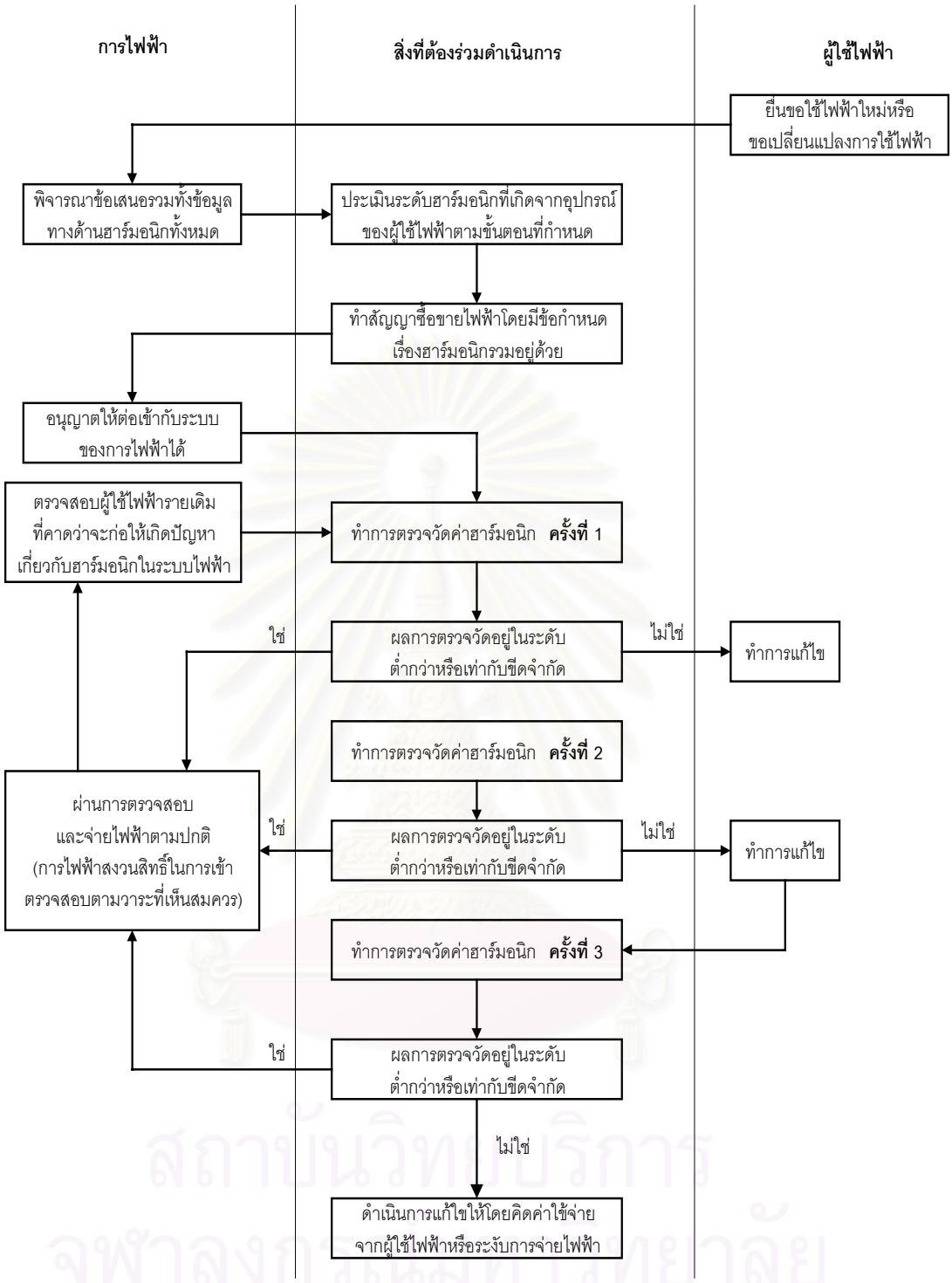
การบังคับใช้ จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ การไฟฟ้า สิ่งที่ต้องร่วมดำเนินการระหว่างผู้ใช้ไฟฟ้าและการไฟฟ้า ผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งรายละเอียดแสดงดังแผนผังในรูปที่ (6.1)

(1) ผู้ขอใช้ไฟฟ้ารายใหม่ ผู้ขอใช้ไฟฟ้ารายใหม่ต้องจัดส่งรายละเอียดของอุปกรณ์และการคำนวณให้การไฟฟ้าฯ ตรวจสอบ โดยแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแล้ว จะไม่ก่อให้เกิดฮาร์มอนิกเกินขีดจำกัดฯ ข้างต้น การไฟฟ้าฯ ขอสงวนสิทธิ์ในการไม่จ่ายไฟฟ้า หากการต่อใช้ไฟฟ้าดังกล่าวก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่น

(2) **ผู้ขอเปลี่ยนแปลงการใช้ไฟฟ้า** ผู้ขอเปลี่ยนแปลงการใช้ไฟฟ้าจะต้องปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ (1) โดยจะต้องจัดส่งรายละเอียดของอุปกรณ์และการคำนวณทั้งโหลดเดิมและโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงให้การไฟฟ้าฯ ตรวจสอบ

(3) **ผู้ใช้ไฟฟ้ารายเดิม** ถ้าทางการไฟฟ้าฯ ตรวจสอบแล้วพบว่าการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้ารายเดิมนั้น ก่อให้เกิดฮาร์มอนิกเกินขีดจำกัดฯ ข้างต้น ผู้ใช้ไฟฟ้าจะต้องทำการปรับปรุงแก้ไขเพื่อลดผลกระทบดังกล่าว หากผู้ใช้ไฟฟ้าไม่ดำเนินการปรับปรุงแก้ไข การไฟฟ้าฯ จะเข้าไปทำการปรับปรุงแก้ไขโดยคิดค่าใช้จ่ายจากผู้ใช้ไฟฟ้า หรืองดการจ่ายไฟฟ้า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.1 แผนผังแสดงวิธีการบังคับใช้ข้อกำหนดของการไฟฟ้า

บทที่ 7

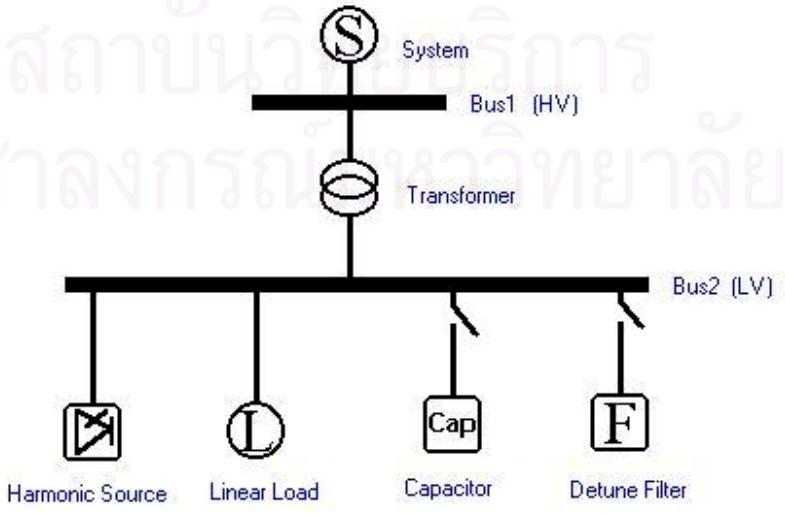
ตัวอย่างการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม

บทนี้จะใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม โดยจะเลือกตัวอย่างในสภาวะต่างๆเพื่อแสดงถึงความสามารถของโปรแกรม ตัวอย่างแรกจะแสดง ผลของการต่อชุดคาปาซิเตอร์เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังแบบมีตัวควบคุมอัตโนมัติเพื่อดูสภาวะของการเกิดเรโซแนนซ์ที่อาจเกิดขึ้น และดูการผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิก ตัวอย่างที่สอง จะแสดงผลของโรงงานข้างเคียงกันที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกทั้งคู่แต่ติดตัวกรองฮาร์มอนิกเพียงโรงงานเดียว จะดูการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่จะกระทบต่อกัน ตัวอย่างที่สาม จะแสดงผลของความผิดเพี้ยนทางด้านแรงดันฮาร์มอนิกของระบบไฟฟ้าก่อนต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าของโรงงานและตัวอย่างที่ 4 จะแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงโหลดของโรงงานต่อการไหลของกระแสฮาร์มอนิกและแสดงประสิทธิภาพของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

7.1 ตัวอย่างที่ 1

โรงงานมีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก 1 ชุด ต่อใช้งานอยู่กับโหลดเชิงเส้นและต้องการปรับปรุงตัวประกอบกำลังให้ดีขึ้น ด้วยการติดตั้งชุดคาปาซิเตอร์ หรือ การติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิก

การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะใช้ข้อมูลของอุปกรณ์และแบบจำลองดังตารางที่ 7.1 และมีไดอะแกรมดังรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 ไดอะแกรมของโรงงานสำหรับตัวอย่างที่ 1

ตารางที่ 7.1(ก) ข้อมูลเบื้องต้นของระบบไฟฟ้า,หม้อแปลงไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

System	Transformer	SPC 6 Pulses
22 kV, 50 Hz MVA_{SC} = 500 MVA X/R ratio = 10	22 kV/400 V 3500 kVA %Z = 6, Loss 50 kW Typical model, No Skin eff	1250 kVA PF = 0.8 lagging

ตารางที่ 7.1(ข) ข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกจาก คอนเวอร์เตอร์

Harm Order (h)	Mag (%of I_1)	Harm Order (h)	Mag (%of I_1)
5	19.2	19	2.7
7	13.2	23	2.0
11	7.3	25	1.6
13	5.7	29	1.4
17	3.5	31	1.2

สำหรับข้อมูลของโหลดเชิงเส้น เนื่องจากโปรแกรมสามารถวิเคราะห์ถึงการเปลี่ยนแปลงโหลดได้ 24 ค่า ในที่นี้จะแสดง การเปลี่ยนแปลงโหลดเพียง 4 ค่าเพื่อให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง ข้อมูลของโหลดแสดงดังตารางที่ 7.2 และ แบบจำลองของโหลดเชิงเส้นนั้น จากการวิเคราะห์ผลของแบบจำลองในบทที่ 5 จึงเลือกใช้แบบจำลองโหลดแบบขนานไม่คิดความต้านทานตามผิว

ตารางที่ 7.2 ข้อมูลเบื้องต้นของโหลดเชิงเส้น

Hour	Linear Load(kVA), pf = 0.8 Lagging
1	1000
2	1300
3	1700
4	2000

7.1.1 ระบบยังไม่ต่อคาปาซิเตอร์และตัวกรองฮาร์มอนิก

การวิเคราะห์ครั้งแรกจะไม่ต่อคาปาซิเตอร์หรือตัวกรองฮาร์มอนิก ผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกแสดงดังตารางที่ 7.3 และ 7.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.3(ก)) แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อเปลี่ยนขนาดของโหลดเชิงเส้น

Order (h)	Load 1000 kVA		Load 1300 kVA		Load 1700 kVA		Load 2000 kVA	
	kV	%(or V_1)	kV	%(or V_1)	kV	%(or V_1)	kV	%(or V_1)
1	22.00	100	22.00	100	22.00	100	22.00	100
5	0.053	0.24	0.053	0.24	0.053	0.24	0.053	0.24
7	0.051	0.23	0.051	0.23	0.050	0.23	0.050	0.23
11	0.044	0.20	0.044	0.20	0.043	0.20	0.042	0.19
13	0.040	0.18	0.040	0.18	0.038	0.18	0.038	0.17
17	0.032	0.15	0.031	0.14	0.030	0.14	0.029	0.13
19	0.028	0.12	0.027	0.12	0.025	0.12	0.024	0.11
23	0.025	0.11	0.023	0.11	0.022	0.10	0.021	0.09
25	0.021	0.09	0.020	0.09	0.018	0.08	0.017	0.08
29	0.021	0.09	0.019	0.09	0.018	0.08	0.017	0.08
31	0.019	0.08	0.018	0.08	0.016	0.07	0.015	0.07
THDv	0.1119	0.51	0.1102	0.50	0.1076	0.49	0.10837	0.49
V_{rms}	22.000	100	22.000	100	22.000	100	22.000	100

ตารางที่ 7.3(ข)) แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 2 ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อเปลี่ยนขนาดของโหลดเชิงเส้น

Order (h)	Load 1000 kVA		Load 1300 kVA		Load 1700 kVA		Load 2000 kVA	
	V	%(or V_1)	V	%(or V_1)	V	%(or V_1)	V	%(or V_1)
1	388.31	100	386.78	100	384.76	100	383.26	100
5	9.06	2.33	9.03	2.34	8.99	2.34	8.95	2.34
7	8.69	2.24	8.65	2.24	8.58	2.23	8.51	2.22
11	7.48	1.93	7.41	1.91	7.27	1.89	7.16	1.87
13	6.87	1.77	6.77	1.75	6.61	1.72	6.47	1.69
17	5.44	1.40	5.31	1.37	5.11	1.33	4.95	1.29
19	4.65	1.20	4.52	1.17	4.32	1.12	4.15	1.08
23	4.09	1.05	3.94	1.02	3.70	0.96	3.51	0.92
25	3.52	0.91	3.77	0.87	3.14	0.82	2.96	0.77
29	3.50	0.90	3.30	0.85	3.03	0.79	2.83	0.74
31	3.17	0.82	2.97	0.77	2.71	0.70	2.51	0.65
THDv	19.06	4.91	18.77	4.85	18.32	4.76	17.96	4.69
V_{rms}	388.77	100.12	387.24	100.12	385.20	100.11	383.68	100.11

ตารางที่ 7.4(ก) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้ขนาดของโหลดเชิงเส้น 1000 kVA (เครื่องหมายลบแสดง ทิศกระแสไหลเข้าบัส หรือบัสแรงสูง)

Order (h)	Harmonic Source	System(HV)	Transformer(LV)	Linear Load # 1
	A	A	A	A
1	1858.88	57.51	3163.25	1486.8
5	- 356.84	- 6.37	- 350.35	28.06
7	- 245.33	- 4.37	- 240.17	26.77
11	- 135.67	- 2.39	- 131.69	22.98
13	- 105.94	- 1.86	- 102.25	21.07
17	- 65.05	- 1.13	- 61.92	16.68
19	- 50.18	- 0.86	- 47.38	14.26
23	- 37.17	- 0.63	- 34.46	12.55
25	- 29.74	- 0.50	- 27.29	10.80
29	- 26.02	- 0.42	- 23.35	10.72
31	- 22.30	- 0.36	- 19.78	9.70
THDi	476.80	14.73	466.01	58.66
I_{rms}	1918.74	101.08	3197.42	1488.00

ตารางที่ 7.4(ข) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้ขนาดของโหลดเชิงเส้น 1300 kVA (เครื่องหมายลบแสดง ทิศกระแสไหลเข้าบัส หรือบัสแรงสูง)

Order (h)	Harmonic Source	System(HV)	Transformer(LV)	Linear Load # 1
	A	A	A	A
1	1865.8	65.36	3594.6	1940.5
5	- 358.25	- 6.35	- 349.34	36.66
7	- 246.30	- 4.35	- 239.00	34.90
11	- 136.21	- 2.37	- 130.29	29.79
13	- 106.35	- 1.83	- 100.79	27.21
17	- 65.31	- 1.10	- 60.50	21.35
19	- 50.38	- 0.84	- 46.06	18.16
23	- 37.32	- 0.60	- 33.14	15.81
25	- 29.85	- 0.47	- 26.09	13.53
29	- 26.12	- 0.40	- 22.06	13.27
31	- 22.39	- 0.34	- 18.57	11.94
THDi	478.68	8.42	463.35	75.68
I_{rms}	1926.30	65.90	3624.42	1941.98

ตารางที่ 7.4(ข) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้ขนาดของโหลดเชิงเส้น 1700 kVA (เครื่องหมายลบแสดง ทิศกระแสไหลเข้าบัส หรือบัสแรงสูง)

