

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

การชดเชยกำลังรีแอกทีฟและการกรองฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้าของรถไฟฟ้
REACTIVE POWER COMPENSATION AND HARMONIC FILTERING
FOR RAILWAY SUPPLY SYSTEM



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **62741**
วัน,เดือน,ปี..... **21 ส.ค. 2549**

b..... **11/8/2002**
i.....

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. จงรักษ์ บุญเส็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

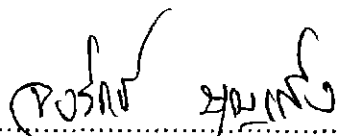
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การชดเชยกำลังรีแอกทีฟและการกรองฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้าของ
รถไฟฟ้า

ผู้จัดทำ

- 
1. นาย กิตติคุณ ตงสกุลวัฒนา
 2. นาย ชานนท์ มุสิกไชย
 3. นาย สุนิมิตร เอ็มโอษฐ์


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ จงรักษ์ บุญเส็ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การชดเชยกำลังรีแอกทีฟและการกรองฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้าของรถไฟฟ้า

นาย กิตติคุณ ดงสกุลวัฒนา
นาย ชานนท์ มุสิกไชย
นาย สุณิมิตร เอ็มโอษฐ์
รศ. จงรักษ์ บุญเส็ง อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2548

บทคัดย่อ

บทคัดยอนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาวิจัยในความรู้ด้านฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้า ซึ่งได้ทำเป็นกรณีศึกษา โดยใช้ข้อมูลของระบบไฟฟ้ารถไฟฟ้าเป็นตัวอย่างในการวิจัยเนื่องจากได้มีโครงการที่จะสร้างและการให้บริการรถไฟฟ้าในกรุงเทพมหานครมากขึ้นหลายเส้นทาง จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจถึงการสร้างความรู้เพื่อการสร้างความรู้เพื่อรองรับสิ่งที่เกิดขึ้น โดยระบบที่ศึกษาใช้ข้อมูลของบริษัทระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด(มหาชน) หรือ BTS เพื่อใช้ในการจำลองผลด้วยโปรแกรม ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) ซึ่งจะได้วิเคราะห์กำลังไฟฟ้าและฮาร์โมนิกส์ที่จุดต่างๆของระบบจะมีลักษณะอย่างไร

REACTIVE POWER COMPENSATION AND HARMONIC FILTERING FOR RAILWAY SYSTEM

Kittikhun Tongsakulwattana

Charnon Musigchai

Sunimit Eamaot

Assoc.Prof.Chongrag Bunseng Advisor

2005

ABSTRACT

The purpose of this project is to study harmonic in power systems. This project used a case study in BTS (Bangkok Mass Transit System Public Company Limited) because BTS has a plan to extend several construction routes. Hence this project can provide useful information for BTS. The project used a simulation by ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) program with BTS data and analyzer the electric system and its harmonic characteristics.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือในการให้ความร่วมมือจากบุคคลหลายท่าน แม้ว่าจะพบกับอุปสรรคในการทำงานมากมาย อย่างไรก็ตามโครงการนี้ก็สามารถสำเร็จจุล่งมาได้ ซึ่งขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ รศ.จรงค์ษ์ บุญสิงห์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งท่านเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ทำให้ผู้เขียนได้มีโอกาสได้ศึกษาและนำมาเขียนเป็นปริญญานิพนธ์เล่มนี้ โดยได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ของการทำโครงการมาด้วยดีตลอด นอกจากนี้ยังต้องขอขอบพระคุณอาจารย์นราดล โชติวรรณพร อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ในการให้ความรู้เกี่ยวกับการใช้งานโปรแกรม ETAP และขอขอบพระคุณพี่ๆ เจ้าหน้าที่จากบริษัทระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด (BTS) ซึ่งได้กรุณาให้ความช่วยเหลือด้านข้อมูลต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อโครงการ ในการทำเป็นกรณีศึกษา ขอขอบคุณครุอาจารย์ทุกท่านที่เคยอบรมสั่งสอนตั้งแต่เล็กจนโต ตลอดจนเพื่อนๆ ทั้งหลายที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำและเป็นกำลังใจ และสุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบุพการี ผู้ซึ่งมีพระคุณอย่างยิ่งของชีวิต และทุกๆ ท่านผู้ซึ่งช่วยเหลืออยู่เบื้องหลังความสำเร็จของปริญญานิพนธ์เล่มนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	IV
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ฮาร์โมนิกส์	3
2.1.1 พื้นฐานเกี่ยวกับฮาร์โมนิกส์	3
2.1.2 ประเภทของฮาร์โมนิกส์	6
2.1.3 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์	7
2.1.4 แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์	9
2.1.4.1 แบบจำลองของระบบไฟฟ้า	10
2.1.4.2 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า	11
2.1.4.3 แบบจำลองโหลดประเภทมอเตอร์	12
2.1.4.4 แบบจำลองของโหลดเชิงเส้น	12
2.1.4.5 แบบจำลองของแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์	13
2.1.5 ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์	14
บทที่ 3 หลักพื้นฐานของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์และการประยุกต์ใช้งาน	20
3.1 ตัวเก็บประจุ	20
3.2 ตัวเหนี่ยวนำ	21
3.3 ตัวประกอบกำลังรีแอกทีฟ	21
3.3.1 ตัวประกอบกำลังของสัญญาณไซน์	21
3.3.2 ตัวประกอบกำลังของสัญญาณที่มีส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์	22
3.3.2.1 ตัวประกอบกำลังการกระจาย	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.2.2 ตัวประกอบค่าความเพี้ยนของรูปคลื่น	23
3.3.2.3 การชดเชยกำลังรีแอกทีฟของสัญญาณที่มีส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์	25
3.3.3 ประโยชน์จากการชดเชยกำลังรีแอกทีฟ	25
3.4 ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ชนิดกรองเดี่ยว.....	26
3.4.1 โครงสร้างหน้าที่และการทำงานของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์	26
3.4.2 การออกแบบและคำนวณค่าส่วนประกอบของวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง	29
3.5 กระประยุกต์ใช้งานตัวกรองในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	32
บทที่ 4 มาตรฐานฮาร์โมนิกส์และตัวเก็บประจุ	34
4.1 มาตรฐานฮาร์โมนิกส์	34
4.2 มาตรฐานตัวเก็บประจุ.....	36
บทที่ 5 การออกแบบการทดลอง.....	38
5.1 ข้อมูลรถไฟฟ้า.....	38
5.1.1 ข้อมูลการให้บริการ	38
5.1.2 ข้อมูลการทำงานของตัวรถ	39
5.1.3 ระบบวงจรขับเคลื่อน	39
5.2 ข้อมูลที่ใช้ในการจำลองผลการทดลอง (ETAP).....	42
5.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการจำลองการ Simulation ด้วยโปรแกรม ETAP	42
บทที่ 6 ผลการทดลอง.....	45
6.1 ขั้นตอนการทดลอง	45
6.2 ผลจากการ Simulation	46
6.2.1 ผล Simulation ที่ 1 สถานี.....	46
6.2.2 ผล Simulation ที่ 2 สถานี.....	47
6.2.3 ผล Simulation ที่ 3 สถานี.....	48
6.2.4 ผล Simulation ที่ 4 สถานี.....	49
6.2.5 ผล Simulation ที่ 5 สถานี.....	50
6.2.6 ผล Simulation ที่ 6 สถานี.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
6.2.7 ผล Simulation ที่ 7 สถานี.....	52
6.2.8 ผล Simulation ที่ 8 สถานี.....	53
6.2.9 ผล Simulation ที่ 9 สถานี.....	54
6.2.10 ผล Simulation ที่ 10 สถานี.....	55
6.2.11 ผล Simulation ที่ 11 สถานี.....	56
6.2.12 ผล Simulation ที่ 12 สถานี.....	57
6.3 การจำลองการออกแบบวงจรกรองฮาร์โมนิกส์.....	58
6.3.1 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 85 %.....	59
6.3.2 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 86 %.....	61
6.3.3 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 87 %.....	63
6.3.4 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 88 %.....	65
6.3.5 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 89 %.....	67
6.3.6 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 90 %.....	69
6.3.7 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 91 %.....	71
6.3.8 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 92 %.....	73
6.3.9 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 93 %.....	75
6.3.10 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 94 %.....	77
6.3.11 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 95 %.....	79
6.3.12 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 96 %.....	81
6.3.13 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 97 %.....	83
6.3.14 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 98 %.....	85
6.3.15 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 99 %.....	87
6.3.16 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 100 %.....	89
6.4 เปรียบเทียบผลการทดลอง.....	91
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	92

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	รูปแบบวงจรของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่หลักมูล..... 3
2.2	รูปแบบวงจรของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ 3
2.3	ตัวอย่างวงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล 9
2.4	ตัวอย่างวงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ใดๆ..... 10
2.5	แบบจำลองของระบบไฟฟ้า 10
2.6	แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า 11
2.7	แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้า..... 12
2.8	แบบจำลองของโหลดเชิงเส้น 13
2.9	แบบจำลองแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์ 14
3.1	ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง..... 20
3.2	ตัวเหนี่ยวนำแบบแกนเหล็กและแกนอากาศแบบ 3 เฟส 21
3.3	สามเหลี่ยมกำลังที่ใช้ในการหาค่าตัวประกอบกำลัง..... 22
3.4	สามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้าของสัญญาณที่มีส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์..... 22
3.5	กระแสที่ไม่เป็นคลื่นรูปไซน์ไหลเข้าสู่คอนเวอร์เตอร์ 24
3.6	การปรับปรุงตัวประกอบกำลังของสัญญาณไซน์ 24
3.7	โครงสร้างของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ชนิดกรองเดี่ยว 26
3.8	วงจรสมมูลของวงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ชนิดกรองเดี่ยว 27
3.9	ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ชนิดกรองเดี่ยวเทียบกับความถี่ 28
3.10	ระบบไฟฟ้าที่ต้องวางจรวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์..... 33
5.1	แผนผังสถานีรับ-ส่งผู้โดยสารจุดต่างๆ..... 38
5.2	รางที่สาม(รางบัสจ่ายไฟ)..... 39
5.3	บล็อกไดอะแกรมการควบคุมความเร็ว Induction-Motor 40
5.4	Single Line วงจรกรอง Harmonic Filter (Filter Plant) 40
5.5	วงจร AC/DC 12 Pulse Converter..... 41
5.6	วงจร Inverter แบบใช้ IGBT ชนิดโมดูลควบคุมความเร็วมอเตอร์ 41
5.7	การจำลอง Single-Line Diagram ทั้งระบบ 43
5.8	วงจรการ Simulation หาผลการเกิดฮาร์โมนิกส์ใน 12 Traction 44
6.1	One-Line Diagram ทั้งระบบ 12 Traction 45
6.2	ผลของ Spectrum และ Waveform จากการ Simulation ที่ 1 สถานี 46
6.3	ผลของ Spectrum และ Waveform จากการ Simulation ที่ 2 สถานี 47
6.4	ผลของ Spectrum และ Waveform จากการ Simulation ที่ 3 สถานี..... 48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
6.5 ผลของ Spectrum และ Waveform จากการ Simulation ที่ 4 สถานี	49
6.6 ผลของ Spectrum และ Waveform จากการ Simulation ที่ 5 สถานี	50
6.7 ผลของ Spectrum และ Waveform จากการ Simulation ที่ 6 สถานี	51
6.8 ผลของ Spectrum และ Waveform จากการ Simulation ที่ 7 สถานี	52
6.9 ผลของ Spectrum และ Waveform จากการ Simulation ที่ 8 สถานี	53
6.10 ผลของ Spectrum และ Waveform จากการ Simulation ที่ 9 สถานี	54
6.11 ผลของ Spectrum และ Waveform จากการ Simulation ที่ 10 สถานี	55
6.12 ผลของ Spectrum และ Waveform จากการ Simulation ที่ 11 สถานี	56
6.13 ผลของ Spectrum และ Waveform จากการ Simulation ที่ 12 สถานี	57
6.14 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 85%	59
6.15 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 85%	60
6.16 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 86%	61
6.17 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 86%	62
6.18 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 87%	63
6.19 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 87%	64
6.20 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 88%	65
6.21 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 88%	66
6.22 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 89%	67
6.23 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 89%	68
6.24 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 90%	69
6.25 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 90%	70
6.26 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 91%	71
6.27 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 91%	72
6.28 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 92%	73
6.29 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 92%	74
6.30 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 93%	75
6.31 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 93%	76
6.32 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 94%	77
6.33 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 94%	78
6.34 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 95%	79
6.35 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 95%	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
6.36 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 96%.....	81
6.37 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 96%.....	82
6.38 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 97%.....	83
6.39 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 97%.....	84
6.40 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 98%.....	85
6.41 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 98%.....	86
6.42 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 99%.....	87
6.43 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 99%.....	88
6.44 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 100%.....	89
6.45 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 100%.....	90



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ขีดจำกัดกระแสฮาร์โมนิกส์สำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อร่วม	35
4.2 ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อร่วม	35
4.3 ขีดจำกัดของตัวเก็บประจุที่กำหนดโดยมาตรฐาน ANSI/IEEE 18-1992	36
4.4 ขีดจำกัดแรงดันตัวเก็บประจุที่กำหนดโดยมาตรฐาน IEC 60831-1(1996).....	36
5.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผลการทดลอง	42
6.1 ค่าผลการ Simulation หาฮาร์โมนิกส์ทั้งระบบ	58
6.2 ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันสำหรับผู้ใช้ไฟที่จุดต่อร่วม	58
6.3 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.85 %.....	59
6.4 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.86 %.....	61
6.5 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.87 %.....	63
6.6 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.88 %.....	65
6.7 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.89 %.....	67
6.8 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.90 %.....	69
6.9 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.91 %.....	71
6.10 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.92 %.....	73
6.11 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.93 %.....	75
6.12 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.94 %.....	77
6.13 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.95 %.....	79
6.14 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.96 %.....	81
6.15 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.97 %.....	83
6.16 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.98 %.....	85
6.17 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.99 %.....	87
6.18 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.100 %.....	89
6.19 ตารางเปรียบเทียบผลการทดลอง.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มสูงมากขึ้นตามจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้นและความเจริญเติบโตทางด้านงานอุตสาหกรรมและเศรษฐกิจ ส่งผลให้เทคโนโลยีต่างๆมีการพัฒนาก้าวหน้าเป็นไปอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งทำให้เกิดมีสิ่งประดิษฐ์เครื่องมือและเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆออกมามากมายอาทิ เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ และบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น การนำเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้ในงานอุตสาหกรรม เครื่องใช้สำนักงานต่างๆเป็นที่นิยมกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากประสิทธิภาพที่ได้ค่อนข้างดีแต่ก็ไม่ได้หมายความว่าจะมีแต่ประโยชน์ อุปกรณ์เหล่านี้ล้วนแต่มีคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าชั่วขณะของแรงดันและกระแสไม่คงที่ เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ภายในตัวอุปกรณ์เหล่านี้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ ทำให้แรงดันและกระแสไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าอิมพีแดนซ์ที่ค่าความถี่ต่างๆ ดังนั้นโหลดที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นหรือโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงของกระแสสูง จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของกระแสอย่างฉับพลัน เป็นผลทำให้มีสัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐานหรือมีฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าที่ใช้งาน จากคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลดจะทำให้กระแสไฟฟ้ามีรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ ทำให้เพาเวอร์แฟคเตอร์มีค่าลดต่ำลง ฉะนั้นโหลดที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นจึงเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ถึงปัญหาทางด้านกำลังไฟฟ้าที่ผิดเพี้ยนไป จากการมีฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งส่งผลให้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการใช้งานโหลดที่ไม่มีคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้น ที่ระดับแรงดัน 24 kV_{AC}
2. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์เทคนิคการชดเชยค่ากำลังรีแอกทีฟและการกรองฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลังที่ระดับแรงดัน 24 kV_{AC} เนื่องจากการใช้งานโหลดที่ไม่มีคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นจากการจำลองผลการทดสอบด้วยโปรแกรม ETAP

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในการวิจัย

สามารถวิเคราะห์การชดเชยค่ากำลังรีแอกทีฟและการกรองฮาร์โมนิกส์ ในระบบไฟฟ้ากำลังที่ระดับแรงดัน 24 kV_{AC} ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของไฟฟ้าแรงหลวง โดยระบบที่ศึกษาใช้ข้อมูลของ บริษัทระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพจำกัด (มหาชน) เพื่อนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆมาทำการจำลองผลการทดลองด้วยโปรแกรม ETAP ตามข้อมูลที่ได้มา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาทำความเข้าใจถึงความสำคัญของปัญหาในการทำวิจัย
2. ติดต่อเจ้าหน้าที่บริษัทระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพจำกัด (มหาชน) เพื่อขอข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการทำวิจัย
3. ทำการศึกษาข้อมูลที่สามารถจัดหาได้จากเจ้าหน้าที่บริษัทระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพจำกัด (มหาชน)
4. ศึกษากระบวนการทำงานรถไฟฟ้าเบื้องต้น
5. ค้นคว้า ศึกษาข้อมูล จากบทความ วารสาร เอกสาร ตำราต่างๆที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการชดเชยค่ากำลังรีแอกทีฟและวิธีการกรองฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลังที่ระดับแรงดัน 24 kV_{AC} จากการใช้งานโหลดที่ไม่มีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น
6. จำลองวงจรการทำงานระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า 1 ขบวน ด้วยโปรแกรม ETAP เพื่อดูค่าฮาร์โมนิกส์ต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าว่ามีค่าอย่างไรเพื่อเป็นแนวทางในการทำวิจัย
7. จำลองวงจรการทำงานระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าทั้งระบบ ด้วยโปรแกรม ETAP เพื่อดูค่าฮาร์โมนิกส์ต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า
8. ศึกษากระบวนการชดเชยค่ากำลังรีแอกทีฟและการกรองฮาร์โมนิกส์ด้วยวิธีที่เหมาะสม
9. สรุปผลการศึกษาวิจัยจากการจำลองผลการทดลองด้วยโปรแกรม ETAP

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. สามารถนำหลักการของภาคทฤษฎีที่เกิดจากการค้นคว้ามาจากรายงาน วารสาร บทความทางวิชาการ วิทยานิพนธ์ ข้อมูลจากอินเทอร์เน็ต มาประยุกต์ใช้จนเกิดประโยชน์ในการทำวิจัย
2. มีความรู้และเข้าใจเกี่ยวกับปัญหาของฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลังเพิ่มมากขึ้น
3. มีความรู้และเข้าใจเกี่ยวกับการชดเชยค่ากำลังรีแอกทีฟและการกรองฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้าของรถไฟฟ้า
4. สามารถนำหลักการการชดเชยค่ากำลังรีแอกทีฟไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ เมื่อมีการใช้งานโหลดที่ไม่มีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นได้ อันจะส่งผลให้ระบบที่ใช้งานมีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์สูงขึ้นและระบบมีเสถียรภาพที่ดี

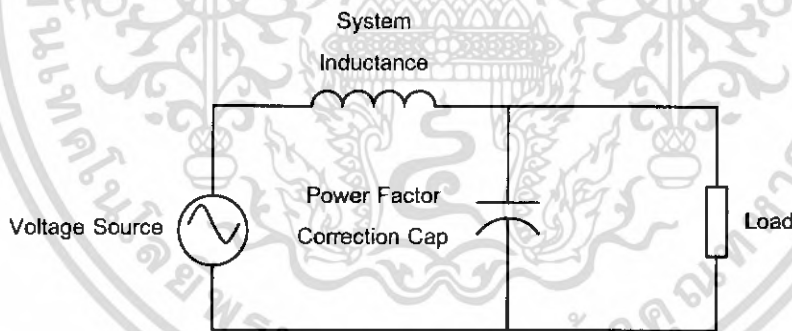
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

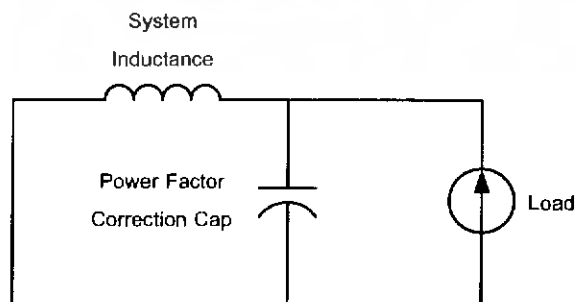
2.1 ฮาร์โมนิกส์ (Harmonic)

2.1.1 พื้นฐานเกี่ยวกับฮาร์โมนิกส์

1. ฮาร์โมนิกส์ (Harmonic) คือ สัญญาณไฟที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลัก (Fundamental Wave) ของระบบไฟฟ้า ซึ่งในประเทศไทยใช้ความถี่หลักมูล 50 Hz โดยความถี่หลักมูลเป็นฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 1 ส่วนฮาร์โมนิกส์อันดับอื่นๆก็คือ การเอาตัวเลขจำนวนเต็มบวกมาคูณกับความถี่หลักมูลเช่น ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 หมายถึงไฟฟ้าที่มีความถี่เป็น 3 เท่าของ 50 Hz ซึ่งก็คือ 150 Hz เป็นต้น ฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปจะเป็นฮาร์โมนิกส์เลขคี่ เช่น 3, 5, 7, 9, ... ฮาร์โมนิกส์ที่มักพบบ่อยๆในระบบไฟฟ้านั้นก็คือ ฮาร์โมนิกส์ที่ 5, 7, 11, 13 ส่วนฮาร์โมนิกส์เลขคู่จะเกิดขึ้นน้อย การวัดความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์สามารถทำได้หลายวิธีที่แตกต่างกันออกไป แต่โดยส่วนมากจะใช้วัดความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวม (Total Harmonic Distortion) ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ ซึ่งปริมาณของขนาดจะแสดงเป็นจำนวนเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่หลักมูล และส่วนเครื่องมือวัดฮาร์โมนิกส์ทั้งหลาย จะแสดงผลของความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวมและความเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์แต่ละส่วน ด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่หลักมูลเช่นกัน



รูปที่ 2.1 รูปแบบวงจรของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่หลักมูล



รูปที่ 2.2 รูปแบบวงจรของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่จะอธิบายว่ารูปคลื่นใดๆ นั้นมีฮาร์โมนิกส์อันดับที่เท่าใดบนอยู่บ้างและฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับนั้นมีปริมาณหรือขนาดมากน้อยแค่ไหน เราสามารถอธิบายได้โดยใช้อนุกรมฟูเรียร์

$$v(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(\frac{2\pi n t}{T}) + b_n \sin(\frac{2\pi n t}{T})] \quad (2.1)$$

$v(t)$ = ฟังก์ชันของรูปคลื่นรายคาบใดๆ

a_0 = ค่าเฉลี่ยของ $v(t)$

n = เลขจำนวนเต็มบวกใดๆ (อันดับของฮาร์โมนิกส์)

a_n และ b_n = สัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูเรียร์

T = คาบเวลาของรูปคลื่น

เราอาจเขียนใหม่ได้เป็น

$$v(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [C_n \cos(n(2\pi f t - \phi_n))] \quad (2.2)$$

f = ความถี่

$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$

$\phi_n = \tan^{-1}(\frac{b_n}{a_n})$

2. กระแสฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Current) ฮาร์โมนิกส์ที่อยู่ในรูปของกระแสในไลน์ในระบบไฟฟ้า เกิดขึ้นจากอุปกรณ์หรือโหลดที่มีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งอาจเป็นโหลดหรือแหล่งกำเนิดก็ได้ เมื่อโหลดไม่เป็นเชิงเส้นถูกป้อนด้วยแรงดันหลักมูลบริสุทธิ์โดยแหล่งจ่าย ซึ่งไม่มีค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ จะมีผลทำให้รูปร่างของกระแสมีความแตกต่างไปจากแรงดันที่ป้อนให้ ความเพี้ยนของกระแสจะมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบแหล่งจ่าย เมื่ออิมพีแดนซ์ของระบบถูกเพิ่มเข้ามา ความเพี้ยนของกระแสจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ตัวอิมพีแดนซ์ จะส่งผลทำให้เกิดความเพี้ยนของแรงดัน

3. แรงดันฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Voltage) เกิดจากการที่กระแสฮาร์โมนิกส์ไหลผ่านค่าอิมพีแดนซ์ของระบบซึ่งได้แก่ รีแอกแตนซ์ของแหล่งจ่าย รีแอกแตนซ์ของสายส่ง หรือของคาปาซิเตอร์ที่ต่อขนานเข้าไปในระบบเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor; PF) ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปแรงดัน อันเนื่องมาจากรีแอกแตนซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่นั่นเอง ซึ่งเป็นไปตามสมการดังนี้

$$V_n = Z_n I_n \quad (2.3)$$

เมื่อ V_n = แรงดันฮาร์โมนิกส์

Z_n = ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ

I_n = กระแสฮาร์โมนิกส์ในระบบ

4. อันดับฮาร์โมนิก (Harmonic Order) คือ อัตราส่วนของความถี่ฮาร์โมนิกต่อความถี่หลักมูล หรือตัวเลขจำนวนเต็มบวกมาคูณกับความถี่มูลฐาน เช่น ฮาร์โมนิกที่ 3 ของความถี่หลักมูล 50 Hz จะได้ความถี่ฮาร์โมนิกเป็น 150 Hz และฮาร์โมนิกที่ 5 จะได้ความถี่ฮาร์โมนิกเป็น 250 Hz เป็นต้น ซึ่งอันดับฮาร์โมนิกที่มักพบบ่อยๆในระบบไฟฟ้า คือ 5, 7, 11, 13

5. ตัวประกอบความเพี้ยน (Distortion Factor ; DF)

ตัวประกอบฮาร์โมนิก (Harmonics Factor ; HF)

ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิก (Total Harmonics Distortion ; THD)

ความหมายทั้งสามตัวตามมาตรฐานของ IEEE Std 519 - 1992 ; IEEE Recommended Practices and Requirement for Harmonic Control in Electrical Power Systems ได้ให้ความหมายไว้ว่า ค่าที่บอกถึงปริมาณของฮาร์โมนิกที่มีอยู่ทั้งหมด โดยเปรียบเทียบกับค่า rms ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล

IEEE 519 – 1992

Harmonic Voltage and Harmonic Current

$$DF_v = HF_v = THD_v = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{V_1^2}} \times 100\% \quad (2.4)$$

$$= \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$DF_i = HF_i = THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}} \times 100\% \quad (2.5)$$

$$= \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\%$$

สำหรับมาตรฐาน IEC ได้ให้ความหมายไว้ว่า ความเพี้ยนของฮาร์โมนิก (Distortion Factor; DF) บอกถึงปริมาณของฮาร์โมนิกที่มีอยู่ทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับค่า rms ของปริมาณทั้งหมด

IEC 555 – 1; 1982

$$HD_v = THD_v = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2}} \times 100\% \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$HD_i = THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \times 100\% \quad (2.7)$$

THD ตามนิยามของมาตรฐาน IEEE มีโอกาสเกิน 100% ได้ ถ้าในรูปคลื่นของกระแสหรือแรงดันมีฮาร์โมนิกส์ปนอยู่มาก แต่ค่า THD ตามนิยามของมาตรฐาน IEC จะไม่มีโอกาสเกิน 100%

2.1.2 ประเภทของฮาร์โมนิกส์ (Type of Harmonic)

ฮาร์โมนิกส์สามารถแบ่งเป็นประเภทต่างๆได้ดังต่อไปนี้

1. ฮาร์โมนิกส์ (Harmonic)
2. อินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ (Interharmonic)
3. ฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะ (Characteristic Harmonic)
4. ฮาร์โมนิกส์ที่ไม่เป็นคุณลักษณะ (Noncharacteristic Harmonic)
5. ฮาร์โมนิกส์อันดับที่สามหารลงตัว (Triplen Harmonic)

ประเภทของฮาร์โมนิกส์มีรายละเอียดดังนี้

1. ฮาร์โมนิกส์ (Harmonic) คือ ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใดๆ ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของตัวของความถี่หลักมูล ซึ่งรูปคลื่นจะมีฮาร์โมนิกส์อันดับต่างๆปนอยู่

2. อินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ (Interharmonic) คือ ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใดๆ ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าของตัวของความถี่หลักมูล ส่วนมากจะพบในกระแสของเตาหลอมแบบอาร์ค (Arc Furnace) เนื่องจากในระหว่างหลอมเหล็ก โดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้นการหลอมกระแสอาร์คจะยังไม่เสถียรทำให้คาบของกระแสไม่แน่นอน เช่น ความถี่หลักมูล 50 Hz ของประเทศไทย 1 คาบใช้เวลา 20 มิลลิวินาที แต่กระแสอาร์คจะมีคาบเวลาไม่เป็น 20 มิลลิวินาทีทุกคาบ ทำให้เกิดอินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ขึ้น นอกจากนี้ยังจะพบอินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการควบคุมการทำงานแบบ Integral Cycle Control หรือ Burst Firing

3. ฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะ (Characteristic Harmonic) คือ ฮาร์โมนิกส์ที่ถูกสร้างโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้า โดยการแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (AC/DC) หรือการแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (DC/AC) โดยจะใช้อุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นตัวสวิตซ์ตัดต่อกระแส เช่น Diode, SCR เป็นต้น ในสภาวะการทำงานปกติ ซึ่งอันดับของ Characteristic Harmonic สามารถหาได้จาก

$$n = kp \pm 1 \quad (2.8)$$

n = อันดับของฮาร์โมนิกส์

k = เลขจำนวนเต็มบวกใดๆ (1, 2, 3 ...)

p = จำนวนพัลส์ (pulse number) ของเครื่องแปลงผันไฟฟ้า

ตัวอย่างเช่น เครื่องแปลงผันไฟฟ้าแบบ 6 พัลส์ ไช้วงจรตัวเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟส ใช้ SCR จำนวน 6 ตัว ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อกระแส ดังนั้นใน 1 cycle ของแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับ จะเกิดกระแสไหลผ่าน SCR ในลักษณะกระแสพัลส์จำนวน 6 ครั้ง จึงใช้ค่า $p = 6$ ดังนั้นจะได้ว่ากระแสฮาร์โมนิกส์จะมีเฉพาะอันดับที่ $n = 6k \pm 1$ ก็คือ อันดับที่ 5, 7, 11, 13, 17, 19, ... เท่านั้น เราจะเรียกอันดับของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่มีเหล่านี้ว่า ฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะ (Characteristic Harmonic) หรือถ้าเครื่องแปลงผันไฟฟ้าแบบ 12 พัลส์ จะมีค่า $p = 12$ กระแสของฮาร์โมนิกส์จะมีเฉพาะอันดับที่ $n = 12k \pm 1$ ก็คือ อันดับที่ 11, 13, 23, 25, 35, 37, ... เท่านั้น ก็เป็นฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะเช่นกัน

4. ฮาร์โมนิกส์ที่ไม่เป็นคุณลักษณะ (Noncharacteristic Harmonic) คือ ฮาร์โมนิกส์ที่ถูกสร้างโดย เครื่องแปลงผันไฟฟ้าที่ไม่เป็นไปตามสมการ $n = kp \pm 1$ เช่นเครื่องแปลงผันไฟฟ้าแบบ 12 พัลส์ ควรจะมีเฉพาะ Characteristic Harmonic ที่มีอันดับที่ 11, 13, 23, 25, 35, 37 ... ดังนั้นถ้ามีฮาร์โมนิกส์ที่มีอันดับเป็น 5, 7, 17, 19 ปนมาด้วย ฮาร์โมนิกส์เหล่านี้ถือว่าเป็น Noncharacteristic Harmonic

5. ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่สามหารลงตัว (Triplen Harmonic) คือ ฮาร์โมนิกส์ที่มีลำดับถูกหารด้วย 3 ลงตัว ได้แก่ ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3, 6, 9 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มที่มีอันดับเป็นศูนย์ ในกรณีที่เป็นระบบ 3 เฟส 4 สาย ฮาร์โมนิกส์กลุ่มนี้จะรวมกันไหลอยู่ในสายนิวทรัล ทำให้เกิดปัญหา กับระบบไฟฟ้าได้ เช่น สายนิวทรัลร้อนจนฉนวนเสียหายเกิดการลัดวงจร เป็นต้น

2.1.3 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Source)

ฮาร์โมนิกส์เกิดจากอุปกรณ์หรือโหลดประเภทที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) ต่างๆที่อยู่กับระบบ ความไม่เป็นเชิงเส้นของกระแสและแรงดัน ความสัมพันธ์ระหว่างค่าชั่วขณะของกระแสและแรงดันไม่คงที่ โหลดที่ไม่มีความเป็นเชิงเส้นและเกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสสูง การเปลี่ยนแปลงของกระแสแบบฉับพลันเป็นผลทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ หรือสัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูลในระบบไฟฟ้า

จากการวิเคราะห์การทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ พบว่ารูปคลื่นกระแสของอุปกรณ์ไฟฟ้าบางชนิดอาจมีรูปคลื่นที่แตกต่างไปจากรูปคลื่นไซน์ได้ทั้งๆ ที่ถูกป้อนด้วยแรงดันกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ทั้งนี้เกิดจากปรากฏการณ์ดังนี้คือ

เกิดจากความสัมพันธ์อย่างไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) ของแรงดันและกระแส ซึ่งอาจเกิดจากการอิ่มตัวของแกนเหล็ก เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นต้น หรือเกิดจากคุณสมบัติการอาร์ก เช่น การทำงานของเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ก เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบอาร์ก หลอดปล่อยประจุในก๊าซชนิดต่างๆ และเกิดจากกระแสไหลเป็นช่วงๆ ไม่ต่อเนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์จำพวกอิเล็กทรอนิกส์กำลังต่างๆ

ดังนั้นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดฮาร์โมนิกส์ หรือแหล่งกำเนิดที่ก่อให้เกิดฮาร์โมนิกส์สามารถแบ่งเป็นประเภทได้ดังนี้

1. อุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic Device) เช่น เครื่องแปลงผันไฟฟ้า มีด้วยกันหลายประเภท ได้แก่ ตัวเรียงกระแส (Rectifier) และอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เป็นต้น

เครื่องแปลงผันไฟฟ้านิยมใช้กันอย่างมากมายตั้งแต่ในบ้าน จนถึงในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เครื่องแปลงผันไฟฟ้าจะมีด้วยกันอยู่ 2 แบบ คือ เครื่องแปลงผันไฟฟ้าหนึ่งเฟส และ เครื่องแปลงผันไฟฟ้าสามเฟส ซึ่งเครื่องแปลงผันไฟฟ้าหนึ่งเฟสนั้นจะใช้กับอุปกรณ์จำพวกอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในบ้าน ได้แก่ คอมพิวเตอร์ โทรทัศน์ และอื่นๆอีกมากมาย

เครื่องแปลงผันไฟฟ้าสามเฟส ที่ใช้กันทั่วไปสามารถแบ่งได้ดังนี้

กรณี AC / DC ใช้เป็นแหล่งจ่ายให้แก่ มอเตอร์กระแสตรง แบตเตอรี่

กรณี AC / DC / AC ใช้กับมอเตอร์ซิงโครนัส หรือ มอเตอร์เหนี่ยวนำ การที่ต้องเปลี่ยนจาก DC เป็น AC อีกครั้งเพื่อทำให้มอเตอร์สามารถจ่ายกำลังที่ความถี่มากกว่า 50 Hz หรือกล่าวกันง่าย ๆ ก็คือ การที่จะสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้ตามต้องการ โดยการปรับความถี่ เครื่องแปลงผันไฟฟ้านั้นสามารถแบ่งออกได้ตามจำนวนพัลส์ ซึ่งมีด้วยกันตั้งแต่ 3, 6, 12, 18, 24 และมากกว่านี้ โดยจำนวนพัลส์จะบอกถึงจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในการปิด - เปิดวงจร (Switching) ซึ่งโดยปกติจะใช้ไทรสเตอร์ควบคุม ทั้งนี้ที่นิยมใช้ SCR เนื่องจากสามารถควบคุมมุมจุดชนวนได้ง่าย ในงานทั่วไปนิยมใช้ 6 พัลส์ หรือ 12 พัลส์ สำหรับงานที่ต้องการกำลังต่ำจะใช้ 3 พัลส์ งานที่ต้องการกำลังสูงจะใช้ 18 พัลส์ หรือมากกว่านี้ ซึ่งยิ่งจำนวนของพัลส์มากก็จะทำให้รูปคลื่นเรียบ มีประสิทธิภาพสูงและมีฮาร์โมนิกส์น้อย แต่ราคาการลงทุนสูง

2. อุปกรณ์ประเภทแม่เหล็ก (Magnetizing Device) ได้แก่ หม้อแปลง มอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น

หม้อแปลง (Transformer) เมื่อได้รับแรงดันมากเกินไปก็ทำให้เกิดกระแสสร้างสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็ก ในสถานะอยู่ตัวปกติ (Normal Steady State) หม้อแปลงไม่ทำให้เกิดการเพี้ยน (Distortion) ต่อข่ายระบบวงจรไฟฟ้า แต่ขณะสถานะชั่วครู่ (Transient) หรือขณะหม้อแปลงทำงานเกินขอบเขตปกติ จะทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ขึ้น กรณีหม้อแปลงไม่มีโหลด แรงดันปฐมภูมิรูปคลื่นไซน์ของหม้อแปลงจะสร้าง ฟลักซ์

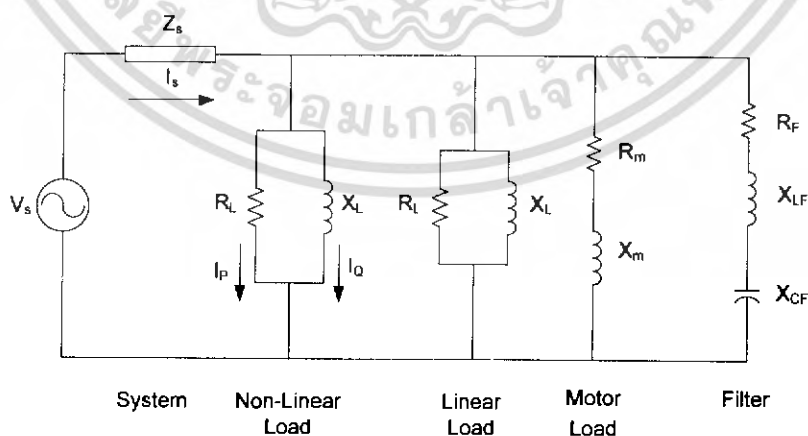
รูปคลื่นไซน์ แต่กระแสปฐมภูมิจะไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ ที่เป็นเช่นนี้เพราะฟลักซ์ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสสร้างอำนาจแม่เหล็ก

เครื่องจักรกลไฟฟ้า (Electric Machinery) ได้แก่ มอเตอร์ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องจักรกลไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัวจะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงข่ายระบบวงจรไฟฟ้า แต่ในสถานะชั่วคราวหรือขณะเครื่องจักรกลไฟฟ้าทำงานเกินขอบเขต จะทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ขึ้น เครื่องจักรกลไฟฟ้าจะผลิตกระแสฮาร์โมนิกส์ในฟังก์ชันความเร็วกับจำนวนร่องของอาร์เมเจอร์ ในการออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ดี ต้องทำให้ระดับกระแสฮาร์โมนิกส์มีค่าน้อยที่สุด ในทางปฏิบัติกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับสามจะสกัดกั้นโดยการต่อหม้อแปลงแบบเดลต้า

