

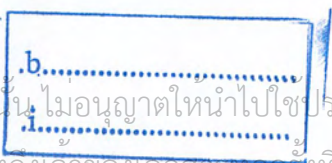
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาและออกแบบพาสซีฟฟิลเตอร์
A STUDY AND DESIGN OF PASSIVE FILTER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2545

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....49896
วันเดือนปี= 2...3...2547



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2545

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาและออกแบบพาสซีฟฟิลเตอร์

A STUDY AND DESIGN OF PASSIVE FILTER

ผู้จัดทำ

1. นายบัญญัติ รักษายฤทธิ รหัสประจำตัว 43015120
2. นายอภิชัย บุญเรือง รหัสประจำตัว 43015147
3. นายชัชชนันต์ โชติกะ รหัสประจำตัว 43015160
4. นายประกาศ เพชรพงศ์ รหัสประจำตัว 43015169



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ประภษา ไพรสวรรณา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาและออกแบบพาสซีฟฟิลเตอร์

นายบัญญัติ รักสายฤทธิ์ 43015120

นายอภิชัย บุญเรือง 43015147

นายชัชชนันต์ โชติกะ 43015160

นายประกาศ เพชรพงศ์ 43015169

รศ.ประภาส ไพรสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2545

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ นำเสนอการแก้ปัญหาความผิดเพี้ยนของสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากฮาร์มอนิกโดยการใช้วงจรกรองแบบพาสซีฟมาต่อขนานในวงจรเป็นจูนไฟลเตอร์ เพื่อกรองฮาร์มอนิกออกจากระบบซึ่งเป็นพาสซีฟฟิลเตอร์แก้ปัญหาไฟฟ้าแรงดันขนาด 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต มีวงจรเฟสคอนโทรลขนาด 500 วัตต์ 220 โวลต์ เป็นตัวกำเนิดสัญญาณขึ้นมาในระบบ ประกอบไปด้วยฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ซึ่งจะกรองฮาร์มอนิกที่เริ่มมีผลกระทบต่อระบบคือ 3,5,7 เป็นต้น ในส่วนหลักการทำงานอาศัยหลักการที่ว่า ตัวฟิลเตอร์มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำที่ความถี่จะกรอง และอิมพีแดนซ์สูงที่ความถี่ใช้งาน (50 เฮิร์ต) เพื่อจะให้กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านฟิลเตอร์ได้ ผลจากการศึกษาทำตัวกรองแบบพาสซีฟจะทำให้ลดฮาร์มอนิกจากชุดจำลอง เป็นค่า THD 3-5 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังศึกษาวงจรดีจูนฟิลเตอร์ที่สถานะเรโซแนนซ์อีกด้วย

A STUDY AND DESIGN OF PASSIVE FILTER

Banyad Raksairit 43015120

Apichai Boonruang 43015147

Chatchanan Chotika 43015160

Prakat Peadpong 43015169

Assoc.Prof.Prapat Prisuwana Advisor

2002

ABSTRACT

This thesis presents the solution for electrical signal distortion generated from harmonic by using passive filter circuit which parallel in the circuit to become the tune filter in order to filter harmonic from the system. The use of passive filter for solving 50 Hz low voltage at 220 V has been performed. Also, at the rate of 500 w and 200 v , a phase control circuit which generates the signal in the system consisting of various orders of harmonic is included. The passive filter is used to filter harmonic of order that effect the system . Such orders are the 3rd, 5th, 7th order ,etc. The operation uses the principle of low impedance filter at such order and high impedance filter at fundamental frequency (50Hz) for which the harmonic of current passes though the filter. From the result , by applying passive filter , the harmonic of the prototype is reduced and %THD₁ = 3-5% . In addition , the detune filter circuit and resonant condition are studied , also.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการและปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ ลุล่วงได้ดี เพราะความร่วมมือเป็นน้ำหนึ่งใจเดียวกันของสมาชิกในกลุ่ม ซึ่งโครงการการศึกษาและออกแบบพาสซีฟฟิลเตอร์กว่าจะได้เนื้อหามาโครงการและเขียนปริญญาณิพนธ์ต้องเดินทางไปศึกษาหาข้อมูลนอกสถานที่ ครั้งแรกไปสัมภาษณ์เรื่องฮาร์มอนิกที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ครั้งที่สองไปศึกษาดูงานที่บริษัท เอบีบี ไทยแลนด์ได้รับความช่วยเหลือเรื่องข้อมูลจากพี่ คุณิต เลิศสวัสดิ์วิชาเป็นอย่างดี

ในส่วนข้อมูลที่มีอยู่จากปริญญาณิพนธ์ของรุ่นพี่ก็เป็นแนวทางในการศึกษา และ ทำโครงการตลอดจนหนังสือต่าง ๆ ที่ใช้ประกอบความรู้จากห้องสมุดซึ่งผู้จัดทำได้เขียนเป็นข้อมูลอ้างอิงไว้แล้วที่ขาดไม่ได้คือคำแนะนำจากรุ่น พี่ปริญญาโททุกท่าน ภาควิชาที่ให้ความสะดวกเรื่องอุปกรณ์เครื่องมือ รุ่นน้องทุกคนที่คอยถามความคืบหน้า ที่สำคัญคือคุณพ่อคุณแม่ของผู้จัดทำและผู้อยู่เบื้องหลังทุกท่าน

ที่สำคัญที่สุดในการที่จะทำให้โครงการสำเร็จได้นั้น ต้องมีอาจารย์ที่ปรึกษาคอยช่วยเหลือ และปรึกษาปัญหาต่าง ๆ ทางผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ สุรินทร์ คำฝอยเป็นอย่างยิ่งและอาจารย์ที่ปรึกษาคนสำคัญที่สุดคือ รศ.ประภาพร ไพรสุวรรณ

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขต	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 ศัพท์และปริมาณต่างๆ	4
2.2 ประเภทฮาร์มอนิก	6
2.3 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก	8
2.4 เรโซแนนซ์	12
2.5 ปัญหาเนื่องจากฮาร์มอนิก	14
2.6 แรงดันไฟฟ้าและกระแสเนื่องจากฮาร์มอนิกส์	14
2.7 การแก้ปัญหาระบบฮาร์มอนิก	15
2.8 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสมด้วยแกน EI	23
บทที่ 3 การคำนวณและการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก	32
3.1 ปัญหาระบบฮาร์มอนิกที่มีในระบบไฟฟ้า	32
3.2 ตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า	33
3.3 แนวคิดในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ	37
3.4 การออกแบบและคำนวณค่าส่วนประกอบของตัวกรองฮาร์มอนิก	38
3.5 การคำนวณค่าต่างๆ ในโครงงานนี้	40
3.6 การออกแบบคาร์รีแอกเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิก	45
3.7 การออกแบบการคำนวณโดยใช้โปรแกรม	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือสงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	78
4.1 การทดลอง	78
4.2 เปรียบเทียบผลการทดลองก่อนกับหลังกรอง	91
4.3 ผลการ Simulation ในโปรแกรม Orcad	95
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	99
5.1 วิจารณ์ผลการทดลอง	99
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางการแก้ไข	99
5.3 แนวทางในการดำเนินงานต่อไป	100

ภาคผนวก

บรรณานุกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงขอบเขตของโครงการ	2
รูปที่ 2.1 การต่อคาปาซิเตอร์ขนานเข้าไปในระบบ	5
รูปที่ 2.2 การควบคุมกระแสที่ไหลผ่าน โหลดแบบ Integral Cycle Control	7
รูปที่ 2.3 วงจรและสัญญาณของคอนเวอร์เตอร์ 3 เฟส 6 พัลส์	10
รูปที่ 2.4 วงจรและค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่างๆ	12
รูปที่ 2.5 ฟิวเตอร์เพื่อกำจัดฮาร์มอนิก	17
รูปที่ 2.6 การต่อพาสซีฟฟิวเตอร์ในระบบไฟฟ้า	18
รูปที่ 2.7 E-I Core Configuration	23
รูปที่ 2.8 Magnetic Circuit	24
รูปที่ 2.9 ขนาดแกนเหล็ก EI	26
รูปที่ 3.1 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ติดตั้งเก็บประจุในระบบ	32
รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดเดียว	34
รูปที่ 3.3 Flow chat แสดงแนวคิดในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก	37
รูปที่ 3.4 Diagram การทำงาน	47
รูปที่ 3.5 แอพพลีเคชัน from 1	69
รูปที่ 3.6 แอพพลีเคชัน from 2	69
รูปที่ 3.7 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ โหลด Harmonic	70
รูปที่ 3.8 แสดงค่าผลการทดสอบ	71
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายการต่อชุดทดสอบ	78
รูปที่ 4.2 รูปคลื่นของแรงดันก่อนกรอง	79
รูปที่ 4.3 รูปคลื่นของกระแสก่อนกรอง	80
รูปที่ 4.4 รูป Power ก่อนกรอง	80
รูปที่ 4.5 รูปสเปกตรัมฮาร์มอนิกก่อนกรอง	81
รูปที่ 4.6 รูปคลื่นของแรงดันเมื่อใส่ไลเนอร์แอกเตอร์	82
รูปที่ 4.7 รูปคลื่นของกระแสเมื่อใส่ไลเนอร์แอกเตอร์	82
รูปที่ 4.8 รูป Power เมื่อใส่ไลเนอร์แอกเตอร์	83
รูปที่ 4.9 รูปสเปกตรัมฮาร์มอนิกเมื่อใส่ไลเนอร์แอกเตอร์	83
รูปที่ 4.10 รูปคลื่นของแรงดันเมื่อใส่ไลเนอร์แอกเตอร์และกรองฮาร์มอนิกที่ 3	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ หากมีการนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต เจ้าของลิขสิทธิ์ขอสงวนสิทธิ์ในการดำเนินคดีตามกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

รูปที่ 4.11 รูปคลื่นของกระแสเมื่อใส่ไลน์รีแอกเตอร์และกรองฮาร์มอนิกที่ 3	85
รูปที่ 4.12 รูป Power เมื่อใส่ไลน์รีแอกเตอร์และกรองฮาร์มอนิกที่ 3	85
รูปที่ 4.13 รูปสเปกตรัมฮาร์มอนิกเมื่อใส่ไลน์รีแอกเตอร์และกรองฮาร์มอนิกที่ 3	86
รูปที่ 4.14 รูปคลื่นของแรงดันเมื่อใส่ไลน์รีแอกเตอร์และกรองฮาร์มอนิกที่ 3,5	87
รูปที่ 4.15 รูปคลื่นของกระแสเมื่อใส่ไลน์รีแอกเตอร์และกรองฮาร์มอนิกที่ 3,5	87
รูปที่ 4.16 รูป Power เมื่อใส่ไลน์รีแอกเตอร์และกรองฮาร์มอนิกที่ 3,5	88
รูปที่ 4.17 รูปสเปกตรัมฮาร์มอนิกเมื่อใส่ไลน์รีแอกเตอร์และกรองฮาร์มอนิกที่ 3,5	88
รูปที่ 4.18 รูปคลื่นของแรงดันเมื่อใส่ไลน์รีแอกเตอร์และกรองฮาร์มอนิกที่ 3,5,7	89
รูปที่ 4.19 รูปคลื่นของกระแสเมื่อใส่ไลน์รีแอกเตอร์และกรองฮาร์มอนิกที่ 3,5,7	90
รูปที่ 4.20 รูป Power เมื่อใส่ไลน์รีแอกเตอร์และกรองฮาร์มอนิกที่ 3,5,7	90
รูปที่ 4.21 รูปสเปกตรัมฮาร์มอนิกเมื่อใส่ไลน์รีแอกเตอร์และกรองฮาร์มอนิกที่ 3,5,7	91
รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบแรงดัน	91
รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบกระแส	92
รูปที่ 4.24 เปรียบแรงดันไฟฟ้า	92
รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบฮาร์มอนิก	93
รูปที่ 4.26 วงจรก่อนใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกในโปรแกรม Orcad	95
รูปที่ 4.27 รูปคลื่นกระแสก่อนกรอง	96
รูปที่ 4.28 สเปกตรัมฮาร์มอนิกก่อนกรอง	96
รูปที่ 4.29 วงจรเมื่อใส่ชุดกรองฮาร์มอนิกในโปรแกรม Orcad	97
รูปที่ 4.30 รูปคลื่นกระแสหลังกรอง	98
รูปที่ 4.31 สเปกตรัมฮาร์มอนิกหลังกรอง	98

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของกระแสสลับที่จ่ายให้กับโหลดที่ใช้ไฟกระแสตรงเรียบ	9
ตารางที่ 2.2 สรุปตารางเปรียบเทียบอุปกรณ์แก้ปัญหาฮาร์มอนิก	21
ตารางที่ 2.3 ลักษณะเฉพาะของแกนแม่เหล็กไฟฟ้า	25
ตารางที่ 3.1 กำหนดพรีอเพอร์ดีให้กับคอนโทรลของฟอร์ม 1	48
ตารางที่ 3.2 กำหนดพรีอเพอร์ดีให้กับคอนโทรลของฟอร์ม 2	52
ตารางที่ 4.1 สรุปผลการทดลองที่ละ Step	94



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันเทคโนโลยีในด้านต่างๆ ได้เจริญก้าวหน้าไปอย่างมาก การนำเอาเทคโนโลยีทางอิเล็กทรอนิกส์ มาใช้ในด้านอุตสาหกรรมและเครื่องใช้ในสำนักงาน การนำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังไปใช้ในการควบคุมเครื่องจักรกลในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากประสิทธิภาพที่ได้ค่อนข้างดี แต่มิได้หมายความว่า จะมีแค่ประโยชน์เท่านั้น เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้ไม่มีความเป็นเชิงเส้นของกระแสและแรงดัน เพราะความสัมพันธ์ระหว่างค่าชั่วขณะของกระแสและแรงดันไม่คงที่ โหลดที่ไม่มีความเป็นเชิงเส้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสสูง การเปลี่ยนแปลงของกระแสอย่างฉับพลัน เป็นผลทำให้เกิดฮาร์มอนิกหรือสัญญาณที่มีความเป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐานในระบบไฟฟ้า และความไม่เป็นเชิงเส้นจะทำให้กระแสไฟฟ้าเกิดการผิดเพี้ยนไป ดังนั้น โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นจึงเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกให้แก่ระบบ

อุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ที่ได้รับการพัฒนาปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และกำเนิดฮาร์มอนิกที่จะเกิดผลเสียต่อระบบน้อยลง แต่อย่างไรก็ตามปัญหาทางด้านฮาร์มอนิกก็ยังมิได้อยู่และในแต่ละระบบไฟฟ้ากำลังที่มีอุปกรณ์ดังกล่าวนี้ก็จะมีความแตกต่างกันไป จึงไม่มีวิธีการแก้ปัญหาแบบสูตรสำเร็จที่สามารถใช้งานได้ทุกระบบ แต่ละระบบที่มีปัญหาทางด้านฮาร์มอนิกก็ต้องแก้ไขปัญหาคด้วยวิธีการแตกต่างกันออกไป

ระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปนั้น ไม่มีปัญหาเรื่องฮาร์มอนิกเสมอไปทุกระบบ ดังนั้นการพิจารณาว่าควรจะมีการศึกษาถึงปัญหาฮาร์มอนิกหรือไม่นั้นอาจพิจารณาคร่าวๆ ดังนี้

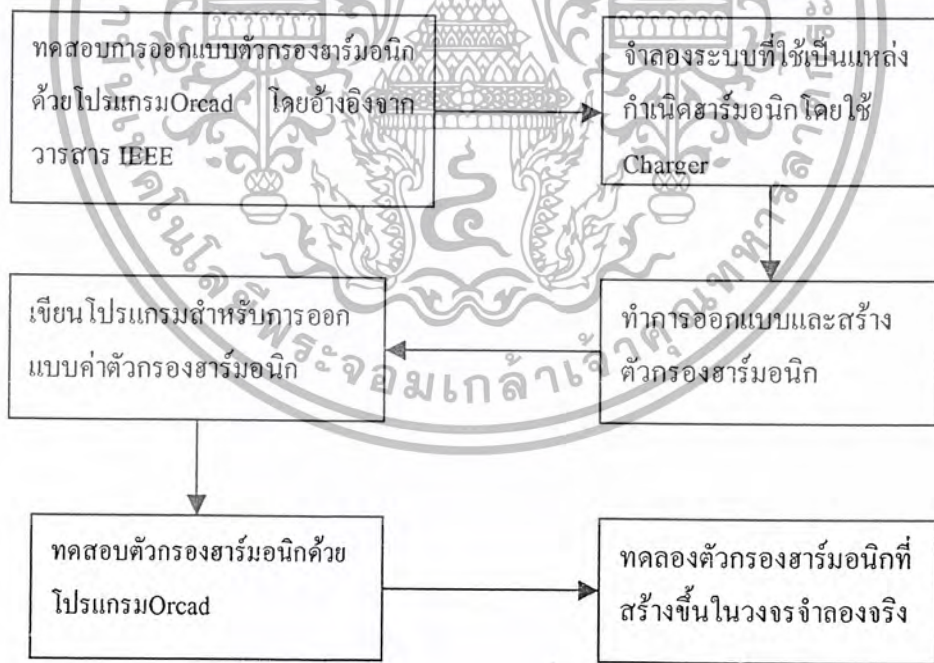
- ก) ต้องการใส่คาปาซิเตอร์เข้าไปในระบบไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยคอนเวอร์เตอร์หรืออุปกรณ์กำเนิดฮาร์มอนิกอื่นๆ ที่มีขนาดเท่ากับหรือมากกว่า 20% ของกำลังของระบบ
- ข) ฟีวส์ของคาปาซิเตอร์ขาดบ่อยปัญหาอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิก
- ค) ในชั้นออกแบบระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยค่าคาปาซิเตอร์และอุปกรณ์กำเนิดฮาร์มอนิก
- ง) ระบบที่ต้องการจำกัดฮาร์มอนิกให้มีขนาดต่ำมาก
- จ) การขยายระบบซึ่งต้องการเพิ่มอุปกรณ์ที่สามารถกำเนิดฮาร์มอนิกเข้าไปในระบบเดิม ที่มีคาปาซิเตอร์ต่ออยู่

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาถึงฮาร์โมนิกที่มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า
- 2) เพื่อศึกษาและออกแบบตัวกรองฮาร์โมนิกแบบพาสซีฟ ให้สามารถนำไปใช้งานได้จริงกับระบบไฟฟ้า

1.3 ขอบเขต

ในโครงการชิ้นนี้เป็นการศึกษาถึงฮาร์โมนิกที่มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า และการออกแบบตัวกรองฮาร์โมนิกแบบพาสซีฟ โดยในการศึกษานั้นจะทำการจำลองระบบไฟฟ้าที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกขึ้นมาซึ่งก็คือ Charger ซึ่งมีวงจรเฟสคอนโทรล ขนาด 500วัตต์ 220 โวลต์และทำการวิเคราะห์ว่าแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกที่จำลองขึ้นมา นั้น สร้างฮาร์โมนิกใดที่เป็นปัญหาต่อระบบไฟฟ้าบ้าง หลังจากนั้นทำการออกแบบตัวกรองฮาร์โมนิก โดยได้ออกแบบโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณฮาร์โมนิกเพื่อสะดวกในการการออกแบบตัวกรองฮาร์โมนิก ตรวจสอบการออกแบบตัวฮาร์โมนิกด้วยโปรแกรม Orcad หลังจากนั้นก็จะสร้างตัวกรองฮาร์โมนิกแล้วใส่ตัวกรองฮาร์โมนิกเข้าไปในระบบ เพื่อดูว่าสามารถกรองฮาร์โมนิกได้ตามที่ต้องการหรือไม่ โดยขอบเขตในการทำโครงการสามารถแสดงได้ดังแผนภาพในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แผนภาพแสดงขอบเขตของโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากการทำโครงการทำให้สามารถออกแบบและสร้างตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟได้ และเป็นแนวทางในการพัฒนาให้ใช้กับงาน อย่างมีประสิทธิภาพ กับระบบไฟฟ้าต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการทั่วไปที่เกี่ยวกับฮาร์มอนิก ในเรื่องของค่าศัพท์และปริมาณต่างๆ ประเภทของฮาร์มอนิก แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก เรโซแนนซ์ ผลกระทบของฮาร์มอนิก และวิธีการแก้ไขฮาร์มอนิก

2.1 ศัพท์และปริมาณต่างๆ

1) ฮาร์มอนิก (Harmonic)

วิชาทางไฟฟ้า ฮาร์มอนิก คือ สัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน เช่น ความถี่มูลฐาน คือ 50 Hz ฮาร์มอนิก คือ 150, 250 Hz เป็นต้น ความถี่มูลฐานเรียกว่าฮาร์มอนิกที่ 1 ส่วนฮาร์มอนิกลำดับอื่นๆ ก็หาได้จากคูณเลขจำนวนเต็มบวก คูณกับความถี่มูลฐาน การวัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกทำได้หลายวิธีแตกต่างกันออกไปแต่โดยส่วนมากจะใช้วัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion) ที่ความถี่ฮาร์มอนิกต่างๆกัน ปริมาณของขนาดจะแสดงด้วยจำนวนเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่มูลฐาน

2) กระแสฮาร์มอนิก (Harmonic Current)

ฮาร์มอนิกที่อยู่ในรูปของกระแสในไลน์ ในระบบ ไฟฟ้าเกิดขึ้นจากอุปกรณ์ที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Devices) ซึ่งอาจเป็นโหลดหรือแหล่งกำเนิดก็ได้ ในอดีตไม่มีการศึกษาอย่างจริงจังเนื่องจากอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นน้อยมาก ทำให้ผลของฮาร์มอนิกต่อระบบ ไฟฟ้ามีค่าน้อย แต่ในช่วงสิบปีที่ผ่านมาอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ขยายตัวเป็นอย่างมาก เป็นผลให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกอย่างมากมาย

3) แรงดันฮาร์มอนิก (Harmonic Voltage)

เกิดจากการที่กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านค่า รีแอกแตนซ์ (Reactance) ของระบบ แหล่งจ่ายสายส่ง หรือรีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่ต่อขนานเข้าไปในระบบ เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปแรงดัน อันเนื่องจากรีแอกแตนซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ส่วนค่าความต้านทานไม่เปลี่ยนแปลงกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบนั้นจะเป็นตัวสร้าง ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก (Harmonic Voltage Distortion) ซึ่งเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$V_n = Z_n I_n \quad (2.1)$$

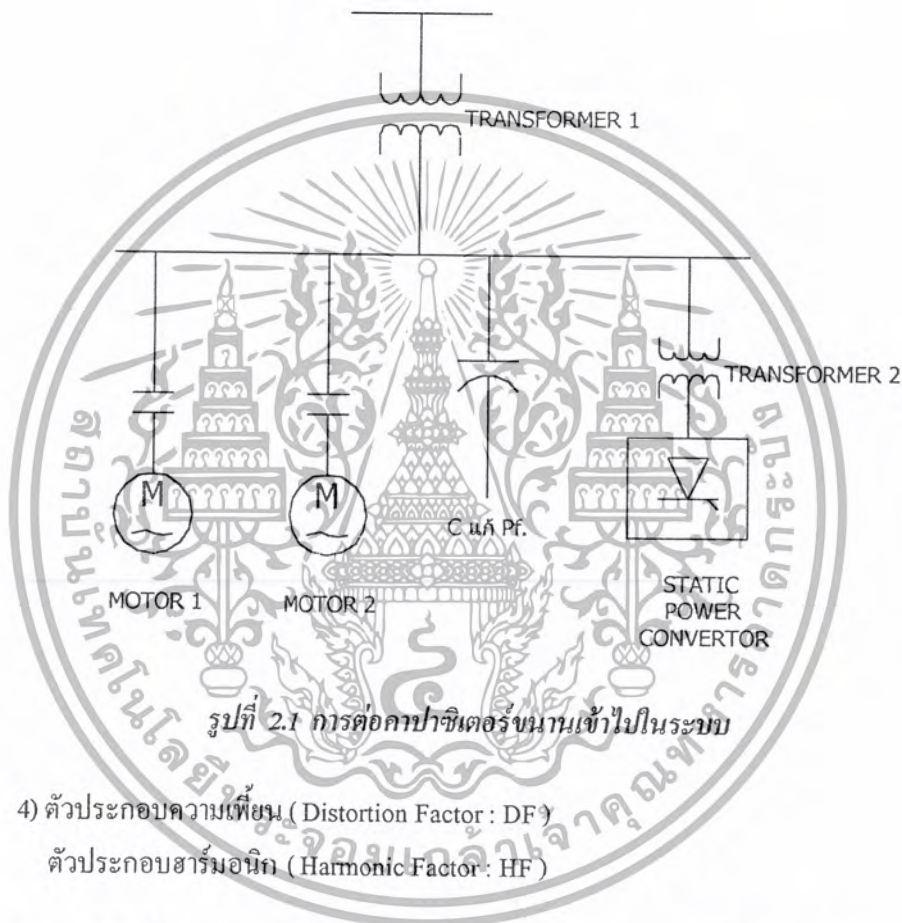
เมื่อ V_n = แรงดันฮาร์มอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_n = กระแสฮาร์โมนิกในระบบ

Z_n = ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ

ถ้าในระบบไฟฟ้าใช้คาปาซิเตอร์ต่อขนานเข้าไปในระบบ เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังจะทำให้มีอิทธิพลต่อระดับฮาร์โมนิกในระบบจำหน่าย คาปาซิเตอร์มิได้กำเนิดฮาร์โมนิกแต่จากการต่อวงจรในระบบมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดเงื่อนไขรีโซแนนซ์แบบขนานระหว่างคาปาซิเตอร์ และ รีแอกแตนซ์ของระบบดังรูป 2.1



- 4) ตัวประกอบความเพี้ยน (Distortion Factor : DF)
- ตัวประกอบฮาร์โมนิก (Harmonic Factor : HF)

ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกรวมหมายถึงตัวเลข % แสดงความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสและแรงดันจากรูปคลื่นไซน์ 50 Hz ตัวเลขยิ่งสูงแสดงถึงความผิดเพี้ยนมากหรืออีกนัยหนึ่งมีส่วนประกอบฮาร์โมนิกปริมาณมากปะปนอยู่ในระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นมาตรฐาน IEEE 519-1992 มีค่า THD อยู่ 2 ค่าคือ

-THD_v (Voltage THD) หมายถึงค่าความผิดเพี้ยนของแรงดัน มีหน่วยเป็น %

$$DV_v = HF_v = THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\alpha} V_n^2}}{V_1} \times 100 \% \tag{2.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-THD_i (Current THD) หมายถึงค่าความผิดเพี้ยนของกระแส มีหน่วยเป็น %

$$DF_i = HF_i = THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100 \% \quad (2.3)$$

5) ลำดับฮาร์โมนิก (Harmonic Order)

ลำดับฮาร์โมนิก คือ อัตราส่วนของความถี่ฮาร์โมนิก และความถี่มูลฐาน เช่น เมื่อพูดถึงฮาร์โมนิก ลำดับที่ 5 หากความถี่มูลฐานเป็น 50 Hz จะได้ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 5 เป็น 250 Hz

6) ตัวประกอบกำลัง (Power Factor)

หมายถึง อัตราส่วนของกำลังงานจริง (W , kW) ต่อกำลังงานปรากฏ (VA , kVA) อย่างไรก็ตาม หากรูปคลื่นของแรงดันและกระแสมีลักษณะรูปคลื่นไซน์ เราอาจพูดถึงตัวประกอบกำลังในเทอมค่า โคไซน์ (cosine) ของมุมเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสก็ได้

2.2 ประเภทฮาร์โมนิก

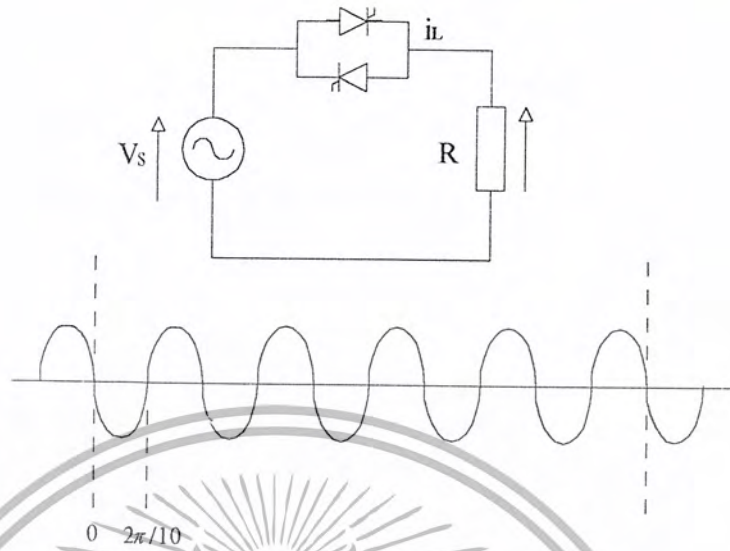
ฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นปะปนอยู่ในกระแสหรือแรงดัน ไฟฟ้า อาจแบ่งเป็นประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

1) ฮาร์โมนิก (Harmonic)

หมายถึง ส่วนประกอบรูปคลื่น ไซน์ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน

2) อินเตอร์ฮาร์โมนิก (Interharmonic)

หมายถึง ส่วนประกอบรูปคลื่น ไซน์ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน อินเตอร์ฮาร์โมนิกนี้ส่วนมากจะพบในกระแสคาบหอนแบบอาร์ก เนื่องจากคอนทอลอมกระแสอาร์คจะไม่เสถียร ทำให้คาบกระแสไม่แน่นอน กล่าวคือ ความถี่ 50 Hz คาบจะกินเวลา 20 มิลลิวินาที แต่กระแสอาร์คจะมีคาบเวลาไม่เป็น 20 มิลลิวินาที ทุกคาบ ทำให้เกิดอินเตอร์ฮาร์โมนิกขึ้น นอกจากนี้ก็จะพบอินเตอร์ฮาร์โมนิก ในอุปกรณ์ที่มีการควบคุมทำงานแบบ Integral Cycle Control ดังรูป



รูปที่ 2.2 การควบคุมกระแสที่ไหลผ่านโหลดแบบ *Integral Cycle Control*

3) ฮาร์มอนิกคุณลักษณะ (Characteristic Harmonic)

หมายถึง ฮาร์มอนิก ที่สร้างโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้า (แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้สารกึ่งตัวนำ เช่น ไดโอด, SCR) ในสภาวะการทำงานปกติลำดับของฮาร์มอนิกสามารถหาได้จาก

$$n = kp \pm 1$$

(2.4)

n = ลำดับของฮาร์มอนิก

k = เลขจำนวนเต็มบวกใดๆ

p = จำนวนพัลส์ของเครื่องแปลงผันไฟฟ้า

6) ฮาร์มอนิกที่ไม่ได้เกิดจากคุณลักษณะ (Noncharacteristic Harmonic)

ฮาร์มอนิกที่ไม่ได้เกิดจากคุณลักษณะ หมายถึง ฮาร์มอนิกที่ถูกสร้างโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้าไม่ปฏิบัติตามสมการ เช่น เครื่องแปลงผันไฟฟ้าชนิด 12 พัลส์ ควรจะมีเฉพาะฮาร์มอนิกคุณลักษณะที่มีลำดับ 11,13,23,25,35,37 ดังนั้นถ้ามีฮาร์มอนิกที่มีลำดับเป็น 5,7,17,19 ปนมาด้วย ฮาร์มอนิกเหล่านี้ถือว่าเป็นฮาร์มอนิกที่ไม่ได้เกิดจากคุณลักษณะ

7) ฮาร์มอนิกที่สามหารลงตัว

ฮาร์มอนิกที่สามหารลงตัว หมายถึง ฮาร์มอนิกลำดับสามหารลงตัวได้แก่ ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3, 6, 9 ซึ่งจัดอยู่กลุ่มลำดับ (sequence) เป็นศูนย์ ในกรณีที่ระบบ 3 เฟส 4 สาย ฮาร์มอนิก กลุ่มนี้จะไหลอยู่ในสายนิวตรอน ทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบไฟฟ้าขึ้นเช่น สายนิวตรอนร้อน ฉนวนเสียหาย เกิดลัดวงจร เป็นต้น

2.3 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ามีด้วยกันหลายอย่าง ทั้งจากอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภท static power converter ที่เริ่มนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมและเนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทต่างๆที่มีใช้กันมานานแล้ว กล่าวคือได้รวบรวมสรุปแหล่งที่มาทั้งหมดที่เป็นตัวกำเนิดฮาร์มอนิกขึ้นมาในระบบไฟฟ้ากำลัง รวมทั้งกล่าวถึงรายละเอียดของการเกิดและขนาดของฮาร์มอนิกว่ามีมากน้อยเพียงใดที่จะมีผลทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบไฟฟ้าหรืออุปกรณ์หรือไม่

แหล่งกำเนิดสัญญาณฮาร์มอนิก สามารถแยกได้หลายประเภทดังนี้

ก. โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

- เรกติไฟเออร์ (rectifier)
- เรกติไฟเออร์แบบมีการควบคุม (controlled rectifier)
- คอนเวอร์เตอร์แบบความถี่ (static frequency converter)
- รีแอกเตอร์แบบอิ่มตัว (saturable reactor)
- เตาหลอมแบบอาร์ค (arc furnace)
- เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบอาร์ค

ข. แหล่งกำเนิดแบบไม่สมดุล (phase unbalance sources)

- โหลดแบบเชิงเส้นเฟสเดียว (single phase linear load)
- โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นเฟสเดียว (single phase nonlinear load)
- หม้อแปลงเดลต้าเปิด (open delta transformer)
- ระบบสายจำหน่ายแบบวางนอนและไม่มีการสลับสาย (untransposed flat configuration of conductors)

ค. กระแสกระตุ้น (exciting current)

- กรณีปกติ (normal condition)
- กรณีกระตุ้นมากเกินไป (overexcited conditions)
- เรโซแนนซ์กับแกนเหล็ก (ferroresonance)

ง. แหล่งกำเนิดอื่นๆ

- สวิตซ์แรงสูง
- ฟิวส์

ข. โหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กระแสตรงในวงจรกระแสสลับ

รายละเอียดของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในหัวข้อข้างต้นนี้ จะได้กล่าวไว้เป็นข้อ ๆ ถึงการกำเนิดฮาร์มอนิกและผลที่มีต่อระบบมากน้อยเพียงใด เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจในเรื่องของแหล่งกำเนิดและวิธีการแก้ไขปัญหเกี่ยวกับฮาร์มอนิกในโอกาสต่อไป

2.3.1 โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear load)

โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ใช้กันมากในปัจจุบัน ได้แก่ โหลดที่รับไฟผ่านเรกติไฟเออร์มา โหลดที่รับไฟรวมทั้งระบบการเรกติไฟร์ซึ่งมีผลต่อแหล่งจ่ายไฟหรือ เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของวงจรทางด้านกระแสตรง ความเหนี่ยวนำซึ่งมีหน้าที่ ทำให้สัญญาณกระแสตรงเรียบขึ้นในวงจรไทรสเตอร์เป็นตัวค้นเหตุที่ทำให้กระแสทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับมีรูปคลื่นใกล้เคียงคลื่นสแควร์ (square wave) มาก ในเรกติไฟเออร์แบบไม่มีการควบคุม (uncontrolled rectifier) และในคอนเวอเตอร์แบบความถี่ (frequency converter) ก็มีผลแบบเดียวกันเกิดขึ้น ถ้าหากมีการใช้ความเหนี่ยวนำสำหรับทำให้สัญญาณกระแสตรงเรียบขึ้น

ถ้าหากกระแสทางด้าน โหลดใช้ความจุสำหรับทำให้สัญญาณเรียบขึ้นแทนที่จะใช้ความเหนี่ยวนำ กระแสสลับทางด้านอินพุทจะไหลเฉพาะช่วงแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (peak voltage) เท่านั้น ในช่วงครึ่งไซเคิล สัญญาณกระแสแบบตัด (chopped current wave) เกิดขึ้นเพราะกระแสไหลได้เฉพาะช่วงของไซเคิลที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับกับแหล่งจ่ายมากกว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่คร่อมความจุ ช่วงระยะที่กระแสไหลในแต่ละครึ่งไซเคิลขึ้นอยู่กับขนาดของความจุ ความจูงยขนาดใหญ่ก็ทำให้กระแสที่ออกมาเรียบมากขึ้นและพัลส์ (pulse) กระแสสลับมีระยะเวลาสั้นแต่มีขนาดสูง