Order (h)	Harmonic Source	System(HV)	Transformer(LV)	Linear Load # 1
	A	A	A	A
1	1875.65	76.06	4183.25	2550.9
5	- 360.13	- 6.32	- 347.68	48.21
7	- 247.59	- 4.31	- 237.05	45.75
11	- 136.92	- 2.33	- 127.96	38.66
13	- 106.91	- 1.79	- 98.38	35.10
17	- 65.65	- 1.06	- 58.23	27.15
19	- 50.64	- 0.80	- 43.99	22.92
23	- 37.51	- 0.57	- 31.14	19.63
25	- 30.01	- 0.44	- 24.32	16.66
29	- 26.26	- 0.37	- 20.23	16.08
31	- 22.51	- 0.31	- 16.89	14.35
THDi	481.19	8.35	459.02	97.64
I_{rms}	1936.40	76.52	4208.39	2552.77

ตารางที่ 7.4(ง) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้ขนาดของโหลดเชิงเส้น 2000 kVA (เครื่องหมายลบแสดง ทิศกระแสไหลเข้าบัส หรือบัสแรงสูง)

Order (h)	Harmonic Source	System(HV)	Transformer(LV)	Linear Load # 1
	A	A	A	A
1	1883.0	84.24	4632.9	3012.8
5	- 361.54	- 6.29	- 346.18	56.92
7	- 248.56	- 4.28	- 235.29	53.84
11	- 137.46	- 2.29	- 125.90	45.11
13	- 107.33	- 1.75	- 96.28	40.74
17	- 65.91	- 1.02	- 56.32	31.14
19	- 50.84	- 0.77	- 42.29	26.13
23	- 37.66	- 0.54	- 29.57	22.10
25	- 30.13	- 0.42	- 22.95	18.65
29	- 26.36	- 0.34	- 18.87	17.78
31	- 22.60	- 0.28	- 15.67	15.79
THDi	483.08	8.28	455.29	113.52
I_{rms}	1944.00	84.64	4655.3	3014.9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางที่ 7.3 (ก) และ 7.3(ข) แรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากการใช้โหลดขนาดต่างๆ กันไม่ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนทางแรงดันมากนักอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยเมื่อเปลี่ยนโหลดเชิงเส้นเป็น 1000 1300 1700 และ 2000 kVA ตามลำดับ ค่าความผิดเพี้ยนรวมที่บัส 1 และ บัส 2 มีค่าดังตารางที่ 7.5(ก) สำหรับความผิดเพี้ยนทางด้านกระแสฮาร์มอนิกรวมแสดงดังตารางที่ 7.5(ข)

ตารางที่ 7.5(ก) สรุปแรงดันผิดเพี้ยนรวมในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 1

Bus	THD_V (%)			
	Load,1000 kVA	Load,1300 kVA	Load,1700 kVA	Load,2000 kVA
Bus 1 (HV)	0.51	0.50	0.49	0.49
Bus 2 (LV)	4.91	4.85	4.76	4.69

ตารางที่ 7.5(ข) สรุปกระแสผิดเพี้ยนรวมในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 1

Equipment	THD_I							
	Load,1000 kVA		Load,1300 kVA		Load,1700 kVA		Load,2000 kVA	
	A	%of I_1	A	%of I_1	A	%of I_1	A	%of I_1
System (HV)	8.47	14.73	8.42	12.89	8.35	10.97	8.28	9.83
Transformer (LV)	466.0	14.73	463.4	12.89	459.0	10.97	455.3	9.83
Linear Load	58.66	3.94	75.68	3.90	97.64	3.83	113.5	3.77

จากค่ากระแสผิดเพี้ยนรวมถือว่ายอมรับได้เพราะจะทำให้ค่ากระแสประสิทธิผลที่ไหลผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นไม่เกิน 2 % จึงไม่จำเป็นต้องวิเคราะห์สภาวะการเกิดเรโซแนนซ์

7.1.2 ระบบต่อคาปาซิเตอร์แต่ไม่ต่อตัวกรองฮาร์มอนิก

เมื่อพิจารณาตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบ พบว่ายังมีค่าต่ำอยู่(0.8) ถ้าต้องการปรับปรุงตัวประกอบกำลังให้ดีขึ้นจะต้องมีการติดตั้งชุดคาปาซิเตอร์ เพื่อให้ได้ค่าตัวประกอบกำลังตามที่ต้องการ เนื่องจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นได้จัดเตรียมการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง เมื่อต่อใช้งานคาปาซิเตอร์แบบอัตโนมัติ โดยสามารถใส่ค่าตัวประกอบกำลังที่ต้องการไว้ ในที่นี้จึงจะทำการทดสอบโปรแกรมถึงการปรับปรุงตัวประกอบกำลังด้วย โดยสมมติให้ค่าตัวประกอบกำลังที่

ต้องการคือ 0.95 และติดตั้งคาปาซิเตอร์ พิกัดแรงดัน 440 โวลต์ 100 kVar 15 ชุด จากโหลดที่ใช้ 4 ระดับ ต้องการกำลังงานรีแอคทีฟจากคาปาซิเตอร์เมื่อคำนวณโดยใช้สมการที่ 7.1 และ ที่ได้จากโปรแกรมแสดงดังตารางที่ 7.6

$$kVar_{Comp.} = kW_{Total}(\tan\Phi_{ong} - \tan\Phi_{new}) \quad (7.1)$$

ตัวอย่าง การคำนวณหากำลังรีแอคทีฟที่ต้องการเมื่อโหลดมีขนาด 1000 kVA และ แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกมีขนาด 1250 kVA

kW_{Total} = 1000*0.8+1250*0.8 = 1800 kW ดังนั้นจากสมการที่ 7.1 กำลังรีแอคทีฟของคาปาซิเตอร์ คือ

$kVar_{Comp.}$ = 1800*[tan($\cos^{-1}$(0.8)) - tan($\cos^{-1}$(0.95))]

= 758.37 kVar

ตารางที่ 7.6 เปรียบเทียบผลของโปรแกรมในการหากำลังรีแอคทีฟเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

Linear Load (kVA)	Reactive Power from Capacitor (kVar)			
	Calculated	Program		
		steps	KVar of steps	KVar Used
1000	758.37	10	1000	799.93
1300	859.48	11	1100	875.23
1700	994.31	13	1300	1028.89
2000	1095.42	14	1400	1102.15

จำนวนชุด(step) ของคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในตารางที่ 7.6 จะให้กำลังรีแอคทีฟจริงที่แรงดันใช้งานน้อยกว่ากำลังรีแอคทีฟที่แรงดันพิกัด 440 โวลต์ ซึ่งการหากำลังรีแอคทีฟที่ใช้ได้จริงแสดงดังตัวอย่าง

$$Qc_{USED} = \left(\frac{V}{V_{rated}}\right)^2 \times Q_{rated} \quad (7.2)$$

เช่น ใช้คาปาซิเตอร์ 10 ชุด

$$Qc = \left(\frac{393.53}{440}\right)^2 \times 1000 = 799.93 \text{ kVar}$$

ผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเมื่อมีคาปาซิเตอร์ต่อเข้าระบบแสดงดังตารางที่ 7.7 และ 7.8

ตารางที่ 7.7(ก) แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อเปลี่ยนขนาดของโหลดเชิงเส้น และ ต่อคาปาซิเตอร์

Order (h)	Load 1000 kVA Capacitor 10 Step		Load 1300 kVA Capacitor 11 Step		Load 1700 kVA Capacitor 13 Step		Load 2000 kVA Capacitor 14 Step	
	kV	%(or V_1)	kV	%(or V_1)	kV	%(or V_1)	kV	%(or V_1)
1	22	100	22	100	22	100	22	100
5	0.083	0.38	0.088	0.40	0.098	0.45	0.103	0.47
7	0.176	0.80	0.204	0.93	0.233	1.06	0.204	0.93
11	0.051	0.23	0.042	0.19	0.031	0.14	0.028	0.13
13	0.026	0.12	0.022	0.10	0.017	0.08	0.016	0.07
17	0.010	0.04	0.009	0.04	0.007	0.03	0.006	0.03
19	0.006	0.03	0.006	0.03	0.005	0.02	0.004	0.02
23	0.004	0.02	0.003	0.01	0.003	0.01	0.002	0.01
25	0.003	0.01	0.002	0.01	0.002	0.01	0.002	0.01
29	0.002	0.01	0.002	0.01	0.001	0.01	0.001	0.01
31	0.002	0.01	0.001	0.01	0.001	0.01	0.001	0.00
THDv	0.204	0.93	0.227	1.03	0.256	1.16	0.231	1.05
V_{rms}	22.00	100	22.00	100	22.00	100.01	22.00	100

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.7(ข)) แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 2 ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อเปลี่ยนขนาดของโหลดเชิงเส้น และ ต่อคาปาซิเตอร์

Order (h)	Load 1000 kVA Capacitor 10 Step		Load 1300 kVA Capacitor 11 Step		Load 1700 kVA Capacitor 13 Step		Load 2000 kVA Capacitor 14 Step	
	V	%(or V_1)	V	%(or V_1)	V	%(or V_1)	V	%(or V_1)
1	393.53	100	392.48	100	391.44	100	390.40	100
5	14.29	3.63	15.01	3.83	16.72	4.27	17.53	4.49
7	30.00	7.62	34.71	8.84	39.77	10.16	34.70	8.89
11	8.71	2.21	7.17	1.83	5.32	1.36	4.71	1.21
13	4.37	1.11	3.76	0.96	2.95	0.75	2.66	0.68
17	1.63	0.41	1.45	0.37	1.18	0.30	1.08	0.28
19	1.07	0.27	0.95	0.24	0.78	0.20	0.72	0.18
23	0.61	0.15	0.55	0.14	0.46	0.12	0.42	0.11
25	0.44	0.11	0.40	0.10	0.33	0.08	0.31	0.08
29	0.32	0.08	0.29	0.07	0.24	0.06	0.23	0.06
31	0.26	0.06	0.23	0.06	0.19	0.05	0.18	0.05
THDv	34.70	8.82	38.72	9.87	43.60	11.14	39.28	10.06
V_{rms}	395.05	100.39	394.39	100.49	393.86	100.62	392.37	100.50

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.8(ก) กระแสฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้ขนาดของโหลดเชิงเส้น 1000 kVAและคาปาซิเตอร์ 10 ชุด (เครื่องหมายลบแสดง ทิศกระแสไหลเข้าบัส หรือบัสแรงสูง)

Order (h)	Harmonic Source	System(HV)	Transformer (LV)	Linear Load # 1	Capacitor
	A	A	A	A	A
1	1833.8	55.03	3026.4	1467.1	1173.6
5	- 352.11	- 10.05	- 552.78	43.10	213.11
7	- 242.07	- 15.08	- 829.25	89.99	626.29
11	- 133.87	- 2.78	- 153.17	26.02	285.56
13	- 104.53	- 1.18	- 65.04	13.05	169.34
17	- 64.19	- 0.34	- 18.59	4.88	82.79
19	- 49.52	- 0.20	- 10.86	3.18	60.39
23	- 36.68	- 0.09	- 5.13	1.82	41.82
25	- 29.34	- 0.06	- 3.40	1.31	32.75
29	- 25.67	- 0.04	- 2.15	0.96	27.83
31	- 22.01	- 0.03	- 1.59	0.76	23.61
THDi	470.48	18.38	1010.66	104.14	750.02
I_{rms}	1893.28	58.01	3190.74	1470.8	1392.77

ตารางที่ 7.8(ข) กระแสฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้ขนาดของโหลดเชิงเส้น 1300 kVAและคาปาซิเตอร์ 11 ชุด (เครื่องหมายลบแสดง ทิศกระแสไหลเข้าบัส หรือบัสแรงสูง)

Order (h)	Harmonic Source	System(HV)	Transformer (LV)	Linear Load # 1	Capacitor
	A	A	A	A	A
1	1838.7	61.34	3373.5	1912.32	1287.5
5	- 353.04	- 10.56	- 580.72	59.18	246.27
7	- 242.72	- 17.45	- 959.48	136.08	797.11
11	- 134.23	- 2.29	- 126.16	28.01	258.74
13	- 104.81	- 1.02	- 56.04	14.70	160.51
17	- 64.36	- 0.30	- 16.51	5.66	80.84
19	- 49.65	- 0.18	- 9.70	3.71	59.35
23	- 36.78	- 0.08	- 4.62	2.14	41.40
25	- 29.42	- 0.06	- 3.07	1.55	32.49
29	- 25.74	- 0.04	- 1.94	1.13	27.69
31	- 22.07	- 0.03	- 1.44	0.90	23.51
THDi	471.73	20.55	1130.2	151.91	896.04
I_{rms}	1898.32	64.69	3557.8	1918.34	1568.6

ตารางที่ 7.8(ค) กระแสฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้ขนาดของโหลดเชิงเส้น 1700 kVAและคาปาซิเตอร์ 13 ชุด (เครื่องหมายลบแสดง ทิศกระแสไหลเข้าบัส หรือบัสแรงสูง)

Order (h)	Harmonic Source	System(HV)	Transformer (LV)	Linear Load # 1	Capacitor
	A	A	A	A	A
1	1843.6	69.99	3849.2	2507.3	1517.5
5	- 353.98	- 11.76	- 646.54	86.62	324.04
7	- 243.36	- 19.99	- 1099.2	204.97	1079.2
11	- 134.59	- 1.70	- 93.57	27.32	226.79
13	- 105.09	- 0.80	- 43.92	15.14	148.66
17	- 64.53	- 0.24	- 13.47	6.07	77.96
19	- 49.78	- 0.15	- 7.99	4.02	57.75
23	- 36.87	- 0.07	- 3.84	2.34	40.72
25	- 29.50	- 0.05	- 2.56	1.70	32.06
29	- 25.81	- 0.03	- 1.63	1.25	27.44
31	- 22.12	- 0.02	- 1.21	1.00	23.34
THDi	472.99	23.27	1279.6	224.84	1164.82
I_{rms}	1903.37	73.75	4056.33	2517.5	1913.05

ตารางที่ 7.8(ง) กระแสฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้ขนาดของโหลดเชิงเส้น 2000 kVAและคาปาซิเตอร์ 14 ชุด (เครื่องหมายลบแสดง ทิศกระแสไหลเข้าบัส หรือบัสแรงสูง)

Order (h)	Harmonic Source	System(HV)	Transformer (LV)	Linear Load # 1	Capacitor
	A	A	A	A	A
1	1848..6	76.62	4214.0	2957.7	1629.9
5	- 354.93	- 12.33	- 677.99	107.44	365.94
7	- 244.02	- 17.44	- 959.16	211.53	1014.16
11	- 134.95	- 1.51	- 82.87	28.61	216.31
13	- 105.37	- 0.72	- 39.67	16.18	144.61
17	- 64.70	- 0.22	- 12.35	6.58	76.99
19	- 49.91	- 0.13	- 7.35	4.38	57.24
23	- 36.97	- 0.06	- 3.55	2.56	40.52
25	- 29.58	- 0.04	- 2.37	1.86	31.94
29	- 25.88	- 0.03	- 1.51	1.37	27.39
31	- 22.18	- 0.02	- 1.12	1.09	23.31
THDi	474.25	21.42	1178.27	239.67	1115.03
I_{rms}	1908.46	79.56	4375.65	2967.46	1974.83

ผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเมื่อต้องการปรับปรุงตัวประกอบกำลังด้วยการติดตั้งชุดคาปาซิเตอร์ จะพบว่ามีความผิดเพี้ยนทางด้านแรงดันฮาร์มอนิกมากขึ้น และ ที่สำคัญคือมีการขยายกระแสฮาร์มอนิกทำให้กระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์มีขนาดเพิ่มขึ้นมาก ตารางที่ 7.9 สรุปความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม

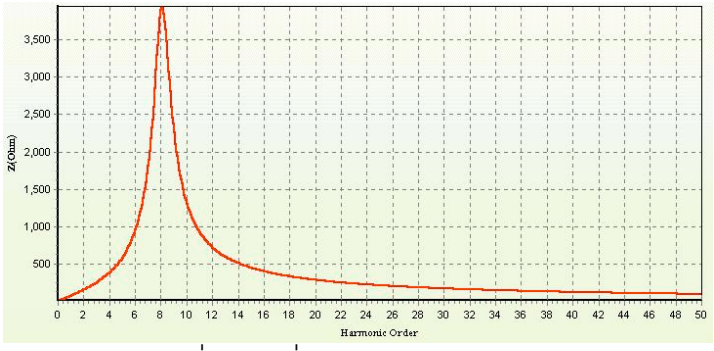
ตารางที่ 7.9(ก) สรุปแรงดันผิดเพี้ยนรวมในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 1 เมื่อติดตั้งชุดคาปาซิเตอร์