3. อุปกรณ์ประเภทอาร์ก (Arc Device) ได้แก่ เตาหลอมไฟฟ้า (Arc Furnaces) เครื่องเชื่อมไฟฟ้า จะกำเนิดฮาร์โมนิกส์จำนวนมาก อุปกรณ์ประเภทอาร์กก็มีมากมายหลายชนิด ซึ่งรวมถึงเตาอาร์กขนาดใหญ่และเครื่องเชื่อมไฟฟ้า อุปกรณ์ทั้งสองทำให้เกิดปัญหาฮาร์โมนิกส์และไฟกระพริบ เพราะจากการที่มีการเปลี่ยนแปลงของกระแสสูงที่ไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ประเภทอาร์กอื่น ๆ อีก ซึ่งทำให้เกิดปัญหาฮาร์โมนิกส์ ได้แก่ การอาร์กจากอุปกรณ์แสงสว่าง ที่ใช้กับไฟถนน

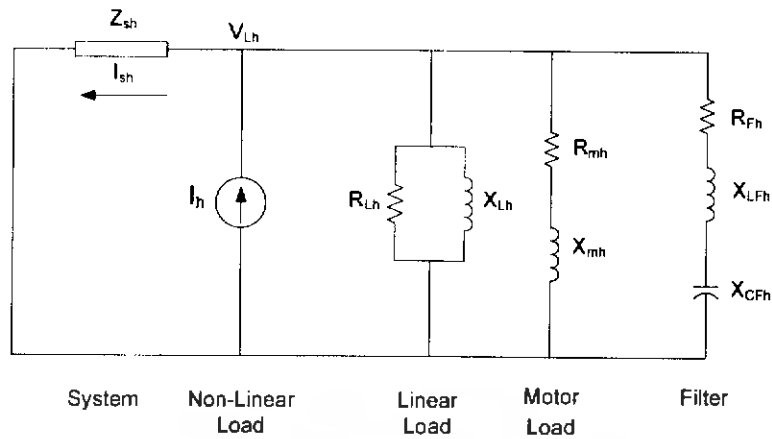
2.1.4 แบบจำลองของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์

ก่อนที่จะทำการหาค่าของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์เพื่อต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า จะต้องทำการวิเคราะห์ก่อนว่ามีกระแสฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้นที่อันดับใดบ้าง และมีขนาดเท่าไรที่ไหลเข้าไปยังระบบไฟฟ้าซึ่งจะต้องนำค่า และพารามิเตอร์ต่างๆของระบบมาทำการคำนวณว่ามีกระแสไหลเข้ามาในตัวกรองเท่าไร ซึ่งจะต้องให้กระแสไหลเข้าตัวกรองไม่เกินค่าพิคคัพของตัวอุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์และที่วงจรสมมูลที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ใดๆ ทำการวิเคราะห์หาค่าต่างๆตามมาตรฐานก่อน



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างวงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างวงจรมูลของระบบไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ใดๆ

การวิเคราะห์หาขนาดตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ชนิดกรองเดี่ยวจะมีความถูกต้องมากน้อยเพียงใดจะขึ้นอยู่กับแบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆในระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์มีรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

2.1.4.1 แบบจำลองของระบบไฟฟ้า

แบบจำลองนี้จะมองจากจุดต่อรวมเข้าไปในระบบไฟฟ้าโครงข่ายที่จ่ายไฟฟ้าซึ่งจะแทนแบบจำลองนี้ด้วยค่าอิมพีแดนซ์ที่มีค่าความต้านทานต่ออนุกรมกับค่ารีแอกแตนซ์ โดยที่ค่าความต้านทานมีความสัมพันธ์กับค่ารีแอกแตนซ์ในรูปของอัตราส่วน X/R ที่ความถี่หลักมูล ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์จะสามารถหาได้จากสมการที่ 2.10

$$Z_s = \frac{V_{sys}^2}{MVA_{sc}} \tag{2.9}$$

$$Z_{sh} = R_s - jhX_s \tag{2.10}$$

- เมื่อ Z_s = ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน
- Z_{sh} = ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์
- R_s = ค่าความต้านทานของระบบไฟฟ้า



รูปที่ 2.5 แบบจำลองของระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- X_s = ค่ารีแอกแตนซ์ของระบบไฟฟ้า
 V_{sys} = ค่าแรงดันของระบบไฟฟ้า
 MVA_{sc} = ค่ากำลังลัดวงจรของระบบไฟฟ้า
 h = เลขอันดับฮาร์โมนิกส์

ในระบบไฟฟ้าทั่วไป ณ จุดต่อร่วมค่า X/R ratio ปกติจะมีค่าประมาณ 10 เท่า คือ $R_s \approx 0.1X_s$ จากข้อมูลเหล่านี้นำมาหาค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าได้

2.1.4.2 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นหม้อแปลงขนาดกลาง ส่วนใหญ่จะทำงานที่แรงดันต่ำกว่าพิกัด ดังนั้นการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ในโรงงานอุตสาหกรรมจึงจำลองหม้อแปลงด้วยค่าอิมพีแดนซ์ที่ประกอบด้วย ค่าของค่าความต้านทานต่ออนุกรมอยู่กับค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหล (Leakage Reactance) ซึ่งแปรผันตามกับเลขฮาร์โมนิกส์ ส่วนค่าความต้านทานถ้าหากไม่คิดผลของ Skin effect ก็จะได้ว่ามีค่าคงที่ ดังนั้นที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงได้ดังนี้

$$Z_{Tr} = \frac{\%Z}{100} \times \frac{V^2}{KVA \times 10^3} \quad (2.11)$$

$$R_{Tr} = Pc \times \frac{V^2}{(KVA \times 10^3)^2} \quad (2.12)$$

$$Z_{Trh} = R_{Tr} + jhX_{Tr} \quad (2.13)$$

เมื่อ Z_{Tr} = ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่มูลฐานของหม้อแปลง

Z_{Trh} = ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ของหม้อแปลง

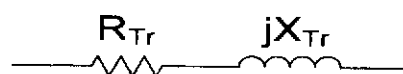
R_{Tr} = ค่าความต้านทานที่ความถี่มูลฐานของหม้อแปลง

X_{Tr} = ค่ารีแอกแตนซ์ที่ความถี่มูลฐานของหม้อแปลง

V = ค่าแรงดันพิกัดของหม้อแปลง

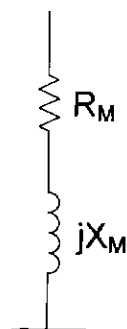
Pc = ค่ากำลังสูญเสียภายในขดลวด

$\%Z$ = ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงคิดเป็นร้อยละ



รูปที่ 2.6 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้า

2.1.4.3 แบบจำลองโหลดประเภทมอเตอร์

ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนมากจะใช้มอเตอร์แบบเหนี่ยวนำเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำจะประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ ในส่วนของโรเตอร์และสเตเตอร์ ดังนั้นในปริณญาณิพนธ์ฉบับนี้จะใช้แบบจำลองของมอเตอร์ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ ด้วยการรวมค่ารีแอกแตนซ์ของโรเตอร์และสเตเตอร์เข้าด้วยกัน แล้วต่ออนุกรมกับค่าความต้านทานของขดลวด ตามแบบจำลองของ CIGRE ซึ่งจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ดังนี้

$$X_M = \frac{V_{sys}^2}{S_{start}} \quad (2.14)$$

$$R_M = \frac{X_M}{3} \quad (2.15)$$

$$Z_{Mh} = R_M + jhX_M \quad (2.16)$$

เมื่อ Z_{Mh} = ค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ที่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ h

V_{sys} = ค่าแรงดันพิกัดของระบบที่สภาวะปกติ

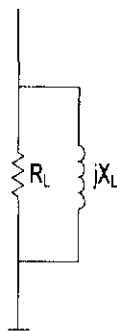
S_{start} = ค่ากำลังปรากฏของมอเตอร์ตอนเริ่มทำงาน

ค่ากำลังปรากฏพิกัดของมอเตอร์ตอนเริ่มทำงาน (S_{start}) จะมีค่าเท่ากับค่ากำลังปรากฏพิกัดของมอเตอร์ตอนทำการยึดตัวโรเตอร์ (Lock Rotor) โรงงานอุตสาหกรรมที่มีมอเตอร์เหนี่ยวนำแรงดันต่ำหลายๆตัวต่ออยู่ภายในโรงงานเดียวกัน อาจคิดค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ได้โดยการนำมอเตอร์มาพิจารณารวมกันเป็นกลุ่มได้

2.1.4.4 แบบจำลองของโหลดเชิงเส้น

ข้อมูลของโหลดเชิงเส้นโดยทั่วไปนั้น จะอยู่ในรูปของกำลังงานจริง (P) และกำลังงานรีแอกทีฟ (Q) ซึ่งใช้สำหรับการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของการคำนวณโหลดโพล์ที่ความถี่หลักมูลสำหรับการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ในโรงงานอุตสาหกรรม แบบจำลองเชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แบบจำลองของโหลดเชิงเส้น

เส้นจะใช้ลักษณะเดียวกันกับการคำนวณโหลดโพล် คือ อิมพีแดนซ์จะประกอบด้วย ค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์ซึ่งจะต่ออนุกรมกันหรือต่อขนานกันนั้น ขึ้นอยู่กับข้อมูลของโหลดนั้นๆ ในปริยายนิพนธ์ฉบับนี้จะใช้การจำลองของโหลดแบบขนาน โดยค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์นั้นหาได้จากกำลังงานจริง (P) และกำลังงานรีแอคทีฟ (Q) ของโหลดนั้นๆตามสมการที่ 2.17 และสมการที่ 2.18

$$R_L = \frac{V_{sys}^2}{P_1} \quad (2.17)$$

$$X_L = \frac{V_{sys}^2}{h \cdot Q_1} \quad (2.18)$$

เมื่อ R_L = ค่าความต้านทานของโหลดที่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ h

$X_{L,h}$ = ค่ารีแอคแตนซ์ของโหลดที่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ h

V_{sys} = ค่าแรงดันพิกัดของระบบที่สภาวะปกติ

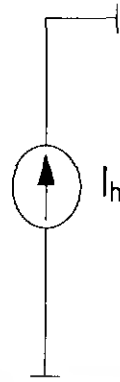
P_1 = กำลังงานจริงของโหลดในสภาวะแรงดันปกติ

Q_1 = กำลังงานรีแอคทีฟของโหลดในสภาวะแรงดันปกติ

ข้อมูลของโหลดเชิงเส้นภายในโรงงาน เพื่อการหาแบบจำลองของโหลดแบบต่อขนานคือ กำลังงานจริง กำลังงานรีแอคทีฟและแรงดันของระบบที่สภาวะที่โหลดทำงาน

2.1.4.5 แบบจำลองของแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์

แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์คือโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นภายในโรงงาน เช่น คอนเวอร์เตอร์แบบสวิต วจรเรียงกระแส เป็นต้น ซึ่งแบบจำลองของแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ภายในโรงงานนั้นจะถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แบบจำลองแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิก

ข้อมูลของความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกที่อันดับต่างๆ อันเนื่องมาจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ต่ออยู่ภายในโรงงานอุตสาหกรรม สามารถหาได้จากการตรวจวัดฮาร์โมนิกภายในโรงงานก่อน จากนั้นจึงนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์หาค่าพหามิตอร์ของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกชนิดกรองเดี่ยว หรืออาจจะเป็นค่าที่ประเมินจากข้อมูลรายละเอียดของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อศึกษาถึงการหาค่าพหามิตอร์ของตัวกรอง

2.1.5 ผลกระทบของฮาร์โมนิก (Effects of Harmonic)

ฮาร์โมนิกสามารถทำให้เกิดผลกระทบต่างๆที่ไม่ต้องการได้ในระบบไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น ทำให้เกิดสัญญาณรบกวน ทำให้เกิดการเสียหายแก่ข้อมูล ทำให้เกิดแรงดันเกินพิกัด ทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงานผิดพลาด ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเกิดความร้อนและไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ และอาจเกิดความเสียหายขึ้นได้ ผลของฮาร์โมนิกทำให้เกิดสัญญาณรบกวนในระบบโทรศัพท์และสายส่งสัญญาณต่างๆ และยังทำให้รีเลย์และมิเตอร์ต่างๆทำงานผิดพลาดอีกด้วย องค์ประกอบฮาร์โมนิกมีลักษณะที่เหมือนกับสัญญาณพาหะในระบบ สิ่งที่ได้รับผลกระทบจากฮาร์โมนิกมากที่สุดก็คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ฮาร์โมนิกยังสามารถทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในหม้อแปลงและคาปาซิเตอร์ ส่งผลให้มีอายุการใช้งานที่สั้นลง หรืออาจเกิดความเสียหายขึ้น เว้นไขต่างๆ และรายละเอียดของการใช้งานอุปกรณ์ในขณะมีฮาร์โมนิกนั้นสามารถดูได้จาก ANSI/IEEE Std 18 -1980 และ IEEE Std C57.110

โดยทั่วไปแล้วปริมาณฮาร์โมนิกทั้งหมดที่คิดเป็นร้อยละ (Total Harmonic Distortion: THD) ในโรงงานอุตสาหกรรมต้องไม่เกิน 5 % ตามคำแนะนำของ IEEE เรื่อง Harmonic Control in Electrical Power System Std. 519 -1992

ฮาร์โมนิกนั้นไม่ได้ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง เพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ยังทำให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับมีประสิทธิภาพลดลง ทำให้ต้องเพิ่มการบำรุงรักษา

มากขึ้น เป็นการทำให้ต้นทุนสูงขึ้น ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่ม และเพิ่มการสูญเสียในหม้อแปลงและคาปาซิเตอร์

รายละเอียดผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลังและระบบอื่น ๆ มีดังนี้

1. ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์จากสภาวะรีโซแนนซ์ความเสียหายในระบบไฟฟ้าที่เกิดจากสภาวะรีโซแนนซ์ อาจจะทำให้กระแสฮาร์โมนิกส์ค่าต่ำ ๆ มีขนาดสูงขึ้นถึง 4-5 เท่าตัว และจากการที่ระบบไฟฟ้าที่มีค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor) ต่ำ จะมีประสิทธิภาพในการใช้งานต่ำด้วย โดยมีการสูญเสียในระบบสูง เกิดแรงดันตกมาก ซึ่งเป็นปัญหาให้กับระบบไฟฟ้า การแก้ปัญหาดังกล่าวจึงต้องใช้คาปาซิเตอร์มาทำการปรับปรุ่งค่าตัวประกอบกำลังในระบบ ซึ่งคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในการปรับปรุ่งค่าตัวประกอบกำลัง อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการรีโซแนนซ์เฉพาะแห่ง ซึ่งคาปาซิเตอร์ได้รับกระแสที่มากเกินไปเกิดกำลังจากผลของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไหลเข้าคาปาซิเตอร์ ซึ่งจะเป็นสาเหตุให้คาปาซิเตอร์เสียหายเกิดระเบิดได้นั่นเอง

การเกิดรีโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้า สามารถแบ่งออกเป็นสองแบบ คือ รีโซแนนซ์ขนาน และรีโซแนนซ์อนุกรม

1.1. รีโซแนนซ์ขนาน

รีโซแนนซ์ขนานเกิดจากอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงขึ้นกับแหล่งจ่ายฮาร์โมนิกส์ที่มีความถี่รีโซแนนซ์ โดยส่วนมากจะพิจารณาแหล่งจ่ายฮาร์โมนิกส์เป็นแหล่งจ่ายกระแส ดังนั้นผลของรีโซแนนซ์ขนาน จะเพิ่มแรงดันฮาร์โมนิกส์และจะเกิดกระแสไหลในแต่ละสาขาของวงจรรีโซแนนซ์มีค่าสูง ซึ่งรีโซแนนซ์ขนานแบ่งเป็นกรณีต่าง ๆ ดังนี้

- รีโซแนนซ์ขนานระหว่างแหล่งจ่ายฮาร์โมนิกส์กับคาปาซิเตอร์ที่บัสบาร์เดียวกัน โดยถ้าให้อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายเป็นอินดักแตนซ์ล้วน จะได้

$$f_p = f \sqrt{\frac{S_s}{S_c}} \quad (2.19)$$

เมื่อ f คือ ความถี่หลักมูล

f_p คือ ความถี่รีโซแนนซ์ขนาน

S_s คือ พิกัดกำลังลัดวงจรของแหล่งจ่าย (Var)

S_c คือ พิกัดของคาปาซิเตอร์ (Var)

- รีโซแนนซ์ขนานระหว่างอินดักแตนซ์ของระบบกับคาปาซิแตนซ์ของระบบ

- รีโซแนนซ์ขนานระหว่างอินดักแตนซ์ของระบบกับโหลดที่เป็นคาปาซิเตอร์

1.2. รีโซแนนซ์อนุกรม

รีโซแนนซ์อนุกรมหาได้จาก

$$f_s = f \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{S_t}{S_c \cdot Z_t} \right) - (S_1^2 - S_c^2) \right]} \quad (2.20)$$

เมื่อ f_s คือ ความถี่รีโซแนนซ์อนุกรม

S_t คือ พิกัดหม้อแปลงไฟฟ้า

Z_t คือ เพอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

S_c คือ พิกัดของโหลด

ผลที่เกิดขึ้นจากรีโซแนนซ์อนุกรม คือ กระแสคาปาซิเตอร์จะมีค่าสูง แรงดันฮาร์โมนิกส์จะมีค่าน้อย

2. ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อระบบสายส่ง

เมื่อมีกระแสฮาร์โมนิกส์ไหลในระบบสายส่ง ทำให้เกิดผลเสียหลัก 2 ประการ

2.1. ทำให้กำลังสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้น โดยเป็นผลมาจากค่า RMS ของรูปคลื่นกระแสตามสมการ

$$P_L = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n \quad (2.21)$$

P_L = กำลังสูญเสียในระบบ

I_n = กระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ n (ค่า rms)

R_n = ความต้านทานระบบที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์

2.2. ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของวงจร โดยเป็นผลของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไหลในวงจร กรณีในระบบไม่มั่นคง คือ ระบบมีอิมพีแดนซ์สูงและมีระดับฟอลต์ต่ำทำให้เกิดแรงดันตกมาก เป็นผลให้เกิดการเพี้ยนของแรงดันซึ่งผิดกับระบบมั่นคงที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำและมีระดับฟอลต์สูง แรงดันตกคร่อมนี้มีผลต่อสายเคเบิล ทำให้เกิดความเครียดไดอิเล็กตริก (dielectric stress) สูงกว่าปกติ เป็นผลให้อายุการใช้งานของเคเบิลสั้นลงและทำให้เกิดฟอลต์ได้ง่าย

3. ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อหม้อแปลง

ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อหม้อแปลงมี 3 ประการดังนี้

3.1. กระแสฮาร์โมนิกส์ ทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลด และกำลังสูญเสียสเตรย์ฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้น

3.2. แรงดันฮาร์โมนิกส์ทำให้เกิดกำลังสูญเสียกระแสไหลวน และกำลังสูญเสียฮิสเตอรีซิสเพิ่มขึ้นโดยถ้าแหล่งจ่าย จ่ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้หม้อแปลงกำลังสูญเสียของแกนเหล็กของหม้อแปลงจะเป็นไปตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{CORE} = (k_1 f + k_2 f^2) V^2 \quad (2.22)$$

- P_{CORE} = กำลังสูญเสียแกนเหล็ก
- $k_1 f$ = กำลังสูญเสียฮิสเตอร์ซิส
- $k_2 f^2$ = กำลังสูญเสียกระแสวนในแกนเหล็ก
- V = แรงดันรูปคลื่นไซน์ของแหล่งจ่าย

3.3. ทำให้เกิดรีโซแนนซ์ระหว่างขดลวดหม้อแปลงกับคาปาซิเตอร์ของสาย

จะเห็นว่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงเกิดจากกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกส์ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่โดยกำลังสูญเสีย จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่ม ดังนั้นที่ฮาร์โมนิกส์สูงจะทำให้เกิดความร้อนแก่หม้อแปลงมากกว่าฮาร์โมนิกส์ต่ำๆ

4. ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อเครื่องจักรไฟฟ้า

ทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและไม่มีโหลดเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เครื่องจักรร้อนกว่าปกติ นอกจากนี้ฮาร์โมนิกส์ยังมีผลต่อประสิทธิภาพและแรงบิดของเครื่องจักรด้วย มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีแหล่งจ่ายไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ จะสร้างคลื่นความหนาแน่นฟลักซ์รบกวนอย่างมากเมื่อเทียบกับกรณีมีแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ ฮาร์โมนิกส์จะทำให้เกิดฟลักซ์ผลลัพธ์กระจายในช่องอากาศ ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Cogging คือ การที่ไม่สามารถเดินเครื่องได้หรือเกิด Crawling คือ การที่ความเร็วมอเตอร์ต่ำกว่าซิงโครนัสซึ่งยังไม่มีมาตรฐานกำหนดแรงดันและกระแสฮาร์โมนิกส์สำหรับมอเตอร์

5. ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อสวิตช์เกียร์

กระแสฮาร์โมนิกส์จะเพิ่มความร้อนและกำลังสูญเสียให้แก่สวิตช์เกียร์ ส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์ในรูปคลื่นกระแสมีผลกระทบต่อความสามารถในการตัดกระแสของสวิตช์เกียร์เป็นผลให้การทำการตัดยากมาก เซอร์กิตเบรกเกอร์จะไม่สามารถตัดกระแสเมื่อมีฮาร์โมนิกส์ ทั้งนี้เนื่องจากขดลวดเป่าดับอาร์กซึ่งทำหน้าที่ช่วยให้อาร์กเข้าไปใน Arc – chute เพื่อทำการตัดทำงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพเป็นผลให้อาร์กไม่ขาด ทำให้เบรกเกอร์ไม่สามารถตัดกระแสได้ ปัญหานี้จะเกิดกับอุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ตัดกระแส เช่น โหลดเบรกสวิตช์ ตัวปิด-เปิดวงจร เป็นต้น

6. ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อคาปาซิเตอร์แบงก์

ทำให้เกิดความร้อนและความเครียดไดอิเล็กตริกกับคาปาซิเตอร์อย่างมากการเพี้ยนของแรงดัน

ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์เป็นไปตามสมการ

$$P_L = \sum_{n=1}^{\infty} C(\tan \delta) \omega_n v_n \quad (2.23)$$

$$P_L = \text{กำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์}$$

$$\tan \delta = R/(1/\omega C) \text{ แฟกเตอร์การสูญเสีย (Loss Factor)}$$

$$\omega_n = 2\pi f_n$$

$$V_n = \text{แรงดัน (rms) ฮาร์โมนิกอันดับ } n$$

มากกว่านั้นในกำลังงานรีแอกทีฟ (Reactive power) ก็ยังมีฮาร์โมนิกรวมอยู่ด้วย ดังเช่น

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \quad (2.24)$$

ผลของรีโซแนนซ์ขนานและอนุกรมที่คาปาซิเตอร์เป็นสาเหตุของแรงดันและกระแสที่มากเกินไป ทำให้มีความสูญเสียและความร้อนสูงขึ้นทำให้เกิดความเสียหายแก่คาปาซิเตอร์

7. ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อระบบป้องกันของระบบไฟฟ้ากำลัง

ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อรีเลย์สามารถสรุปได้ดังนี้

-ฮาร์โมนิกทำให้รีเลย์มีแนวโน้มที่จะทำงานช้าลง หรือทำงานด้วยค่าเริ่มที่สูงขึ้นแทนที่จะทำงานอย่างรวดเร็วหรือทำงานด้วยค่าเริ่มต่ำๆ

-ฮาร์โมนิกทำให้รีเลย์สติดแบบความถี่ต่ำ (Static under frequency relay) มีความไวกว่าปกติทำให้การทรูปผิดพลาด

-ฮาร์โมนิกทำให้รีเลย์กระแสและแรงดันเกิน (Over current and over voltage relay) เปลี่ยนลักษณะการทำงาน

-ฮาร์โมนิกทำให้แรงบิดทำงานของรีเลย์กลับทิศทาง

-ฮาร์โมนิกทำให้ค่าอิมพีแดนซ์รีเลย์ชนิดคานสมดุล (Balanced beam impedance relay) วัดระยะที่เกิดฟอลต์ผิดพลาดมากเกินไปหรือน้อยเกินไป

-ฮาร์โมนิกทำให้ความเร็วในการทำงานของรีเลย์ชนิดผลต่าง (Differential relay) ช้าลง

8. ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อมิเตอร์วัดไฟฟ้า

มิเตอร์และเครื่องวัดต่างๆ ก่อนการใช้ต้องทำการปรับแต่ง (Calibration) ที่กระแสไฟสลักรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่หลักมูล ดังนั้นถ้านำมิเตอร์มาใช้กับระบบที่มีฮาร์โมนิก ค่าที่วัดได้จะผิดพลาด หรือกรณีเกิดรีโซแนนซ์ในระบบ มีผลทำให้เกิดแรงดันฮาร์โมนิกค่าสูงในวงจรทำให้มิเตอร์ประเภทจานเหนี่ยวนำ เช่น Watt-hour Meter ทำงานผิดพลาดเนื่องจากการเพี้ยนของฮาร์โมนิก โดยทั่วไปการเพี้ยนของฮาร์โมนิกมากกว่า 20% จะมีผลต่อมิเตอร์

9. ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่ออุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟฟ้า

- คอมพิวเตอร์ จะไวต่อความเพี้ยนของฮาร์โมนิกอย่างมาก

- หลอดฟลูออเรสเซนต์และหลอดเมอคิวรีอาร์ก ซึ่งการทำงานของหลอดชนิดนี้ต้องมีบัลลาสต์ และคาปาซิเตอร์ด้วยจึงอาจเกิดรีโซแนนซ์กับอินดักแตนซ์ของบัลลาสต์และวงจร ทำให้หลอดเกิดความร้อนสูงจนเกิดความเสียหาย

- โทรnatศน์ จะมีฮาร์โมนิกส์ที่มีผลต่อแรงดันยอดทำให้ขนาดและความสว่างของภาพเปลี่ยนไป

10. ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่อระบบสื่อสาร

ฮาร์โมนิกส์จะก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสาร ทำให้คุณภาพของการส่งสัญญาณลดลง สัญญาณรบกวนระดับต่ำ เช่น ในระบบโทรศัพท์อาจก่อให้เกิดความรำคาญฮาร์โมนิกส์จะเหนี่ยวนำให้เกิดสัญญาณรบกวนทำให้ได้ยินเสียงเบาว่าปกติหรือมีเสียงรบกวน แต่ที่ระดับสูง ฮาร์โมนิกส์ทำให้คุณภาพการส่งลดลงและอาจเกิดการสูญเสียของข่าวสาร หรือระบบสื่อสารถึงกับใช้การไม่ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

หลักพื้นฐานของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์และการประยุกต์ใช้งาน

ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดหนึ่งในระบบไฟฟ้า ซึ่งช่วยในการป้องกันกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับต่างๆที่เกิดจากโหลดประเภทที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Load) ไม่ให้ไหลเข้าไปในระบบไฟฟ้าเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายกับโหลดที่ต่อรวมอยู่ในระบบไฟฟ้า ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีกระแสฮาร์โมนิกส์ไหลในระบบ จะเกิดปัญหาด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าขึ้นมากมาย ดังนั้นจึงต้องมีการกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไหลอยู่ในระบบออกไป โดยการใส่ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ชนิดกรองเดี่ยว เพื่อเป็นการเพิ่มความมั่นคงให้กับระบบ รวมถึงการมีคุณภาพกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพที่ดีขึ้นด้วย

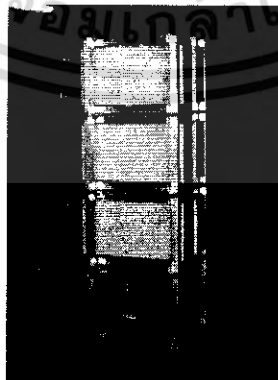
ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้ามักมี 2 แบบ คือ

1. ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ประเภทแอคทีฟ (Active Filters) ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบสวิตช์กำลัง (Power Electronic Switching) ซึ่งจะทำหน้าที่สร้างกระแสฮาร์โมนิกส์ขึ้นมาหักล้างกับกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อไม่ให้กระแสฮาร์โมนิกส์ไหลเข้าไปในระบบไฟฟ้า

2. ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ประเภทพาสซีฟ (Passive Filters) ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทาน ทำงานคล้ายกับเป็นทางเดินของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ลำดับต่างๆมีหลายชนิดทั้งแบบกรองเดี่ยวแบบกรองคู่ แบบโลพาส แบบไฮพาส และแบบแบนด์พาส

3.1 ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบต่างๆ ที่มีความซับซ้อนมากขึ้นกว่าตัวเก็บประจุโดยทั่วไป เพราะเพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการใช้งานที่แรงดันสูง โดยเฉพาะวัสดุไดอิเล็กตริกจะมีขนาดบางมากและต้องสามารถทนต่อความเครียดทางไฟฟ้าสูงได้ ตัวเก็บประจุกำลังมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ สามารถจ่ายกำลังรีแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้าได้



รูปที่ 3.1 แสดงตัวเก็บประจุที่ใช้ในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ที่มีองค์ประกอบเดียวคือ ขดลวดทองแดงพันอยู่บนแกนเหล็ก ซึ่งแกนของขดลวดนั้นมีอยู่ 2 แบบคือ แกนเหล็กและแกนอากาศ แกนทั้ง 2 แบบนี้จะทำให้ตัวเหนี่ยวนำมีคุณสมบัติการทำงานที่แตกต่างกัน ตัวเหนี่ยวนำแบบแกนเหล็กสามารถเกิดการอิมิตัวของสนามแม่เหล็กที่เกิดการกระแสวิ่งผ่านตัวมันได้ แต่ตัวเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศจะไม่เกิดการอิมิตัวของสนามแม่เหล็ก การอิมิตัวของสนามแม่เหล็กของตัวเหนี่ยวนำนั้นจะเป็นข้อจำกัดในการทำงานของตัวเหนี่ยวนำด้วย คุณสมบัติอีกประการของตัวเหนี่ยวนำ คือ สามารถรับกำลังรีแอกทีฟที่เป็นส่วนเกินในระบบไฟฟ้าให้ไหลผ่านตัวมันได้ เพื่อไม่ให้แรงดันในระบบเกินค่าพิกัด จึงถูกนำมาใช้ในการเพิ่มเสถียรภาพในระบบไฟฟ้า



รูปที่ 3.2 แสดงตัวเหนี่ยวนำแบบแกนเหล็กและแกนอากาศแบบ 3 เฟส

3.3 ตัวประกอบกำลังและการชดเชยกำลังรีแอกทีฟ (Power Factor and Reactive Power Compensation)

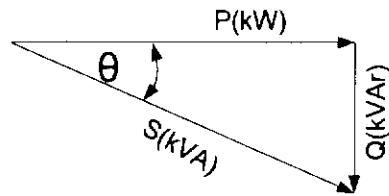
การปรับปรุงตัวประกอบกำลัง (Power Factor Correction) ของระบบไฟฟ้ากำลังให้มีค่าสูงขึ้นจะส่งผลช่วยให้มีประสิทธิภาพและคุณภาพของระบบไฟฟ้ากำลังดีขึ้น เช่น ค่ากำลังสูญเสียในระบบไฟฟาลดลง ช่วยรักษาระดับแรงดันในระบบไฟฟ้าสูงขึ้นและทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าสามารถจ่ายโหลดได้เพิ่มขึ้น เป็นต้น

3.3.1 ตัวประกอบกำลังของสัญญาณไซน์

ค่าตัวประกอบกำลัง (P.F.) คือค่าคงที่ของโหลดตัวใดตัวหนึ่งหรือของกลุ่มโหลดใดๆซึ่งใช้เป็นค่าบอกความสามารถในการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าปรากฏ (S) ให้เป็นกำลังไฟฟ้าจริง (P) จากรูปที่ 3.3 แสดงสามเหลี่ยมกำลังที่ใช้ในการหาค่าตัวประกอบกำลัง ซึ่งสามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงต่อกำลังไฟฟ้าปรากฏ ดังสมการที่ 3.1

$$\begin{aligned}
 P.f. &= \frac{\text{Real Power}}{\text{Apparent Power}} \\
 &= \frac{P(kW)}{S(kVA)} \\
 &= \cos \theta
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เมื่อ S คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ (VA)
 P คือ กำลังไฟฟ้าจริง (W)
 Q คือ กำลังไฟฟ้าเสมือน (Var)

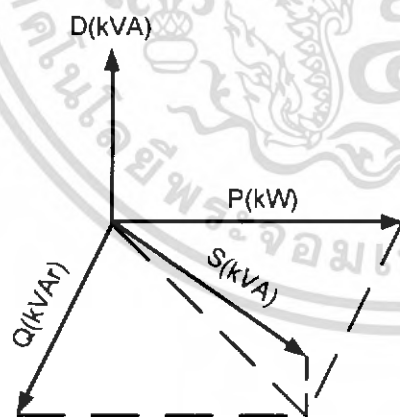
รูปที่ 3.3 สามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการหาค่าตัวประกอบกำลัง

3.3.2 ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของสัญญาณที่มีส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์

กรณีที่ระบบไฟฟ้ามีการใช้งานโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งจะทำให้มีส่วนประกอบของฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้สามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้ามีความผิดเพี้ยนไปจากเดิมที่มีส่วนประกอบเพียง กำลังไฟฟ้าปรากฏ (S) กำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) โดยจะมีค่ากำลังไฟฟ้าที่ผิดเพี้ยน (D) ประกอบอยู่ในสามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้าด้วย จากรูปที่ 3.4 แสดงสามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้าที่มีส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์ ซึ่งสามารถหาค่าตัวประกอบกำลังได้จากสมการที่ 3.2

กำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน (Distortion Factor) สามารถหาได้จากสมการ

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad \text{kVA} \quad (3.2)$$



เมื่อ S คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ (kVA)
 P คือ กำลังไฟฟ้าจริง (kW)
 Q คือ กำลังไฟฟ้าเสมือน (kVar)
 D คือ กำลังไฟฟ้าผิดเพี้ยน (kVA)

รูปที่ 3.4 แสดงสามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้าของสัญญาณที่มีส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์

ตัวประกอบกำลังเมื่อสัญญาณที่มีส่วนประกอบฮาร์โมนิกค้นหาได้จากสมการที่ 3.3

$$\begin{aligned}
 P.f. &= \frac{P_1}{V \sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}} \\
 &= \frac{VI_1 \cos \phi}{V \sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}} \\
 &= \cos \phi \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}} \\
 &= \text{Dis.F.} \times DF
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

ในกรณีเป็นคลื่นรูปไซน์ $DF = 1$ ทำให้ $DF = \text{Dis.F.}$ แต่เมื่อใดก็ตามที่รูปคลื่นไม่เป็นไซน์ $DF < \text{Dis.F.}$ ด้วย

3.3.2.1 ตัวประกอบการกระจาย (Displacement Factor)

ตัวประกอบการกระจายถูกนิยามไว้ว่า

$$\text{Dis.F.} = \frac{P_1}{V_1 I_1} = \frac{VI_1 \cos \phi}{V_1 I_1} = \cos \phi \tag{3.4}$$

- เมื่อ
- P_1 คือ กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยขาเข้า
 - V คือ ค่า rms ของแรงดันขาเข้า
 - V_1 คือ ค่า rms ของแรงดันที่ความถี่มูลฐาน
 - I_1 คือ ค่า rms ของกระแสที่ความถี่มูลฐาน

จะเห็นว่าค่าที่ได้จะคล้ายๆ กับเพาเวอร์แฟคเตอร์ในระบบไฟฟ้าทั่วไปต่างกันก็ตรงที่ Dis.F. คือ เพาเวอร์แฟคเตอร์ของกระแสที่ความถี่มูลฐานเท่านั้น และเนื่องจากว่าค่า Dis.F. มีค่าเท่ากับ $\cos \phi$ เมื่อ ϕ เป็นมุมจุดขนาน จึงกล่าวได้ว่ามุมกระจัด (Displacement angle) จะมีค่าเท่ากับมุมจุดขนาน

3.3.2.2 ตัวประกอบค่าความเพี้ยนของรูปคลื่น (Distortion Factor)

นิยามของตัวประกอบค่าความเพี้ยนของรูปคลื่น จะบอกถึงค่าความเพี้ยนของกระแสที่ไหลเข้าสู่คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งตรงตามใดก็ตามที่กระแสไม่เป็นคลื่นรูปไซน์ แสดงว่ามีฮาร์โมนิกสแปนอยู่ ฮาร์โมนิกของกระแสนี้มากกว่าฮาร์โมนิกของแรงดันเพราะฮาร์โมนิกของกระแส มักจะไปทำให้แรงดันของแหล่งจ่ายผิดเพี้ยนและยังข้ามไปกวนระบบอื่นที่อยู่ใกล้ๆ ได้ด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ตามความถี่ของฮาร์โมนิกที่ปะปนอยู่กับกระแส ดังนั้นจึงจำเป็นอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากที่สุดที่เราจะต้องสนใจรูปคลื่นกระแสของเราว่ามีฮาร์โมนิกสเปปนมากน้อยเพียงใด ตัวประกอบค่าความเพี้ยนของรูปคลื่นจะเป็นตัวบ่งบอกว่ากระแสของเราเพี้ยนไป จากคลื่นรูปไซน์มากน้อยเพียงใด โดยบอกมาในรูปของอัตราส่วนระหว่างกระแสที่ความถี่มูลฐานกับกระแสทั้งหมดดังสมการที่ 3.5

$$DF = \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}} \tag{3.5}$$

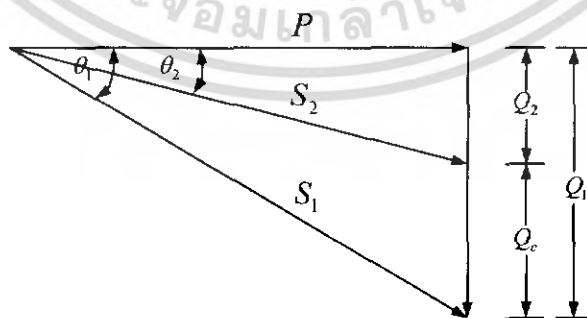
เมื่อ I_1 คือ ค่า rms ของกระแสที่ความถี่มูลฐาน

$\sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}$ คือ ค่า rms ของกระแสรวม

ค่า DF จะดีที่สุดเมื่อ $DF = 1$ นั่นคือไม่มีความเพี้ยนอยู่เลย



รูปที่ 3.5 กระแสที่ไม่เป็นคลื่นรูปไซน์ไหลเข้าสู่คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.6 การปรับปรุงตัวประกอบกำลังของสัญญาณไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.3 การชดเชยกำลังรีแอกทีฟของสัญญาณที่มีส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์

โดยทั่วไปการปรับปรุงตัวประกอบกำลังจะนิยมใช้ตัวเก็บประจุ เพราะมีราคาค่อนข้างถูกไม่ต้องทำการบำรุงรักษามากนักและมีกำลังสูญเสียในตัวเองต่ำมาก แต่มักจะมีปัญหาเมื่อมีการใช้โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งอาจจะทำให้เกิดสภาวะรีโซแนนซ์ขึ้นโดยจะทำให้เกิดการขยายตัวของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไหลในระบบไฟฟ้าจนเกินค่าพิกัดของโหลดต่างๆ ที่ต่อรวมอยู่เป็นผลทำให้โหลดต่างๆ ได้รับความเสียหาย ดังนั้นจึงใช้ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์แทนตัวเก็บประจุเพราะตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์จะทำหน้าที่ทั้งการชดเชยกำลังรีแอกทีฟและจำกัดกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไหลเข้าระบบไฟฟ้าด้วย