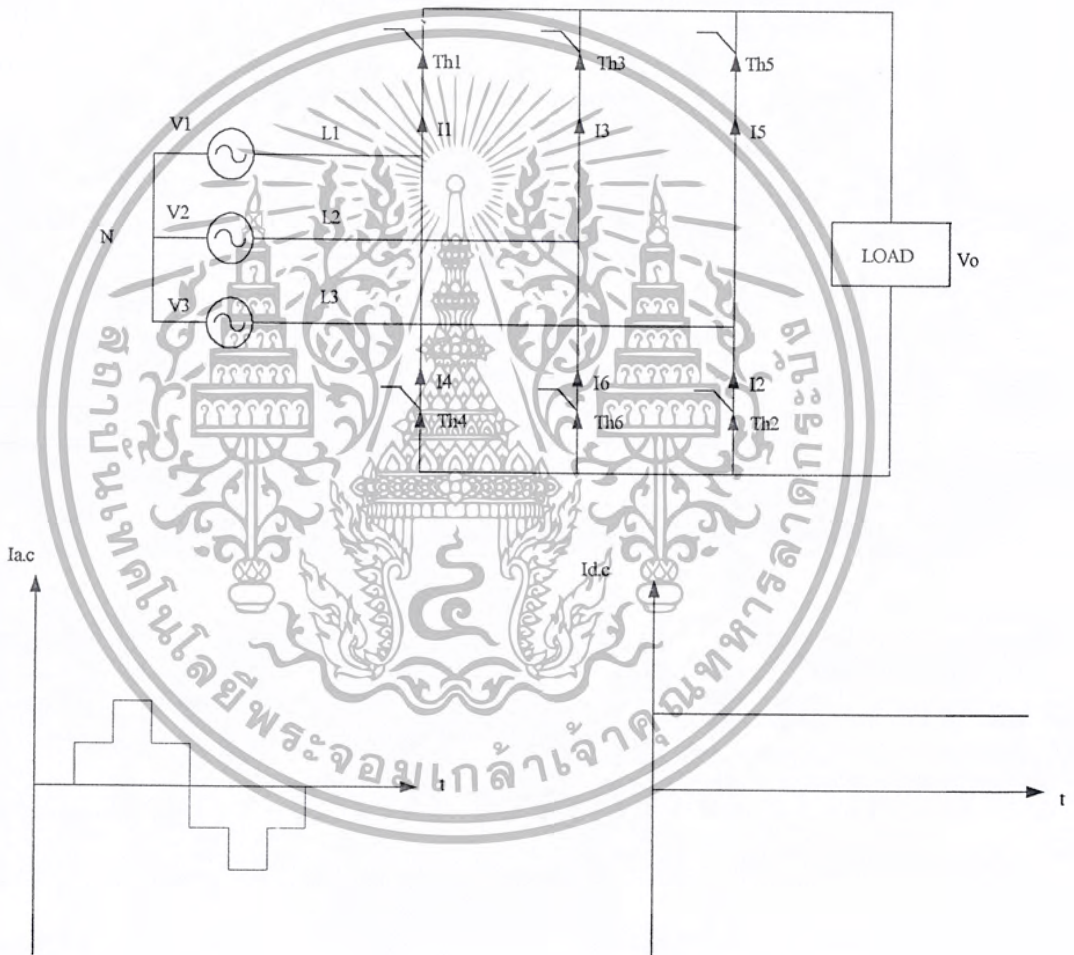
ในกรณีที่ไม่ได้มีการใช้ทั้งความเหนี่ยวนำและ ความจุเพื่อทำให้สัญญาณกระแสตรงเรียบนั้นทำให้กระแสสลับจากแหล่งจ่ายไฟมีการเบี่ยงเบนจากไซน์ (distort) น้อย เรกติไฟเออร์แบบ full wave single phase เมื่อจ่ายกระแสให้โหลดที่เป็นความต้านทานอย่างเดียวก็ไม่มีการเบี่ยงเบนของไซน์เกิดขึ้นทางด้านกระแสสลับของแหล่งจ่ายไฟ อย่างไรก็ตามถ้าแบบเป็นสามเฟสการเบี่ยงเบนของไซน์ทางด้านกระแสของแหล่งจ่ายก็เกิดขึ้น

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของกระแสสลับที่จ่ายให้กับโหลดที่ใช้ไฟกระแสตรงเรียบ

ฮาร์มอนิก	ขนาด (pu.)
ความถี่ปกติ (fundamental)	1.0
5	0.2
7	0.143
11	0.077
13	0.059
17	0.053

รูปที่ 2.3 เป็นวงจรคอนเวอเตอร์แบบ 3 เฟส 6 พัลส์ เปลี่ยนแปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรงโดยจ่ายกระแสตรงออกมาเรียบ ส่วนกระแสสลับมีลักษณะเป็นคลื่นสแควร์ทางอินพุทที่มาจากแหล่งจ่ายไฟนี้ก็คือคลื่นที่เบี่ยงเบนจากไซน์ซึ่งเมื่อแยกคลื่นออกโดยใช้ Fourier Analysis จะได้

$$L_{AC} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} Id (\cos\theta - \frac{1}{5}\cos 5\theta + \frac{1}{7}\cos 7\theta - \frac{1}{11}\cos 11\theta + \frac{1}{13}\cos 13\theta \dots) \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.3 วงจรและสัญญาณของคอนเวอเตอร์ 3 เฟส 6 พัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเบี่ยงเบนจากไซน์ของสัญญาณที่แหล่งจ่ายไฟ อันเนื่องมาจากวงจรทรานซิสเตอร์ที่มีสาเหตุอีกประการที่เรียกว่าคอมมิวเตชันนอช (commutation notches) มันจะเกิดขึ้นทุกๆ ครั้ง ไซเคิลในแต่ละเฟสของระบบ 6 พัลส์ สาเหตุเกิดเนื่องจากการควบคุมคัทคาไฟฟ้าเอาท์พุทนั้น ทรานซิสเตอร์ บางขณะก็อยู่ในช่วงเป็นตัวนำและบางขณะก็ไม่เป็นตัวนำ (conducting and nonconducting) การที่ทำเช่นนี้ได้ นั้น การคอมมิวเตทกระแส กับ ทรานซิสเตอร์ตัวถัดไปจำเป็นต้องลัดวงจรทางด้านกระแสลับช่วงขณะเป็นโมโครวินาที การจำกัดกระแสลัดวงจร ให้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้นั้นขึ้นอยู่กับขนาดความเหนียวนำของสายและระบบ ความเหนียวนำยิ่งมากกระแสลัดวงจรยิ่งน้อยและระยะเวลาที่เกิดก็ต้องให้นานพอควรในการทำให้เกิดคอมมิวเตชันที่สมบูรณ์ คอมมิวเตชันนอชอาจเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของไซน์ เช่นมอเตอร์ขนาด 500 แรงม้า อาจมีการคอมมิวเตชันนอชเกิดขึ้นขนาด 70% เป็นเวลา $\frac{1}{4}$ ms โดยเกิดขึ้น 6 ครั้ง ภายในครึ่งไซเคิลซึ่งก็คือ 1.5 ms ภายในหนึ่งไซเคิลหรือประมาณ 10% ของเวลา และถ้าหากมีมอเตอร์ดังกล่าวหลายๆชุดต่อกันก็อาจจะทำให้เกิดผลเสียหายมากขึ้น ความถี่ของคอมมิวเตชันนอชอยู่ในย่านความถี่ mid-audio หรือสูงกว่าที่ทำให้เกิดการรบกวนคลื่นวิทยุและเกิดการเบี่ยงเบนจากไซน์ในสัญญาณจากแหล่งจ่ายไฟ

2.3.2 ความไม่สมดุลของเฟส (phase unbalance)

ความไม่สมดุลของเฟสที่เกิดขึ้นในระบบก็มีผลต่อระบบเช่นเดียวกับการเบี่ยงเบนจากไซน์เพราะมันมีผลต่อมอเตอร์เช่นเดียวกับการเบี่ยงเบนของความถี่ สาเหตุของการความไม่สมดุลของเฟสก็เนื่องมาจากโหลดไม่สมดุลย์หรืออิมพีแดนซ์ของเฟสไม่สมดุลหรืออาจเกิดเนื่องมาจากมีโหลดแบบเฟสเดียวที่เป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น เช่นการขับเคลื่อนแบบใช้ทรานซิสเตอร์แบบเฟสเดียวเป็นต้น ซึ่งทำให้มีปัญหาทางด้านฮาร์โมนิกเกิดขึ้นนอกเหนือจากเฟสไม่สมดุลย์

สาเหตุของความไม่สมดุลของเฟสที่คาดไม่ถึงอีกประการก็คือ เมินฟิวส์ฟาสหนึ่งของคาปาซิเตอร์ขาดและฟิวส์ที่ขาดแบบนี้โดยทั่วไปก็ไม่น่าจะว่ามันเกิดขึ้น ดังนั้นจึงทำให้เกิดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเฟส ถ้าคาปาซิเตอร์ที่ลัดคั้งไว้ใช้เพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้น 4% ของระบบเมื่อฟิวส์ขาดไปหนึ่งเฟสจะเกิดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า 2% ทำให้เกิดความสูญเสียในมอเตอร์ประมาณ 8%

2.3.3 กระแสเอ็กไซตและเฟอโรเรโซแนนซ์ (exciting current and ferroresonance)

กระแสเอ็กไซตโดยปกติไม่ไม่ได้ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของคลื่น (wave distortion) แต่ปัญหาเกิดเนื่องจากแรงดันไฟฟ้า เพราะกระแสเอ็กไซตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐานแล้วหม้อแปลงที่แรงดันไฟฟ้า 110% ของอัตรากระแสไม่ควรเกิดความร้อนมากเกินไป (overheat) เมื่อไม่มีโหลดนั้นก็คือที่ 110% ของอัตราแรงดันไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากกระแสเอ็กไซตมีค่าเท่ากับความสูญเสียในหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดเต็มที่ที่ 130% ของอัตราแรงดันไฟฟ้ากระแสเอ็กไซตอาจมีขนาดใกล้เคียงกับกระแสโหลดเต็มที่ซึ่งกระแสดังกล่าวประกอบด้วยฮาร์โมนิกที่ 3 หรือมากกว่ามีขนาดมากกว่า 50% และทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของคลื่น

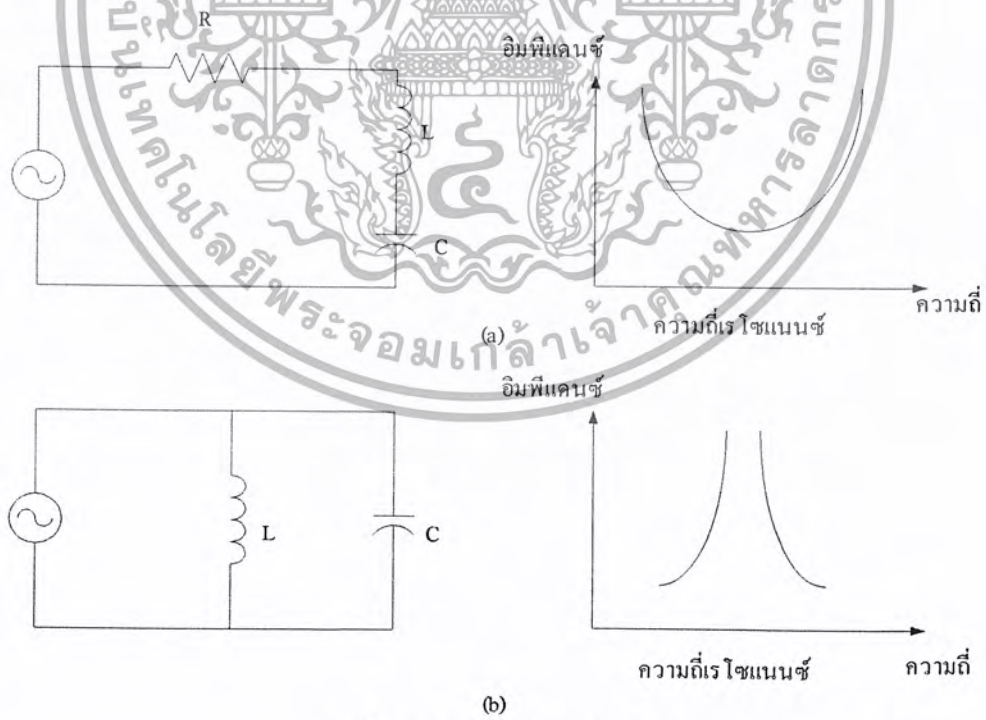
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟอโรเรโซแนนซ์เป็นสิ่งปกติอีกอย่างที่เกิดขึ้นไม่บ่อยครั้งนัก แต่เมื่อเกิดขึ้นแล้วก็ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของคลื่นและเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินขึ้น (overvoltage) เฟอโรเรโซแนนซ์อาจเกิดขึ้นได้เมื่อเฟสหนึ่งเปิดออกและเฟสหนึ่งของหม้อแปลงถูกจ่ายไฟผ่านทางความจุ เคเบิลยาว 30-60 เมตร สามารถให้ความจุมากพอที่จะทำให้เกิดเฟอโรเรโซแนนซ์ สาเหตุที่เกิดอาจเป็นได้ว่าฟิวส์ต้นทางตัวหนึ่งของสายที่จ่ายมายังหม้อแปลงขนาดไม่เกิน 5000 KVA ขาดลงขนาดของกระแสคาปาซิเตอร์แม้เพียง 1% ของกระแสเอ็กไซต์ของหม้อแปลงก็สามารถทำให้เกิดเฟอโรเรแนนซ์ได้กับหม้อแปลงที่ไม่ได้จ่ายโหลด โดยทั่วไปเฟอโรเรแนนซ์ไม่เกิดขึ้นถ้าหม้อแปลงจ่ายโหลดมากกว่า 30% ของอัตราป้องกันระบบก็คือพยายามไม่ให้เกิดเอ็กไซต์หม้อแปลงผ่านความจุที่ต่ออนุกรมและพยายามให้หม้อแปลงจ่ายโหลดเสมอ เมื่อเกิดเฟอโรเรโซแนนซ์ขึ้นให้รีบปลดเฟสอื่นๆของหม้อแปลงทันที

2.4 เรโซแนนซ์

เมื่อทราบสาเหตุการเกิดฮาร์โมนิกแล้ว ปัญหาต่อไปที่ต้องศึกษาก็คือฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบมีกระแสฮาร์โมนิกไหลไปในระบบแล้วเกิดอะไรตามมา สำหรับผลเสียอันเนื่องมาจากฮาร์โมนิกจะกล่าวไว้ในภายหลัง แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบกรณีที่มีความถี่ตรงกับเรโซแนนซ์ของระบบ

เรโซแนนซ์ในระบบมี 2 แบบ คือ เรโซแนนซ์ขนานกับเรโซแนนซ์อนุกรม วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมและขนานรวมทั้งค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่ความถี่ต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรและค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่างๆ

(a) เรโซแนนซ์อนุกรม

(b) เรโซแนนซ์ขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเกิดเรโซแนนซ์ขนานกระแสเพียงเล็กน้อย ก็ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสูงๆ ส่วนเรโซแนนซ์อนุกรมเมื่อเกิดแล้วแรงดันไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดกระแสสูง ที่ความถี่เรโซแนนซ์ถ้าไม่มีการเบี่ยงเบนของคลื่นหรือไม่มีประเภทไม่เป็นเชิงเส้นเรโซแนนซ์ที่มีอยู่ในระบบก็ไม่สร้างปัญหาใดๆใด ความถี่เรโซแนนซ์สามารถหาได้จาก

$$F_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{X_c}{X_{sc}}} \tag{2.6}$$

$$= 50 \sqrt{\frac{KVAsc}{KVAc}} \tag{2.7}$$

$$= \frac{50}{\sqrt{\Delta e}} \tag{2.8}$$

- L = ความเหนี่ยวนำของระบบ
- C = ความจุของระบบหรือคาปาซิเตอร์
- KVAsc = KVA ลัดวงจรของระบบตำแหน่งที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์
- KVAc = KVA ของคาปาซิเตอร์
- Δe = การเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากการใส่คาปาซิเตอร์เข้าไปในระบบ (per unit)

เช่น ระบบไฟฟ้า 5 Hz ที่มี KVA ลัดวงจร 20000 และคาปาซิเตอร์ที่ใช้ 800 KVA

$$\text{ความถี่เรโซแนนซ์} = 50 \sqrt{\frac{20000}{800}} = 50 \sqrt{25} = 250 \text{ Hz}$$

$$\text{หรือ } \frac{50}{\sqrt{0.04}} = \frac{50}{0.2} = 250 \text{ Hz}$$

เรโซแนนซ์อนุกรมปกติเป็นวงจรที่ถูกออกแบบไว้ คือ ตั้งใจทำขึ้นเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาเนื่องจากเรโซแนนซ์ขนานโดยใช้เรโซแนนซ์อนุกรมเป็นทางผ่านสำหรับฮาร์โมนิกที่ต้องการ เรโซแนนซ์อนุกรมประกอบด้วยความเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับความจุหรือคาปาซิเตอร์ เพื่อทำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่หนึ่งและอิมพีแดนซ์รวมของความเหนี่ยวนำและความจุมีค่าต่ำมากทำให้กระแสฮาร์โมนิกที่ความถี่ดังกล่าวไหลเข้าไปในวงจรเรโซแนนซ์ที่ทำต่อไว้เพื่อไม่ให้เข้าไปในระบบไฟฟ้า บางครั้งก็เรียวงจรเรโซแนนซ์ที่ทำต่อไว้ว่าแตรป (trap) วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมทำหน้าที่เหมือนความเหนี่ยวนำที่ความถี่สูงมากๆดังนั้นจึงไม่มีโอกาสที่จะเกิดเรโซแนนซ์ขนานที่ความถี่สูงกว่านี้ เมื่อเพิ่มวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมเข้าไป การต่อความเหนี่ยวนำอนุกรมเข้าไปทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ขนานต่ำลง

สำหรับกรณีการทำงานปกติของคอนเวอเตอร์พารามิเตอร์ของวงจรซึ่งได้แก่ ความเหนี่ยวนำ ความจุ

และ ความต้านทานไม่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์เข้ากับความถี่เกิดจากคอนเวอเตอร์ ความจุของหม้อแปลง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคเบิลและสายมีค่าน้อยมากและความเหนียวของหม้อแปลง เคเบิลและสายทำให้เกิดเรโซแนนซ์ได้แต่เป็นที่ความถี่สูงมากๆ ซึ่งไม่มีปัญหาต่อระบบแต่ถ้าเคเบิลปาซิเตอร์เข้าไปในระบบเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในระบบมีโอกาสที่จะตรงกับความถี่ฮาร์มอนิกที่เกิดจากคอนเวอเตอร์และเป็นปัญหา ต้องแก้ไขเมื่อจะใช้คาปาซิเตอร์

2.5 ปัญหาเนื่องจากฮาร์มอนิก

ปัญหาเนื่องมาจากฮาร์มอนิกอาจพิจารณาได้เป็นสองขั้นตอน คือในระบบไฟฟ้าเมื่อแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นทำให้เกิดผลเสียโดยเฉพาะทางด้านการสูญเสียในอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดต่อไปในตอนนี้ และในระบบที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกมักจะมีเพาเวอร์แฟคเตอร์ต่ำ ดังนั้นเมื่อต้องการปรับเพาเวอร์แฟคเตอร์ให้สูงโดยใส่คาปาซิเตอร์ก็ต้องระวังปัญหาความถี่เรโซแนนซ์เพราะทำให้มีกระแสและแรงดันสูงในระบบ จะเห็นว่าปัญหาที่เกิดขึ้นก็ต้องแยกพิจารณาออกเป็น 2 กรณีดังที่ได้กล่าวและสรุปไว้ดังนี้

ก) ฮาร์มอนิกที่เกิดในระบบทำให้เกิดปัญหาเรื่องความสูญเสียในระบบไฟฟ้าต่างๆในระบบ

ข) เมื่อต้องการปรับเพาเวอร์แฟคเตอร์ให้สูงขึ้นในระบบที่มีฮาร์มอนิก โดยใช้คาปาซิเตอร์ก็อาจพบกับปัญหาเรื่องของเรโซแนนซ์ตรงกับความถี่ฮาร์มอนิก

ในตอนนี้จะกล่าวรายละเอียดเกี่ยวกับปัญหาที่เกิดจากฮาร์มอนิกและมีผลเสียต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าและระบบ

ไม่ว่าจะเป็นปัญหาของคลื่นเบี่ยงเบน มาจากฮาร์มอนิกหรือเนื่องจากความไม่สมดุลของเฟสก็ทำให้ค่าใช้จ่ายในระบบสูงขึ้น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะ

- ก) ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลง
- ข) ความสูญเสียของมอเตอร์สำรอง (standby motor) เพิ่มขึ้น
- ค) ความสูญเสียในหม้อแปลงคาปาซิเตอร์ สายและสวิตช์เกียร์สูงขึ้น
- ง) กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพิ่มขึ้น
- จ) เพิ่มเงินลงทุนระบบมากขึ้น
- ฉ) คุณภาพของผลผลิตลดลง
- ช) ค่าบำรุงรักษาเพิ่มขึ้น
- ซ) ค่าใช้จ่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

2.6 แรงดันไฟฟ้าและกระแสเนื่องจากฮาร์มอนิก

การวิเคราะห์ระบบเพื่อดูผลเนื่องจากเรโซแนนซ์ต้องอาศัยการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกต่างๆที่ไหลในระบบและคำนวณแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่เกิดจากกระแสรีเรคตีฟเฮอร์และอุปกรณ์อย่างอื่นที่คล้ายคลึงกันแทนด้วยแหล่งกำเนิดกระแส (current source) และเตหาลอมแบบอาร์คแทนได้ด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า (voltage source)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ผลจากฮาร์มอนิกควรมีค่าต่างๆ ดังนี้ประกอบการพิจารณา

$$KVA = \sum VhIh = (Vh^2 / yh) \tag{2.9}$$

$$Vp = \sum Vhm \tag{2.10}$$

$$I_{rms} = (\sum Ih^2)^{1/2} \tag{2.11}$$

$$V_{rms} = (\sum Vh^2)^{1/2} \tag{2.12}$$

สมการที่ 2.9 มีไว้เพื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่คาปาซิเตอร์เนื่องจากฮาร์มอนิกทั้งหมดที่เกิดขึ้น สมการที่ 2.10 มีไว้เพื่อหาขนาดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดเนื่องจากฮาร์มอนิกทั้งหมด และ I_{rms} , V_{rms} คือค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า ที่รวมผลของฮาร์มอนิกทั้งหมดและอื่นๆที่ทำให้เกิดความร้อนมากเกินไปเนื่องจากไหลของกระแสฮาร์มอนิก

แรงดันไฟฟ้าและกระแสตามสมการข้างต้นมีไว้เพื่อพิจารณาว่า จะมีผลต่อคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในระบบหรือไม่เพราะคาปาซิเตอร์ที่ใช้กันนั้นถูกออกแบบให้มีอัตราดังนี้ (ANSI C55.1)

KVA สูงสุด	135% ของอัตรากำลังไฟฟ้าของคาปาซิเตอร์
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด	110% ของอัตราแรงดันไฟฟ้าของคาปาซิเตอร์
กระแสไฟฟ้าสูงสุด	160% ของอัตรากระแสไฟฟ้าของคาปาซิเตอร์

และคาปาซิเตอร์ที่ถูกออกแบบและสร้างจากผู้ผลิตตั้งนั้นเพื่อให้มีเปอร์เซ็นต์ความปลอดภัยเพื่อไว้สำหรับแรงดันไฟฟ้าเกินหรือแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น

2.7 การแก้ปัญหาฮาร์มอนิก

ในระบบไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์กำเนิดฮาร์มอนิกเมื่อใส่คาปาซิเตอร์เข้าไปในระบบอาจเกิดเรโซแนนซ์ในระบบที่ความถี่ตรงหรือใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิกในกรณีดังกล่าว เกิดแรงดันไฟฟ้าและกระแสสูงในระบบซึ่งอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายได้ วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าว สามารถทำได้หลายประการดังนี้

ก) เปลี่ยนตำแหน่งหรือขนาดของคาปาซิเตอร์เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิก

ข) ใส่ LC ฟิวเจอร์ที่ตำแหน่งแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกและจูน (tune) ให้เข้ากับฮาร์มอนิกที่เกิดปัญหา LC ฟิวเจอร์ดังกล่าวจะให้อิมพีแดนซ์ต่ำที่ฮาร์มอนิกที่มีปัญหา ในกรณีที่ใส่ฟิวเจอร์เข้าไปแล้วต้องตรวจสอบเช็คต่อไปว่าอาจเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ตรงกับฮาร์มอนิกตัวอื่นหรือไม่ ถ้าเป็นอย่างนั้นก็ต้องใส่ LC ฟิวเจอร์กรองฮาร์มอนิกที่มีปัญหาตัวต่อไปอีก

ค) ใส่ L อุปกรณ์เข้าไปกับคาปาซิเตอร์เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ไม่ให้ใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิกหรือใส่ L เข้าไปอนุกรมกับคาปาซิเตอร์เพื่อใช้เป็นฟิวเจอร์เลย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1 การเปลี่ยนตำแหน่งหรือขนาดคาปาซิเตอร์

ปัญหาของเรโซแนนซ์ที่มีความถี่ตรงหรือใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิกที่เกิด สมควรให้มีการแก้ไขด้วยการเปลี่ยนตำแหน่งหรือขนาดคาปาซิเตอร์ก่อนเป็นอันดับแรก เพราะเป็นวิธีที่เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด พิจารณาความถี่เรโซแนนซ์ของระบบที่เกิดขึ้นตามสมการอีกครั้ง

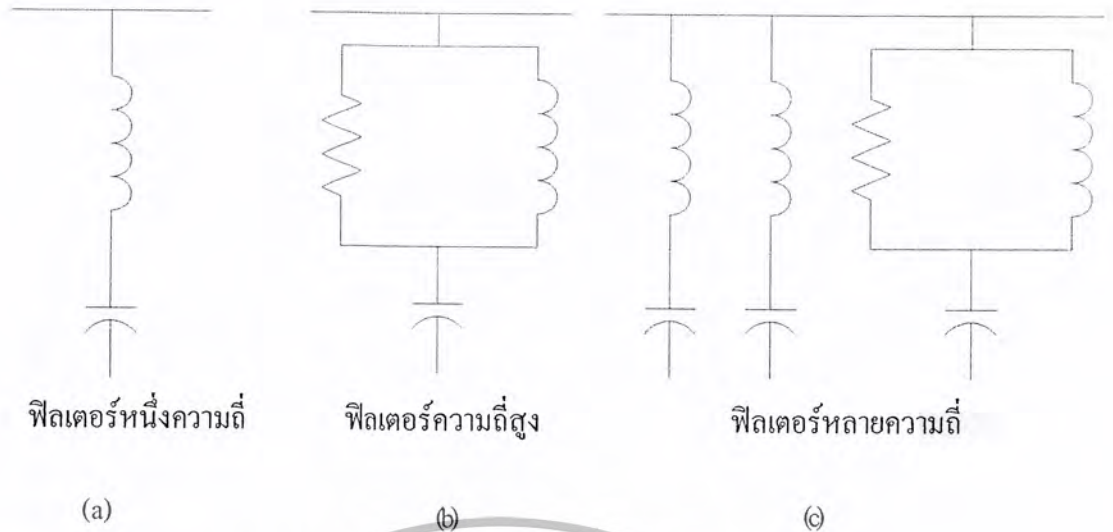
$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{X_c}{X_L}} = \sqrt{\frac{KVA_{sc}}{KVA_c}} \quad (2.13)$$

จากสมการที่ 2.13 จะเห็นว่าความถี่เรโซแนนซ์ f_p เปลี่ยนแปลงโดยการเปลี่ยนแปลงค่าของ L และ C ดังนั้นในการเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งของคาปาซิเตอร์ในระบบก็เพื่อเปลี่ยนค่า L ที่จะมาอนุกรมหรือขนานกับคาปาซิเตอร์ในการเกิดเรโซแนนซ์อนุกรมหรือขนานตามลำดับ แต่ในทางปฏิบัติโอกาสที่จะแก้ไขปัญหาร่วมกันด้วยวิธีดังกล่าวอาจจะไม่ประสบความสำเร็จมากนัก เพราะการเปลี่ยนแปลงของ L แต่ถ้ายากเปลี่ยนตำแหน่งของคาปาซิเตอร์จากต้นทางของระบบไปติดตั้งที่โหลดหรือจากการเปลี่ยนไปติดตั้งที่ต้นทางของระบบในกรณีเช่นนี้อาจแก้ไขปัญหาก็ได้ แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดโหลดด้วยมิฉะนั้นการนำคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่ไปติดตั้งที่โหลดขนาดเล็กอาจมีปัญหาทางด้านแรงดันไฟฟ้าเกินเกิดขึ้น ซึ่งจะกลายเป็นการแก้ไขปัญหาร่วมกันแต่ไปสร้างปัญหาอย่างอื่นไว้อีก

ในการเปลี่ยนแปลงขนาดของคาปาซิเตอร์ก็ช่วยแก้ปัญหาร่วมกันเพราะทำให้ f_p ในสมการที่ 2.13 เปลี่ยนแปลงไป การเปลี่ยนแปลงขนาดของคาปาซิเตอร์นั้นต้องคิดเสมอว่าถ้าเปลี่ยนแปลงขนาดของคาปาซิเตอร์ไปมากเกินไปอาจทำให้ การแก้ไขปัญหาวอร์เทจเฟลเตอร์ด้วยคาปาซิเตอร์มีผลไม่ดีขึ้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงขนาดของคาปาซิเตอร์ต้องให้อยู่ในเกณฑ์ที่ไม่สูญเสียผลทางด้าน การแก้ไขเพาเวอร์แฟคเตอร์จนอยู่นอกเกณฑ์ที่จะยอมรับได้ เช่น จุดประสงค์ต้องการปรับปรุงระบบให้มีเพาเวอร์แฟคเตอร์สูงกว่า 0.85 แต่มีปัญหาทางด้านฮาร์มอนิกและเปลี่ยนแปลงขนาดของคาปาซิเตอร์จนเพาเวอร์แฟคเตอร์จำเป็นต้องต่ำกว่า 0.85 ก็ถือว่าการแก้ไขปัญหาดังกล่าวไม่ได้ผล

2.7.2 การใส่ LC ฟิลเตอร์

ฟิลเตอร์เพื่อเลือกใช้สำหรับเป็นทางผ่านให้ฮาร์มอนิกไหลออกจากระบบได้ง่าย โดยไม่เข้าไปรบกวนในระบบมิได้หลายแบบดังแสดงในรูปที่ 2.4 การเลือกใช้ชนิดของฟิลเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.4 นั้นอยู่กับความต้องการที่จะกำจัดฮาร์มอนิกมากน้อยเพียงใด



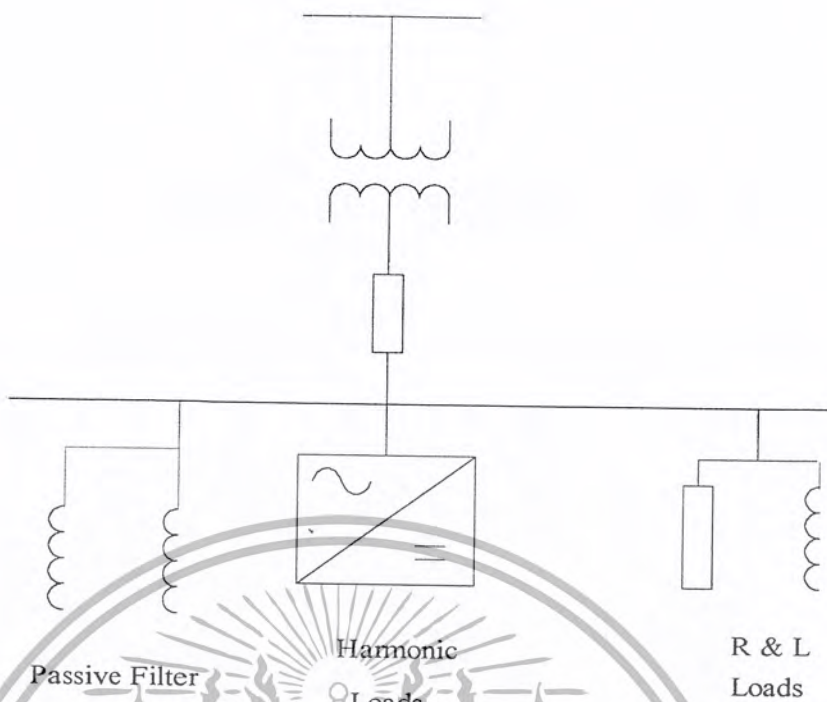
รูปที่ 2.5 ฟิวเตอร์เพื่อกำจัดฮาร์มอนิก

- (a) ฟิวเตอร์กำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะความถี่
- (b) ฟิวเตอร์กำจัดฮาร์มอนิกความถี่สูง
- (c) ฟิวเตอร์กำจัดฮาร์มอนิกหลายๆความถี่

รูปที่ 2.5 (a) เป็นฟิวเตอร์ประเภทแบบที่ถูกต้องที่สุดและใช้แพร่หลายที่สุด แต่ถ้าใช้รีแอคเตอร์ไม่ถูกต้อง ความถี่ฮาร์มอนิกที่พุ่งไว้อาจลดลงในระดับที่ยอมรับได้ แต่อาจเกิดเรโซแนนซ์ที่ฮาร์มอนิกอื่นๆ ฟิวเตอร์ในรูป 2.5 (b) ใช้เมื่อต้องการกำจัดฮาร์มอนิกที่ความถี่สูง ส่วนฟิวเตอร์ในรูป 2.5 (c) ประกอบด้วยฟิวเตอร์ที่กำจัดฮาร์มอนิกที่รุนแรง 2 ความถี่และฟิวเตอร์ทางขวาสุดของรูปมีไว้เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกที่สูงๆ

ในการแก้ปัญหาจากฮาร์มอนิกจะใช้อุปกรณ์กรองฮาร์มอนิกซึ่ง หมายถึง ชุดอุปกรณ์ที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้าแล้วสามารถกรองฮาร์มอนิกออกจากระบบไฟฟ้าได้ หรืออีกนัยหนึ่งคือดูดฮาร์มอนิกออกจากระบบไฟฟ้าโดยให้ฮาร์มอนิกไหลผ่านตัวมันหรือสร้างกระแสไปชดเชยจนฮาร์มอนิกหายไป ชนิดของอุปกรณ์กรองฮาร์มอนิกมีดังนี้

1). พาสซีฟฟิวเตอร์ (Passive Filter) หมายถึง อุปกรณ์กรองฮาร์มอนิกที่ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ ตัวต้านทาน (R) รีแอคเตอร์ (L) และคาปาซิเตอร์ (C) ที่ได้รับการออกแบบให้มีค่า R, L และ C ที่สัมพันธ์กันจนประพาคตัวเสมือนลัดวงจร (Low Impedance) สำหรับฮาร์มอนิก แต่เป็นเพียงโหลดธรรมดาตัวหนึ่งสำหรับไฟฟ้า 50Hz ดังนั้นกระแสฮาร์มอนิกในระบบจะเห็นพาสซีฟฟิวเตอร์เป็นเสมือนลัดวงจรและกระแสไหลผ่านพาสซีฟฟิวเตอร์โดยแทบจะไม่รบกวนระบบไฟฟ้าเลย พาสซีฟฟิวเตอร์เป็นวงจรไฟฟ้าต่างๆ แต่ต้องทำการออกแบบและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่ซับซ้อนรวมถึงการผลิตตัว R, L & C ที่มีความคาดเคลื่อนต่ำจึงสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและปลอดภัยพาสซีฟฟิวเตอร์ มีข้อจำกัดในการใช้งานที่ไม่ยืดหยุ่น การต่อพาสซีฟฟิวเตอร์ในระบบไฟฟ้าจะแสดงในรูปที่ 2.6



รูป 2.6 การต่อพาสซีฟฟิลเตอร์ในระบบไฟฟ้า

พาสซีฟฟิลเตอร์ในระบบไฟฟ้ายังแยกออกอีกเป็น คิวจูนฟิลเตอร์ และจูนฟิลเตอร์

- คิวจูนฟิลเตอร์ (Detuning Filter) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สามารถแก้ไขปัญหาระโซแนนซ์แบบขนานได้ (Parallel Resonance) ในระบบไฟฟ้าที่มีปริมาณฮาร์มอนิกอยู่ปริมาณหนึ่งแต่ ยังไม่เกิดปัญหาฮาร์มอนิกเมื่อมีการติดตั้งคาปาซิเตอร์จำนวนหนึ่ง เพื่อปรับปรุงค่าแอมเพดเจอร์จะทำให้เกิดวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานซึ่งมีความถี่เรโซแนนซ์ตรงกับฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้า เกิดการขยายปริมาณฮาร์มอนิกให้มีปริมาณสูงชันอย่างมาก จนทำให้เกิดความเสียหายในระบบไฟฟ้า

อีกนัยหนึ่งในระบบไฟฟ้าที่มีฮาร์มอนิกปะปน และมีคาปาซิเตอร์ติดตั้งอยู่เพื่อปรับปรุงค่าแอมเพดเจอร์ถึงแม้จะเกิดวงจรเรโซแนนซ์ขนานขึ้น แต่ก็ไม่มีปัญหาแต่อย่างใด เนื่องจากในระบบไฟฟ้าไม่มีฮาร์มอนิกไปกระตุ้นปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ หากภายหลังมีการเพิ่มโหลดที่สร้างฮาร์มอนิกเข้าไปในระบบไฟฟ้ามากพอ ปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะไปกระตุ้นให้เกิดขึ้นจะไปกระตุ้นให้เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์แบบขนาน ส่งผลให้ปริมาณฮาร์มอนิกถูกขยายจนทำให้เกิดความเสียหายในระบบไฟฟ้า

ต้นเหตุของปัญหา คือ การมีปริมาณฮาร์มอนิกปริมาณหนึ่งบวกกับการมีคาปาซิเตอร์จำนวนหนึ่งที่ทำให้เกิดค่าความถี่เรโซแนนซ์ตรงกับฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบพอดี

การแก้ปัญหอาจทำได้โดยการปรับเปลี่ยนขนาดของคาปาซิเตอร์ เพื่อไม่ให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ตรงกับฮาร์มอนิกที่มีอยู่ หรือการลดปริมาณฮาร์มอนิกโดยใช้อุปกรณ์กรองฮาร์มอนิก ในทางปฏิบัติ

การปรับเปลี่ยนขนาดของคาปาซิเตอร์ อาจทำได้ยากเพราะระบบไฟฟ้าจำเป็นต้องมีค่าแอมเพดเจอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น สมุดรื้อให้หนึ่งฉบับส่งมอบแก่ผู้ดำเนินการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงเกินเกณฑ์ของการไฟฟ้า ในขณะที่การลดปริมาณฮาร์มอนิกโดยตรงจะเป็นการลงทุนสูงเกินไปและแก้ปัญหาไม่ตรงจุด

วิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดคือ การตัดแปลงคาปาซิเตอร์ให้เป็นดีจูนฟิลเตอร์ ดีจูนฟิลเตอร์คือคาปาซิเตอร์ มีการต่อรีแอคเตอร์พันรอบแกนเหล็กต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์จะทำให้เกิดวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานและแบบอนุกรมพร้อมๆกัน โดยวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานที่เกิดขึ้นจะมีความถี่เรโซแนนซ์แบบขนานที่อยู่ต่ำกว่าความถี่ของทุกๆฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า จึงไม่เกิดการขยายฮาร์มอนิกขึ้นและวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมที่เกิดขึ้นจะช่วยกรองฮาร์มอนิกบางส่วนออกจากระบบไฟฟ้าอีกด้วย