Bus	THD_V (%)			
	Load,1000 kVA Cap 10 step	Load,1300 kVA Cap 11 step	Load,1700 kVA Cap13 step	Load,2000 kVA Cap 14 step
Bus 1 (HV)	0.93	1.03	1.16	1.05
Bus 2 (LV)	8.82	9.87	11.14	10.06

ตารางที่ 7.9(ข) สรุปกระแสผิดเพี้ยนรวมในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 1 เมื่อติดตั้งชุดคาปาซิเตอร์

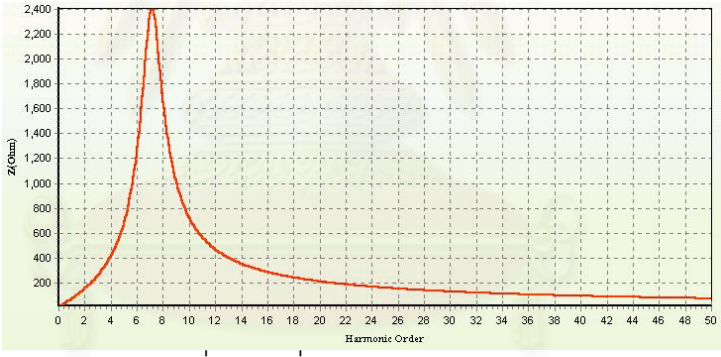
Equipment	THD_I							
	Load,1000 kVA Cap 10 step		Load,1300 kVA Cap 11 step		Load,1700 kVA Cap 13 step		Load,2000 kVA Cap 14 step	
	A	%of I_1	A	%of I_1	A	%of I_1	A	%of I_1
System (HV)	18.38	33.39	20.55	33.50	23.27	33.24	21.42	27.96
Transformer (LV)	1010	33.39	1130	33.50	1279	33.24	1178	27.96
Linear Load	104.1	7.10	151.9	7.94	224.8	8.97	239.7	8.10
Capacitor	750.0	63.91	896.0	69.60	1164	76.76	1115	68.41

การวิเคราะห์สภาวะการเกิดเรโซแนนซ์จะพิจารณาอิมพีแดนซ์สมมูลที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเห็น ดังแสดงในรูปที่ 7.2 -7.5 เป็นอิมพีแดนซ์สมมูลที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเห็นเมื่อมีการเปลี่ยนโหลดและชุดคาปาซิเตอร์ ซึ่งสรุปว่ายิ่งโหลดมีขนาดมากขึ้นต้องใช้จำนวนชุดคาปาซิเตอร์มากขึ้นในการปรับปรุงตัวประกอบกำลังจุดเรโซแนนซ์จะเลื่อนเข้าใกล้ลำดับฮาร์มอนิกที่ 7 มากยิ่งขึ้นจึงมีการขยายกระแสที่ลำดับฮาร์มอนิกที่ 7 มากยิ่งขึ้น การขยายกระแสแสดงดังรูปที่ 7.6-7.9



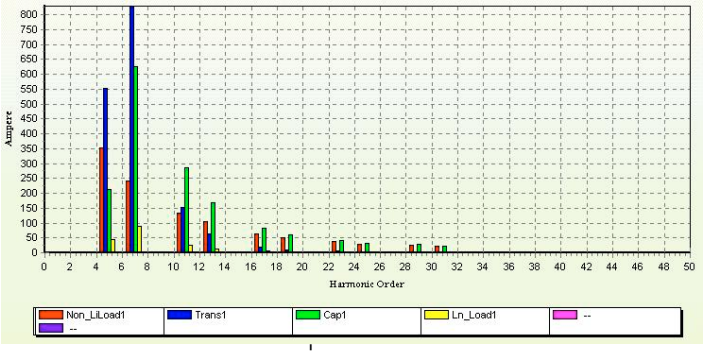
รูปที่ 7.2 อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส 2 เมื่อโหลดมีขนาด 1000 kVA, คาปาซิเตอร์ 10 ชุด

รูปที่ 7.3 อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส 2 เมื่อโหลดมีขนาด 1300 kVA, คาปาซิเตอร์ 11 ชุด

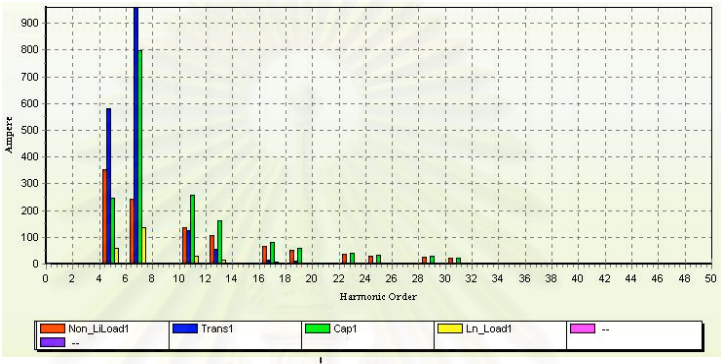


รูปที่ 7.4 อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส 2 เมื่อโหลดมีขนาด 1700 kVA, คาปาซิเตอร์ 13 ชุด

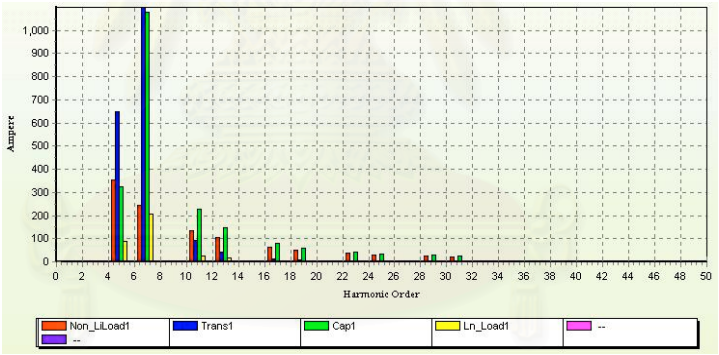
รูปที่ 7.5 อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส 2 เมื่อโหลดมีขนาด 2000 kVA, คาปาซิเตอร์ 14 ชุด



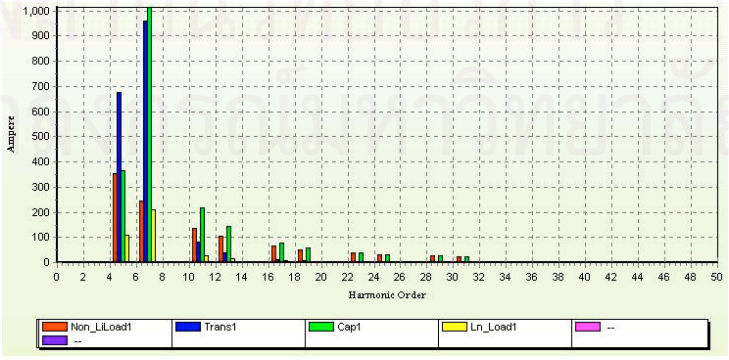
รูปที่ 7.6 ขนาดของกระแสในอุปกรณ์ เมื่อโหลดมีขนาด 1000 kVA, คาปาซิเตอร์ 10 ชุด



รูปที่ 7.7 ขนาดของกระแสในอุปกรณ์ เมื่อโหลดมีขนาด 1300 kVA, คาปาซิเตอร์ 11 ชุด



รูปที่ 7.8 ขนาดของกระแสในอุปกรณ์ เมื่อโหลดมีขนาด 1700 kVA, คาปาซิเตอร์ 13 ชุด



รูปที่ 7.9 ขนาดของกระแสในอุปกรณ์ เมื่อโหลดมีขนาด 2000 kVA, คาปาซิเตอร์ 14 ชุด

7.1.3 ระบบต่อตัวกรองฮาร์มอนิกแทนคาปาซิเตอร์เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

การปรับปรุงตัวประกอบกำลังในระบบที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกนิยมใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกปรับคลื่นเดี่ยว ถ้ามีปริมาณฮาร์มอนิกไม่มากและต้องการเน้นการปรับปรุงตัวประกอบกำลังเป็นหลักจะใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกปรับคลื่นเดี่ยวประเภทดีจูน แต่ถ้าต้องการกรองฮาร์มอนิกโดยเฉพาะจะใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกปรับคลื่นเดี่ยวประเภทจูน ในที่นี้ต้องการปรับปรุงตัวประกอบกำลังจึงเลือกใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบดีจูน

ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบดีจูนในโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น สามารถเลือกใช้แบบปรับจำนวนชุดอัตโนมัติหรือปรับเองได้เช่นเดียวกับชุดคาปาซิเตอร์ ในที่นี้เลือกใช้แบบปรับอัตโนมัติเพื่อตรวจสอบความถูกต้องและเพื่อความสะดวก ข้อมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกประเภทดีจูนที่ใช้ คือ เลือกพิกัดแรงดัน 440 โวลต์ กำหนดกำลังรีแอคทีฟ ชุดละ 100 kVar %L = 7 %, QF = 60 มีทั้งหมด 15 ชุด จากค่ากำลังรีแอคทีฟที่ต้องการเพื่อการปรับปรุงตัวประกอบกำลังในตารางที่ 7.6 เปรียบเทียบกับจำนวนชุดของตัวกรองที่ต้องใช้เมื่อใช้โปรแกรมคำนวณและกำลังรีแอคทีฟที่ได้จริงแสดงในตารางที่ 7.10

ตารางที่ 7.10 เปรียบเทียบผลของโปรแกรมในการหากำลังรีแอคทีฟเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง

Linear Load (kW)	Reactive Power From Detune Filter (kVar)			
	Calculated	Program		
		steps	KVar of steps	KVar Used
1000	758.37	9	900	773.42
1300	859.48	10	1000	854.98
1700	994.31	12	1200	1020.92
2000	1095.42	13	1300	1100.35

การคำนวณหากำลังรีแอคทีฟที่ได้จริงเพื่อใช้ปรับปรุงตัวประกอบกำลัง แสดงดังสมการที่ 7.3

$$Q_F = Qcr \times \left(\frac{Vs}{Vcr}\right)^2 \times \left(\frac{100}{100 - \%X_L}\right) \qquad (7.3)$$

เช่น จำนวนชุด(Step) = 10 ชุด

$$Q_F = 1000 \times \left(\frac{392.35}{440}\right)^2 \times \left(\frac{100}{100 - 7}\right)$$

$$= 773.42 \text{ kVar}$$

จำนวนชุดของตัวกรองที่ได้จากโปรแกรมจึงใช้ได้ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 7.11-7.12

ตารางที่ 7.11(ก) แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อเปลี่ยนขนาดของโหลดเชิงเส้น และ ตัวกรองดีจูน

Order (h)	Load 1000 kVA Detune Filter 9 Steps		Load 1300 kVA Detune Filter 10 Steps		Load 1700 kVA Detune Filter 12 Steps		Load 2000 kVA Detune Filter 13 Steps	
	kV	%(or V_1)	kV	%(or V_1)	kV	%(or V_1)	kV	%(or V_1)
1	22	100	22	100	22	100	22	100
5	0.036	0.16	0.035	0.16	0.033	0.15	0.032	0.14
7	0.040	0.18	0.039	0.18	0.0.7	0.17	0.36	0.16
11	0.036	0.16	0.035	0.16	0.033	0.15	0.032	0.15
13	0.033	0.15	0.032	0.15	0.031	0.14	0.029	0.13
17	0.026	0.12	0.026	0.12	0.024	0.11	0.023	0.11
19	0.023	0.10	0.022	0.10	0.021	0.09	0.020	0.09
23	0.020	0.09	0.019	0.09	0.018	0.08	0.017	0.08
25	0.017	0.08	0.017	0.08	0.015	0.07	0.015	0.07
29	0.017	0.08	0.016	0.07	0.015	0.07	0.014	0.06
31	0.016	0.07	0.015	0.07	0.014	0.06	0.012	0.06
THDv	0.0879	0.40	0.085	0.39	0.0801	0.36	0.0774	0.35
V_{rms}	22	100	22	100	22	100	22	100

ตารางที่ 7.11(ข) แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 1 ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อเปลี่ยนขนาดของโหลดเชิงเส้น และ ตัวกรองดีจูน

Order (h)	Load 1000 kVA Detune Filter 9 Steps		Load 1300 kVA Detune Filter 10 Steps		Load 1700 kVA Detune Filter 12 Steps		Load 2000 kVA Detune Filter 13 Steps	
	V	%(or V_1)	V	%(or V_1)	V	%(or V_1)	V	%(or V_1)
1	393.35	100	392.35	100	391.38	100	390.38	100
5	6.6	1.57	5.94	1.51	5.56	1.42	5.38	1.38
7	6.75	1.72	6.57	1.67	6.25	1.60	6.09	1.56
11	6.09	1.55	5.93	1.51	5.64	1.44	5.49	1.41
13	5.63	1.43	5.47	1.40	5.20	1.33	5.05	1.29
17	4.51	1.15	4.36	1.11	4.11	1.05	3.97	1.02
19	3.87	0.98	3.73	0.95	3.51	0.90	3.37	0.86
23	3.44	0.87	3.29	0.84	3.06	0.78	2.92	0.75
25	2.97	0.75	2.83	0.72	2.62	0.67	2.49	0.64
29	2.7	0.75	2.81	0.72	2.57	0.66	2.42	0.62
31	2.70	0.69	2.54	0.65	2.31	0.59	2.17	0.56
THDv	14.97	3.81	14.48	3.69	13.64	3.49	13.19	3.38
V_{rms}	393.64	100.07	392.61	100.07	391.62	100.06	390.60	100.06

ตารางที่ 7.12(ก) กระแสฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้ขนาดของโหลดเชิงเส้น 1000 kVAและตัวกรองดีจูน 9 ชุด (เครื่องหมายลบแสดงทิศกระแสไหลเข้าบัสหรือบัสแรงสูง)

Order (h)	Harmonic Source	System(HV)	Transformer (LV)	Linear Load # 1	Detune Filter
	A	A	A	A	A
1	1834.72	55.07	3028.9	1467.7	1135.17
5	- 352.27	- 4.33	- 238.13	18.59	110.17
7	- 242.18	- 3.39	- 186.45	20.25	52.17
11	- 133.93	- 1.95	- 107.08	18.21	24.06
13	- 104.58	- 1.52	- 83.85	16.84	18.15
17	- 64.22	- 0.93	- 51.34	13.47	10.70
19	- 49.54	- 0.72	- 39.45	11.57	8.14
23	- 36.69	- 0.53	- 28.92	10.26	5.89
25	- 29.36	- 0.42	- 22.99	8.87	4.66
29	- 25.69	- 0.36	- 19.82	8.87	3.99
31	- 22.02	- 0.31	- 16.85	8.06	3.39
THDi	470.69	6.20	340.89	44.87	126.61
I_{rms}	1894.13	55.42	3048.11	1468.46	1142.21

ตารางที่ 7.12(ข) กระแสฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้ขนาดของโหลดเชิงเส้น 1300 kVAและตัวกรองดีจูน 10 ชุด(เครื่องหมายลบแสดงทิศกระแสไหลเข้าบัสหรือบัสแรงสูง)

Order (h)	Harmonic Source	System(HV)	Transformer (LV)	Linear Load # 1	Detune Filter
	A	A	A	A	A
1	1839.4	61.44	3379.0	1912.99	1258.0
5	- 353.17	- 4.18	- 229.86	23.44	118.16
7	- 242.80	- 3.30	- 181.56	25.77	56.44
11	- 134.28	- 1.90	- 104.26	23.17	26.03
13	- 104.85	- 1.48	- 81.50	21.39	19.60
17	- 64.38	- 0.90	- 49.65	17.02	11.50
19	- 49.66	- 0.69	- 38.04	14.57	8.72
23	- 36.79	- 0.50	- 27.69	12.84	6.26
25	- 29.43	- 0.40	- 21.92	11.05	4.94
29	- 25.75	- 0.34	- 18.75	10.96	4.20
31	- 22.07	- 0.29	- 15.87	9.92	3.55
THDi	471.89	6.00	330.27	56.70	136.05
I_{rms}	1898.98	61.73	3395.13	1913.83	1265.42