จากรูปที่ 3.6 สามเหลี่ยมกำลังขณะโหลดได้รับกำลังไฟฟ้าจริง (P) กำลังไฟฟารีแอกทีฟแบบล้าหลัง (Q_1) และกำลังไฟฟ้าปรากฏ (S_1) จะได้ค่าตัวประกอบกำลังคือ

เมื่อต่อตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ขนานกับโหลดจะทำให้ ค่าตัวประกอบกำลังถูกปรับปรุง เปลี่ยนจาก $\cos \theta_1$ เป็น $\cos \theta_2$ โดยที่

$$\begin{aligned} \cos \theta_2 &= \frac{P}{S_2} \\ &= \frac{P}{[P^2 + (Q_1 - Q_c)^2]^{1/2}} \end{aligned} \quad (3.6)$$

จากรูปที่ 3.6 จะได้ว่ากำลังไฟฟ้าปรากฏและกำลังไฟฟารีแอกทีฟมีค่าลดลงจาก S_1 เป็น S_2 และเปลี่ยนจาก Q_1 เป็น Q_2 (โดยการจ่ายกำลังรีแอกทีฟของ Q_c) ตามลำดับ ซึ่งทำให้กระแสทั้งหมดลดลงและทำให้ระบบไฟฟ้ามีคุณภาพและมีประสิทธิภาพดีขึ้นด้วย

3.3.3 ประโยชน์จากการชดเชยกำลังรีแอกทีฟ

การปรับปรุงตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้ากำลังจะเกิดผลดีดังนี้

1. หม้อแปลงไฟฟ้าสามารถรับโหลดได้เพิ่มมากขึ้นกำลังไฟฟ้าปรากฏที่เพิ่มขึ้นคือ

$$kVA = kW \times \left(\frac{1}{\cos \theta_1} - \frac{1}{\cos \theta_2} \right) \quad (3.7)$$

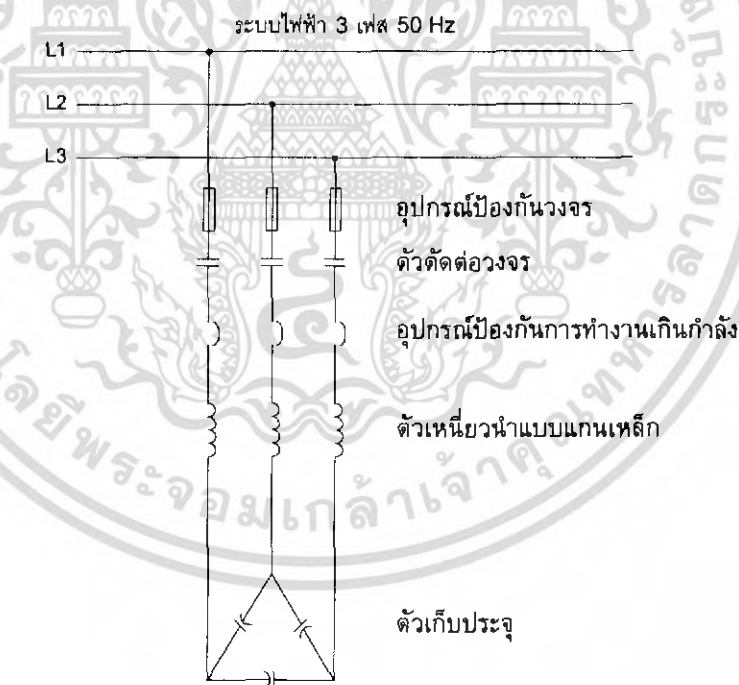
2. ปรับปรุงระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าให้ดีขึ้นและลดแรงดันตกคร่อมในสายส่งหม้อแปลงไฟฟ้า
3. ลดความสูญเสียในสายส่ง หม้อแปลงไฟฟ้าและอุปกรณ์ป้องกัน
4. ลดขนาดสายส่งกำลังไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้าให้มีขนาดเล็กลง
5. ไม่ต้องเสียค่าปรับให้การไฟฟ้าฯ

3.4 ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ชนิดกรองเดี่ยว (Single – Tune Filter)

3.4.1 โครงสร้าง หน้าที่และการทำงานของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์

โครงสร้างของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละชุดจะประกอบด้วย ส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 5 ส่วนคือ

1. ตัวเก็บประจุแบบ 3 เฟสต่อแบบเดลต้าที่พิกัดแรงดันต่างๆ
2. ตัวเหนี่ยวนำแบบแกนเหล็กซึ่งถูกออกแบบมาให้ใช้ร่วมกับตัวเก็บประจุเพื่อทำให้ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์โดยเฉพาะ ต้องมีความเป็นเชิงเส้นดีเพราะต้องสามารถรับกระแสที่ไหลผ่านตัวมันเองได้เพื่อไม่ให้สนามแม่เหล็กในแกนเหล็กอิ่มตัวในช่วงใช้งานปกติ
3. ตัวตัดต่อวงจรใช้ตัดต่อวงจรตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์
4. อุปกรณ์ป้องกันวงจร เช่น ฟิวส์ เซอร์คิตเบรกเกอร์ ฯลฯ ใช้ป้องกันการลัดวงจรของตัวกรองฮาร์โมนิกส์
5. อุปกรณ์ป้องกันการทำงานเกินกำลังของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกระแสในตัวกรองฮาร์โมนิกส์เกินพิกัดที่กำหนด ซึ่งอาจเกิดจากการกระแสฮาร์โมนิกส์ในระบบที่เพิ่มขึ้นจากการใช้งานโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นหรือจุดปรับคลื่นของตัวกรองเปลี่ยนไป เพราะตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำมีค่าเปลี่ยนไปตามอายุการใช้งานหรืออุณหภูมิ



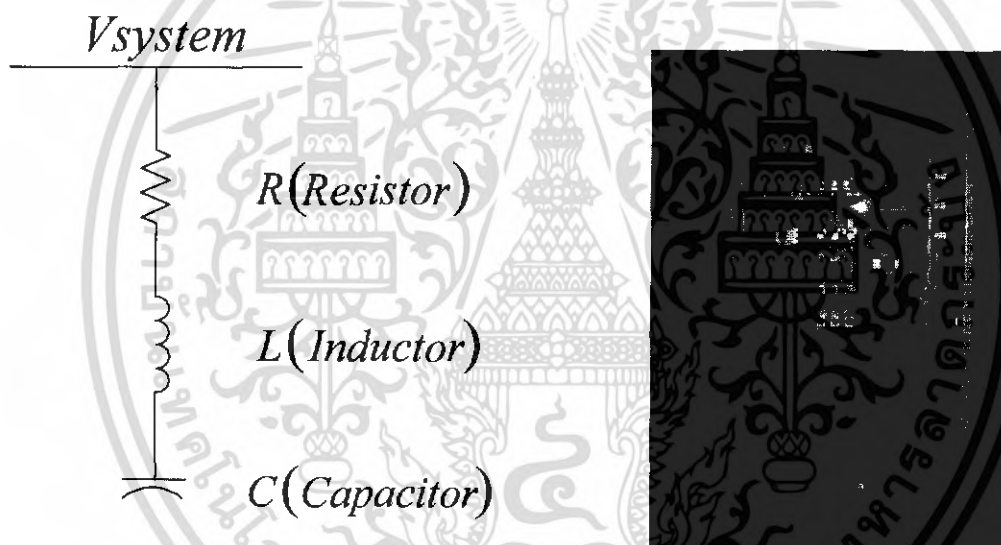
รูปที่ 3.7 แสดงโครงสร้างของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ชนิดกรองเดี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกชนิดกรองเดี่ยวมีหน้าที่หลักที่สำคัญ 2 ประการคือ

1. จ่ายกำลังรีแอกทีฟที่ความถี่หลักมูลให้ระบบไฟฟ้าเพื่อเป็นการชดเชยกำลังงานรีแอกทีฟที่อุปกรณ์ไฟฟ้าต้องการใช้
2. กรองกระแสฮาร์โมนิกและลดแรงดันฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้าให้ได้ตามเกณฑ์ที่กำหนดโดยมาตรฐานหรือข้อบังคับของการไฟฟ้า

การทำงานของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกชนิดกรองเดี่ยวเกิดจาก ส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทานที่อยู่ในรูปแบบของขดลวดเหนี่ยวนำมาต่อเป็นวงจรรีโซแนนซ์แบบอนุกรม เพื่อทำให้วงจรตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ำที่สุดที่ความถี่รีโซแนนซ์หรือความถี่ปรับคลื่น (Tuning Frequency) ซึ่งเรียกว่าเกิดรีโซแนนซ์แบบอนุกรมที่ความถี่ปรับคลื่นตัวกรองกระแสฮาร์โมนิก จะมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับค่าความต้านทานเพราะว่าที่ความถี่รีโซแนนซ์ค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์จะมีค่าเท่ากับ ค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์แต่จะมีขั้วตรงข้ามกันจึงทำให้ค่ารีแอกแตนซ์หักล้างกันหมดไป



รูปที่ 3.8 แสดงวงจรสมมูลของวงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกชนิดกรองเดี่ยว

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.8 สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ได้
ดังนี้

$$\begin{aligned} Z &= R + jX \\ &= R + j(X_L - X_C) \\ &= R + j\left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right) \end{aligned} \quad (3.8)$$

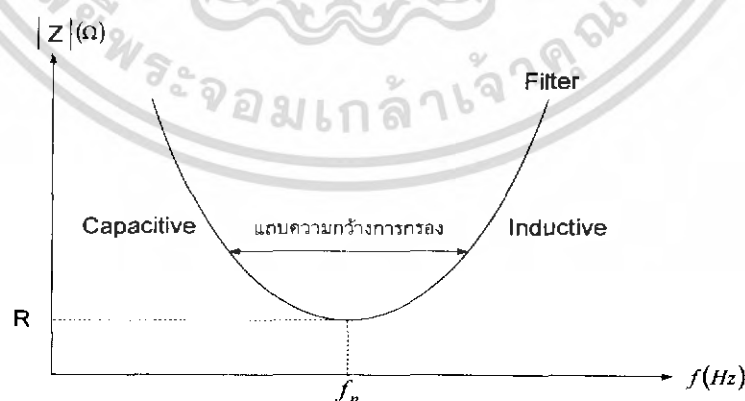
จากสมการที่ 3.8 จะเห็นได้ว่าค่า Z จะมีค่าต่ำสุดเท่ากับ R เมื่อค่าความถี่ f มีค่าเป็น f_n

โดยจะทำให้ค่า $X_L = X_C$ ซึ่งสามารถหาค่า f_n ได้จากสมการที่ 3.9

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.9)$$

เมื่อนำสมการที่ 3.9 มาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่จะได้ดัง
รูปที่ 3.9

จากรูปที่ 3.9 ที่ความถี่รีโซแนนซ์ (f_n) หรือความถี่ปรับคลื่น (Tuning Frequency) ตัว
กรองกระแสฮาร์โมนิกส์จะมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับความต้านทานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ปรับคลื่น
ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์จะมีคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุและที่ความถี่สูงกว่าความถี่ปรับคลื่น
ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์จะมีคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.9 ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ชนิดกรองเดี่ยวเทียบกับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์มีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1. ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ชนิดกรองเดี่ยว ที่ต่อขนานกับระบบไฟฟ้าควรมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำในย่านความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ต้องการจะกรองทิ้งเพื่อให้กระแสฮาร์โมนิกส์ไหลเข้าระบบไฟฟ้าให้น้อยที่สุดและทำให้แรงดันฮาร์โมนิกส์มีค่าต่ำด้วย
2. ค่าความกว้างแถบการกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ชนิดกรองเดี่ยวควรมีความกว้างของแถบการกรองกว้างพอสมควร เพื่อกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ที่อันดับนั้นๆ ได้เหมาะสมและช่วยลดปัญหาที่จะเกิดการเป็นดีจูนของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ที่อันดับอื่นๆ

ข้อดี

1. ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์แบบนี้มีโครงสร้างง่าย ๆ เพราะมีส่วนประกอบเพียง 2 ชนิดเท่านั้นคือ ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ โดยที่ตัวต้านทานในวงจรสมมูลคือค่าความต้านทานของขดลวดของตัวเหนี่ยวนำ
2. เป็นตัวกรองที่มีค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor) สูงในระบบแรงดัน 400-415 V ตัวประกอบคุณภาพอาจสูงถึง 60 และในระบบแรงดันสูงตัวประกอบคุณภาพอาจสูงถึง 100 ทำให้ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ที่มีอัตราลดทอนกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับที่กำหนดไว้สูง
3. มีการสูญเสียที่ต่ำเพราะการสูญเสียส่วนใหญ่จะเกิดในตัวเหนี่ยวนำ
4. มีความต้องการบำรุงรักษาต่ำ จากโครงสร้างอย่างง่ายที่มีส่วนประกอบน้อย

ข้อเสีย

1. ต้องใช้ตัวกรองชนิดนี้หลายตัวเพื่อกรองกระแสฮาร์โมนิกส์หลาย ๆ อันดับพร้อมๆ กัน เนื่องจากตัวกรองแต่ละตัวจะทำหน้าที่กรองกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่กำหนดไว้เท่านั้น ซึ่งจะกรองกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับอื่นๆ ได้น้อย
2. เนื่องจากตัวกรองมีค่าตัวประกอบคุณภาพสูงทำให้มีความกว้างแถบในการกรองแคบ จึงไวต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่หลักมูลของระบบและการเปลี่ยนแปลงค่าของส่วนประกอบต่างๆ ของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เปลี่ยนไป
3. มีความจำเป็นต้องทำการปรับตั้งค่าความถี่รีโซแนนซ์ ในภาคสนามทำให้ต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีแท็ปราคาของตัวเหนี่ยวนำจึงมีราคาแพงกว่าปกติ

3.4.2 การออกแบบและคำนวณค่าส่วนประกอบของวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

การคำนวณหาค่าส่วนประกอบของ วงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ชนิดกรองเดียวนั้น จะต้องทราบค่ากำลังรีแอทีฟขดเซย์ที่ตัวกรองจะต้องจ่ายให้ระบบ ค่าความถี่ปรับคลื่น (f_n) ที่ต้องการกรอง ค่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor : QF) และค่าการทำงานต่างๆ ของระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น ระดับแรงดันไฟฟ้า ขนาดพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าลัดวงจรโหลดต่างๆ ที่มีในระบบไฟฟ้ากำลัง เป็นต้น

การออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ชนิดกรองเดี่ยวมีขั้นตอนทั้งหมดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่าพิกัดแรงดันของระบบไฟฟ้า (V_{sys}) ที่จะทำการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ว่ามีค่าเท่าใด มี Voltage Regulation เท่าใดและมีความถี่หลักมูลเท่าใดเพื่อใช้ออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดค่ากำลังงานรีแอกทีฟ (Q_{Com}) ที่ระบบต้องการตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์เพื่อใช้ในการปรับค่าตัวประกอบกำลังของระบบให้ได้ตามต้องการ
ค่ากำลังงานรีแอกทีฟที่ระบบต้องการหาได้ดังนี้

$$Q_{Com} = kW(\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (3.10)$$

เมื่อ Q_{Com} คือ กำลังงานรีแอกทีฟที่ระบบต้องการ ($kVAr$)

kW คือ กำลังงานจริงของโหลดรวมทั้งหมด (kW)

θ_1 คือ มุมของตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเดิม

θ_2 คือ มุมของตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใหม่ที่ต้องการ

ขั้นตอนที่ 3 วิเคราะห์ข้อมูลของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไหลในระบบที่ได้จากการวัดจริงในระบบที่ทำการศึกษาหรือผลที่ได้จากการจำลองผลการทดสอบ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และทำการกำหนดจำนวนชุดตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ในระบบ ว่าจะต้องทำการติดตั้งลำดับใดบ้าง เช่น ถ้ามีกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 และอันดับที่ 7 มากเกินมาตรฐานกำหนดก็ควรใช้จำนวน 2 ชุด คือตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ที่กรองกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 และอันดับที่ 7 เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 4 ทำการแบ่งค่า Q_{Com} ออกเป็นส่วนๆตามจำนวนชุดของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ได้กำหนดไว้ โดยอาศัยข้อมูลขนาดกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไหลในระบบและขนาดของภาระในระบบไฟฟ้ากำลัง

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดจุดปรับคลื่น (Tuning Point : Π_h) ของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละลำดับโดยกำหนดจุดปรับคลื่นมีค่าต่ำกว่าอันดับของฮาร์โมนิกส์ที่ต้องการกรองเล็กน้อย

ขั้นตอนที่ 6 กำหนดขนาดพิกัดของตัวเก็บประจุที่ความถี่หลักมูลดังนี้

$$V_{Cr} \geq \frac{n_h^2}{n_h^2 - 1} \times V_{Sys} \quad (3.11)$$

เมื่อ V_{Sys} คือ แรงดันระบบที่ตัวกรองต่ออยู่

n_h คือ ค่าจุดปรับคลื่นของตัวกรอง

V_{Cr} คือ แรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ

ขั้นตอนที่ 7 กำหนดขนาดกำลังรีแอกทีฟพิกัดของตัวเก็บประจุ (Q_{Cr}) ที่ต้องใช้ในตัวกรองแต่ละอันดับ การกำหนดขนาดกำลังงานรีแอกทีฟพิกัดของตัวเก็บประจุ จะต้องเลือกให้มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดที่มีจำหน่ายอยู่ในท้องตลาดทั่วไปเพื่อให้ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ มีราคาถูกที่สุด

การหาขนาดของตัวเก็บประจุทำได้โดยใช้สมการ

$$Q_{Cr} = \frac{Q_{Com}}{\left(\frac{n_h^2}{n_h^2 - 1}\right) \times \left(\frac{V_{Sys}}{V_{Cr}}\right)^2} \quad (3.12)$$

เมื่อ V_{Sys} คือ แรงดันระบบที่ตัวกรองต่ออยู่

n_h คือ ค่าจุดปรับคลื่นของตัวกรอง

V_{Cr} คือ แรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ

Q_{Com} คือ กำลังงานรีแอกทีฟชดเชยที่ตัวกรองจ่ายให้ระบบ

Q_{Cr} คือ กำลังงานรีแอกทีฟพิกัดของตัวเก็บประจุ

ขั้นตอนที่ 8 การหาค่าตัวเก็บประจุ (C), ค่าตัวเหนี่ยวนำ (L) และค่าความต้านทาน (R) ดังสมการดังนี้

$$X_C = \frac{V_{Cr}^2}{Q_{Cr} \times 10^3} \quad (3.13)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f \cdot X_C} \quad (3.14)$$

$$L = \frac{X_C}{2\pi f \cdot n_h^2} \quad (3.15)$$

$$R = \frac{X_{L(n_h)}}{Q_F} \quad (3.16)$$

เมื่อ V_{Cr} คือ แรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ (V)

Q_{Cr} คือ กำลังงานรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุ ($kVAr$)

n_h คือ ค่าจุดปรับคลื่นของตัวกรอง

Q_F คือ ตัวประกอบคุณภาพของตัวกรอง

หมายเหตุ ค่า C , L และ R เป็นค่าต่อเฟส

ขั้นตอนที่ 9 วิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์โมนิกส์ในส่วนต่างๆของระบบไฟฟ้าใหม่ที่ทำกรติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์เข้าในระบบและทำการตรวจสอบการทำงานของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ด้วยเพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ตรวจสอบตัวเก็บประจุว่าทำงานเกินพิกัดหรือไม่ หากผลการตรวจสอบพบว่าตัวเก็บประจุทำงานเกินพิกัดที่กำหนดจะต้องเลือกขนาดพิกัดของตัวเก็บประจุใหม่โดยกลับไปขึ้นตอนที่ 7 ใหม่

2. ตรวจสอบขนาดกระแสทั้งหมดที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งพิกัดของกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ในกรณีที่เลวร้ายที่สุดคือ

$$I_{RMS-Li} = \sqrt{(I_{Fi-1} \times 1.1)^2 + \sum_{h=2}^n I_{Fi,h}^2} \quad (3.17)$$

เมื่อ I_{RMS-Li} คือ กระแสรวมที่ไหลผ่านตัวกรองทั้งหมด

I_{Fi-1} คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวกรองที่ i ที่ความถี่หลักมูล

$I_{Fi,h}$ คือ กระแสฮาร์โมนิกที่ไหลผ่านตัวกรองที่ i ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์

หมายเหตุ

กระแสพิกัดของตัวเหนี่ยวนำจะเพื่อขนาดกระแสความถี่หลักมูลไว้ 10% เพื่อเป็นการป้องกันตัวเหนี่ยวนำ

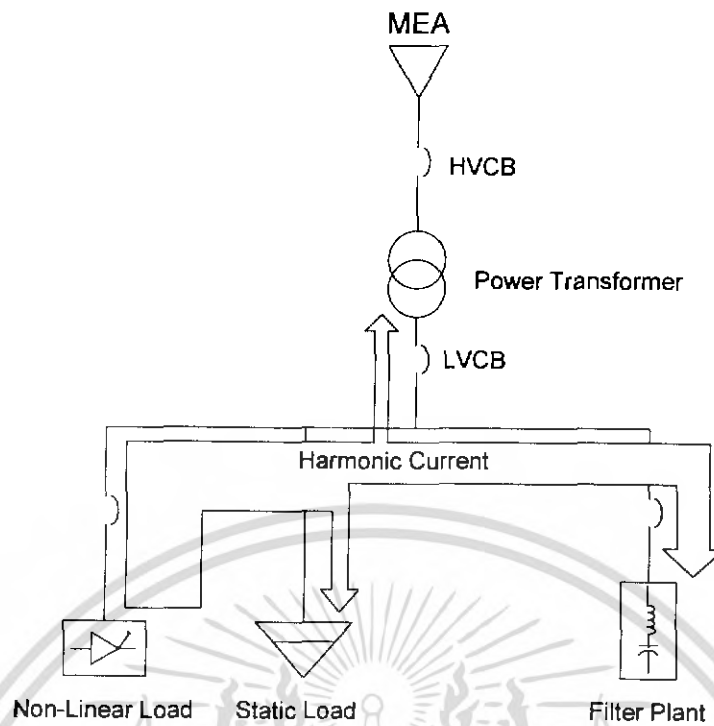
1. ตรวจสอบขนาดกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไหลเข้าไปในระบบและแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นว่าอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานด้านฮาร์โมนิกส์กำหนดไว้หรือไม่

2. ทดสอบความสามารถในการทำงานของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์เมื่อตัวแปรต่างๆ ของระบบเปลี่ยนไป เช่น ความถี่ของระบบ ขนาดของระบบ(กำลังงานลัดวงจรของระบบ แรงดันของระบบ)

สำหรับพิกัดของอุปกรณ์ประกอบอื่นๆของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ เช่น ฟิวส์ ตัวตัดต่อวงจรและอุปกรณ์ป้องกันการทำงานเกินกำลังจะต้องเลือกโดยรวมผลของกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกส์ด้วยเพื่อให้ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์สามารถทำงานได้ตามปกติ

3.5 การประยุกต์ใช้งานตัวกรองในระบบไฟฟ้ากำลัง

การใช้งานตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ชนิดกรองเตี้ยนั้นจะต้องนำตัวกรองไปต่อขนานกับระบบไฟฟ้าที่มีกระแสฮาร์โมนิกส์ไหลอยู่ในระบบเพื่อให้ตัวกรองเป็นทางเดินของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไหลอยู่ในระบบ ซึ่งเป็นผลทำให้มีกระแสฮาร์โมนิกส์ไหลเข้าไปในระบบไฟฟ้าน้อยลงกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้



รูปที่ 3.10 ระบบไฟฟ้าที่ต่อตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์

การใช้งานตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์สามารถติดตั้งใช้งานได้หลายจุดในระบบแต่อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด ควรติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ใกล้กับแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์

บทที่ 4

มาตรฐานฮาร์โมนิกส์และตัวเก็บประจุ

4.1 มาตรฐานฮาร์โมนิกส์

ในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ นั้นได้มีการใช้งานโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นมากขึ้น เป็นลำดับทำให้มีกระแสฮาร์โมนิกส์ไหลในระบบไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก ซึ่งส่งผลเสียหายให้กับ การไฟฟ้าโดยรวม จึงได้มีการประกาศใช้มาตรฐานทางด้านฮาร์โมนิกส์ขึ้นและมีการปรับปรุง เพื่อให้เหมาะสมกับสภาวะการณ์ปัจจุบัน ในปฏิญญาพนันท์นี้จะกล่าวถึงมาตรฐานทางฮาร์โมนิกส์ ที่กำหนดโดยการไฟฟ้าของประเทศไทยทั้ง 3 หน่วยงานคือ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) และการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) ซึ่งได้ตั้งคณะทำงาน ขึ้นเพื่อจัดทำข้อกำหนดทางฮาร์โมนิกส์ที่ใช้อยู่ในประเทศไทยขึ้นดังนี้

ขอบเขตของข้อกำหนด

- เพื่อเป็นข้อกำหนดกฎเกณฑ์สำหรับขีดจำกัดและวิธีการตรวจสอบฮาร์โมนิกส์ (Harmonic) สำหรับลูกค้าผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม
- เพื่อกำหนดมาตรการให้ผู้ใช้ไฟฟ้าแก้ไขและปรับปรุงวงจรที่ทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนด
- ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Load) ที่ใช้ในโรงงาน อุตสาหกรรมสำหรับระบบไฟฟ้า ทั้งอุปกรณ์ชนิดเฟสเดียวและสามเฟส

ขีดจำกัดกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกส์

ค่าจำกัดของกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกส์ของการไฟฟ้าฯ นี้ได้อ้างอิงมาตรฐาน G.5/3-1976 : Engineering Recommendation ของประเทศอังกฤษแต่ได้มีการปรับปรุงระดับแรงดันที่มีใช้จริงในประเทศไทยเข้าไปด้วย ดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งเป็นข้อจำกัดกระแสและแรงดันตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ขีดจำกัดกระแสฮาร์โมนิกส์สำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อร่วม *

แรงดัน ที่จุดต่อ ร่วม (kV)	อันดับฮาร์โมนิกส์และขีดจำกัดของกระแส (A rms)																		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
0.44	48	37	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 4.2 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อร่วม (รวมทั้งระดับความผิดเพี้ยนที่มีอยู่เดิม)

ระดับแรงดันไฟฟ้า ที่จุดต่อร่วม (kV)	ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ รวมแรงดัน (%)	ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ ของแรงดันแต่ละอันดับ (%)	
		อันดับคี่	อันดับคู่
0.44	5	4	2
11,12,22 และ 24	4	3	1.75
33	3	2	1
69	2.45	1.63	0.82
115 และมากกว่า	1.5	1	0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 มาตรฐานตัวเก็บประจุ

กระแสที่ไหลในตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกชนิดกรองเดียว จะประกอบด้วยกระแสที่ความถี่มูลฐานและกระแสฮาร์โมนิกที่ไหลในตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกนี้ อาจจะทำให้ตัวเก็บประจุต้องรับภาระเกินค่าพิกัดของตัวเองได้ ซึ่งส่งผลให้ตัวเก็บประจุได้รับความเสียหาย ดังนั้น จึงต้องมีมาตรฐานที่ใช้จำกัดผลกระทบของฮาร์โมนิกที่มีต่อตัวเก็บประจุคือ IEEE Standard 18 -1992 ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ IEC 60831-1(1996) ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ขีดจำกัดของตัวเก็บประจุที่กำหนดโดยมาตรฐาน ANSI/IEEE 18-1992

Item	Value
Percent of nameplate kVAr	135%
Present of rated rms voltage	110%
Present of rated rms current	180%
Present of peak voltage	120%

ตารางที่ 4.4 ขีดจำกัดแรงดันตัวเก็บประจุ ที่กำหนดโดยมาตรฐาน IEC 60831-1(1996)

Type	Voltage factor x Un rms.	Maximum duration	Observations
Power frequency	1.00	Continuous	Highest average value during any period of capacitor energization. For energization period less than 24 h , exceptions apply as indicated below
Power frequency	1.10	8 h in every 24 h	System voltage regulation and fluctuations
Power frequency	1.15	30 min in every 24 h	System voltage regulation and fluctuations
Power frequency	1.20	5 min	Voltage rise at light load
Power frequency	1.30	1 min	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนขีดจำกัดกระแสของตัวเก็บประจุตามมาตรฐานของ IEC 60831-1(1996) คือค่ากระแสของตัวเก็บประจุที่สภาวะการทำงานปกติสามารถมีค่าสูงเป็น 1.3 เท่าของค่ากระแสของตัวเก็บประจุที่พิกัดแรงดันและความถี่ ถ้าค่าความผิดพลาดของค่าตัวเก็บประจุไม่เกิน 15 % ของค่าพิกัดแล้วค่ากระแสของตัวเก็บประจุสามารถสูงได้ถึง 1.5 เท่า

มาตรฐานทั้ง 2 มีข้อกำหนดการใช้งานตัวเก็บประจุที่เกินค่าพิกัด โดยคำนึงถึงผลของฮาร์โมนิกส์ที่จะทำให้เกิดความเสียหายต่อตัวเก็บประจุ

การคำนวณปริมาณทางฮาร์โมนิกส์ตามมาตรฐาน

ค่าปริมาณทางฮาร์โมนิกส์ที่ถูกระบุไว้ตามมาตรฐานทั้ง 2 แบ่งออกเป็น 4 ค่า ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$\text{Percent of rated rms voltage} = V_{ci}^{rms} (\%) = \sqrt{\sum_{h=1}^{25} |V_{ci}^h|^2} \times 100\% \quad (4.1)$$

$$\text{Percent of rated rms current} = I_{ci}^{rms} (\%) = \sqrt{\sum_{h=1}^{25} |I_{ci}^h|^2} \times 100\% \quad (4.2)$$

$$\text{Percent of peak voltage} = V_{ci}^{peak} (\%) = \sum_{h=1}^{25} V_{ci}^h \times 100\% \quad (4.3)$$

$$\text{percent of nameplate kVA} = \sqrt{3} \cdot I_{ci}^{rms} \cdot V_{ci}^{rms} \times 100\% \quad (4.4)$$

เมื่อ V_{ci}^{rms} = แรงดัน rms ของตัวเก็บประจุในตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ i

V_{ci}^h = แรงดันฮาร์โมนิกส์อันดับที่ h ของตัวเก็บประจุในตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ i

V_{ci}^{peak} = แรงดันสูงสุดของตัวเก็บประจุในตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ i

ค่าปริมาณทางฮาร์โมนิกส์ที่คำนวณจากสมการทั้ง 4 จะนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของตัวเก็บประจุตามมาตรฐานใดมาตรฐานหนึ่งที่ใช้กำหนดโดยผู้ออกแบบ ซึ่งค่าทางฮาร์โมนิกส์ของตัวเก็บประจุจะต้องอยู่ในมาตรฐานกำหนดเพื่อความปลอดภัยในการทำงานของตัวเก็บประจุ

บทที่ 5

การออกแบบการทดลอง

5.1 ข้อมูลรถไฟฟ้า

5.1.1 ข้อมูลการให้บริการ

ปัจจุบันรถไฟฟ้ามีไว้รองรับการให้บริการทั้งสิ้น 35 ขบวน แต่ถูกนำออกมาใช้งาน 31 ขบวน/วัน และมีสถานีจุดรับส่งผู้โดยสารทั้งหมด 23 สถานี โดยแบ่งเป็น 2 เส้นทาง คือ เส้นทางสายสุขุมวิท เริ่มตั้งแต่สถานีหมอชิต-อ่อนนุชจำนวน 17 สถานี และเส้นทางสายสีลม เริ่มตั้งแต่สถานีสนามกีฬาแห่งชาติ-สะพานตากสินจำนวน 7 สถานี โดยมีสถานีเชื่อมต่อที่สยามดังรูปที่ 5.1

รถไฟฟ้ามีความเร็วสูงสุดที่ 80 กม./ชม. แต่ความเร็วที่ใช้ในการให้บริการนั้นอยู่ที่ 35 กม./ชม. (ซึ่งเป็นความเร็วที่ปลอดภัยมาตรฐาน) และมีระยะห่างระหว่างสถานีโดยเฉลี่ย อยู่ที่ 1-2 กม./สถานี และรถไฟฟ้าจะมาเข้าในแต่ละสถานีในเวลาเร่งด่วน (7.30น.และ17.30น.) ทุกๆ ความถี่ที่ 2.40 -3.00 นาที/ขบวน ส่วนช่วงเวลาปกติทุกๆความถี่ที่ 5.55 นาที/ขบวน



รูปที่ 5.1 แผนผังสถานีรับ-ส่งผู้โดยสารจุดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 รางที่สาม(รางบัสจ่ายไฟ)

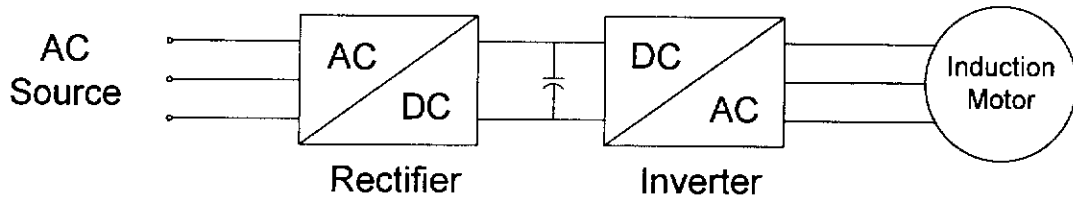
5.1.2 ข้อมูลการทำงานของตัวรถ

รถไฟฟ้าแต่ละขบวนจะประกอบด้วยตู้โดยสาร 3 ตู้ ซึ่งตู้ที่เป็นตัวขับเคลื่อน คือ ตู้หัวและท้าย ส่วนตู้กลางนั้นทำหน้าที่จ่ายระบบไฟฟ้าส่วนกลางเลี้ยงโหลดต่าง ๆ บนตัวรถโดยจะรับไฟมาจากรางที่สาม(รางเป็นบัสตัวนำที่มีกรอบฉนวนสีขาวหุ้มอยู่ ยกตัวสูงขึ้นวางยาวขนานกับรางล้อตลอดระยะทาง ดังรูปที่ 5.2) ซึ่งจะมีมอเตอร์ขับเคลื่อนบนตัวรถขบวนละ 8 ตัว แบ่งเป็นตู้หน้า 4 ตัว และตู้หลังอีก 4 ตัว โดยจะทำงานพร้อมกันแล้วแต่ว่าวิ่งไปทิศทางใด ส่วนระบบเบรคนั้นจะเป็นแบบผ้าเบรคห้ามล้อ

5.1.3 ระบบวงจรขับเคลื่อน

การขับเคลื่อนของรถไฟฟ้านั้น ใช้หลักการเดียวกันกับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induction-Motor) เพราะระบบที่ใช้งานเป็นระบบที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง ทำงานโดยควบคุมความเร็วได้ และต้องใช้งานอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะมีระบบวงจรการทำงานเป็นดังรูปที่ 5.3, 5.5, 5.6

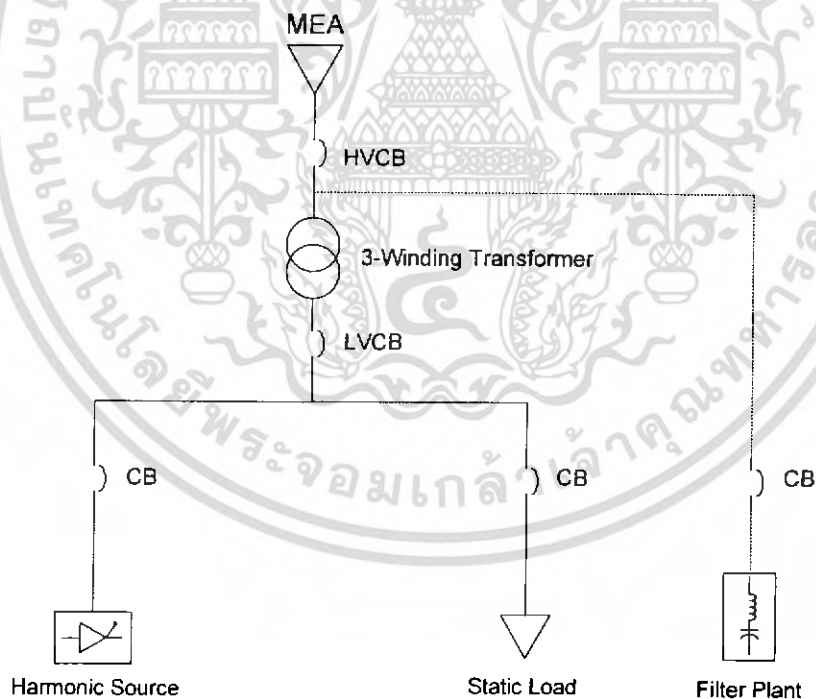
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมความเร็ว Induction-Motor

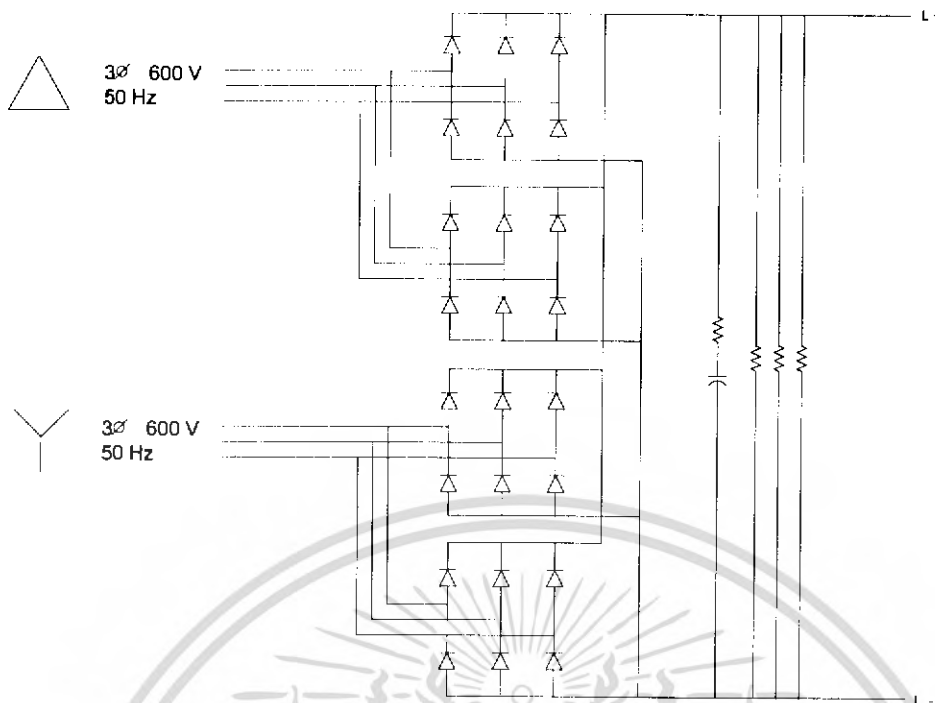
จากบล็อกไดอะแกรม แสดงส่วนประกอบของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์กระแส สลับที่ใช้ อินเวอร์เตอร์ปรับแรงดันและความถี่ให้กับ Induction-Motor ในส่วนของ DC Link จะเป็นคาร์ปาซิเตอร์เพื่อเป็นตัวเชื่อมโยงระหว่าง AC/DC Converter และ Inverter ตัวแปรที่ถูกรวบรวม อย่างเช่น กระแส, แรงดัน และความเร็วรอบ จะถูกป้อนกลับให้กับตัวคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้ในการควบคุมอุปกรณ์สวิตชิงในวงจรหลักของอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