การทำงานของดีจูนฟิลเตอร์จะเหมือนกับคาปาซิเตอร์แบบคู่ทุกประการ โดยมีหน้าที่หลักในการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ เสริมด้วยความสามารถพิเศษในการแก้ปัญหาเรโซแนนซ์แบบขนาน อย่างไรก็ตามคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในดีจูนฟิลเตอร์จะออกแบบมาพิเศษให้สามารถทนแรงดันได้สูงขึ้นเนื่องจากการมีรีแอคเตอร์ต่อแบบอนุกรมกันอยู่และการต้องทนต่อปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่ฟิลเตอร์ช่วยกรองมาบางส่วน ทั้งนี้ดีจูนฟิลเตอร์ไม่สามารถใช้งานได้ในระบบที่มีฮาร์มอนิกต่ำกว่าอันดับที่ 5

ดีจูนฟิลเตอร์ได้รับการออกแบบมา เป็น โมดูลมาตรฐานที่สามารถนำมาประกอบใช้งานเพื่อปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ในระบบไฟฟ้า และแก้ปัญหาเรโซแนนซ์แบบขนาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

- จูนฟิลเตอร์ (Tuned Filter) โดยจูนฟิลเตอร์มีองค์ประกอบเช่นเดียวกับดีจูนฟิลเตอร์โดยทำหน้าที่หลักในการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์และยังสามารถกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าได้ด้วย ในระบบไฟฟ้าที่มีฮาร์มอนิกปริมาณมากๆ จนเกิดปัญหาฮาร์มอนิกอย่างรุนแรงถึงแม้ยังไม่ได้ต่อคาปาซิเตอร์เข้าไปในระบบไฟฟ้าก็ได้ จำเป็นต้องมีการกรองฮาร์มอนิกออกจากระบบไฟฟ้า

วิธีการแก้ คือการตัดแปลงคาปาซิเตอร์ให้เป็นวงจรจูนฟิลเตอร์ เช่นเดียวกับดีจูนฟิลเตอร์ โดยเลือกขนาดรีแอคเตอร์ให้เหมาะสมจนเกิดวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมตรงกับฮาร์มอนิกที่มีในระบบไฟฟ้า วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมจะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำมากที่สุด เรโซแนนซ์ที่ตรงกับความถี่ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น ดังนั้นกระแสฮาร์มอนิกที่มีความถี่ตรงกับจูนเรโซแนนซ์จะเห็นจูนฟิลเตอร์ เสมือนลัดวงจรและไหลมายังจูนฟิลเตอร์โดยไม่ไหลไปยังโหลดอื่นๆ ของระบบไฟฟ้า

เนื่องจากจะต้องรับภาระในการกรองฮาร์มอนิกปริมาณมากจากระบบไฟฟ้า จูนฟิลเตอร์จึงต้องได้รับการออกแบบเป็นพิเศษ โดยใช้อุปกรณ์ขนาดใหญ่มีค่าทางไฟฟ้าที่แม่นยำและมีการคำนวณอย่างแม่นยำทางปฏิบัติการออกแบบติดตั้งจูนฟิลเตอร์มีรายละเอียดทางเทคนิคมาก และมีข้อจำกัดในการใช้งานหลายประการเช่น

- จูนฟิลเตอร์ อาจเกิดโอเวอร์ โหลดได้ง่าย หากปริมาณกระแสที่เกิดขึ้นมากกว่าที่คำนวณได้จึงจำเป็นต้องมีการป้องกันที่ดีพอ การเพิ่มโหลดฮาร์มอนิกในอนาคตหรือหรือการมีมลภาวะทางฮาร์มอนิกจากระบบไฟฟ้ามารบกวน จะทำให้จูนฟิลเตอร์เสียหายได้
- จูนฟิลเตอร์ ไม่สามารถออกแบบให้แยกเป็นชิ้นการทำงานย่อยๆ ได้ จึงไม่สามารถเปลี่ยนแปลงโหลดได้อย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีค่าการสูญเสียทางไฟฟ้าสูง เนื่องจากใช้รีแอคเตอร์ขนาดใหญ่ และใช้พื้นที่มากในการติดตั้ง
- จะเริ่มทำการกรองฮาร์มอนิกต่ำสุดเสมอ โดยเรียงจากน้อยไปหามากในกรณีที่โหลดเพิ่มขึ้น และจะเรียงลำดับการปลดออกจากรวมกันน้อยในกรณีที่โหลดลดลง โดยไม่สามารถข้ามขั้นคอนได้
- การออกแบบต้องการข้อมูลของระบบไฟฟ้า ที่ละเอียดมีการคำนวณที่ซับซ้อนและต้องการอุปกรณ์ที่มีความแม่นยำสูง
- การเพิ่มโหลดในอนาคตก็ไม่สามารถ ทำได้นอกจากออกแบบจูนฟิลเตอร์ตัวใหม่มาติดตั้งแทน

ข้อดีข้อเสียของพาสซีฟฟิลเตอร์

ข้อดี 1. เป็นวงจรที่ง่าย

2. ค่า EMI (Electromagnetic Interference) ต่ำ

3. ค่าเพนเวอร์แฟคเตอร์สูงสุดเท่ากับ 0.9

ข้อเสีย 1. มีขนาดและน้ำหนักมาก เนื่องจากใช้ตัวเหนี่ยวนำขนาดใหญ่

2. ราคาแพง

3. มีค่า %THD สูง

4. มีค่าการสูญเสียมาก เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำ

5. มีผลกระทบกับค่าเฉลี่ยของแรงดัน

2). แอคทีฟฟิลเตอร์ (Active Filter) จากข้อจำกัดมากมายและง่ายต่อการเสียหายหากเกิด โอเวอร์โหลด จึงมีการใช้แอคทีฟฟิลเตอร์เพื่อแก้ปัญหารวมกันแทนจูนฟิลเตอร์

แอคทีฟฟิลเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์คืออุปกรณ์กรองฮาร์มอนิกที่ใช้กำลัง (IGBT) ประกอบกับระบบควบคุมการทำงานแบบอิเล็กทรอนิกส์ (DSP, ไมโครคอนโทรลเลอร์) โดยจะทำหน้าที่ตรวจวัดกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าทำการวิเคราะห์และคำนวณ แล้วจึงฉีดกระแสฮาร์มอนิกในเฟสตรงกันข้ามกับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ผลที่ได้คือกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าถูกหักออกไปจนเหลือแค่กระแส 50Hz แอคทีฟฟิลเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถกรองฮาร์มอนิกได้ดีที่สุด แต่จะมีราคาสูงกว่าจูนฟิลเตอร์ในการประยุกต์ใช้งานส่วนใหญ่

ตารางที่ 2.2 สรุปตารางเปรียบเทียบอุปกรณ์แก้ปัญหาระบบอัตโนมัติ

รายละเอียดแต่ละฟิลเตอร์	ดีจูนฟิลเตอร์	จูนฟิลเตอร์	แอคทีฟฟิลเตอร์
- ปรับปรุง pf.	ได้	ได้	ได้
- กรองฮาร์มอนิกส์	บางส่วน	ได้	ได้
- เพิ่มเคมได้ภายหลัง	ได้	ไม่ได้	ได้
- ต้องมีการศึกษาอย่างละเอียด	ไม่	ใช่	ไม่
- อาจเกิดโอเวอร์โวลตได้ง่าย	ไม่	ใช่	ไม่
- ความสามารถในการตาม โหลด	ช้า	ช้ามาก	เร็วมาก
- ขนาด	ใหญ่	ใหญ่สุด	เล็กสุด
- ความซับซ้อนในการใช้งานและติดตั้ง	ง่าย	ยาก	ง่าย
- ความสูญเสีย	สูง	สูงมาก	ต่ำ
- กรองฮาร์มอนิกส์ได้แม้ pf. ใกล้เคียง 1.0	ไม่ได้	ไม่ได้	ได้
- เลือกกรองเฉพาะฮาร์มอนิก	ไม่ได้	บางส่วน	ได้
- ความคลาดเคลื่อนของจุดจูน	มีบ้าง	มีบ้าง	ไม่มี
- การทำงานแบบ closed loop control	ไม่ใช่	ไม่ใช่	ใช่

2.7.3 การเพิ่มรีแอกเตอร์

การแก้ปัญหาระบบอัตโนมัติที่นิยมใช้กันและได้ผลก็คือ การเพิ่มรีแอกเตอร์เข้าไปอนุกรมกับคาปาซิเตอร์โดยจูน ให้มีเรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำกว่าฮาร์มอนิกที่ 5 ใช้ได้กับระบบที่มีความถี่ตั้งแต่ที่ 5 ขึ้นไปเกิดขึ้น วิจารณ์กล่าวทำหน้าที่เหมือนความเหนี่ยวนำที่ฮาร์มอนิกที่ 5 หรือสูงกว่าดังนั้นการเรโซแนนซ์เข้ากับ ความเหนี่ยวนำของระบบ ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ที่ฮาร์มอนิกที่กำเนิดจากอุปกรณ์กำเนิดฮาร์มอนิก

ต่อมาพิจารณาว่ารีแอกเตอร์ที่ใส่อนุกรม กับ คาปาซิเตอร์นั้น ควรมีขนาดเท่าใดเพื่อจูนให้มี เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำกว่าฮาร์มอนิกที่ 5

ขนาดของรีแอคเตอร์เพื่อจูนให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ฮาร์มอนิกที่ 5 หาได้จาก

$$2\pi f_s L = \frac{1}{2\pi f_s C} \quad (2.14)$$

$$2\pi \times 5 \times f_1 L = \frac{1}{2\pi \times 5 \times f_1 C}$$

$$5X_L = \frac{X_C}{5}$$

$$\frac{X_L}{X_C} = \frac{1}{25} = 0.04 \quad (2.15)$$

f_1 คือความถี่ฮาร์มอนิกที่ 1, f_s คือฮาร์มอนิกที่ 5, X_L คือรีแอคเตอร์ที่ความถี่ปกติ, X_C คือรีแอคแตนซ์คาปาซิเตอร์ปกติ

จากสมการที่ 2.12 พบว่ารีแอคเตอร์ขนาด 4% ของรีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์เมื่ออนุกรมเข้ากับคาปาซิเตอร์จะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่ 5 และจากสมการที่ 2.12 ถ้าใส่รีแอคเตอร์มากกว่า 4% ก็ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่มีความถี่ต่ำกว่าฮาร์มอนิกที่ 5 ถ้าใส่รีแอคเตอร์น้อยกว่า 4% ก็อาจทำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ใกล้เคียงกับฮาร์มอนิกที่ 7,9 หรือ 11 เป็นต้น

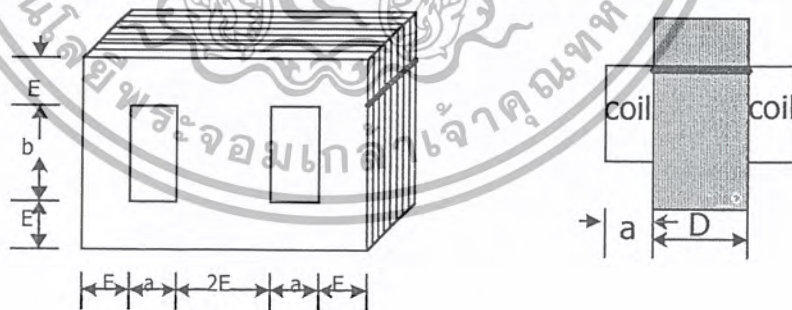
ดังนั้นในการหลีกเลี่ยงเพื่อไม่ให้คาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งไว้ให้เรโซแนนซ์กับ ความเหนี่ยวนำของระบบที่มีความถี่ฮาร์มอนิกก็สามารถทำได้โดยเพิ่มรีแอคเตอร์ค่ออนุกรมเข้าไป ขนาดของรีแอคเตอร์ที่เพิ่มเข้าไปนั้นต้องมากกว่า 4% เป็นอย่างน้อยเพื่อไม่ให้เกิดเรโซแนนซ์ระหว่างรีแอคเตอร์ที่ใส่เข้าไปกับคาปาซิเตอร์ที่ใช้กันมีตั้งแต่ 4.5 - 7% การใช้ขนาด % ของรีแอคเตอร์ซึ่งมากกว่า 4% ขึ้นไปก็มีผลดีในกรณีที่คาปาซิเตอร์บางหน่วยลัดวงจรจะทำให้ X_C มากขึ้น ความถี่ของเรโซแนนซ์ก็มากขึ้นทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ไปตรงกับความถี่ฮาร์มอนิกได้ยากขึ้น

2.8 การออกแบบตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสมด้วยแกน EI

การออกแบบตัวเหนี่ยวนำมีอยู่หลายวิธีการ เพื่อพัฒนาการสร้างความเหนี่ยวนำที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างเช่น Power-Convertor, Power-inverter และ Pulse-width-modulated (PWM) inverter เราสามารถออกแบบตัวเหนี่ยวนำ โดยปรับปรุงทางภาคปฏิบัติ ดังแสดงให้เห็นในหนังสือการออกแบบของ Mclyman [1988] เพื่อคำนวณหาข้อมูลของแกนเหล็กให้ได้ตามต้องการ เช่น iron, power, ferrite และ ferro ซึ่งใน Catalogue จะมีตาราง, กราฟ สำหรับงานออกแบบที่ยากๆ การปรับปรุงเหล่านี้บางครั้งอาจจะไม่เหมาะสมสำหรับงานเฉพาะอย่างเพราะมีข้อจำกัดในการใช้ออกแบบ

ในส่วนของการใช้ numerical จะเหมาะสมสำหรับการออกแบบตัวเหนี่ยวนำในแกน EI ซึ่งการเหนี่ยวนำของแกนเหล็กมีค่าสูงมาก และในการออกแบบสามารถปรับขนาดเหล็กได้ง่ายเพราะสามารถปรับขนาดเหล็กได้ง่ายเพราะสามารถปรับช่องอากาศได้ตามต้องการ จุดประสงค์ของการออกแบบนี้คือ ให้น้ำหนักรวมมีค่าน้อยที่สุด โดยได้กำหนดให้ [4] พื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านเป็น A_w กระแสสูงสุดของขดลวดเป็น I_p และค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการเป็น L ค่าคงที่ควรรู้ในการออกแบบเช่น ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงสุดของแกนเหล็กคือ B_{max} ความหนาแน่นของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าคือ D_w ความหนาแน่นของแกนเหล็กคือ D

รูปร่างของตัวเหนี่ยวนำแกน EI (ได้แสดงในรูปที่(2-1))ซึ่ง a คือช่องว่างของช่องอากาศ b คือความยาวของช่องว่าง $2E$ คือความกว้างของ tongue และ D คือความหนาของแกนเหล็กจุดมุ่งหมายในการออกแบบนี้คือให้ได้รูปร่างของตัวเหนี่ยวนำที่เหมาะสมและมีน้ำหนักเบาที่สุดดังนั้นจึงต้องหาค่า $a, b, 2E$ และ D ด้วยวิธีต่าง



รูปที่ 2.7 E-I Core Configuration

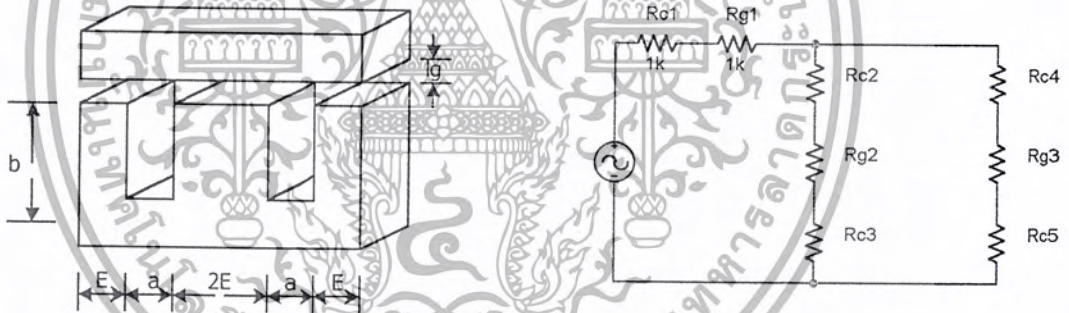
2.8.1 แบบจำลองของค้วเหนี่ยวนำแกน EI

ค่าเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L)จะเป็นอัตราส่วนระหว่าง จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวข้องทั้งหมดในขดลวด(Flux linkage)กับกระแสในขดลวดซึ่งมีหน่วยทางไฟฟ้าเป็นเฮนรี(Henry,H)เขียนเป็นสมการได้คือ

$$L = \frac{\lambda}{I} = \frac{N\phi}{I} = \frac{NB_m A_w F_s}{I} \tag{2.16}$$

เมื่อ

- N คือจำนวนรอบของขดลวด
- A_c คือพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก
- λ คือฟลักซ์ที่เกี่ยวข้อง
- B_{max} คือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
- I คือกระแสที่ไหลผ่านค้วเหนี่ยวนำ



รูปที่ 2.8 Magnetic Circuit

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}} \tag{2.17}$$

$$= \frac{N^2(\mu_1\mu_2ED)}{(2ED + a + b)\mu_2 + \mu_1 l_g}$$

$$= \frac{\mu_0 N^2 ED}{l_g}$$

เมื่อ $b = 3E, a = E, \mu_1 \gg \mu_2, \mu_2 = \mu_0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างอากาศ I_g กับความเหนียวนำ (L) จะแปรผกผันกัน

2.8.2 ข้อพิจารณาในการออกแบบตัวเหนียวนำแกน EI

นักออกแบบต้องสังเกต ในการออกแบบของตัวเหนียวนำในส่วนของารออกแบบมีสิ่งที่ต้องพิจารณาอยู่ 2 อย่าง เพื่อให้ได้รูปร่างของตัวเหนียวนำแกน EI ที่เหมาะสมคือ

$$B_{max} = A_w F_s N = L_d I_p \tag{2.18}$$

ได้เลือก Magnesil (Si 3%, Fe 97%) เป็นแกนแม่เหล็กซึ่งใช้ในการออกแบบตามตารางที่(2.1)จะสังเกต ได้ว่าลักษณะของ Magnesil คือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กสูงและความหนาแน่นวัสดุต่ำ

ตารางที่ 2.3 ลักษณะเฉพาะของแกนแม่เหล็กไฟฟ้า

Material	Percentage	B_{max} (tesla)	Density(g/cm)
Magnesil	3%Si,97%Fe	1.6	7.63
48 Alloy	48%Ni,50%Fe	1.2	8.19
Orthonol	50%Ni,50%Fe	1.5	8.24

พื้นที่ช่องว่าง

$$\frac{A_w N}{F_w} = ab \tag{2.19}$$

(2.19)

ซึ่ง F_w = (Window Utilization Factor)คือพื้นที่ช่องว่างขดลวดที่เกิดขึ้นบนแกนเหล็กที่นำมาพัน

ปัจจัยที่มีผลอยู่ 4 อย่าง คือ ฉนวนของขดลวด,ขดลวดที่วางพาดกัน,พื้นที่กระสวย (bobbin area) และฉนวนที่ป้องกันระหว่างขดลวดที่พันกันอยู่แต่ละชั้น

ตัวอย่างของค่านี้ประมาณ 0.4 ซึ่งค่านี้ทำให้แน่ใจได้ว่าค่าประสิทธิภาพของช่องว่างแกนเหล็กเพียงพอในการพัน

2.8.3 ข้อกำหนดในการออกแบบ

ในการออกแบบตัวเหนียวนำของโครงการนี้ จะอาศัยสมการ 2 ลักษณะอันได้แก่สมการเป้าหมายและสมการเงื่อนไขซึ่งจะกล่าวต่อไป

สมการเป้าหมาย(Objective Funtion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโครงการนี้ได้พิจารณาเป้าหมาย 3 ประการคือ

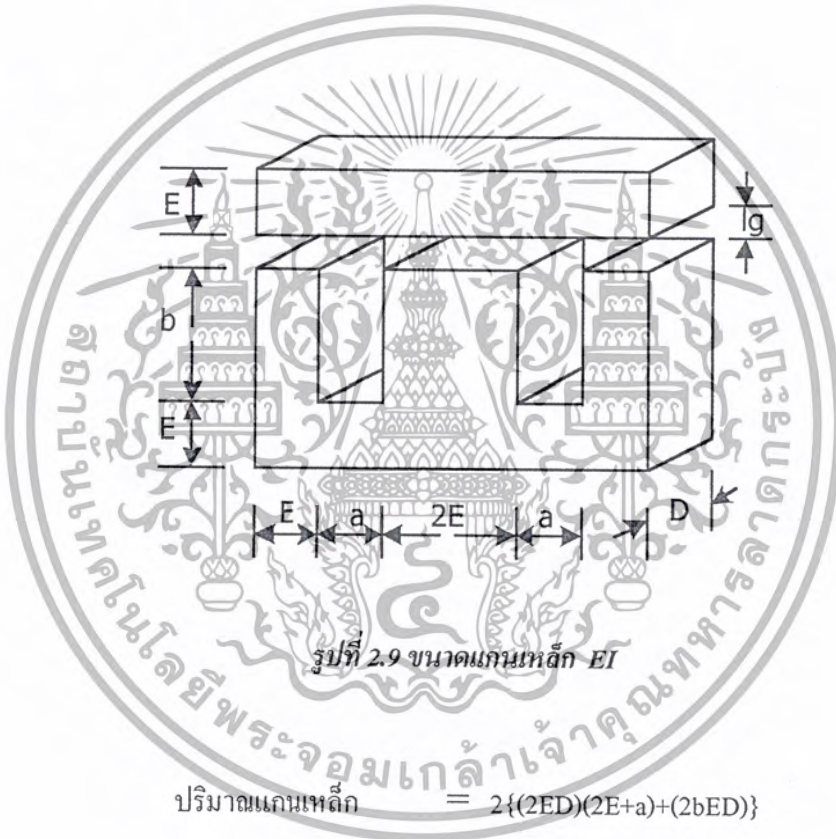
1. น้ำหนักเบา
 2. ราคาถูกที่สุด
 3. ประสิทธิภาพดีที่สุด หรือมีการสูญเสียต่ำที่สุด
- ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้

$$f_{weight} = \text{น้ำหนักแกนเหล็ก} + \text{น้ำหนักขดลวด}$$

$$f_{cost} = \text{ราคาแกนเหล็ก} + \text{ราคาขดลวดตัวนำ}$$

$$f_{loss} = \text{ค่าสูญเสียแกนเหล็ก} + \text{ค่าสูญเสียขดลวดตัวนำ}$$

ดังนั้น



รูปที่ 2.9 ขนาดแกนเหล็ก EI

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรแกนเหล็ก} &= 2\{(2ED)(2E+a) + (2bED)\} \\ &= 2(2ED)(2E+a+b) \end{aligned} \tag{2.20}$$

$$\text{น้ำหนักของแกนเหล็ก} = 2D_i F_s \{2ED(2E+a+b)\} \tag{2.21}$$

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักขดลวดตัวนำ} &= A_w N D_w F_c \times (\text{เส้นรอบวงของแกนเหล็ก}) \\ &= A_w N D_w F_c [2(2E+D)] \end{aligned} \tag{2.22}$$

$$\text{ให้ MLT} = F_c [2(2E+D)] \tag{2.23}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \text{จะได้ น้ำหนักขดลวดตัวนำ} = D_w N A_w (MLT) \tag{2.24}$$

เมื่อ D_i คือความหนาแน่นของแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- D_w คือ ความหนาแน่นของตัวนำ
 F_c คือ (Pitch factor) อัตราส่วนตัวนำต่อเส้นรอบวง
 N คือ จำนวนรอบของขดลวด
 MLT คือ เส้นรอบวงเฉลี่ยของตัวนำที่พัน
 A_w คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ
 F_s คือ stacking Factor

ถ้า $a = E$ และ $b = 3E$ จะได้

$$W_{t(a,b,E,D)} = [2D_i F_s (2ED)(2E+a+b)] + \{2D_w F_c F_w ab(2E+D)\} \quad (2.25)$$

$$W_{t(ED)} = [24D_i F_s E^2 D] + [6D_w F_c F_w E^2 (2ED)] \quad (2.26)$$

เมื่อเขียนอยู่รูปฟังก์ชันจะได้

$$\begin{aligned} f_{(weight)} &= \text{น้ำหนักแกนเหล็ก} + \text{น้ำหนักลวดตัวนำ} \\ &= [24D_i F_s E^2 D] + [6D_w F_c F_w E^2 (2ED)] \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} f_{(cost)} &= (\text{ราคาแกนเหล็กต่อน้ำหนัก} \times \text{น้ำหนักเหล็ก}) + \\ &\quad (\text{ราคาขดทองแดงต่อน้ำหนัก} \times \text{น้ำหนักขดลวดทองแดง}) \\ &= [C_{core} \times (24D_i F_s E^2 D)] + [C_{copper} \times \{6D_w F_c F_w E^2 (2ED)\}] \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} f_{loss} &= (\text{กระแสยกกำลังสอง} \times \text{ความต้านทานขดทองแดง}) + \\ &\quad (\text{กำลังสูญเสียต่อน้ำหนัก} \times \text{น้ำหนักเหล็ก}) + \text{ค่าสูญเสียที่ช่องอากาศ} \\ &= I^2 R + [P_{core} \times (24D_i F_s E^2 D)] + P_{gap} \end{aligned} \quad (2.29)$$

เมื่อ

C_{core} คือราคาแกนเหล็กต่อกิโลกรัม

C_{copper} คือราคาขดตัวนำต่อกิโลกรัม

P_{core} คือค่าสูญเสียในแกนเหล็ก

P_{gap} คือค่าสูญเสียในช่องว่างอากาศ

สมการเงื่อนไข (Constrain Function)

$$N = \frac{LI}{B_{max} A_m F_s} = \frac{abF_s}{A_c} \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{B_{\max} A_m F_s a b F_s}{A_c} - LI$$

$$\frac{B_{\max} (2ED) 3E^2 F_w F_s}{A_c} - LI = 0$$

เพราะฉะนั้นจะได้ inequality constraint คือ

$$\frac{B_{\max} F_s F_w D 6E^3}{A_c} - LI = 0 \quad (2.31)$$

$$0.002 < E < 0.3$$

$$0.0005 < D < 0.3$$

โดยที่ค่า D และ ค่า E จะกำหนดให้อยู่ในช่วง Feasible เพื่อให้สามารถซื้อแกนเหล็กได้ตามท้องตลาด

2.8.4 หลักการออกแบบตัวเหนี่ยวนำโดยทั่วไป

ในการออกแบบตัวเหนี่ยวนำ (Inductance Design) สิ่งที่ต้องคำนึงในการออกแบบคือการเลือกอุปกรณ์

1. ชนิดลักษณะ โครงสร้าง และ ขนาดของแกนเหล็ก
2. ชนิดรูปร่าง ขนาด และจำนวนรอบที่ใช้ในการพันของลวดตัวนำ
3. ชนิดและลักษณะฉนวน
4. ลักษณะ โครงสร้างของ case ตลอดจนการระบายความร้อน
5. คุณสมบัติทางไฟฟ้า และเชิงกลอื่นๆ

ข้อกำหนด

1. ค่าความเหนี่ยวนำ
2. ขนาดรูปร่างรวมทั้งความถี่กระแสแรงดัน
3. กำลังสูญเสีย ประสิทธิภาพ หรืออุณหภูมิเพิ่ม (T_{nsc})
4. คุณสมบัติทางไฟฟ้า และเชิงกลอื่นๆ

ขีดจำกัด

1. ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กอิ่มตัวของแกนแม่เหล็ก
2. กำลังสูญเสียในสวิตทงแคงหรือแกนเหล็ก
3. คุณสมบัติอื่นๆ เช่น Permeability (μ), Break down voltage (Vb)

สมการของการออกแบบ

จากขีดจำกัดของแกนแม่เหล็ก (Saturation or Coreloss)

$$B_{\max} = \frac{\phi_{\max}}{S} = \frac{\lambda_{\max}}{S \cdot N} = \frac{LI_{peak}}{S \cdot N} \quad (2.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi_{\max} = \frac{LI_{\text{peak}}}{N} \text{ สนามแม่เหล็กแปรตามกระแส}$$

$$K.W = N.A_w \text{ ขีดจำกัดของหน้าตัด ; } k = 0.3-0.9$$

จากขีดจำกัดของลวดทองแดง โดยคำนึงถึงการสูญเสีย (Cu loss : P_{cu})

$$P_{cu} = I_{rms}^2 \cdot R \quad (2.33)$$

$$R = \frac{\rho l}{A_w}$$

$$J = \frac{I_{rms}}{A_w}$$

$$\text{โดยที่ } J = 100 - 1000 (A/cm^2)$$

$$P = 1.724 \times 10^{-8} (\Omega \cdot m)$$

จากวงจรแม่เหล็กและตัวเหนี่ยวนำ

$$L = N^2 P_c = \frac{N^2}{R_c} \quad (2.34)$$

$$R_c = R_m + R_g ; R_g = \frac{l_g}{\mu_0 S} \quad (2.35)$$

$$l_g = \frac{N^2 \mu_0 S}{L} \quad (2.36)$$

2.8.5 การออกแบบโดยวิธีการคำนวณแบบ Area product

การออกแบบ inductor เราจะต้องกำหนดค่าและทราบค่าดังต่อไปนี้

1. ค่ากระแสที่ต้องการใช้งาน
2. ค่า inductor ที่ต้องการในการออกแบบ (L)

ขั้นตอนในการออกแบบ

1. หาค่าโวลต์แดงจากสูตร

$$V = 2\pi fLI \quad (2.37)$$

2. หาพื้นที่หน้าตัด (A_i) และขนาดของแกนเหล็ก (2l) โดยนำค่า V จากข้อ 1. และนำค่ากระแส (A) ที่กำหนดมาแทนในสูตร

$$A_i = \frac{\sqrt{VA}}{5.58} \quad (2.38)$$

$$(2l) = \sqrt{A_i}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ A_f พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กมีหน่วยเป็นตารางนิ้ว
($2I$) มีหน่วยเป็นนิ้ว

3. หลังจากนั้นนำค่าโวลต์แดงที่ได้จากข้อ 1. และพื้นที่หน้าตัด(A_f) จากข้อ 2. ไปหาจำนวนรอบของขดลวด(N)ที่ใช้ในการพันจากสูตร

$$V = 4.44fNA_f \times (2.54)^2 \times 10^{-4} \tag{2.39}$$

4. หาขนาดลวดที่ใช้ในการพัน (A_w) จากสูตร

$$A_w = \frac{I}{J} \tag{2.40}$$

โดยที่ J คือค่า current density มีหน่วยเป็น (A/mm²)

A_w คือพื้นที่หน้าตัดลวดตัวนำ(mm²)

I คือกระแสมีหน่วยเป็น (A)

5. จากนั้นจึงมาหาค่าพื้นที่หน้าตัดรวมของลวด($A_{w(total)}$) จากสูตร

$$A_{w(total)} = N \times A_w \tag{2.41}$$

โดยที่ $A_{w(total)}$ มีหน่วยเป็น mm²

6. หาพื้นที่ที่ใช้งานจริงหรือพื้นที่หน้าตัดวง(A_R) จากสูตร

$$A_R = (31) \times (1) \times 2.54^2$$

โดยที่ A_R มีหน่วยเป็น mm²

7. ตรวจสอบพื้นที่หน้าตัดรวมของลวด($A_{w(total)}$)และพื้นที่ใช้งานจริง (A_R)ว่าสามารถพันลงไปได้หรือไม่จากเงื่อนไข

$$A_{w(total)} < 0.5(A_R)$$

หมายเหตุ หากตรวจสอบแล้วไม่เป็นไปตามเงื่อนไขจะต้องปรับพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก(A_f) โดยที่ $n \times$ ขนาดของแกนเหล็ก($2I$) และเปลี่ยนความหนาของแกนเหล็กเพิ่มขึ้นแทนแล้วกลับไปคำนวณจำนวนรอบ(N) ตามข้อ 3.เสียใหม่โดยแทนค่า(A_f)_{ใหม่}ในสูตรแทนและทำตามขั้นตอนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. หาค่าของช่องว่างอากาศจากสูตร(gap)จากสูตร

$$g = \frac{N^2 \mu_0 A_i}{2L} \quad (2.42)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

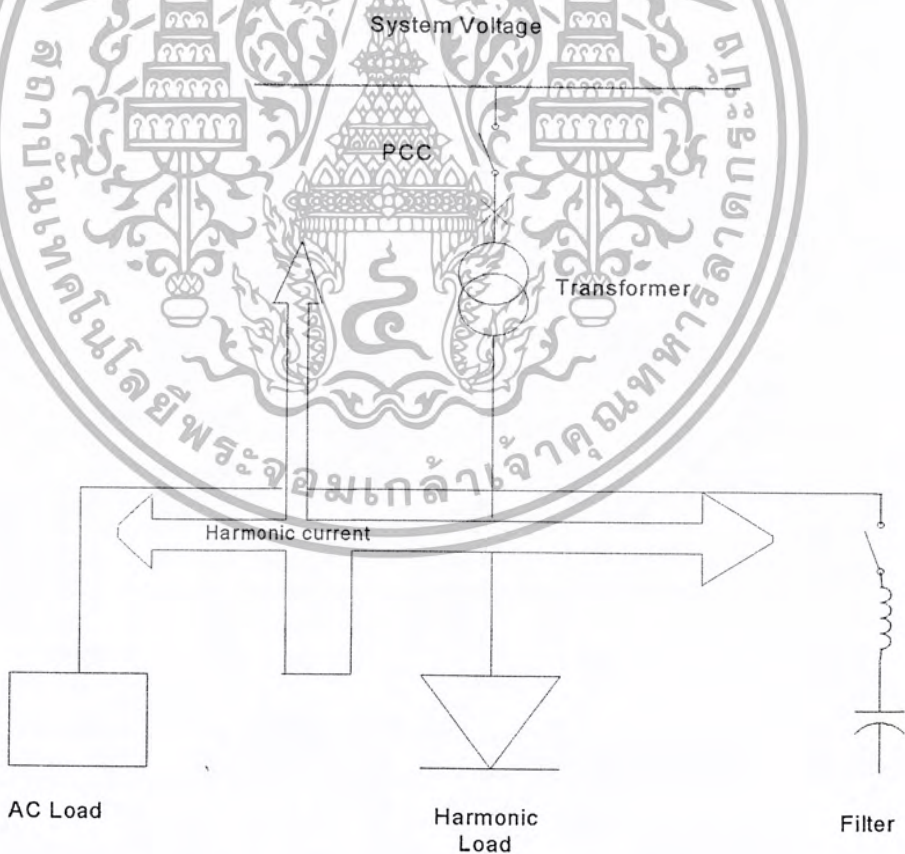
บทที่ 3

การคำนวณ และการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก

ในบทนี้จะกล่าวถึงตัวกรองฮาร์มอนิกที่มีในระบบไฟฟ้า ตัวกรองฮาร์มอนิก แนวคิดในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟตลอดจนถึงการคำนวณค่าส่วนประกอบต่างๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิก

3.1 ปัญหาฮาร์มอนิกที่มีในระบบไฟฟ้า

ระบบไฟฟ้าทั่วไปที่มีการใช้โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นและมีการต่อตัวเก็บประจุ เพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้า ซึ่งอาจเกิดสภาวะการเท่ากันของความถี่ธรรมชาติของระบบไฟฟ้ากำลังกับความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบทำให้เกิดการขยายของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบ จนเกินค่ากระแสพิคคของอุปกรณ์ ทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายหรือเกิดระเบิดได้และยังทำให้มีกระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าในระบบดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบ

การแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นสามารถทำได้โดย การติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดเดี่ยวเข้ากับระบบไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้มีกระแสฮาร์มอนิกส่วนน้อยเท่านั้นที่ไหลในระบบไฟฟ้าซึ่งจะมีค่าไม่เกินมาตรฐานฮาร์มอนิกที่กำหนดไว้

3.2 ตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า

3.2.1 คำจำกัดความเบื้องต้นของตัวกรอง (Filter)

ฟิลเตอร์เป็นตัวกรองที่ทำงานโดย อาศัยการปรับความถี่เพื่อให้ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ

คุณภาพของตัวกรอง(Q) เป็นตัวที่ใช้บอกค่าความคม ความเที่ยงตรง ในการปรับตัวกรอง โดยที่เราสามารถอาศัยคุณภาพของตัวกรองเป็นเกณฑ์แบ่งชนิดของตัวกรองได้เป็นดังกรอง โดยที่เราแบ่งได้เป็น 2 แบบ ดังนี้

1. ชนิดที่มีคุณภาพของตัวกรองสูง

โดยปกติจะมีคุณภาพอยู่ในช่วง 30-60 และใช้ในกรณีที่ปรับเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกที่ความถี่หนึ่งซึ่งมีความถี่ต่ำ

วงจรถองผ่านแถบความถี่ (band pass filter)

$$Q = \frac{X_0}{R} = \frac{\omega_n}{PB} \tag{3.1}$$

โดยที่

- X_0 เป็นค่าแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำหรือแอกแตนซ์ตัวเก็บประจุ
- R เป็นค่ารีซิสแตนซ์
- ω_n เป็นค่าความถี่ที่เราปรับในหน่วยเรเดียนต่อวินาที
- PB เป็นช่วงความถี่ผ่าน (Pass Band)

2. ชนิดที่มีคุณภาพของตัวกรองต่ำ

โดยปกติจะมีคุณภาพอยู่ในช่วง 0.5-5.0 และใช้ในกรณีที่กำจัดความถี่สูงๆ เช่น ฮาร์มอนิกที่ 17 ขึ้นไป

วงจรถองผ่านความถี่สูง (High Pass Filter)

$$Q = \frac{X_0}{R} \tag{3.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบในการปรับตัวกรอง

1. การเปลี่ยนแปลงความถี่หลักมูล
 2. การเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุ และค่าเหนี่ยวนำของตัวกรองตามอายุการใช้งานและอุณหภูมิ
 3. ความคลาดเคลื่อนจากการผลิตและขนาดที่จำกัดของลำดับชั้นการจูน
- ความถี่การจูนของดีจูน แสดงตามสมการ

$$\delta = \frac{(\omega - \omega_n)}{\omega} \quad (3.3)$$

นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของ L และ C ไป 2% เหมือนการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบไป 1% แสดงตามสมการเป็น

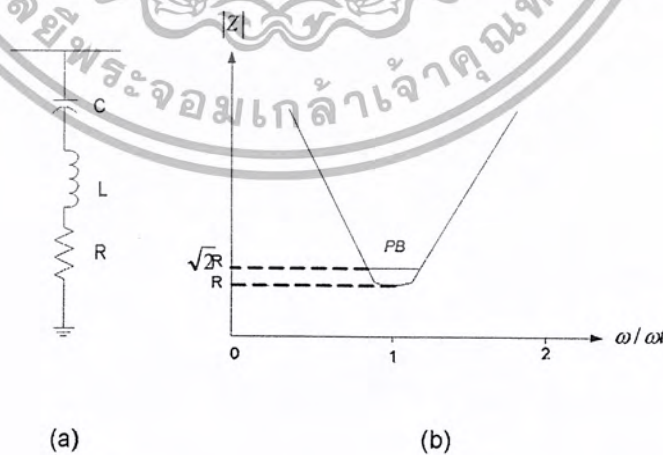
$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right) \quad (3.4)$$

3.2.3 ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว

ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยวซึ่งใช้ใน โครงการงานนี้ มีหน้าที่หลักสำคัญ 2 ประการคือ

1. จ่ายกำลังงานรีแอกทีฟที่ความถี่หลักมูลให้ระบบไฟฟ้า
2. กรองกระแส และลดแรงดันฮาร์มอนิก ในระบบไฟฟ้าให้ได้ตามเกณฑ์ที่กำหนด

การทำงานของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว จะใช้ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทาน มาต่อเป็นวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม เพื่อให้ตัวกรองมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำที่สุด ซึ่งเท่ากับค่าความต้านทาน



รูปที่ 3.2 วงจรสมมูลตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดเดี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.2 สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ได้ดังนี้

$$Z_f = R + j\left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right) \quad (3.5)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.6)$$

ในสมการจะเห็นว่าค่า Z_f จะมีค่าต่ำสุดเท่ากับค่า R เมื่อค่าความถี่ f มีค่าเป็น f_n

ตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1. ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกชนิดเดียว ที่ต่อขนานกับระบบไฟฟ้าควรมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำในย่านความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกที่ต้องการจะกรองทิ้ง
2. ค่าความกว้างแถบการกรองกระแสฮาร์โมนิกของตัวกรองฮาร์โมนิกชนิดเดียว ควรมีความกว้างของแถบพอสบลวร

3.2.4 ข้อควรคำนึงเกี่ยวกับการแก้ปัญหาฮาร์โมนิก

1. ฟิวเตอร์ที่ออกแบบสำหรับงานหนึ่ง ๆ ไม่ใช่แบบที่สามารถใช้ได้กับงานทุกงานได้ ถ้าจะให้ฟิวเตอร์ทำงานได้ จะต้องวิเคราะห์ระบบของฮาร์โมนิกทุกครั้งที่จะออกแบบค่ากระแสฮาร์โมนิก และข้อมูลต่างๆ ต้องใช้ค่าจริงที่ได้วัดเสมอ
2. ข้อมูลที่สำคัญที่ต้องทราบมีดังต่อไปนี้
 - กระแสฮาร์โมนิกต่าง ๆ จากแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิก
 - แรงดันอิมพีแดนซ์ (Impedance Voltage)
 - วัตถุประสงค์ของฮาร์โมนิกเนื่องจากโหลดที่อาจจะเพิ่มเข้ามาในระบบในอนาคต

3.2.4.1 ข้อคำนึงเกี่ยวกับตัวเก็บประจุที่ใช้ในตัวกรอง

1. ต้องมีการลดพิทิล (derate) สำหรับตัวเก็บประจุที่ใช้เนื่องมาจากฮาร์โมนิก
2. ในการออกแบบตัวกรองต้องคำนวณค่าเรโซแนนซ์ขนานใหม่ และต้องให้ความสนใจว่าไม่ไปตรงที่ระดับฮาร์โมนิกที่มีในระบบ

3. แรงดันที่ตัวเก็บประจุจะสูงกว่าปกติเนื่องจากมีรีแอกเตอร์ต่ออยู่ เช่นถ้าปรับตั้งระดับฮาร์โมนิก 4.5 (225 Hz) แรงดันจะเพิ่มขึ้นประมาณ 5 %

3.2.4.2 ข้อคำนึงเกี่ยวกับรีแอกเตอร์

1. สำหรับคิจูนฟิวเตอร์ ต้องปรับตั้งรีแอกเตอร์ให้เกิดรีโซแนนซ์ที่ต่ำกว่าระดับฮาร์โมนิกต่ำสุดที่มีอยู่ในระบบ เช่น ถ้าระบบมีฮาร์โมนิกที่ 5 อยู่ต้องปรับตั้งให้ต่ำกว่า 5 เป็นต้น
2. ถ้าปรับตั้งไปที่ระดับความถี่ 4.5 (225 Hz) ฟิวเตอร์จะมีค่ารีแอกเตอร์เป็นอินดักทีฟ (ลุดถ้ายมีอินดักแดนซ์ต่ออยู่อย่างเดียว) ที่ระดับฮาร์โมนิกที่ 5 และสูงกว่า ดังนั้นจึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดรีโซแนนซ์ขนานที่ระดับฮาร์โมนิกที่ 5 และสูงกว่าไม่ได้ นั่นคือกระแสฮาร์โมนิกที่ 5 และสูงกว่าจะไหลเข้าตัวกรองน้อย

3. ระบบรีแอกเตอร์แรงดันต่ำ (LV reactor) จะใช้แบบแกนเหล็กระบายความร้อนด้วยอากาศ (iron – cored, air cooled) รีแอกเตอร์แรงดันสูง(HV reactor) จะใช้แบบแกนเหล็กระบายความร้อนด้วยน้ำมัน(iron – cored, oil – cooled)
4. ระบบแรงดันต่ำและแรงดันสูงที่ใช้แบบหลายชั้น และควบคุมอัตโนมัติแต่ละชั้น จะมีรีแอกเตอร์ในทุกชั้นเพื่อให้ได้ว่าการเปิด-ปิด วงจร(Switching) จะเป็นอย่างไร
5. การกรองแบบรีแอกเตอร์สำหรับตัวเก็บประจุขนาด 50 KVA ต้องระวังให้มากถ้าระบบมีกระแสฮาร์โมนิกสูง และอินดักแตนซ์ในการผลิตอาจทำให้เกิดรีโซแนนซ์ใกล้ระดับฮาร์โมนิกที่ 5 มากมีผลทำให้เกิดสภาวะไหลล้นเกินมากในตัวเก็บประจุและรีแอกเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 แนวคิดในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ

แนวคิดในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกที่ใช้ในโครงการนี้ สามารถแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 3.3 Flow Chart แสดงแนวคิดในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบและคำนวณค่าส่วนประกอบของตัวกรองฮาร์มอนิก

3.4.1 ขั้นตอนการคำนวณค่าไลน์รีแอกเตอร์

ไลน์รีแอกเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยขจัดฟิลเตอร์ในการกำจัดฮาร์มอนิก โดยไลน์รีแอกเตอร์นั้นจะช่วยลดฮาร์มอนิกลำดับที่สูงๆ ได้โดยค่าหรือขนาดของไลน์รีแอกเตอร์นั้นสามารถคำนวณค่าได้ตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 ต้องรู้ค่าพิกัดกำลังที่ใช้ในการขับ โหลดมีขนาดเท่าไร(kVA) และขนาดของแรงดันที่ใช้ในการขับโหลดว่ามีขนาดเท่าไร(โวลต์)

ขั้นที่ 2 เมื่อรู้ค่าพิกัดกำลังและขนาดแรงดันที่ใช้ในระบบแล้วนำมาคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าในระบบได้จากสมการ

$$I = \frac{S}{V} \quad (3.7)$$

ขั้นที่ 3 เมื่อได้กระแสไฟฟ้าในระบบแล้ว นำมาคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ โดยสมการ

$$Z = \frac{V}{I} \quad \text{หรือ} \quad Z = \frac{V^2}{VA} \quad (3.8)$$

ขั้นที่ 4 เมื่อได้อิมพีแดนซ์ของระบบแล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณรีแอกเตอร์นั้น ประมาณ 3%-5% ของอิมพีแดนซ์ของระบบดังนี้

$$\% X_L = 3\% - 5\%$$

ขั้นที่ 5 เมื่อได้ค่ารีแอกเตอร์ของระบบแล้ว นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าอินดักเตอร์(L) โดยจากสมการ

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (H) \quad (3.9)$$

3.4.2 ขั้นตอนการคำนวณค่าส่วนประกอบของวงจรกรองฮาร์มอนิก

การออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดเดียวมีขั้นตอนทั้งหมดดังนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้าที่ติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกว่ามีค่าเท่าใด

ขั้นที่ 2 กำหนดค่ากำลังงานรีแอกทีฟที่ระบบต้องการ

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

โดยที่ Q_{com} คือ กำลังงานรีแอกทีฟที่ระบบต้องการ

kW คือ กำลังงานจริงของระบบของ โหลดรวมทั้งหมด

θ_1 คือ มุมของตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเดิม

θ_2 คือ มุมของตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใหม่

ขั้นที่ 3 วิเคราะห์ข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบที่ได้จากการวัด หรือการประเมิน และทำ

การกำหนดจำนวนชุดตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกในระบบ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่ 4 ทำการแบ่ง Q_{Com} ออกเป็นส่วนตามจำนวนชุดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกที่ได้กำหนดไว้ โดยอาศัยข้อมูลขนาดกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบ และขนาดของภาระในระบบไฟฟ้า

ขั้นที่ 5 กำหนดจุดปรับคลื่น (Tuning Point) ของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ

ขั้นที่ 6 กำหนดขนาดพิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุหลังมูลดังนี้

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

โดยที่ V_{Sys} คือ แรงดันระบบที่ตัวกรองต่ออยู่

n_h คือ ค่าจุดปรับคลื่นของตัวกรอง

V_{Cr} คือ ค่าแรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ

ขั้นที่ 7 กำหนดขนาดกำลังงานรีแอกทีฟพิกัดของตัวเก็บประจุ ที่ต้องใช้ในตัวกรองแต่ละอันดับ

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

โดยที่ V_{Sys} คือ แรงดันระบบที่ตัวกรองต่ออยู่

n_h คือ ค่าจุดปรับคลื่นของตัวกรอง

V_{Cr} คือ ค่าแรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ

Q_{Com} คือ กำลังงานรีแอกทีฟชดเชยที่จ่ายให้ระบบ

Q_{Cr} คือ กำลังงานรีแอกทีฟพิกัดของตัวเก็บประจุ

ขั้นที่ 8 การหาค่าตัวเก็บประจุ ค่าตัวเหนี่ยวนำ และค่าความต้านทาน ดังสมการดังนี้

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

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

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

$$R = \frac{X_L \text{at} n_h}{Q_F} \quad (3.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่
- V_G คือ ค่าแรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ
 - Q_G คือ กำลังงานรีแอกทีฟพิกัดของตัวเก็บประจุ
 - n_h คือ ค่าจุดปรับคลื่นของตัวกรอง
 - Q_F คือ ตัวประกอบคุณภาพของตัวกรอง

หมายเหตุ ค่า C, L และ R เป็นค่าต่อเฟส

ขั้นที่ 9 ติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกเข้าระบบและวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกในส่วนต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าใหม่ และตรวจสอบการทำงานของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก

1. ตรวจสอบตัวเก็บประจุว่าทำงานเกินพิกัดหรือไม่
2. ตรวจสอบขนาดกระแสรวมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

$$I_{RMS,U} = \sqrt{(I_{F,1} \times 1.1)^2 + \sum_{h=2}^n I_{F,h}^2} \tag{3.17}$$

- โดยที่
- $I_{F,1}$ คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวกรองที่ 1 ที่ความถี่หลักมูล
 - $I_{F,h}$ คือ กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านตัวกรองที่ h ที่ความถี่ฮาร์มอนิก
 - $I_{RMS,U}$ คือ กระแสรวมที่ไหลผ่านตัวกรองทั้งหมด

3. ตรวจสอบกระแสฮาร์มอนิกและแรงดันฮาร์มอนิกว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานฮาร์มอนิกหรือไม่
 4. ทดสอบการทำงานของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกเมื่อตัวแปรต่าง ๆ ของระบบเปลี่ยนไป
- 3.5 การคำนวณค่าต่าง ๆ ใน โครงการนี้

3.5.1 การคำนวณค่าไลน์รีแอกเตอร์

ผลการทดลอง

แรงดันที่ใช้ในระบบนี้ (V)	222	โวลต์
พิกัดกำลังที่ปรากฏในระบบนี้(S)	0.79	KVA

$$\therefore I = \frac{S}{V} = \frac{0.79 \times 10^3}{222} = 3.558 \quad A$$

$$\therefore Z = \frac{V}{I} = \frac{222}{3.558} = 62.39 \quad \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \therefore \text{คิด \%XL ที่ } 5\% &= 5\%(Z) \\ &= 0.05(62.39) \\ &= 3.12 \quad \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L &= \frac{X_L}{2\pi f} \\ &= \frac{3.12}{2 \times \pi \times 50} \\ &= 9.93 \text{ mH} \end{aligned}$$

ไลน์รีแอกเตอร์ที่ใช้มีขนาด 9.93 mH

3.5.2 การคำนวณค่าตัวกรอง

จากผลการทดลองจะได้ค่าของ โหลดเป็นดังนี้

พิกัดแรงดันที่ใช้ในระบบนี้ 222 โวลต์

พิกัดกำลังที่ใช้ในระบบนี้ 0.56 กิโลวัตต์

กระแสที่ใช้ในระบบนี้ 3.558 แอมป์

$$\therefore P = VI \cos \theta$$

$$0.56 \times 10^3 = (222)(3.558) \cos \theta$$

$$\cos \theta = \frac{0.56 \times 10^3}{(222)(3.558)} = 0.7$$

$$\theta = 45.57^\circ$$

ต้องการค่าตัวประกอบกำลัง(P.F) = 0.95

$$\cos \theta = 0.95$$

$$\theta = 18.19^\circ$$

ค่ากำลังรีแอกทีฟที่ระบบต้องการ (Q_{Com})

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

$$\therefore Q_{Com} = 0.56(\tan 45.57^\circ - \tan 18.19^\circ)$$

$$Q_{Com} = 0.387 \quad \text{kVAR}$$

กำหนดชุดของวงจรกรอง 3 ชุด กรองฮาร์มอนิกที่ 3rd, 5th, 7th

แบ่ง Q_{com} ออกตามกระแสฮาร์มอนิกได้ดังนี้

$$\text{- กระแสฮาร์มอนิกที่ 3} = 0.71 \text{ A}$$

$$\text{- กระแสฮาร์มอนิกที่ 5} = 0.56 \text{ A}$$

$$\text{- กระแสฮาร์มอนิกที่ 7} = 0.21 \text{ A}$$

$$\text{คิด } 100\% = 0.71 + 0.56 + 0.21 = 1.47$$

ดังนั้น

$$I_3 = \frac{0.71}{1.47} \times 100\% = 48.3\%$$

$$I_5 = \frac{0.56}{1.47} \times 100\% = 38.1\%$$

$$I_7 = \frac{0.21}{1.47} \times 100\% = 13.6\%$$

เมื่อคิดค่า Q Factor ที่ 60%

$$Q_F = 60\% \times Q_{com}$$

$$Q_F = 0.6 \times 0.387 = 0.232 \text{ kVAR}$$

ค่า Q Factor ที่ฮาร์มอนิกต่าง ๆ ดังนี้

$$Q_{F3} = 48.3\% \times 0.232 = 0.112 \text{ kVAR}$$

$$Q_{F5} = 38.1\% \times 0.232 = 0.0884 \text{ kVAR}$$

$$Q_{F7} = 13.6\% \times 0.232 = 0.0315 \text{ kVAR}$$

กำหนดจุดปรับคลื่น n_h ของตัวกรองแต่ละชุด ซึ่งแล้วแต่ว่าจะกำหนดที่จุดไหนขึ้นอยู่กับโหลด สำหรับโครงการนี้กำหนดต่ำกว่าความถี่ที่กรองประมาณ 5-10%

$$n_3 = 2.8(140\text{Hz})$$

$$n_5 = 4.6(230\text{Hz})$$

$$n_7 = 6.4(320\text{Hz})$$

ตรวจสอบแรงดันตัวคาปาซิเตอร์ของตัวกรอง และเลือกแรงดันพิกัดของคาปาซิเตอร์

$$V_C = \frac{n_h^2}{n_h^2 - 1} \times V_S \quad \text{โดยเลือก } V_{cr} \geq V_C$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฮาร์มอนิกที่ 3

$$\therefore V_{C3} = \left(\frac{2.8^2}{2.8^2 - 1} \right) \times 222 = 254.4 \quad \text{โวลต์}$$

ฮาร์มอนิกที่ 5

$$\therefore V_{C5} = \left(\frac{4.6^2}{4.6^2 - 1} \right) \times 222 = 233.01 \quad \text{โวลต์}$$

ฮาร์มอนิกที่ 7

$$\therefore V_{C7} = \left(\frac{6.4^2}{6.4^2 - 1} \right) \times 222 = 227.5 \quad \text{โวลต์}$$

ดังนั้น เลือก $V_{cr} \approx 300$ โวลต์

กำหนดขนาดกำลังรีแอกทีฟที่ผลิต Q_{cr} (kVAR) ของตัวคาปาซิเตอร์ ในแต่ละชุด

$$Q_{cr} = Q_F \left(\frac{V_{cr}}{V_s} \right)^2 \left(\frac{n_h^2 - 1}{n_h^2} \right)$$

$$Q_{cr3} = 0.112 \left(\frac{300}{222} \right)^2 \left(\frac{2.8^2 - 1}{2.8^2} \right) = 0.178 \quad \text{kVAR}$$

$$Q_{cr5} = 0.0884 \left(\frac{300}{222} \right)^2 \left(\frac{4.6^2 - 1}{4.6^2} \right) = 0.154 \quad \text{kVAR}$$

$$Q_{cr7} = 0.0315 \left(\frac{300}{222} \right)^2 \left(\frac{6.4^2 - 1}{6.4^2} \right) = 0.056 \quad \text{kVAR}$$

หาค่าคาปาซิเตอร์และอินดักเตอร์ที่ใช้

$$C = \frac{Q_{cr} \times 10^9}{2\pi f V_{cr}^2} \quad (\mu\text{F})$$

$$L = \frac{10^9}{(2\pi f n_h)^2 C} \quad (\text{mH})$$

ที่ฮาร์มอนิกที่ 3

$$C = \frac{0.178 \times 10^9}{2\pi \times 50 \times 300^2} = 6.29 \quad \mu\text{F}$$

เลือกใช้ C ที่มีอยู่ = 10.86 μF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L = \frac{10^9}{(2\pi \times 50 \times 2.8)^2 \times 10.86} = 119 \text{ mH}$$

ที่ฮาร์มอนิกที่ 5

$$C = \frac{0.154 \times 10^9}{2\pi \times 50 \times 300^2} = 5.44 \text{ } \mu\text{F}$$

เลือกใช้ C ที่มีอยู่ = 6.27 μF

$$L = \frac{10^9}{(2\pi \times 50 \times 4.6)^2 \times 6.27} = 76.37 \text{ mH}$$

ที่ฮาร์มอนิกที่ 7

$$C = \frac{0.056 \times 10^9}{2\pi \times 50 \times 300^2} = 1.98 \text{ } \mu\text{F}$$

เลือกใช้ C ที่มีอยู่ = 4.227 μF

$$L = \frac{10^9}{(2\pi \times 50 \times 6.4)^2 \times 4.227} = 58.52 \text{ mH}$$

3.5.3 สรุปค่าต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณ

ค่าไลน์รีแอกเตอร์ขนาด = 9.93 mH

ฮาร์มอนิกที่ 3

ค่าคาปาซิเตอร์ขนาด = 10.86 μF

ค่าอินดักเตอร์ขนาด = 119 mH

ฮาร์มอนิกที่ 5

ค่าคาปาซิเตอร์ขนาด = 6.27 μF

ค่าอินดักเตอร์ขนาด = 76.37 mH

ฮาร์มอนิกที่ 7

ค่าคาปาซิเตอร์ขนาด = 4.227 μF

ค่าอินดักเตอร์ขนาด = 58.52 mH

3.6 การออกแบบค่ารีแอกเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิก

สิ่งที่จำเป็นต้องรู้ก่อนการออกแบบ คือ ค่ารีแอกเตอร์ และค่ากระแสของรีแอกเตอร์
วิธีการหามีดังนี้

1. หาค่าแรงดันของรีแอกเตอร์ โดยใช้สูตร

$$V = 2\pi fLI \quad (3.18)$$

2. หาพื้นที่ A_m โดยใช้สูตร

$$A_m = \frac{\sqrt{VA}}{5.58} \quad (3.19)$$

3. เลือกแกนที่มีพื้นที่มากกว่า A_m
4. หาจำนวนรอบในการพัน โดยใช้สูตร

$$N = \frac{V}{4.44fBA_m \times 2.54^2 \times 10^{-4}} \quad (3.20)$$

5. ตรวจสอบว่าสามารถพันลง window หรือไม่
6. หาระยะ gab โดยใช้สูตร

$$g = \frac{N^2 \mu_0 A}{2L} \quad (3.21)$$

สรุปค่ารีแอกเตอร์ที่ได้จากการออกแบบมีดังนี้

1. ไลน์รีแอกเตอร์

ใช้ลวดเบอร์ AWG15 ขนาดแกน 1.5×2 นิ้ว จำนวนรอบ 105 รอบ

2. รีแอกเตอร์ฮาร์มอนิกที่ 3

ใช้ลวดเบอร์ AWG15 ขนาดแกน 2×4 นิ้ว จำนวนรอบ 255 รอบ

3. รีแอกเตอร์ฮาร์มอนิกที่ 5

ใช้ลวดเบอร์ AWG 18 ขนาดแกน 1.5×2 นิ้ว จำนวนรอบ 320 รอบ

4. รีแอกเตอร์ฮาร์มอนิกที่ 7

ใช้ลวดเบอร์ AWG 18 ขนาดแกน 1.5×1.5 นิ้ว จำนวนรอบ 230 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามในการออกแบบค่ารีแอกเตอร์ที่ได้นั้นอาจไม่ตรงกับที่คำนวณ ดังนั้น จึงต้องมีการปรับ gab เพื่อให้ได้ค่ารีแอกเตอร์ ตามที่ได้ออกแบบไว้กับวงจรกรอง

3.7 การออกแบบการคำนวณ โดยใช้โปรแกรม

3.7.1 ที่มาการเขียน โปรแกรม

การเขียนโปรแกรมกับ visual basic เพื่อสร้างแอปพลิเคชันสำหรับใช้งานนั้น ภาษาที่ใช้เป็นภาษา basic เหมาะสมสำหรับสร้างแอปพลิเคชันเพื่อใช้งานอย่างรวดเร็ว เน้นส่วนติดต่อผู้ใช้ที่เป็นแบบกราฟิกและการสร้างแอปพลิเคชันแบบไคลเอนท์/เซิร์ฟเวอร์ นอกจากนี้ยังสนับสนุนการสร้างแอปพลิเคชันสำหรับอินเทอร์เน็ต

การศึกษาภาษา basic สามารถแอปพลิเคชันได้หลายรูปแบบทั้งด้านอาทิเช่นการใช้งานทางด้านฐานข้อมูล (database application) ระบบร้านค้า, คลังสินค้า, ระบบบัญชี, ระบบบริหาร หรือแม้แต่ e-Commerce ทั้งหมดต่างๆ ต้องมีส่วนติดต่อกับฐานข้อมูลอย่างแน่นอน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 เปรียบเทียบส่วนประกอบโดย chart

(ค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดมาพิจารณา chart ดังรูป)



รูปที่ 3.4 Diagram การทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.3 การสร้างแอปพลิเคชัน ของ Project

กำหนดพรีอเพอร์ตีให้กับคอนโทรลต่างๆ ฟอร์ม1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 กำหนดพรีอเพอร์ตีให้กับคอนโทรลของฟอร์ม1

ออบเจกต์	พรีอเพอร์ตี	ค่าที่กำหนด
ฟอร์ม	Name	FORM1
	Caption	คำนวณและออกแบบ PASSIVEFILTER
	BorderStyle	5-Sizable Toolwindow
LABLE	Name	LABLE1
	Caption	VOLTAGE
	BorderStyle	0-None
LABLE	Name	LABLE2
	Caption	VOLT
	BorderStyle	0-None
LABLE	Name	LABLE3
	Caption	CURRENT
	BorderStyle	0-None
LABLE	Name	LABLE4
	Caption	Amp
	BorderStyle	0-None
LABLE	Name	LABLE5
	Caption	REAL POWER
	BorderStyle	0-None
LABLE	Name	LABLE6
	Caption	KW
	BorderStyle	0-None
LABLE	Name	LABLE7
	Caption	REACTIVE POWER
	BorderStyle	0-None

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางกำหนดพรีดเพอร์ตีให้กับคอนโทรลของฟอร์ม(ต่อ)

ออบเจ็กต์	พรีอเพอร์ตี	ค่าที่กำหนด
LABEL	Name	TABLE8
	Caption	KVAR
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	TABLE9
	Caption	APPARENT POWER
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	TABLE10
	Caption	KVA
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	TABLE11
	Caption	CURRENT HARMONIC
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	TABLE12
	Caption	3
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	TABLE13
	Caption	5
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	TABLE14
	Caption	7
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	TABLE15
	Caption	Amp
	BorderStyle	0-None

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางกำหนดพรีดเพอร์ดีให้กับคอนโทรลของฟอร์ม(ต่อ)

ออบเจกต์	พรีอเพอร์ดี	ค่าที่กำหนด
LABEL	Name	TABLE16
	Caption	%THD
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	TABLE17
	Caption	POWER FACTOR(old)
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	TABLE18
	Caption	POWER FACTOR(new)
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	TABLE19
	Caption	%
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	TABLE20
	Caption	%XL3-5%Z0
	BorderStyle	0-None
TextBox	Name	TEXT1
	Text	-
	BorderStyle	1-Fixed Single
TextBox	Name	TEXT2
	Text	-
	BorderStyle	1-Fixed Single
TextBox	Name	TEXT3
	Text	-
	BorderStyle	1-Fixed Single

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางกำหนดพรีดเฟอริตี้ให้กับคอนโทรลของฟอร์ม1(ต่อ)

ออบเจกต์	พรีอพเฟอริตี้	ค่าที่กำหนด
TextBox	Name	TEXT4
	Text	-
	BorderStyle	1-Fixed Single
TextBox	Name	TEXT5
	Text	-
	BorderStyle	1-Fixed Single
TextBox	Name	TEXT6
	Text	-
	BorderStyle	1-Fixed Single
TextBox	Name	TEXT7
	Text	-
	BorderStyle	1-Fixed Single
TextBox	Name	TEXT8
	Text	-
	BorderStyle	1-Fixed Single
TextBox	Name	TEXT9
	Text	-
	BorderStyle	1-Fixed Single
TextBox	Name	TEXT10
	Text	-
	BorderStyle	1-Fixed Single
TextBox	Name	TEXT11
	Text	-
	BorderStyle	1-Fixed Single

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางกำหนดพรีอพเพอร์ตี้ให้กับคอนโทรลของฟอร์ม 1(ต่อ)

ออบเจกต์	พรีอพเพอร์ตี้	ค่าที่กำหนด
TextBox	Name	TEXT12
	Text	-
	BorderStyle	1-Fixed Single
TextBox	Name	TEXT13
	Text	-
	BorderStyle	1-Fixed Single
TextBox	Name	TEXT14
	Text	-
	BorderStyle	1-Fixed Single
Button	Name	COMMAND1
	Caption	RUN
Button	Name	COMMAND2
	Caption	EXIT

ตารางที่ 3.2 กำหนดพรีอพเพอร์ตี้ให้กับคอนโทรลของฟอร์ม 2

ออบเจกต์	พรีอพเพอร์ตี้	ค่าที่กำหนด
ฟอร์ม	Name	FORM2
	Caption	ผลการคำนวณและออกแบบ
	BorderStyle	2-Sizable
LABEL	Name	LABLE1
	Caption	VOLTAGE
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE2
	Caption	VOLT
	BorderStyle	0-None

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางกำหนดพรีดเพอร์ติให้กับคอนโทรลของฟอร์ม 2 (ต่อ)

ออปเจกต์	พรีอเพอร์ติ	ค่าที่กำหนด
LABLE	Name	LABLE3
	Caption	CURRENT
	BorderStyle	0-None
LABLE	Name	LABLE4
	Caption	`Amp
	BorderStyle	0-None
LABLE	Name	LABLE5
	Caption	REAL POWER
	BorderStyle	0-None
LABLE	Name	LABLE6
	Caption	KW
	BorderStyle	0-None
LABLE	Name	LABLE7
	Caption	IMPEDANCE
	BorderStyle	0-None
LABLE	Name	LABLE8
	Caption	OHM
	BorderStyle	0-None
LABLE	Name	LABLE9
	Caption	%XL{
	BorderStyle	0-None
LABLE	Name	LABLE10
	Caption	%Z}
	BorderStyle	0-None

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางกำหนดพรีดเพอร์ตีให้กับคอนโทรลของฟอร์ม 2 (ต่อ)

ออบเจกต์	พรีอเพอร์ตี	ค่าที่กำหนด
LABEL	Name	TABLE11
	Caption	OHM
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	TABLE12
	Caption	LINE INDUCTOR(L)
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	TABLE13
	Caption	mH
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	TABLE14
	Caption	QCOM
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	TABLE15
	Caption	ANGLE(old)
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	TABLE16
	Caption	DEGREE
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	TABLE17
	Caption	ANGLE(new)
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	TABLE18
	Caption	DEGREE
	BorderStyle	0-None

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางกำหนดพรีอพเพอร์ตี้ให้กับคอนโทรลของฟอร์ม 2 (ต่อ)

ออบเจกต์	พรีอพเพอร์ตี้	ค่าที่กำหนด
LABLE	Name	LABLE19
	Caption	KVAR
	BorderStyle	0-None
LABLE	Name	LABLE20
	Caption	Q FACTORB 60%
	BorderStyle	0-None
LABLE	Name	LABLE21
	Caption	KVAR
	BorderStyle	0-None
LABLE	Name	LABLE22
	Caption	QF3
	BorderStyle	0-None
LABLE	Name	LABLE23
	Caption	KVAR
	BorderStyle	0-None
LABLE	Name	LABLE24
	Caption	QF5
	BorderStyle	0-None
LABLE	Name	LABLE25
	Caption	KVAR
	BorderStyle	0-None
LABLE	Name	LABLE26
	Caption	QF7
	BorderStyle	0-None

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางกำหนดพรีคเพอร์ตีให้กับคอนโทรลของฟอร์ม 2 (ต่อ)

ออบเจกต์	พรีคเพอร์ตี	ค่าที่กำหนด
LABEL	Name	LABLE27
	Caption	KVAR
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE28
	Caption	เลือกกรอง order harmonic (nh)
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE29
	Caption	3
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE30
	Caption	5
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE31
	Caption	7
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE32
	Caption	Vc3{
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE33
	Caption	}
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE34
	Caption	VOLT
	BorderStyle	0-None

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางกำหนดพรีอเดอร์ตีให้กับคอนโทรลของฟอร์ม 2 (ต่อ)

ออบเจกต์	พรีอเพอร์ตี	ค่าที่กำหนด
LABEL	Name	LABLE35
	Caption	VC5{
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE36
	Caption	VOL.
	BorderStyle	}
LABEL	Name	LABLE37
	Caption	VOLT
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE38
	Caption	VC7{
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE39
	Caption	}
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE40
	Caption	VOLT
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE41
	Caption	เลือก Vcr
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE42
	Caption	VOLT
	BorderStyle	0-None

ตารางกำหนดพรีอตเพอร์ตีให้กับคอนโทรลของฟอร์ม 2 (ต่อ)

ออบเจกต์	พรีอตเพอร์ตี	ค่าที่กำหนด
LABEL	Name	LABLE43
	Caption	Qcr3{
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE44
	Caption	}
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE45
	Caption	KVAR
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE46
	Caption	Qcr5{
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE47
	Caption	}
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE48
	Caption	KVAR
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE49
	Caption	Qcr7{
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE50
	Caption	}
	BorderStyle	0-None

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางกำหนดพรีอเพอร์ตีให้กับคอนโทรลของฟอร์ม 2 (ต่อ)

ออบเจกต์	พรีอเพอร์ตี	ค่าที่กำหนด
LABEL	Name	LABLE51
	Caption	KVAR
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE52
	Caption	เลือก Qcr3{
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE53
	Caption	}
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE54
	Caption	KVAR
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE55
	Caption	เลือก Qcr5{
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE56
	Caption	}
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE57
	Caption	KVAR
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE58
	Caption	เลือก QCR7{
	BorderStyle	0-None

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางกำหนดพรีดเฟอรัตี้ให้กับคอนโทรลของฟอร์ม 2 (ต่อ)

ออบเจกต์	พรีอพเฟอรัตี้	ค่าที่กำหนด
LABEL	Name	LABLE59
	Caption	}
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE60
	Caption	KVAR
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE61
	Caption	C3
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE63
	Caption	UF/(ph)
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE65
	Caption	C5
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE66
	Caption	UF/(ph)
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE69
	Caption	C7
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE70
	Caption	UF/(ph)
	BorderStyle	0-None

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางกำหนดพรีอตเพอร์ตีให้กับคอนโทรลของฟอร์ม 2 (ต่อ)

ออบเจกต์	พรีอตเพอร์ตี	ค่าที่กำหนด
LABEL	Name	LABLE74
	Caption	C3เลือก
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE75
	Caption	uF/(ph)
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE76
	Caption	C5เลือก
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE78
	Caption	uF/(ph)
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE77
	Caption	C7 เลือก
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE79
	Caption	uF/(ph)
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE73
	Caption	L3
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	LABLE64
	Caption	L5
	BorderStyle	0-None

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางกำหนดพรีดเฟอรัตี้ให้กับคอนโทรลของฟอร์ม 2 (ต่อ)

ออบเจกต์	พรีอเพอรัตี้	ค่าที่กำหนด
LABEL	Name	TABLE67
	Caption	L5
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	TABLE68
	Caption	mh/(ph)
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	TABLE71
	Caption	L7
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	TABLE72
	Caption	mh/(ph)
	BorderStyle	0-None
LABEL	Name	TABLE72
	Caption	mh/(ph)
	BorderStyle	-
TEXT	Name	TEXT1
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT2
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT3
	Caption	-
	BorderStyle	0-None

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางกำหนดพรีคเพอร์ตีให้กับคอนโทรลของฟอร์ม 2 (ต่อ)

ออบเจกต์	พรีคเพอร์ตี	ค่าที่กำหนด
TEXT	Name	TEXT4
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT5
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT6
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT7
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT8
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT9
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT10
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT11
	Caption	-
	BorderStyle	0-None

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางกำหนดพร็อพเพอร์ตี้ให้กับคอนโทรลของฟอร์ม 2 (ต่อ)

ออบเจกต์	พร็อพเพอร์ตี้	ค่าที่กำหนด
TEXT	Name	TEXT12
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT13
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT14
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT15
	Caption	-
	BorderStyle	1-Fixed Single
TEXT	Name	TEXT16
	Caption	-
	BorderStyle	1-Fixed Single
TEXT	Name	TEXT17
	Caption	-
	BorderStyle	1-Fixed Single
TEXT	Name	TEXT18
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT19
	Caption	-
	BorderStyle	0-None

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางกำหนดพรีดเฟอรัตี้ให้กับคอนโทรลของฟอร์ม 2 (ต่อ)

ออบเจกต์	พรีอพเพอรัตี้	ค่าที่กำหนด
TEXT	Name	TEXT20
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT21
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT22
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT23
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT24
	Caption	-
	BorderStyle	1-Fixed Single
TEXT	Name	TEXT25
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT26
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT27
	Caption	-
	BorderStyle	0-None

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางกำหนดพรีอตเพอร์ตีให้กับคอนโทรลของฟอร์ม 2 (ต่อ)

ออบเจกต์	พรีอตเพอร์ตี	ค่าที่กำหนด
TEXT	Name	TEXT28
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT29
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT30
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT31
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT32
	Caption	-
	BorderStyle	1-Fixed Single
TEXT	Name	TEXT33
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT34
	Caption	-
	BorderStyle	1-Fixed Single
TEXT	Name	TEXT35
	Caption	-
	BorderStyle	0-None

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางกำหนดพรีอตเพอร์ตีให้กับคอนโทรลของฟอร์ม 2 (ต่อ)

ออบเจกต์	พรีอตเพอร์ตี	ค่าที่กำหนด
TEXT	Name	TEXT36
	Caption	-
	BorderStyle	1-Fixed Single
TEXT	Name	TEXT37
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT38
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT39
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT40
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT41
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT42
	Caption	-
	BorderStyle	0-None
TEXT	Name	TEXT43
	Caption	-
	BorderStyle	1-Fixed Single

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางกำหนดพรีอิตเพอร์ตีให้กับคอนโทรลของฟอร์ม 2 (ต่อ)

ออบเจ็กต์	พรีอิตเพอร์ตี	ค่าที่กำหนด
TEXT	Name	TEXT44
	Caption	-
	BorderStyle	1-Fixed Single
TEXT	Name	TEXT45
	Caption	-
	BorderStyle	1-Fixed Single
LABLE	Name	Command1
	Caption	Vc
LABLE	Name	Command2
	Caption	Qcr
LABLE	Name	Command3
	Caption	C
LABLE	Name	Command4
	Caption	Exit
LABLE	Name	Command5
	Caption	RETURN
LABLE	Name	Command6
	Caption	L

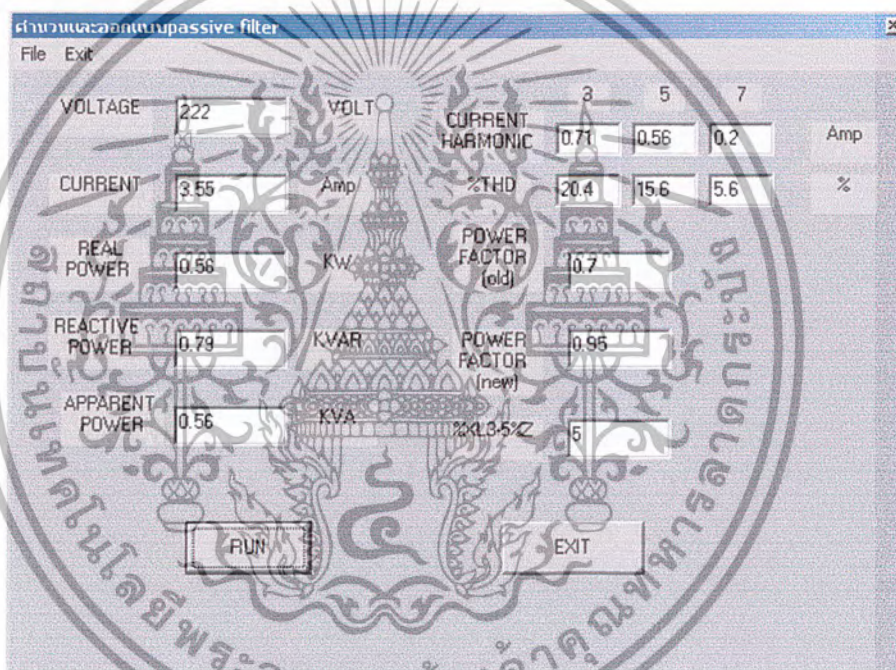
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองโปรแกรม

ข้อมูลตามโปรแกรม ที่ Volt=222 V Current=3.55A ,P= 0.56 KW Q=0.79 KVA S=0.56 KVAR P.F(old)=0.7 P.F(new)=0.95 Current Harmonic ที่3=0.71 A Current Harmonic ที่5=0.56 A Current Harmonic ที่7=0.20 A THD3 =20.4%r THD5 =15.8%r THD7 =5.6%r

จากข้อมูลดังกล่าว เป็นผลจากการวัดค่า ค่า Power Factor (old) เป็นค่าที่ได้จากวัด เพื่อต้องการปรับปรุงค่า Power Factor. ให้สูงขึ้น เลือกค่า Power Factor (new) เป็น 0.95

ป้อนค่าดังรูป



รูปที่ 3.7 ข้อมูลผลการวิเคราะห์โหลด harmonic

ผลการทดสอบ

Parameter	Value	Unit	Parameter	Value	Unit
VOLTAGE	222	VOLT	ANGLE(old)	45.5745505682	DEGREE
CURRENT	3.55	Amp	ANGLE(new)	18.1956194331	DEGREE
REAL POWER	56	KW	QCOM	.387253094126	KVAR
IMPEDANCE	62.5352112676	OHM	Q	.232351856475	KVAR
%L1 5 %Z	3.12676056336	OHM	QF3	.112224366052	KVAR
LINE INDUCTOR(L)	9.95308153232	mH	QF5	.088514992943	KVAR
เลือกกระแส order harmonic(Nh)	2.8	4.8	6.8	QF7	.0316
VC	Qcr	C	L		
VC3(2.8)	254.456140	VOLT	Qcr3(2.8)	-17875963	KVAR
VC5(4.8)	232.072595	VOLT	Qcr5(4.8)	-15459380	KVAR
VC7(6.8)	226.9072	VOLT	Qcr7(6.8)	-0565	KVAR
เลือก Vcr	300	VOLT	เลือก Qcr3(2.8)	178	KVAR
			เลือก Qcr5(4.8)	154	KVAR
			เลือก Qcr7(6.8)	0565	KVAR
			C3เลือก	10	uF/(ph)
			C5เลือก	6	uF/(ph)
			C7เลือก	2	uF/(ph)
			L3	129.24382	mH/(ph)
			L5	73.298003	mH/(ph)
			L7	109.5666	mH/(ph)

รูปที่ 3.8 แสดงค่าผลการทดสอบ

โค้ดคำสั่ง(form1)

Private Sub Command1_Click()

Form1.Hide

Form2.Show

Dim cur, vol, real, reac, appp, curh3, curh5, curh7, pofo, pofn, pxl As Double

Dim thd3, thd5, thd7 As Currency

Dim qfac, IP1, IP2, IP3, ip4, sum As Double

Dim qf3, qf5, qf7 As Currency

Dim in1, in2, in3, in4, on5, in6, in7, in8, in9, in10, in11, in12, in13, in14 As Currency

Dim Z, px, L, QCOM, ANGLE1, ANGLE2, AAA, bbb As Double

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

in1 = CCur(Text1.Text)
 in2 = CCur(Text2.Text)
 in3 = CCur(Text3.Text)
 in4 = CCur(Text4.Text)
 in5 = CCur(Text5.Text)
 in6 = CCur(Text6.Text)
 in7 = CCur(Text7.Text)
 in8 = CCur(Text8.Text)
 in9 = CCur(Text9.Text)
 in10 = CCur(Text10.Text)
 in11 = CCur(Text11.Text)
 in12 = CCur(Text12.Text)
 in13 = CCur(Text13.Text)
 in14 = CCur(Text14.Text)
 vol = in1
 cur = in2
 real = in3
 reac = in4
 appp = in5
 curh3 = in6
 curh5 = in7
 curh7 = in8
 thd3 = in9
 thd5 = in10
 thd7 = in11
 pof0 = in12
 pofn = in13
 pxl = in14
 Z = vol / cur
 px = (pxl / 100) * Z
 L = px / (2 * 3.1415 * 50)
 Form2.Text1 = vol
 Form2.Text2 = cur
 Form2.Text3 = real



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Form2.Text4 = Str(Z)
Form2.Text5 = Str(px1)
Form2.Text6 = px
Form2.Text7 = L
ANGLE1 = 1.5708 - Atn((pof0 / Sqr(1 - pof0 ^ 2)))
AAA = (ANGLE1 * 180) / 3.1415
Form2.Text8 = (AAA)
ANGLE2 = 1.5708 - Atn((pofn / Sqr(1 - pofn ^ 2)))
bbb = (ANGLE2 * 180) / 3.1415
Form2.Text9 = bbb
QCOM = real * (Tan(AAA * (3.1415 / 180)) - Tan(bbb * (3.1415 / 180)))
Form2.Text10 = QCOM
qfac = 0.6 * QCOM
Form2.Text11 = qfac
sum = curh3 + curh5 + curh7
IP1 = (curh3 / sum) * 100
IP2 = (curh5 / sum) * 100
IP3 = (curh7 / sum) * 100
qf3 = (IP1 / 100) * qfac
Form2.Text12 = qf3
qf5 = (IP2 / 100) * qfac
Form2.Text13 = qf5
qf7 = (IP3 / 100) * qfac
Form2.Text14 = qf7
End Sub
Private Sub MUNEXIT_Click()
Form1.Hide
End Sub

```

โค้ดคำสั่ง(form2)

```

Private Sub Command1_Click()
Dim OR3, OR5, OR7 As Currency
Dim IP1, IP2, IP3 As Double
Dim NH, VS As Currency

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dim VC3, VC5, VC7 As Currency

Dim VCR As Currency

VS = CCur(Text1.Text)

IP1 = CDbI(Text12.Text)

IP2 = CDbI(Text13.Text)

IP3 = CDbI(Text14.Text)

OR3 = CCur(Text15.Text)

OR5 = CCur(Text16.Text)

OR7 = CCur(Text17.Text)

$VC3 = ((OR3 ^ 2) / ((OR3 ^ 2) - 1)) * VS$

Text18.Text = Text15

Text19.Text = VC3

$VC5 = ((OR5 ^ 2) / ((OR5 ^ 2) - 1)) * VS$

Text20.Text = Text16

Text21.Text = VC5

$VC7 = ((OR7 ^ 2) / ((OR7 ^ 2) - 1)) * VS$

Text22.Text = Text17

Text23.Text = VC7

End Sub

Private Sub Command2_Click()

Dim VCR2, VOLT As Currency

Dim QCR3, QCR5, QCR7 As Currency

Dim QF33, QF55, QF77 As Currency

Dim OR33, OR55, OR77 As Currency

VCR2 = CCur(Text24.Text)

QF33 = CCur(Text12.Text)

QF55 = CCur(Text13.Text)

QF77 = CCur(Text14.Text)

VOLT = CCur(Text1.Text)

OR33 = CCur(Text15.Text)

OR55 = CCur(Text16.Text)

OR77 = CCur(Text17.Text)

$QCR3 = QF33 * ((VCR2 / VOLT) ^ 2) * (((OR33 ^ 2) - 1) / (OR33 ^ 2))$

Text25.Text = OR33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Text26.Text = QCR3
QCR5 = QF55 * ((VCR2 / VOLT) ^ 2) * (((OR55 ^ 2) - 1) / (OR55 ^ 2))
Text27.Text = OR55
Text28.Text = QCR5
QCR7 = QF77 * ((VCR2 / VOLT) ^ 2) * (((OR77 ^ 2) - 1) / (OR77 ^ 2))
Text29.Text = OR77
Text30.Text = QCR7
Text31.Text = OR33
Text33.Text = OR55
Text35.Text = OR77
End Sub
Private Sub Command3_Click()
Dim QCR33, QCR55, QCR77 As Currency
Dim VCR22 As Currency
Dim C3, C5, C7, OR333, OR555, OR777 As Currency
QCR33 = CCur(Text32.Text)
QCR55 = CCur(Text34.Text)
QCR77 = CCur(Text36.Text)
VCR22 = Text24.Text
OR333 = CCur(Text15.Text)
OR555 = CCur(Text16.Text)
OR777 = CCur(Text17.Text)
C3 = ((QCR33 * (10 ^ 9)) / (2 * 50 * 3.1415 * (VCR22 ^ 2)))
Text37.Text = C3
C5 = ((QCR55 * (10 ^ 9)) / (2 * 50 * 3.1415 * (VCR22 ^ 2)))
Text39.Text = C5
C7 = ((QCR77 * (10 ^ 9)) / (2 * 50 * 3.1415 * (VCR22 ^ 2)))
Text41.Text = C7
End Sub
Private Sub Command4_Click()
Form2.Hide
End Sub
Private Sub Command5_Click()
Form2.Hide