ตารางที่ 7.12(ค) กระแสฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้ขนาดของโหลดเชิงเส้น 1700 kVAและตัวกรองดีจูน 12 ชุด(เครื่องหมายลบแสดงทิศกระแสไหลเข้าบัสหรือบัสแรงสูง)

Order (h)	Harmonic Source	System(HV)	Transformer (LV)	Linear Load # 1	Detune Filter
	A	A	A	A	A
1	1843.95	70.12	3856.7	2507.7	1505.95
5	- 354.04	- 3.91	- 214.94	28.81	132.58
7	- 234.40	- 3.14	- 172.62	32.20	64.39
11	- 134.61	- 1.80	- 99.26	28.99	29.73
13	- 105.11	- 1.41	- 77.41	26.69	22.34
17	- 64.54	- 0.85	- 46.82	21.20	13.01
19	- 49.79	- 0.65	- 35.72	17.98	9.82
23	- 36.88	- 0.47	- 25.75	15.69	6.99
25	- 29.50	- 0.37	- 20.28	13.43	5.48
29	- 25.82	- 0.31	- 17.16	13.18	4.61
31	- 22.13	- 0.26	- 14.45	11.86	3.87
THDi	473.06	5.66	311.26	70.21	153.26
I_{rms}	1903.65	70.35	3869.26	2508.76	1513.77

ตารางที่ 7.12(ง) กระแสฮาร์มอนิกจากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 1 เมื่อใช้ขนาดของโหลดเชิงเส้น 2000 kVAและตัวกรองดีจูน 13 ชุด (เครื่องหมายลบแสดงทิศกระแสไหลเข้าบัสหรือบัสแรงสูง)

Order (h)	Harmonic Source	System(HV)	Transformer (LV)	Linear Load # 1	Detune Filter
	A	A	A	A	A
1	1848.7	76.76	4222.0	2957.9	1627.25
5	- 354.95	- 3.79	- 208.19	32.99	139.12
7	- 244.03	- 3.06	- 168.29	37.12	68.01
11	- 134.96	- 1.76	- 96.60	33.36	31.35
13	- 105.38	- 1.37	- 75.14	30.64	23.49
17	- 64.70	- 0.82	- 45.15	24.06	13.59
19	- 49.91	- 0.62	- 34.32	20.43	10.22
23	- 36.97	- 0.45	- 24.54	17.68	7.22
25	- 29.58	- 0.35	- 19.25	15.08	5.64
29	- 25.88	- 0.29	- 16.15	14.67	4.70
31	- 22.18	- 0.25	- 13.54	13.15	3.93
THDi	474.28	5.49	302.12	80.27	161.01
I_{rms}	1908.57	76.96	4232.8	2959.01	1635.24

ผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเมื่อต้องการปรับปรุงตัวประกอบกำลังด้วยการติดตั้งชุดตัวกรองดีจูนแทนการติดตั้งชุดคาปาซิเตอร์ จะพบว่ามีความผิดเพี้ยนทางด้านแรงดันฮาร์มอนิกน้อยลง และ กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์ลดลงมาอยู่ในระดับที่อุปกรณ์ยอมรับได้ สรุปความผิดเพี้ยนทางด้านแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกรวมในกรณีต่างๆได้ดังตารางที่ 7.13

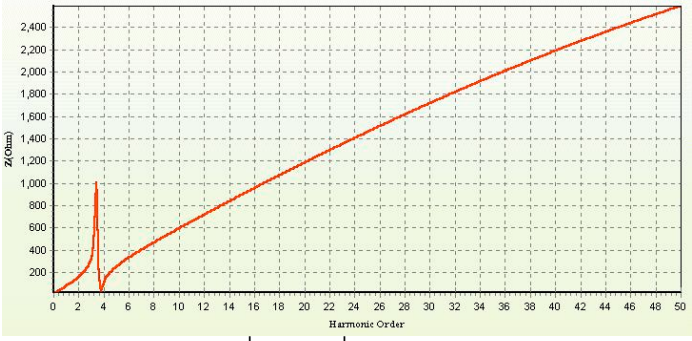
ตารางที่ 7.13(ก) สรุปแรงดันผิดเพี้ยนรวมในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 1 เมื่อติดตั้งชุดตัวกรองฮาร์มอนิกดีจูนแทนชุดคาปาซิเตอร์

Bus	THD_V (%)			
	Load,1000 kVA Detune 9 steps	Load,1300 kVA Detune 10 steps	Load,1700 kVA Detune 12 steps	Load,2000 kVA Detune 13 steps
Bus 1 (HV)	0.40	0.39	0.36	0.35
Bus 2 (LV)	3.81	3.69	3.49	3.38

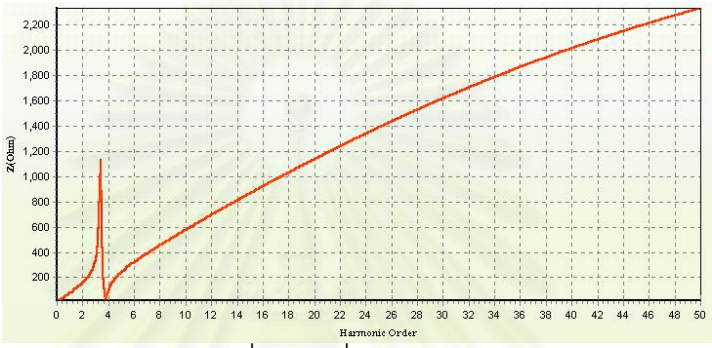
ตารางที่ 7.13(ข) สรุปแรงดันผิดเพี้ยนรวมในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 1 เมื่อติดตั้งชุดตัวกรองฮาร์มอนิกดีจูนแทนชุดคาปาซิเตอร์

Equipment	THD_I							
	Load,1000 kVA Detune 9 steps		Load,1300 kVA Detune 10 steps		Load,1700 kVA Detune 12 steps		Load,2000 kVA Detune 13 steps	
	A	%of I_1	A	%of I_1	A	%of I_1	A	%of I_1
System (HV)	6.20	11.25	6.00	9.77	5.66	8.07	5.49	7.16
Transformer (LV)	340.9	11.25	330.3	9.77	311.3	8.07	302.1	7.16
Linear Load	44.87	3.06	56.70	2.96	70.21	2.80	80.27	2.71
Detune Filter	126.6	11.15	136.1	10.81	153.3	10.18	161.0	9.89

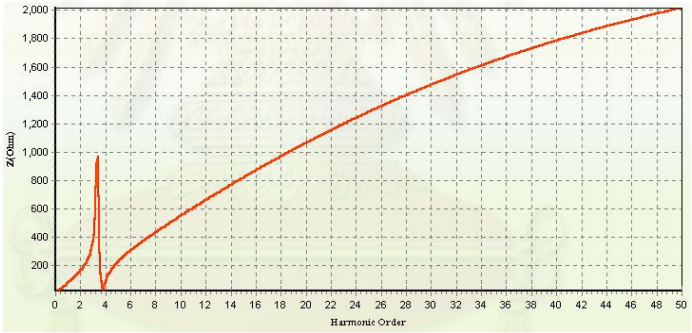
การวิเคราะห์สภาวะการเกิดเรโซแนนซ์จะพิจารณาอิมพีแดนซ์สมมูลที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเห็น ดังแสดงในรูปที่ 7.10 -7.13 เป็นอิมพีแดนซ์สมมูลที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเห็นเมื่อมีการเปลี่ยนโหลดและชุดตัวกรองดีจูน ซึ่งสรุปว่ายิ่งโหลดมีขนาดมากขึ้นต้องใช้จำนวนชุดตัวกรองดีจูนมากขึ้นในการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง จุดเรโซแนนซ์จะถูกตั้งอยู่ที่ ลำดับฮาร์มอนิกประมาณ 3.78 ดังนั้นจึงไม่มีการขยายกระแสในลำดับฮาร์มอนิกที่สำคัญ การขยายกระแสแสดงดังรูปที่ 7.14 - 7.17 เนื่องจากการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบดีจูนใช้เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังเป็นหลักดังนั้นจึงกรองฮาร์มอนิกได้เพียงบางส่วน แต่จะไม่เกิดการเรโซแนนซ์ในลำดับฮาร์มอนิกที่สำคัญถ้าต้องการกรองฮาร์มอนิกโดยเฉพาะให้ใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบจูน



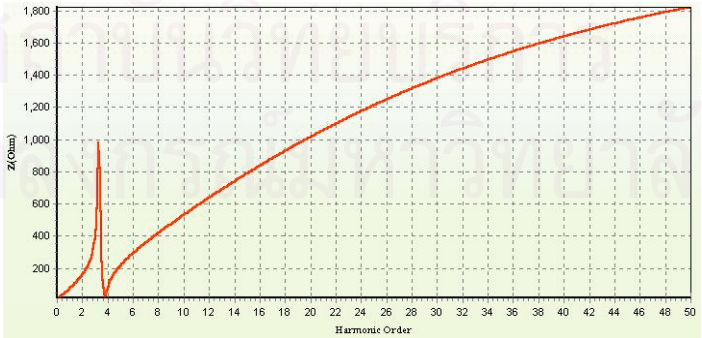
รูปที่ 7.10 อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส 2 เมื่อโหลดมีขนาด 1000 kVA, ดีจูน 9 ชุด



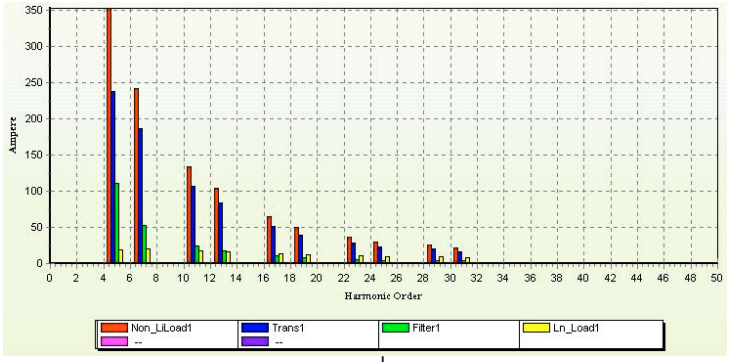
รูปที่ 7.11 อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส 2 เมื่อโหลดมีขนาด 1300 kVA, ดีจูน 10 ชุด



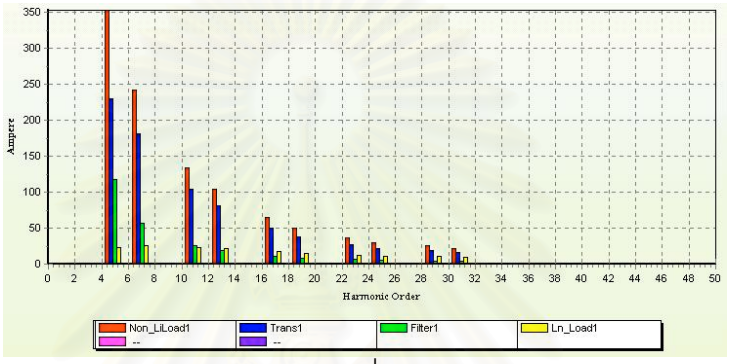
รูปที่ 7.12 อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส 2 เมื่อโหลดมีขนาด 1700 kVA, ดีจูน 12 ชุด



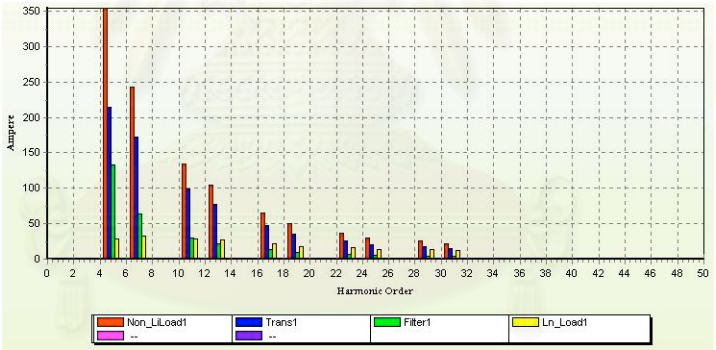
รูปที่ 7.13 อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส 2 เมื่อโหลดมีขนาด 2000 kVA, ดีจูน 13 ชุด



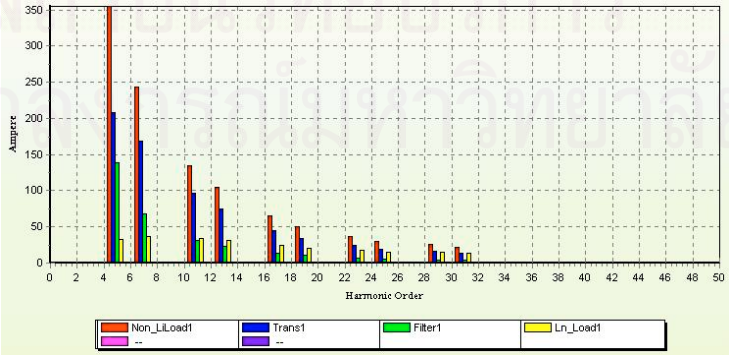
รูปที่ 7.14 ขนาดของกระแสในอุปกรณ์ เมื่อโหลดมีขนาด 1000 kVA, ดีจูน 9 ชุด



รูปที่ 7.15 ขนาดของกระแสในอุปกรณ์ เมื่อโหลดมีขนาด 1300 kVA, ดีจูน 10 ชุด



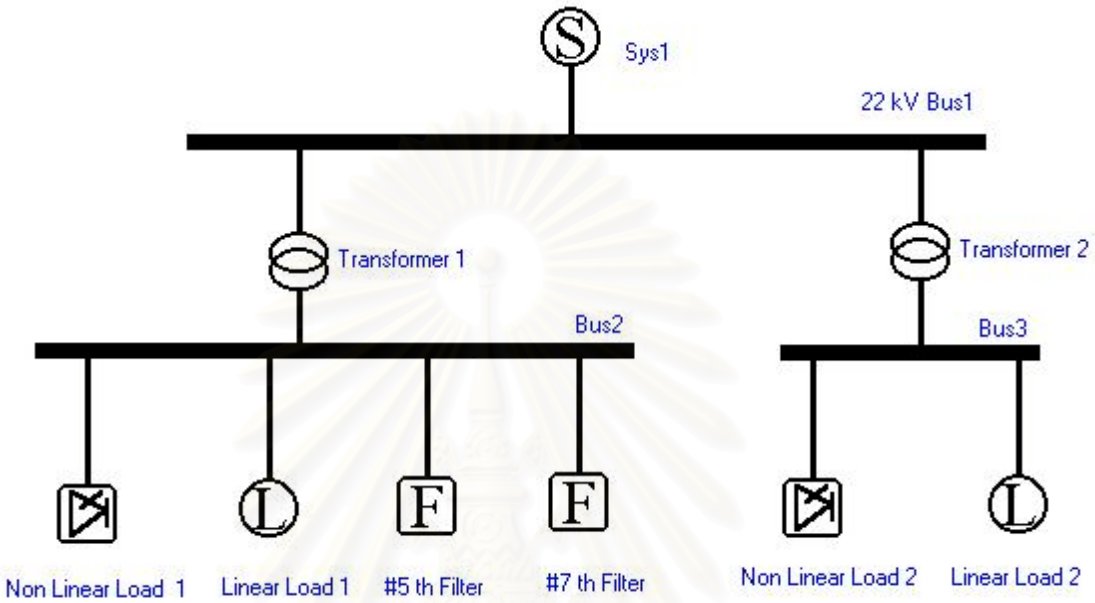
รูปที่ 7.16 ขนาดของกระแสในอุปกรณ์ เมื่อโหลดมีขนาด 1700 kVA, ดีจูน 12 ชุด



รูปที่ 7.17 ขนาดของกระแสในอุปกรณ์ เมื่อโหลดมีขนาด 2000 kVA, ดีจูน 13 ชุด

7.2 ตัวอย่างที่ 2

ศึกษาถึงผลกระทบของฮาร์มอนิกจากโรงงานอุตสาหกรรมข้างเคียงกันที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกทั้งสองโรงงานแต่ติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกโรงงานเดียว ไดอะแกรมของโรงงานที่ต้องการศึกษาแสดงดังรูปที่ 7.18 และข้อมูลของอุปกรณ์แสดงในตารางที่ 7.14



รูปที่ 7.18 ไดอะแกรมของโรงงานสำหรับตัวอย่างที่ 2

ตารางที่ 7.14(ก) ข้อมูลเบื้องต้นของระบบไฟฟ้า,หม้อแปลงไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