วงจรกรอง Harmonic Filter (Filter Plant) ของระบบ ที่ติดตั้งเพื่อป้องกันการ feed-เข้า ของฮาร์โมนิกส์จากระบบรถไฟฟ้าเข้าสู่ระบบการจ่ายไฟของการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งจะทำให้การ ติดตั้งตู้ไว้บริเวณ Main Switchgear ด้าน High-Volt ก่อนเข้าหม้อแปลง



รูปที่ 5.4 Single Line วงจรกรอง Harmonic Filter (Filter Plant)

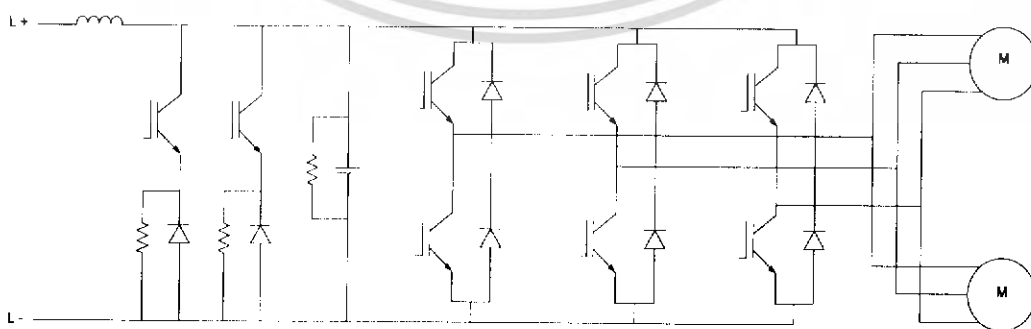
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 วงจร AC/DC 12-Pulse Converter

วงจร AC/DC 12-Pulse Converter เป็นวงจรการแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงผ่านส่วน DC Link ป้อนเข้าสู่วงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมความเร็วมอเตอร์ต่อไป

วงจรการแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ให้กับโหลดสามเฟส(Induction-Motor) นิยมแปลงผันกำลังไฟฟ้าผ่านอินเวอร์เตอร์สามเฟสซึ่งจะเหมาะกับงานที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง ซึ่งจากรูปที่ 5.6 เป็นสวิตชิงสามเฟส ควบคุมความเร็วมอเตอร์สามเฟสโดยใช้ IGBT ชนิดโมดูล 3 ตัว (แต่ละตัวจะมีชุดไดโอด 2 ตัว) เป็นตัวสวิตชิงเพื่อควบคุมความเร็วมอเตอร์



รูปที่ 5.6 วงจร Inverter แบบใช้ IGBT ชนิดโมดูลควบคุมความเร็วมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อมูลที่ใช้ในการจำลองผลการทดลอง (ETAP)

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผลการทดลอง

Schedule	Rating
Power Grid (MEA)	24 kV, 100 MVA, 3-Phase, Δ
AC.BUS	(Switchgear) 600 A., 50 kA_{peak}
3-Winding Transformer	22.8 \pm 2*2.5% / 0.585 / 0.585 kV 2550 / 1275 / 1275 kVA, (Δ /Y - Δ) Indoor (Class: IP00 = AA) %Z = ~6% / ~6% / ~6%, (BIL = 95)
Rectifier	AC :1275 kVA, 0.585 kV, 1258 A Power Factor 100% DC : 750 V
Inverter	DC : 750 V AC : 0.721 kV, 414 kVA, PF.100%
Motor	0.721 kV, 230 kW, 400 A, 3-Phase 1900 rpm, Y

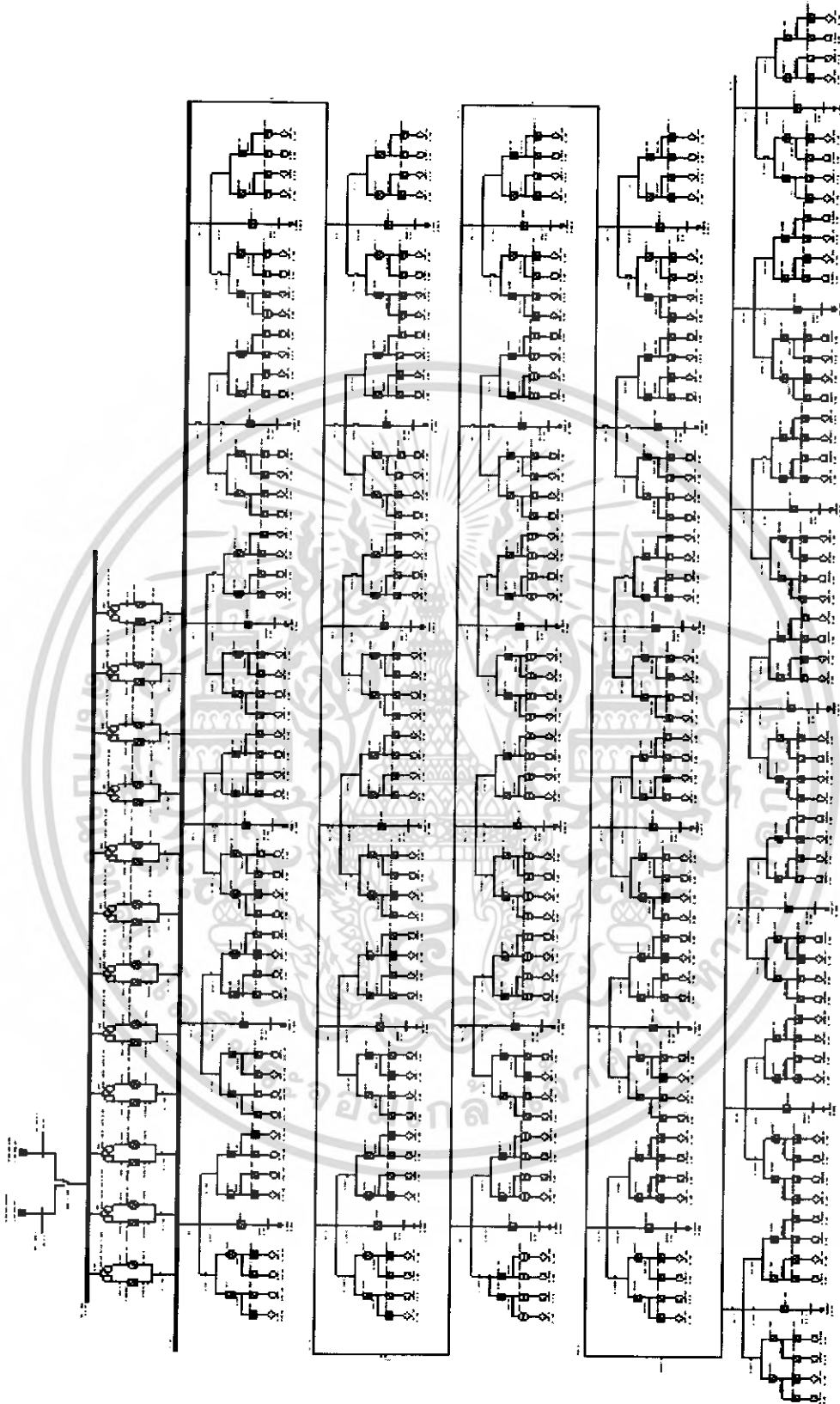
5.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการจำลองวงจรการ Simulation ด้วยโปรแกรม (ETAP)

1. นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มาใส่ในวงจร Single-Line Diagram ดังรูปที่ 5.7 เพื่อทำการ Simulation หาผลการเกิดฮาร์โมนิกส์ในระบบทั้งหมด

2. ทำการ RUN โปรแกรมตรวจสอบดูค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบว่าครบตามที่โปรแกรมต้องการใช้ในการ RUN หรือไม่

3. เมื่อทำการ RUN โปรแกรมดังรูปที่ 5.7 จะพบว่ามีผลการเกิดฮาร์โมนิกส์อันดับต่างๆ จากอุปกรณ์ภายในระบบอยู่หลายอันดับด้วยกัน (แต่เนื่องจากค่าฮาร์โมนิกส์อันดับต่างๆที่เกิดจากการใช้งานของอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นนั้น จะไม่สามารถ feed ผ่าน DC. BUS ขึ้นมาได้) ดังนั้นจึงทำการพิจารณาค่าของลำดับฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นเหนือ DC. BUS ขึ้นมา โดยจะทำการ Simulation ใหม่อีกครั้งจากวงจรดังรูปที่ 5.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

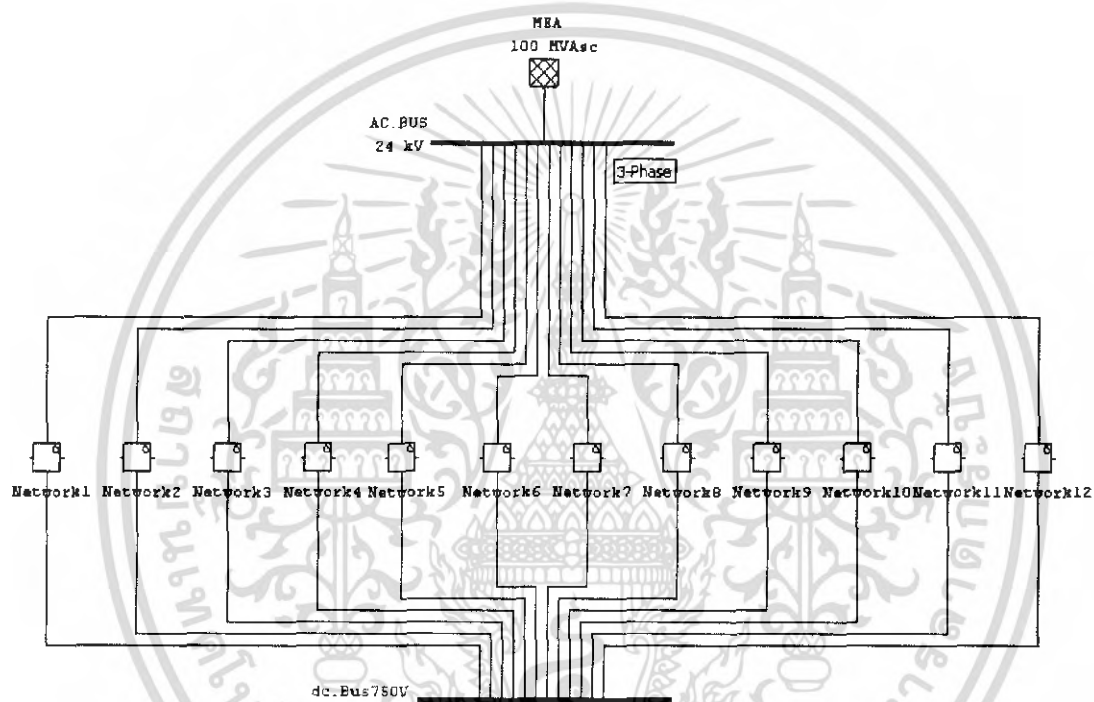


รูปที่ 5.7 การจำลอง Single-Line Diagram ทุกระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เราจะทำการนำวงจรแต่ละสถานี (Traction) ในรูปที่ 5.7 มาใส่ลงใน Composite Network ที่อยู่ในโปรแกรมดังรูปที่ 5.8 เพื่อให้ง่ายแก่การมองและการเขียนวงจรอื่น (filter plant) ที่จะมาต่อร่วมกับวงจรนี้เพื่อแก้ค่าฮาร์โมนิกส์อันดับที่เกิดขึ้นในวงจรต่อไป

5. ทำการ Simulation อีกครั้งโดยใช้ค่าพารามิเตอร์เดิมลงในวงจรดังรูปที่ 5.8 โดยจะทำการ Simulation หาผลการทดลองต่อไป



รูปที่ 5.8 วงจร Single-Line Diagram 12 Traction

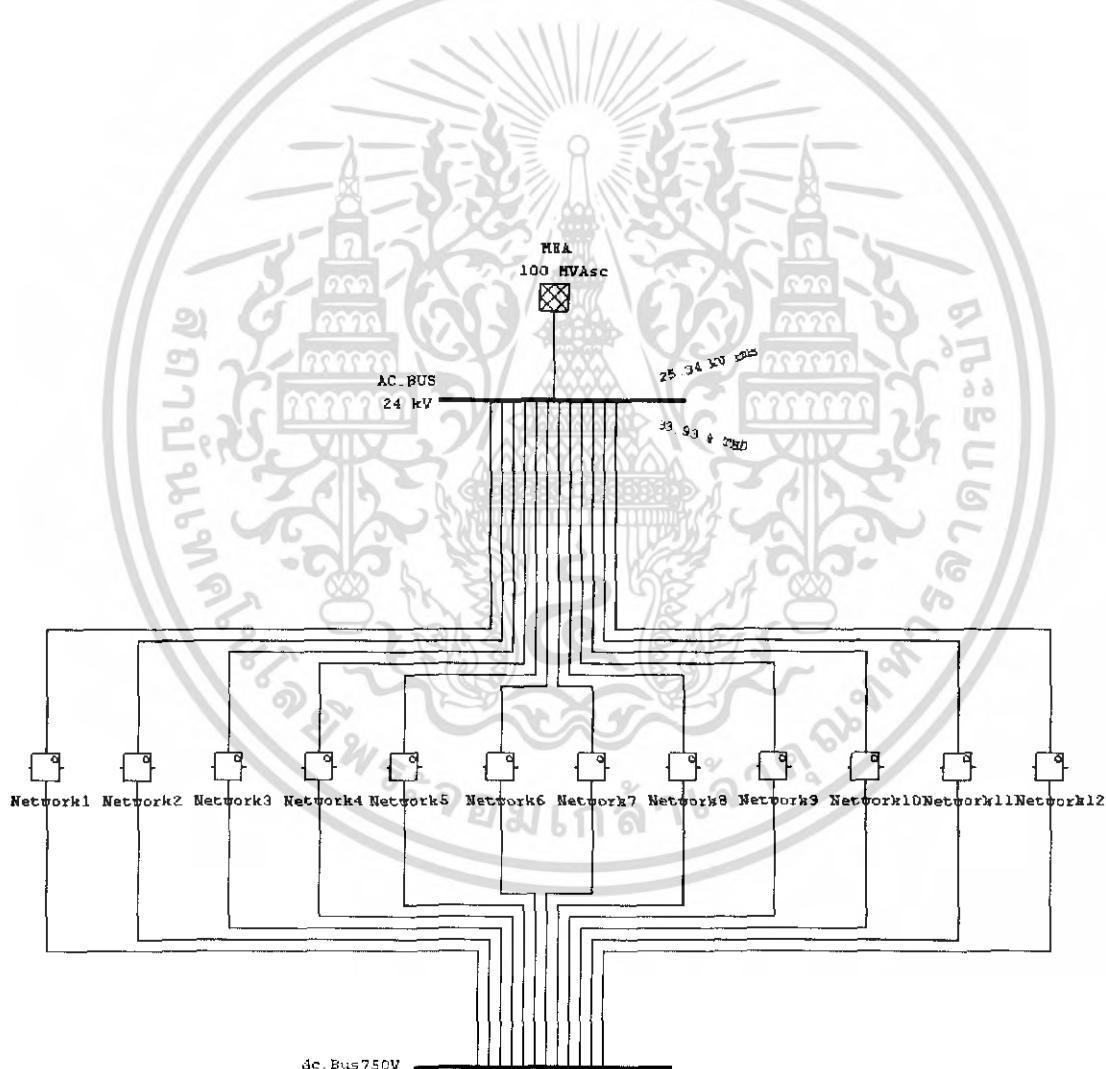
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ผลการทดลอง

6.1 ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการ Simulation โดยการเพิ่มทีละสถานี ตั้งแต่สถานีที่ 1 ไปจนครบทั้ง 12 สถานี ดังรูปที่ 6.1
2. ทำการสังเกตค่าที่เปลี่ยนแปลง ตั้งแต่ 1 สถานีจนถึง 12 สถานี ว่าในแต่ละครั้งที่มีการเพิ่มสถานีเข้าไปในระบบ โดยจะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของ Spectrum และ Waveform โดยจะพิจารณาผลที่ AC. BUS 24 kV
3. เมื่อได้ค่าฮาร์โมนิกส์สูงสุดแล้ว จึงนำผลที่ได้ไปทำการพิจารณาวิเคราะห์แก้ไขต่อไป โดยการใส่วงจรกรองฮาร์โมนิกส์

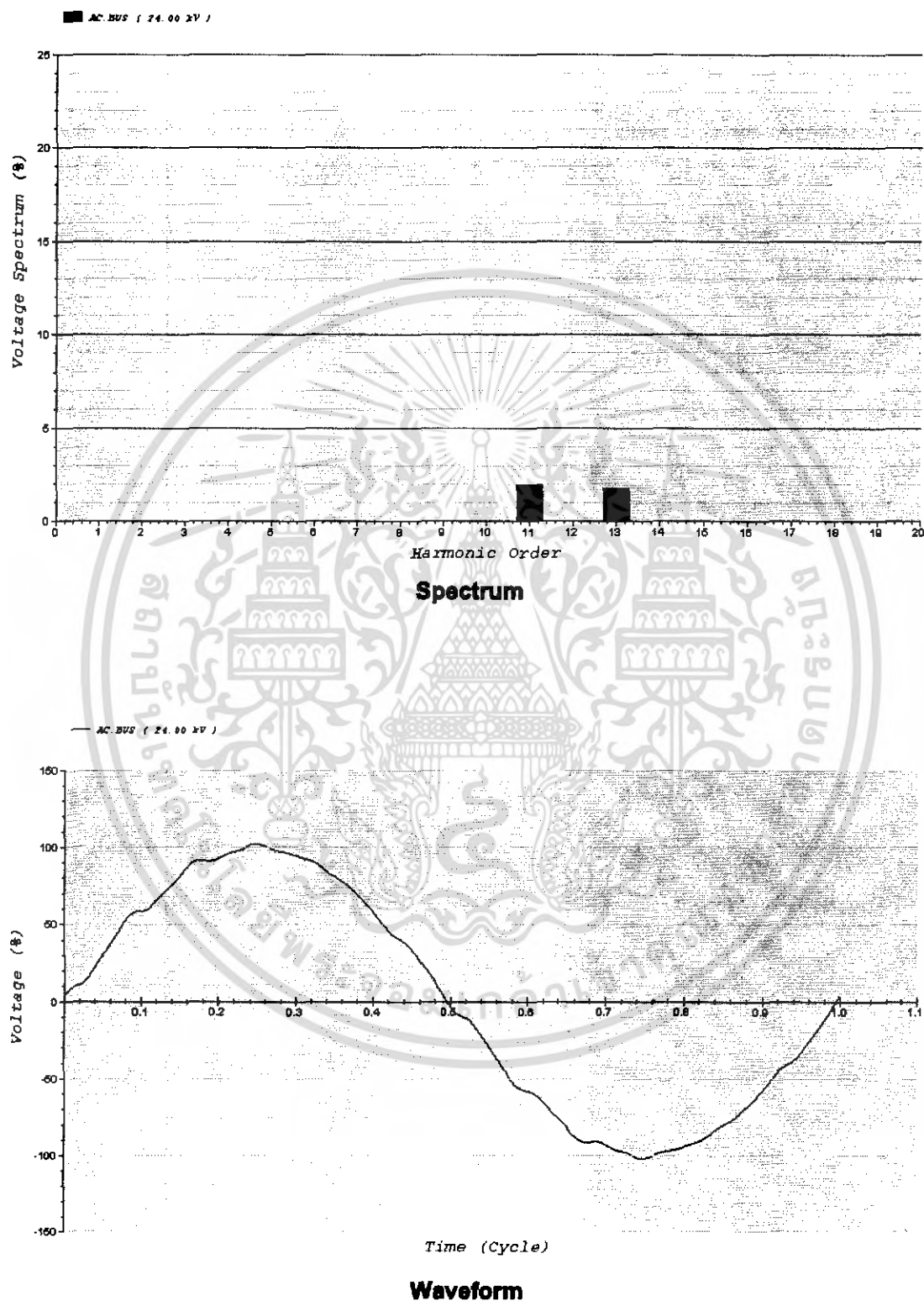


รูปที่ 6.1 One-Line Diagram ทั้งระบบ 12 Traction

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ผลจากการ Simulation โดยทำการเพิ่มทีละสถานีตั้งแต่สถานีที่ 1-12

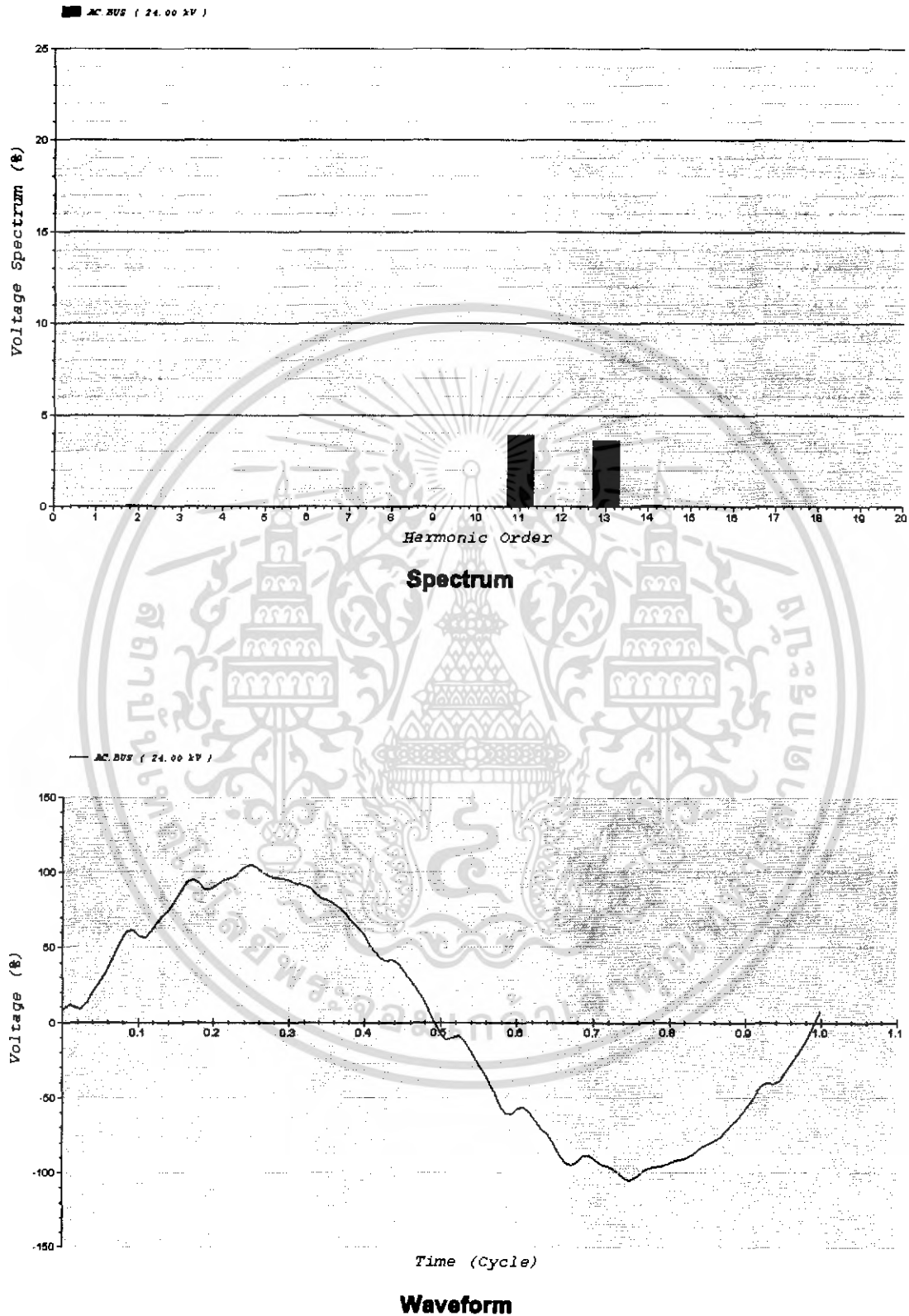
6.2.1 ผล Simulation ที่ 1 สถานี



รูปที่ 6.2 ผลของ Spectrum และ Waveform จากการ Simulation ที่ 1 สถานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

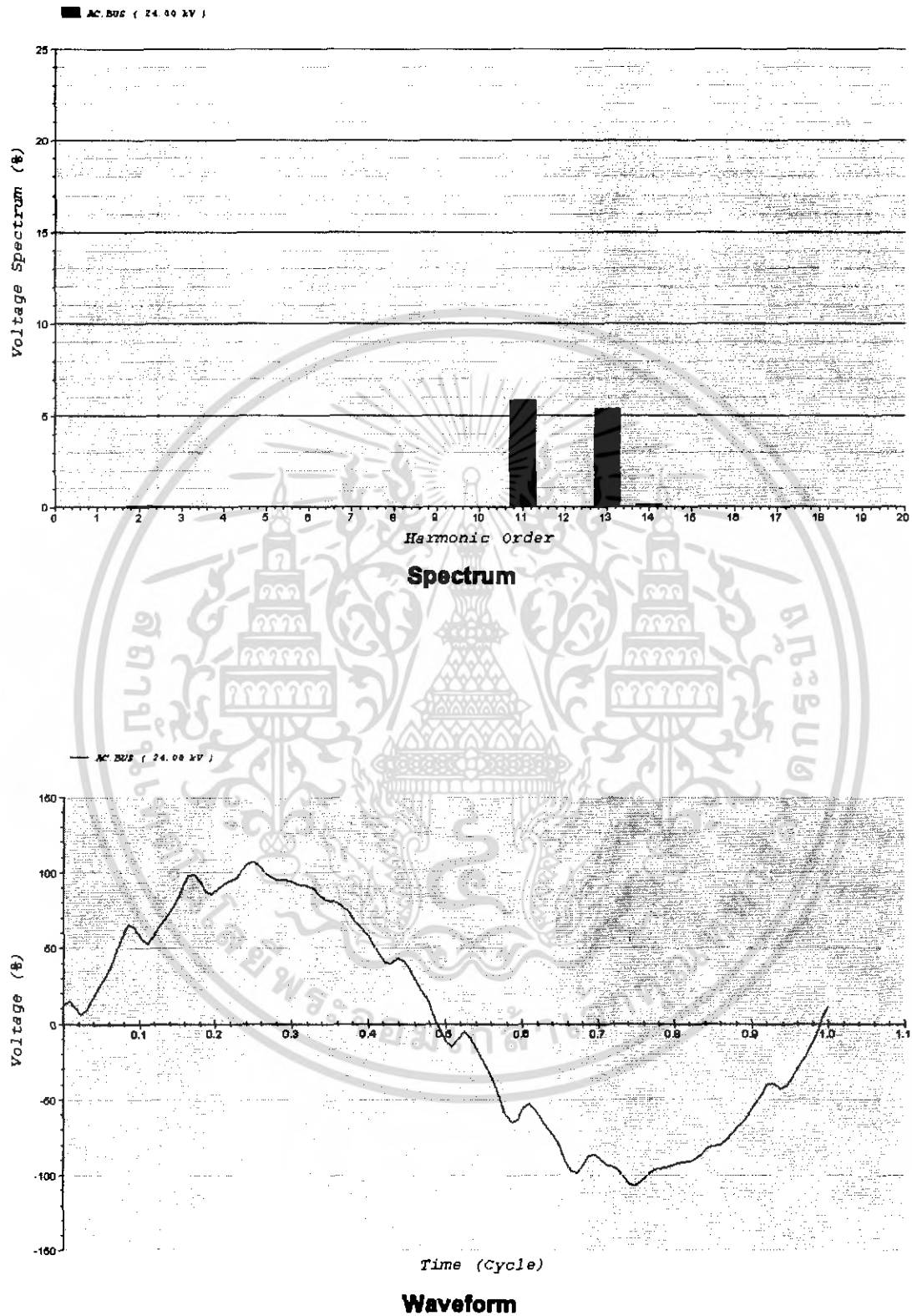
6.2.2 ผล Simulation ที่ 2 สถานี



รูปที่ 6.3 ผลของ Spectrum และ Waveform จากการ Simulation ที่ 2 สถานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

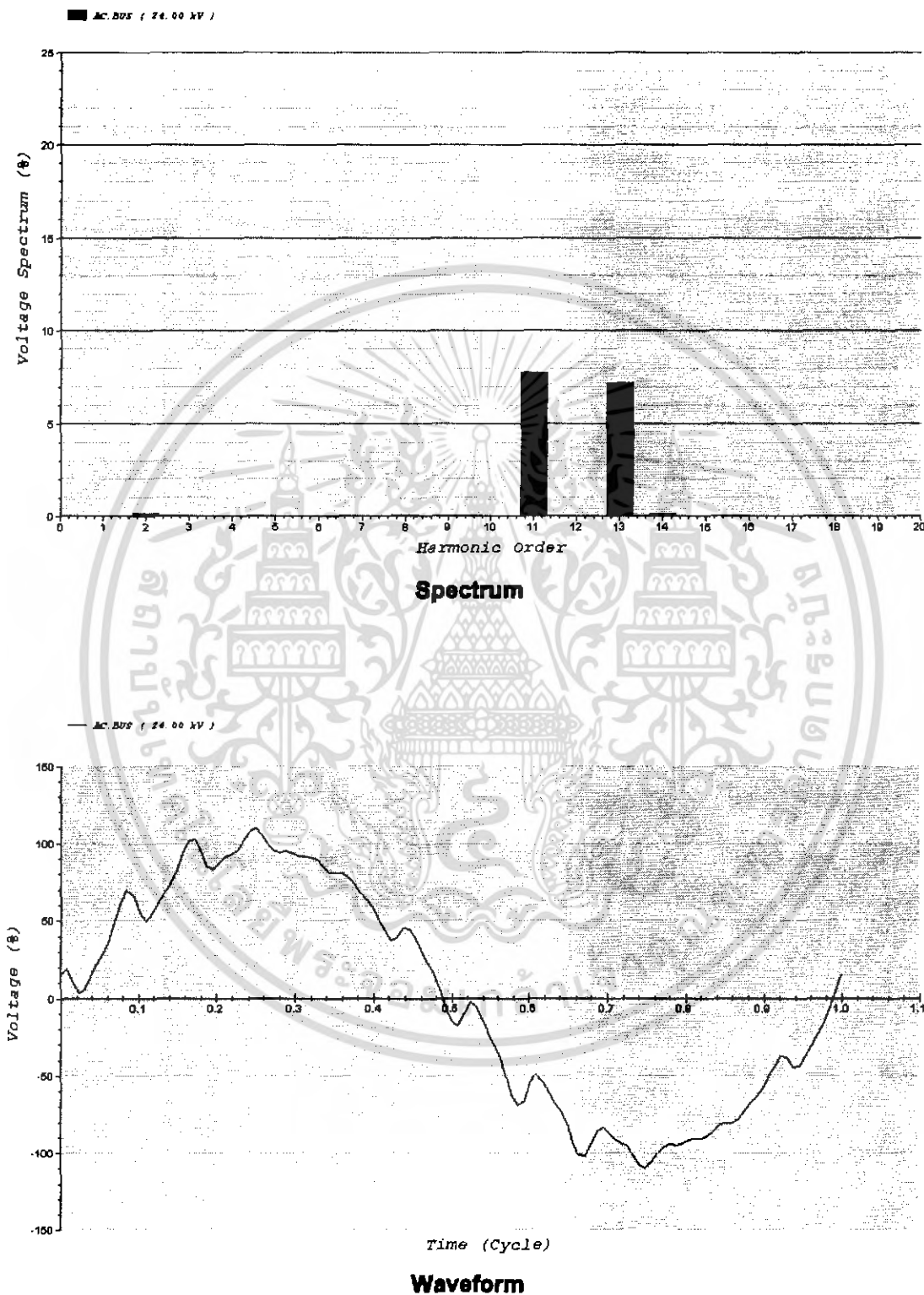
6.2.3 ผล Simulation ที่ 3 สถานี



รูปที่ 6.4 ผลของ Spectrum และ Waveform จากการ Simulation ที่ 3 สถานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

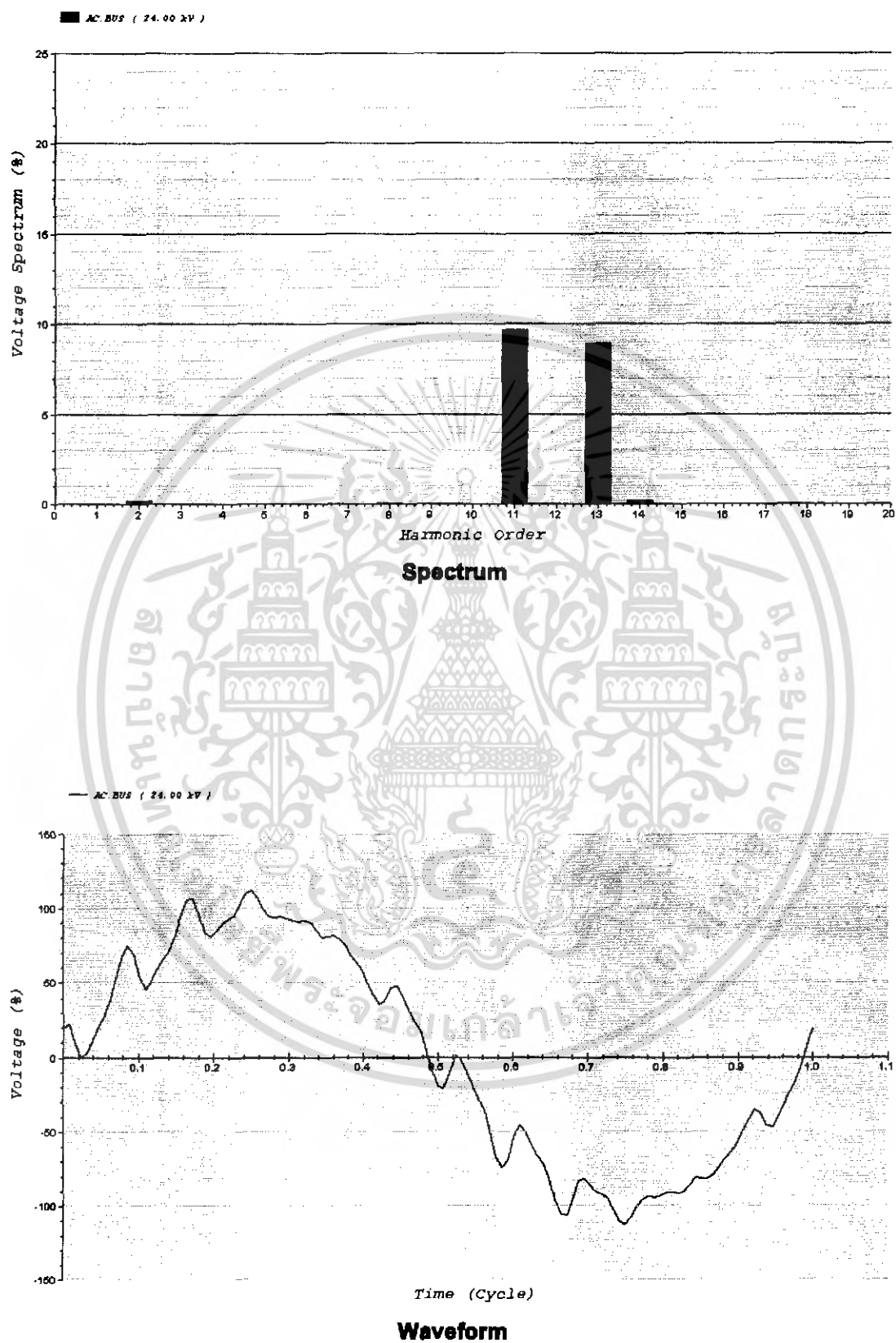
6.2.4 ผล Simulation ที่ 4 สถานี



รูปที่ 6.5 ผลของ Spectrum และ Waveform จากการ Simulation ที่ 4 สถานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

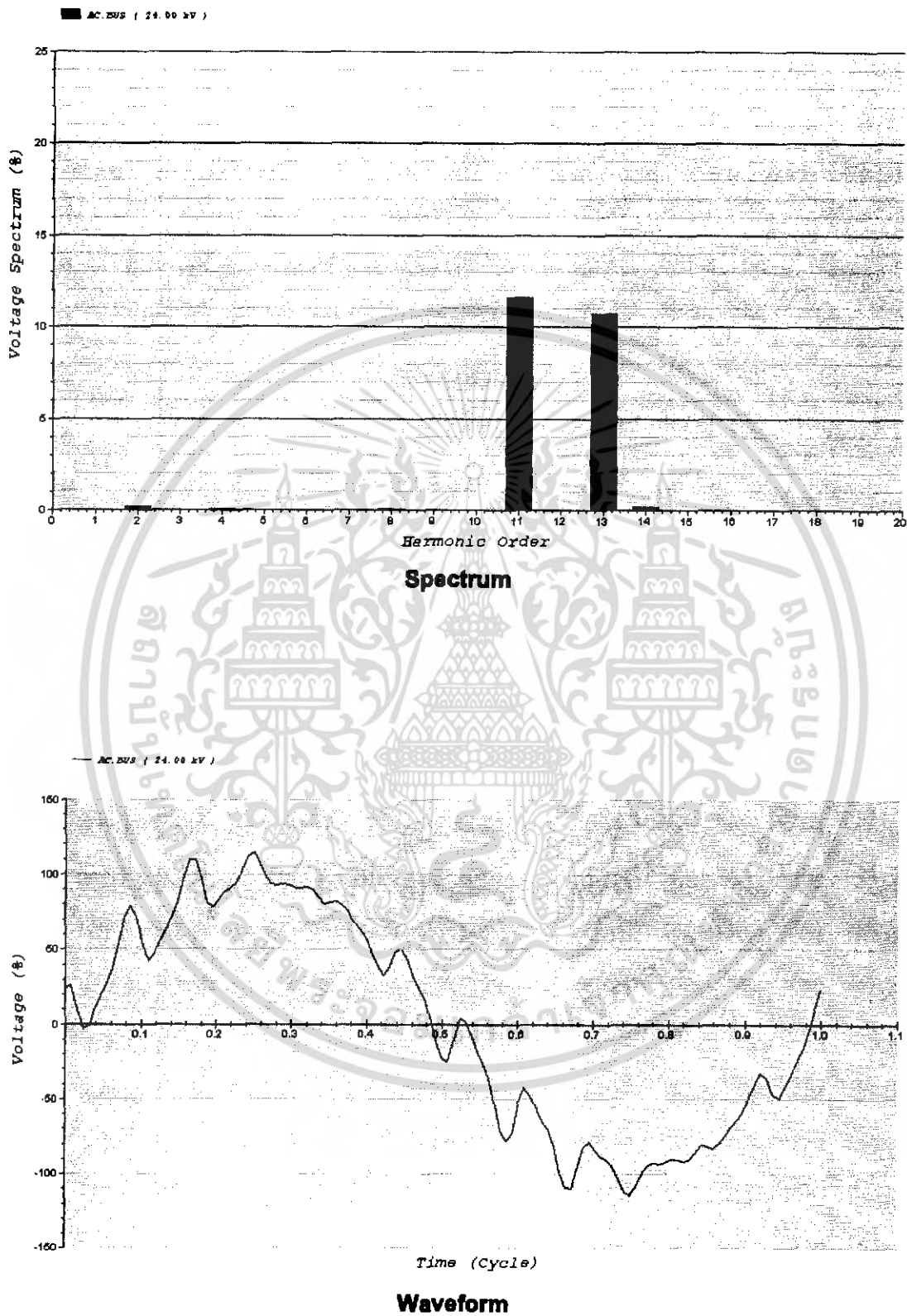
6.2.5 ผล Simulation ที่ 5 สถานี



รูปที่ 6.6 ผลของ Spectrum และ Waveform จากการ Simulation ที่ 5 สถานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