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Form1.Show
End Sub
Private Sub Command6_Click()
Dim IPC3, IPC5, IPC7 As Currency
Dim L33, L55, L77 As Currency
Dim OR3333, OR5555, OR7777 As Currency
OR3333 = CCur(Text15.Text)
OR5555 = CCur(Text16.Text)
OR7777 = CCur(Text17.Text)
IPC3 = CCur(Text43.Text)
IPC5 = CCur(Text44.Text)
IPC7 = CCur(Text45.Text)
L33 = (10 ^ 9) / ((2 * 50 * 3.1415 * OR3333) ^ 2 * IPC3)
Text38.Text = L33
L55 = (10 ^ 9) / ((2 * 50 * 3.1415 * OR5555) ^ 2 * IPC5)
Text40.Text = L55
L77 = (10 ^ 9) / ((2 * 50 * 3.1415 * OR7777) ^ 2 * IPC7)
Text42.Text = L77
End Sub
Private Sub MUNEXIT_Click()
Form2.Hide
End Sub

```



3.7.5 การปรับปรุงแก้ไข โปรแกรม

จากการทดสอบโปรแกรมที่สร้างขึ้นมา เมื่อป้อนค่าทั้งในส่วนที่เปรียบเทียบกับ โปรแกรมและเปรียบเทียบกันระหว่างการคำนวณทั่วไป

จะสรุปได้ว่า มีข้อแก้ไขดังนี้

1. ข้อผิดพลาดที่เกิดจากการป้อนไม่ครบจำนวน หมายถึงการป้อนข้อมูล ในช่อง Text เมื่อได้รับผลจากการทดลอง การแก้ไขคือ จะต้องป้อนค่าที่ได้จากการทดลองให้แน่นอนและแม่นยำ

2. การเลือก%XL ค่าที่เลือกอยู่ในช่วง 3-5%Z การเลือกขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในตัวอย่างเบื้องต้นใช้ค่า5%Z

3. ในการเขียนโปรแกรมมีจะ MATCH FUCTION บางตัวที่สามารถใช้ได้ ดังในโปรแกรม จะมี FUNTION MATCH

ที่ใช้อยู่ $ANGLE2 = 1.5708 - \text{Atn}(\text{pofn} / \text{Sqr}(1 - \text{pofn}^2)) = \text{Arccosine}$

3.7.6 FORMULAS FOR COMMON MATH FUNCTIONS NOT INCLUDED WITH VISUAL BASIC

FUNTION

Secant

FORMULA

$$\text{Sec}(x) = 1/\text{Cos}(x)$$

Cosecant

$$\text{Csc}(x) = 1/\text{Sin}(x)$$

Cotangent

$$\text{Cot}(x) = 1/\text{Tan}(x)$$

Arcsine

$$\text{Asin}(x) = \text{Atn}(x/\text{Sqr}(1-x^2))$$

Arccosine

$$\text{Acos} = 1.5708 - \text{Atn}(x/\text{Sqr}(1-x^2))$$

Arcsecant

$$\text{Asec}(x) = \text{Atn}(\text{Sqr}(x^2-1)) + (\text{Sgn}(x)-1) * 1.5708$$

Arccosecant

$$\text{Acsc}(x) = \text{Atn}(1/\text{Sqr}(x^2-1)) + (\text{Sgn}(x)-1) * 1.5708$$

Arccotangent

$$\text{Acot}(x) = 1.5708 - \text{Atn}(x)$$

Hyperbolic Sine

$$\text{Sinh} = (\text{Exp}(x) - \text{Exp}(-x))/2$$

Hyperbolic Cosine

$$\text{Cosh}(x) = (\text{Exp}(x) + \text{Exp}(-x))/2$$

Hyperbolic Tangent

$$\text{Tanh}(x) = (\text{Exp}(x) - \text{Exp}(-x)) / (\text{Exp}(x) + \text{Exp}(-x))$$

Hyperbolic Secant

$$\text{Sech}(x) = 2 / (\text{Exp}(x) + \text{Exp}(-x))$$

Hyperbolic Cotangent

$$\text{Csch}(x) = 2 / (\text{Exp}(x) - \text{Exp}(-x))$$

Hyperbolic Cotangent

$$\text{Coth}(x) = (\text{Exp}(x) + \text{Exp}(-x)) / (\text{Exp}(x) - \text{Exp}(-x))$$

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดลอง

วัตถุประสงค์ในการทดลอง

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ที่มีผลต่อระบบไฟฟ้ากำลัง
2. เพื่อศึกษาส่วนประกอบต่างๆ ของพาสซีฟฟิลเตอร์
3. ออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟฟิลเตอร์ที่มีประสิทธิภาพ

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. Fluke 43B Power Quality Analyzer	1	ตัว
2. Digital multimeter	1	ตัว
3. ชุดเฟสคอนโทรล (เครื่องชาร์จแบตเตอรี่)	1	ชุด
4. แผงหลอดไส้จำนวน หลอด 25 วัตต์	30	หลอด
5. Henry Meter	1	ตัว
6. แบตเตอรี่ DC SP125 12 V	6	ก้อน
7. สายไฟ	10	เส้น

4.1.1 การทดลอง โหลดชุดเฟสคอนโทรล(ก่อนกรอง)

รูปการทดลอง

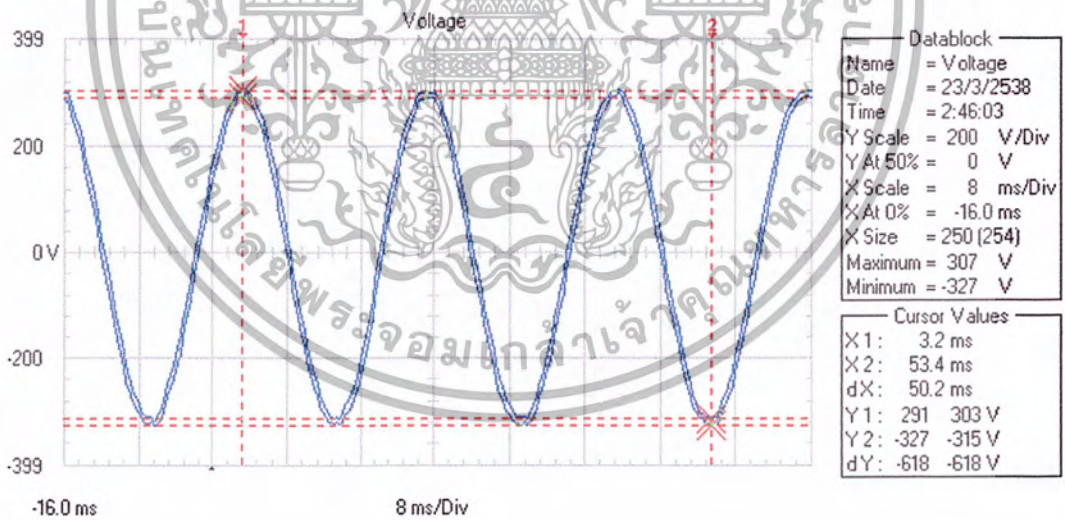


รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายการต่อชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

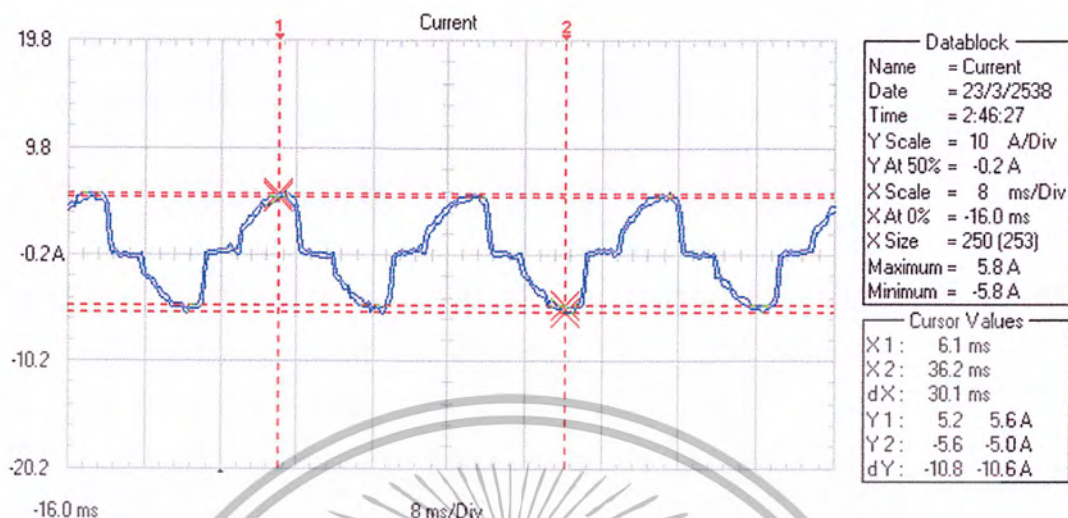
ผลการทดลองก่อนกรอง

แรงดัน	222	โวลต์
กระแสรวม	3.56	แอมป์
กำลังงานจริง (Active Power)	0.79	KVA
กำลังงานปรากฏ (Apparent Power)	0.58	KW
กำลังงานสูญเสีย(Reactive power)	0.54	KVAR
กระแสฮาร์มอนิกที่ 3	0.71 A	THD _i 20.4 %
กระแสฮาร์มอนิกที่ 5	0.56 A	THD _i 15.8 %
กระแสฮาร์มอนิกที่ 7	0.20 A	THD _i 7.1 %
เปอร์เซ็นต์ THD _i รวม		27.8 %
ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์		0.74

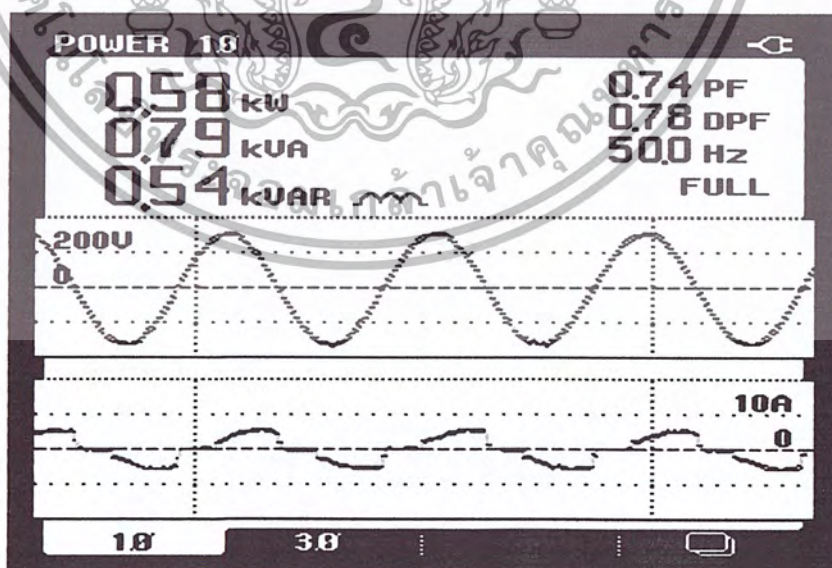


รูปที่ 4.2 รูปคลื่นของแรงดันก่อนกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

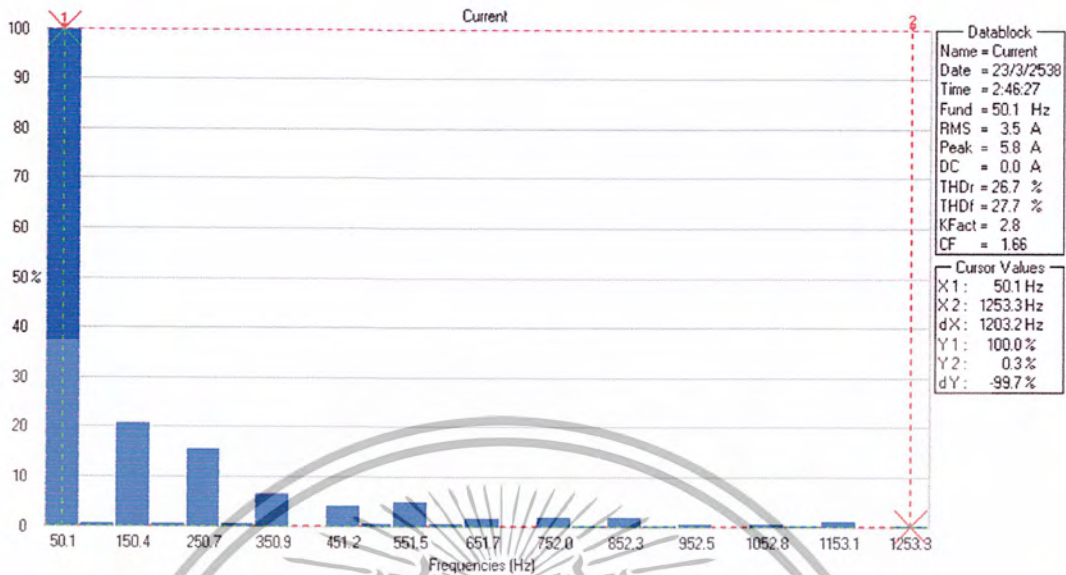


รูปที่ 4.3 รูปคลื่นของกระแสก่อนกรอง



รูปที่ 4.4 รูป Power ก่อนกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



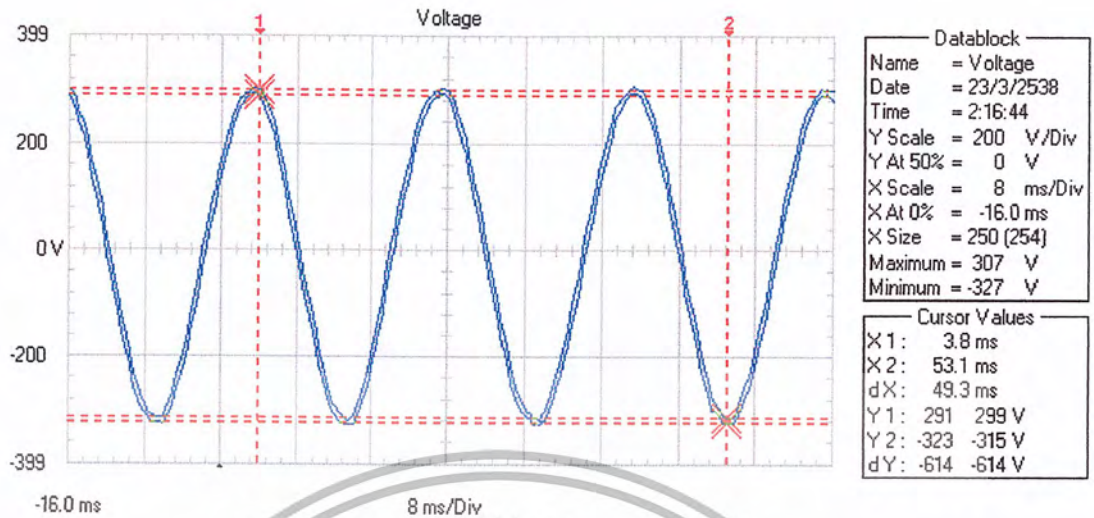
รูปที่ 4.5 รูปสเปกตรัมฮาร์มอนิกก่อนกรอง

4.1.2 การทดลองเมื่อใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแต่ละ Step

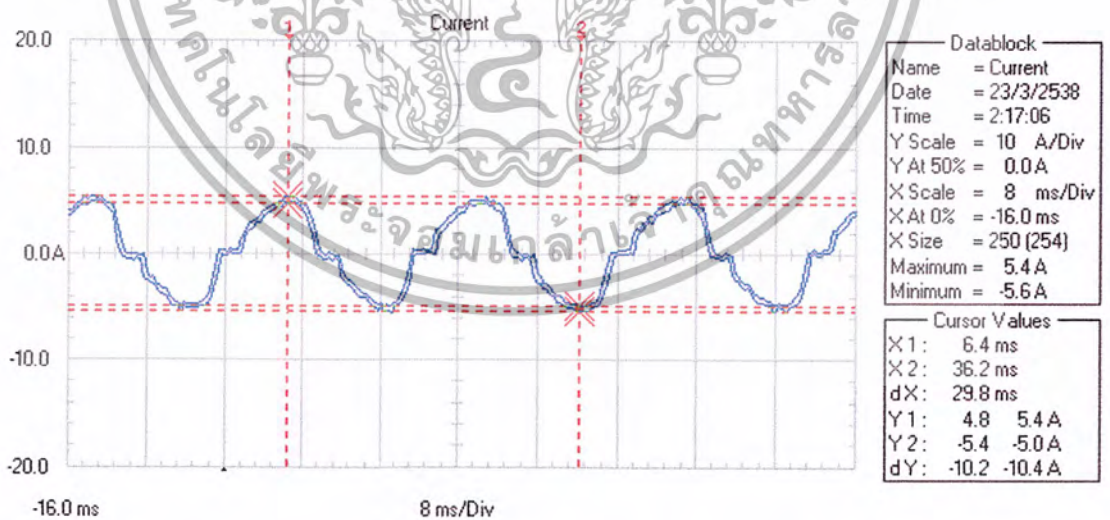
- ผลการทดลองเมื่อใส่ไลเนอร์แอกเตอร์เข้าไป

แรงดัน	222	โวลต์
กระแสรวม	3.99	แอมป์
กำลังงานจริง (Active Power)	0.79	KVA
กำลังงานปรากฏ (Apparent Power)	0.57	KW
กำลังงานสูญเสีย(Reactive power)	0.56	KVAR
กระแสฮาร์มอนิกที่ 3	0.41 A	THD _i 11.7 %
กระแสฮาร์มอนิกที่ 5	0.34 A	THD _i 9.6 %
กระแสฮาร์มอนิกที่ 7	0.27 A	THD _i 7.9 %
เปอร์เซ็นต์ THD _i รวม		17.7 %
ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์		0.71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

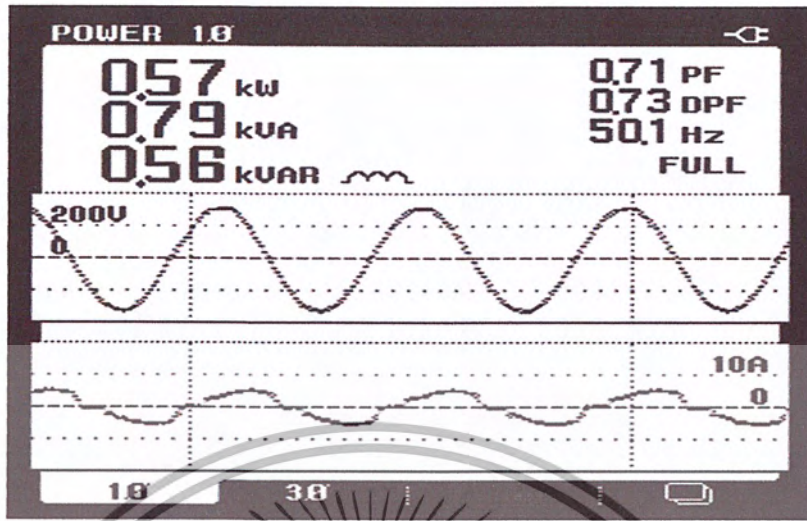


รูปที่ 4.6 รูปคลื่นของแรงดันเมื่อใส่ไดโอดรีแอกเตอร์

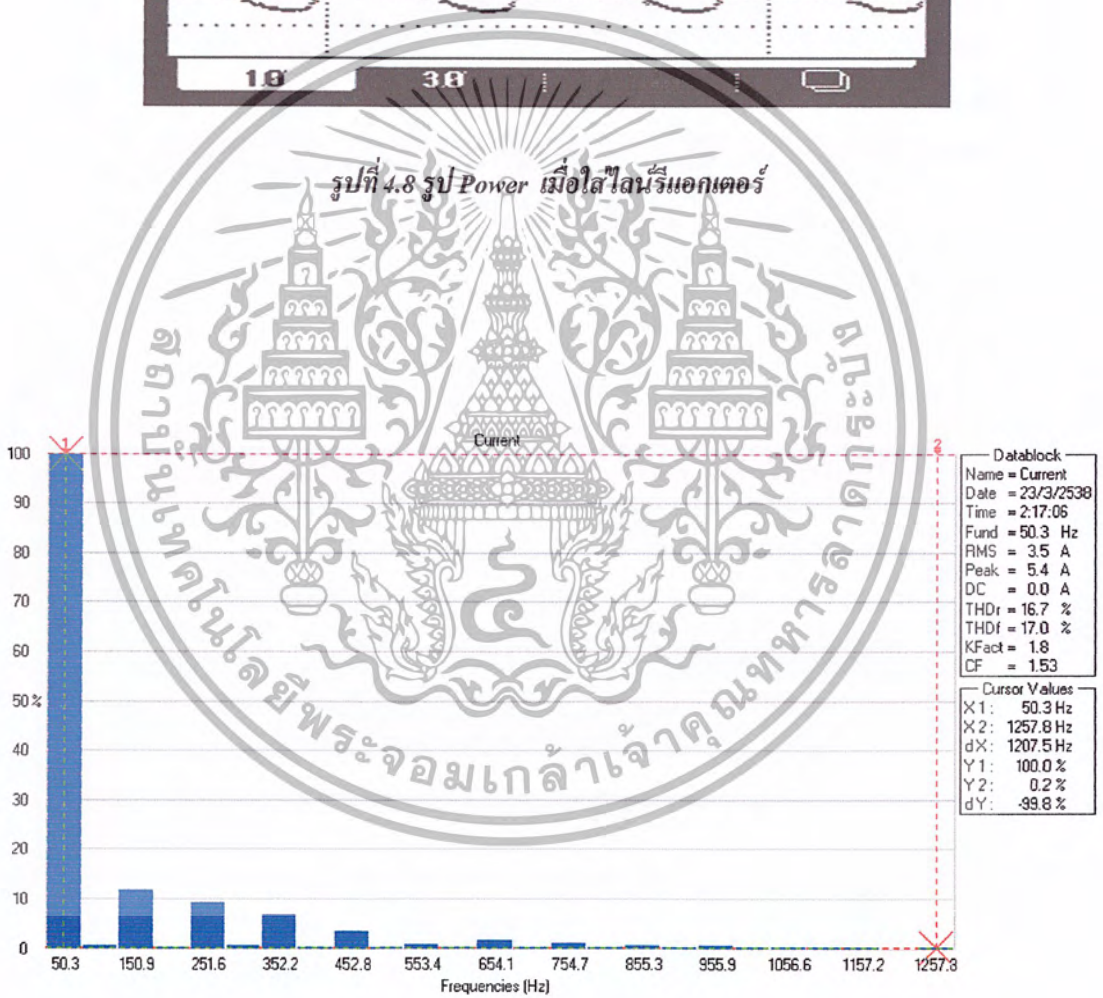


รูปที่ 4.7 รูปคลื่นกระแสเมื่อใส่ไดโอดรีแอกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 รูป Power เมื่อใส่ไลน์รีแอกเตอร์

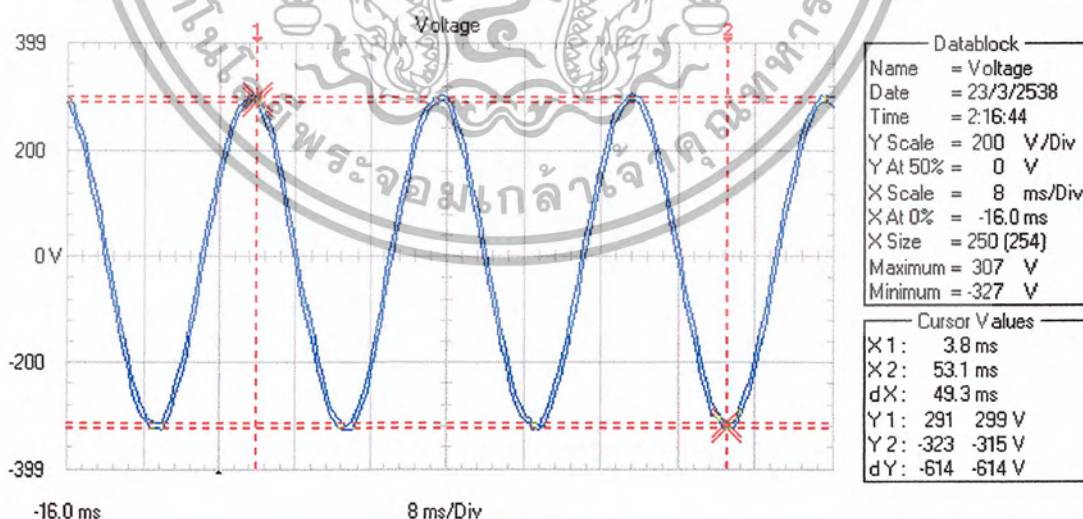


รูปที่ 4.9 รูปสเปกตรัมฮาร์มอนิกเมื่อใส่ไลน์รีแอกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

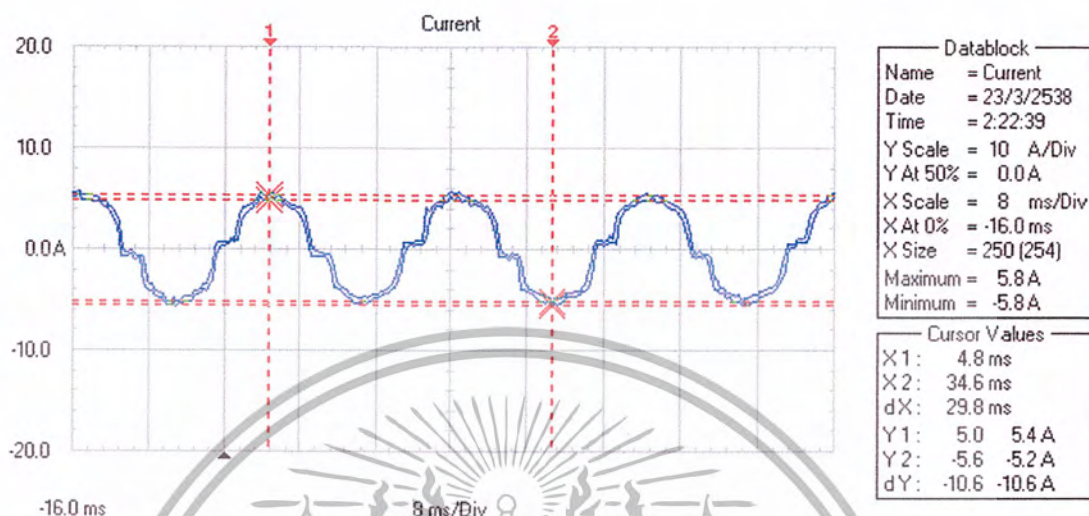
- ผลการทดลองเมื่อใส่ โหลดรีแอกเตอร์ และกรองฮาร์มอนิกที่ 3

แรงดัน	221	โวลต์
กระแสรวม	3.9	แอมป์
กำลังงานจริง (Active Power)	0.88	KVA
กำลังงานปรากฏ (Apparent Power)	0.74	KW
กำลังงานสูญเสีย(Reactive power)	0.47	KVAR
กระแสฮาร์มอนิกที่ 3	0.11 A	THD _i 2.8 %
กระแสฮาร์มอนิกที่ 5	0.27 A	THD _i 7.0 %
กระแสฮาร์มอนิกที่ 7	0.29 A	THD _i 7.5 %
เปอร์เซ็นต์ THD _i รวม		11.9 %
ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์		0.84

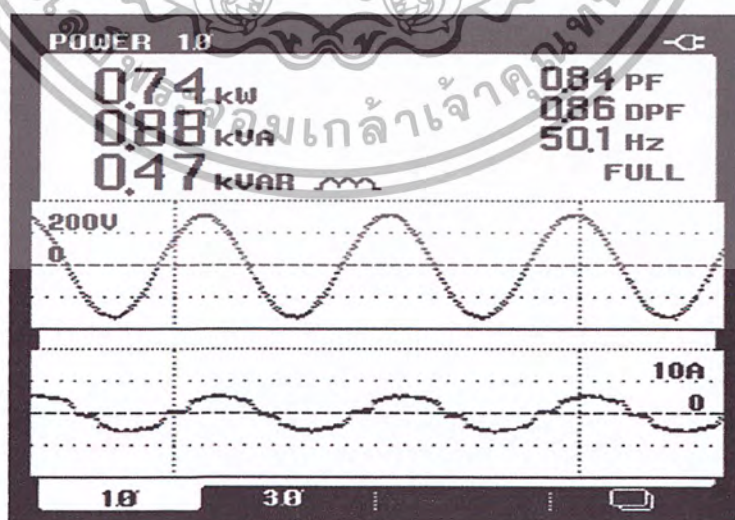


รูปที่ 4.10 รูปคลื่นแรงดันเมื่อใส่ โหลดรีแอกเตอร์และกรองฮาร์มอนิกที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

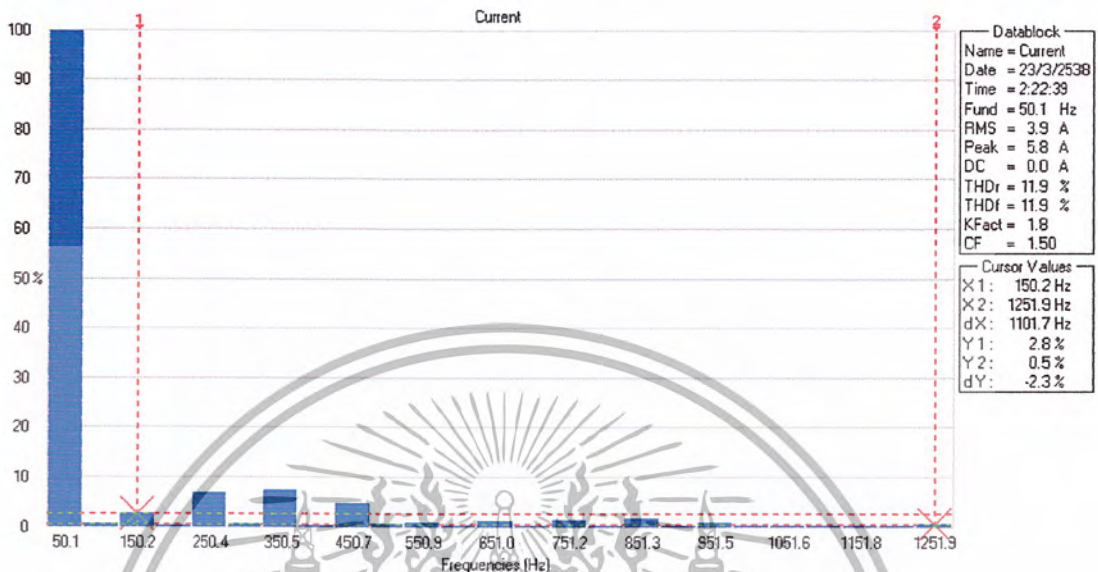


รูปที่ 4.11 รูปคลื่นกระแสเมื่อใช้ไดโอดรีแอक्टरและกรองฮาร์มอนิกที่ 3



รูปที่ 4.12 รูป Power เมื่อใช้ไดโอดรีแอक्टरและกรองฮาร์มอนิกที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

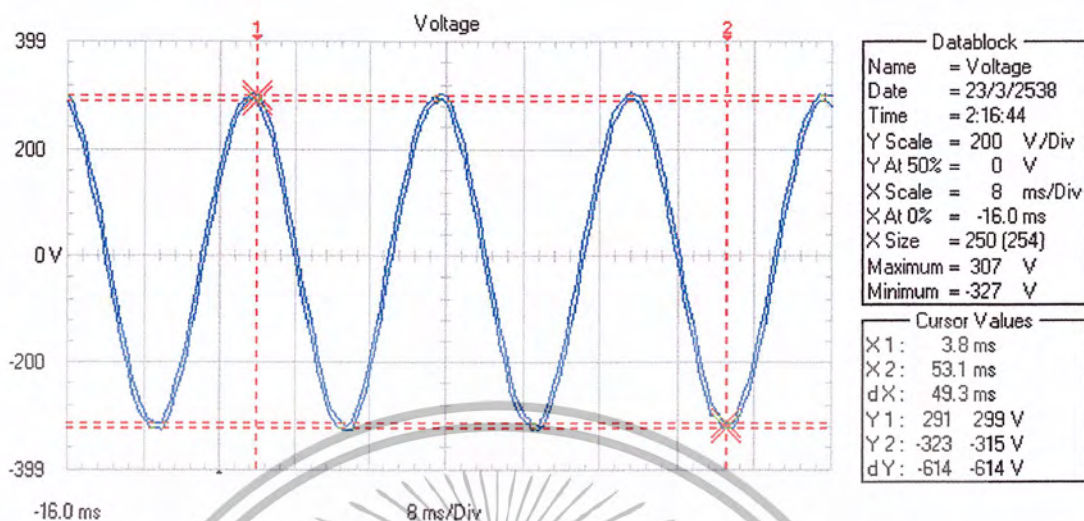


รูปที่ 4.13 รูปสเปกตรัมฮาร์มอนิกเมื่อใส่ไลนรีแอกเตอร์และกรองฮาร์มอนิกที่ 3

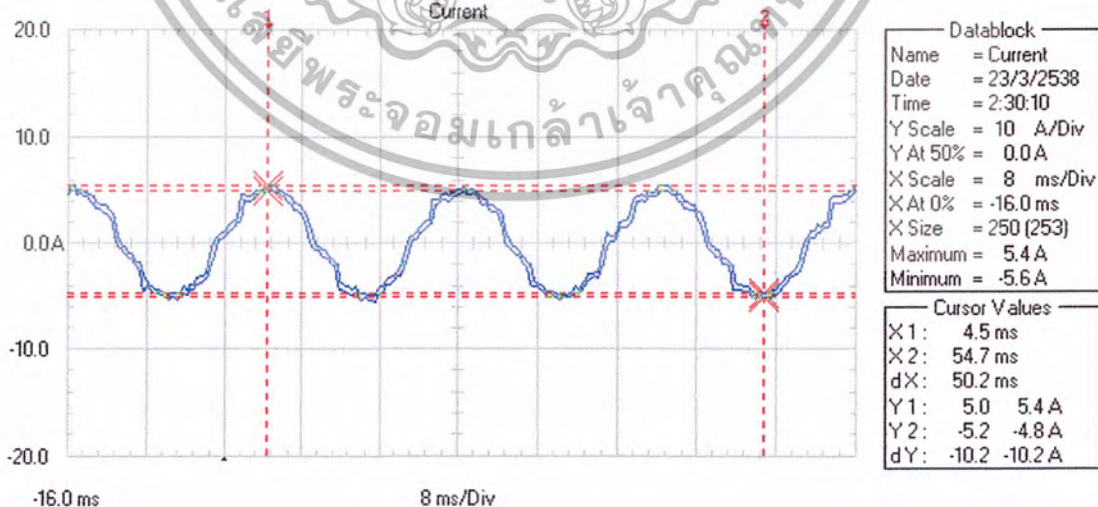
- ผลการทดลองเมื่อใส่ไลนรีแอกเตอร์และกรองฮาร์มอนิกที่ 3,5

แรงดัน	221	โวลต์
กระแสรวม	3.6	แอมป์
กำลังงานจริง (Active Power)	0.82	KVA
กำลังงานปรากฏ (Apparent Power)	0.73	KW
กำลังงานสูญเสีย(Reactive power)	0.36	KVAR
กระแสฮาร์มอนิกที่ 3	0.086 A	THD _i 2.4 %
กระแสฮาร์มอนิกที่ 5	0.1 A	THD _i 2.8 %
กระแสฮาร์มอนิกที่ 7	0.22 A	THD _i 6.1 %
เปอร์เซ็นต์ THD _i รวม	8.3	%
ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์	0.90	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

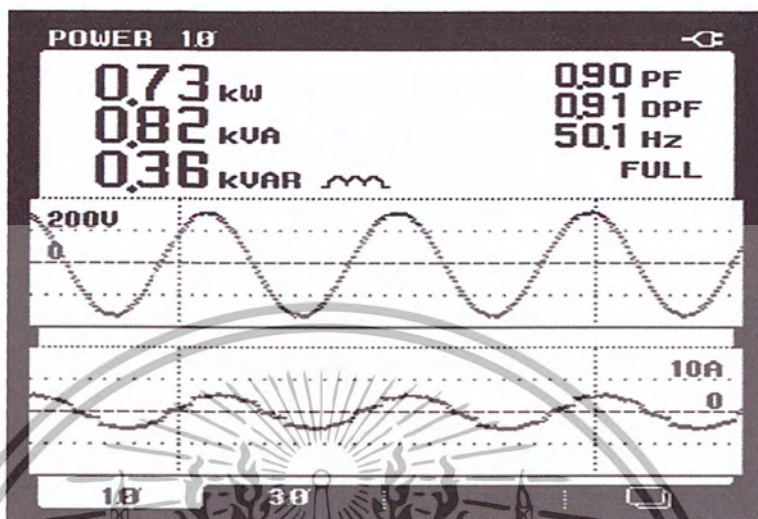


รูปที่ 4.14 รูปคลื่นของแรงดันเมื่อใส่ไลเนอร์แอกเตอร์และกรองฮาร์มอนิกที่ 3,5

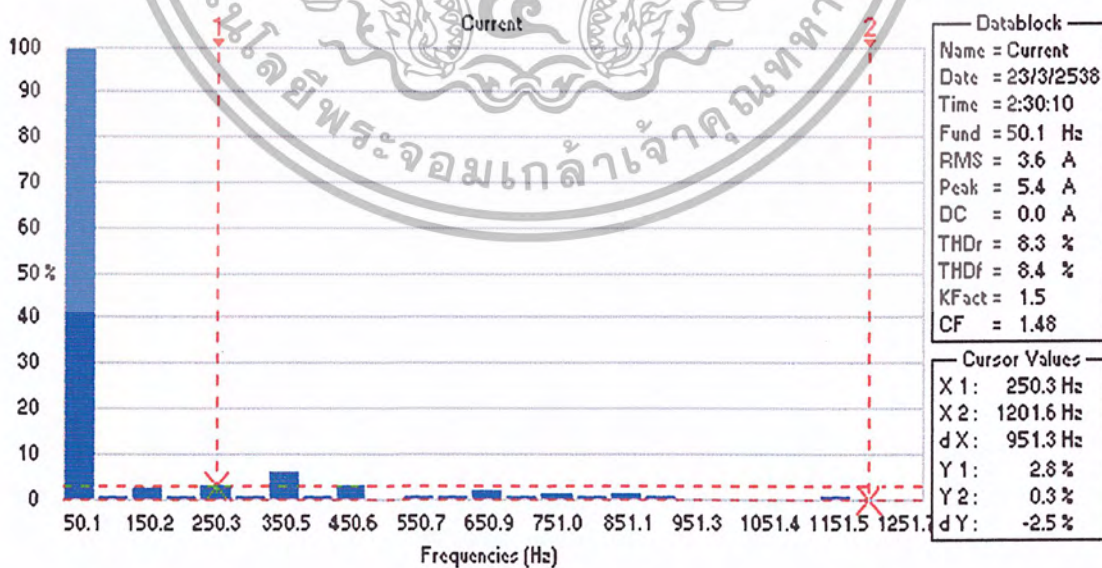


รูปที่ 4.15 รูปคลื่นกระแสเมื่อใส่ไลเนอร์แอกเตอร์และกรองฮาร์มอนิกที่ 3,5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 รูป Power เมื่อใส่ไลน์มอเตอร์และกรองฮาร์มอนิกที่ 3,5

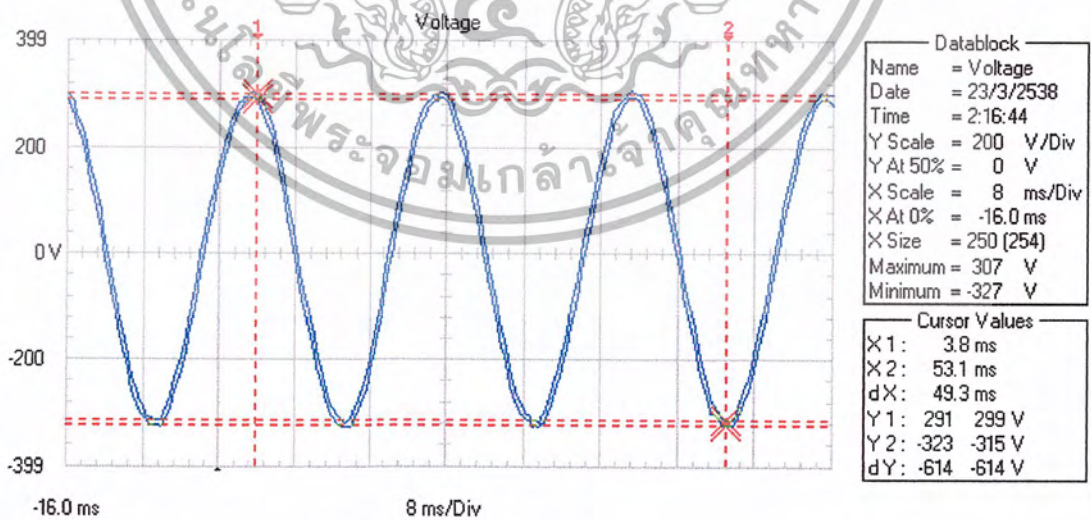


รูปที่ 4.17 รูปสเปกตรัมฮาร์มอนิกเมื่อใส่ไลน์มอเตอร์และกรองฮาร์มอนิกที่ 3,5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

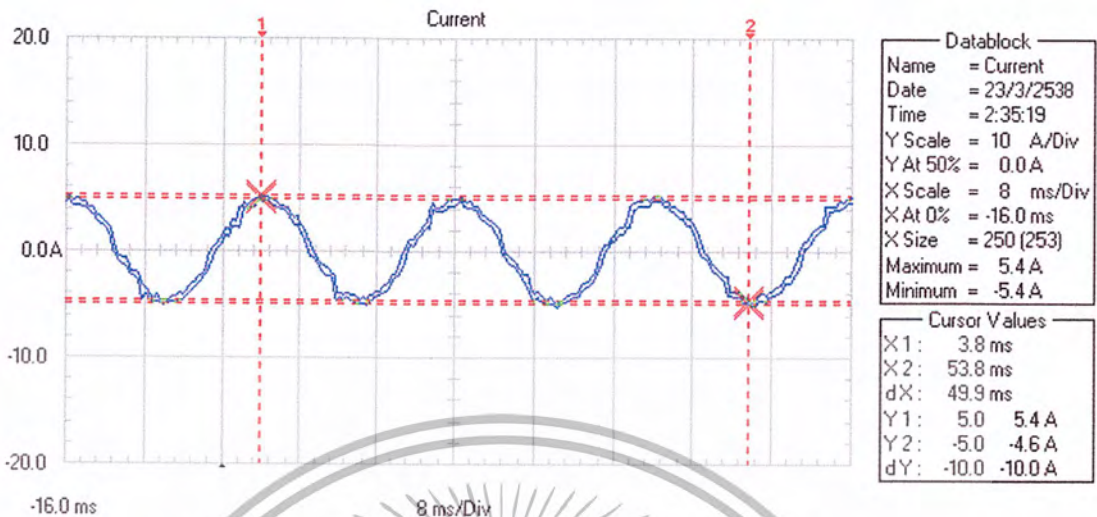
- ผลการทดลองเมื่อใส่ไลนรีแอกเตอร์และกรองฮาร์มอนิกที่ 3,5,7

แรงดัน	221	โวลต์
กระแสรวม	3.5	แอมป์
กำลังงานจริง (Active Power)	0.78	KVA
กำลังงานปรากฏ (Apparent Power)	0.73	KW
กำลังงานสูญเสีย(Reactive power)	0.28	KVAR
กระแสฮาร์มอนิกที่ 3	0.094	A THD _i 2.7 %
กระแสฮาร์มอนิกที่ 5	0.098	A THD _i 2.8 %
กระแสฮาร์มอนิกที่ 7	0.12	A THD _i 3.6 %
เปอร์เซ็นต์ THD _i รวม		6.4 %
ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์	0.93	

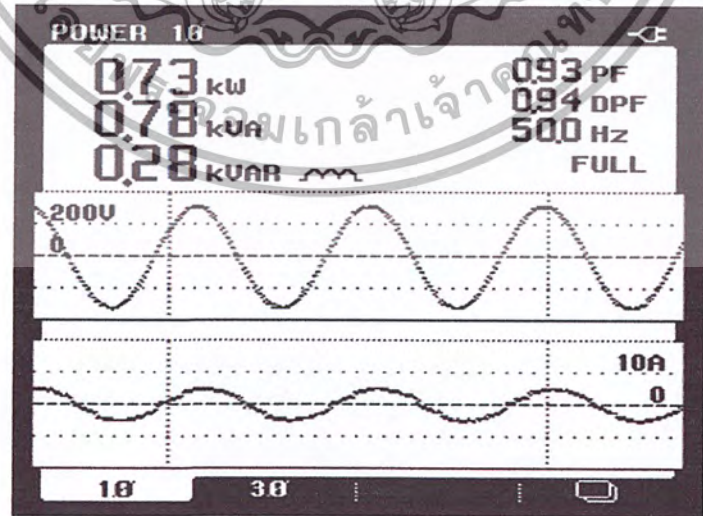


รูปที่ 4.18 รูปคลื่นแรงดันเมื่อใส่ไลนรีแอกเตอร์และกรองฮาร์มอนิกที่ 3,5,7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

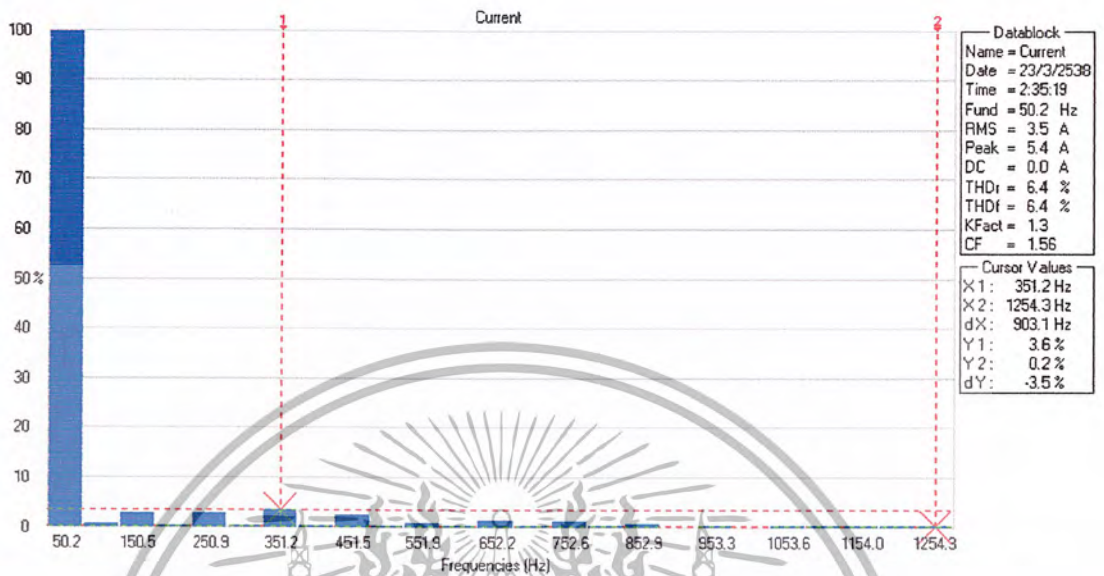


รูปที่ 4.19 รูปคลื่นกระแสเมื่อใส่ไดโอดรีแอกเตอร์และกรองฮาร์มอนิกที่ 3,5,7



รูปที่ 4.20 รูป Power เมื่อใส่ไดโอดรีแอกเตอร์และกรองฮาร์มอนิกที่ 3,5,7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

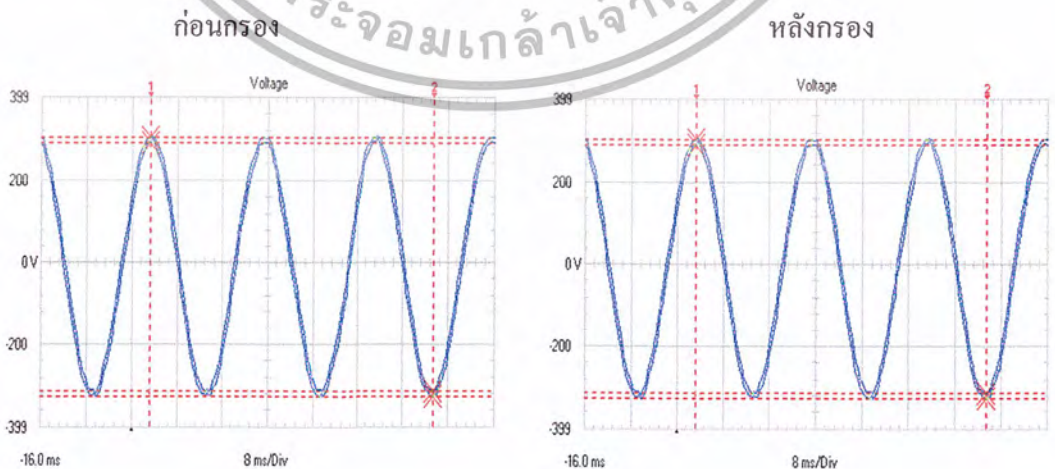


รูปที่ 4.21 รูปสเปกตรัมฮาร์มอนิกเมื่อใส่ไดโอดรีแอกเตอร์และกรองฮาร์มอนิกที่ 3,5,7

4.2 เปรียบเทียบผลการทดลองก่อนกรองและหลังกรอง

4.2.1 การเปรียบเทียบทางด้านแรงดัน

แรงดันที่ได้ก่อนกรองและหลังกรองรูปคลื่นไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากฮาร์มอนิกของโหลดที่ทดลองไม่ทำให้รูปคลื่นแรงดันเพี้ยน พิจารณาดังรูป

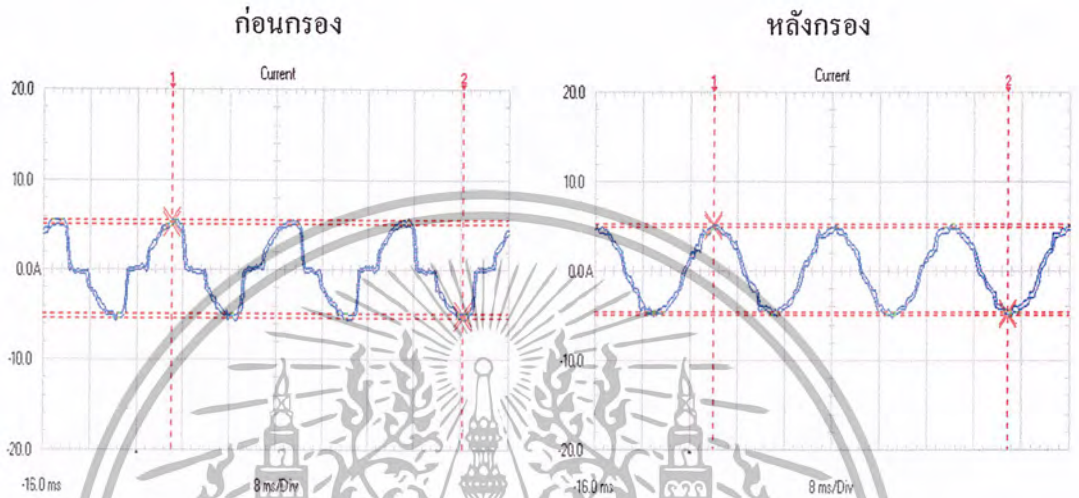


รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 เปรียบเทียบทางด้านกระแส

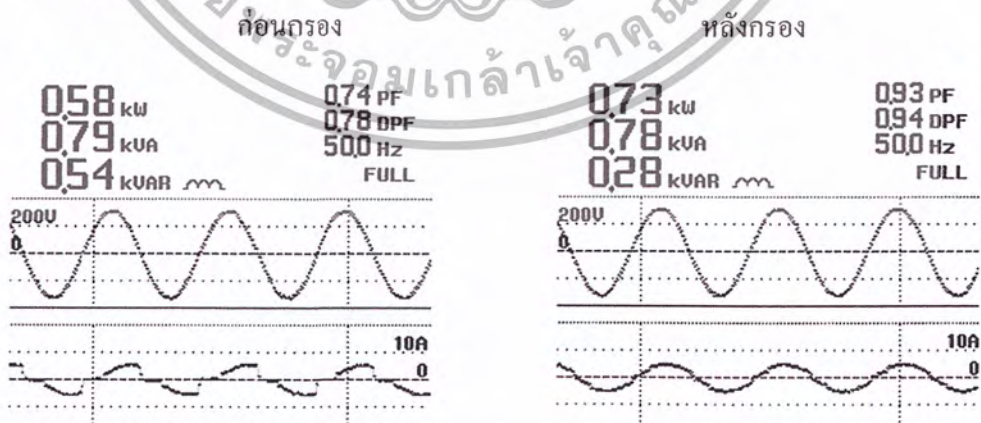
กระแสที่ได้จากการทดลองก่อนกรองและหลังกรองมีความแตกต่างกันมาก รูปคลื่นก่อนกรองจะไม่เป็นรูปไซน์ เนื่องจากผลของฮาร์มอนิก เมื่อผ่านชุดกรองทำให้รูปคลื่นของกระแสเป็นไซน์มากขึ้น พิจารณาดังรูป



รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบกระแส

4.2.3 เปรียบเทียบด้าน POWER

กำลังไฟฟ้าและค่า Power factor ที่ได้ก่อนกรองและหลังกรองมีความแตกต่างกัน ก่อนกรองจะมีค่ากำลังสูญเสียมาก ทำให้ค่า Power factor มีค่าต่ำ เมื่อผ่านชุดกรองจะทำให้กำลังสูญเสียลดลง ค่า Power factor จึงมีค่าสูงขึ้น พิจารณาดังรูป

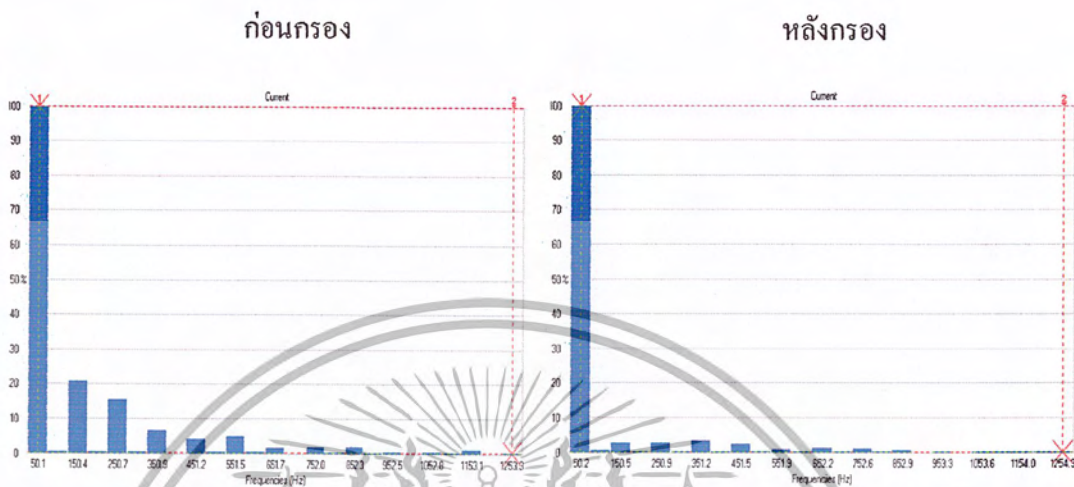


รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้า

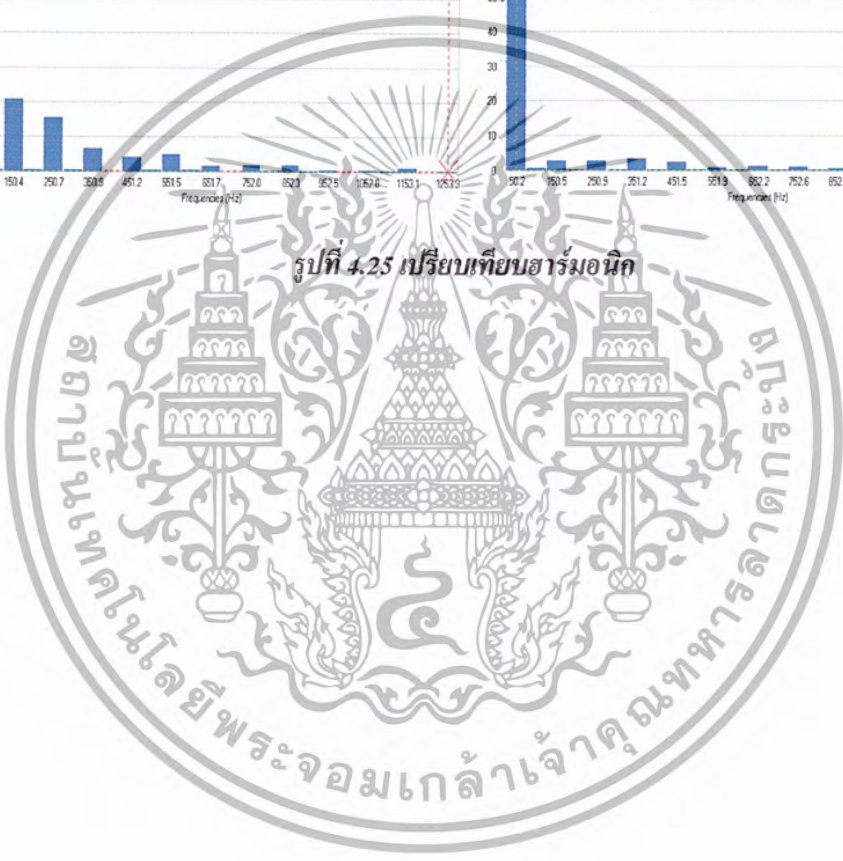
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 เปรียบเทียบผลของฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิกที่ได้เมื่อผ่านชุดกรองฮาร์มอนิกแล้วจะมีผลทำให้ฮาร์มอนิกอันดับที่ 3,5,7 หายไปทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้น พิจารณาดังรูป



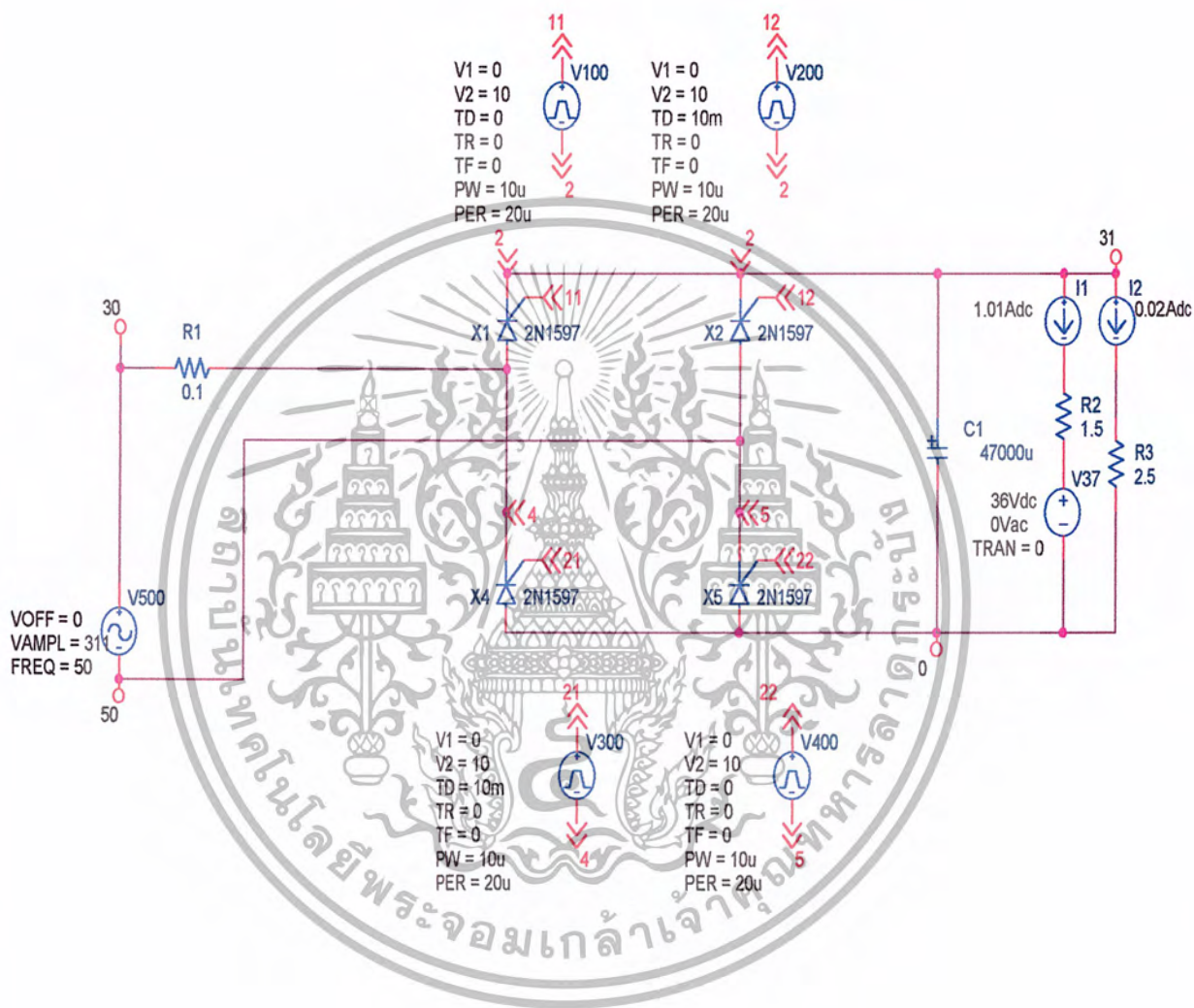
รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบฮาร์มอนิก



ตารางที่ 4.1 สรุปผลการทดลองที่ละ Step

ค่าต่าง ๆ	ค่าก่อนกรองฮาร์มอนิก	ค่าหลังกรองฮาร์มอนิกที่ละ Step			
		ไดโวลต์รีแอกเตอร์	กรองฮาร์มอนิกที่ 3	กรองฮาร์มอนิกที่ 5	กรองฮาร์มอนิกที่ 7
แรงดัน (V)	222	222	221	221	221
กระแส (A)	3.56	3.99	3.9	3.6	3.5
กำลังไฟฟ้าจริง (KVA)	0.79	0.79	0.88	0.82	0.78
กำลังไฟฟ้าปรากฏ (KW)	0.58	0.57	0.74	0.73	0.73
กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (KVAR)	0.54	0.56	0.47	0.36	0.28
PF	0.74	0.71	0.84	0.9	0.93
DPF	0.78	0.73	0.86	0.91	0.94
THD ฮาร์มอนิกที่ 3 (%)	20.4	11.7	2.8	2.4	2.7
THD ฮาร์มอนิกที่ 5 (%)	15.8	9.6	7	2.8	2.8
THD ฮาร์มอนิกที่ 7 (%)	7.1	7.9	7.5	6.1	3.6
THD รวม (%)	27.8	17.7	11.9	8.3	6.4

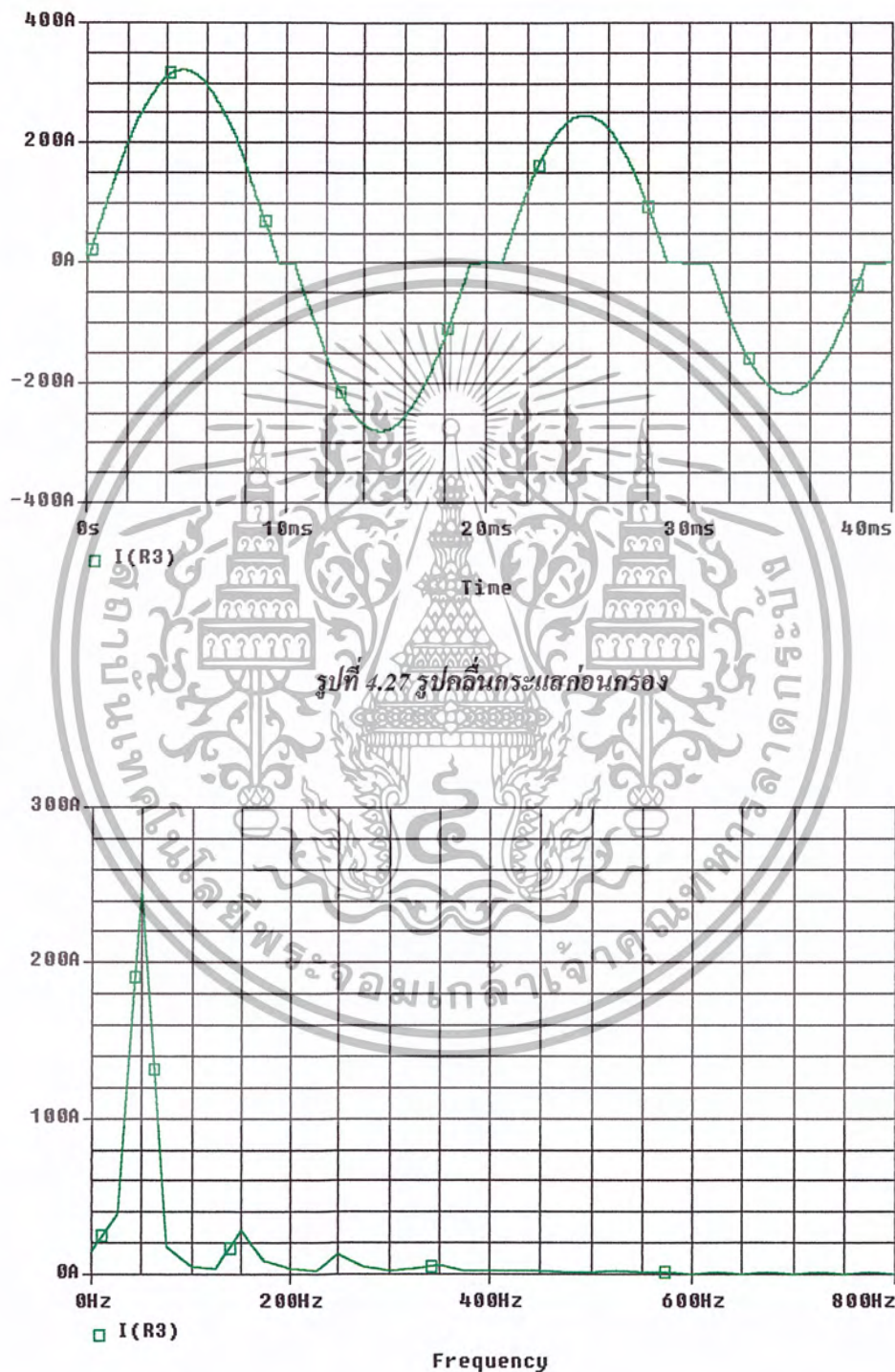
4.3 ผลการ Simulation ในโปรแกรม Orcad



รูปที่ 4.26 วงจรก่อนใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกในโปรแกรม Orcad

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

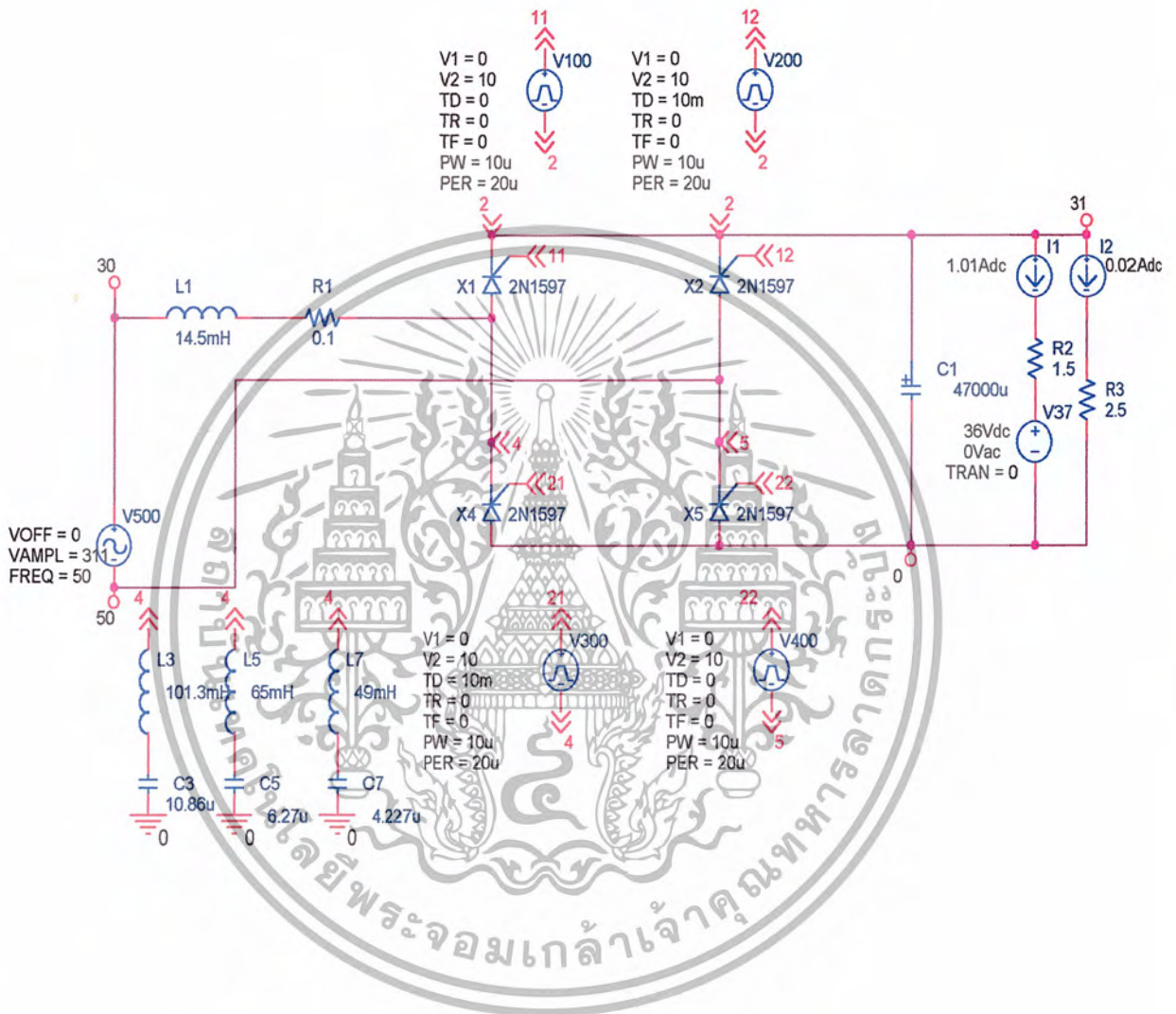
ผลที่ได้จากการ Simulation



รูปที่ 4.27 รูปคลื่นกระแสก่อนกรอง

รูปที่ 4.28 สเปกตรัมฮาร์มอนิกก่อนกรอง

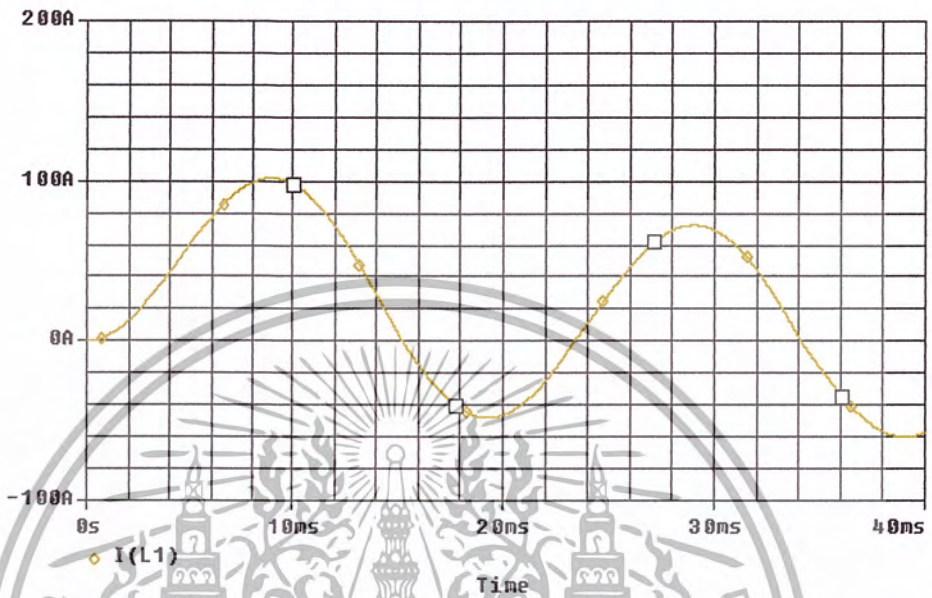
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



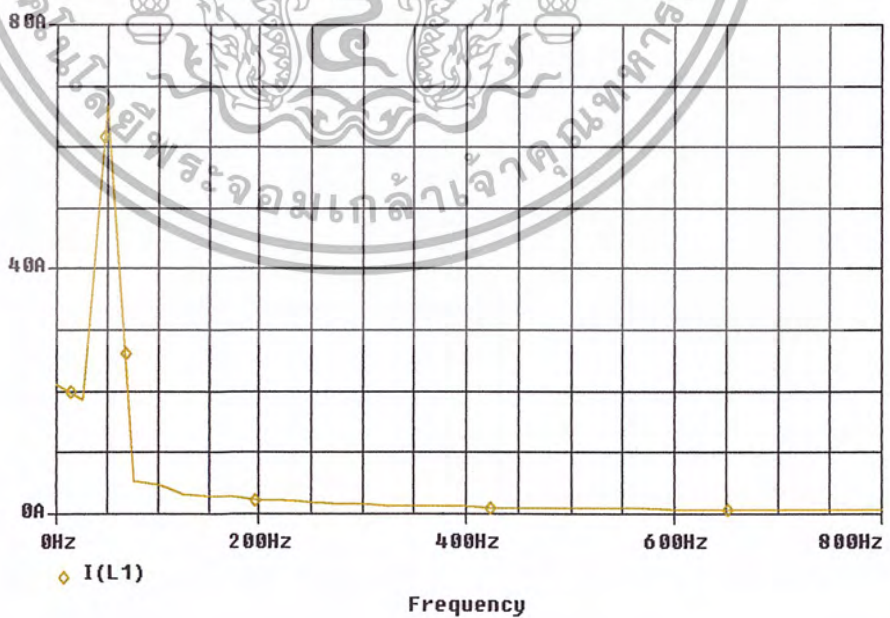
รูปที่ 4.29 วงจรเมื่อใส่ชุดกรองฮาร์มอนิกในโปรแกรม OrCAD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ได้จากการ Simulation



รูปที่ 4.30 รูปคลื่นกระแสหลังกรอง



รูปที่ 4.31 สเปกตรัมฮาร์มอนิกหลังกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุป

5.1 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองโหลดของฮาร์มอนิกปรากฏว่าส่วนใหญ่จะอยู่ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเช่น ชุดเฟสคอนโทรล อินเวอร์เตอร์ เครื่องเชื่อม DC ความถี่สูง ซึ่งในโครงการนี้ได้นำเอาโหลดชุดเฟสคอนโทรล ขนาด 220 V ขนาด 500 วัตต์ เป็นโหลดฮาร์มอนิก ในการออกแบบตัวกรองแบบพาสซีฟ ซึ่งจากผลการทดลองสามารถลด % THD_r รวมของระบบได้ 75 % คือ THD_r รวม จาก 28 % เหลือ 7 % และฮาร์มอนิกแต่ละอันดับ มีค่า THD_r ไม่เกิน 5 %

ค่าคาปาซิเตอร์และค่ารีแอคเตอร์ที่นำมาต่ออนุกรมกันในวงจรกรองนั้น ได้จากการคำนวณทางด้านทฤษฎี ซึ่งค่าที่ได้ในโครงการนี้ได้มีการกำหนดค่าคาปาซิเตอร์ไว้ให้มากกว่าที่คำนวณแล้วออกแบบรีแอคเตอร์ เพื่อจูนความถี่ให้เท่ากับความถี่ที่จะกรองในฮาร์มอนิกนั้น ๆ โดยการปรับ gab ของรีแอคเตอร์ แต่เนื่องจากเครื่องมือวัด ทำให้ค่ารีแอคเตอร์ที่วัด ได้มีความผิดพลาดไปจากที่คำนวณ เมื่อนำมาต่อในวงจรจึงจำเป็นต้องปรับ gab ของรีแอคเตอร์ทีละ step แล้วทำการทดลองกรองฮาร์มอนิก ให้ได้ผลการกรองที่ดีที่สุด แล้วจึงคงที่ค่ารีแอคเตอร์นั้นไว้

จะเห็นได้ว่า ค่าคาปาซิเตอร์และค่ารีแอคเตอร์ที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันกับค่าที่ต่อใช้งานจริงในระบบ ซึ่งก็เป็นไปตามทฤษฎีที่ได้ศึกษามา จึงได้มีการออกแบบ โปรแกรม ในการคำนวณค่า L และ C ในวงจรกรองแบบพาสซีฟ เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบมากยิ่งขึ้น พร้อมทั้งได้มีการจำลองการกรองโดยการใช้โปรแกรม Orcad เพื่อดูผลของฮาร์มอนิกก่อนกรองและหลังกรอง ทำให้การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกมีความถูกต้อง แม่นยำและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางการแก้ไข

1. โหลดที่ใช้ในการทดลองเป็นชุดเฟสคอนโทรล ซึ่งเป็นเครื่องซาร์จแบดแคปเจอร์ และจ่ายโหลดเมื่อทดลองไปนาน ๆ กระแสรวมจะลดลงเล็กน้อย ทำให้การกรองฮาร์มอนิกคลาดเคลื่อน ผลก็คือ THD_r ทำให้ฮาร์มอนิกที่ 3 เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ไม่เกิน 5%

แนวทางการแก้ไข หาโหลดฮาร์มอนิกที่คงที่เพื่อออกแบบตัวกรองพาสซีฟอย่างมีประสิทธิภาพ

2. ในการออกแบบรีแอคเตอร์ ใช้ขดลวดและแกน EI ที่มีอยู่ทำให้น้ำหนักไม่ได้ตามการออกแบบให้มีน้ำหนักน้อย

3. ในการออกแบบรีแอคเตอร์ ค่าที่ได้จากการคำนวณ เมื่อนำมาพันลงแกนจะไม่ได้ค่าตามที่คำนวณไว้มีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย

แนวทางการแก้ไข ปรับระยะ Gab หรือพันขดลวดเพื่อรอบไปประมาณ 30-50 รอบ

4. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง เช่น Fluke 43B , Henry Meter , แผลงหลอด มีอยู่จำกัดต้องรอทำให้

เสียเวลาในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบให้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 แนวทางในการดำเนินงานต่อไป

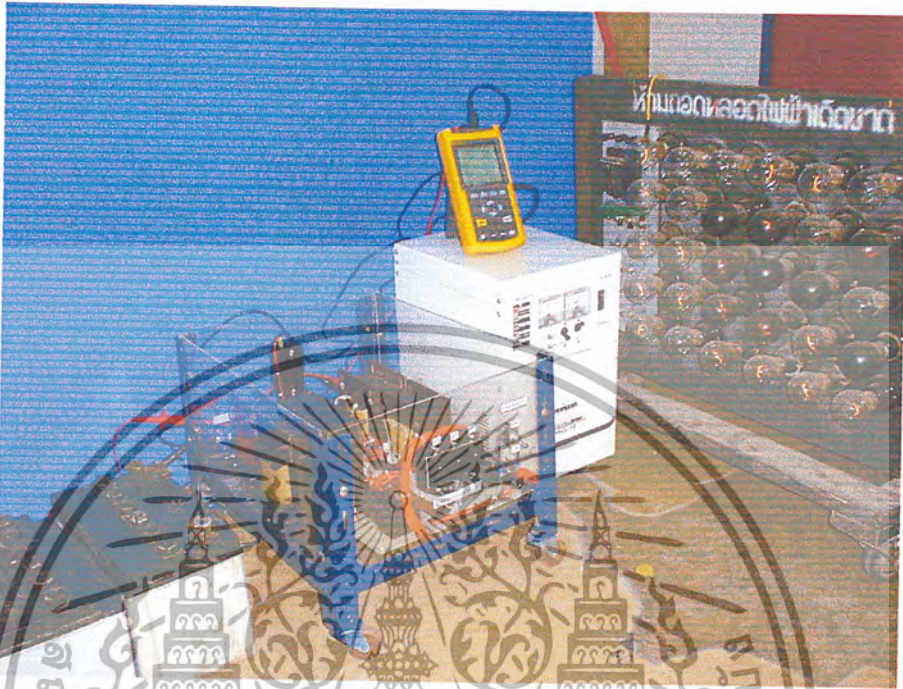
1. ปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพสามารถรองรับฮาร์โมนิกได้ใกล้เคียง 100 % และ $PF = 1$
2. ออกแบบให้สามารถรองรับฮาร์โมนิกได้คงที่ เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงไป
3. ตัวเหนี่ยวนำออกแบบให้มีขนาดเล็ก และน้ำหนักเบา
4. ออกแบบโครงสร้างให้สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก น้ำหนักเบา



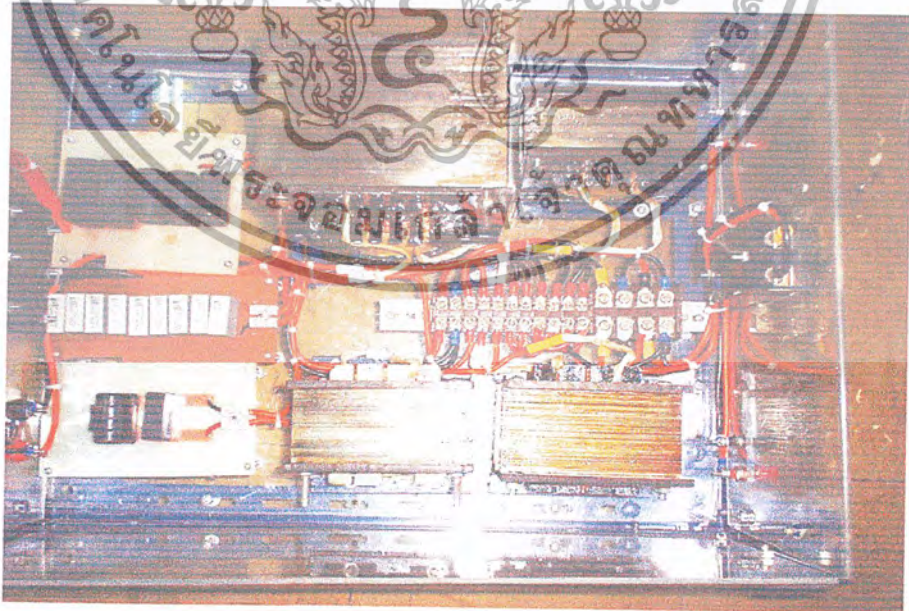


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
รูปชุดกรองฮาร์มอนิก

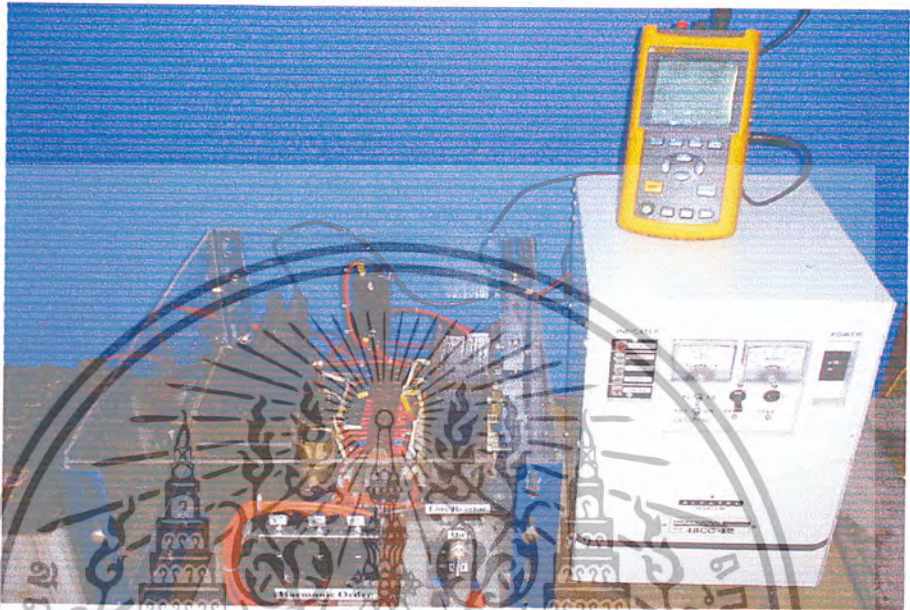


รูปที่ 1 วงจรการต่อชุดกรองฮาร์มอนิก



รูปที่ 2 วงจรภายในของชุดกรองฮาร์มอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 การต่อชุดกรองเข้ากับขารจ์เจอร์และ Fluke 43



รูปที่ 4 สวิตช์และเบรกเกอร์ เปิด-ปิดวงจรในชุดกรองฮาร์มอนิก

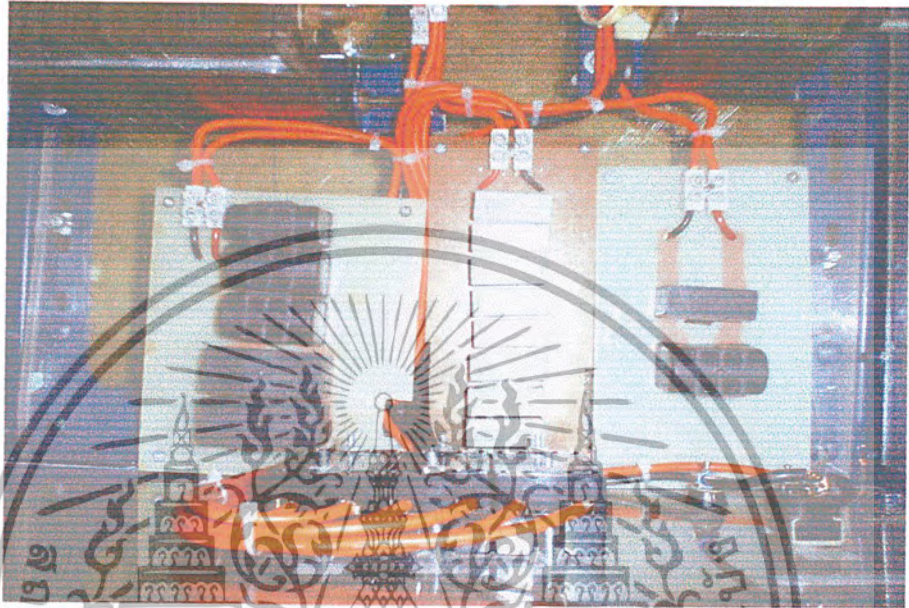
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 หน้าจอ FLUKE 43B แสดงผลฮาร์โมนิก

รูปที่ 6 ชุดกรองฮาร์โมนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 คาปาซิเตอร์ที่ต่อในชุดกรองฮาร์มอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ENGINEER RECOMMENDATION G.5/3
SYSTEM DESIGN AND DEVELOPMENT
COMMITTEE
SEPTEMBER 1976
CLASSIFICATION 'C'

THE ELECTRICITY COUNCIL
CHIEF ENGINEERS CONFERENCE
LIMITS FOR HARMONICS IN THE UK ELECTRICITY SYSTEM

SCOPE

This engineering recommendation supersedes engineering recommendation G.5/2 and G.11, which are hereby cancelled. It provides guidance as to the limits of harmonic currents that may be fed into the electricity supply system by consumer supplied from low or higher voltage systems and to the limits of harmonics voltage distortion caused thereby, but whether or not the a proposed installation can be accepted on the system will rest with the board concerned. Other aspects of the connection of load with non-linear characteristics such as voltage flicker and unbalance are discussed in the relevant engineering recommendation P.16 for induction Furnaces. A frequent application of the harmonics current limits is to the connection of single and three-phase convectors or a.c. regulators, and guidance is therefor given as to the maximum sizes of these types of equipment that may be connected to the electricity supply system.

Household or similar equipment provided with electronic control device and complying with British standard 5406 (European standard EN 50.006: CEHNAIEEC) will automatically comply with this Recommendation.

REFERENCES

This Recommendation makes reference to the following documents:

BS 5406: The Limitation of Disturbances in

Electricity supply networks caused by

Domestic and similar Appliances Equipped

With electronic devices

IEC

: Semiconductor converters

IEC standard (In draft)

: Electronic A.C. Regulators and Switches

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Engineering Recommendation P.16	: EHV and HV Supplies to induction Furnaces
ACE Report No.15	: Harmonic distortion caused by inverter Equipment
ECRC Report No.R920	:The development of a harmonic analyzer
ECRC Report No.962	:A harmonic alarm for the supply Industry ECRC
Report No.989	:A harmonic power meter
ECR Report No.990	:A system for measuring the source impedance Of HV and LV distribution networks at various Frequencies
EC(TR Branch) Publication	: Engineering application to computers program data sheets
EC(TR Branch)Publication	: User 's guide to the automatic mains harmonic analyzer CCL Type C 157A

3 DEFINITIONS

3.1 Point of common coupling (pcc)

The point of common coupling with other consumers is the point in the public supply network electrically nearest to the consumer for whom the new connection is proposed, at which other consumers load are or may be , connected.

3.2 HARMONIC DISTORTION

The departure of a waveform sinusoidal shape, that is caused by the addition of one or more harmonic to the fundamental

3.3 HARMONIC VOLTAGE DISTORTION , V_n

The rms. Amplitude of a harmonic voltage, of order n, expressed as percentage of the rm. amplitude of the fundamental.

3.4 HARMONIC DISTORTION, I_n

The rms. Amplitude of a harmonic current, of order n, expressed as a percentage of the rms. amplitude of the fundamental

3.5 TOTAL HAMONIC VOLTAGE DISTORTION, V_T , expressed as a Percentage of the fundamental, and calculated using the expression

$$V_T = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}$$

Not: Generally, it is sufficient to use values of n up to 19.

3.6 CONVERTOR EQUIPMENT (CONVERTOR)

An operating unit for power conversion, comprising one or more diode or thyristor assemblies together with converter transformers, essential switching device and other auxiliaries

Thyristor A.C. power (A.C. regulator)

Power electronic equipment for the control for the switching of a.c. power using circuits without forced commutation and where switching, mutycycle control or phase controls are included.

Definitions 3.6 and 3.7 for converters and A.C. regulator, are from IEC standard 146, "semiconductor converters", and draft IEC standard, "electronic A.c. Regulators and switching", respectively.

4. General

The method of approach enables the problem of acceptance of load with non-linear characteristics to be dealt with in stages, according to the size and type of equipment. The first stage concerns the smaller type of equipment which are in general use and stages the maximum sizes of converter or a.c. regulator generally acceptable for connection to the normal 0.415, 6.6 or 11 kV system (s). No consideration of system details, other than the normal considerations which apply to all new loads, such as thermal rating of the circuit to supply the load, or voltage regulation, is necessary.

If the equipment size exceeds the stage 1 limit then it should be considered under stage 2. The stage 2 limits comprise a table of maximum permitted values of harmonic currents that the consumer may feed into the system at the point of common coupling, provided that the existing values of individual harmonic and total harmonic voltage distortion on the system are within stated limits

Finally, if the equipment cannot be accepted under stage 2 limits because of its size or the existing levels of harmonic current and voltage, then it should be considered under stage 3. This comprises a number of guide lines, including voltage distortion values, which should be considered in conjunction with a knowledge of the characteristics of the load, the system and existing background distortion levels.

5. Stage 1 limits

5.1 Three phase-equipment

The maximum size of individual converter or a.c. regulator equipment that may be connected to any 0.415, 6.6 or 11 kV system(s), without detailed consideration by the supply authority of the harmonic currents produced, are staged in table I

TABLE 1
MAXIMUM SIZES INDIVIDUAL CONVERTOR AC REGULATOR EQUIPMENT

supply system voltage (kV) at point of command coupling	3-Phase converter			3-Phase A.c.Regulator	
	3-Pulse	6-Pulse	12-Pulse	6-Thyristor	3-Thyristor
	(KVA)	(KVA)	(KVA)	(KVA)	(KVA)
0.415	8	12		14	10
6.6and11	85	130	250	150	100

This limit applies to 12-pulse device, and to combinations of 6-pulse device always operated as 12-pulse device, employing careful control of the firing angles and the D.C. ripple to minimize non-characteristic harmonic, eg 3rd, 5th and 7th

5.2 Single-phase equipment

Single phase electrical appliances equipped with electronic devices for supply or control and intended for household or similar applications should comply with British standard 5406 (European standard EN 50.006)

Single-phase converters or a.c. regulators, which theoretically produce no even harmonics, and which intended for industrial type equipment and battery charging should exceed 5 KVA capacity at 240 volt, 7.5 KVA at 415 or 480 volt. The use of single-phase converters or a.c. regulators, which do produce both odd and even harmonic, is deprecated.

When a number of single phase equipment are installed by a consumer at one location, an attempt should be made to connect them so as to balance the non-linear load equally between the three phase. The aggregate effect of the non-linear loads at an installation where there is more than one non-linear loads per phase should comply with the requirement of stage 2. Further information on the connection of single phase loads is given in engineering recommendation P.16

5.3 Direct current

The use of equipment that produces a D.C. component in the a.c. supply system is deprecated.

6 State 2 limits

6.1 Three-phase loads

The connection of equipment whose side exceeds the stage one limit may be agreed if

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (a) The consumer 's total installation does not produce, at the pcc ,current (in any phase)in excess of those listed in table 2,
- (b) The existing voltage distortion at the point of common coupling before connection of the new load does not exceed 75% of the values in table 3, and
- (c) The short circuit level is not unduly low.

For convenience of use, Table a1 and A2 in the Appendix, show the current limits of table2 in terms of equivalent convector a.c. regulator load.