System	Transformer #1, #2	SPC 6 Pulses #1	SPC 6 Pulses #2
22 kV, 50 Hz MVA_{SC} = 500 MVA X/R ratio =10	22 kV/400 V 3000 kVA %Z = 6, Loss 30 kW Typical model, No Skin eff	1250 kVA PF = 0.8 lagging	1500 kVA PF = 0.8 lagging
Linear Load #1	**Linear Load #2**	**5 th Filter**	**7 th Filter**
1250 kVA PF = 0.8 lagging Typical model, No Skin eff	1000 kVA PF = 0.8 lagging Typical model, No Skin eff	Vrated 440 V Q_{cr}=750 kVar TP = 4.8 QF = 60	Vrated 440 V Q_{cr}=600 kVar TP = 6.8 QF = 60

ตารางที่ 7.14(ข) ข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกจาก คอนเวอร์เตอร์ทั้งสองตัว

Harm Order (h)	Mag (%of I_1)	Harm Order (h)	Mag (%of I_1)
5	19.2	19	2.7
7	13.2	23	2.0
11	7.3	25	1.6
13	5.7	29	1.4
17	3.5	31	1.2

ผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจากไดอะแกรมของโรงงานอุตสาหกรรมที่สร้างขึ้น แสดงได้ใน ตารางที่ 7.15 -7.16

ตารางที่ 7.15 แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 2

Order (h)	Bus 1		Bus 2		Bus 3	
	kV	%(or V_1)	V	%(or V_1)	V	%(or V_1)
1	22	100	394.39	100	385.80	100
5	0.072	0.33	2.71	0.69	12.84	3.33
7	0.061	0.28	1.12	0.28	12.17	3.16
11	0.070	0.32	4.40	1.12	10.76	2.79
13	0.066	0.30	4.32	1.10	9.87	2.56
17	0.053	0.24	3.63	0.92	7.79	2.02
19	0.045	0.21	3.15	0.80	6.65	1.72
23	0.040	0.18	2.83	0.72	5.81	1.51
25	0.034	0.16	2.45	0.62	4.99	1.29
29	0.034	0.15	2.46	0.62	4.91	1.27
31	0.030	0.14	2.23	0.57	4.43	1.15
THDv	0.167	0.76	9.74	2.47	27.08	7.02
V_{rms}	22	100	394.51	100.03	386.74	100.25

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.16 กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์ ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 2

Order (h)	Non Linear Load #1	Non Linear Load #2	System	Transformer #1	Transformer #2	5 th Tune Filter	7 th Tune Filter	Linear Load #1	Linear Load #2
	A	A	A	A	A	A	A	A	A
1	1829.8	2244.7	122.63	3354.4	3537.9	922.13	721.29	1829.8	1496.52
5	- 351.33	- 431.00	- 8.60	- 51.80	- 421.83	384.99	52.75	10.17	40.28
7	- 241.54	- 296.31	- 5.25	3.29	- 288.94	15.53	225.50	4.17	37.99
11	- 133.58	- 163.87	- 3.81	- 52.08	- 157.77	25.47	53.57	16.37	33.46
13	- 104.30	- 127.95	- 3.02	- 44.11	- 122.19	19.84	37.88	16.07	30.69
17	- 64.05	- 78.57	- 1.86	- 28.79	- 73.56	11.96	21.04	13.49	24.20
19	- 49.41	- 60.61	- 1.43	- 22.46	- 56.09	9.13	15.74	11.71	20.64
23	- 36.60	- 44.90	- 1.04	- 16.76	- 40.49	6.63	11.15	10.51	18.05
25	- 29.28	- 35.92	- 0.82	- 13.39	- 31.93	5.25	8.76	9.10	15.48
29	- 25.62	- 31.43	- 0.70	- 11.63	- 27.10	4.49	7.42	9.13	15.25
31	- 21.96	- 26.94	- 0.59	- 9.91	- 22.85	3.81	6.27	8.30	13.75
THD_I	469.44	575.89	11.54	96.84	560.11	351.29	242.74	36.22	84.41
I_{rms}	1889.12	2317.47	123.18	3355.8	3581.96	989.78	761.04	1830.22	1498.90

จากการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในตัวอย่างที่ 2 พบว่าโรงงานที่ 1 มีความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกน้อยกว่าโรงงานที่ 2 เพราะมีการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิก แต่กระแสที่ไหลเข้าตัวกรองฮาร์มอนิกทั้ง 2 ตัวไม่ได้มาจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในโรงงานที่ 1 เท่านั้นแต่ยังมาจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกของโรงงานที่ 2 ด้วย ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าตัวกรองฮาร์มอนิกที่มาจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกจากโรงงานที่ 2 แสดงในตารางที่ 7.17

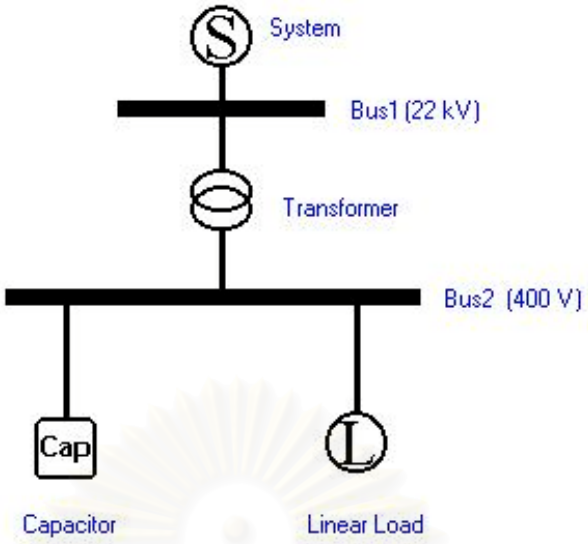
ตารางที่ 7.17 กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าตัวกรองฮาร์มอนิก ที่มาจากแหล่งกำเนิดในโรงงานที่ 2

Order (h)	5 th Tune Filter	7 th Tune Filter	Order (h)	5 th Tune Filter	7 th Tune Filter
	A	A		A	A
5	34.62	5.23	23	0.62	1.04
7	1.54	22.30	25	0.48	0.81
11	2.50	5.25	29	0.40	0.67
13	1.93	3.69	31	0.34	0.56
17	1.15	2.02	THD_I	-	-
19	0.87	1.50	I_{rms}	-	-

ดังนั้นตัวกรองฮาร์มอนิกจากโรงงานที่ 1 ต้องรับภาระกระแสฮาร์มอนิกจากโรงงานที่ 2 ด้วย ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณไม่มากเมื่อเทียบกับกระแสที่รับจากแหล่งฮาร์มอนิกในโรงงานที่ 1 แต่ถ้าแหล่งฮาร์มอนิกในโรงงานที่ 2 มีการขยายกระแสจะทำให้กระแสที่ไหลเข้าตัวกรองในโรงงานที่ 1 มากขึ้น

7.3 **ตัวอย่างที่** 3

ในโรงงานที่ไม่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเลยแต่ต่อยู่กับระบบไฟฟ้าที่มีความผิดเพี้ยนทางด้านแรงดันฮาร์มอนิกอยู่ก่อน เมื่อโรงงานมีการติดตั้งคาปาซิเตอร์เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังจะวิเคราะห์ผลของฮาร์มอนิกที่มีต่อโรงงาน ไดอะแกรมของโรงงานแสดงในรูปที่ 7.19 ข้อมูลของอุปกรณ์แสดงในตารางที่ 7.18 และใช้ข้อมูลค่าจำกัดทางด้านความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกของประเทศไทยที่ได้ร่างขึ้นเป็นแรงดันฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้าก่อนต่อระบบโรงงาน ซึ่งจะคิดเฉพาะแรงดันฮาร์มอนิกลำดับคี่และไม่เป็นจำนวนเท่าของ 3 ค่าจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกที่แรงดัน 22 kV คือ 3%



รูปที่ 7.19 ไดอะแกรมของโรงงานสำหรับตัวอย่างที่ 3

ตารางที่ 7.18(ก) ข้อมูลเบื้องต้นของระบบไฟฟ้า,หม้อแปลงไฟฟ้า ในตัวอย่างที่ 3

System	Transformer	Capacitor
22 kV, 50 Hz MVA_{SC} = 300 MVA X/R ratio = 10	22 kV/400 V 2500 kVA %Z = 6, Loss 10 kW Typical model, No Skin eff	Vrated 440 V Q = 60 kVar 10 steps

ตารางที่ 7.18(ข) ข้อมูลโหลดเชิงเส้น 24 ชั่วโมง, PF = 08 lagging

Hour	kVA	Hour	kVA	Hour	kVA	Hour	kVA
1	125	7	375	13	1250	19	375
2	125	8	1250	14	1250	20	250
3	125	9	1250	15	1250	21	125
4	125	10	1250	16	1250	22	125
5	125	11	1250	17	1250	23	125
6	125	12	1250	18	375	24	125

จำนวนชุดใช้งานของคาปาซิเตอร์ขึ้นกับจำนวนโหลดในแต่ละช่วงเวลาโดยจะตั้งให้ปรับปรุงตัวประกอบกำลังอัตโนมัติ และ ต้องการตัวประกอบกำลัง 0.95 การหาจำนวนชุดคาปาซิเตอร์ทำเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 1 ผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจะแสดงที่ค่าโหลด 4 ระดับคือ 125, 250, 375 และ 1250 kVA

ตารางที่ 7.19(ก) แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 3

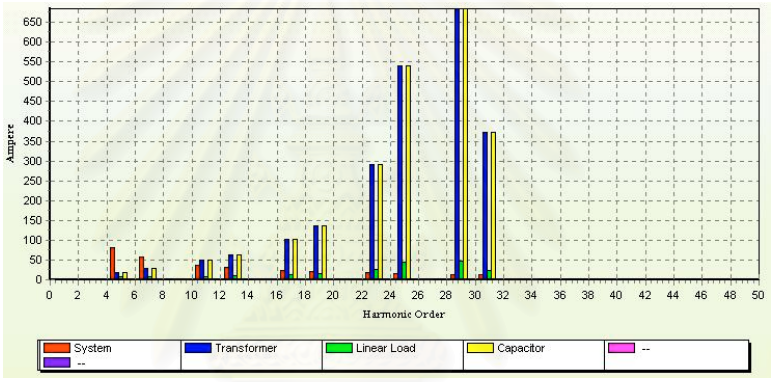
Order (h)	125 kVA				250 kVA				375 kVA				1250 kVA			
	Bus 1		Bus 2		Bus 1		Bus 2		Bus 1		Bus 2		Bus 1		Bus 2	
	kV	% of V1	V	% of V1	kV	% of V1	V	% of V1	kV	% of V1	V	% of V1	kV	% of V1	V	% of V1
1	22	100	399.7	100	22	100	399.4	100	22	100	399.1	100	22	100	396.4	100
5	1.15	5.22	21.46	5.37	1.152	5.24	22.17	5.55	1.157	5.26	22.93	5.75	1.191	5.41	28.37	7.16
7	1.15	5.24	22.20	5.55	1.163	5.29	23.81	5.96	1.175	5.34	25.65	6.43	1.277	5.80	44.11	11.13
11	1.17	5.32	24.77	6.20	1.207	5.49	30.56	7.65	1.265	5.75	39.63	9.93	0.809	3.68	37.88	9.56
13	1.18	5.38	26.83	6.71	1.253	5.70	37.62	9.42	1.397	6.35	61.17	15.33	0.886	4.03	18.92	4.77
17	1.23	5.59	33.88	8.48	1.546	7.03	85.55	21.42	0.671	3.05	94.63	23.71	0.950	4.32	8.18	2.06
19	1.27	5.78	40.20	10.06	1.791	8.14	186.9	46.78	0.739	3.36	42.85	10.74	0.964	4.38	6.09	1.54
23	1.47	6.68	70.61	17.67	0.711	3.23	45.68	11.69	0.886	4.03	17.99	4.51	0.979	4.45	3.81	0.96
25	1.77	8.05	120.5	30.16	0.810	3.68	29.70	7.44	0.915	4.16	13.47	3.38	0.983	4.47	3.14	0.79
29	0.52	2.37	131.8	32.98	0.896	4.07	16.24	4.07	0.947	4.30	8.60	2.16	0.989	4.50	2.25	0.57
31	0.587	2.67	67.14	16.80	0.917	4.17	12.96	3.25	0.956	4.35	7.16	1.79	0.991	4.51	1.94	0.49
THD_V	3.801	17.28	215.5	53.92	3.757	17.08	221.7	55.50	3.272	14.87	133.9	33.54	3.195	14.52	68.41	17.26
V_{rms}	22.33	101.5	454.1	113.6	22.32	101.5	456.8	114.4	22.24	101.1	420.9	105.5	22.23	101.1	402.2	101.5

ตารางที่ 7.19(ข) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์ ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 3

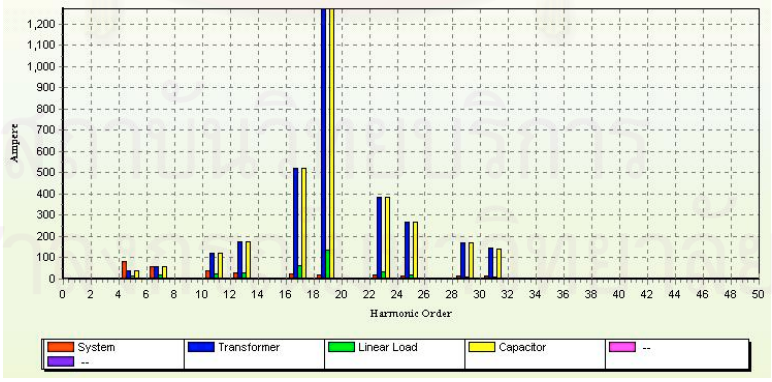
Order (h)	$I_{Vsource}$	125 kVA			250 kVA			375 kVA			1250 kVA		
		Trans	Load	Cap	Trans	Load	Cap	Trans	Load	Cap	Trans	Load	Cap
	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
1	-	148.93	180.42	71.57	298.42	361.40	142.92	448.07	542.53	214.22	1525.7	1820.7	638.31
5	82.21	19.63	7.83	19.20	40.58	16.23	39.68	62.96	25.22	61.55	236.95	105.41	228.42
7	58.73	28.11	8.06	27.81	60.32	17.34	59.65	97.48	28.06	96.39	506.47	163.01	497.20
11	37.37	48.96	8.96	48.75	120.82	22.17	120.29	253.08	43.21	234.03	676.01	139.52	671.02
13	31.62	62.61	9.70	62.41	175.58	27.28	175.02	428.20	66.63	426.83	398.26	69.65	396.15
17	24.18	103.25	12.24	103.07	521.41	61.99	520.45	865.19	103.02	863.58	224.67	30.09	223.97
19	21.64	136.88	14.52	136.68	1272.3	135.37	1270.4	437.67	46.64	437.02	186.79	22.40	186.32
23	17.88	290.91	25.50	290.62	384.58	33.81	384.19	222.32	19.58	222.10	141.40	14.01	141.16
25	16.45	539.77	43.52	539.32	265.93	21.51	265.70	180.95	14.66	180.79	126.57	11.54	126.39
29	14.18	684.66	47.60	684.24	168.63	11.76	168.52	133.97	9.36	133.89	105.08	8.26	104.97
31	13.26	372.63	24.24	372.43	143.88	9.39	143.80	119.22	7.79	119.15	97.00	7.14	96.92
THD_i	120.93	1010.2	77.84	1009.42	1486.32	160.62	1487.07	1143.03	145.83	1140.59	1034.45	252.70	1023.61
I_{rms}	-	1021.1	196.50	1011.95	1515.99	394.49	1490.93	1227.71	561.78	1160.53	1843.35	1838.17	1206.33

จากการวิเคราะห์จะพบว่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทั้งแรงดันฮาร์มอนิกและกระแสฮาร์มอนิกมีค่ามาก แม้แต่ที่ลำดับฮาร์มอนิกสูง ทั้งนี้เพราะได้สมมติความผิดเพี้ยนทางด้านแรงดันของระบบไฟฟ้าก่อนการต่อกับระบบโรงงานไว้เท่ากันที่ 3 % แต่ในความเป็นจริงความผิดเพี้ยนที่ลำดับสูงจะน้อยกว่านี้ดังนั้นจึงมีผลกระทบน้อยกว่าที่แสดง การขยายของกระแสฮาร์มอนิกเกิดจากสภาวะเรโซแนนซ์แบบอนุกรมที่แหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์มอนิกเห็น ดังรูปที่ 7.20 - 7.27