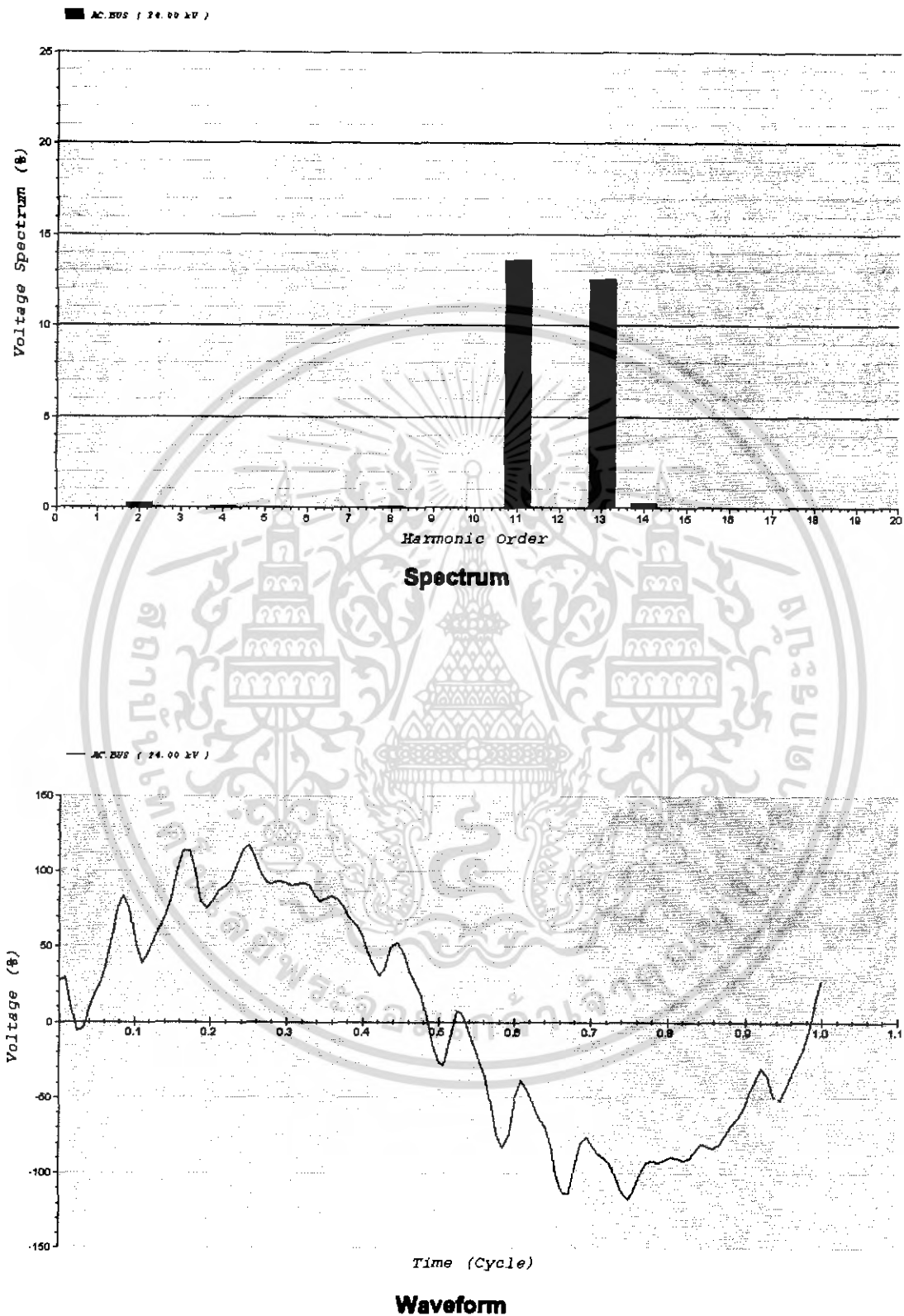
6.2.6 ผล Simulation ที่ 6 สถานี



รูปที่ 6.7 ผลของ Spectrum และ Waveform จากการ Simulation ที่ 6 สถานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

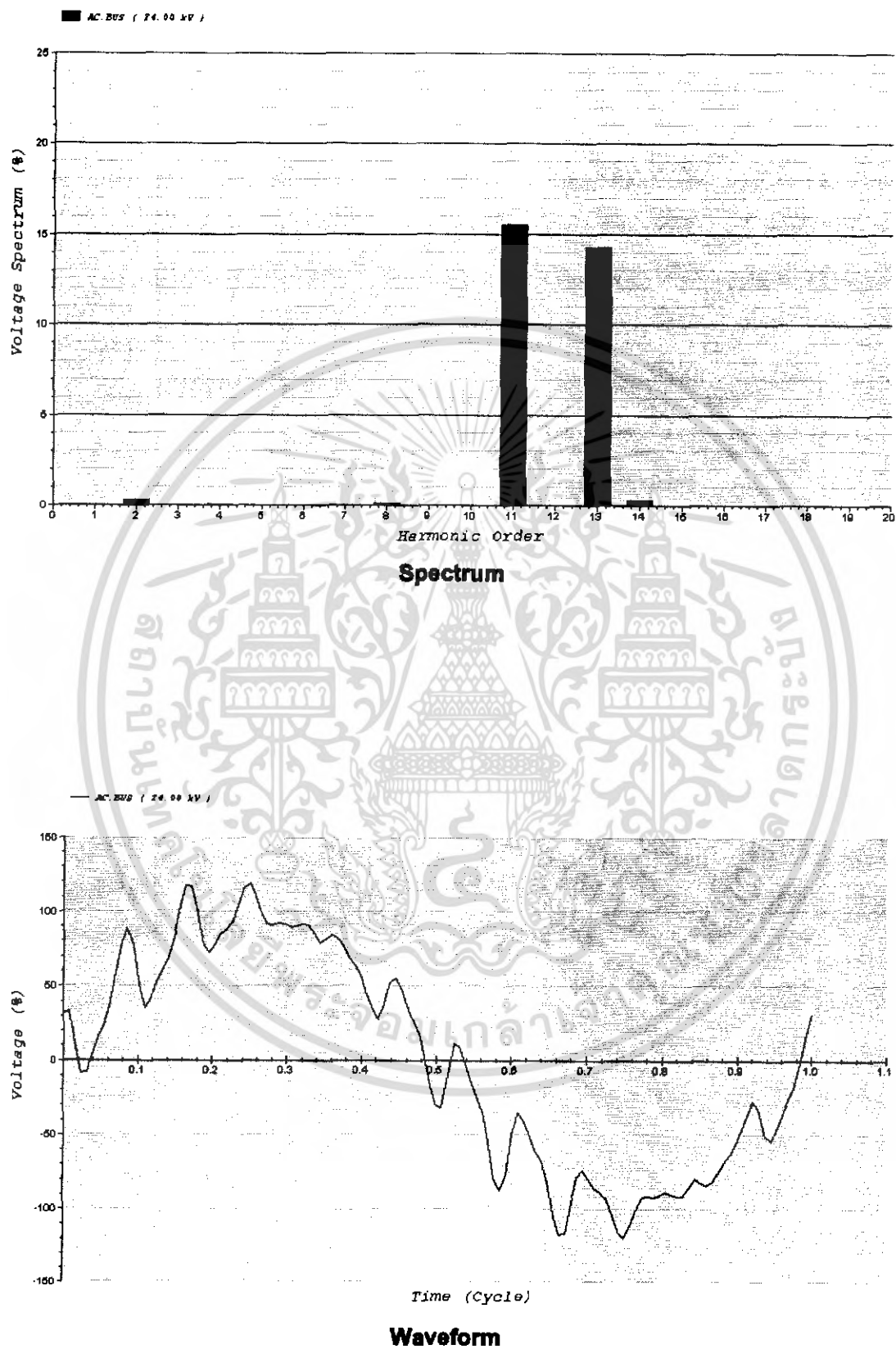
6.2.7 ผล Simulation ที่ 7 สถานี



รูปที่ 6.8 ผลของ Spectrum และ Waveform จากการ Simulation ที่ 7 สถานี

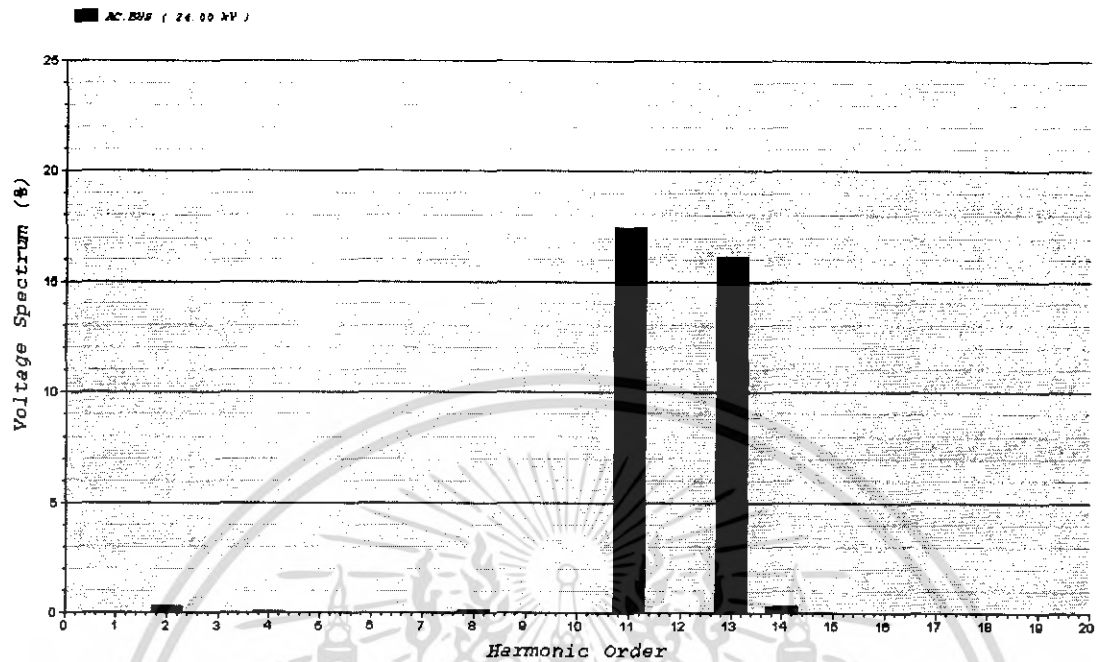
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.8 ผล Simulation ที่ 8 สถานี

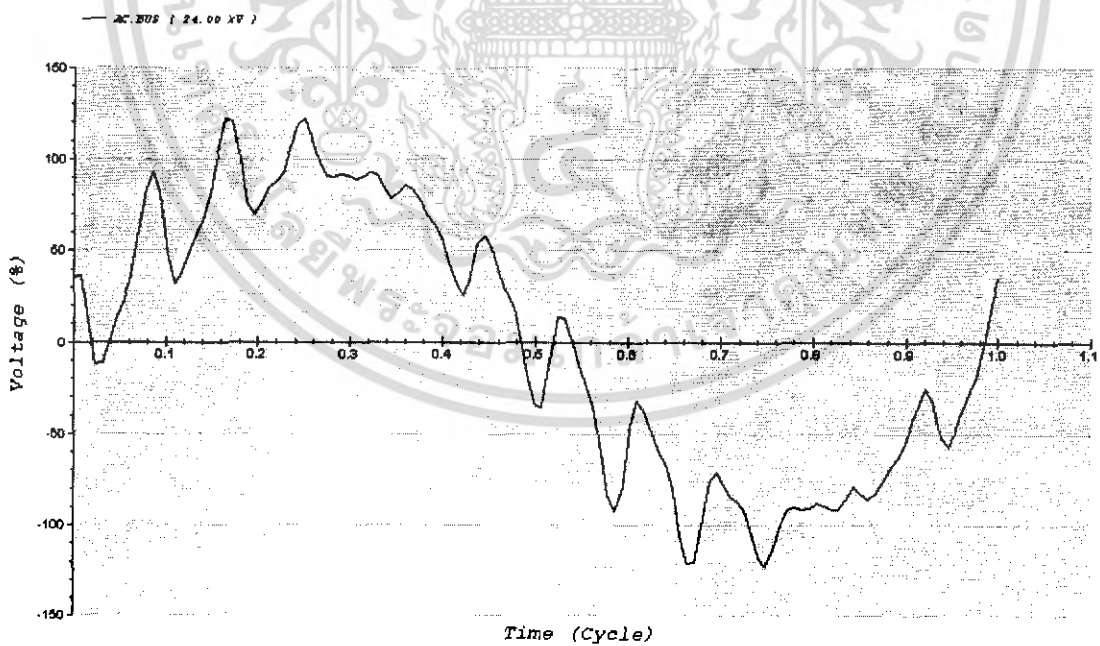


รูปที่ 6.9 ผลของ Spectrum และ Waveform จากการ Simulation ที่ 8 สถานี
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.9 ผล Simulation ที่ 9 สถานี



Spectrum

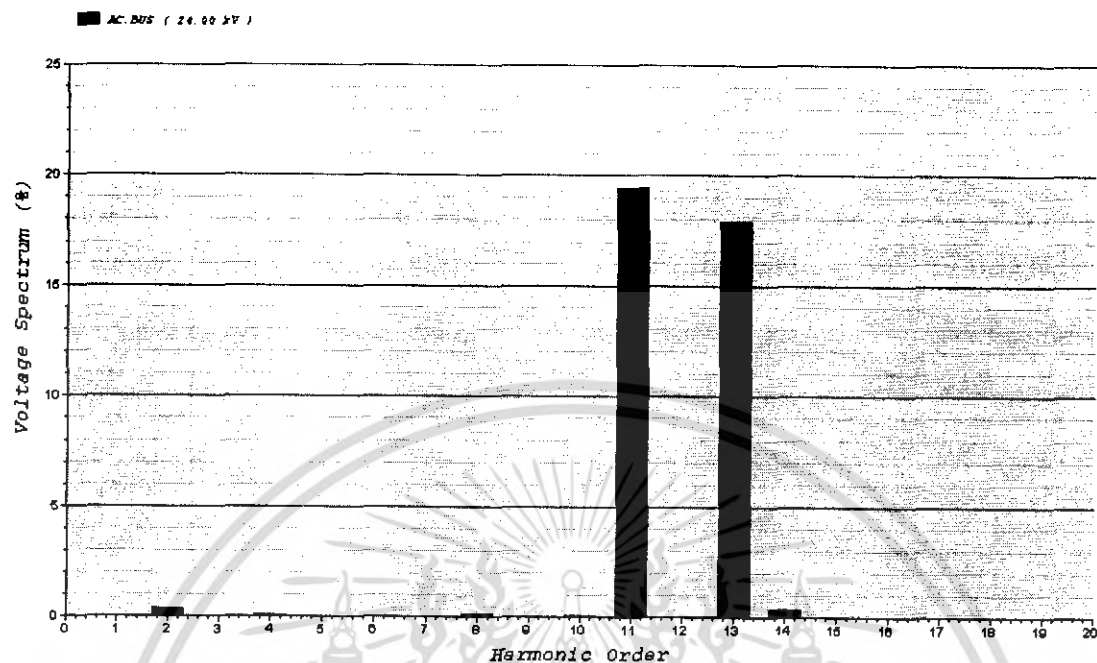


Waveform

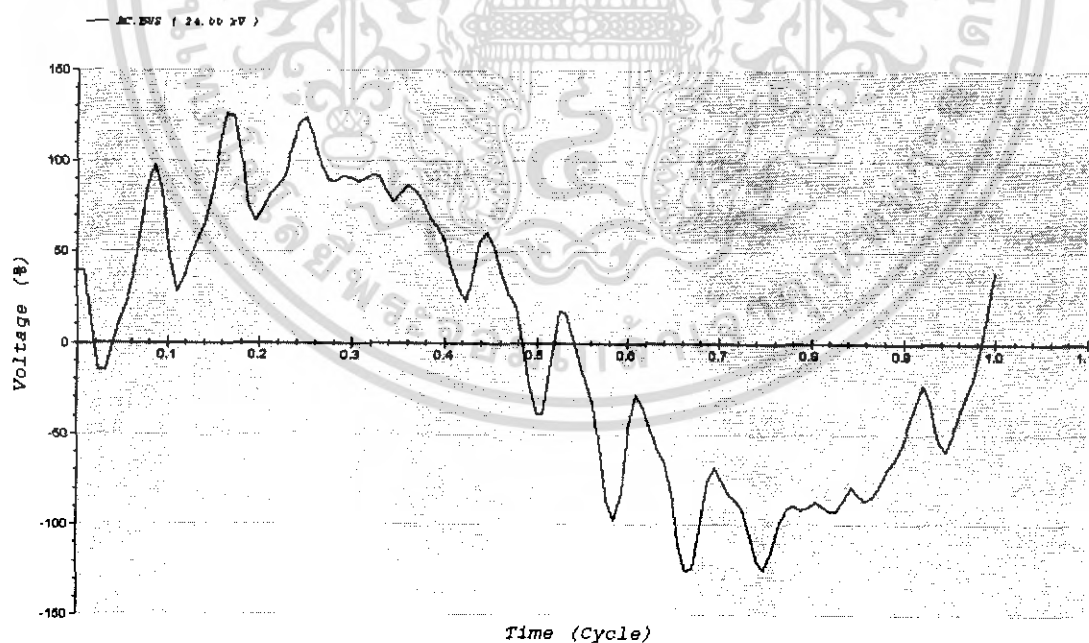
รูปที่ 6.10 ผลของ Spectrum และ Waveform จากการ Simulation ที่ 9 สถานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.10 ผล Simulation ที่ 10 สถานี



Spectrum

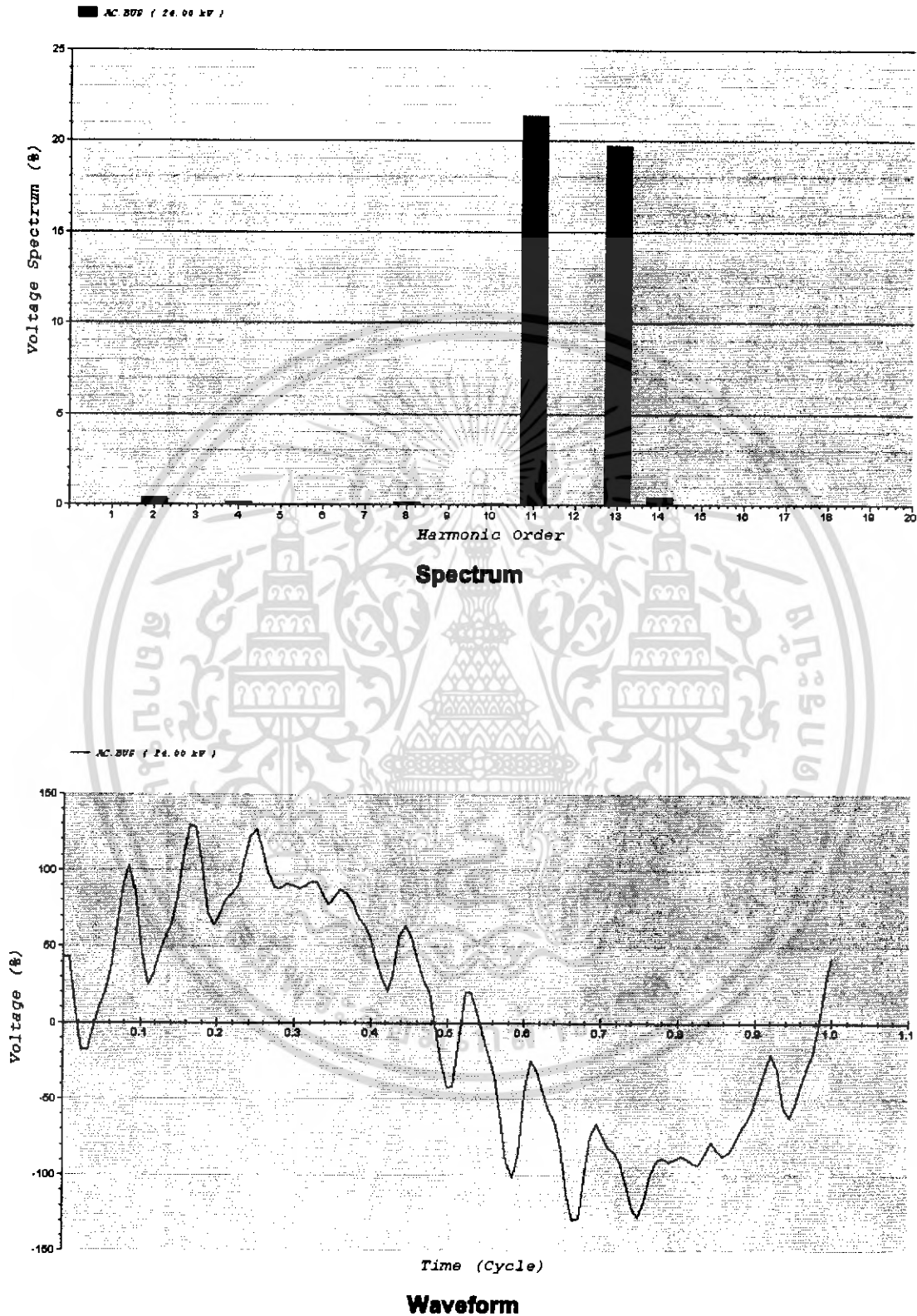


Waveform

รูปที่ 6.11 ผลของ Spectrum และ Waveform จากการ Simulation ที่ 10 สถานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

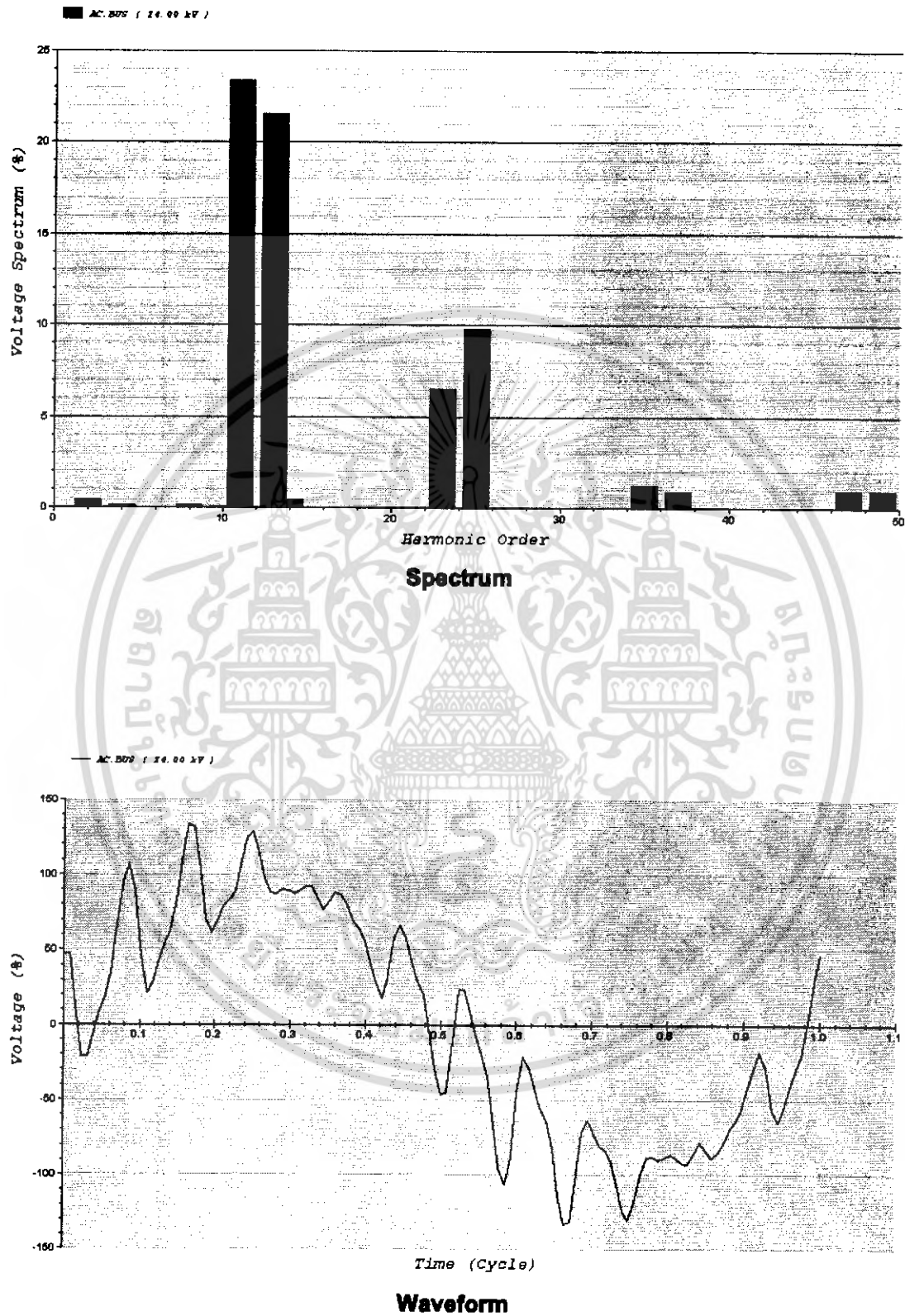
6.2.11 ผล Simulation ที่ 11 สถานี



รูปที่ 6.12 ผลของ Spectrum และ Waveform จากการ Simulation ที่ 11 สถานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.12 ผล Simulation ทั้งหมด 12 สถานี



รูปที่ 6.13 ผลของ Spectrum และ Waveform จากการ Simulation ที่ 12 สถานี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่ทำการ Simulation มานั้น จะสังเกตเห็นว่าค่า %THDv จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเกินค่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ดังตารางที่ 6.2 และความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น Sine wave ก็มีการบิดเบี้ยวมากขึ้นด้วยเช่นกัน จากรูปที่ 6.1 พิจารณาที่ AC.BUS จะเห็นว่าเกิดค่าฮาร์โมนิกส์สูงสุดที่ 12 สถานี (traction) ซึ่งมีค่าการทดลองดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ค่าผลการ Simulation หาฮาร์โมนิกส์ทั้งระบบ

% P.F.	S (MVA)	P (MW)	Q (MVar)	V_{rms} (kV)
83.24	32	26.63	17.73	25.34

ค่าความเพี้ยน (% THDv.)	ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน แต่ละอันดับ (%)	
	อันดับคี่	อันดับคู่
33.93	33.92	0.66

ID BUS	Harmonic Voltage (% of Fundamental Voltage)												
	2	4	8	10	11	13	14	23	25	35	37	47	49
AC.	0.43	0.13	0.17	0.07	23.33	21.56	0.45	6.52	9.79	1.23	0.91	0.96	0.96

* หมายเหตุ ใส่เฉพาะอันดับที่มีค่า (อันดับที่มีค่าเป็น 0 ไม่ใส่)

6.3 การจำลองการออกแบบวงจรถองฮาร์โมนิกส์

เราจะทำการทดลองปรับเปลี่ยนแก้ค่า Power Factor (p.f.) ในระบบ เพื่อหาค่าที่จะมาทำการแก้ฮาร์โมนิกส์ในระบบที่เกิดขึ้น โดยจะทำการปรับเปลี่ยนค่า p.f. จาก 83.23 เปอร์เซนต์ เป็น 85, 90 และ 95 เปอร์เซนต์ตามอันดับ หลังจากนั้นทำการพิจารณาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยจะพิจารณาเทียบกับค่ามาตรฐานที่การไฟฟ้านครหลวงกำหนดไว้ดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันสำหรับผู้ใช้ไฟที่จุดต่อร่วม

ระดับแรงดันไฟฟ้า ที่จุดต่อร่วม (kV)	ค่าความเพี้ยน (% THDv)	ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดัน แต่ละอันดับ (%)	
		อันดับคี่	อันดับคู่
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.1 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 85 %

นำค่าจากการคำนวณต่างๆ ที่ได้จากบทที่ 3 มาใส่ลงในพารามิเตอร์ของวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดังรูปที่ 6.14 และทำการ Simulation ได้ผลตามตารางที่ 6.3

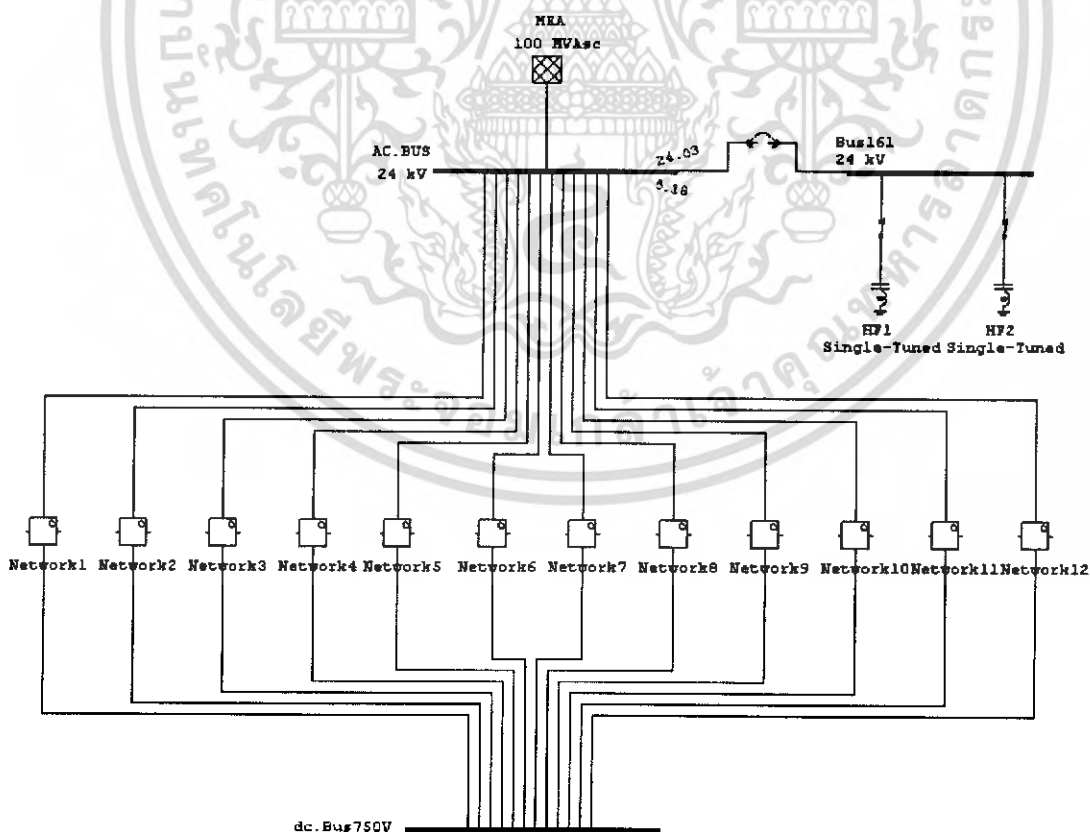
ตารางที่ 6.3 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.85 %

	% P.F.	% THDv	S (MVA)	P (MW)	Q (MVar)	V_{rms} (kV)
Before	83.24	33.93	32	26.63	17.73	25.34
After	85	5.18	31.33	26.63	13.96	24.03

	Harmonic Voltage (% of Fundamental Voltage)												
	2	4	8	10	11	13	14	23	25	35	37	47	49
Before	0.43	0.13	0.17	0.07	23.33	21.56	0.45	6.52	9.79	1.23	0.91	0.96	0.96
After	0.51	0.54	0	0	2.52	3.49	0.08	1.5	2.29	0.29	0.22	0.22	0.22

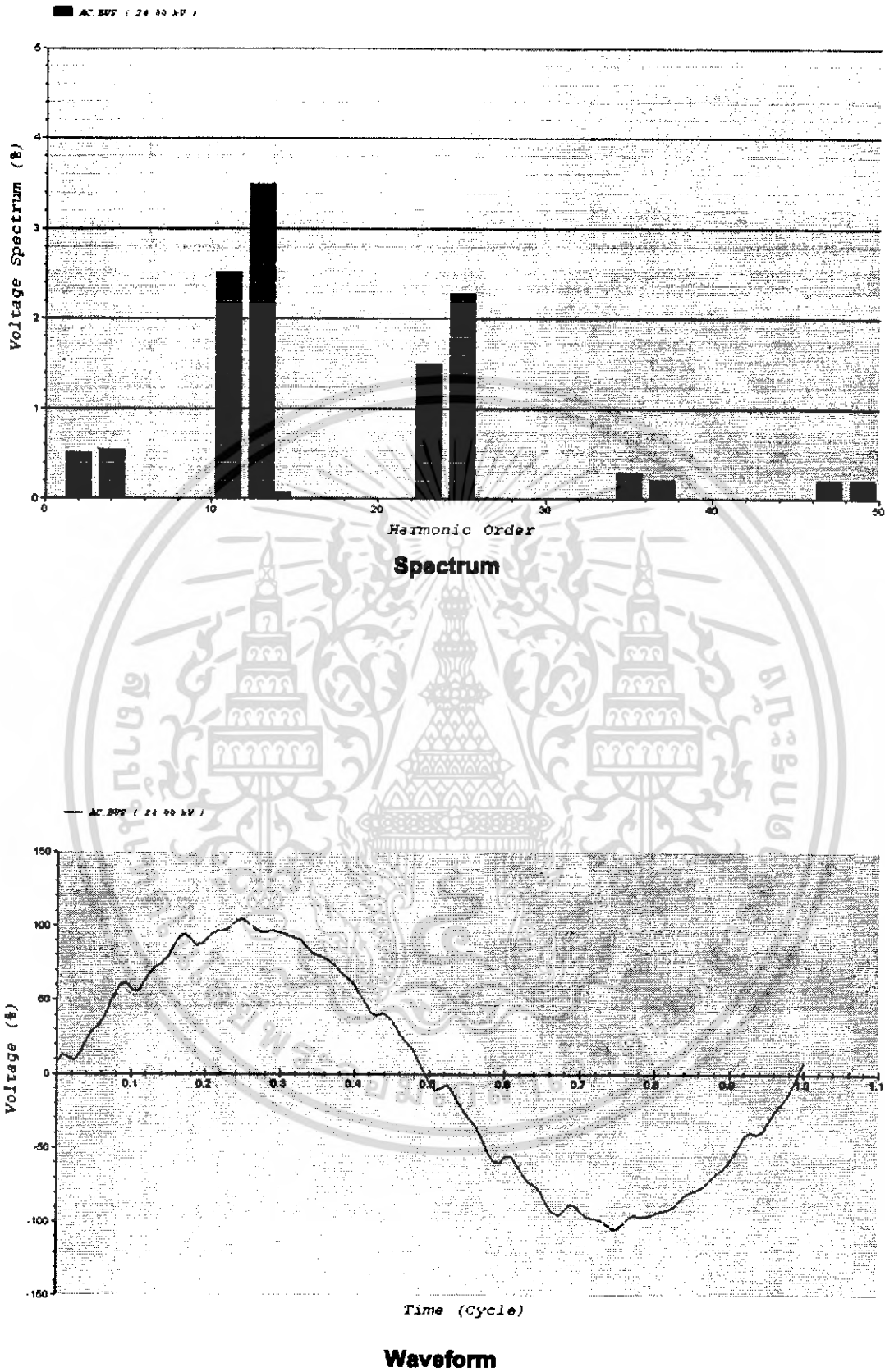
∴ ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคี่ (%) = 5.12

ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคู่ (%) = 0.74



รูปที่ 6.14 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 85 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.15 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 85 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.2 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 86 %

นำค่าจากการคำนวณต่างๆ ที่ได้จากบทที่ 3 มาใส่ลงในพารามิเตอร์ของวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดังรูปที่ 6.16 และทำการ Simulation ได้ผลตามตารางที่ 6.4

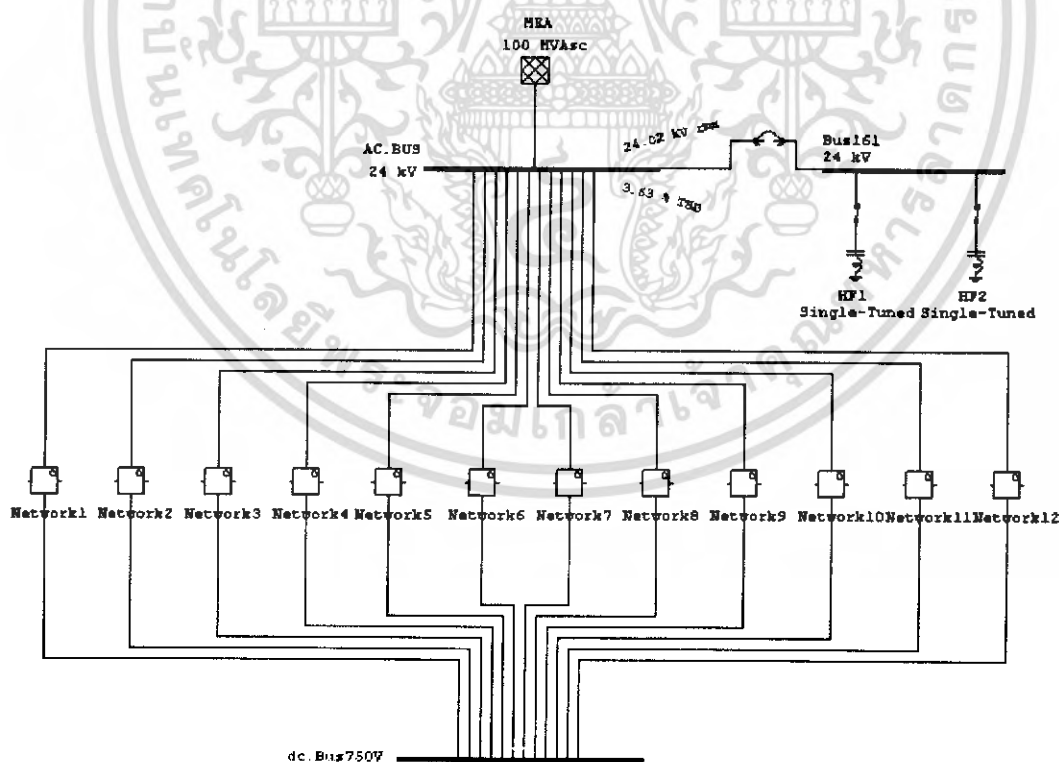
ตารางที่ 6.4 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.86 %

	% P.F.	% THDv	S (MVA)	P (MW)	Q (MVar)	V_{rms} (kV)
Before	83.24	33.93	32	26.63	17.73	25.34
After	86	3.63	30.96	26.63	11.81	24.02

	Harmonic Voltage (% of Fundamental Voltage)												
	2	4	8	10	11	13	14	23	25	35	37	47	49
Before	0.43	0.13	0.17	0.07	23.33	21.56	0.45	6.52	9.79	1.23	0.91	0.96	0.96
After	0.57	0.63	0	0	1.72	2.39	0.06	1.05	1.60	0.20	0.15	0.15	0.15