Example of the procedures that may be adopted in dealing with a request by a new consumer for the connection of non-linear load, or by an existing consumer for the connection of additional non-linear load, are given in the Appendix, section A3.

TABLE 2
PERMITTED HARMONIC CURRENT FOR ANY ONE CONSUMER AT POINT OF COMMON
COUPLING UNDER STAGE 2 LIMITS

Supply (kV)	Harmonic number and current (A rms.)																		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
0.415	4	3	3	5	1	4	9	8	7	19	6	16	5	5	5	6	4	6	
	8		4	6	1	0													
6.6 and 11	1	8	6	1	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1	
	3			0															
33	1	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1	1	
	1																		
132	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1	

6.2 single-Phase Load

Harmonic-producing single-phase loads in excess of stage 1 limits are deprecated because the unbalance caused to the fundamental three-phase voltage as well as the increased penetration of unbalanced triplet harmonic to difference voltage levels. If single-phase loads are installed they should comply with the voltage unbalance limits of engineering. Recommendation P.16. Under unbalance condition voltage levels, in percent may differ widely from the phase to neutral harmonic voltage levels ,in percent, may differ widely from the phase to phase values.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7 STAGE 3 LIMITS

When a non-linear load does not comply with the limits of table 2 and/ or when the voltage distortion of the point of common coupling already excess 75 per cent of the limits of table 3, it may still be possible to connect the load after a detail examination of existing harmonic current and voltage conditions and conditions resulting from the new load.

Information should first be obtained about existing harmonic voltage distortion on the system to which the load is to be connected. This may be obtained from previous knowledge of the system or by a survey using the automatic mains harmonic analyzer knowledge referred to in section 10,"or and equivalent device.

The voltage distortion expect on the distortion network, resulting from a combination of the existing distortion and the produced by the new load, should be estimated and should not exceed, at and point at and on the supply Authority network, the values in table 3. An example of the procedure that may be adopted in dealing with a request for a connection which come within stage 3.in given in section A3 of the Appendix.

The values in table 3 are only to be regarded as a guide to good practice, reducing the risks of damage or malfunctioning of other consumers, or of the board's, equipment or overloading of a section of the network due to resonance.

TABLE 3
HARMONIC VOLTAGE DISTORTION LIMITS IS ANY POINT ON THE SYSTEM
(INCLUDING BACKGROUND LEVELS)

supply system voltage (kV)at point	Total harmonic voltage distortion	Individual harmonic voltage distortion(%)	
		odd	even
0.415	5	4	2
6.6and11	4	3	1.75
33and66	3	2	1
132	1.5	1	0.5

In considering the connection of plant having a 132 kV point of common coupling it may be necessary to make a harmonic penetration computer study. This should permit the level of distortion throughout a network to be estimated, including the effects of resonance, provided sufficient data available on system and load parameter. The side and cos of plant likely to be connected at this voltage, and the potential

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

area of distortion, will, in general, warrant this more detailed analysis. The lack of wound VT 's may make site recordings difficult, but system data should be more readily available to permit analysis by computer studies (see the electricity council's "engineering application of computers")

It is expected that the use of the harmonic impedance meter mentioned in section 10,"site measurements", may help to supply information about the system impedance as seen from the point of common coupling of a consumer 's non-linear load.

8 ADDITION OF HARMONIC

There is no simple rule for the addition of varying harmonic current produced by he equipment of a number of consumer connected to the same section of the distribution network. A research project is being conducted by the electrical research association (ERA) with the of object of formulating a guide for the addition of the harmonic current produced by two or more sources. Pending the outcome of this work, where number of harmonic producing loads are to be connected to the network the procedure decried in section A2 of the Appendix - Treatment of a number of harmonic sources - may be followed as providing a reasonable guide.

9 SHORT-DURATION HARMONIC

Devices such as thyristor - controlled rolling mill drives may produce short-duration bursts of current of as a sheet or billet passes through the rollers these bursts of current may include transients and also harmonics. Such short - duration transients and harmonic are tolerable provide the current bursts and related voltage distortion are of an intermittent nature, eg the bursts duration does not exceed 2 seconds and interval between bursts not less than 30 second . The principle concern is to prevent damage to other plant such as capacitors, Provide the fundamental voltage at the mattering point does not exceed the nominal system supply voltage plus 6 per cent ,

There should be no risk of damage.

The harmonic condition likely to prevail pose problem of measurement and quantitative analysis. However, the controlling factor in such is installations is frequently not the harmonic current content of the waveform but the rapid voltage changes caused by the nature of the process. In order to reduce these to an acceptable level, either the short-circuit level must be high. Such as make harmonic distortion a secondary consideration, or a voltage fluctuation compensatory incorporating harmonic filtering can be provided.

10 SITE MEASUREMENT

Measurement should be carried out from time to time diagnose system behavior and to provide background information so that consideration may be given to the connection of new loads in accordance with stage 2 and 3 procedure site measurements are also required before and after the connection of large new load to verify compliance with the agreed levels of harmonic current production. Instrument has been developing to facilitate this work and to assist in maintaining a uniform interpretation of this Engineering recommendation.

10.1 HARMONIC ALARM INDICATOR

A harmonic alarm indicator has been developed (see electricity council search center (ECRC) report no R 962) and will give an approximate indication of the total voltage distortion exceeds 5 per cent, the flag lock in the fully displayed position. This is a low cost instrument that can be installed at point where high level of distortion is suspected. It may help to determine where harmonic surveys are required and also to give warning of point at which is may be longer be possible to accept loads, in accordance with stage 2 limits, without a harmonic survey.

10.2 AUTOMATIC MAINS HARMONIC ANALYSER

An instrument has been developed (see ECRC report No R 920) under the direction of the electricity council and is designed to facilitate the carrying out of harmonic surveys. It use is described in the electricity council (Technical Research Branch) publication entitled 'User 's guide to the automatic mains harmonic analyzer, CCL - Type C1574A'. A new version of this instrument is now available.

This analyzer can be used to measure harmonic voltage as percentages of the fundamental 50 Hz voltage as the time of measurement, or by use of a suitable shut harmonic current of percentage of the fundamental 50 Hz current at the time of measurement. It also measure phase angle of the harmonic relative to the fundamental .The instrument will measure are the harmonics selected in the range 2nd to 25th (or to 39th in a special version).It can be set to measure each harmonic for 5, 10 or 20 seconds and to make the selected sequence of harmonic measurement continuously. Or at intervals of 7.5,15,30,or 60 minutes. The measured quantities are recorded on built-in printer and, if required can be punch onto paper tape by a separate paper tape punch. Computer programs are available to analyses the paper tape output Further detail of these instrument and of the paper tape data analysis, can be obtained from the technical Research Branch of the Engineering Division, Electricity.

Harmonic current and voltage magnitudes frequently vary erratically, and occasionally give rise to uncharacteristic high values. There is also the possibility of occasional spurious high

values being recorded by the instrument; these reading should be ignored. It is recommended that over a 24-hour record period.the highest three rms. Reading of a harmonic be identified and, if they are not equal, the lowest one is taken and compared with them limit of the same harmonic number in Table2 A shorter recording period may be used if there is justification for believing that this will include a number of occasions of maximum harmonic current generation.

10.3 DIRECTION OF FLOW OF HARMONIC

The convention adopted in the supply industry concerning the connection of thyristor/diode or other non-linear load to system is to consider the direction of flow of harmonic current resulting from their connection as being from the device into the source of the supply. However it is evident that when there are other non-linear load connected to the system the net harmonic current flowing in the new connection at the point of common coupling will be depending on the magnitude and the phase angle of both the existing and new harmonic currents and the ability of the new loads to absorb harmonics. This may be important consideration if the installation includes power factor correction capacitors or a filter since either may draw harmonic current from the supply system as well as from the new non-linear load.

The direction of flow of the net harmonic connect in the new connection can be determined by site measurement using an instrument developed (see ECRC Report No . R 989) for the purpose by the electricity council Detail of this instrument can be obtained from the Technical Research Branch.

10.4 IMPEDANCE MEASUREMENT

A recurring problem, when considering the connection of new load, is the conversion of harmonic current, injected into the system, into their corresponding harmonic voltages, because the values of system impedance at harmonic frequencies are not know with confidence. A survey is being made of system harmonic impedance with a technique (see ECRC Report No R990) develop by the electricity council. The harmonic impedance measurement –system comprises a variable –frequency current injection unit an automatic harmonic analyzer modifier to measure the injected frequencies. Current amplitude and phase angle are monitored via a system current transformer whilst the voltage drop across the system impedance is monitored in amplitude and phase via a system voltage transformer Victorian division the system impedance at the injection frequency.

11. APPLICATION

This Recommendation in no way overrides good engineering practice for establishing firm supplies and acceptable regulation.

It is suggested that in accepting harmonic producing loads within the limit of this recommendation, the following approach should be adopted :-

All such installation larger than 1 MW or beyond the limit of stage 2 should have commissioning tests carried out by the electricity board to determine:-

i Prior to commissioning – the magnitude of existing current and voltage harmonic in the network.

ii following commissioning – that agreed values of harmonic current and voltage distortion have not been exceeded.

The consumer should be advised to check:-

i. That power factor correction capacitors are not being overloaded by excessive harmonic current absorption, or overstressed by excessive peak voltage.

ii. That a harmful degree of series or parallel resonance not occurring.

As there is no guarantee that adherence to the recommended limits of harmonic current and voltage will prevent trouble arising particularly when the limits are approached, and as it prudent to consider that system charges will some thing justify re-examination. Measurement should be carries out from time to time to diagnose system behavior and equipment performance. The use of the harmonic alarm indicator, on the system at points where harmonic surveys are required.

Bearing in mind the limits imposed are necessarily base on certain simplifying assumptions and and in order to enable as flexible an interpretation of the recommendation as possible attention is drawn to the use of filters for limiting the harmonic currents passed to the network and also to the use of protective inductor with capacitor installation to eliminate possible resonance and overloading, and to the use of alternative transformer connection to produce phase shifts between currents from a number of equipment.

An ACE Report will describe the relevant methods of measurement and study procedures, and will explain the theory and assumptions on which the present engineering recommendation is based.

TABLE A1

Maximum load of single-phase installation correspond to harmonic current limits of table2

supply system voltage (kv) at point of common coupling	type of converter	Permissible KVA capacity and corresponding Effective pulse Number of 3-phase installations		
		3-pulse	6-pulse	12-pulse
0.415	uncontrolled	–	150	300
	half-controlled	–	65	–
	controlled	–	100	150
6.6and11	uncontrolled	400	1000	3000
	half-controlled	–	500	–
	controlled	–	800	1500
33	uncontrolled	1200	3000	7600
	half-controlled	–	1200	–
	controlled	–	2400	3800
132	uncontrolled	1800	5200	15000
	half-controlled	–	2200	–
	controlled	–	4700	7500

Notes

i Multi-converter installation

The total installed capacity of converter, at an installation comprising a number of separate converters, may be greater than the figures shown if there is diversity in use and/or control. See section A2.1, “coincidence factor” and Table A3

ii 3-phase converters

These are not acceptable at 415 V because they produce direct current in the low voltage network.

iii Half-controlled converters

The capacities show in table A1 for 6-pulse half-controlled converter, refer to three-thyristor/three-diode half-controlled bridges.

iv Uncontrolled converters

The capacities had shown for uncontrolled, that is, free firing, converters take advantage of transformer impedance in reducing the harmonic currents to values below the theoretical, infinite load inductance values.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

v Accuracy of control

The maximum loads permitted assume that the accuracy in the timing of the firing pulses is such that they are symmetrically displaced on the three phase, and the commutation voltage at the voltages at the instant of firing are all identical.

TABLE A2
MAXIMUM LOAD OF SINGLE AC REGULATOR INSTALLATIONS
CORRESPONDING TO HARMONIC CURRENT LIMITS OF TABLE 2

Supply System voltage (kV) at point of common coupling	3 phase		1 phase
	6 thyristor type (KVA)	3 diode/3 thyristor type(KVA)	2 thyristor full wave type(KVA)
0.415	100	85	25(240 v)
6.6 and 11	900	600	45(415v)

*Not that these devices may be described as 3-phase or 1-phase Triacs. A Triac simulates a single assembly of two thyristors with,

A2 TREATMENT OF A NUMBER OF A HARMONIC

Statistical methods have been propose for the addition of harmonic currents produced by several non-linear loads connected to the same supply system. Pending the outcome of these investigations, Table A3 may be to assess the cumulative effects of a number coupling on the same voltage network.

If however, one source provides more than 60% of the arithmetic total harmonic current, the arithmetic total should be used.

A2.1 COINCIDENCE FACTOR

Types of equipment and operating condition are numerous; however present information regarding summation effects only justifies the use of the three broad categories in Table A3

TABLE A3
COINCIDENCE FACTORS FOR IN SUMMATION OF HARMONIC CURRENT *

Category	Type and Operating Conditions of A number of Convertors	Coincidence Factor
1.	Uncontrolled convertors (therefore a high probability of phase coincidence at times of peak harmonic production)	0.9
2.	Convertors with control of firing angle ,operating on daily duty cycles likely to produce maximum rms harmonic currents on numerous occasions each day (therefore a fair probability of coincidence of peak harmonic production of a number of units).	0.75
3.	Convertors with control of firing angle , operating independently , intermittently throughout the day , or once started operating continuously for a shift and only producing maximum rms harmonic currents during starting (therefore low probability of coincidence of peak harmonic production and then only for a short time).	0.6 for up to 3 convertors 0.5 for 4 or more convertors

*Note: As started in Section A2 above , this guide can only be used when no convertor provides more than 60% of the arithmetic total of the harmonic currents being considered. If a convertor does provide more than 60% of the arithmetic total then the arithmetic sum must be used and the Coincidence Factor is therefore 1.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Coincidence Factors shown in table A3 for each category may be applied to the arithmetic sum of the maximum rms values of harmonic currents produced by a number of equipment in kVA – if table A1 or A2 are being used.

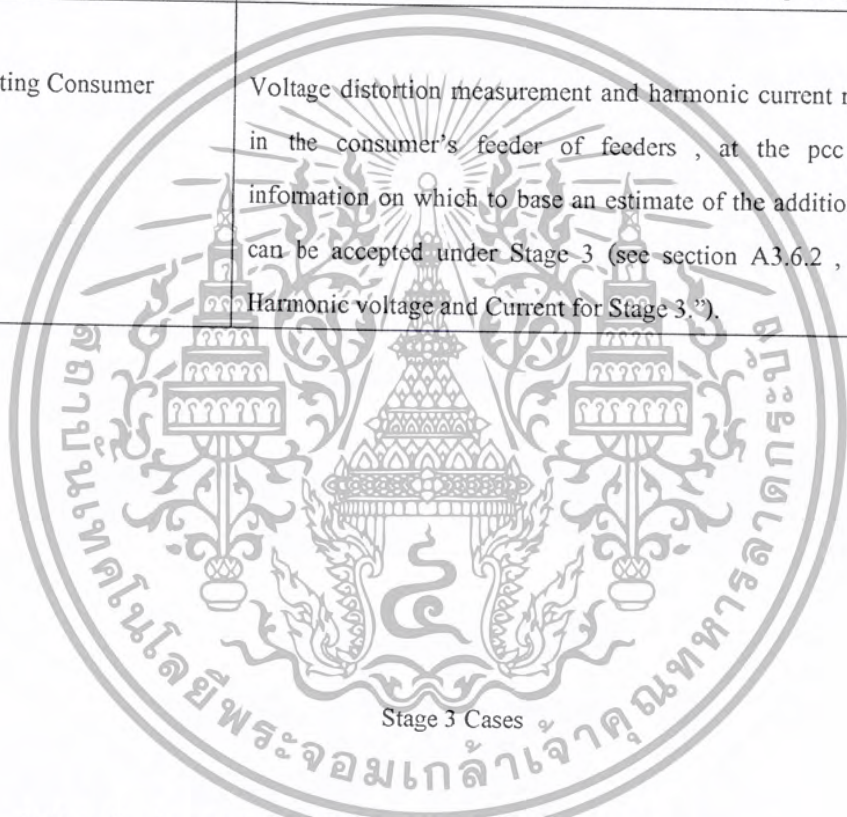
A3 COMPLIANCE WITH STAGE 2 AND STAGE 3 RECOMMENDATIONS

A3.1 Site Measurements

Site measurements may be required before agreeing to the connection of a new consumer with a non-linear load or the connection of additional non-linear loads by an existing consumer. They should be made under the conditions likely to produce the greatest distortion. This will normally be at times of minimum demand on the supply system, with no local generation connected. The types of measurement required depend upon whether a new consumer's application is being considered or an existing consumer wishes to install additional non-linear load. The measurements required are as follows:-

Stage 2 Cases	
(a) New Consumer	Voltage distortion measurement to determine that the voltage distortion at the proposed pcc does not exceed 75% of the value of Table 3 and that the consumer may therefore be considered under Stage 2.
(b) Existing Consumer	Voltage distortion measurement as in (a) above. Harmonic current measurement at the pcc to provide information on which to base an estimate of the additional load that can be accepted under Stage 2. (See Section A3.5 "Estimating Harmonic Current for Stage 3.")

(c) New Consumer	Voltage distortion measurement at the proposed pcc to determine what increase in voltage distortion may be allowed to appear due to the connection of a new non-linear load. Harmonic current measurement may also be required to determine the magnitude and pattern of hourly variation in magnitude and phase of exiting harmonic current in feeders at the proposed pcc (see section A3.6.1 , “Estimating Harmonic voltage and Current for Stage 3.”).
(d) Existing Consumer	Voltage distortion measurement and harmonic current measurement in the consumer’s feeder of feeders , at the pcc to provide information on which to base an estimate of the additional load that can be accepted under Stage 3 (see section A3.6.2 , “Estimating Harmonic voltage and Current for Stage 3.”).



Stage 3 Cases

A3.2 Information Required from Consumer , For Stage 2 and 3 Cases

The consumer should be asked to provide , as appropriate , the following information , some of which he may have to obtain from his equipment supplier:

a New Consumer

- i Type and rating of the proposed plant.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ii Rating and point of connection of any power factor correction capacitor or filter bank.

iii Pulse number of convertors, type of a.c. regulators , method of connection (ie type of bridge , full or half- controlled etc) and details of any transformer connections providing phase displacement between individual convertor equipments.

iv Harmonic current production for the whole installation in the form of a table giving:-

v Type and duty cycle of plant , in particular the time of day , duration and number of time per hour or day that maximum production of harmonic occurs.

vi Details of any short bursts of harmonics (See Section 9 , “ Short Duration Harmonics “) .

b Consumer with Existing Non – Linear Load

i to vi as in (a) for both new and existing plant plus

vii The relative phase displacement of the harmonics produced by the new and existing plant . If that is not possible a statement of the categories into which the sections of the plant fall according to Table A3 ; alternatively a table of maximum harmonic current for the complete installation which the consumer undertakes not to exceed and which can be checked by site measurement using the Automatic Mains Harmonic Analyser .

A3.3 Information Required by Consumers

The consumer may require the following information

i The short – circuit level of the Board’s system , as seen from the pcc for pcc for winter minimum generation condition. If there is a large variation in the short – circuit level between winter and summer condition due to the operation of local generation, it is advisable to use the summer minimum plant condition.

ii Details of the existing harmonic voltage distortion at the pcc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

iii In Stage 3 cases , for a new connection , the estimated values of harmonic currents which the new consumer may be allowed to produce at the pcc ; or , where an existing consumer wishes to increase his non – linear load , the maximum value of the harmonics current that he may be allowed to produce with the combination of new and existing loads.

A3.4 System Impedance