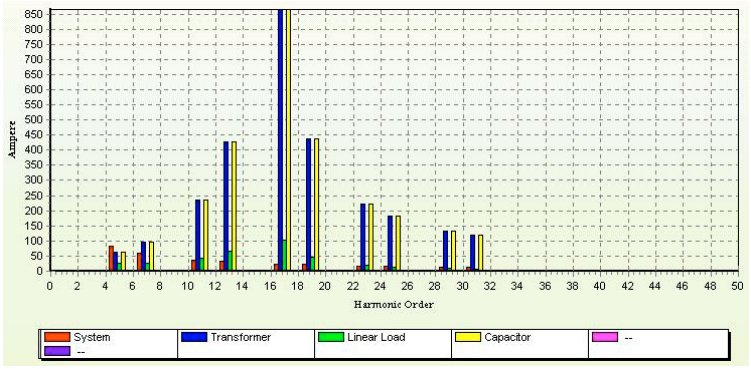
ผลการวิเคราะห์สรุปว่าแรงดันผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกที่ระบบไฟฟ้ามีก่อนต่อเข้ากับระบบของโรงงานสามารถก่อให้เกิดความเสียหายต่อโรงงานแม้ว่าโรงงานนั้นจะไม่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอยู่เลยและแรงดันที่ผิดเพี้ยนก็อยู่ในข้อจำกัดของการไฟฟ้าที่ร่างขึ้น ดังนั้นก่อนการติดตั้งชุดคาปาซิเตอร์เพื่อใช้ปรับปรุงตัวประกอบกำลังควรศึกษาถึงผลกระทบทางด้านฮาร์มอนิกอย่างละเอียดก่อนการติดตั้ง



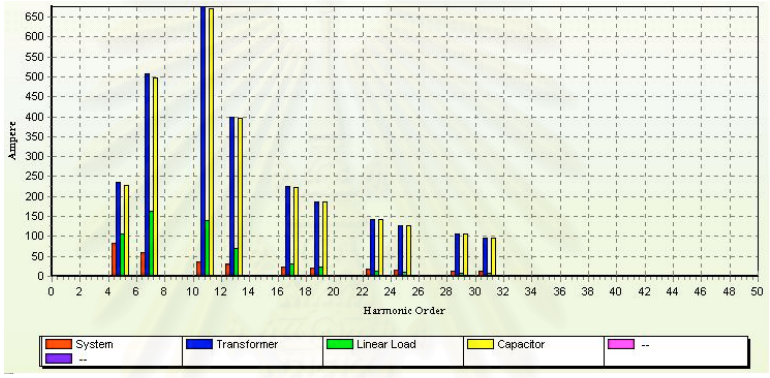
รูปที่ 7.20 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดที่ไหลเข้าอุปกรณ์เมื่อโหลดมีขนาด 125 kVA, ในตัวอย่างที่ 3



รูปที่ 7.21 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดที่ไหลเข้าอุปกรณ์เมื่อโหลดมีขนาด 225 kVA, ในตัวอย่างที่ 3

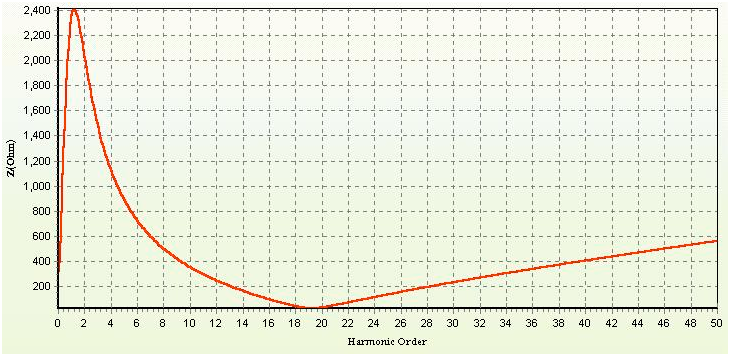


รูปที่ 7.22 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดที่ไหลเข้าอุปกรณ์ เมื่อโหลดมีขนาด 375 kVA, ในตัวอย่างที่ 3

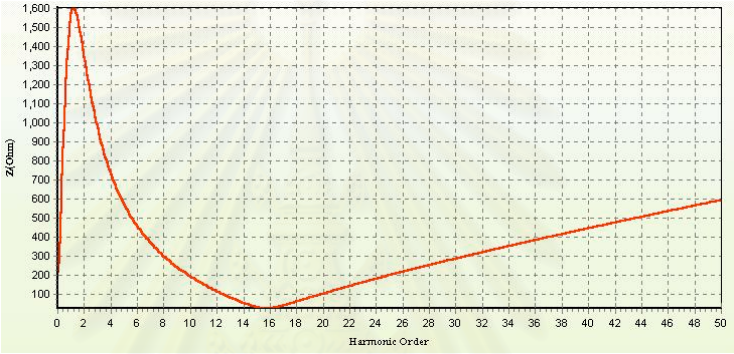


รูปที่ 7.23 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดที่ไหลเข้าอุปกรณ์ เมื่อโหลดมีขนาด 1250 kVA, ในตัวอย่างที่ 3

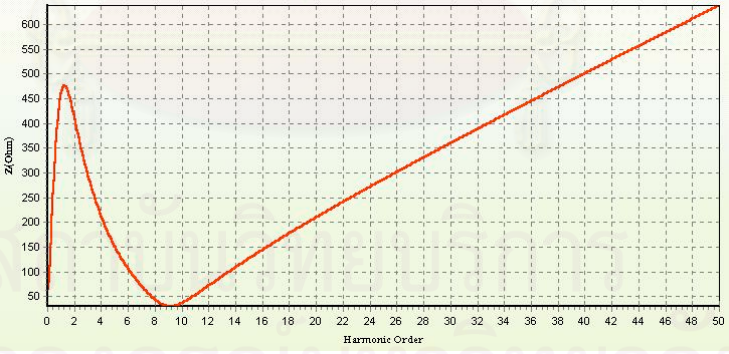
รูปที่ 7.24 อิมพีแดนซ์สมมูลเพื่อวิเคราะห์การเกิด series resonance เมื่อโหลดมีขนาด 125 kVA, ในตัวอย่างที่ 3



รูปที่ 7.25 อิมพีแดนซ์สมมูลเพื่อวิเคราะห์การเกิด series resonance เมื่อโหลดมีขนาด 225 kVA, ในตัวอย่างที่ 3



รูปที่ 7.26 อิมพีแดนซ์สมมูลเพื่อวิเคราะห์การเกิด series resonance เมื่อโหลดมีขนาด 375 kVA, ในตัวอย่างที่ 3



รูปที่ 7.27 อิมพีแดนซ์สมมูลเพื่อวิเคราะห์การเกิด series resonance เมื่อโหลดมีขนาด 1250 kVA, ในตัวอย่างที่ 3

การแก้ปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนี้จะใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกประเภทดีนูนเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง ขนาดของดีจูนคือ V_{Rated} = 440 โวลต์ กำลังรีแอคทีฟชุดละ 60 kVar มีทั้งหมด 10 ชุด ใช้ตัวเหนี่ยวนำ 7 % QF = 60 มีตัวควบคุมอัตโนมัติ ผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเมื่อใช้ ตัวกรองดีจูนแทน คาปาซิตอร์แสดงในตารางที่ 7.20

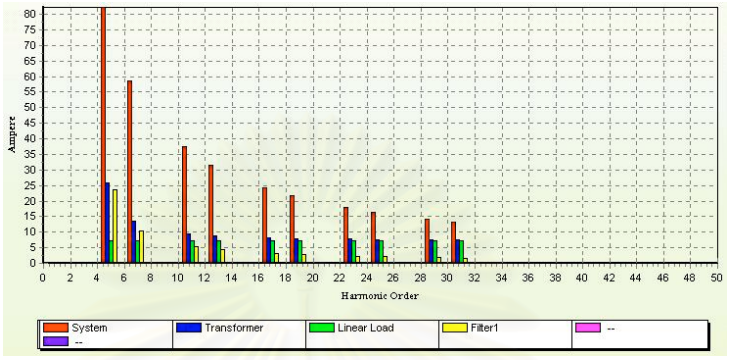
ตารางที่ 7.20(ก) แรงดันฮาร์มอนิกที่บัส ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 3 เมื่อใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแทนคาปาซิเตอร์

Order (h)	125 kVA				250 kVA				375 kVA				1250 kVA			
	Bus 1		Bus 2		Bus 1		Bus 2		Bus 1		Bus 2		Bus 1		Bus 2	
	kV	% of V1	V	% of V1	kV	% of V1	V	% of V1	kV	% of V1	V	% of V1	kV	% of V1	V	% of V1
1	22	100	399.7	100	22	100	399.5	100	22	100	399.2	100	22	100	396.2	100
5	1.136	5.17	19.84	4.96	1.131	5.14	18.98	4.75	1.126	5.12	18.19	4.56	1.104	5.02	14.94	3.77
7	1.139	5.18	20.19	5.05	1.135	5.16	19.61	4.91	1.131	5.14	19.07	4.78	1.114	5.06	16.55	4.18
11	1.139	5.18	20.29	5.07	1.136	5.17	19.79	4.96	1.132	5.15	19.31	4.84	1.113	5.06	16.81	4.24
13	1.140	5.18	20.30	5.08	1.36	5.17	19.81	4.96	1.133	5.15	19.33	4.84	1.111	5.05	16.69	4.21
17	1.140	5.18	20.31	5.08	1.136	5.17	19.81	4.96	1.132	5.15	19.30	4.84	1.106	5.03	16.29	4.11
19	1.140	5.18	20.30	5.08	1.136	5.16	19.80	4.96	1.131	5.14	19.27	4.83	1.103	5.01	16.04	4.05
23	1.140	5.18	20.30	5.08	1.1.6	5.16	19.76	4.95	1.131	5.14	19.19	4.81	1.096	4.98	15.47	3.91
25	1.140	5.18	20.29	5.08	1.135	5.16	19.74	4.94	1.130	5.14	19.15	4.80	1.092	4.97	15.17	3.83
29	1.139	5.18	20.28	5.07	1.134	5.16	19.69	4.93	1.129	5.13	19.03	4.77	1.086	4.94	14.55	3.67
31	1.139	5.18	20.27	5.07	1.134	5.15	19.66	4.92	1.128	5.13	18.97	4.75	1.082	4.92	14.23	3.59
THD_V	3.602	16.38	63.99	16.01	3.589	16.31	62.19	15.57	3.575	16.25	60.35	15.12	3.481	15.82	49.64	12.53
V_{rms}	22.29	101.3	404.8	101.3	22.29	101.3	404.3	101.2	22.29	101.3	403.7	101.1	22.27	101.2	399.3	100.8

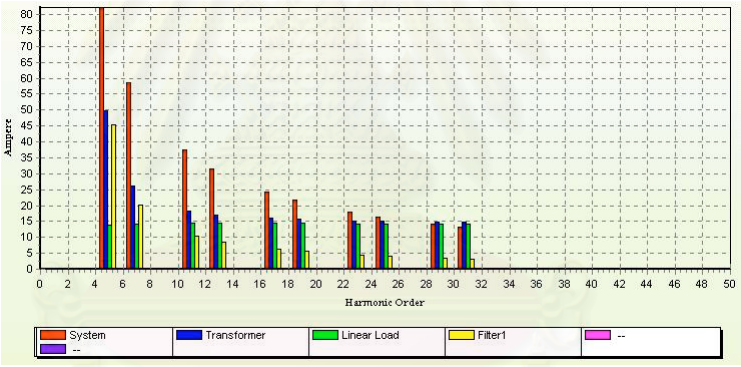
ตารางที่ 7.20(ข) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้า ที่ได้จากการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่ 3 เมื่อใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแทนคาปาซิเตอร์

Order (h)	$I_{Vsource}$	125 kVA			250 kVA			375 kVA			1250 kVA		
		Trans	Load	Detune	Trans	Load	Detune	Trans	Load	Detune	Trans	Load	Detune
	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
1	-	148.17	180.55	76.91	296.59	361.34	153.70	445.26	542.38	230.40	1538.0	1821.5	609.8
5	82.21	25.96	7.25	23.67	49.67	13.89	45.29	71.40	19.99	65.09	161.99	55.58	142.61
7	58.73	13.43	7.34	10.41	26.11	14.27	20.22	38.09	20.84	29.49	96.95	60.21	68.24
11	37.37	9.40	7.35	5.35	18.37	14.36	10.43	26.90	21.04	15.27	73.65	60.98	35.44
13	31.62	8.78	7.35	4.36	17.15	14.36	8.51	25.12	21.04	12.46	69.48	60.50	28.69
17	24.18	8.16	7.34	3.21	15.93	14.35	6.27	23.31	21.00	9.16	64.34	59.97	20.62
19	21.64	7.99	7.34	2.84	15.59	14.34	5.55	22.80	20.97	8.10	61.44	59.03	17.97
23	17.88	7.77	7.34	2.32	15.16	14.31	4.52	22.11	20.87	6.58	59.15	56.94	14.14
25	16.45	7.70	7.34	2.12	15.01	14.29	4.13	21.86	20.82	6.01	57.65	55.82	12.70
29	14.18	7.60	7.33	1.82	14.78	14.25	3.53	21.46	20.70	5.12	54.81	53.52	10.44
31	13.26	7.56	7.33	1.70	17.69	14.23	3.29	21.29	20.63	4.76	53.46	52.35	9.53
THD_i	120.93	37.21	23.18	27.40	71.87	45.11	52.65	104.15	65.75	75.98	258.10	183.04	168.47
I_{rms}	-	152.77	182.03	81.64	305.17	364.14	162.67	457.28	546.35	242.60	1559.5	1830.8	632.64

จากผลการวิเคราะห์เมื่อใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบดีจูนแทนคาปาซิเตอร์พบว่าแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสและกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์ลดลงอย่างมากเนื่องจากไม่มีการขยายกระแส กราฟเปรียบเทียบการไหลของกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดและไหลเข้าอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 7.28-7.31 และการวิเคราะห์สภาวะการเกิดเรโซแนนซ์แสดงดังรูปที่ 7.32-7.35

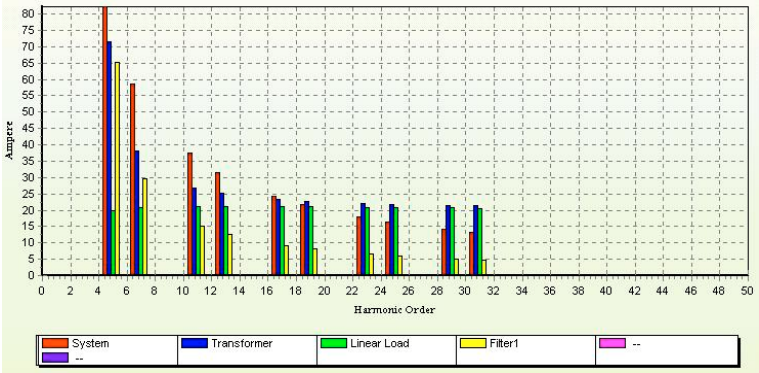


รูปที่ 7.28 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดกับที่ไหลเข้าอุปกรณ์ เมื่อโหลดมีขนาด 125 kVA, และใช้ตัวกรองดีจูนแทนชุดคาปาซิเตอร์ ในตัวอย่างที่ 3

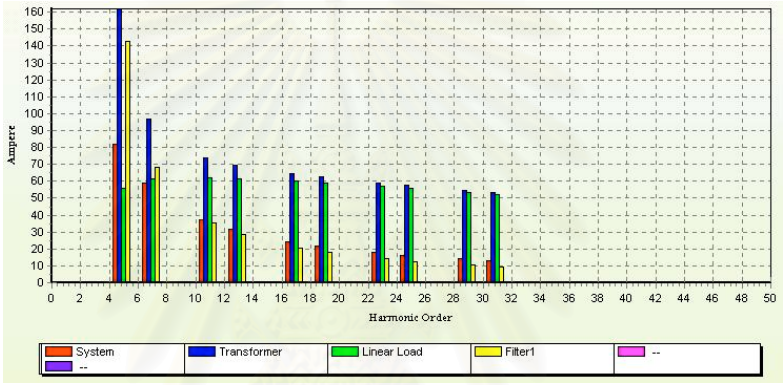


รูปที่ 7.29 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดกับที่ไหลเข้าอุปกรณ์ เมื่อโหลดมีขนาด 225 kVA, และใช้ตัวกรองดีจูนแทนชุดคาปาซิเตอร์ ในตัวอย่างที่ 3