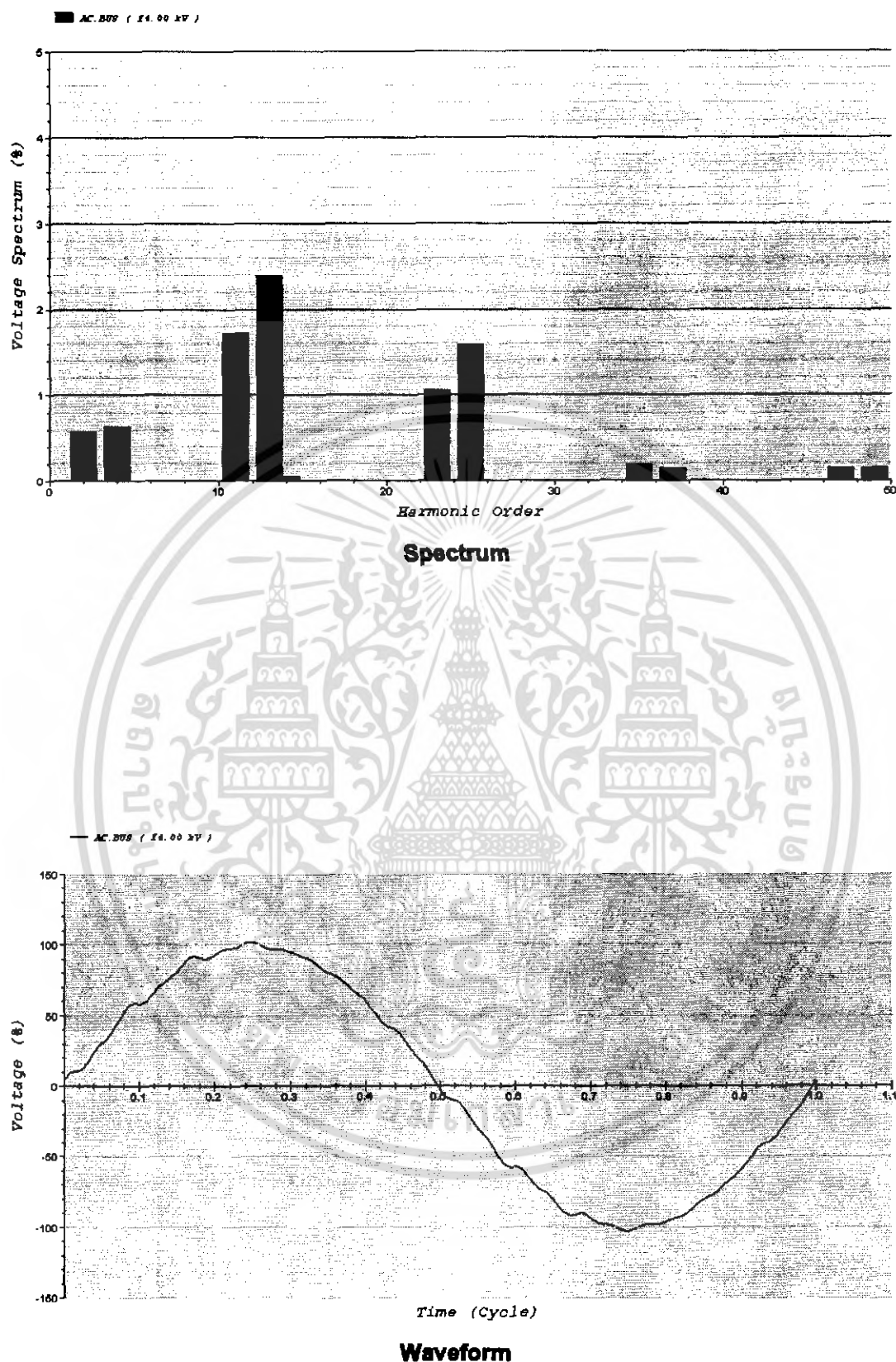
∴ ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับที่ (%) = 3.53

ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคู่ (%) = 0.85



รูปที่ 6.16 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 86 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.17 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 86 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.3 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 87 %

นำค่าจากการคำนวณต่างๆ ที่ได้จากบทที่ 3 มาใส่ลงในพารามิเตอร์ของวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดังรูปที่ 6.18 และทำการ Simulation ได้ผลตามตารางที่ 6.5

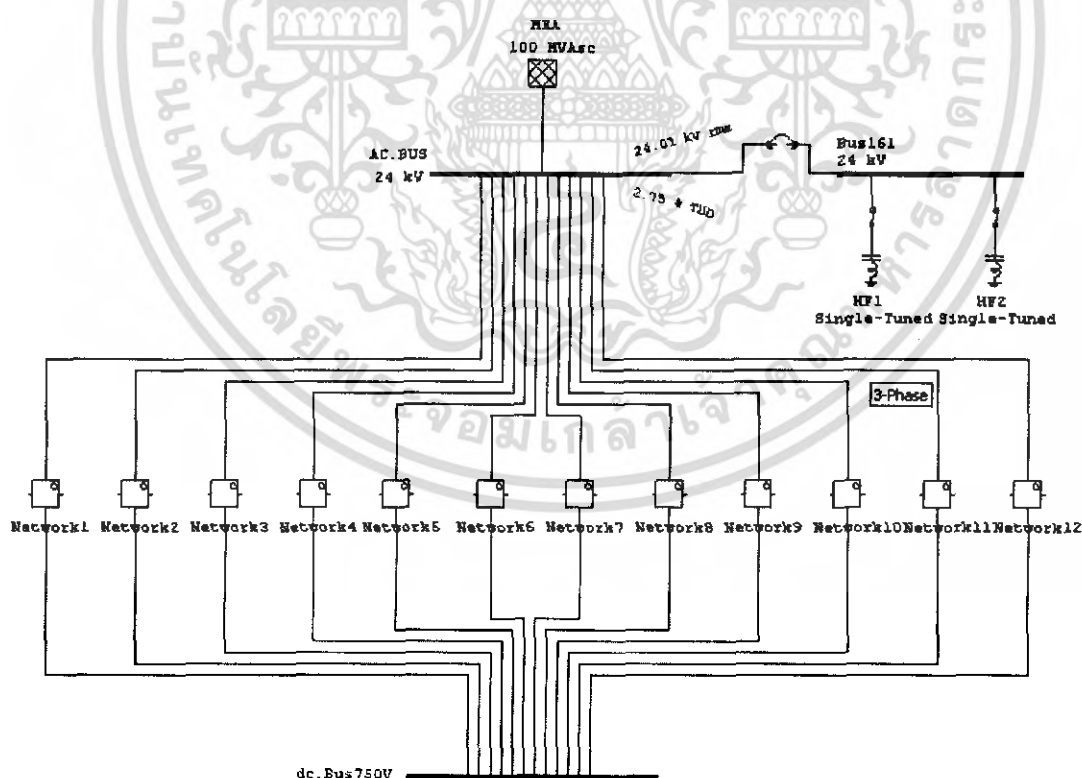
ตารางที่ 6.5 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.87 %

	% P.F.	% THDv	S (MVA)	P (MW)	Q (MVar)	V_{rms} (kV)
Before	83.24	33.93	32	26.63	17.73	25.34
After	87	2.75	30.6	26.63	9.63	24.01

	Harmonic Voltage (% of Fundamental Voltage)												
	2	4	8	10	11	13	14	23	25	35	37	47	49
Before	0.43	0.13	0.17	0.07	23.33	21.56	0.45	6.52	9.79	1.23	0.91	0.96	0.96
After	0.65	0.20	0	0	1.28	1.80	0.04	0.80	1.22	0.16	0.12	0.12	0.12

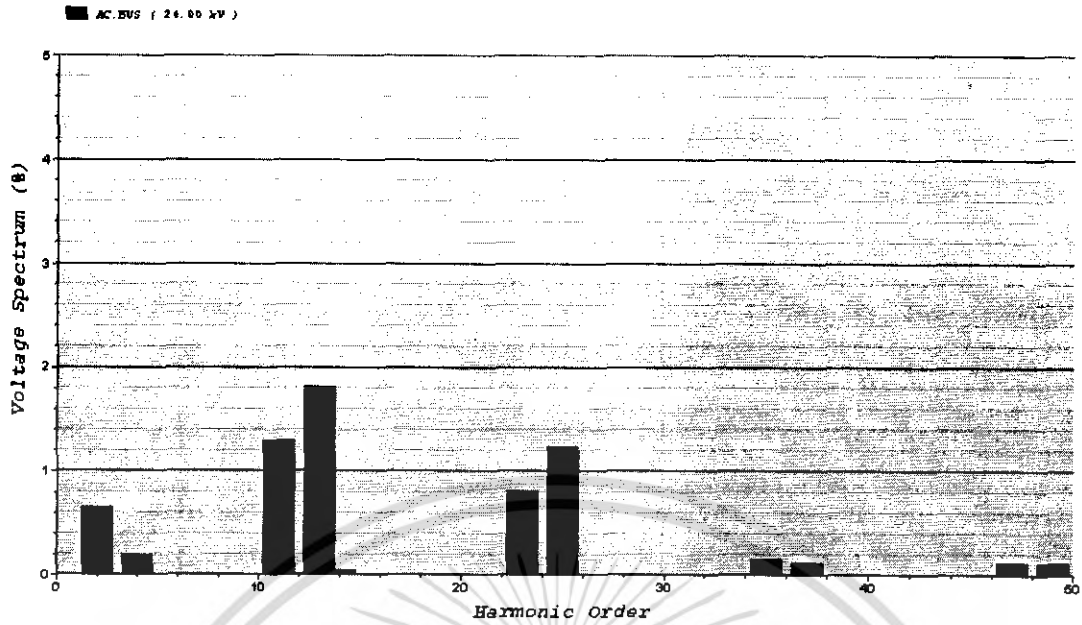
∴ ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคี่ (%) = 2.66

ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคู่ (%) = 0.68

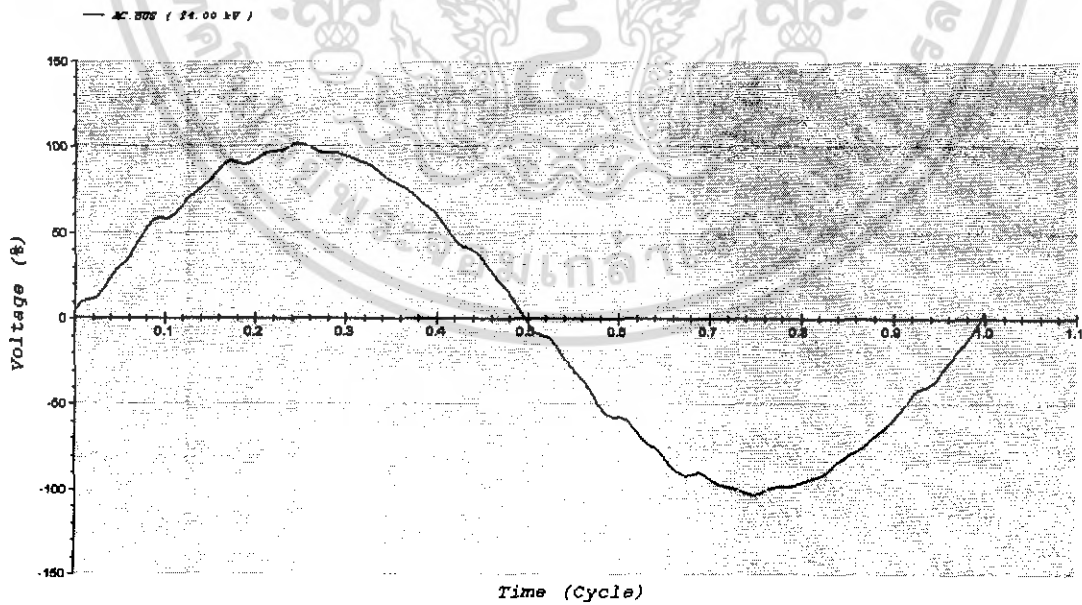


รูปที่ 6.18 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 87 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Spectrum



Waveform

รูปที่ 6.19 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 87 % เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.4 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 88 %

นำค่าจากการคำนวณต่างๆ ที่ได้จากบทที่ 3 มาใส่ลงในพารามิเตอร์ของวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดังรูปที่ 6.20 และทำการ Simulation ได้ผลตามตารางที่ 6.6

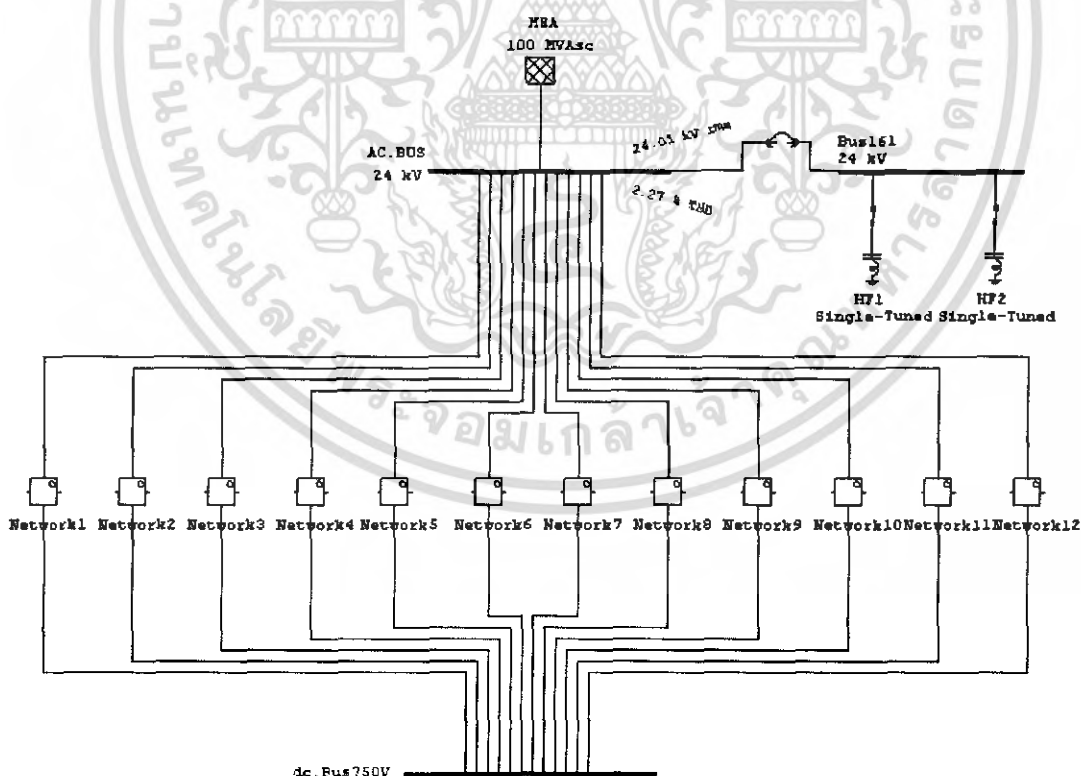
ตารางที่ 6.6 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.88 %

	% P.F.	% THDv	S (MVA)	P (MW)	Q (MVar)	V _{rms} (kV)
Before	83.24	33.93	32	26.63	17.73	25.34
After	88	2.27	30.26	26.63	7.43	24.01

	Harmonic Voltage (% of Fundamental Voltage)												
	2	4	8	10	11	13	14	23	25	35	37	47	49
Before	0.43	0.13	0.17	0.07	23.33	21.56	0.45	6.52	9.79	1.23	0.91	0.96	0.96
After	0.75	0.12	0	0	1.02	1.44	0.03	0.65	0.99	0.13	0.09	0.09	0.09

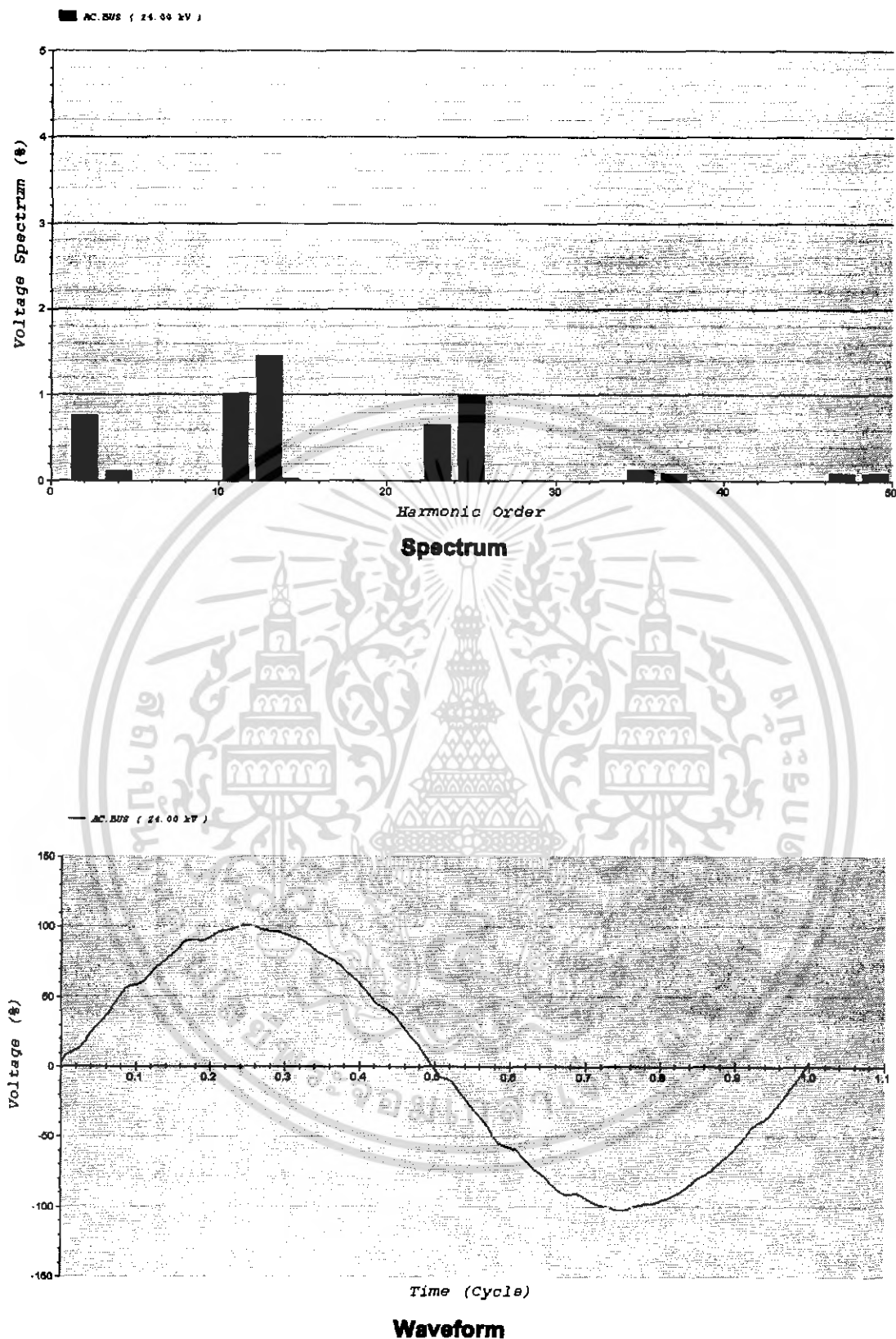
∴ ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคี่ (%) = 2.13

ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคู่ (%) = 0.76



รูปที่ 6.20 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 88 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.21 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 88 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.5 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 89 %

นำค่าจากการคำนวณต่างๆ ที่ได้จากบทที่ 3 มาใส่ลงในพารามิเตอร์ของวงจร
กรองฮาร์โมนิกส์ดังรูปที่ 6.22 และทำการ Simulation ได้ผลตามตารางที่ 6.7

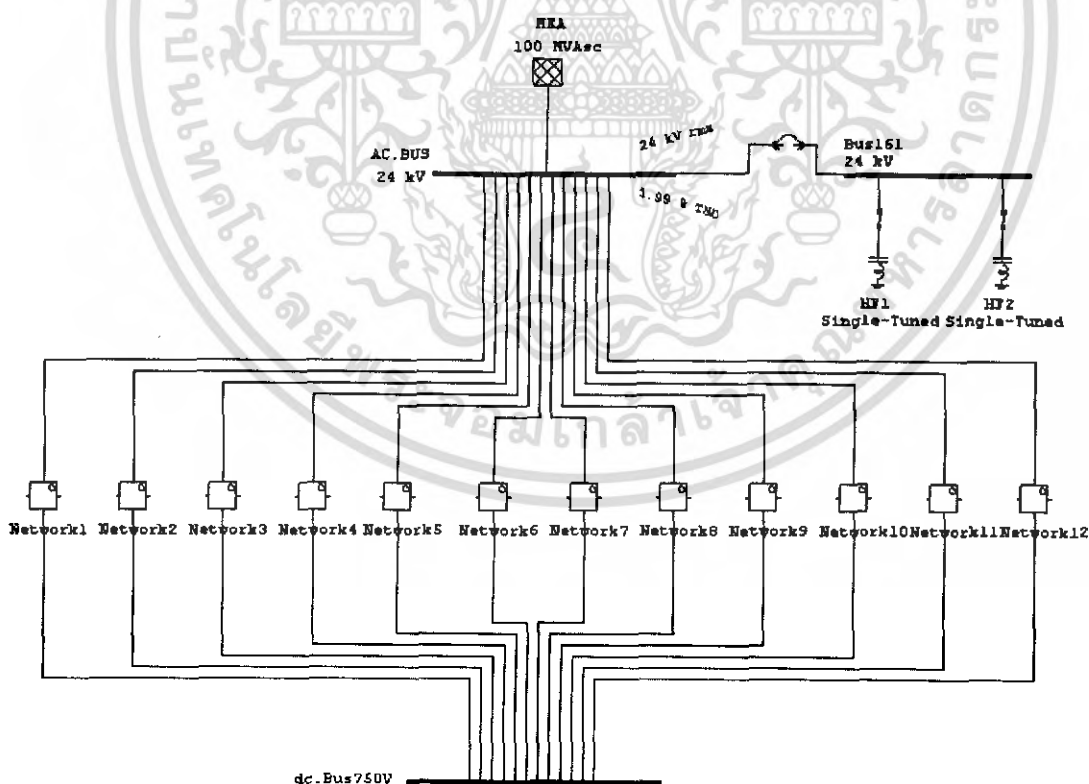
ตารางที่ 6.7 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.89 %

	% P.F.	% THDv	S (MVA)	P (MW)	Q (MVar)	V_{rms} (kV)
Before	83.24	33.93	32	26.63	17.73	25.34
After	89	1.99	29.92	26.63	5.19	24

	Harmonic Voltage (% of Fundamental Voltage)												
	2	4	8	10	11	13	14	23	25	35	37	47	49
Before	0.43	0.13	0.17	0.07	23.33	21.56	0.45	6.52	9.79	1.23	0.91	0.96	0.96
After	0.90	0.08	0	0	0.84	1.20	0.03	0.54	0.83	0.11	0.08	0.08	0.08

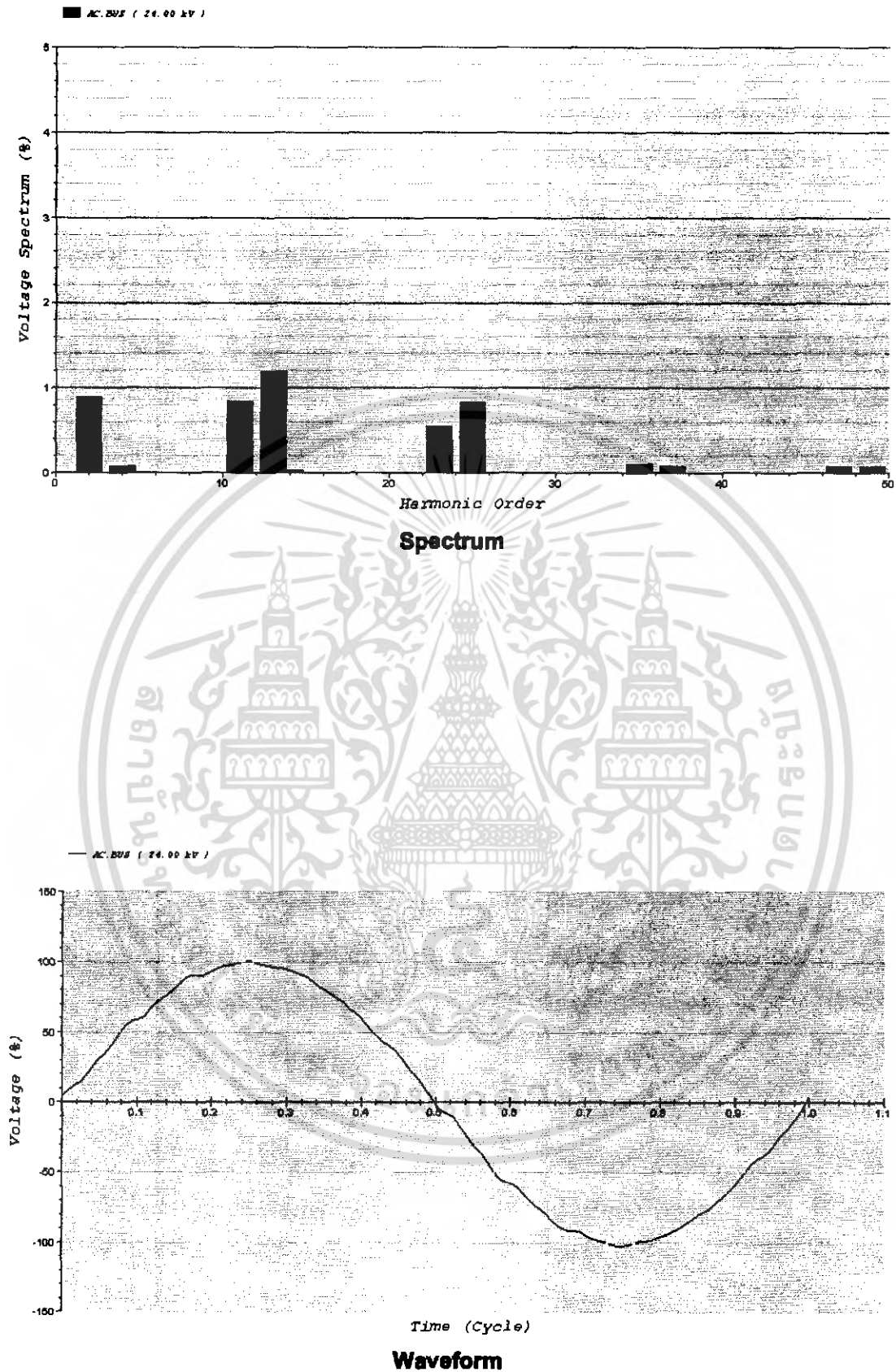
∴ ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคี่ (%) = 1.78

ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคู่ (%) = 0.90



รูปที่ 6.22 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 89 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.23 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 89 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.6 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 90 %

นำค่าจากการคำนวณต่างๆ ที่ได้จากบทที่ 3 มาใส่ลงในพารามิเตอร์ของวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดังรูปที่ 6.24 และทำการ Simulation ได้ผลตามตารางที่ 6.8

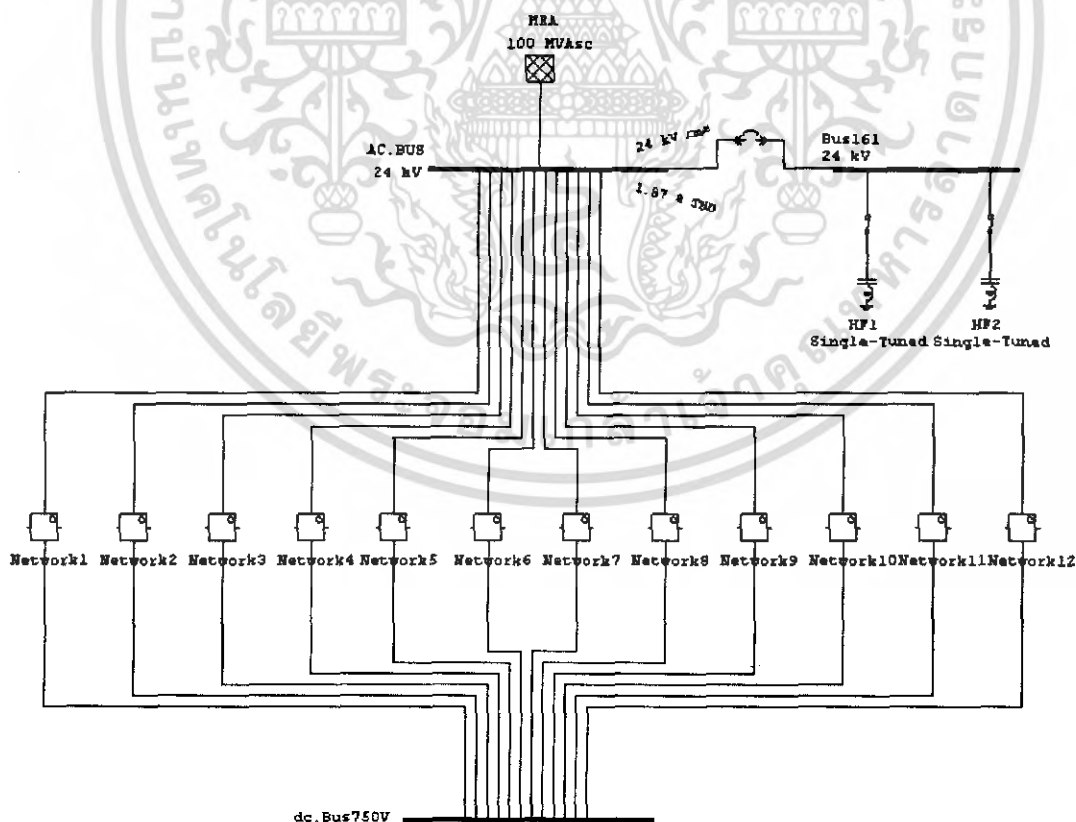
ตารางที่ 6.8 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.90 %

	% P.F.	% THDv	S (MVA)	P (MW)	Q (MVar)	V_{rms} (kV)
Before	83.24	33.93	32	26.63	17.73	25.34
After	90	1.87	29.6	26.64	2.96	24

	Harmonic Voltage (% of Fundamental Voltage)												
	2	4	8	10	11	13	14	23	25	35	37	47	49
Before	0.43	0.13	0.17	0.07	23.33	21.56	0.45	6.52	9.79	1.23	0.91	0.96	0.96
After	1.12	0.06	0	0	0.96	1.2	0.03	0.51	0.77	0.1	0.07	0.07	0.07

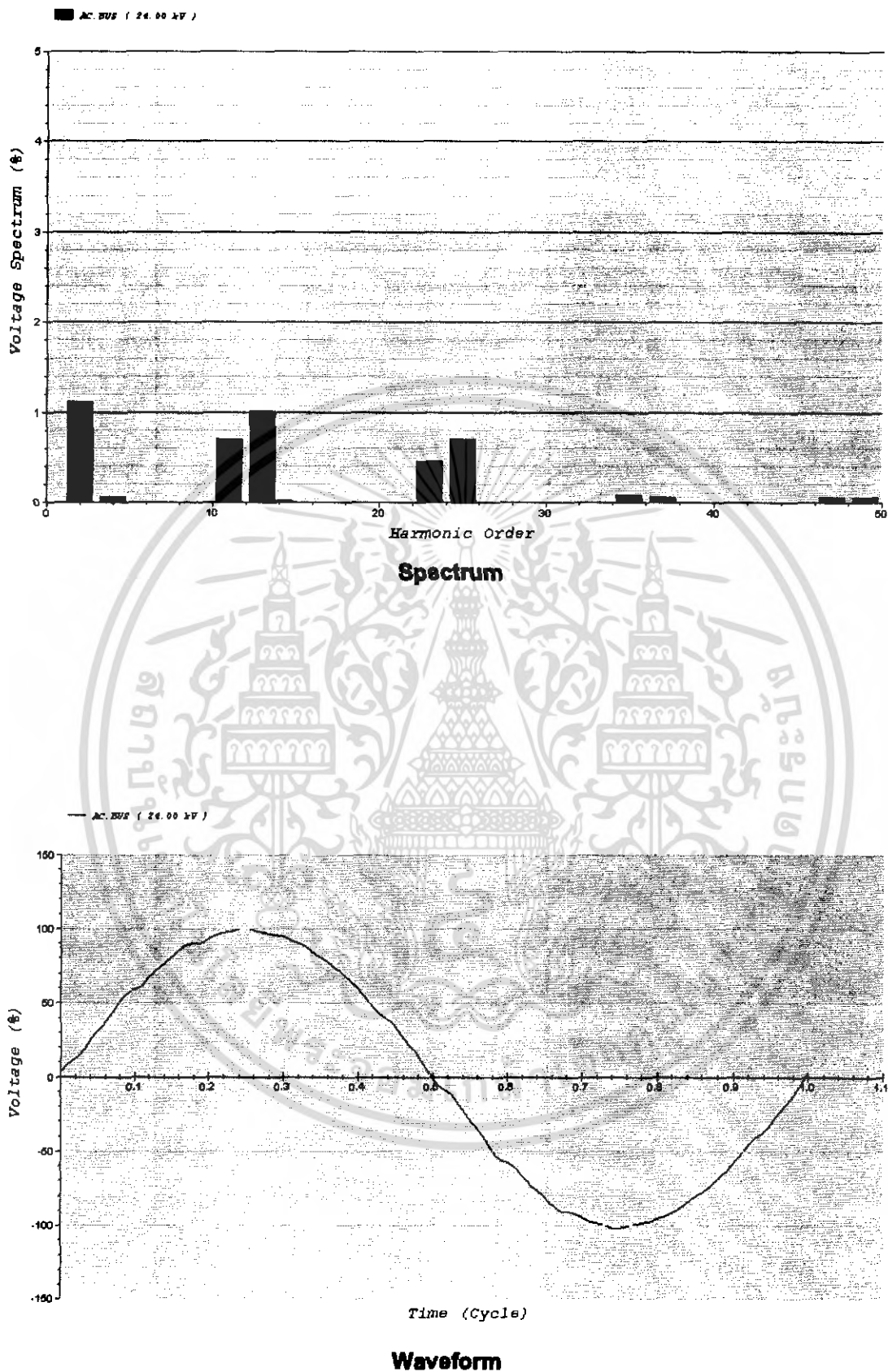
∴ ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคี่ (%) = 1.49

ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคู่ (%) = 1.11



รูปที่ 6.24 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 90 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.25 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 90 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.7 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 91 %

นำค่าจากการคำนวณต่างๆ ที่ได้จากบทที่ 3 มาใส่ลงในพารามิเตอร์ของวงจรกริดฮาร์โมนิกส์ดังรูปที่ 6.26 และทำการ Simulation ได้ผลตามตารางที่ 6.9

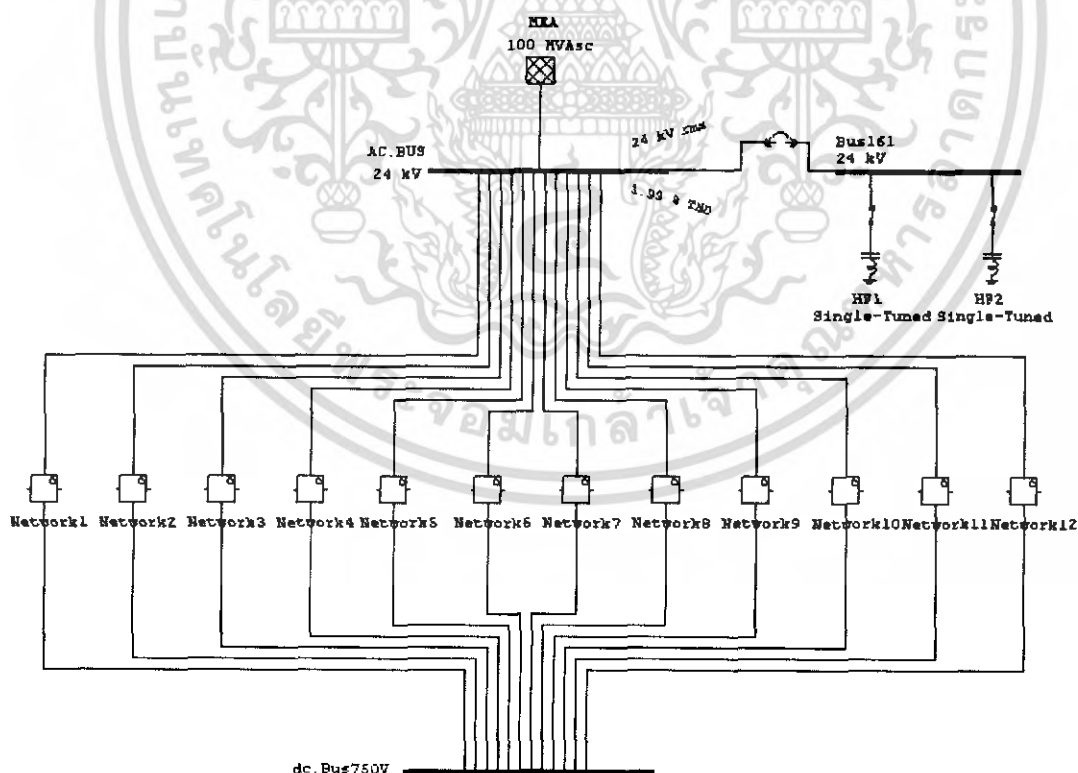
ตารางที่ 6.9 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.91 %

	% P.F.	% THDv	S (MVA)	P (MW)	Q (MVar)	V_{rms} (kV)
Before	83.24	33.93	32	26.63	17.73	25.34
After	91	1.99	29.27	26.64	0.56	24

	Harmonic Voltage (% of Fundamental Voltage)												
	2	4	8	10	11	13	14	23	25	35	37	47	49
Before	0.43	0.13	0.17	0.07	23.33	21.56	0.45	6.52	9.79	1.23	0.91	0.96	0.96
After	1.49	0.05	0	0	0.62	0.89	0.02	0.41	0.62	0.08	0.06	0.06	0.06

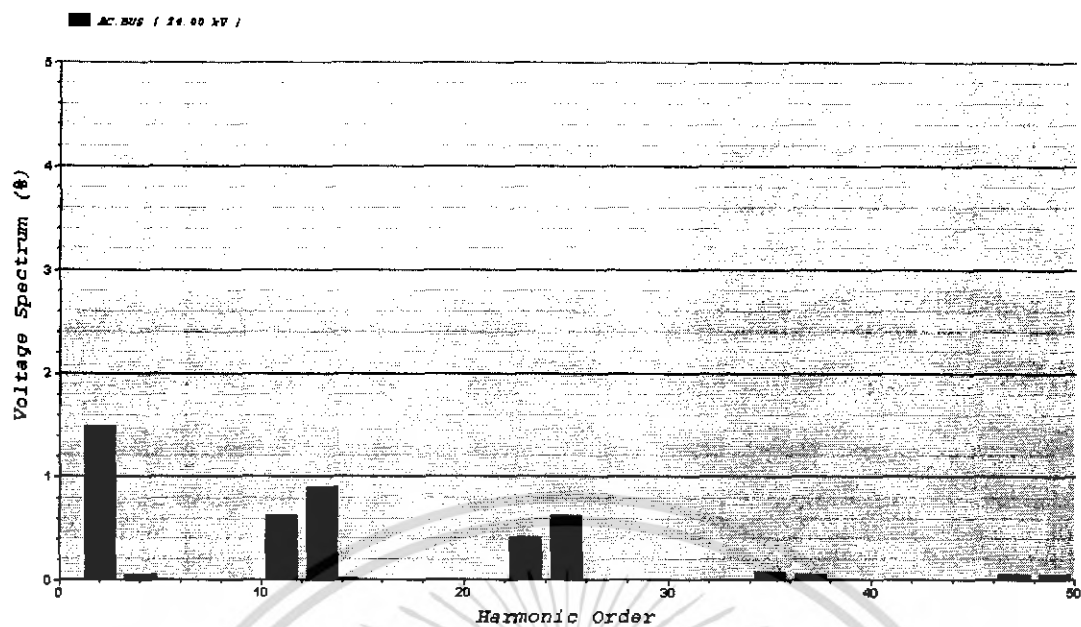
∴ ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคี่ (%) = 1.32

ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคู่ (%) = 1.49

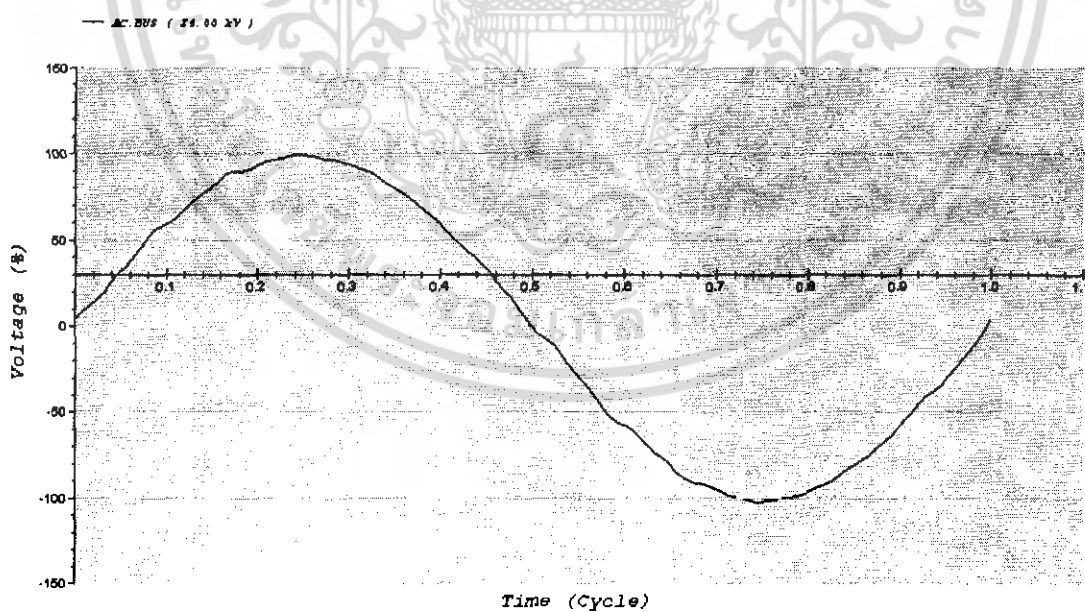


รูปที่ 6.26 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรกริดฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 91 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Spectrum



Waveform

รูปที่ 6.27 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 91 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.8 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 92 %

นำค่าจากการคำนวณต่างๆ ที่ได้จากบทที่ 3 มาใส่ลงในพารามิเตอร์ของวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดังรูปที่ 6.28 และทำการ Simulation ได้ผลตามตารางที่ 6.10

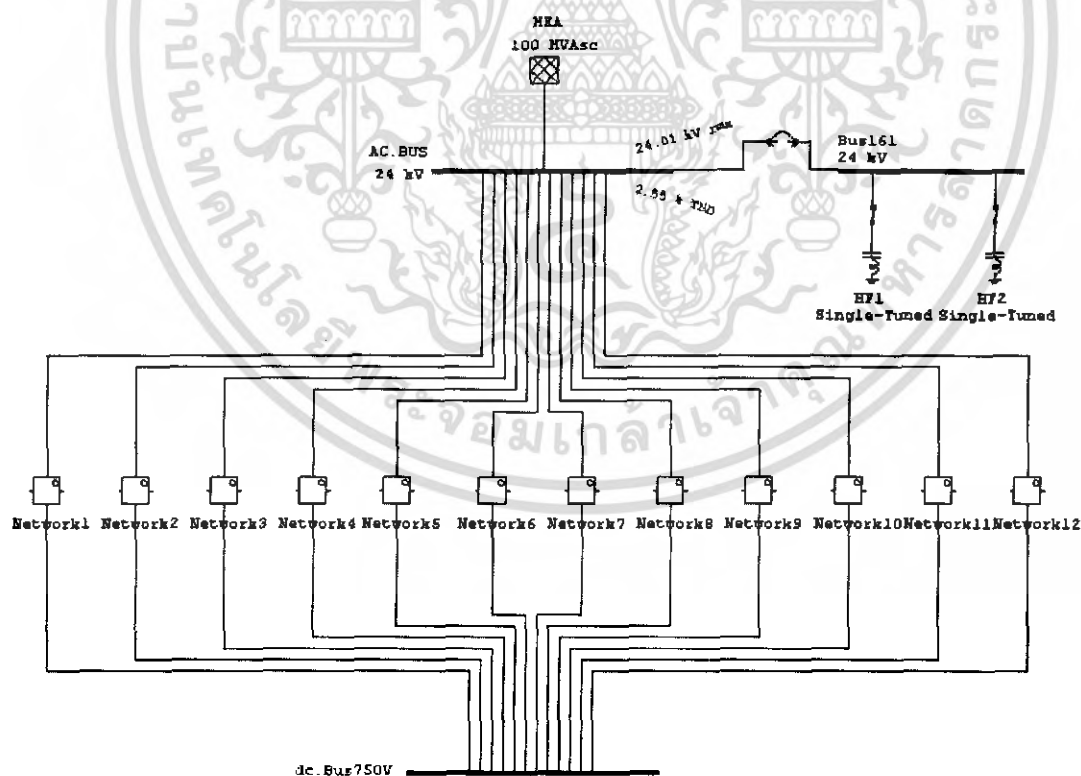
ตารางที่ 6.10 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.92 %

	% P.F.	% THDv	S (MVA)	P (MW)	Q (MVar)	V_{rms} (kV)
Before	83.24	33.93	32	26.63	17.73	25.34
After	92	2.55	28.95	26.64	-1.87	24.01

	Harmonic Voltage (% of Fundamental Voltage)												
	2	4	8	10	11	13	14	23	25	35	37	47	49
Before	0.43	0.13	0.17	0.07	23.33	21.56	0.45	6.52	9.79	1.23	0.91	0.96	0.96
After	2.27	0.04	0	0	0.55	0.78	0.02	0.36	0.55	0.07	0.05	0.05	0.05

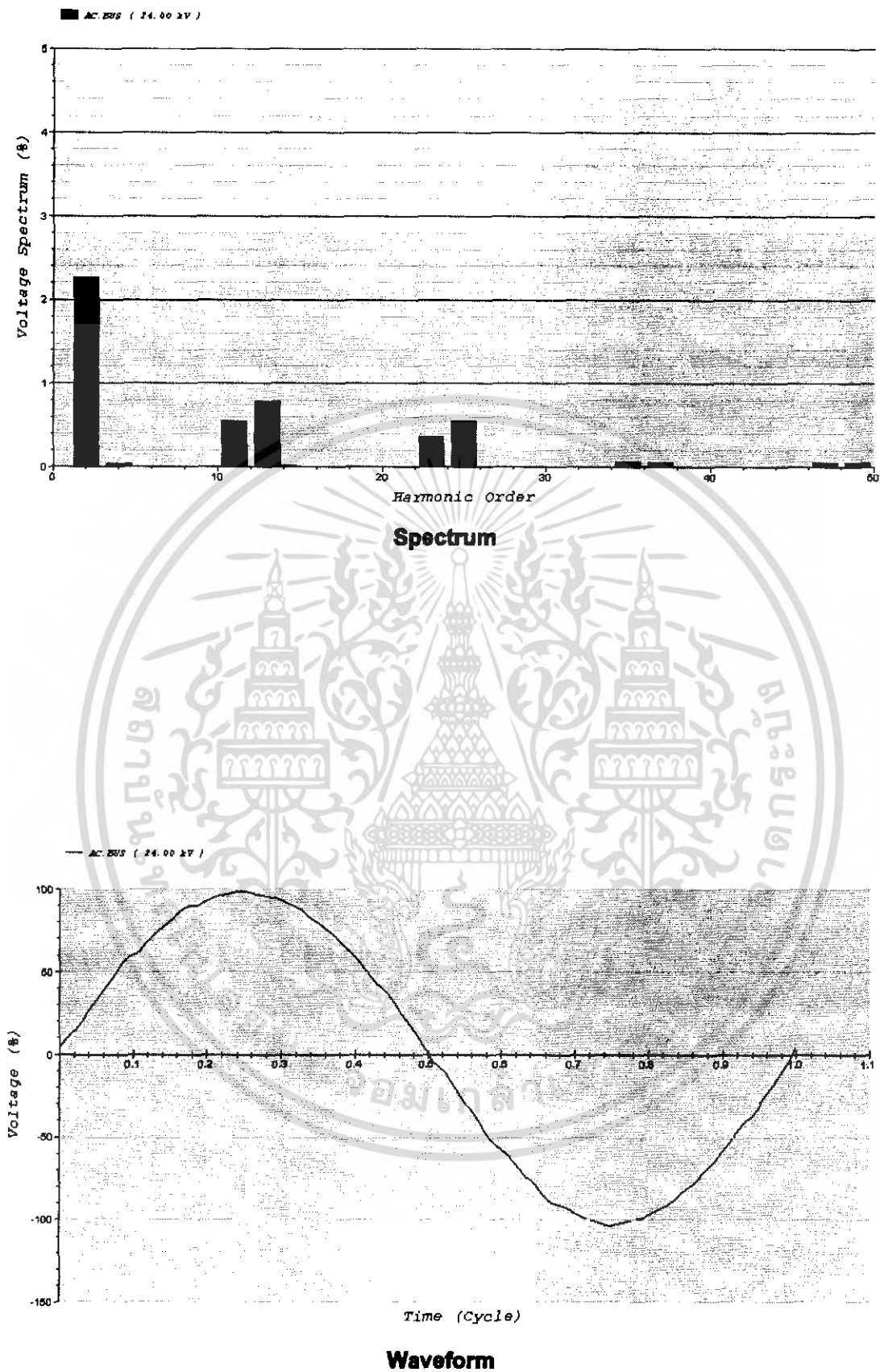
∴ ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคี่ (%) = 1.16

ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคู่ (%) = 2.27



รูปที่ 6.28 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 92 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.29 ผลของ Spectrum และWaveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 92 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.9 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 93 %

นำค่าจากการคำนวณต่างๆ ที่ได้จากบทที่ 3 มาใส่ลงในพารามิเตอร์ของวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดังรูปที่ 6.30 และทำการ Simulation ได้ผลตามตารางที่ 6.11

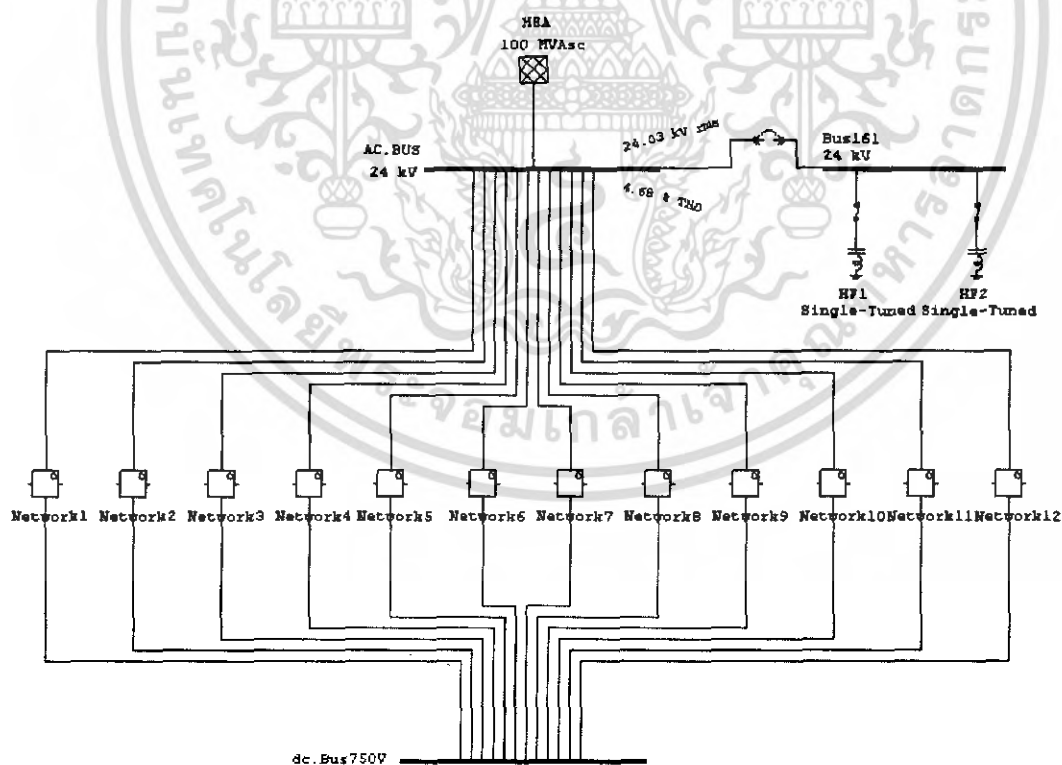
ตารางที่ 6.11 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.93 %

	% P.F.	% THDv	S (MVA)	P (MW)	Q (MVar)	V_{rms} (kV)
Before	83.24	33.93	32	26.63	17.73	25.34
After	93	4.68	28.64	26.64	-4.35	24.03

	Harmonic Voltage (% of Fundamental Voltage)												
	2	4	8	10	11	13	14	23	25	35	37	47	49
Before	0.43	0.13	0.17	0.07	23.33	21.56	0.45	6.52	9.79	1.23	0.91	0.96	0.96
After	4.56	0.04	0	0	0.48	0.70	0.02	0.32	0.49	0.06	0.05	0.05	0.05

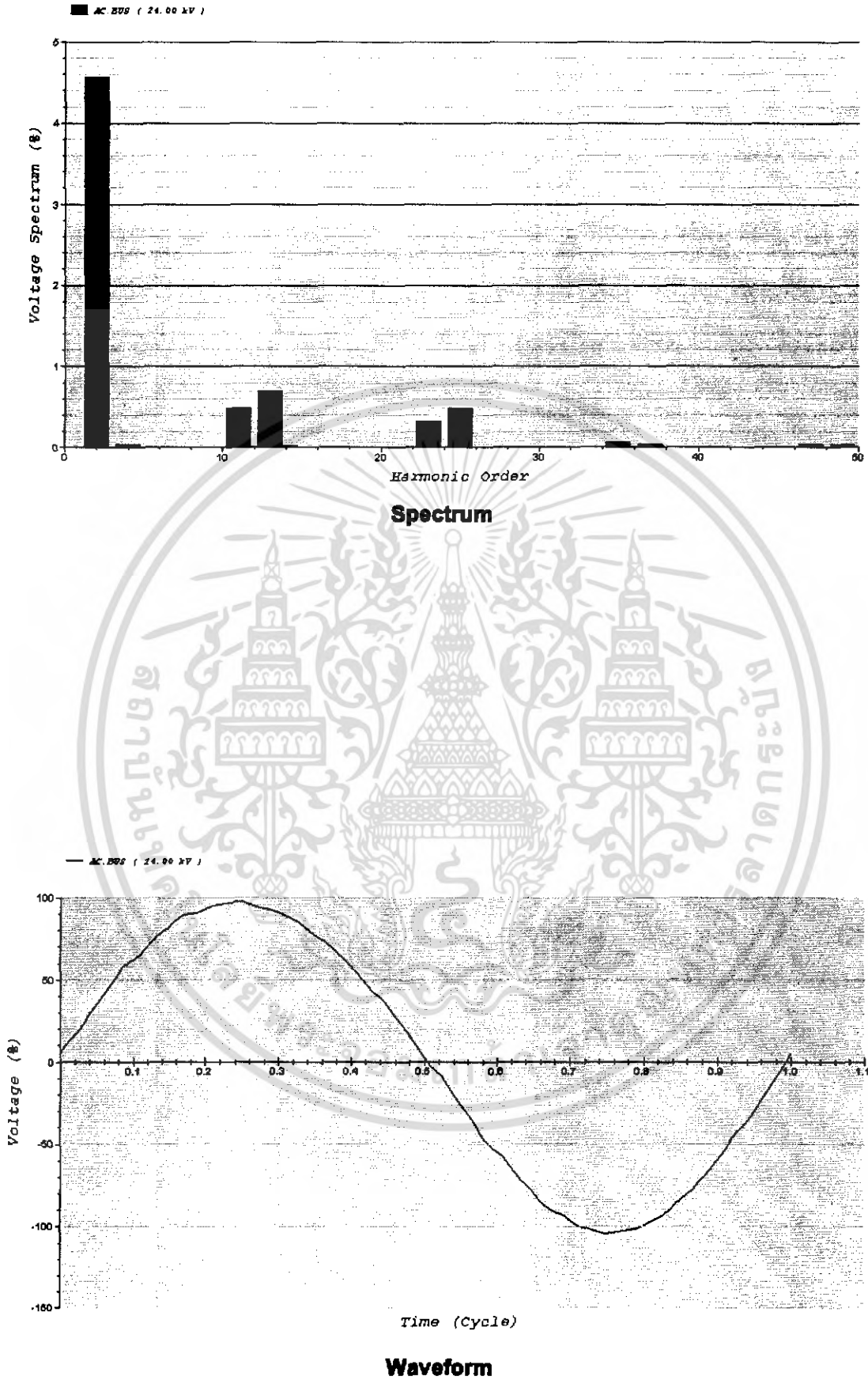
∴ ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคี่ (%) = 1.04

ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคู่ (%) = 4.56



รูปที่ 6.30 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 93 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.31 ผลของ Spectrum และWaveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 93 %
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.10 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 94 %

นำค่าจากการคำนวณต่างๆ ที่ได้จากบทที่ 3 มาใส่ลงในพารามิเตอร์ของวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดังรูปที่ 6.32 และทำการ Simulation ได้ผลตามตารางที่ 6.12

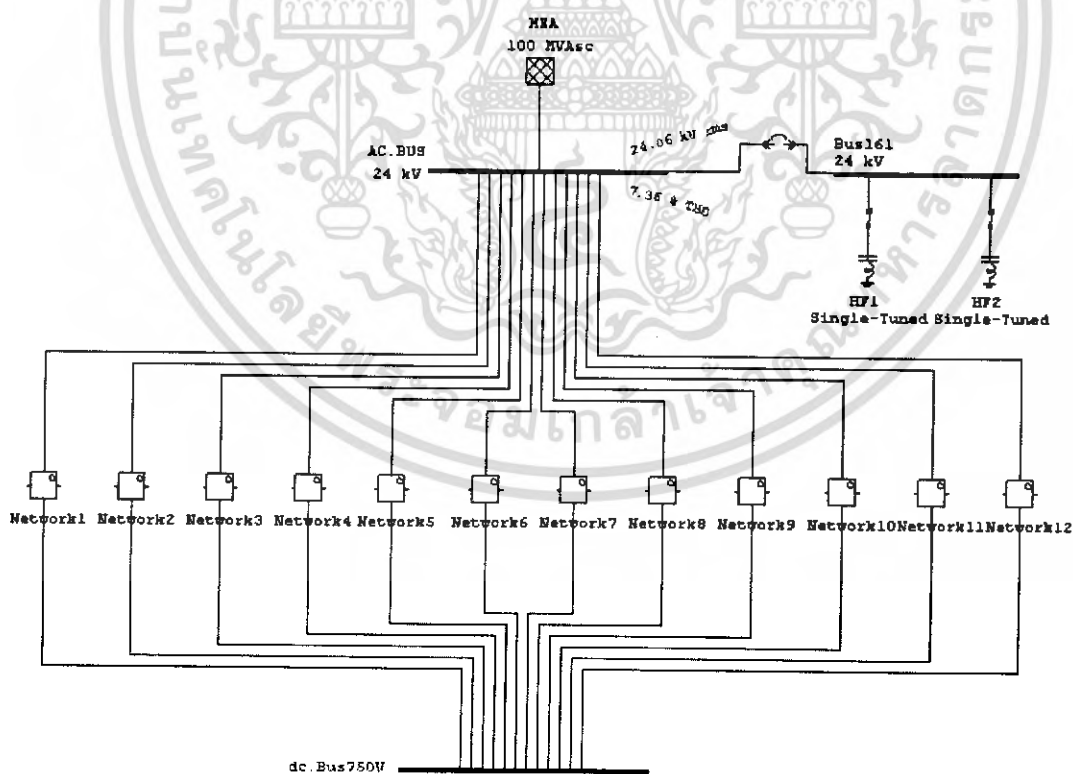
ตารางที่ 6.12 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.94 %

	% P.F.	% THDv	S (MVA)	P (MW)	Q (MVar)	V_{rms} (kV)
Before	83.24	33.93	32	26.63	17.73	25.34
After	94	7.36	28.34	26.64	-6.99	24.06

	Harmonic Voltage (% of Fundamental Voltage)												
	2	4	8	10	11	13	14	23	25	35	37	47	49
Before	0.43	0.13	0.17	0.07	23.33	21.56	0.45	6.52	9.79	1.23	0.91	0.96	0.96
After	7.30	0.03	0	0	0.44	0.63	0.01	0.29	0.44	0.06	0.04	0.04	0.04

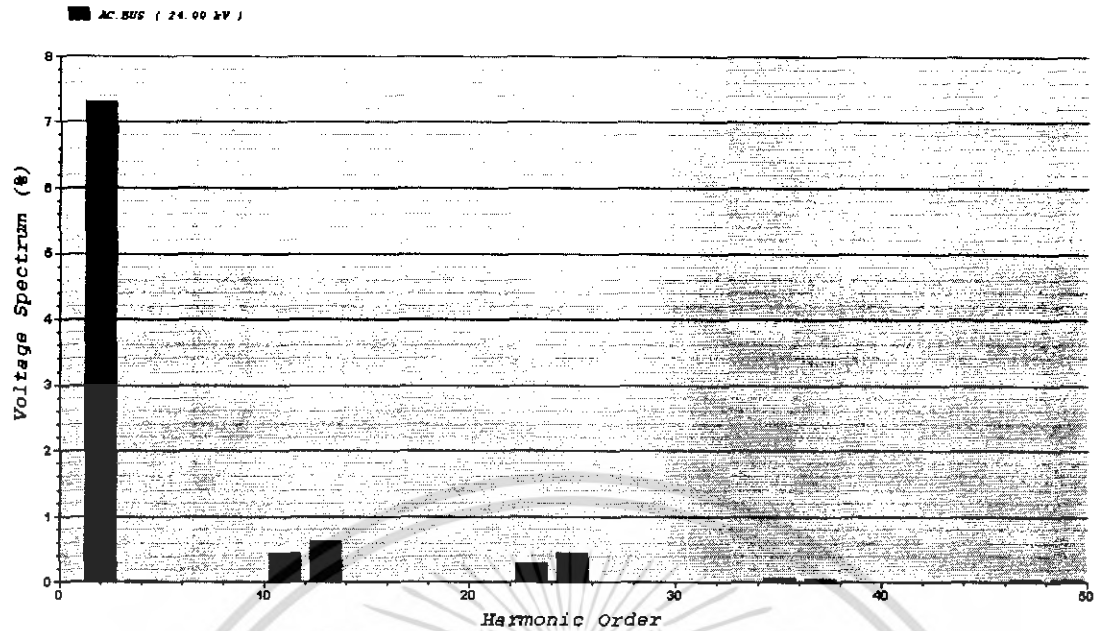
∴ ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับที่ (%) = 0.94

ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคู่ (%) = 7.3

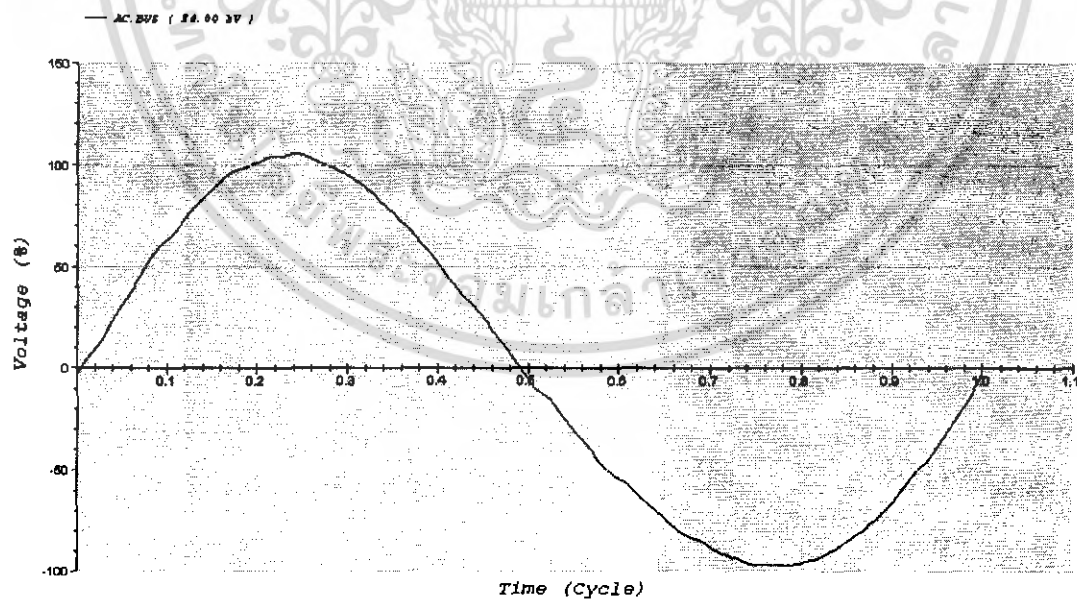


รูปที่ 6.32 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 94 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Spectrum



Waveform

รูปที่ 6.33 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 94 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.11 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 95 %

นำค่าจากการคำนวณต่างๆ ที่ได้จากบทที่ 3 มาใส่ลงในพารามิเตอร์ของวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดังรูปที่ 6.34 และทำการ Simulation ได้ผลตามตารางที่ 6.13

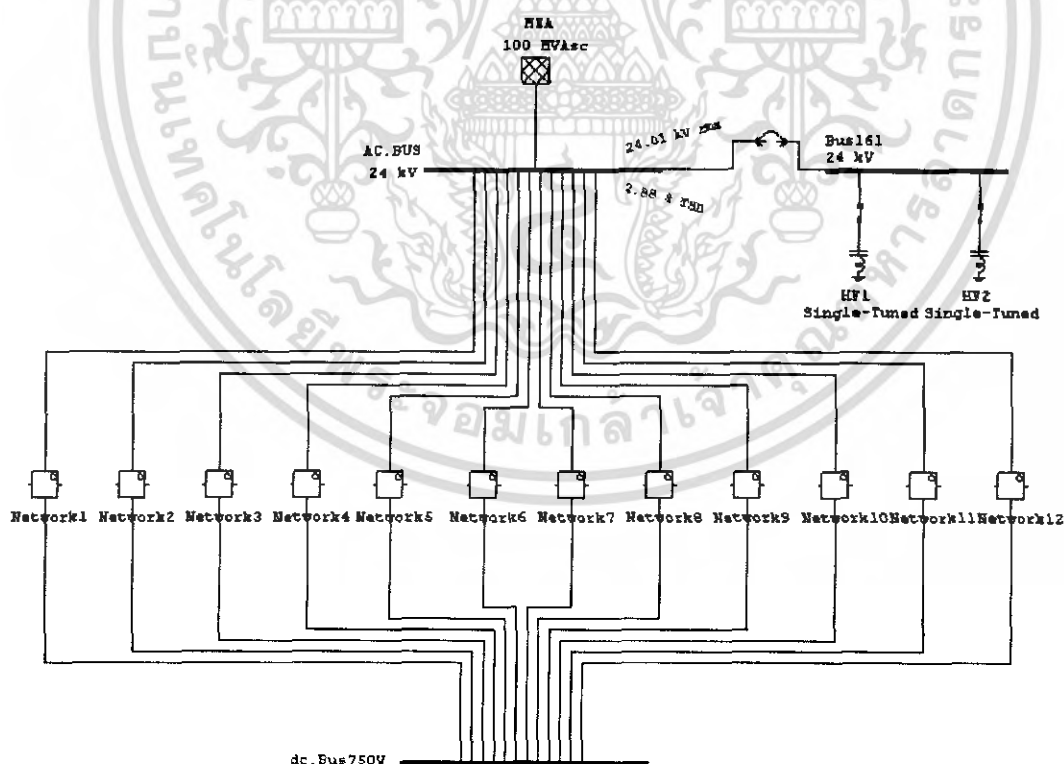
ตารางที่ 6.13 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.95 %

	% P.F.	% THDv	S (MVA)	P (MW)	Q (MVar)	V_{rms} (kV)
Before	83.24	33.93	32	26.63	17.73	25.34
After	95	2.88	28.04	26.64	-9.81	24.01

	Harmonic Voltage (% of Fundamental Voltage)												
	2	4	8	10	11	13	14	23	25	35	37	47	49
Before	0.43	0.13	0.17	0.07	23.33	21.56	0.45	6.52	9.79	1.23	0.91	0.96	0.96
After	2.76	0.03	0	0	0.38	0.56	0.01	0.26	0.39	0.05	0.04	0.04	0.04

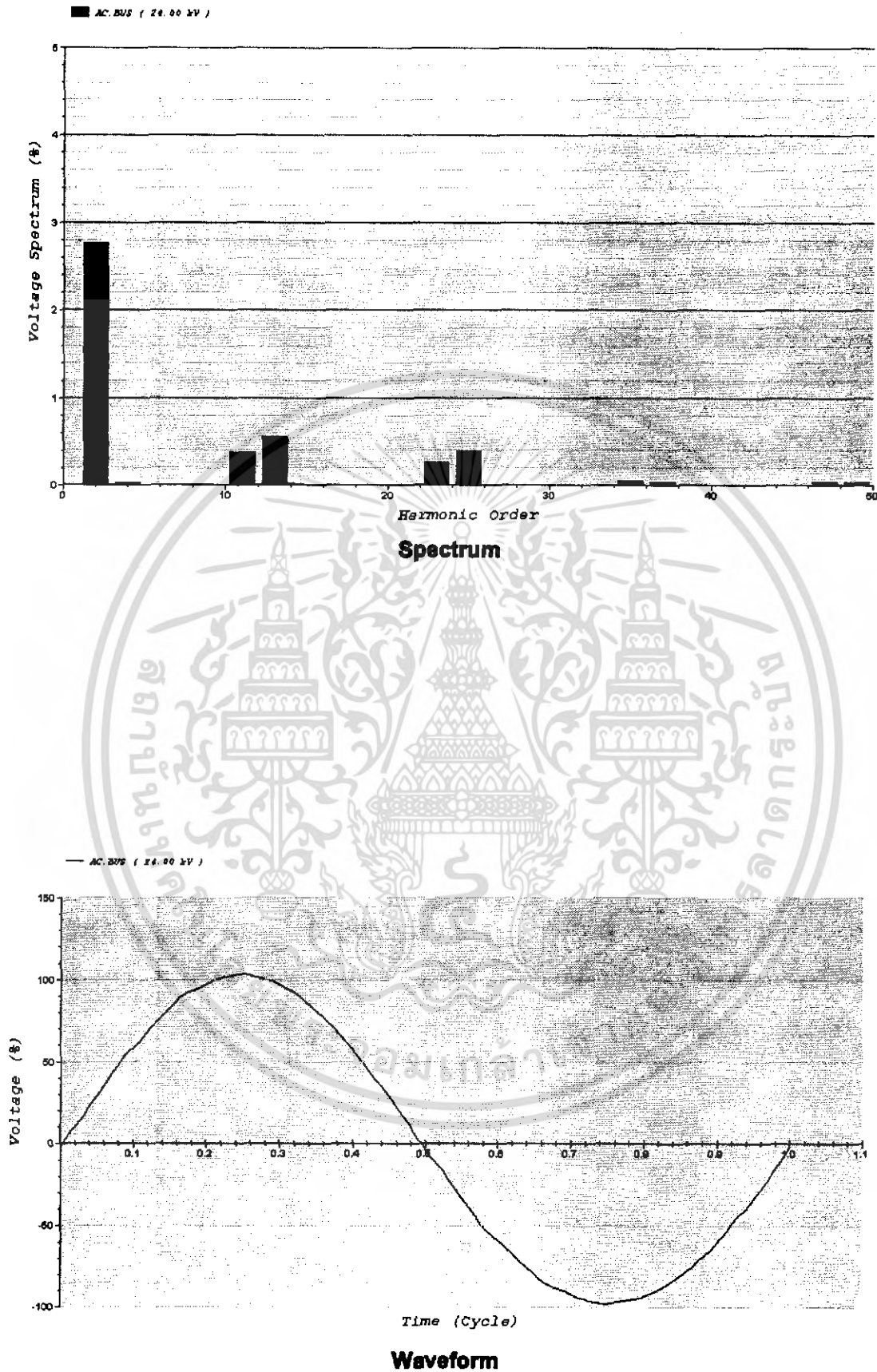
∴ ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคี่ (%) = 0.83

ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคู่ (%) = 2.76



รูปที่ 6.34 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 95 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.35 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 95 % เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.12 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 96 %

นำค่าจากการคำนวณต่างๆ ที่ได้จากบทที่ 3 มาใส่ลงในพารามิเตอร์ของวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดังรูปที่ 6.36 และทำการ Simulation ได้ผลตามตารางที่ 6.14

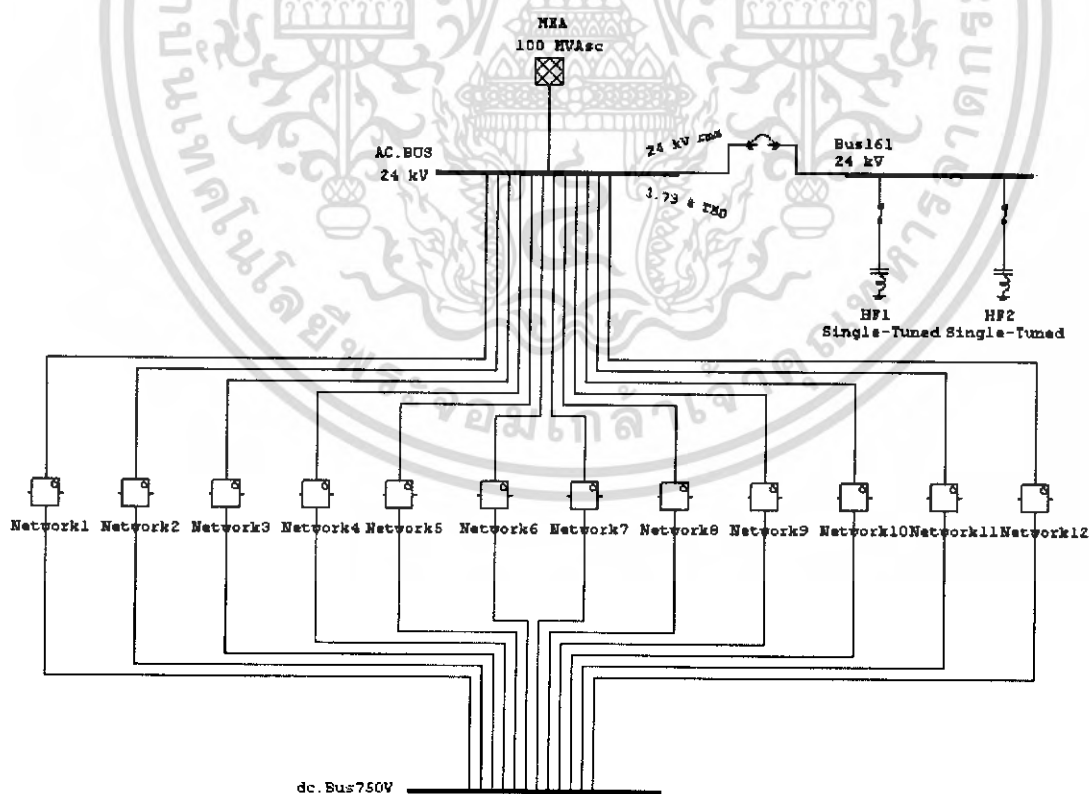
ตารางที่ 6.14 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.96 %

	% P.F.	% THDv	S (MVA)	P (MW)	Q (MVar)	V_{rms} (kV)
Before	83.24	33.93	32	26.63	17.73	25.34
After	96	1.73	27.75	26.64	-12.81	24

	Harmonic Voltage (% of Fundamental Voltage)												
	2	4	8	10	11	13	14	23	25	35	37	47	49
Before	0.43	0.13	0.17	0.07	23.33	21.56	0.45	6.52	9.79	1.23	0.91	0.96	0.96
After	1.55	0.02	0	0	0.35	0.51	0.01	0.23	0.36	0.05	0.03	0.03	0.03

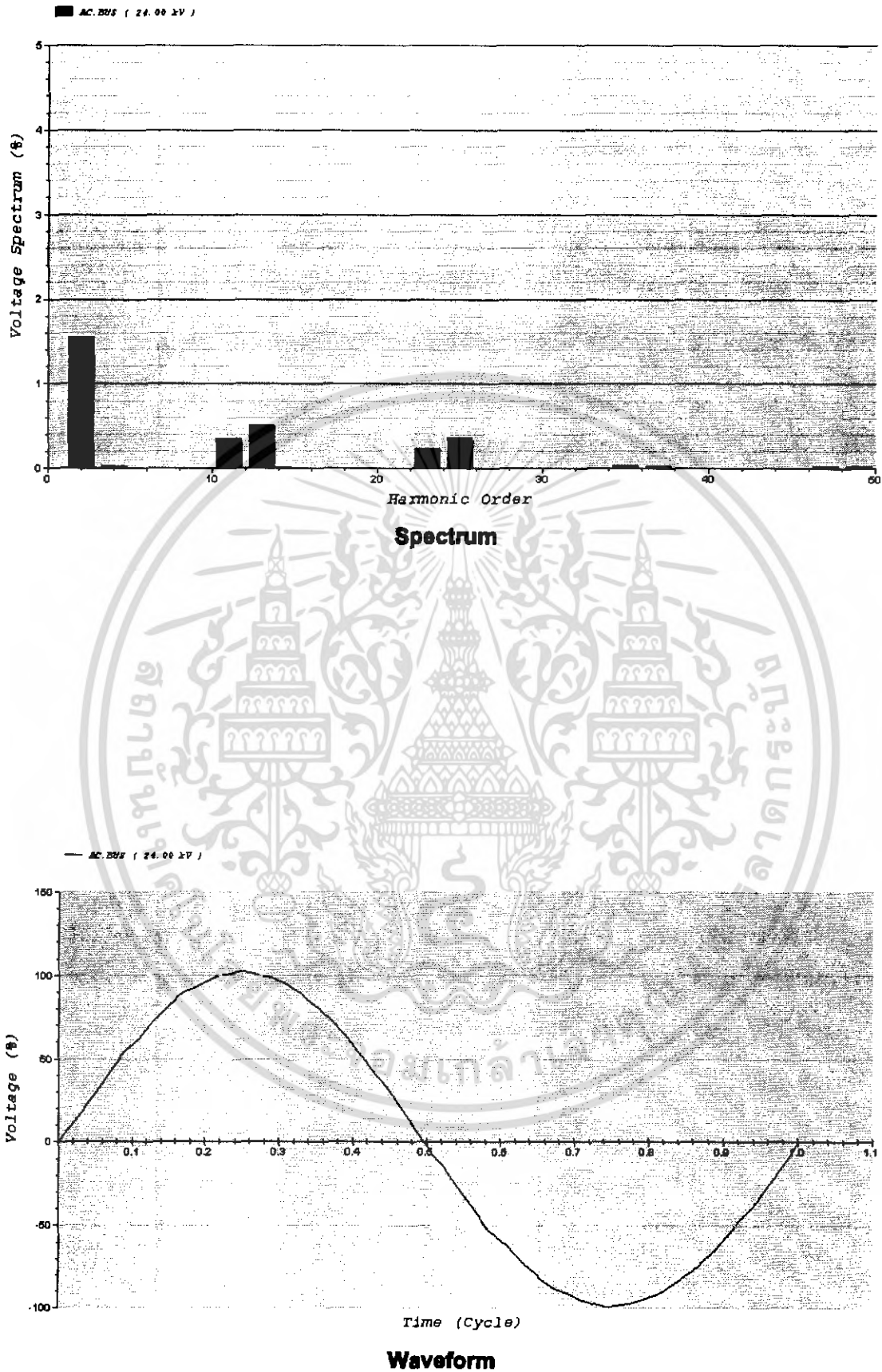
∴ ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคี่ (%) = 0.75

ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคู่ (%) = 1.55



รูปที่ 6.36 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 96 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.37 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 96 %
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.13 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 97 %

นำค่าจากการคำนวณต่างๆ ที่ได้จากบทที่ 3 มาใส่ลงในพารามิเตอร์ของวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดังรูปที่ 6.38 และทำการ Simulation ได้ผลตามตารางที่ 6.15

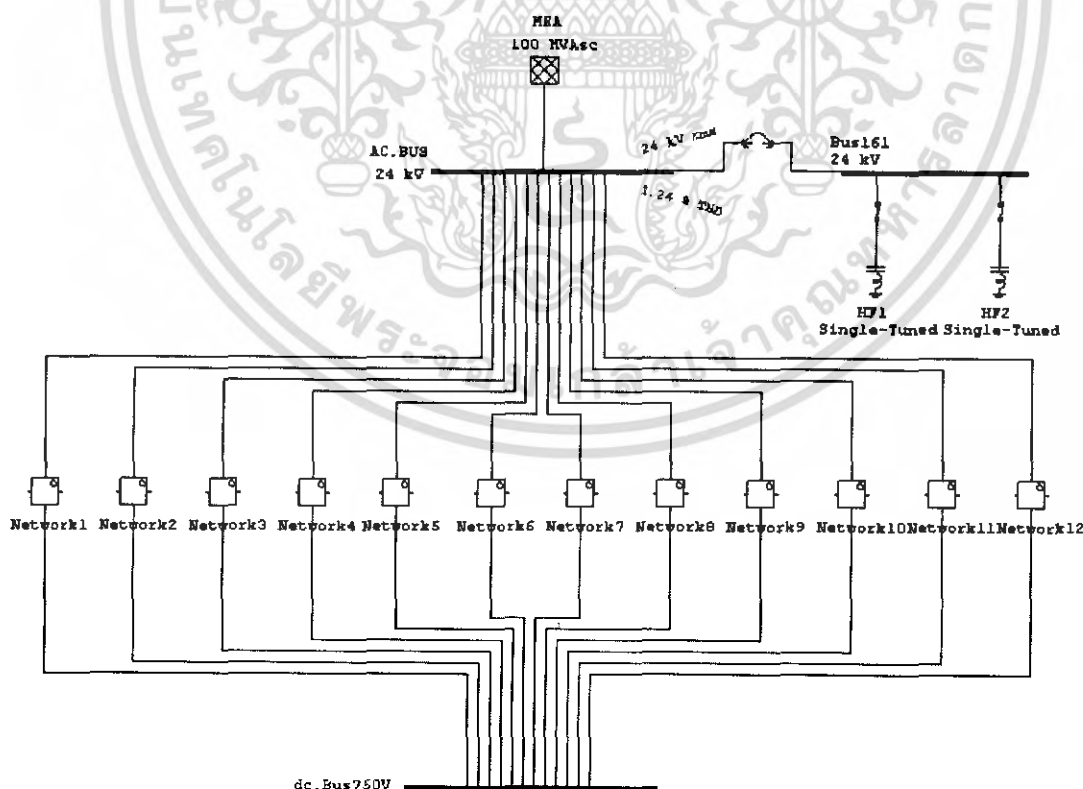
ตารางที่ 6.15 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.97 %

	% P.F.	% THDv	S (MVA)	P (MW)	Q (MVar)	V_{rms} (kV)
Before	83.24	33.93	32	26.63	17.73	25.34
After	97	1.24	27.46	26.64	-16.18	24

	Harmonic Voltage (% of Fundamental Voltage)												
	2	4	8	10	11	13	14	23	25	35	37	47	49
Before	0.43	0.13	0.17	0.07	23.33	21.56	0.45	6.52	9.79	1.23	0.91	0.96	0.96
After	1.03	0.02	0	0	0.32	0.46	0.01	0.21	0.32	0.04	0.03	0.03	0.03

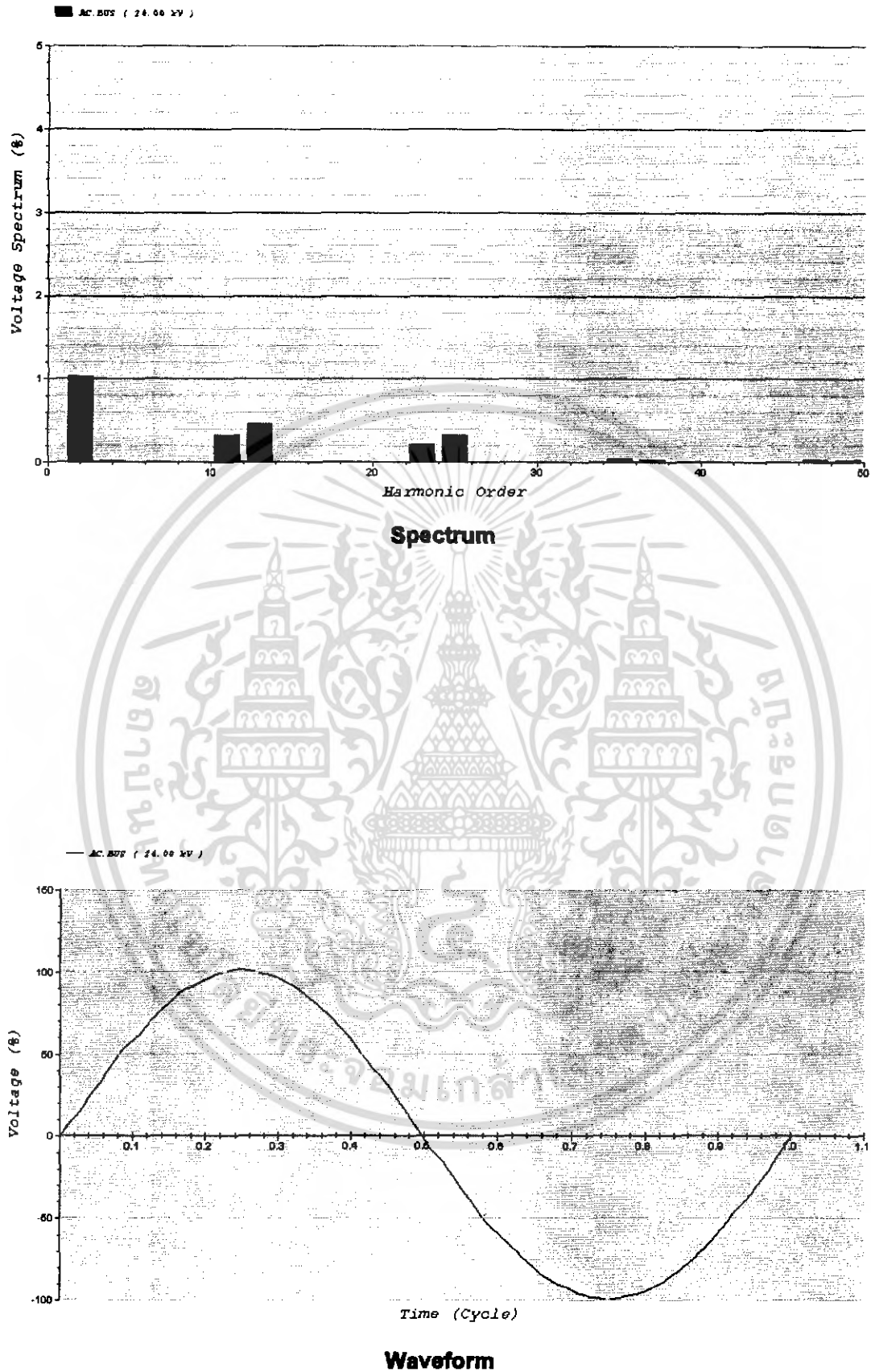
∴ ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคี่ (%) = 0.68

ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคู่ (%) = 1.03



รูปที่ 6.38 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 97 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.39 ผลของ Spectrum และWaveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 97 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.14 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 98 %

นำค่าจากการคำนวณต่างๆ ที่ได้จากบทที่ 3 มาใส่ลงในพารามิเตอร์ของวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดังรูปที่ 6.40 และทำการ Simulation ได้ผลตามตารางที่ 6.16

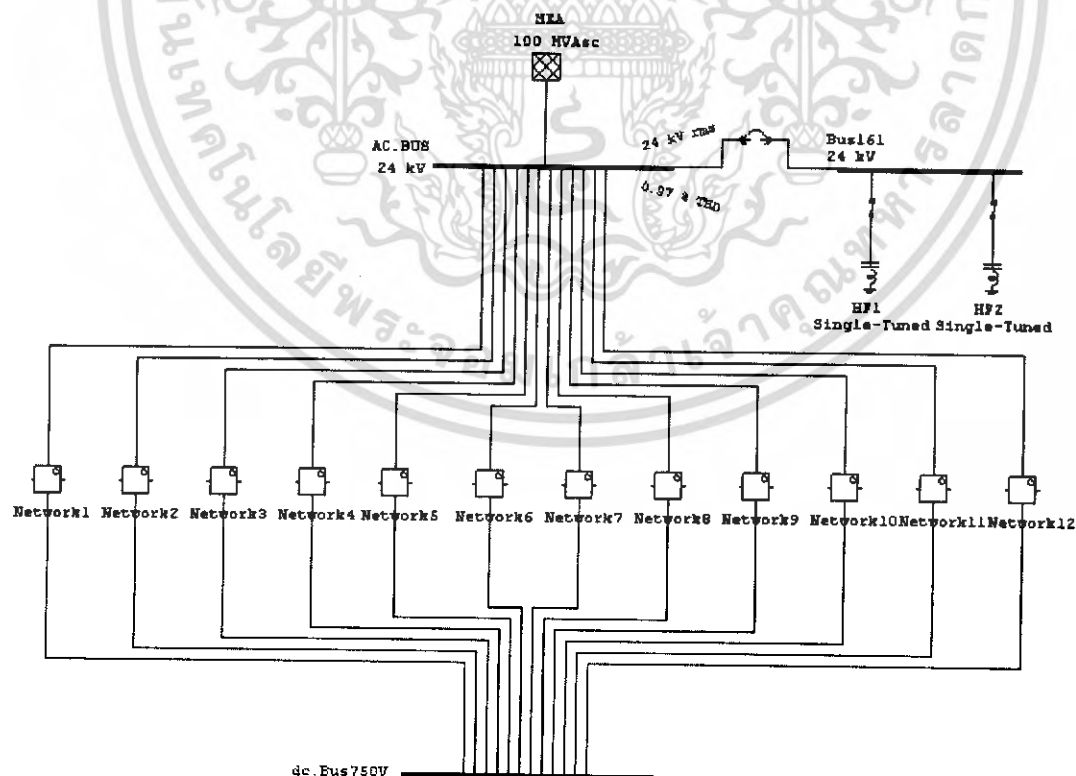
ตารางที่ 6.16 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.98 %

	% P.F.	% THDv	S (MVA)	P (MW)	Q (MVar)	V_{rms} (kV)
Before	83.24	33.93	32	26.63	17.73	25.34
After	98	0.97	27.18	26.64	-20.05	24

	Harmonic Voltage (% of Fundamental Voltage)												
	2	4	8	10	11	13	14	23	25	35	37	47	49
Before	0.43	0.13	0.17	0.07	23.33	21.56	0.45	6.52	9.79	1.23	0.91	0.96	0.96
After	0.75	0.02	0	0	0.29	0.41	0.01	0.19	0.29	0.04	0.03	0.03	0.03

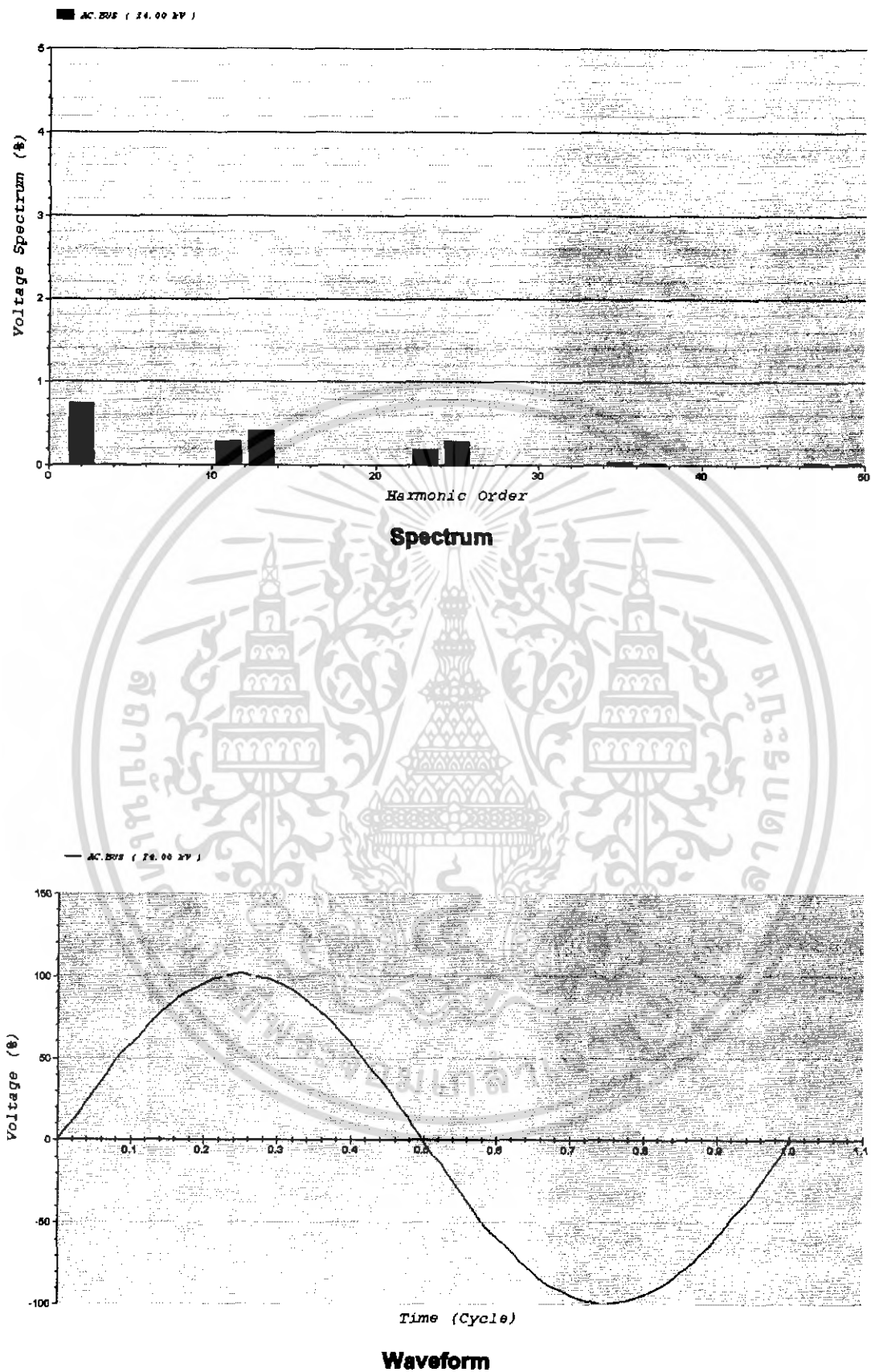
∴ ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับที่ (%) = 0.61

ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคู่ (%) = 0.75



รูปที่ 6.40 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 98 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.41 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 98 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.15 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 99 %

นำค่าจากการคำนวณต่างๆ ที่ได้จากบทที่ 3 มาใส่ลงในพารามิเตอร์ของวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดังรูปที่ 6.42 และทำการ Simulation ได้ผลตามตารางที่ 6.17

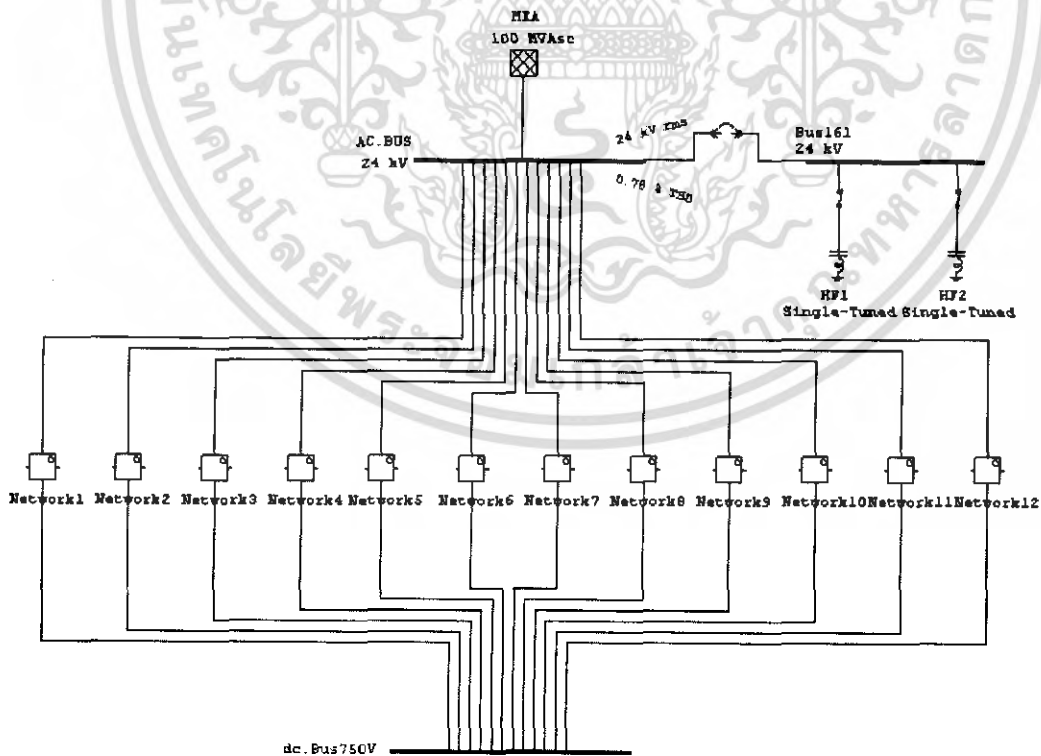
ตารางที่ 6.17 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.99 %

	% P.F.	% THDv	S (MVA)	P (MW)	Q (MVar)	V_{rms} (kV)
Before	83.24	33.93	32	26.63	17.73	25.34
After	99	0.78	26.91	26.64	-25.02	24

	Harmonic Voltage (% of Fundamental Voltage)												
	2	4	8	10	11	13	14	23	25	35	37	47	49
Before	0.43	0.13	0.17	0.07	23.33	21.56	0.45	6.52	9.79	1.23	0.91	0.96	0.96
After	0.55	0.02	0	0	0.25	0.37	0.01	0.17	0.26	0.03	0.02	0.02	0.02

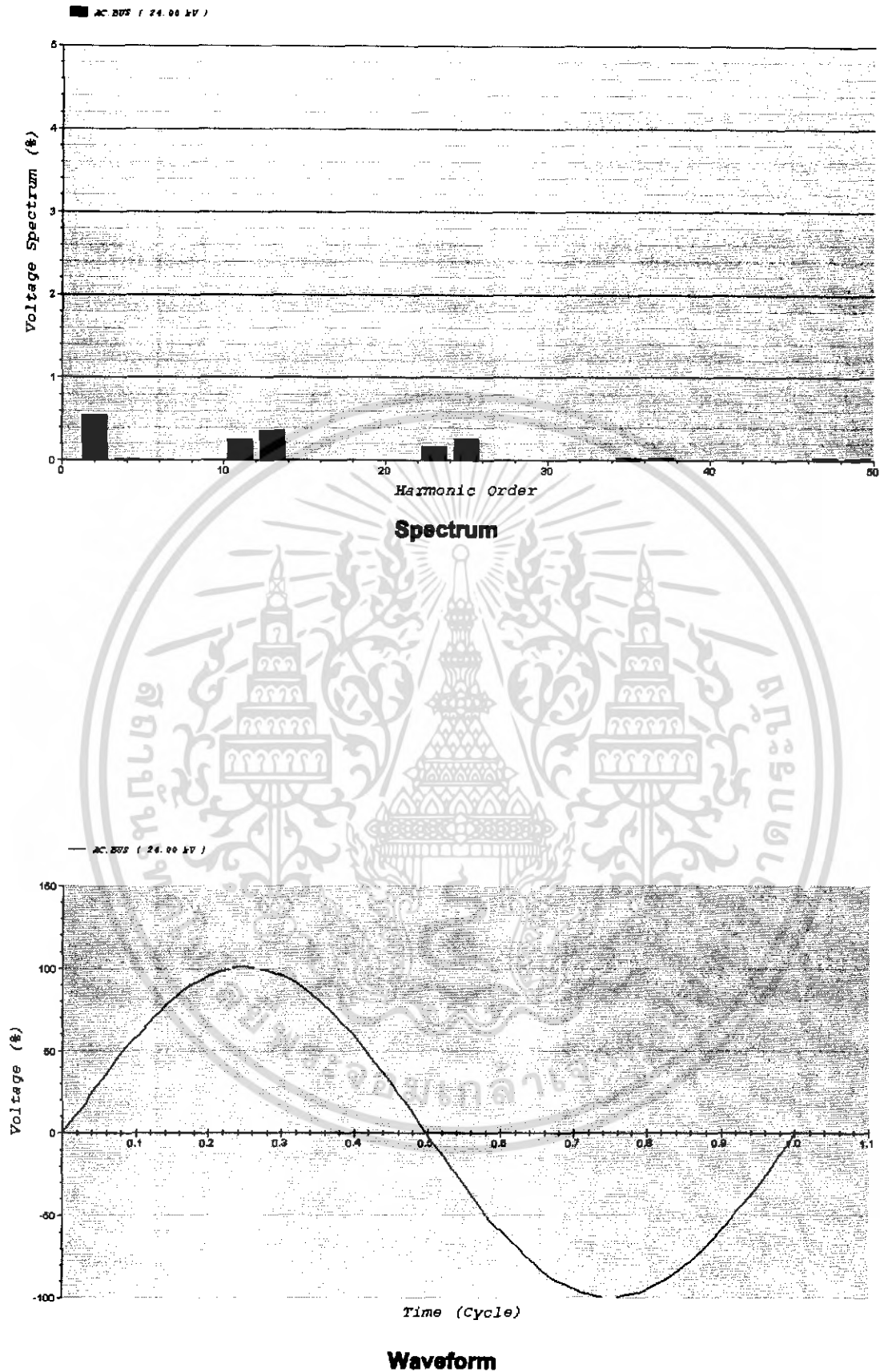
∴ ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับที่ (%) = 0.54

ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับคู่ (%) = 0.55



รูปที่ 6.42 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 99 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.43 ผลของ Spectrum และ Waveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 99 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.16 ผลการแก้โดยกำหนดค่า P.F. ที่ 100 %

นำค่าจากการคำนวณต่างๆ ที่ได้จากบทที่ 3 มาใส่ลงในพารามิเตอร์ของวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดังรูปที่ 6.44 และทำการ Simulation ได้ผลตามตารางที่ 6.18

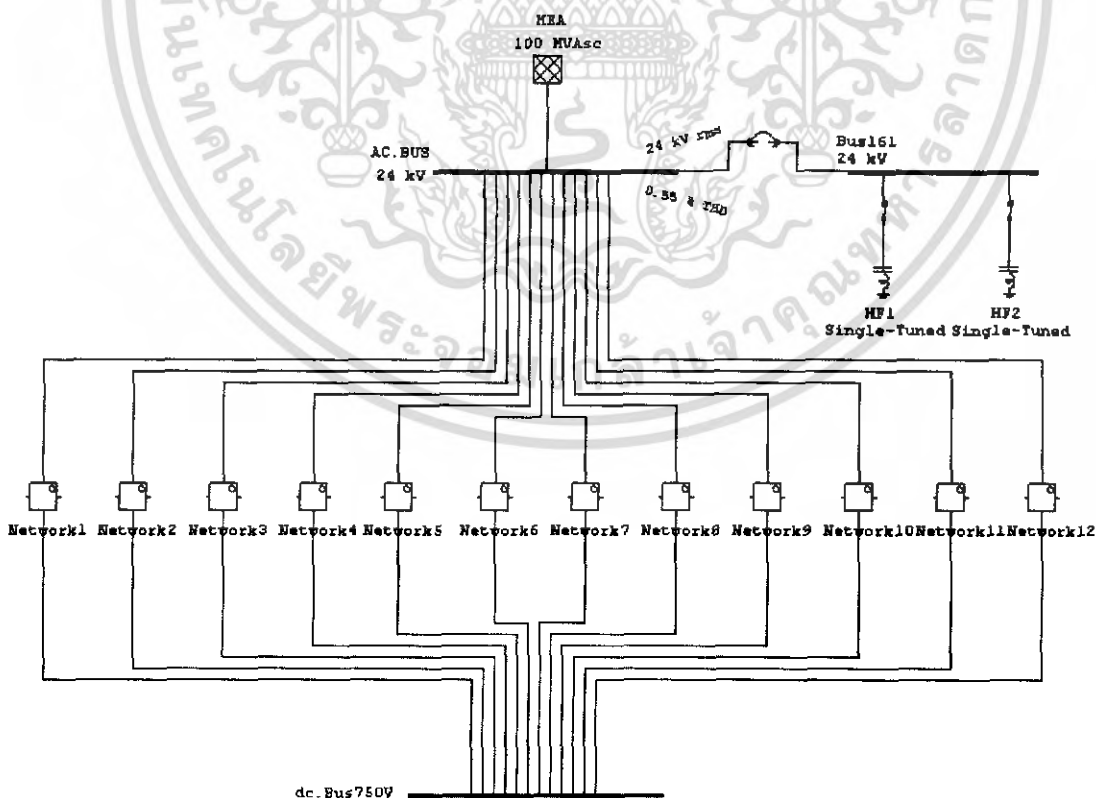
ตารางที่ 6.18 แสดงผลการ Simulation แก่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่ P.F.100 %

	% P.F.	% THDv	S (MVA)	P (MW)	Q (MVar)	V_{rms} (kV)
Before	83.24	33.93	32	26.63	17.73	25.34
After	100	0.55	26.65	26.65	-36.64	24

	Harmonic Voltage (% of Fundamental Voltage)												
	2	4	8	10	11	13	14	23	25	35	37	47	49
Before	0.43	0.13	0.17	0.07	23.33	21.56	0.45	6.52	9.79	1.23	0.91	0.96	0.96
After	0.34	0.01	0	0	0.20	0.29	0.01	0.13	0.20	0.03	0.02	0.02	0.02

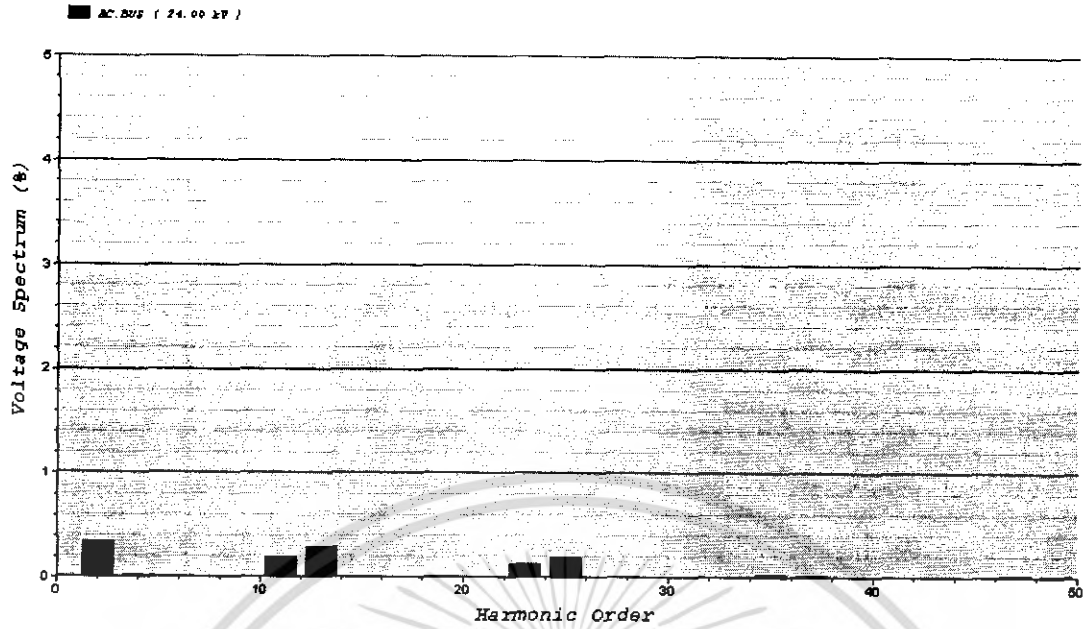
∴ ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับที่ 2 (%) = 0.43

ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ของแรงดันอันดับที่ 4 (%) = 0.34

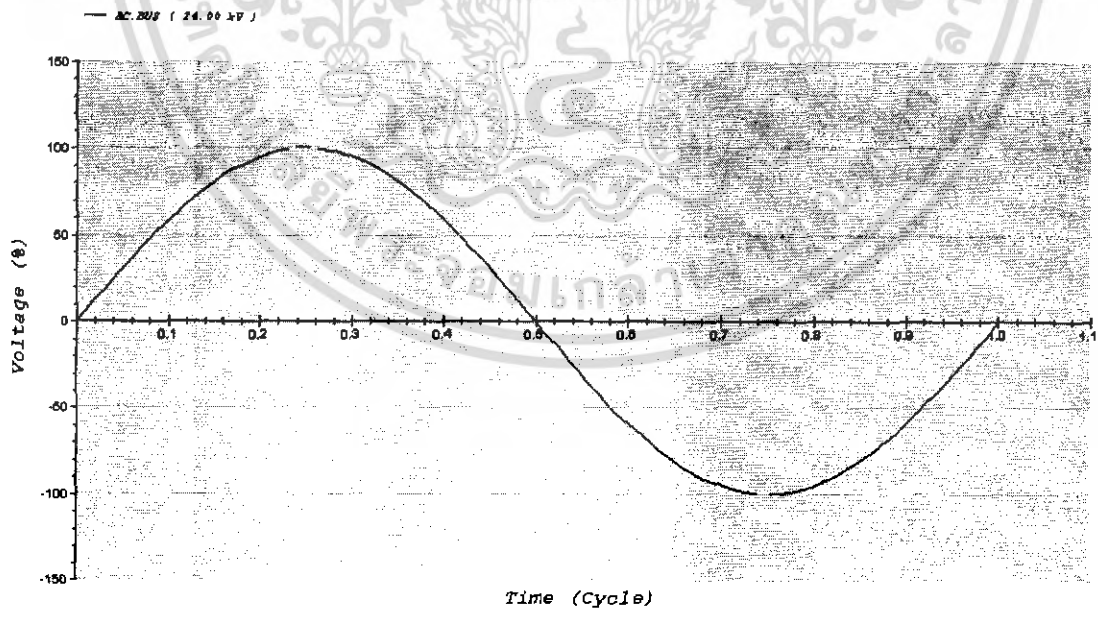


รูปที่ 6.44 One-Line Diagram 12 Traction พร้อมวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 100 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Spectrum



Waveform

รูปที่ 6.45 ผลของ Spectrum และWaveform โดยผ่านการกรองฮาร์โมนิกส์ที่ P.F. = 100 %
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 เปรียบเทียบผลการทดลอง

ตารางที่ 6.19 ตารางเปรียบเทียบผลการทดลอง

Power Factor (% P.F.)	ค่าความเพี้ยน (% THDv)	ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกซ์ของ แรงดันแต่ละอันดับ (%)	
		อันดับสี่	อันดับคู่
83.24	33.93	33.92	0.66
85	5.18	5.12	0.74
86	3.63	3.53	0.85
87	2.75	2.66	0.68
88	2.27	2.13	0.76
89	1.99	1.78	0.90
90	1.87	1.49	1.11
91	1.99	1.32	1.49
92	2.55	1.16	2.27
93	4.68	1.04	4.56
94	7.36	0.94	7.3
95	2.88	0.83	2.76
96	1.73	0.75	1.55
97	1.24	0.68	1.03
98	0.97	0.61	0.75
99	0.78	0.54	0.55
100	0.55	0.43	0.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ในปฏิญญาฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการชดเชยกำลังรีแอกทีฟและการกรองกระแสฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้าของรถไฟฟ้า ซึ่งข้อมูลระบบไฟฟ้าที่ใช้ประกอบในการทำปฏิญญาฉบับนี้ ได้รับการอนุเคราะห์ข้อมูลจากบริษัทระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพจำกัด (มหาชน) ซึ่งจะใช้ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกชนิดกรองเดี่ยว (Single Tune) มาทำการกรองกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นคือ กระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 11 และ 13 ให้มีค่าลดลงจากการกำหนดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) ตามที่ต้องการ โดยการจำลองผลการทดลองด้วยโปรแกรม ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้นั้น จะได้มาโดยการกำหนดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) ตามที่ต้องการคือ ตั้งแต่ 85% (ค่ามาตรฐานที่การไฟฟ้ายินยอม) ถึง 100% โดยทำการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) ครั้งละ 1% ซึ่งพบว่าค่าตัวประกอบกำลังบางค่าจะไม่สามารถนำมาใช้งานได้ เนื่องจาก %THDv (Total Harmonic Distortion Voltage) นั้นไม่ผ่านข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์โมนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจอุตสาหกรรม ซึ่งจัดทำโดยคณะกรรมการปรับปรุงความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า ซึ่งประกอบไปด้วย การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) และการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) ซึ่งจะส่งผลให้มีการเสียค่าปรับให้กับการไฟฟ้า เนื่องจากค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) ไม่ถึง 85 %

จากความสามารถของตัวโปรแกรมที่ไม่มีข้อจำกัด ในด้านการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกเพื่อจำกัดกระแสฮาร์โมนิกที่ไหลในระบบ กล่าวได้คือเมื่อตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีค่าสูง จะทำให้การติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกไม่ประสบปัญหา เนื่องจากค่ากำลังรีแอกทีฟที่ต้องใช้ในระบบจะมีค่าน้อยมากทำให้ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกต้องรับกระแสฮาร์โมนิกที่ไหลเข้ามาในตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกมาก ซึ่งจะทำให้ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกทำงานเกินกำลังซึ่งในทางปฏิบัติอาจจะใช้ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกแบบพาสซีฟทำงานร่วมกับตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกแบบแอกทีฟ เพื่อเป็นการขจัดปัญหาที่จะเกิดขึ้นจากการใช้งานของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกชนิดกรองเดี่ยว (Single Tune) ผลการทดลองที่ได้จากโปรแกรม ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) นั้นสามารถนำไปเป็นแนวทางในการออกแบบในทางปฏิบัติจริงได้

จากการกำหนดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) ตามที่ต้องการจะทำให้ได้ค่าตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกชนิดกรองเดี่ยว (Single Tune) เป็นเพียงในทางอุดมคติเท่านั้น ซึ่งในทางปฏิบัตินั้น การที่จะหาค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุได้ตามที่ต้องการโดยจากการคำนวณนั้น เป็นเรื่องที่ยากหรืออาจจะสามารถทำได้ แต่ต้นทุนในการสั่งทำนั้นมีค่าสูง เนื่องจากการทำนั้นเป็นการสั่งทำขึ้นเป็นกรณีพิเศษนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นเพื่อเป็นการที่จะพัฒนาแนวความคิดที่จะทำการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ชนิดกรองเดี่ยว (Single Tune) ให้สามารถใช้งานได้จริง ควรจะได้มีการตรวจสอบข้อมูลในเรื่องของราคาตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุตามท้องตลาด แล้วจึงนำข้อมูลของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ มาทำการคำนวณใหม่ว่าตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ได้นั้นทำให้ระบบไฟฟ้าที่ใช้งานมีตัวประกอบกำลังตามที่ต้องการมากน้อยเพียงใด และจะเหมาะสมกับการใช้งานหรือไม่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] V.E Wagner and etal, " Effects of Harmonics on Equipment ," **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol.8, No.2, April 1993, pp. 672-680.
- [2] " IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control Power System ," **IEEE Std 519**, 1992.
- [3] IEC Publication prepared by Technical Committee " Part 2 : Harmonics ," **IEC Std 555-1**, No.7, 1982.
- [4] " Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents ," **ANSI / IEEE Std C57.110**, 1986.
- [5] " Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters," **IEEE 519**, 1981
- [6] Jens-Onno Krah and Joachim Holtz, " Total Compensation of Line-Side Switching Harmonics in Converter-Fed AC Locomotives ," **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol.31, No.6, November/December 1995, pp. 1264-1273.
- [7] Bimimal K. Bose, **Tower Electronics and AC Drive**, Englewood Cliffs : Prentice-Hall,1986
- [8] "Shunt capasitor for a.c. power system having a rated voltage above 1000 V Part1:General performance , testing and rating – Safety requirements – Guide for installation and operation," **IEC 60831-1**, 10,1997.
- [9] "ANSI/IEEE Standard for Shunt Power Capasitor," **ANSI/IEEE Standard**, 18,1992.
- [10] J.Arrillage, D.A. Bradley, and P.S. Bodger, **Power System Harmonic**, Norwich : John Wiley & Sons, 1985.
- [11] Robert A., Deflandre T., and Working group CC02, "Guide for Assess the Network Harmonic Impedance." **ELECTRA**, No. 16,1996.
- [12] "IEC1000 Electromagnetic Compatibility (EMC).Part2:Enviroment Section6:Assessment of the emission level in the power supply of industrial plants as regards low-frequency conducted disturbances," **IEC Standard 1000-2-6**,1995.
- [13] ชีรภัทร พัฒนานิติ, บรรดิษฐ์ อินทร์ใหญ่ และ ฤทธิชัย ภูภิรมย์, " การวิเคราะห์และการแก้ปัญหาฮาร์มอนิก,"**ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2538.
- [14] **ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์โมนิกส์เกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม**, คณะกรรมการปรับปรุงความน่าเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า, 2541.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้