The impedance of a supply system as seen from a pcc will depend upon the frequency of the current flowing , the resistance , inductance and capacitance of the system and its connected loads . When considering the effects of harmonic currents produced by consumer it is seldom possible to obtain sufficient information of the system and load characteristics to carry out an accurate harmonic penetration study . For the purpose of this Recommendation , in the absence of more detailed information, it is assumed that the system impedance is inductive and hence proportional to frequency , and that there are no resonance effects. At 132 kV, sufficient information should be available to permit estimates to be made using computer programs. Particular care is required in dealing with higher order and triplen harmonic. In the latter case transformer winding connections have a major effect and must be carefully represented.

A3.5 Estimating Harmonic Currents For Stage 2

When considering an application by an existing consumer to install additional non-linear load under the stage 2 procedure it is necessary to estimate jointly with the consumer the harmonic currents that the new load may produce, without the combined existing and new harmonic currents exceeding the permitted values of Table 2. It is then possible for the consumer or his equipment supplier to estimate the permissible harmonic characteristics of the new plant.

This estimate may be made in the following manner, using the results of the site measurements mentioned in Section A3.1 (b) and described in Section A4:-

For each harmonic let:-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_m = the measured values of harmonic current, (item (b) of Section A3.1)

I_p = the permitted total harmonic current in accordance with Table 2

I_a = the harmonic current that could be accepted under Stage 2 from the

k_1 = factor from table A3 taking account of the consumer's existing and

then,

$$I_a = \frac{I_p}{K_1} - I_m$$

The consumer can then be advised that the combined operation of his new and existing load will be acceptable provided that his total installation does not produce harmonic currents in excess of I_p (from Table 2) of which it is estimated that I_a may be produced by the new load. Measurements should be made during commissioning to ascertain that the value I_p is not exceeded.

Using the above approach to calculate value for I_a which must not be exceeded, use is made of the coincidence factor k_1 . consequently there is a finite probability that the value of I_p will occasionally be exceeded (See Section 10.2, "Automatic Mains Harmonic Analyser"). When measurements are made to check the actual values of the currents being produced, it is necessary to bear this possibility in mind, and hence avoid the expense of providing remedial measures dictated by abnormal measurement conditions.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A3.6 Estimating Harmonic Voltage and Current for Stage 3

There are two types of problem under Stage 3, as indicated in Section A3.1 (c) and (d), namely the connection of a new consumer or the consideration of an increase in non-linear load at an existing consumer's installation. The fact that the additional load is being considered under Stage 3 implies that the harmonic currents expected to be produced exceed the Table 2 recommended limits or the voltage distortion at the pcc exceeds 75% of the value in Table 3. An estimate of the effect of the additional load on the system should therefore be made using the best available information and methods of analysis taking account of the actual system impedance/frequency characteristic. However sufficient information may not be available to permit of rigorous calculations and the following approximate method is suggested as a guide. For each harmonic let:-

- kV = system voltage at pcc in kV (phase to phase)
- n = harmonic number
- V_p = permitted harmonic voltage distortion in accordance with Table 3
- V_m = measured harmonic voltage distortion Section A3.1(c), A3.1 (d) and A4
- V_a = harmonic voltage distortion which could be accepted under Stage 3 due to new load
- k_2 = factor from Table A3 taking account of new load and existing distorting loads around the pcc.
- F = system short-circuit level at pcc in MVA, see Section A3.3 (i)

then,

$$V_a = \frac{V_p}{k_2} - V_m \%$$

A3.6.1 New consumer

Firstly, the case of the connection of a new Stage 3 consumer when it is desired to estimate the permissible values of harmonic currents.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

In order to convert the values of V_a into harmonic currents let I_a = harmonic current that could be accepted if produced by the new load,

then,

$$I_a = \frac{V_a \cdot 10F}{\sqrt{3kV_n}} \quad \text{A rms}$$

The consumer can then be advised that the new load is acceptable, provided that it does not produce harmonic currents in excess of the calculated values of I_a and provided that measurements are made after commissioning to show that these values are not exceeded.

A3.6.2 Existing Consumer

In the second case, the connection of additional non-linear load by an existing consumer, it is necessary to estimate the harmonic currents that can be accepted if produced by the combination of new and existing loads. First determine, as in Section A3.6, the harmonic voltage distortion, V_a , which could be accepted under Stage 3 due to the consumer's new load. For this part of the calculation, the factor to be used from Table A3 is that relating to the diversity between the consumer's installation and other installations around the pcc, that is k , of Section A3.6.

Then for each harmonic let:

I_c = harmonic current that could be accepted from the combined new and existing load

I_m = measured value of existing harmonic current at pcc (item (d) of Section A3.1)

I_a = harmonic current that could be accepted, under Stage 3, from the new load

k_1 = coincidence factor between the consumer's new load and his existing load – Table A3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Then,

$$I_a = \frac{V_a \cdot 10F}{\sqrt{3kVn}} \quad \text{A rms}$$

Where V_a , has been determined as A3.6

And,

$$I_c = k(I_m + I_a) \quad \text{A rms}$$

The consumer can then be advised that the combined operation of his new and existing load will be acceptable provided that his total installation does not produce harmonic currents in excess of this value of I_c . He may also be advised that these values include harmonics of values I_a attributable to the new load. The agreement should be to limit the combined harmonic current production from the whole installation to the values of I_c and measurements should be made after commissioning to ascertain that these values are not exceeded.

In a similar manner to, the measurements of I_a and I_p (see last paragraph of Section A3.5) there is a finite probability that the calculated values of I_c will occasionally be exceeded.

The same caution should be exercised in this case as in the previous one.

A4 MEASUREMENT PROCEDURES

The recording of voltage distortion and current harmonics at an existing or at the position of a future, pcc should preferably be made with the Automatic Mains Harmonic Analyser. There may be instances where this is not suitable because of very rapid bursts of harmonic current caused by other plant connected near the pcc.

The Automatic Mains Harmonic Analyser or equivalent instrument should be connected to make recordings as follows:-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Measurement Points	Point of Common Coupling a Busbar or equivalent , for voltage b Current transformer in the supply feeder or feeders to the consumer , for currents.
Measurement Duration	At least 24 hours , at a time of the week when the proposed plant would be in operation. System conditions may vary widely during a week; tests should be made under worst conditions . (See Notes 1 and 2 below)
Measurement Time	10 seconds per harmonic
Measurement Repetition	Every 15 min
Measured Harmonics	2, 3, 4, 5, 7, 11, 13, 17, 19th current and voltage.(See Note 3 below).

Note:

- 1 A knowledge of the method of operation of the new and existing plant and existing voltage distortion levels may justify recording only during certain hours of the day.
- 2 Harmonics voltage distortion effects and resonance conditions are usually most pronounced at times of light load.
- 3 The harmonic currents or voltages recorded may be modified if information is available to indicate which harmonics may be significant. A trial run may assist in selection of harmonics to be recorded.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Standards

UNITED KINGDOM

Engineering Recommendations G5/3

1. Permitted harmonic currents for any one consumer at point of common coupling

System voltage (kV)	Harmonic number and current (A)															
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
0.415	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	16	5	5	6	
6.6-11	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	
33-66	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	2	
132	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	

ABB Capacitors



Standards

UNITED KINGDOM (cont.)

Engineering Recommendations G5/3

2. Harmonic distortion limits at any point of the system

System voltage	THD	Dn Odd	Dn Even
0.415 kV	5 %	4 %	2 %
6.6–11 kV	4 %	3 %	1.75 %
33–66 kV	3 %	2 %	1 %
132 kV	1.5 %	1 %	0.5 %

ABB Capacitors

ABB
ASEA BROWN BOVERI

ภาคผนวก ก.
ตารางมาตรฐานการวัด

Gauge				Diameter		Sectional area			Weight	
B.W.G	A.W.G	S.W.G	mm.G.	Mil	mm.	Cir.Mil	In ²	mm ²	lb/1,000 ft	kg/km
5	-	4/0	-	500	12.7	250,000	0.1964	126.7	756.9	1,126
-	-	-	12	472.4	12	233,162	0.1753	113.1	675.6	1,005
-	-	6/0	-	464	11.786	215,296	0.1691	109.1	651.7	969.9
-	4/0	-	-	460	11.684	211,600	0.1662	107.2	640.5	953
4	-	-	-	454	11.532	205,100	0.1619	104.4	624	928.1
-	-	5/0	-	432	10.973	186,624	0.1466	94.56	565	840.6
3	-	-	-	425	10.795	180,600	0.1419	91.52	546.9	813.6
-	3/0	-	-	409.5	10.404	167,772	0.1318	85.03	508	755.9
-	-	4/0	-	400	10.16	160,000	0.1257	81.07	484.5	720.7
-	-	-	10	393.7	10	155,000	0.1217	78.54	468	698.2
2	-	-	-	380	9.652	144,400	0.1134	73.17	437.1	650.5
-	-	3/0	-	372	9.44	138,384	0.1087	70.12	418.9	623.4
-	2/0	-	-	364.8	9.266	133,079	0.1045	67.42	402.7	599.4
-	-	-	9	354.3	9	125,528	0.09859	63.62	380	565.6
-	-	2/0	-	348	8.839	121,104	0.09512	61.36	366.6	545.5
0	-	-	-	340	8.636	115,600	0.09079	58.58	349.9	520.8
-	0	-	-	324.9	8.25	104,976	0.08291	53.49	319.5	475.5
-	-	0	-	324	8.23	104,976	0.08245	53.19	317.8	472.8
-	-	-	8	315	8	99,225	0.07793	50.27	300.3	446.9
1	-	1	-	300	7.629	90,000	0.07069	45.6	272.4	405.4
-	1	-	-	289.3	7.348	83,694	0.06573	42.41	253.3	377
2	-	-	-	284	7.214	80,660	0.06335	40.87	244.2	363.3
-	-	2	-	276	7.01	76,176	0.05983	39.6	230.6	343.2
-	-	-	7	275.6	7	75,955	0.05966	38.48	229.9	342

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางมาตรฐานการวัด(ต่อ)

Gauge				Diameter		Sectional area			Weight	
B.W.G	A.W.G	S.W.G	mm.G.	Mil	mm.	Cir.Mil	In ²	mm ²	lb/1,000 ft	kg/km
3	-	-	-	259	6.579	67,080	0.05269	33.99	203.1	302
-	2	-	-	257.6	6.544	66,358	0.05212	33.63	200.9	299
-	-	-	6.5	255.9	6.5	65,485	0.05143	22.18	189.2	295
-	-	3	-	252	6.401	63,504	0.04988	32.18	192.2	286.1
4	-	-	-	238	6.045	56,640	0.04449	28.7	171.5	255.1
-	-	-	6	236.2	6	55,790	0.04382	28.27	168.9	251.1
-	-	4	-	232	5.893	53,824	0.04227	27.27	162.9	242.4
-	3	-	-	229.4	5.827	52,624	0.04133	26.66	159.3	237
5	-	-	-	220	5.588	48,400	0.03801	24.52	146.5	218
-	-	-	5.5	216.5	5.5	46,872	0.03681	23.72	141.9	210.9
-	-	5	-	212	5.385	44,944	0.03535	22.77	136	202.4
-	4	-	-	204.3	5.189	41,738	0.03278	21.15	126.3	188
6	-	-	-	203	5.156	41,210	0.03237	20.88	124.8	185.6
-	-	-	6	196.9	5	38,770	0.03045	19.63	117.4	174.5
-	-	6	-	192	4.877	36,864	0.02895	18.68	111.6	166.3
-	5	-	-	181.9	4.621	33,088	0.02599	16.77	100.2	149.1
7	-	-	-	180	4.572	32,400	0.02545	16.42	98.08	146
-	-	-	4.5	177.2	4.5	31,400	0.02466	15.9	95.04	141.4
-	-	7	-	176	4.47	30,976	0.02433	15.7	93.77	139.6
8	-	-	-	165	4.191	27,220	0.02138	13.8	82.4	122.7
-	6	-	-	162	4.115	26,244	0.02061	13	79.43	118.2
-	-	8	-	160	4.064	25,600	0.02011	12.97	77.5	115.3
-	-	-	-	157.5	4	24,806	0.01948	12.57	75.08	111.3
9	-	-	4	148	3.759	21,900	0.0172	11.1	66.29	98.68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางมาตรฐานการวัด(ต่อ)

Gauge				Diameter		Sectional area			Weight	
B.W.G	A.W.G	S.W.G	mm.G.	Mil	mm.	Cir.Mil	In ²	mm ²	lb/1,000 ft	kg/km
-	7	-	-	144.3	3.665	20,822	0.01635	10.55	63.01	94
-	-	9	-	144	3.658	20,736	0.01629	10.52	62.78	94
-	-	-	3.5	137.8	3.5	18,989	0.01491	9.621	57.46	85.53
10	-	-	-	134	3.404	17,960	0.0141	9.098	54.34	80.88
-	8	-	-	128.5	3.264	16,512	0.01297	8.368	49.99	74.39
-	-	10	-	128	3.251	16,384	0.01287	8.302	49.6	73.81
-	-	-	3.2	126	3.2	15,876	0.01247	8.042	48.06	71.49
11	-	-	-	120	3.048	14,400	0.01131	7.297	43.59	64.87
-	-	11	-	116	2.946	13,456	0.01057	6.818	40.74	60.61
-	9	-	-	114.4	2.906	13,087	0.01028	6.632	39.62	58.96
-	-	-	2.9	114.2	2.9	13,042	0.01024	6.605	39.47	58.72
12	-	-	-	109	2.769	11,880	0.009331	6.02	35.96	53.52
-	-	12	-	104	2.6432	10,816	0.008495	5.481	32.74	48.73
-	-	-	2.6	102.4	2.6	10,486	0.008246	5.309	31.78	47.29
-	10	-	-	101.9	2.588	10,384	0.008156	5.26	31.43	46.78
13	-	-	-	95	2.413	9,025	0.007088	4.573	27.32	40.65
-	-	13	-	92	2.337	8,464	0.006648	4.289	25.62	38.13
-	11	-	-	90.74	2.305	8,234	0.006467	4.172	24.92	37.09
-	-	-	2.3	90.55	2.3	8,199	0.006439	4.155	24.82	36.94
14	-	-	-	83	2.108	6,889	0.005411	3.491	20.85	31.04
-	12	-	-	80.81	2.053	6,530	0.005129	3.309	19.77	29.42
-	-	14	-	80	2.032	6,400	0.005027	3.243	19.37	28.83
-	-	-	2	78.74	2	6,200	0.004869	3.142	18.77	27.93
15	-	15	-	72	1.829	5,184	0.004072	2.637	18.46	27.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางมาตรฐานการวัด(ต่อ)

Gauge				Diameter		Sectional area			Weight	
B.W.G	A.W.G	S.W.G	mm.G.	Mil	mm.	Cir.Mil	In ²	mm ²	lb/1,000 ft	kg/km
-	13	-	-	71.96	1.828	5,178	0.004067	2.624	15.67	23
-	-	-	1.8	70.87	1.8	5,023	0.003945	2.545	15.2	23
16	-	-	-	65	1.651	4,225	0.003318	2.141	12.79	19.03
-	14	-	-	64.08	1.628	4,106	0.003225	2.081	12.43	18.5
-	-	16	-	64	1.626	4,096	0.003217	2.075	12.4	18.45
-	-	-	1.6	62.99	1.6	3,968	0.003116	2.011	12.01	17.88
17	-	-	-	58	1.473	3,364	0.002642	1.705	10.18	15.16
-	15	-	-	57.07	1.45	3,257	0.002558	1.65	9.859	14.67
-	-	17	-	56	1.422	3,136	0.002463	1.589	9.493	14.13
-	-	-	1.4	55.12	1.4	3,038	0.002386	1.539	9.196	13.68
-	16	-	-	50.82	1.291	2,583	0.002029	1.309	7.82	11.64
18	-	-	-	49	1.245	2,401	0.001886	1.217	7.269	10.82
-	-	18	-	48	1.219	2,304	0.00181	1.167	6.976	10.38
-	-	-	1.2	47.24	1.2	2,232	0.001753	1.131	6.756	10.06
-	17	-	-	45.26	1.15	2,048	0.001608	1.037	6.197	9.219
19	-	-	-	42	1.067	1,764	0.001385	0.8938	5.388	7.946
-	18	-	-	40.3	1.024	1,624	0.001275	0.8226	4.914	7.313
-	-	19	-	40	1.016	1,600	0.001257	0.8107	4.845	7.207
-	-	-	1.0	39.37	1	1,550	0.001217	0.7854	4.69	6.982
-	-	20	-	36	0.9144	1,296	0.001018	0.6576	3.923	5.838
-	19	-	-	35.89	0.9116	1,288	0.001012	0.6529	3.9	5.804
-	-	-	0.9	35.43	0.9	1,255	0.0009857	0.6362	3.799	5.656
20	-	-	-	35	0.889	1,225	0.0009621	0.6207	3.708	5.518
21	-	21	-	32	0.8128	1,024	0.0008042	0.5189	3.099	4.613

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางมาตรฐานการวัด(ต่อ)

Gauge				Diameter		Sectional area			Weight	
B.W.G	A.W.G	S.W.G	mm.G.	Mil	mm.	Cir.Mil	In ²	mm ²	lb/1,000 ft	kg/km
-	27	-	-	14.2	0.3606	201.6	0.0001583	0.1021	0.6101	0.908
28	-	-	-	14	0.3556	196.0	0.0001539	0.09932	0.5931	0.833
-	-	-	0.35	13.78	0.35	189.9	0.0001491	0.09621	0.5746	0.8553
-	-	29	-	13.6	0.3454	185.0	0.0001453	0.09372	0.56	0.8332
29	-	-	-	13	0.3302	169.0	0.0001327	0.08563	0.5114	0.7613
-	28	-	-	12.64	0.3211	159.3	0.0001255	0.08097	0.4837	0.7198
-	-	-	0.3	12.6	0.32	158.8	0.0001246	0.08042	0.7806	0.7149
-	-	30	-	12.4	0.315	153.6	0.0001208	0.07791	0.4656	0.6926
30	-	-	-	12	0.3048	144.0	0.0001131	0.07297	0.4359	0.6487
-	-	31	-	11.6	0.2946	134.6	0.0001057	0.06818	0.4074	0.6061
-	-	-	0.29	11.42	0.29	130.4	0.0001024	0.06605	0.3947	0.5872
-	29	-	-	11.26	0.2859	126.3	0.00009959	0.06425	0.3838	0.5712
-	-	32	-	10.8	0.2743	116.6	0.00009158	0.05913	0.353	0.5257
-	-	-	0.26	10.24	0.26	104.9	0.00008239	0.05309	0.3175	0.472
-	30	-	-	10.03	0.2546	101	0.00007901	0.05097	0.3045	0.4531
31	-	33	-	10	0.254	100.0	0.00007954	0.05067	0.3027	0.4504
-	-	34	-	9.2	0.2337	84	0.00006648	0.04289	0.2562	0.3812
-	-	-	0.23	9.055	0.23	82.0	0.0000644	0.4155	0.2482	0.3693
32	-	-	-	9	0.2286	81	0.00006362	0.04104	0.2452	0.3648
-	31	-	-	8.928	0.2238	80	0.0000626	0.4039	0.2413	0.359
-	-	35	-	8.4	0.2134	71	0.00005542	0.03575	0.2136	0.3178
33	-	-	-	8	0.2032	64.0	0.00005027	0.03243	0.1937	0.2882
-	32	-	-	7.95	0.2	65.2	0.00004964	0.03203	0.1913	0.2846
-	-	-	0.2	7.874	0.2	62	0.00004869	0.03142	0.1877	0.2793

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางมาตรฐานการวัด(ต่อ)

Gauge				Diameter		Sectional area			Weight	
B.W.G	A.W.G	S.W.G	mm.G.	Mil	mm.	Cir.Mil	In ²	mm ²	lb/1,000 ft	kg/km
-	-	36	-	7.6	0.193	57.76	0.00004536	0.02927	0.1748	0.2601
-	-	-	0.18	7.087	0.18	50.23	0.00003945	0.02545	0.152	0.2262
-	33	-	-	7.08	0.1798	50.13	0.00003937	0.0254	0.1517	0.2257
34	-	-	-	7	0.1778	49.00	0.00003848	0.02483	0.1483	0.2207
-	-	37	-	6.8	0.1727	46.24	0.00003632	0.02343	0.14	0.2083
-	34	-	-	6.305	0.1601	39.75	0.00003122	0.02014	0.1203	0.179
-	-	-	0.16	6.299	0.16	39.68	0.00003116	0.02011	0.1201	0.1787
-	-	38	-	6	0.1524	36.00	0.00002827	0.01824	0.109	0.1622
-	35	-	-	5.615	0.1426	31.53	0.00002476	0.01597	0.09543	0.14201
-	-	-	0.14	5.512	0.14	30.38	0.00002386	0.01539	0.09196	0.13684
-	-	39	-	5.2	0.1321	27.04	0.00002124	0.0137	0.08186	0.12181
35	36	-	-	5	0.127	25.00	0.00001963	0.01267	0.07565	0.11257
-	-	40	-	4.8	0.1219	23.04	0.0000181	0.01167	0.06976	0.10381
-	-	-	0.12	4.724	0.12	22.32	0.00001753	0.01131	0.06756	0.10053
-	37	-	-	4.453	0.1131	18.83	0.00001557	0.01005	0.06001	0.0893
-	-	41	-	4.4	0.1118	18.36	0.00001521	0.00981	0.05812	0.08649
36	-	42	-	4	0.1016	16.00	0.00001257	0.008107	0.04845	0.0721
-	38	-	-	3.965	0.1007	15.72	0.00001235	0.007968	0.0475	0.07083
-	-	-	0.1	3.937	0.1	15.50	0.00001217	0.007854	0.0469	0.06979
-	-	43	-	3.6	0.09114	15.96	0.00001018	0.006567	0.03923	0.05838
-	39	-	-	3.531	0.08969	12.47	9.794E-06	0.006319	0.03775	0.05617
-	-	44	-	3.2	0.08138	10.24	8.042E-06	0.005819	0.03009	0.04612
-	40	-	-	3.145	0.07987	9.89	7.768E-06	0.005012	0.02994	0.04455
-	41	45	-	3.8	0.07113	7.84	6.159E-06	0.003973	0.02374	0.03533

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางมาตรฐานการวัด(ต่อ)

Gauge				Diameter		Sectional area			Weight	
B.W.G	A.W.G	S.W.G	mm.G.	Mil	mm.	Cir.Mil	In ²	mm ²	lb/1,000 ft	kg/km
-	42	-	-	2.494	0.06334	6.219	4.884E-06	0.003151	0.01882	0.0280
-	-	46	-	2.4	0.06096	5.760	4.528E-06	0.002929	0.01744	0.0260
-	43	-	-	2.221	0.05641	4.932	3.873E-06	0.002495	0.01498	0.02292
-	-	47	-	2	0.0508	4.000	3.142E-06	0.002027	0.01211	0.01802
-	44	-	-	1.987	0.05023	3.911	3.072E-06	0.001982	0.01184	0.01762
-	-	-	0.05	1.969	0.05	3.877	3.045E-06	0.001963	0.01174	0.01747
-	45	-	-	1.761	0.04473	3.102	2.436E-06	0.001572	0.009383	0.000164
-	-	48	-	1.6	0.04064	2.560	2.011E-06	0.001297	0.00775	0.000135
-	46	-	-	1.568	0.03984	2.460	1.931E-06	0.001246	0.007446	0.00013
-	47	-	-	1.397	0.03547	1.951	1.532E-06	0.0009884	0.005904	0.000103
-	48	-	-	1.244	0.03159	1.547	1.215E-06	0.0007838	0.004683	0.000082
-	-	49	-	1.2	0.03048	1.440	1.310E-06	0.0007297	0.004359	0.000076
-	-	-	-	1.08	0.02813	1.227	9.635E-07	0.0006216	0.003713	5.526E-05
-	-	50	-	1	0.0254	1.000	7.854E-07	0.0005067	0.003027	4.505E-05
-	-	-	-	0.986	0.02505	0.928	7.641E-07	0.0004929	0.002945	4.382E-05

Note:

B.W.G - Birmingham Iron Wire Gauge

A.W.G - American Wire Gauge

S.W.G - British Standard Wire Gauge

mm.G. - Millimeter Gauge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนความต้านทาน DC/AC

The AC/DC resistance ratio of the conductor is given by the following formula

$$K_2 = 1 + \lambda_s + \lambda_p$$

Where:

K_2 = DC/AC resistance ratio of conductor

λ_s = skin effect factor

λ_p = proximity effect factor

The skin effect factor is given by:

$$\lambda_s = \frac{X^4}{192 + 0.8X^4}$$

Where

$$X = \sqrt{\frac{8\pi f}{R_0 K_1 \times 10^4}}$$

f = supply frequency. Hz

R_0 = DC resistance of conductor at 20° C Ω /km

K_1 = reciprocal factor of temperature correction factor

The proximity effect factor is given by:

$$\lambda_p = \frac{X^4}{192 + 0.8X^4} \left(\frac{d_1}{S} \right)^2 \left\{ 0.312 \left(\frac{d_1}{S} \right)^2 \times \frac{1.18}{\frac{X^4}{192 + 0.8X^4} + 0.27} \right\}$$

Where

$$X^1 = \sqrt{0.8X}$$

d^1 = diameter of conductor, mm

S = distance between conductor axes, mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางความต้านทานของตัวนำ

Nominal cross-sectional area(mm ²)	Number of wires in conductor	Diameter of wires in conductor	Maximum resistance of conductor of 200C (ohms/km)
			Single core - Multi core
0.5	1	0.3	36
1	1	1.13	18.1
1	7	0.4	18.1
1.5	1	1.38	12.1
1.5	7	0.5	12.1
2.5	1	1.78	7.41
2.5	7	0.67	7.41
4	1	2.25	4.61
4	7	0.85	4.61
6	7	1.04	3.08
10	7	1.35	1.83
16	7	1.7	1.15
25	7	2.14	0.727
35	19	1.53	0.524
50	19	1.78	0.387
70	19	2.14	0.268
95	19	2.52	0.193
120	37	2.03	0.153
150	37	2.25	0.124
185	37	2.52	0.0991
240	61	2.25	0.0754
300	61	2.52	0.0601
400	61	2.85	0.047
500	61	3.2	0.0366

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] ลัญญา ตาปราบ , สันติ ศิริพันธ์ , สันติ รัตนรงค์ : “ ชุดศึกษาทดลองการกรองฮาร์มอนิก ” , ปรินูญานินพนธ์(วศ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า)), สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2541.
- [2] สุกกิจ นิ้วเจริญ , อัครเดช พรหมชน , อาทิตย์ พัฒนาพงศ์ชัย : “ การศึกษาและออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ ” , ปรินูญานินพนธ์(วศ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า)), สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2543.
- [3] ณัฐติพล ทันจิตรีวัฒนา , ต่อพงษ์ ขวงพานิช , อนุชิต ศรีสมบรมณ์สกุล : “ การออกแบบตัวเหนี่ยวนำแกน EI ” , ปรินูญานินพนธ์(วศ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า)), สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2538.
- [4] ชีรภัทร พัฒนานิธิ, บรรณิษฐ์ อินทร์ใหญ่, ฤทธิชัย ภูภิรมย์, : “ การวิเคราะห์และแก้ปัญหาฮาร์มอนิก ” , ปรินูญานินพนธ์(วศ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า)), - สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2538
- [5] รศ. ประภาส ไพรสุวรรณ , : “Energy Conversion”, เอกสารประกอบการเรียน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2544.
- [6] ชัยยงค์ แก้วมงคล , นภัทร วัฒนเทพินทร์ : “ อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 1 ” , บริษัท สกายบุคส์ จำกัด , 2540
- [7] Noshirwan K. Medora and Alexander Kusko , : “Computer – Aided Design and Analysis of Power Harmonic Filter”, IEEE Trans. Ind. Applcat , , Vol-3 , Mar/Apr.2000.
- [8] PES Chapter IEEE Thailand Section , : “Case Studies on Harmonics Problems and Thailand and Asia Pacific, Faculty of Engineering , Chulalongkorn University Bangkok ,Thailand 10 July,2002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้