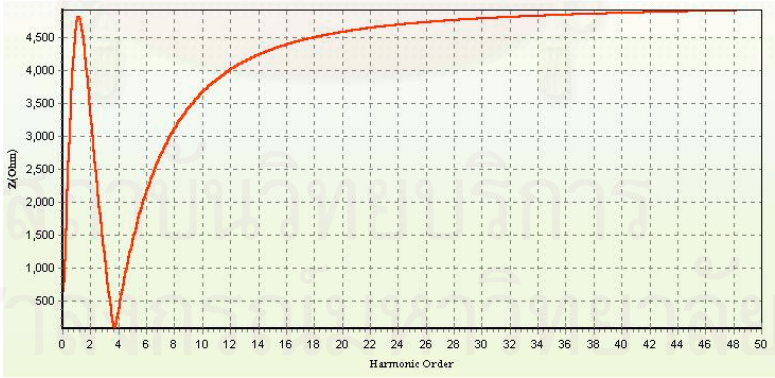
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



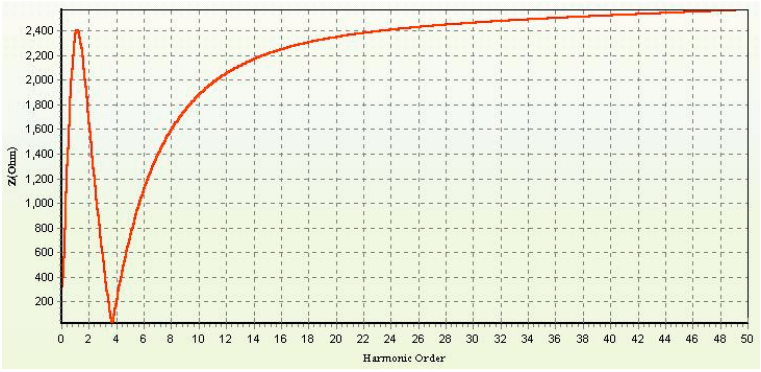
รูปที่ 7.30 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดกับที่ไหลเข้าอุปกรณ์
เมื่อโหลดมีขนาด 375 kVA, และใช้ตัวกรองดีจูนแทนชุดคาปาซิเตอร์ ในตัวอย่างที่ 3



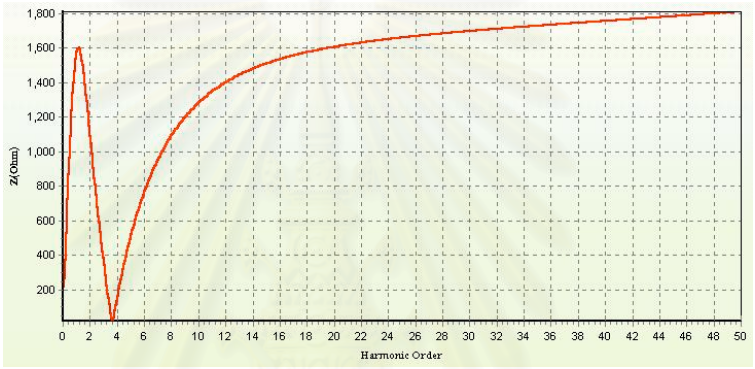
รูปที่ 7.31 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดกับที่ไหลเข้าอุปกรณ์
เมื่อโหลดมีขนาด 1250 kVA, และใช้ตัวกรองดีจูนแทนชุดคาปาซิเตอร์ ในตัวอย่างที่ 3



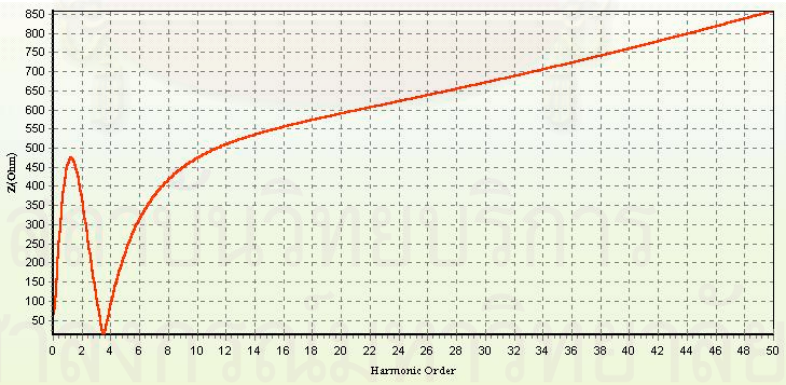
รูปที่ 7.32 อิมพีแดนซ์สมมูลเพื่อวิเคราะห์การเกิด series resonance
เมื่อโหลดมีขนาด 125 kVA และใช้ตัวกรองดีจูนแทนชุดคาปาซิเตอร์ ในตัวอย่างที่ 3



รูปที่ 7.33 อิมพีแดนซ์สมมูลเพื่อวิเคราะห์การเกิด series resonance
เมื่อโหลดมีขนาด 225 kVA และใช้ตัวกรองดีจูนแทนชุดคาปาซิเตอร์ ในตัวอย่างที่ 3



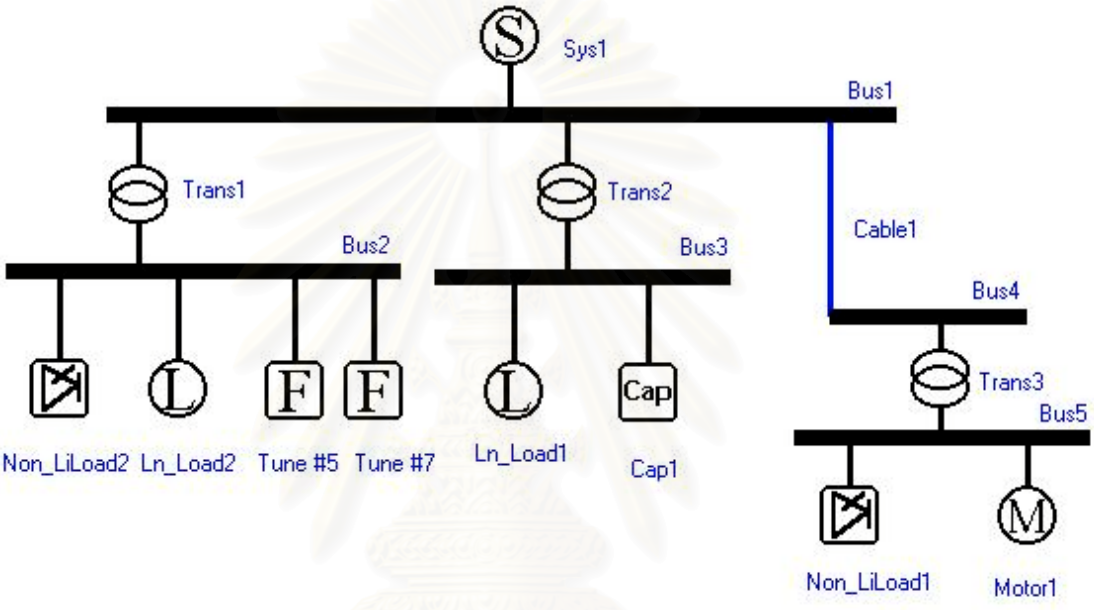
รูปที่ 7.34 อิมพีแดนซ์สมมูลเพื่อวิเคราะห์การเกิด series resonance
เมื่อโหลดมีขนาด 375 kVA และใช้ตัวกรองดีจูนแทนชุดคาปาซิเตอร์ ในตัวอย่างที่ 3



รูปที่ 7.35 อิมพีแดนซ์สมมูลเพื่อวิเคราะห์การเกิด series resonance
เมื่อโหลดมีขนาด 1250 kVA และใช้ตัวกรองดีจูนแทนชุดคาปาซิเตอร์ ในตัวอย่างที่ 3

7.4 ตัวอย่างที่ 4

ลักษณะการใช้ไฟฟ้าของโรงงานแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนการผลิตที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าค่อนข้างคงที่ และ ส่วนการบริหารจัดการที่จะมีความต้องการใช้ไฟฟ้ามากในเวลากลางวันและต้องการใช้ไฟฟ้าน้อยในเวลากลางคืน การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจึงต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของโหลดด้วย รูปที่ 7.36 แสดงไดอะแกรมของโรงงานที่จะทำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโดยมีข้อมูลของอุปกรณ์แสดงในตารางที่ 7.21



รูปที่ 7.36 ไดอะแกรมของโรงงานในตัวอย่างที่ 4

ตารางที่ 7.21(ก) ข้อมูลเบื้องต้นของระบบไฟฟ้า,หม้อแปลงไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

System	Transformer #1,2,3	Non-Linear Load 1,2
22 kV, 50 Hz MVA_{SC} = 350 MVA X/R ratio = 5	22 kV/400 V 2500 kVA %Z = 6, Loss 25 kW Typical model, No Skin eff	1000 kVA PF = 0.8 lagging

ตารางที่ 7.21(ข) ข้อมูลของสาย

R (Ohm/km)	X_L (Ohm/km)	X_C (MegaOhm*km)	Length (km)
0.002	0.012	0.002	0.3

ตารางที่ 7.21(ค) ข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกจาก คอนเวอร์เตอร์

Harm Order (h)	Mag (%of I_1)	Harm Order (h)	Mag (%of I_1)
5	19.831	29	2.547
7	14.050	31	2.274
11	8.723	37	1.811
13	7.260	39	1.613
17	5.324	41	1.270
19	4.643	43	1.120
23	3.610	47	0.858
25	3.206	49	0.743

ตารางที่ 7.21(ง) ข้อมูลเบื้องต้นโหลดเชิงเส้นและมอเตอร์

Linear Load 1	Linear Load 2,3	Motor
PF = 0.8 lagging (ดูตารางที่ 7.21 (จ))	1000 kVA PF = 0.8 lagging	250 kVA 400 Vrated Efficicentcy = 94 % PF = 0.88 lagging

ตารางที่ 7.21(จ) ข้อมูลโหลดเชิงเส้นตัวที่ 1(Ln_Load 1)

Hour	kVA	Hour	kVA	Hour	kVA	Hour	kVA
1	125	7	225	13	1250	19	375
2	125	8	375	14	1250	20	225
3	125	9	1250	15	1250	21	225
4	125	10	1250	16	1250	22	125
5	125	11	1250	17	1250	23	125
6	125	12	1250	18	375	24	125

ผลการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกทั้งค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสต่างๆและค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าอุปกรณ์ แสดงไว้ในภาคผนวก และค่าแรงดันฮาร์มอนิกผิดเพี้ยนรวมและกระแสฮาร์มอนิกผิดเพี้ยนรวมแสดงในตารางที่ 7.22

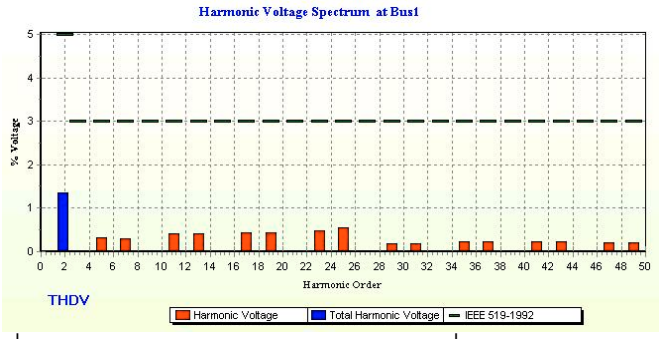
ตารางที่ 7.22(ก) สรุปแรงดันผิดเพี้ยนรวมในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 4

Bus	THD_V (%)			
	Load #1, 125 kVA	Load #1, 225 kVA	Load #1, 375 kVA	Load #1, 1250 kVA
Bus 1 (HV)	1.36	1.35	1.32	1.23
Bus 2 (LV)	4.27	4.27	4.26	4.22
Bus 3 (LV)	3.97	3.44	13.15	1.69
Bus 4 (HV)	1.36	1.35	1.33	1.23
Bus 5 (LV)	8.89	8.90	8.88	8.82

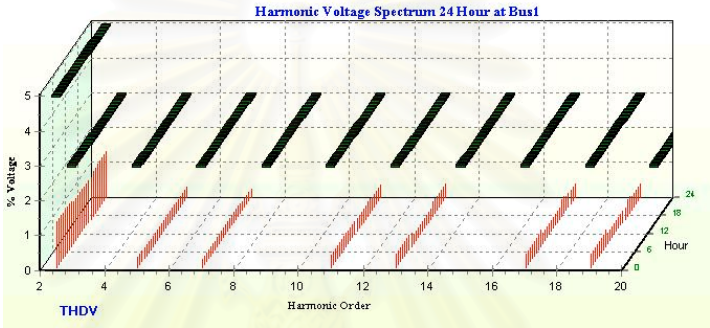
ตารางที่ 7.22(ข) สรุปกระแสผิดเพี้ยนรวมในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกตัวอย่างที่ 4

Equipment	THD_I							
	Load #1, 125 kVA		Load #1, 225 kVA		Load #1, 375 kVA		Load #1, 1250 kVA	
	A	%of I_1	A	%of I_1	A	%of I_1	A	%of I_1
System (HV)	9.61	11.06	9.58	10.74	9.63	10.41	9.15	8.13
Transformer 1	105.7	3.95	105.4	3.94	105.3	3.93	107.8	4.03
Transformer 2	76.28	51.16	65.36	22.65	85.28	18.07	86.5	5.36
Transformer 3	416.9	18.96	416.9	18.96	416.9	18.96	417.0	18.96
Capacitor	76.23	106.6	65.00	91.07	84.72	59.44	84.5	19.97
Tune Filter #5	287.6	38.98	287.6	38.98	287.7	39.00	287.9	39.03
Tune Filter #7	207.8	38.41	207.8	38.41	207.9	38.44	207.9	38.43
Motor1	10.16	0.88	10.15	0.88	10.16	0.88	10.10	0.88
Linear Load 1	5.74	3.18	8.97	2.76	13.70	2.52	24.76	1.35
Linear Load 2	50.03	3.42	50.08	3.42	49.94	3.41	49.47	3.38
Cable1	7.71	19.30	7.72	19.30	7.71	19.29	7.71	19.28

แรงดันฮาร์มอนิกที่ได้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานได้ด้วยสเปกตรัมแรงดัน ซึ่งสามารถเลือกชั่วโมงที่ต้องการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 7.37 และสามารถแสดงการเปรียบเทียบกับค่ามารตฐานในทุกชั่วโมงในรูปของกราฟ 3 มิติ ดังรูปที่ 7.38

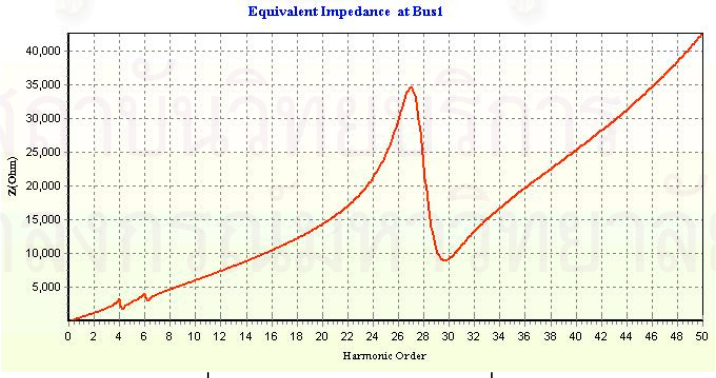


รูปที่ 7.37 สเปกตรัมแรงดันของฮาร์มอนิกที่บัส 1 เป็นเปอร์เซ็นต์
และเทียบกับค่ามาตรฐาน IEEE 519-1992

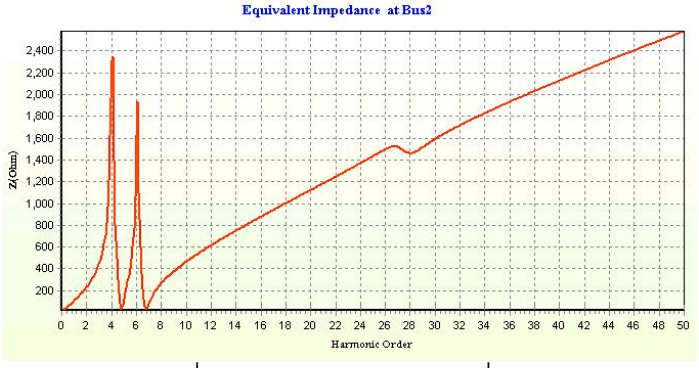


รูปที่ 7.38 สเปกตรัม 3 มิติของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 1 เป็นเปอร์เซ็นต์
และเทียบกับค่ามาตรฐาน IEEE 519-1992

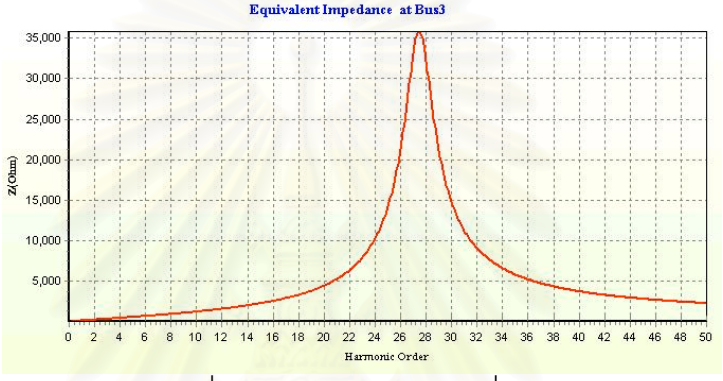
การวิเคราะห์สภาพการเกิดเรโซแนนซ์สามารถศึกษาได้โดยใช้อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัสต่างๆ ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงการขยายกระแสที่มาจากแหล่งกำเนิดที่ต่ออยู่ที่บัสนั้น อิมพีแดนซ์สมมูลแสดงได้ดังรูปที่ 7.39-7.43 โดยแสดงในรูปกราฟเส้นและกราฟ 3 มิติ



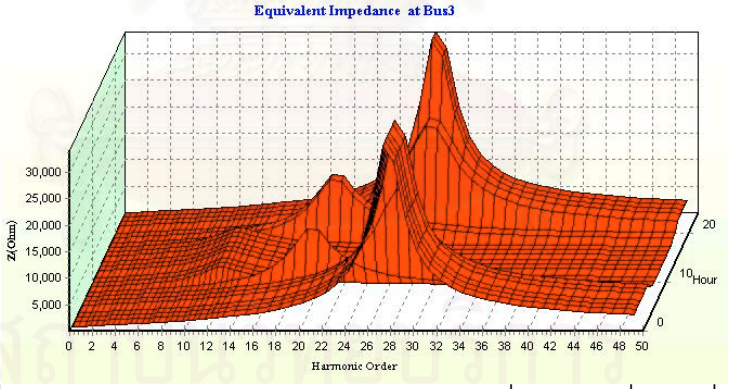
รูปที่ 7.39 อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส 1



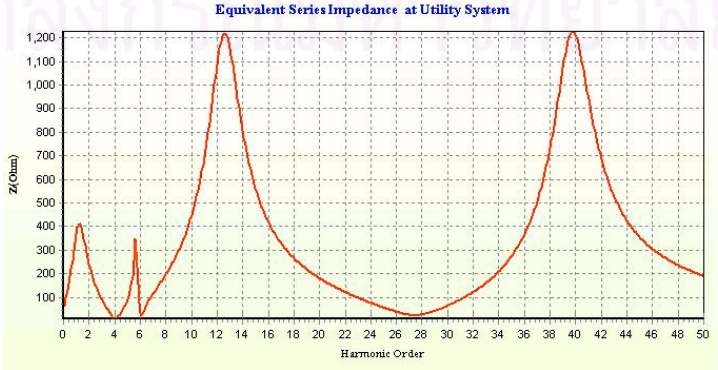
รูปที่ 7.40 อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส 2



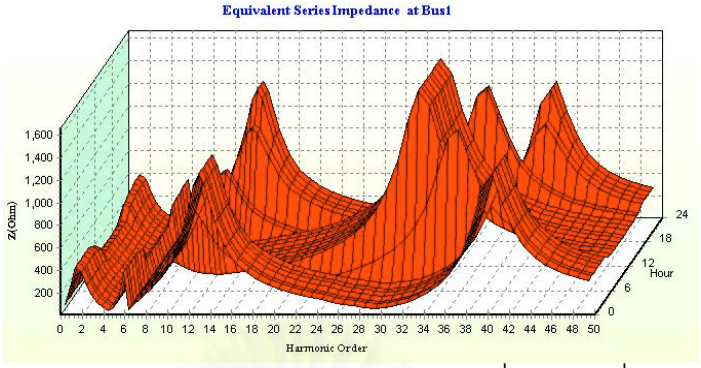
รูปที่ 7.41 อิมพีแดนซ์สมมูลที่บัส 3



รูปที่ 7.42 อิมพีแดนซ์สมมูล 3 มิติ แสดงเป็นรายชั่วโมง 24 ชั่วโมง ที่บัส 3



รูปที่ 7.43 อิมพีแดนซ์สมมูลแบบอนุกรม ที่จุดต่อร่วม



รูปที่ 7.44 อิมพีแดนซ์สมมูลแบบอนุกรม แสดงเป็นรายชั่วโมง 24 ชั่วโมง ที่จุดต่อร่วม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 8

สรุปและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะมีปัญหามากขึ้น ทั้งปัญหาที่เกิดภายในโรงงานเองและผลกระทบต่อระบบจ่ายไฟฟ้าและเพื่อให้การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกถูกต้องมากขึ้นจึงมีการใช้แบบจำลองของอุปกรณ์หลายแบบให้สอดคล้องกับสภาพการทำงานจริงและสอดคล้องกับลำดับฮาร์มอนิกที่ต้องการวิเคราะห์ นอกจากนี้เพื่อให้การวิเคราะห์ทำได้ต่อเนื่องตามสภาพโหลดในแต่ละชั่วโมงของแต่ละวันจึงสร้างโปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์ฮาร์มอนิกได้ 24 ชั่วโมงเพื่อนำข้อมูลมาศึกษาเปรียบเทียบได้ โดยข้อมูลโหลดอาจเป็นข้อมูลการใช้งานจริงที่ผ่านมาหรือเป็นการคาดการล่วงหน้าซึ่งจะทำให้เห็นปัญหาและหาทางป้องกันหรือแก้ไขได้ก่อนใช้งานจริง

วิธีการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรมของโปรแกรมที่สร้างขึ้นได้ประยุกต์ใช้การคำนวณโหลดโฟล์วในระบบโครงข่ายโดยการสร้างเมตริกซ์ความนำเพราะสะดวกและรวดเร็วอีกทั้งยังสามารถใช้วิเคราะห์ในกรณีที่มีแหล่งฮาร์มอนิกหลายแหล่งได้เป็นอย่างดี โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นได้สร้างไดอะแกรมของอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โหลดเชิงเส้น โหลดไม่เชิงเส้น ชุดปรับปรุงตัวประกอบกำลังและตัวกรองฮาร์มอนิก เป็นต้น เตรียมไว้ให้ผู้ใช้งานได้สร้างไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นโปรแกรมนี้จะสามารถวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรมได้ถ้าสามารถสร้างไดอะแกรมระบบไฟฟ้าของโรงงานได้ โปรแกรมจึงไม่มีข้อจำกัดเรื่องขนาดของโรงงานหรือจำนวนอุปกรณ์ที่ต่อใช้งาน นอกจากนี้ยังสามารถนำโปรแกรมไปวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในอาคารทั่วไปได้

เนื่องจากการทำงานของโปรแกรมสามารถวิเคราะห์ฮาร์มอนิกได้ต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง ในกรณีที่ โรงงานอุตสาหกรรมมีการใช้ตัวควบคุมค่าตัวประกอบกำลังอัตโนมัติ เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจำนวนชุดของคาปาซิเตอร์ที่ใช้งาน อาจมีผลทำให้จุดการเกิด เรโซแนนซ์ตรงกับลำดับของฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในโรงงานเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกได้ ดังนั้นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจึงมีการจำลองการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังให้ผู้ใช้เลือกเพื่อดูผลของการเปลี่ยนแปลงจำนวนชุดคาปาซิเตอร์ต่อการเกิดสภาวะเรโซแนนซ์

ความสามารถของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม แสดงเป็นข้อๆ ได้ดังนี้

1) **วิเคราะห์ฮาร์มอนิกได้ในโรงงานหลายขนาด**

ผู้ใช้สามารถสร้างระบบไฟฟ้าของโรงงานได้ตามความต้องการ โดยขนาดโรงงานใหญ่ที่สุดที่โปรแกรมสามารถใช้งานได้คือ 50 บัส

2) **วิเคราะห์ฮาร์มอนิกได้ 24 ชั่วโมง**

ทำให้ทราบการเปลี่ยนแปลงของฮาร์มอนิกตลอดทั้ง 24 ชั่วโมงและยังใช้คำนวณคาดการถึงการเปลี่ยนแปลงของฮาร์มอนิกถ้ามีการเปลี่ยนแปลงโหลดได้

3) **เลือกแบบจำลองของอุปกรณ์ได้**

โปรแกรมได้เตรียมแบบจำลองที่นิยมใช้ของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมไว้ให้เลือกเพียงพอต่อการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบโรงงานอุตสาหกรรมและสามารถเลือกความถี่ฮาร์มอนิกให้เหมาะสมต่อแบบจำลองได้ด้วย

4) **ชุดคาปาซิเตอร์และตัวกรองฮาร์มอนิกแบบดีจูนสามารถควบคุมอัตโนมัติได้**

เพื่อวิเคราะห์การเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ที่อาจเกิดขึ้นจึงจำลองการใช้งานจริงของชุดคาปาซิเตอร์และตัวกรองฮาร์มอนิกแบบดีจูน

5) **วิเคราะห์ฮาร์มอนิกได้ถึงลำดับฮาร์มอนิกที่** 49

ซึ่งเพียงพอและเหมาะสมกับการเกิดขึ้นจริง เพราะฮาร์มอนิกที่ลำดับมากกว่านี้จะมีขนาดเล็กและมีผลกระทบน้อย

6) **ผลการคำนวณได้แรงดันและกระแสฮาร์มอนิก**

ได้แรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับและแรงดันฮาร์มอนิกผิดเพี้ยนรวมที่บัสและได้ค่ากระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับและกระแสฮาร์มอนิกผิดเพี้ยนรวมที่ไหลเข้าอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งจะแสดงค่าเป็นตาราง สเปกตรัมและสเปกตรัม 3 มิติ นอกจากนี้ยังสามารถเปรียบเทียบแรงดันฮาร์มอนิกกับค่าในมาตรฐานต่างๆว่าเป็นไปตามมาตรฐานหรือไม่

7) **วิเคราะห์การเกิดเรโซแนนซ์**

วิเคราะห์การเกิดเรโซแนนซ์ได้ทั้งการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานและการเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมโดยศึกษาอิมพีแดนซ์สมมูล และยังแสดงเป็นรูป 3 มิติให้เป็นภาพการเปลี่ยนแปลงการเกิดเรโซแนนซ์ในแต่ละชั่วโมงด้วย

8) **วิเคราะห์กระแสจากแหล่งฮาร์มอนิกที่เลือก**

วิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งฮาร์มอนิกที่เลือกว่าไหลเข้าอุปกรณ์ไฟฟ้าปริมาณเท่าไร นำไปสู่การวิเคราะห์การขยายกระแสได้ นอกจากนี้แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกรวมถึงความผิดเพี้ยนทางด้านแรงดันของระบบไฟฟ้าที่โรงงานต่ออยู่ด้วย

จากความสามารถของโปรแกรมที่กล่าวมาเมื่อนำผลของการคำนวณเปรียบเทียบกับการวัดจริงอาจมีความแตกต่างกันได้ เพราะอาจมีข้อจำกัดบางอย่างที่ไม่ได้นำมาคิด เช่น การทำงานแบบเกินพิกัดของอุปกรณ์ ระบบไฟฟ้าไม่สมดุล มุมเฟสของแหล่งฮาร์มอนิก เป็นต้น หรือแบบจำลองอาจไม่ตรงกับสภาพการทำงานจริง

โปรแกรมการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกนี้ยังสามารถพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้จึงต้องการเสนอแนะเพื่อใช้เป็นแนวทางการพัฒนาต่อไป

1) โปรแกรมสามารถรับแหล่งจ่ายไฟได้เพียงหนึ่งแหล่งจึงวิเคราะห์ฮาร์มอนิกได้เฉพาะการจ่ายไฟแบบเรเดียล ถ้าพัฒนาให้โปรแกรมสามารถรับแหล่งจ่ายไฟได้มากกว่าหนึ่งแหล่งจะสามารถนำโปรแกรมไปวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบโครงข่ายได้
2) ข้อมูลของอุปกรณ์ถ้ามีการเก็บเป็นฐานข้อมูลจะช่วยให้การเลือกใช้งานทำได้สะดวกขึ้น และสามารถแก้ไขปรับปรุงข้อมูลได้ง่าย
3) อาจมีการเพิ่มเติมอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือเพิ่มแบบจำลองของอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้วให้มากยิ่งขึ้น เพื่อให้การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกมีประสิทธิภาพมากขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Deflandre, T., and working Group CC02. Guide for Assessing the Network Harmonic Impedance. Electra No. 167, 1996.
2. IEEE Power Engineering Society. Tutorial on Harmonics Modeling and Simulation.
3. Arrillaga, J , Juhlin, L , Lahtinen, M , Ribeiro, P , and Saavedra, A.R. AC System Modelling for AC Filter Design an Overview of Impedance Modelling. Electra No.164, 1996.
4. Arrillaga, J., Smith, B.C., Watson, R.W, and Wood, A.R. Power System Harmonics Analysis. Great Britain: John Wiley & Sons, 1997.
5. Stevenson, W.D. Elements of Power System Analysis. Singapore: McGraw-Hill, 1982.
6. Task Force on Harmonics Modeling and Simulation. Test Systems for Harmonics Modeling and Simulation. IEEE Trans. on Power Delivery, 1997.
7. Dugui, W., and Zheng, X. Harmonic Model of Power Transformer. IEEE, 1998.
8. Heydt, C.T. Electric Power Quality second edition. Stars in Circle Publication, 1991.
9. Roger, C., Mark, D.F., McGranagnan, H, and Beaty, W. Electrical Power systems. 1996.
10 Corasaniti, V.F., Blanchi, R., Viollaz, F. Comparison Load Models in Harmonic Flows. IEEE Conference Publication, No. 482, June 2001.
11 Todde, C., Brisson, M., Tessier, J., and McGillis, D.T. Identification of Excessive Harmonic Flow in Large Industrial Loads. IEEE.,2000.
12 Yan, Y.H., and Chen, C.H. Harmonic Analysis for Industrial Customers. IEEE Transactions on industry application, Vol. 30, No. 2, March/April 1994.
13 American National Standards Institute. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems: Std519-1992. USA: IEEE,1993.
14 Limits for Harmonics in The United Kingdom Electricity Supply System. Engineering Recommendation G.5/4-2001. February 2001.

15 ไชยะ แช่มช้อย, และ พีรยุทธ แสงศิลป์. เอกสารประกอบการสัมมนา เรื่อง Harmonic Filter Design.,ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลังร่วมกับภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย., 24-25 พฤษภาคม 2544.

16 ปานทอง ถินสถิตย์, การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกสำหรับระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรม , วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

17 พีรยุทธ แสงศิลป์, การพัฒนาระบบจำลองการไหลของกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเรวัต สุวรรณไพรัตน์ เกิดวันที่ 13 เมษายน พ.ศ. 2521 ที่อำเภอโกรกพระ จังหวัดนครสวรรค์ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2543 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยในระหว่างที่ศึกษาอยู่ในระดับปริญญาบัณฑิตได้รับทุนการศึกษาจากโครงการจุฬาฯ-ชนบท จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย