

การวิเคราะห์การควบคุมปริมาณฮาร์มอนิก
และการปรับค่าตัวประกอบกำลังด้วยตัวกรองพาสซีฟ

ANALYSIS OF HARMONICS CONTROL
AND POWER FACTOR IMPROVEMENT BY PASSIVE FILTERS



วสันต์ อุทัยโตม
WASON U-YAISOM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-9546-33-9

การวิเคราะห์การควบคุมปริมาณฮาร์มอนิกส์
และการปรับค่าตัวประกอบกำลังด้วยตัวกรองพาสซีฟ

ANALYSIS OF HARMONICS CONTROL
AND POWER FACTOR IMPROVEMENT BY PASSIVE FILTERS



วสันต์ อุ้ยายโสสม
WASON U-YAISOM

เลขหม.....
เลขทะเบียน..... 47667
วัน, เดือน, ปี..... 21 ส.ค. 2546

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

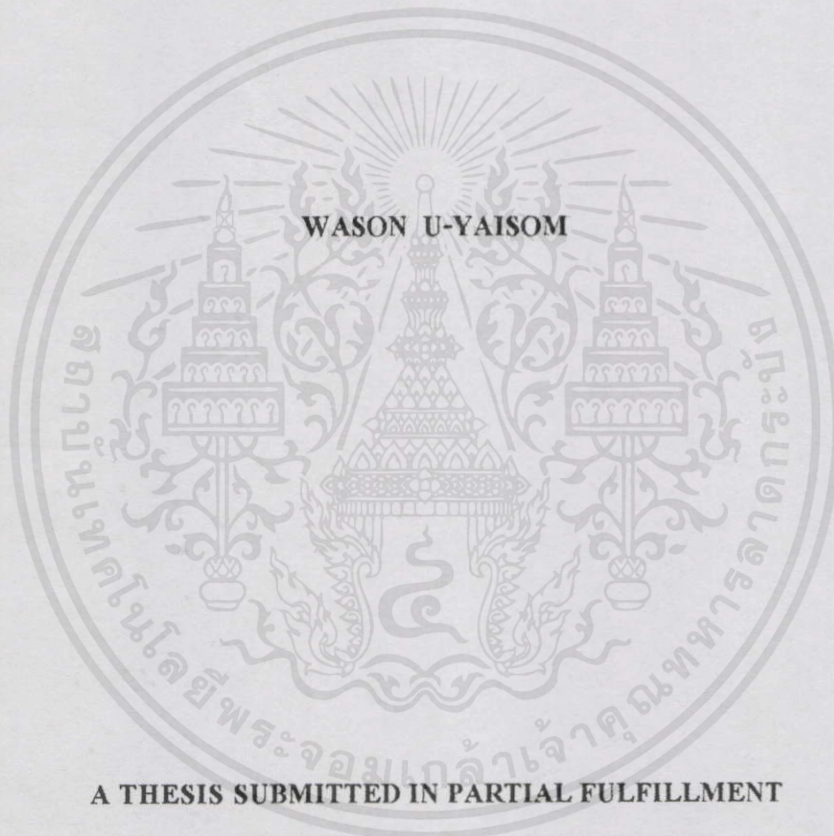
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
พ.ศ.2545

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ISBN 974-9546-33-9

974-9546-33-9

**ANALYSIS OF HARMONICS CONTROL
AND POWER FACTOR IMPROVEMENT BY PASSIVE FILTERS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2002

ISBN 974-9546-33-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2002

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

ไม่อนุญาตให้นำไปทำสิ่งอื่นนอกเหนือจากนี้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์การควบคุมปริมาณฮาร์มอนิกส์และการปรับค่าตัวประกอบกำลังด้วยตัวกรองพาสซีฟ

ANALYSIS OF HARMONICS CONTROL AND POWER FACTOR IMPROVEMENT BY PASSIVE FILTERS

ชื่อนักศึกษา

นายวสันต์ อุ๋ชายโสม

รหัสประจำตัว

38061216

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

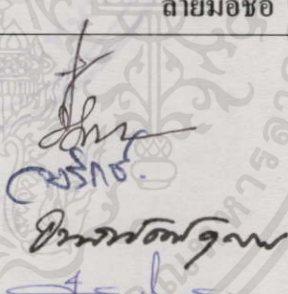
วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม

ผศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ	ชันเงิน	
ผศ.ดร.วิจิตร	กิมเรศ	
รศ.จงรักษ์	บุญเส็ง	
ดร.อนันท์วัฒน์	คุณากร	
รศ.ศิริวัฒน์	โปธิเวชกุล	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 20 พฤษภาคม 2545 เวลา 10.30-12.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-403)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว



(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัทธู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงบัณฑิตวิทยาลัยในการนำไปใช้

วัน.....๕๑.....เดือน.....สิงหาคม.....พ.ศ.....๒๕๔๕.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์การควบคุมปริมาณฮาร์มอนิกส์และการปรับค่า ตัวประกอบกำลังด้วยตัวกรองพาสซีฟ
นักศึกษา	นายสันต์ อุทัย โสม
รหัสประจำตัว	38061216
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ศิริวัฒน์ โทชิวะกุล
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาและวิเคราะห์ถึงวิธีการควบคุมปริมาณฮาร์มอนิกส์และปรับ
ปรุ่งค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้าด้วยตัวกรองความถี่แบบพาสซีฟ ให้สอดคล้องกับข้อ
กำหนดตามมาตรฐาน IEEE 519-1992 โดยการวิเคราะห์ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของระบบด้วย
โปรแกรม PSPICE เพื่อให้ผลที่ได้มีความเหมาะสมกับปัญหาที่เกิดขึ้นในแต่ละระบบ ซึ่งในงานวิจัย
นี้จะนำเสนอถึงขั้นตอนต่างๆที่เกี่ยวข้องตั้งแต่การจำลองระบบไฟฟ้า, การสร้างแบบจำลองใน
โปรแกรมคอมพิวเตอร์, การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์ให้ได้ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน และ
การเปรียบเทียบถึงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ กับผลการทดลองที่ได้จาก
การทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ

ขอบเขตของงานวิจัยจะประกอบไปด้วยการศึกษาถึงปัญหาเกี่ยวกับปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่
เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์แบบ 3 เฟสที่สำคัญ 4 ชนิดคือ เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้า
กระแสสลับเป็นกระแสตรง, ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ, ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า
กระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ โดยกำหนดให้ระบบตัวอย่างเป็นระบบแบบ 3 เฟส 380/220
โวลท์ 50Hz พิกัด 3kVA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Analysis of Harmonics Control and Power Factor Improvement by Passive Filters
Student	Mr. Wason U-yaisom
Student ID.	38061216
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Siriwat Potivejkul
Thesis Co-advisor	Assist. Prof. Dr. Werachet Khan-ngern

ABSTRACT

This research presents passive harmonic filter designing procedures to comply with IEEE Std. 519-1992 harmonic limits by a system transfer function analysis through PSPICE program. Developments of typical power systems, computer models, the prediction of a feasibility of meeting harmonic specification and the comparison of the harmonic reduction obtained from simulations and experimental work are described.

Four types of the important non-linear loads commonly used in industrial power system; AC to DC Converter 3-phase diode rectifier, AC voltage controller, DC motor drive and AC motor drive, are used as a harmonic source in a 3 phase 380/220 3kVA 50Hz power system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาต่างๆจาก ร.ศ.ศิริวัฒน์ โทชเวชกุล และ ผศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วมตามลำดับ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบคุณเพื่อนๆ นักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำต่างๆจนสำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

วสันต์ อุทัยโสม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญภาพ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา	5
1.6 ข้อตกลงและข้อจำกัดของการศึกษา	7
1.7 คำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา	8
บทที่ 2 พื้นฐานเกี่ยวกับฮาร์มอนิกส์	12
2.1 ลักษณะของฮาร์มอนิกส์	12
2.2 ฮาร์มอนิกส์แบ่งออกได้เป็น 5 ประเภท.....	13
2.3 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์	14
2.4 ผลกระทบเนื่องจากฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง	22
บทที่ 3 คุณสมบัติในการตอบสนองของระบบ	27
3.1 รายละเอียดโดยทั่วไป	27
3.2 สภาวะเรโซแนนซ์	28
3.3 ผลกระทบเนื่องจากโหลดที่ต่ออยู่ในระบบ	30
3.4 ระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรม	31
บทที่ 4 วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1 การคำนวณค่ากระแสฮาร์มอนิกส์	33
4.2 การคำนวณผลการตอบสนองทางความถี่ของระบบ	34
4.3 การคำนวณอย่างง่าย	34
4.4 การจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์	35
4.5 การสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์	36
บทที่ 5 การวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์	42
5.1 บทนำ	42
5.2 อุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์แรงดันและกระแสฮาร์มอนิกส์	42
5.3 ความต้องการเกี่ยวกับการตอบสนองของเครื่องวัด	43
5.4 การแสดงข้อมูลของฮาร์มอนิกส์	45
5.5 ทรานส์ดิวเซอร์สำหรับการวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์	48
บทที่ 6 ตัวกรองฮาร์มอนิกและขั้นตอนการออกแบบ	52
6.1 วัตถุประสงค์ในการใช้งานตัวกรองฮาร์มอนิก	52
6.2 นิยามและข้อกำหนดต่างๆ	52
6.3 ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบกรองผ่านความถี่เดียว	53
6.4 ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบกรองผ่านความถี่สูง	58
6.5 เกณฑ์ในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์	61
6.6 IEEE 519-1992 สำหรับการควบคุมฮาร์มอนิกส์	62
6.7 การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบไม่คำนึงถึงค่ากำลังงานเสมือน	65
6.8 พิกัดต่างๆสำหรับส่วนประกอบของตัวกรองฮาร์มอนิก	66
6.9 การเลือกตัวกรองฮาร์มอนิกและการหาค่าประสิทธิภาพของตัวกรอง	68
6.10 การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์ด้วยวิธีวิเคราะห์ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของระบบ	69
6.11 การวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ของปริมาณฮาร์มอนิกส์กับค่า I_{sc}/I_L	76
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เปอร์เซ็นต์โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นต่าง ๆ กัน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านใด ๆ 76	
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้	
บทที่ 7 การทดลอง และผลการทดลอง	87

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7.1 รายละเอียดของการทดลอง	87
7.2 การทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติของ โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นต่างๆ.....	88
7.3 การกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบและพิกัดของ โหลดที่ใช้ในระบบ.....	99
7.4 ตัวอย่างของระบบจำลองและการแก้ปัญหา.....	109
บทที่ 8 บทวิเคราะห์ผลการทดลอง	96
8.1 บทนำ148	
8.2 การเปรียบเทียบปริมาณฮาร์มอนิกส์ก่อนและหลังต่อตัวกรองที่จุด PCC.....	148
8.3 การเปรียบเทียบถึงปริมาณฮาร์มอนิกส์จากภายนอกหลังต่อตัวกรองที่จุด PCC.....	151
8.4 การเปรียบเทียบปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่แหล่งกำเนิด.....	153
8.5 การเปรียบเทียบถึงกำลังงาน ไฟฟ้าปรากฏทั้งสามเฟสที่จุด PCC.....	155
8.6 การเปรียบเทียบถึงกำลังงาน ไฟฟ้าจริงทั้งสามเฟสที่จุด PCC.....	157
8.7 การเปรียบเทียบถึงค่าตัวประกอบกำลังทั้งสามเฟสที่จุด PCC.....	159
8.8 การเปรียบเทียบถึงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์โดยรวมทั้งสามเฟสที่จุด PCC.....	161
บทที่ 9 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	164
เอกสารอ้างอิง.....	168
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ตัวอย่างฮาร์มอนิกส์และตัวอย่างการทดสอบ.....	169
ภาคผนวก ข ข้อมูลของฮาร์มอนิกส์ที่วัด ได้ทั้งสามเฟส ทั้งก่อนและหลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ที่จุด PCC.....	181
ภาคผนวก ค แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์.....	206
ภาคผนวก ง ตัวอย่างที่มาข้อมูลที่ป้อนให้กับแบบจำลอง ใน PSPICE.....	213
ภาคผนวก จ บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	227
ประวัติผู้เขียน.....	237

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าตัวอย่างของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากเตาหลอมแบบอาร์ค.....	16
2.2 ตัวอย่างค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ของ TCR.....	19
3.1 คุณสมบัติเกี่ยวกับลำดับที่แตกต่างกัน.....	28
5.1 ค่าอัตราลดทอนต่ำสุด.....	44
5.2 ตารางสเปกตรัมของกระแสฮาร์โมนิกส์.....	45
6.1 เกณฑ์มาตรฐานของฮาร์โมนิกส์ในแรงดันไฟฟ้า.....	63
6.2 เกณฑ์มาตรฐานของฮาร์โมนิกส์ในกระแสไฟฟ้า.....	63
7.1 เปรียบเทียบกระแสฮาร์โมนิกส์ที่วัดได้กับค่ามาตรฐาน.....	110
7.2 เปรียบเทียบแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่วัดได้กับค่ามาตรฐาน.....	111
7.3 การคำนวณค่าอัตราการแบ่งกระแสฮาร์โมนิกส์ได้สูงสุดตามมาตรฐาน (H_{spec}).....	111
7.4 เปรียบเทียบกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่วัดได้กับค่ามาตรฐานหลังต่อตัวกรอง.....	115
7.5 เปรียบเทียบกระแสฮาร์โมนิกส์ที่วัดได้กับค่ามาตรฐาน.....	119
7.6 เปรียบเทียบแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่วัดได้กับค่ามาตรฐาน.....	120
7.7 การคำนวณค่าอัตราการแบ่งกระแสฮาร์โมนิกส์ได้สูงสุดตามมาตรฐาน (H_{spec}).....	120
7.8 เปรียบเทียบกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่วัดได้กับค่ามาตรฐานหลังต่อตัวกรอง.....	125
7.9 เปรียบเทียบกระแสฮาร์โมนิกส์ที่วัดได้กับค่ามาตรฐาน.....	129
7.10 เปรียบเทียบแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่วัดได้กับค่ามาตรฐาน.....	130
7.11 การคำนวณค่าอัตราการแบ่งกระแสฮาร์โมนิกส์ได้สูงสุดตามมาตรฐาน (H_{spec}).....	130
7.12 เปรียบเทียบกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่วัดได้กับค่ามาตรฐานหลังต่อตัวกรอง.....	136
7.13 เปรียบเทียบกระแสฮาร์โมนิกส์ที่วัดได้กับค่ามาตรฐาน.....	140
7.14 เปรียบเทียบแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่วัดได้กับค่ามาตรฐาน.....	140
7.15 การคำนวณค่าอัตราการแบ่งกระแสฮาร์โมนิกส์ได้สูงสุดตามมาตรฐาน (H_{spec}).....	141
7.16 เปรียบเทียบกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่วัดได้กับค่ามาตรฐานหลังต่อตัวกรอง.....	144
ง-1 ตารางการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์กระแสฮาร์โมนิกส์, ค่าอิมพีแดนซ์โหลดแบบเชิงเส้นและค่าอัตราส่วน ISC/IL จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ 1.1 (หัวข้อ 7.2.1).....	214

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง-2 ตารางการคำนวณค่ากระแสฮาร์มอนิกส์, ค่าอิมพีแดนซ์โหลดแบบเชิงเส้น ที่ค่าเปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆเพื่อนำไปวิเคราะห์ใน PSPICE และนำมาพล็อตกราฟ เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์โหลดที่เหมาะสมในการสร้างระบบจำลอง (หัวข้อ7.3.3).....	215
ง-3 ตารางการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์กระแสฮาร์มอนิกส์, ค่าอิมพีแดนซ์โหลดแบบเชิงเส้น และค่าอัตราส่วน ISC/IL จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ 2.1 (หัวข้อ7.4.1).....	217
ง-4 ตารางการคำนวณค่าอัตราส่วนการแบ่งกระแสฮาร์มอนิกส์สู่ระบบ ตามมาตรฐาน [H_{spec} (dB)] จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ 2.1 (หัวข้อ7.4.1) เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบด้วยวิธีการ วิเคราะห์ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของระบบ (หัวข้อ 7.4.1.2).....	218
ง-5 ตารางการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกส์ที่ค่า DPF ต่างๆ ในกรณีใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกส์อันดับที่5 โดยค่าที่ได้ จะนำไปพล็อตกราฟอัตราส่วนการแบ่งกระแสฮาร์มอนิกส์สู่ระบบจริง ในPSPICE [H_{cds} (dB)] ในขั้นตอนของการออกแบบ (หัวข้อ 7.4.1.2).....	219
ง-6 ตารางบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยรูปที่ ง-4.....	223
ง-7 ตารางที่ใช้คำนวณค่า กระแสไฟฟ้า และ อิมพีแดนซ์ของ โหลดแบบเชิงเส้น และอิมพีแดนซ์ของระบบเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ หาความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ โหลดแบบเชิงเส้นที่นำมาคํว่รวม กับปริมาณฮาร์มอนิกส์ใน PSPICE (หัวข้อที่ 7.4.1.4-2).....	224
ง-8 ตารางที่ใช้คำนวณค่า กระแสไฟฟ้าของ โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ โหลด แบบเชิงเส้นที่นำมาคํว่รวมกับปริมาณฮาร์มอนิกส์ใน PSPICE (หัวข้อที่ 7.4.1.4-2).....	225
ง-9 ตารางที่ใช้บันทึกปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากการวิเคราะห์ ใน PSPICE ที่เปอร์เซ็นต์ โหลดต่างๆ เพื่อนำไปพล็อตกราฟ (หัวข้อที่ 7.4.1.4-2).....	225

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 โพลชาร์ตแสดงการดำเนินงานทั้งหมด.....	6
2.1 รูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม.....	13
2.2 ส่วนประกอบฮาร์โมนิกส์ของ Magnitizing Current.....	15
2.3 Frequency Spectra.....	16
2.4 รูปคลื่นกระแสทางค่าน AC.....	17
2.5 ตัวอย่างของรูปคลื่นและค่าฮาร์โมนิกส์ของแหล่งจ่ายแบบสวิตโทนิค.....	21
2.6 ตัวอย่างของรูปคลื่นของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบที่ดับลิวิตเอ็ม.....	22
2.7 ตัวอย่างการเรโซแนนซ์แบบขนาน.....	24
2.8 ตัวอย่างการเรโซแนนซ์แบบอนุกรม.....	24
2.9 การต่อรีแอคเตอร์ร่วมกับชุดตัวเก็บประจุ.....	24
3.1 ทางเดินปกติของกระแสฮาร์โมนิกส์ในระบบ.....	29
3.2 เรโซแนนซ์แบบขนาน.....	29
3.3 เรโซแนนซ์แบบอนุกรม.....	30
3.4 องค์ประกอบของระบบที่เห็นจากการมองผ่านขดลวดค่านปฐมภูมิ ของหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านอินพุท.....	30
3.5 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบที่พิกัดต่างๆของ โหลดแบบตัวค่านทาน.....	31
4.1 แหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์ในระบบ.....	33
4.2 การคำนวณปริมาณฮาร์โมนิกอย่างง่าย.....	34
4.3 การคำนึงถึงผลของคาปาซิแตนซ์ระหว่างสายตัวนำ.....	37
5.1 เอาท์พุทของสเปคตรัมนาไลเซอร์แบบ Time Domain	46
5.2 เอาท์พุทของสเปคตรัมนาไลเซอร์แบบ Frequency Domain	46
5.3 ฮิสโตแกรมของแรงดันฮาร์โมนิกส์.....	47
5.4 ข้อมูลความน่าจะเป็นของปริมาณแรงดันฮาร์โมนิกส์แบบกราฟเส้น.....	48
5.5 ลักษณะการใช้ขดลวด (Search Coil) ในการตรวจวัดค่ากระแส.....	49
5.6 ค่าความผิดพลาดของอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าเทียบกับความถี่.....	50
5.7 อุปกรณ์แบ่งแรงดันแบบใช้คาปาซิเตอร์.....	51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
6.1 (a) ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบกรองผ่านความถี่เดียว, (b) ความสัมพันธ์ของอินพีแดนซ์กับความถี่.....	53
6.2 ตัวอย่างของผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองฮาร์มอนิกอย่างเดี่ยวและกรณีต่อเข้าสู่ระบบ....	55
6.3 ตัวอย่างของผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 4.7 ที่ค่าแฟคเตอร์คุณภาพต่างๆ.....	56
6.4 ตัวกรองแบบผ่านความถี่สูง (a) แบบอันดับที่1, (b) แบบอันดับที่2, (c) แบบอันดับที่3, (d) แบบซี (C-type).....	58
6.5 ตัวกรองแบบผ่านความถี่สูงอันดับที่2.....	60
6.6 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองที่ค่าความต้านทานต่างๆ.....	60
6.7 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองเมื่อต่อเข้าสู่ระบบที่ค่าความต้านทานต่างๆ.....	60
6.8 วงจรที่ใช้ในการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิก.....	62
6.9 การเปลี่ยนแปลงของค่า %THD _v ที่สัมพันธ์กับอัตราส่วนพิคก้าถึงล้นค้วงจร.....	65
6.10 พิกก้าถึงล้นของคาปาซิเตอร์ที่ต้องการสำหรับตัวกรองฮาร์มอนิก ที่สัมพันธ์กับอัตราส่วนพิคก้าถึงล้นค้วงจร.....	66
6.11 ลำดับขั้นในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกกรณีคำนึงถึงการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง.....	70
6.12 ลำดับขั้นในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกกรณีไม่คำนึงถึงการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง..	71
6.13 วงจรเสมือนของระบบเมื่อต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์.....	72
6.14 ตัวอย่างของการพล็อตกราฟ H_{cdfs} เทียบกับค่า H_{spec} ที่ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5 th	73
6.15 โพลซาร์ทซ์ขั้นตอนการออกแบบด้วยวิธีการวิเคราะห์ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของระบบ.....	74
6.16 ตัวอย่างการออกแบบกรณีตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 th , 7 th DPF = 0.95.....	75
6.17 ตัวอย่างการออกแบบกรณีตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 th , 7 th DPF = 0.85-1.00.....	75
6.18 ตัวอย่างการออกแบบกรณีตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 th , 7 th , damped 11 th DPF = 0.85-1.00.....	75
6.19 ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกส์เทียบกับเปอร์เซ็นต์โหลด แบบไม่เป็นเชิงเส้นกรณีพิคก้าถึงล้นของโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นคงที่.....	78
6.20 ตัวอย่างระบบที่วิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิก	79
6.21 ตัวอย่างปริมาณฮาร์มอนิก (%THD _v & %THD _i) กับค่าเปอร์เซ็นต์โหลดแบบ ไม่เป็นเชิงเส้นในระบบสำหรับระบบที่มีค่า I_{sc}/I_L ต่างๆกัน กรณีไม่มีตัวกรองฮาร์มอนิก.....	79

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
6.22 ตัวอย่างปริมาณฮาร์โมนิก (%THDv & %THDi) กับค่าเปอร์เซ็นต์โหลดแบบ ไม่เป็นเชิงเส้นในระบบสำหรับระบบที่มีค่า I_{sc}/I_L ต่างๆกัน กรณีมีตัวกรองฮาร์โมนิก 4.7 th	80
6.23 ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณฮาร์โมนิกส์เทียบกับเปอร์เซ็นต์โหลดแบบ ไม่เป็นเชิงเส้นกรณีพิกัดกำลังของระบบมีค่าคงที่.....	81
6.24 ตัวอย่างระบบที่วิเคราะห์ปริมาณฮาร์โมนิก	82
6.25 ASD ขนาด 100-hp ไม่มีไอซึกในส่วนแรงดันคัสซี (a) และ ASD ขนาด 100-hp มีไอซึก 3%ในส่วนแรงดันคัสซี (b)	83
6.26 ความสัมพันธ์ของ %Hd ₅ กับ เปอร์เซ็นต์โหลดแบบไม่เชิงเส้น จาก 0-100% เมื่อยังไม่มีตัวกรองฮาร์โมนิกส์ในระบบ.....	83
6.27 ความสัมพันธ์ของ %Hd ₇ กับ เปอร์เซ็นต์โหลดแบบไม่เชิงเส้น จาก 0-100% เมื่อมีตัวกรองฮาร์โมนิกส์อันดับที่4.7 th ในระบบ.....	84
6.28 ความสัมพันธ์ของ %Hd ₁₁ กับ เปอร์เซ็นต์โหลดแบบไม่เชิงเส้น จาก 0-100% เมื่อมีตัวกรองฮาร์โมนิกส์อันดับที่4.7 th ในระบบ.....	84
6.29 โพลชาร์ตที่จะใช้ในการออกแบบกับกรณีศึกษา.....	86
7.1 ไคอะแกรมของหัวข้อการทดลอง.....	87
7.2 ลักษณะของระบบที่ใช้ในการทดลอง.....	88
7.3 ลักษณะของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไดโอด.....	88
7.4 ผลการทดลองโหลดแบบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไดโอด.....	90
7.5 ตัวอย่างรูปคลื่น และสเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุตที่ พิกัดกำลัง 80%.....	91
7.6 ลักษณะของวงจรชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	91
7.7 ผลการทดลองโหลดแบบอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	93
7.8 ตัวอย่างรูปคลื่น และสเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุตที่ พิกัดกำลัง 100%.....	93
7.9 ลักษณะของวงจรชุดควบคุมชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	94
7.10 ผลการทดลองโหลดแบบชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Drive).....	96
7.11 ตัวอย่างรูปคลื่น และสเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุตที่ พิกัดกำลัง 80%.....	96
7.12 ลักษณะของวงจรชุดควบคุมชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ.....	97

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
7.13 ผลการทดลองโหลดแบบชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Drive).....	98
7.14 ตัวอย่างรูปคลื่น และสเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทางค่านินพทที่ ทักัดกำลัง 100%.....	99
7.15 โดอะแกรมของระบบไฟฟ้าจำลอง.....	100
7.16 ตัวอย่างของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกส์.....	101
7.17 ตัวอย่างการป้อนค่าแหล่งจ่ายไฟฟ้าในแบบจำลอง.....	102
7.18 ตัวอย่างการป้อนค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ในแบบจำลอง.....	102
7.19 ตัวอย่างการป้อนค่าอินคักแดนซ์ของ โหลดแบบเชิงเส้นในแบบจำลอง.....	102
7.20 ตัวอย่างการป้อนค่ารีซิสแดนซ์ของ โหลดแบบเชิงเส้นในแบบจำลอง.....	103
7.21 ตัวอย่างการป้อนค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ที่3ของ โหลดแบบไม่เชิงเส้นในแบบจำลอง.....	103
7.22 ตัวอย่างการตั้งค่าการประมวลผลแบบทรานเซียนในแบบจำลอง.....	103
7.23 ปริมาณฮาร์มอนิกส์โดยรวมที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า	104
7.24 ปริมาณฮาร์มอนิกส์โดยรวมที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า....	105
7.25 ปริมาณฮาร์มอนิกส์โดยรวมที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า....	106
7.26 ปริมาณฮาร์มอนิกส์โดยรวมที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า	107
7.27 ผลการทดลองที่วัดได้ในระบบจำลองที่จุด PCC	110
7.28 การเปรียบเทียบ H_{ocds} กับ H_{spec} กรณีค่า DPF = 1.00.....	112
7.29 การเปรียบเทียบ H_{ocds} กับ H_{spec} กรณีค่า DPF = 1.00 และ 0.95.....	112
7.30 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกส์กรณีค่า DPF = 1.00 [I(Lsys)] และ 0.95 [I(Lsys-2)].....	113
7.31 ผลการทดลองที่วัดได้ในระบบจำลองที่จุด PCC	114
7.32 ปริมาณฮาร์มอนิกส์โดยรวมที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า.....	116
7.33 ปริมาณฮาร์มอนิกส์โดยรวมที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า.....	117
7.34 ผลการทดลองที่วัดได้ในระบบจำลองที่จุด PCC	119
7.35 การเปรียบเทียบ H_{ocds} กับ H_{spec} กรณีค่า DPF = 1.00, 0.95, 0.90 และ 0.85.....	121
7.36 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกส์กรณีค่าDPF=1.00-0.85[I(Lsys)]และ0.95[I(Lsys-4)].....	122
7.37 การเปรียบเทียบ H_{ocds} กับ H_{spec} กรณีค่า DPF = 1.00, 0.95, 0.90 และ 0.85.....	122
7.38 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกส์กรณีค่าDPF=1.00-0.85[I(Lsys)]และ0.95[I(Lsys-4)].....	123

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
7.39 ผลการทดลองที่วัดได้ในระบบจำลองที่จุด PCC	124
7.40 ปริมาณฮาร์มอนิกส์โดยรวมที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า.....	126
7.41 ปริมาณฮาร์มอนิกส์โดยรวมที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า.....	127
7.42 ผลการทดลองที่วัดได้ในระบบจำลองที่จุด PCC	129
7.43 การเปรียบเทียบ H_{cdfs} กับ H_{spec} กรณีค่า DPF = 1.00, 0.95, 0.90 และ 0.85.....	131
7.44 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกส์กรณีค่า DPF=1.00-0.85[I(Lsys)]และ0.95[I(Lsys-4)].....	132
7.45 การเปรียบเทียบ H_{cdfs} กับ H_{spec} กรณีค่า DPF = 1.00, 0.95, 0.90 และ 0.85.....	132
7.46 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกส์กรณีค่า DPF=1.00-0.85[I(Lsys)]และ0.95[I(Lsys-4)].....	133
7.47 การเปรียบเทียบ H_{cdfs} กับ H_{spec} กรณีค่า DPF = 1.00, 0.95, 0.90 และ 0.85.....	133
7.48 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกส์กรณีค่า DPF=1.00-0.85[I(Lsys)]และ0.95[I(Lsys-4)].....	134
7.49 ผลการทดลองที่วัดได้ในระบบจำลองที่จุด PCC	135
7.50 ปริมาณฮาร์มอนิกส์ โดยรวมที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า.....	137
7.51 ปริมาณฮาร์มอนิกส์ โดยรวมที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า.....	138
7.52 ผลการทดลองที่วัดได้ในระบบจำลองที่จุด PCC	139
7.53 การเปรียบเทียบ H_{cdfs} กับ H_{spec} กรณีค่า DPF = 1.00, 0.95 และ 0.90.....	141
7.54 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกส์กรณีค่า DPF=1.00-0.95[I(Lsys)]และ0.95[I(Lsys-2)].....	142
7.55 ผลการทดลองที่วัดได้ในระบบจำลองที่จุด PCC	144
7.56 ปริมาณฮาร์มอนิกส์ โดยรวมที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า.....	145
7.57 ปริมาณฮาร์มอนิกส์ โดยรวมที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า.....	146
8.1 ฮาร์มอนิกส์ก่อนและหลังต่อตัวกรองที่จุด PCC กรณีวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส.....	148
8.2 ฮาร์มอนิกส์ก่อนและหลังต่อตัวกรองที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	149
8.3 ฮาร์มอนิกส์ก่อนและหลังต่อตัวกรองที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	149
8.4 ฮาร์มอนิกส์ก่อนและหลังต่อตัวกรองที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ค่า DPF 1.00.....	150
8.5 ฮาร์มอนิกส์ก่อนและหลังต่อตัวกรองที่จุด PCC ไม่ทำการสลับโวลต์จิ้น อีกทั้งทำขึ้นก็ใช้แค่แปลงโมดูล และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับที่ค่า DPF 0.90 Lag.....	150

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
8.6 ฮาร์มอนิกส์ภายนอกหลังต่อตัวกรองที่จุด PCC กรณีวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส.....	151
8.7 ฮาร์มอนิกส์ภายนอกหลังต่อตัวกรองที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	151
8.8 ฮาร์มอนิกส์ภายนอกหลังต่อตัวกรองที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	151
8.9 ฮาร์มอนิกส์ภายนอกหลังต่อตัวกรองที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ.....	152
8.10 กระแสฮาร์มอนิกส์ที่แหล่งกำเนิดกรณีวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส.....	153
8.11 กระแสฮาร์มอนิกส์ที่แหล่งกำเนิดกรณีชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	153
8.12 กระแสฮาร์มอนิกส์ที่แหล่งกำเนิดกรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	154
8.13 กระแสฮาร์มอนิกส์ที่แหล่งกำเนิดกรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ.....	154
8.14 กำลังงานไฟฟ้าปรากฏ 3 เฟสที่จุด PCC กรณีวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส.....	155
8.15 กำลังงานไฟฟ้าปรากฏ 3 เฟสที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	155
8.16 กำลังงานไฟฟ้าปรากฏ 3 เฟสที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	156
8.17 กำลังงานไฟฟ้าปรากฏ 3 เฟสที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ.....	156
8.18 กำลังงานไฟฟ้าจริง 3 เฟสที่จุด PCC กรณีวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส.....	157
8.19 กำลังงานไฟฟ้าจริง 3 เฟสที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	157
8.20 กำลังงานไฟฟ้าจริง 3 เฟสที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	158
8.21 กำลังงานไฟฟ้าจริง 3 เฟสที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ.....	158
8.22 ค่าตัวประกอบกำลังทั้ง 3 เฟสที่จุด PCC กรณีวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส.....	159
8.23 ค่าตัวประกอบกำลังทั้ง 3 เฟสที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	159
8.24 ค่าตัวประกอบกำลังทั้ง 3 เฟสที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	160
8.25 ค่าตัวประกอบกำลังทั้ง 3 เฟสที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ.....	160
8.26 ฮาร์มอนิกส์โดยรวมทั้ง 3 เฟสที่จุด PCC กรณีวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส.....	161
8.27 ฮาร์มอนิกส์โดยรวมทั้ง 3 เฟสที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ.....	161
8.28 ฮาร์มอนิกส์โดยรวมทั้ง 3 เฟสที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	162
8.29 ฮาร์มอนิกส์โดยรวมทั้ง 3 เฟสที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ.....	162
9.1 ตัวอย่างของกระแสฮาร์มอนิกส์จากโหลดแบบเตาหลอมแบบอาร์ค.....	165
9.2 ตัวอย่างของแบบจำลองในการพิจารณาถึงฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2 และ 4.....	166

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
9.3 ตัวอย่างสเปคตรัมกระแสฮาร์มอนิกส์ที่จุด PCC หลังต่อตัวกรองอันดับที่ 5.....	166
ก-1 ตัวกรองฮาร์มอนิกส์สำหรับโหลดแบบ 3-Phase Diode Rectifier.....	170
ก-2 ตัวอย่างการทดสอบคุณสมบัติของอินคักเตอร์ของตัวกรองอันดับที่ 5.....	171
ก-3 ตัวกรองฮาร์มอนิกส์สำหรับโหลดแบบ AC Voltage Controller.....	172
ก-4 ตัวอย่างการทดสอบคุณสมบัติของอินคักเตอร์ของตัวกรองอันดับที่ 5.....	173
ก-5 ตัวอย่างการทดสอบคุณสมบัติของอินคักเตอร์ของตัวกรองอันดับที่ 7.....	174
ก-6 ตัวกรองฮาร์มอนิกส์สำหรับโหลดแบบ DC Drive.....	175
ก-7 ตัวอย่างการทดสอบคุณสมบัติของอินคักเตอร์ของตัวกรองอันดับที่ 5.....	176
ก-8 ตัวอย่างการทดสอบคุณสมบัติของอินคักเตอร์ของตัวกรองอันดับที่ 7.....	177
ก-9 ตัวกรองฮาร์มอนิกส์สำหรับอินเวอร์เตอร์ (AC Drive)	178
ก-10 ตัวอย่างการทดสอบคุณสมบัติของอินคักเตอร์ของตัวกรองอันดับที่ 5.....	179
ก-11 เครื่องมือวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	180
ข-1 ก่อนต่อตัวกรอง-3 Phase Rectifier-Phase-R.....	182
ข-2 ก่อนต่อตัวกรอง-3 Phase Rectifier-Phase-S.....	183
ข-3 ก่อนต่อตัวกรอง-3 Phase Rectifier-Phase-T.....	184
ข-4 หลังต่อตัวกรอง-3 Phase Rectifier-Phase-R.....	185
ข-5 หลังต่อตัวกรอง-3 Phase Rectifier-Phase-S.....	186
ข-6 หลังต่อตัวกรอง-3 Phase Rectifier-Phase-T.....	187
ข-7 ก่อนต่อตัวกรอง-AC Voltage Controller-R	188
ข-8 ก่อนต่อตัวกรอง-AC Voltage Controller-S	189
ข-9 ก่อนต่อตัวกรอง-AC Voltage Controller-T	190
ข-10 หลังต่อตัวกรอง-AC Voltage Controller-R	191
ข-11 หลังต่อตัวกรอง-AC Voltage Controller-S	192
ข-12 หลังต่อตัวกรอง-AC Voltage Controller-T	193
ข-13 ก่อนต่อตัวกรอง-DC Drive-R	194
ข-14 ก่อนต่อตัวกรอง-DC Drive-S	195

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ข-15 ก่อนต่อตัวกรอง-DC Drive-T	196
ข-16 หลังต่อตัวกรอง-DC Drive-R	197
ข-17 หลังต่อตัวกรอง-DC Drive-S	198
ข-18 หลังต่อตัวกรอง-DC Drive-T	199
ข-19 ก่อนต่อตัวกรอง-AC Drive-R	200
ข-20 ก่อนต่อตัวกรอง-AC Drive-S	201
ข-21 ก่อนต่อตัวกรอง-AC Drive-T	202
ข-22 หลังต่อตัวกรอง-AC Drive-R	203
ข-23 หลังต่อตัวกรอง-AC Drive-S	204
ข-24 หลังต่อตัวกรอง-AC Drive-T	205
ค-1 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ชนิด 3 Phase Diode Rectifier without Capacitor แรงดันอินพุท 380 V _{L-L} พิกัดกำลังทางด้านอินพุท 3kVA	207
ค-2 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ชนิด 3 Phase AC Voltage Controller (Phase Control) แรงดันอินพุท 220 V _{L-L} ต่อร่วมกันเป็นแบบเคลด้า, จ่ายกำลังงานจากระบบ ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบ วาย/เคลด้า พิกัดกำลังทางด้านอินพุท 3kVA	208
ค-3 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ชนิด 3 Phase DC Motor Control (3 Phase Full Controlled) แรงดันอินพุท 380 V _{L-L} ต่อควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบแยกขดลวดกระตุ้น ขนาดพิกัดกำลัง 5kW และขับโหลดเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส.....	210
ค-4 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ชนิด 3 Phase AC Motor Control (3 Phase Pulse Width Modulated Control) แรงดันอินพุท 380 V _{L-L} ขนาด 11kVA ต่อควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับพิกัดกำลัง 3Hp 4 pole แบบวาย.....	212
ง-1 แบบจำลองของระบบใน PSPICE ที่ใช้เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์โหลดที่เหมาะสม ในการสร้างระบบจำลองกรณีเปอร์เซ็นต์โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นเท่ากับ 75% (หัวข้อ 7.3.3).....	216
ง-2 แบบจำลองของระบบใน PSPICE ที่ค่า DPF ต่างๆ (0.85, 0.90, 0.95 และ 1.00) กรณีใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5 เพื่อใช้ลดอัตราฟลักซ์การแบ่ง ไม่มีการใช้ตัวกรองอื่น อีกหนึ่งกับในลัดแปลงเนื้อหา และตั้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ กระแสฮาร์มอนิกส์สู่ระบบจริง [H_{cd} (dB)] ในขั้นตอนของการออกแบบ (หัวข้อ 7.4.1.2)	221

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ง-3 ตัวอย่างการกำหนดพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์แบบ Transient และแบบ AC Sweep กรณีใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5 เพื่อพิจารณาถึงสเปคตรัมของกระแสฮาร์มอนิกส์ และพล็อตกราฟ [H_{cd} (dB)] ตามลำดับ, ในขั้นตอนของการออกแบบ (หัวข้อ 7.4.1.2).....	222
ง-4 ตัวอย่างแบบจำลองกรณีใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5 เพื่อพิจารณาถึงเปอร์เซ็นต์โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่สามารถใช้ได้ในระบบหลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ กรณีพิกัดรวมของระบบมีค่าคงที่ (หัวข้อ 7.4.1.4).....	223
ง-5 ตัวอย่างแบบจำลองที่ใช้และกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ เพื่อวิเคราะห์ถึงเปอร์เซ็นต์โหลดแบบเชิงเส้นที่สามารถใช้ได้ ในระบบหลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ (หัวข้อที่ 7.4.1.4-2).....	226

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของการใช้พลังงานไฟฟ้า เนื่องจากการเจริญเติบโตทางอุตสาหกรรม และเศรษฐกิจส่งผลให้เกิดการนำเอาเทคโนโลยีใหม่ๆ มาใช้เช่น อุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งมีคุณสมบัติเป็นโพลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น และเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์ขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ที่สำคัญในปัจจุบันคือ คอนเวอร์เตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง [1], ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าแบบกระแสสลับ และแบบกระแสตรง (AC & DC Drive) โดยค่า %THD ของ แบบกระแสสลับประมาณ 40-55% และแบบกระแสตรงประมาณ 31-45%), อุปกรณ์ชดเชยค่ากำลังงานไฟฟ้าเสมือนแบบสถิต (Static Var Compensators), ระบบส่งกำลังงานไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง(HVDC), เตาหลอมแบบอาร์ค (ARC Furnace) และเครื่องเชื่อมแบบอาร์ค (ARC Welders) โดยอุปกรณ์ดังกล่าวมักไม่มีการติดตั้งชุดควบคุมปริมาณฮาร์มอนิกส์ตั้งแต่แรกเนื่องจากต้นทุนของอุปกรณ์ ความยุ่งยากในการออกแบบและการติดตั้ง [11] ซึ่งจะทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าได้หลายลักษณะ เช่นการทำให้เกิดความร้อนสูงเฉพาะแห่งในระบบไฟฟ้า, การทำให้ระบบควบคุมและเครื่องวัดทางไฟฟ้าต่างๆทำงานผิดพลาด และมีผลต่ออายุการใช้งานของฉนวนในระบบไฟฟ้า(IEEE)

สำหรับในปัจจุบันผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังเนื่องจากฮาร์มอนิกส์ที่กำลังได้รับความสนใจก็คือการขยายตัวของปริมาณฮาร์มอนิกส์เนื่องจากการเกิดเรโซแนนซ์ขึ้นในระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบไฟฟ้าในอุตสาหกรรมที่มีฮาร์มอนิกส์ปรากฏอยู่ และต้องการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง(Power Factor) ให้อยู่ในช่วง 0.9-0.95 โดยใช้ชุดของตัวเก็บประจุ (Capacitor Bank) มักจะทำให้เกิดเรโซแนนซ์แบบขนานขึ้นระหว่างอินดักแตนซ์ในระบบกับชุดของตัวเก็บประจุดังกล่าว ที่ความถี่ในช่วง 300-420 Hz [4] ซึ่งจะทำให้ปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกส์ ที่ผ่านชุดตัวเก็บประจุที่ความถี่เรโซแนนซ์มีขนาดเพิ่มขึ้นประมาณ 15-20 เท่าในทางปฏิบัติเป็นผลให้ [10] เกิดความเสียหายขึ้นกับชุดตัวเก็บประจุได้ และยังทำให้ระดับของแรงดันฮาร์มอนิกส์ มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย [4]

จากการที่ผู้ผลิตไฟฟ้าได้รับผลกระทบทำให้มีการประกาศใช้มาตรฐานต่างๆในการควบคุมปริมาณฮาร์มอนิกส์เช่น IEEE 519-1992 [2] โดยในปัจจุบันในประเทศไทยยังไม่มี การควบคุมอย่างเข้มงวดเกี่ยวกับปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่จะยอมให้ผู้ใช้จ่ายกลับคืนสู่ระบบไฟฟ้า ทำให้ผลกระทบเนื่องจากฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ามีความรุนแรงมากยิ่งขึ้นเรื่อยๆ แต่ในอนาคตอันใกล้ระบบไฟฟ้ากำลังในประเทศไทยคงจะต้องมีการบังคับใช้มาตรฐานดังกล่าวเข้มงวดยิ่งขึ้น ซึ่งมีผลทำให้การ

ควบคุมฮาร์มอนิกส์มีการออกแบบที่ซับซ้อนมากขึ้น ทำให้ผู้ที่มีหน้าที่ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมดูแลระบบไฟฟ้ากำลังจะต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นและแนวทางในการควบคุมให้สอดคล้องและเหมาะสมกับมาตรฐานที่จะประกาศใช้ดังกล่าว ดังนั้นพอจะสรุปได้ว่าในทางปฏิบัติสาเหตุหลักที่ทำให้ระบบไฟฟ้าต้องการใช้งานตัวกรองฮาร์มอนิกส์คือ ปริมาณฮาร์มอนิกส์สูงเกินค่ามาตรฐาน และแก้ปัญหาการเกิดเรโซแนนซ์ที่ตัวคาปาซิเตอร์

รูปแบบของวิธีในการแก้ปัญหาที่นิยมทำก็คือ การใช้ตัวกรองต่อขนานแบบพาสซีฟ (Shunt Passive Harmonic Trap Filter) [4] เนื่องจากการออกแบบง่ายกว่า, ค่าการบำรุงรักษาต่ำ, ค่าการลงทุนต่ำพิศดกระแสที่อุปกรณ์ต่ำ และยังช่วยจ่ายกำลังงานรีแอกทีฟด้วย [1] ซึ่งในบทความทางวิชาการหลายเรื่องตีพิมพ์ถึงวิธีการควบคุมในหลายๆแบบ ซึ่งส่วนใหญ่ยังไม่สมบูรณ์ และยังหาไม่ได้ในตลาดทั่วไป, โดยฟิลเตอร์แบบที่นิยมใช้มากที่สุดซึ่งมีใช้ในทุกระดับแรงดันจะเป็นแบบตัวกรองความถี่เดียวชนิดเรโซแนนซ์อนุกรม (Second-Order Series Resonant Filter or Single Tuned Filter) [11] ซึ่งมีความสามารถในการลดปริมาณฮาร์มอนิกส์ได้ในช่วง 60%-90% [10]

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ที่สำคัญในปัจจุบัน

1.2.2 เพื่อศึกษาถึงการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการช่วยวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกส์ในระบบและช่วยในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์

1.2.3 เพื่อศึกษาถึงหลักการและเทคนิคพิเศษต่างๆที่ใช้ในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์ในแต่ละขั้นตอน สำหรับการควบคุมปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่อ้างถึงมาตรฐาน IEEE 519-1992

1.2.4 เพื่อที่จะเรียบเรียงรูปแบบในการออกแบบขึ้นใหม่เพื่อใช้สำหรับระบบขนาดกลางถึงขนาดเล็กที่มีลักษณะของระบบไม่ยุ่งยากซับซ้อน โดยการใช้ข้อมูลที่ได้พัฒนาการออกแบบจากงานวิจัยต่างๆ

1.2.5 เพื่อที่จะศึกษาถึงค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการใช้รูปแบบที่นำเสนอเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงที่ได้จากระบบตัวอย่างที่ได้จำลองขึ้น รวมถึงการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากงานจริงในทางปฏิบัติ

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1.3.1 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ที่สำคัญในปัจจุบันน่าจะเป็นอุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยแบบที่นิยมใช้ในทางอุตสาหกรรมคือชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรง โดยอันดับของฮาร์มอนิกส์ที่สำคัญคือ 5, 7, 11, และ 13

1.3.2 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการช่วยวิเคราะห์และออกแบบสามารถใช้ได้หลายแบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ PSPICE (เป็นโปรแกรมจาก MicroSim Corporation of Irvine, California) โดยประโยชน์ที่จะได้รับจากโปรแกรมดังกล่าวคือ การทำแบบจำลองของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ ได้หลายๆชนิด, การแสดงถึงผลของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ร่วมกับหลายชุด, และการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบ (Frequency Scan), การวิเคราะห์รูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้า ในช่วงเวลาที่กำหนด และการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าแต่ละอันดับ (Fourier Analysis) ดังนั้นในขั้นตอนของการออกแบบผู้ออกแบบสามารถดูผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของโปรแกรม ซึ่งรายละเอียดที่สำคัญที่ควรจะนำเสนอคือ เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างผลการทดลองในโปรแกรมเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงแบบจำลองที่ใช้งาน และเปอร์เซ็นต์ค่าผิดพลาดในการออกแบบ

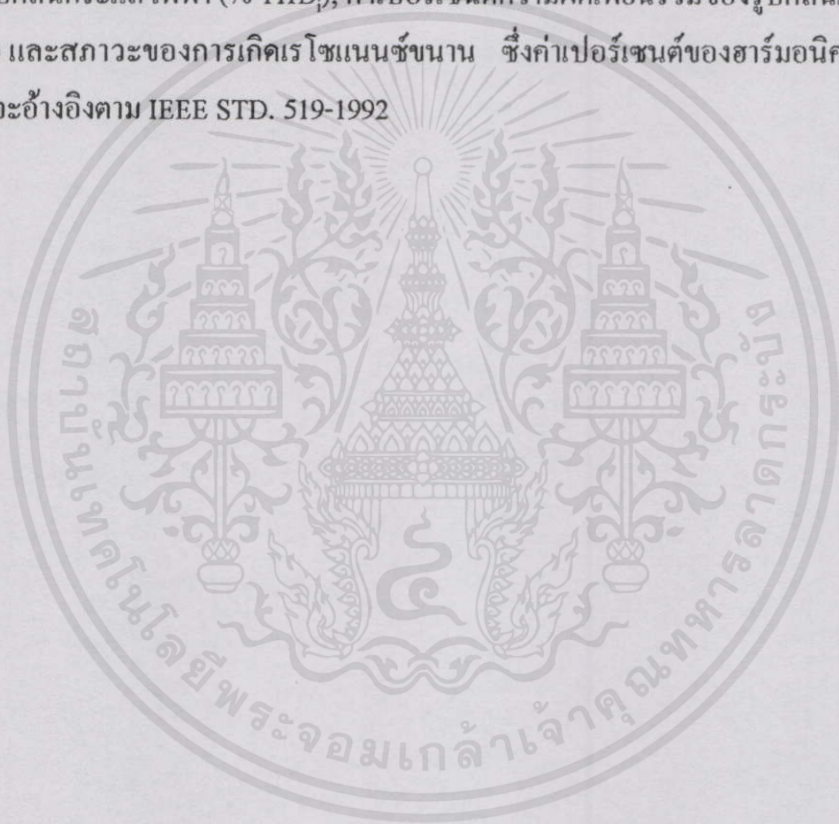
1.3.3 ในการเรียบเรียงข้อมูลเกี่ยวกับงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์พบว่าบทความวิจัยในแต่ละเรื่อง ได้พยายามอธิบายเน้นถึงการพัฒนารูปแบบหรือเทคนิคต่างๆ ในการออกแบบในจุดใดจุดหนึ่งของขั้นตอนในการออกแบบทั้งหมดให้ดีขึ้นและแสดงตัวอย่างของการใช้วิธีที่ได้นำเสนอเกี่ยวกับตัวอย่างของระบบเพื่อแสดงผลที่ได้รับ ดังนั้นจะเห็นว่าถ้าผู้ออกแบบสามารถประยุกต์เทคนิคที่ได้จากงานวิจัยดังกล่าวเข้าด้วยกันและปรับแต่งให้สอดคล้องกับการออกแบบสำหรับระบบโดยทั่วไปที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนโดยใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์อย่างง่ายก็จะทำรูปแบบในการออกแบบใหม่ที่มีการแก้ไขปรับปรุงทุกขั้นตอนในการออกแบบ ทำให้การออกแบบและวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกส์โดยภาพรวมมีความถูกต้องและมีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการควบคุมปริมาณฮาร์มอนิกส์ในระบบให้สอดคล้องมาตรฐานที่กำหนดซึ่งในที่นี้คือ IEEE-519 Std.

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

จากปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องจากฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบที่มีการปรับปรุค่าตัวประกอบกำลังโดยใช้ชุดของตัวเก็บประจุ (Capacitor Bank) และการที่ระบบไฟฟ้าจะต้องถูกควบคุมปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่จะจ่ายกลับคืนสู่ระบบอย่างเข้มงวดขึ้นในอนาคต ในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอถึงวิธีการควบคุมปริมาณฮาร์มอนิกส์และปรับปรุค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยตัวกรองความถี่แบบพาสซีฟ (Passive Filter) ให้สอดคล้องกับข้อกำหนดในมาตรฐาน IEEE 519-1992 (Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System) ซึ่งรายละเอียดของเนื้อหาที่สำคัญจะเน้นถึงการปรับปรุรูปแบบในการออกแบบและวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ในระบบโดยการใช้โปรแกรม PSPICE และศึกษาถึงเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการใช้งาน เพื่อให้ใช้ได้กับระบบแรงดันต่ำมีพิกัดกำลังไม่เกิน 2MVA (ระบบขนาดเล็กถึงขนาดกลาง) ที่มีลักษณะไม่ซับซ้อน

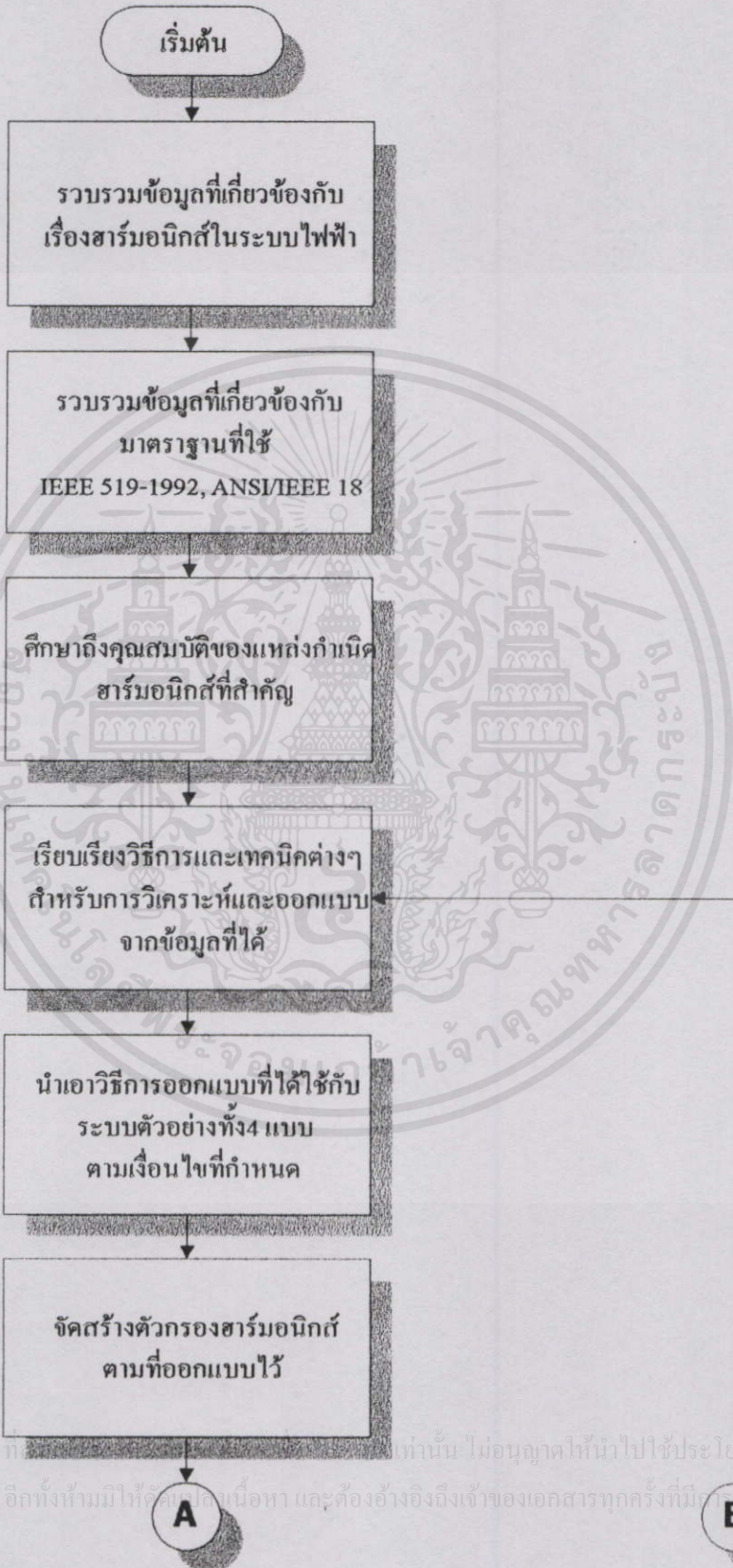
โดยจะทำการศึกษาในระบบจำลองสมดุคัลย์ 3เฟส ขนาดพิกัดกำลัง 3kVA 380/220 50Hz และใช้แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์แบบอุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง 4 แบบคือ ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าแบบกระแสสลับ และแบบกระแสตรง (AC & DC Drive), เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงแบบใช้ไดโอด (3 ϕ Diode Rectifier) และชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Voltage Controller)

แฟกเตอร์หลักที่จะใช้ในการพิจารณาประกอบการออกแบบในระบบไฟฟ้าแต่ละระบบนั้นคือ ค่ากำลังงานไฟฟ้าจริง (Real Power), ค่ากำลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power), ค่าตัวประกอบกำลังของระบบ (Power Factor), ค่าแฟกเตอร์คุณภาพ (Quality Factor), ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า (% THD_i), ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า (% THD_v) และสภาวะของการเกิดเรโซแนนซ์ขนาน ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ของฮาร์โมนิกส์ที่จะใช้เป็นมาตรฐานจะอ้างอิงตาม IEEE STD. 519-1992



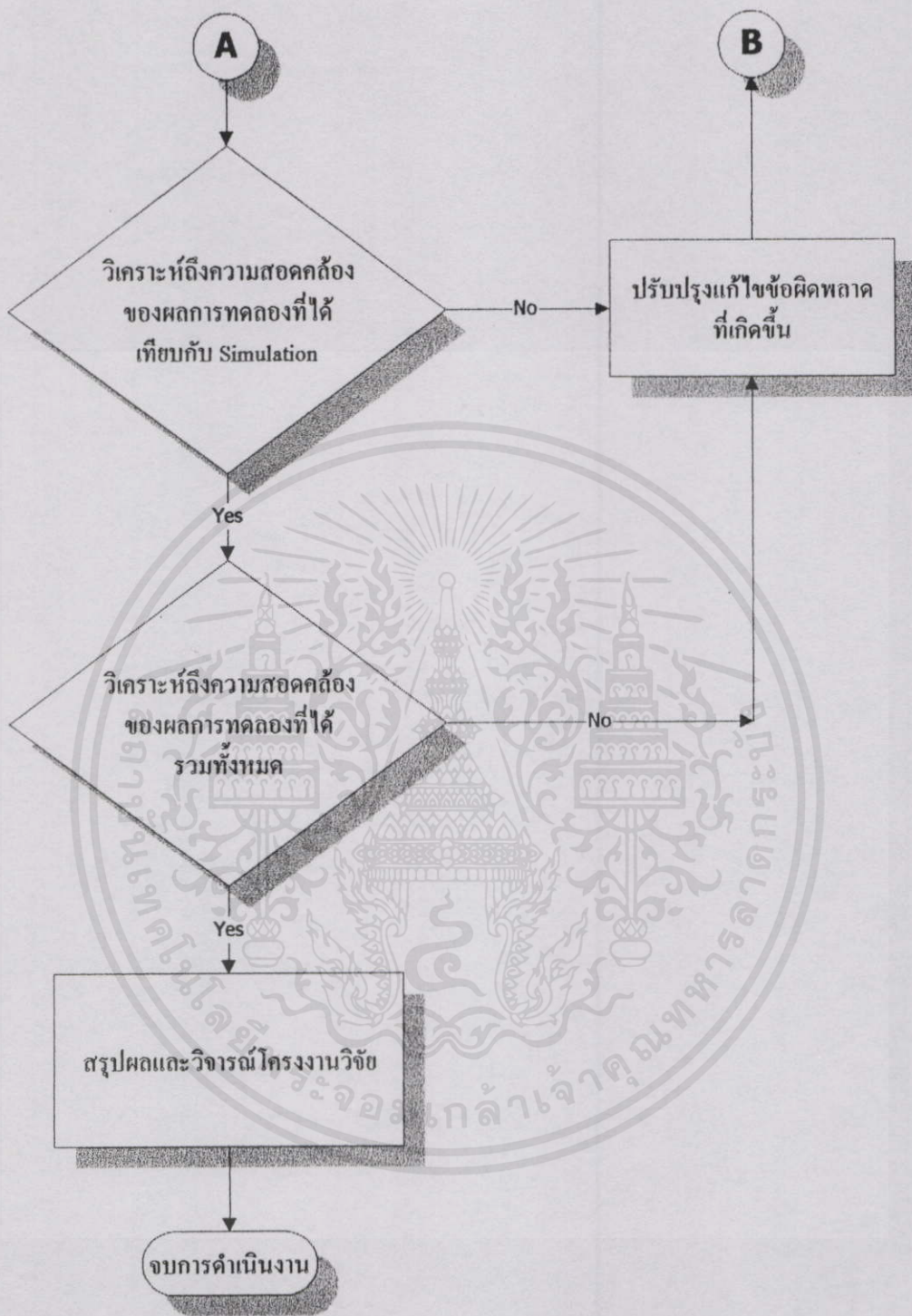
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยนาตาให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี... ไปใช้

รูปที่ 1.1 โฟลชาร์ตแสดงการดำเนินงานทั้งหมด



รูปที่ 1.1 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ข้อตกลงและข้อจำกัดของการศึกษา

1.6.1 ข้อกำหนดเกี่ยวกับสถานะของระบบ : งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยโหลดแบบเชิงเส้น และแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยจะมีการพิจารณาถึงรูปคลื่นแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบ ในสถานะคงตัว (Steady State) เท่านั้น และระบบถูกกำหนดให้มีลักษณะแบบสามเฟสสมดุลย์ตลอดการทดลอง โดยคุณภาพของระบบไฟฟ้ากำลังจะเน้นไปที่จุดต่อร่วมระหว่างแหล่งจ่ายกับโหลด (จุดPCC) และขอบเขตของงานวิจัยนี้จะไม่ครอบคลุมถึงการรบกวนในระบบที่ความถี่วิทยุ (RFI)

1.6.2 การกำหนดพิกัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า : จากข้อที่1.6.1 มีผลให้การกำหนดพิกัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เป็นองค์ประกอบต่างๆของตัวกรองฮาร์มอนิกส์ในที่นี้คืออินดักเตอร์ และคาปาซิเตอร์ สามารถพิจารณาได้จากค่าองค์ประกอบหลักมูลรวมกับองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ที่สถานะคงตัวในระบบแบบสมดุลย์เท่านั้น

1.6.3 ตำแหน่งในการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ : จากข้อที่1.6.1 เป้าหมายในการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์คือต้องการให้ปริมาณฮาร์มอนิกส์ในระบบมีค่าต่ำกว่าข้อกำหนดของมาตรฐานที่จุด PCC ดังนั้นตำแหน่งในการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ที่เหมาะสมคือจุด PCC (Main Bus)

1.6.4 เครื่องมือวัด : เครื่องมือวัดที่จะใช้ในการทดลองจะเป็นเครื่องวัดแบบ Power Harmonic Analyzer (รุ่น Fluke 41B) (ไม่สามารถแสดงค่าฮาร์มอนิกส์ประเภท Interharmonic) สามารถแสดงปริมาณฮาร์มอนิกส์ได้ถึง 41อันดับ และมีค่าผิดพลาดในการวัดในส่วนของแรงดัน(5-65Hz, DC) ไม่เกิน $\pm 0.5\% + 2\text{Digit}$ สำหรับค่า RMS และ $\pm 2\% + 3\text{Digit}$ สำหรับค่า Peak, DC, ในส่วนของกระแส(5-65Hz, DC) ไม่เกิน $\pm 0.5\% + 3\text{Digit}$ สำหรับค่า RMS และ $\pm 2\% + 4\text{Digit}$ สำหรับค่า Peak, DC, (ยังไม่รวมค่าผิดพลาดของ Current Probe)

1.6.5 อินพุทอิมพีแดนซ์ของระบบ : เนื่องจากจุดยากในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์คือการหาอินพุทอิมพีแดนซ์ของระบบที่ถูกต้องในทางปฏิบัติถ้าต้องการค่าที่ถูกต้องจะต้องติดต่อกับหน่วยงานที่คุณแลระบบอยู่เพื่อขอตัวเลขของค่าอิมพีแดนซ์ที่ถูกต้องดังกล่าว ซึ่งในการวิเคราะห์แบบง่าวนั้นจะใช้เฉพาะค่ารีแอกแตนซ์อนุกรมของหม้อแปลงทางด้านอินพุทเพียงอย่างเดียว โดยในงานวิจัยนี้จะใช้เฉพาะค่ารีแอกแตนซ์อนุกรมต่อเฟสที่ต่อเข้าไปในระบบเพื่อจำลองให้เป็นค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของระบบโดยรวม

1.6.6 แบบจำลองที่ใช้ใน PSPICE : ในการวิเคราะห์ถึงปัญหาฮาร์มอนิกส์ระบบโดยทั่วไปมักต้องการการวิเคราะห์ที่อยู่ 2 ลักษณะคือผลการตอบสนองทางความถี่ของอิมพีแดนซ์ในระบบ และปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆของระบบ, แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาฮาร์มอนิกส์ในระบบโดยปกติจะเป็นแบบ 1 เฟส ยกเว้นในกรณีที่สำคัญเช่น เกิดความไม่สมดุลย์ของอิมพีแดนซ์ระบบ, โหลดที่ใช้ในระบบ และแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ ซึ่งจำเป็นจะต้องใช้แบบจำลองแบบ

3 เฟส, ซึ่งแบบจำลองที่จะใช้ในการวิเคราะห์สำหรับระบบจำหน่ายและระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมจะเป็นรายละเอียดเฉพาะในส่วนด้านแรงดันต่ำ และเป็นการประมาณค่าอิมพีแดนซ์ระบบแบบง่ายเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์

1.6.7 ปัญหาฮาร์มอนิกส์จากภายนอก : แหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์จากภายนอกอาจทำให้กระแสรวมที่ผ่านตัวกรองมีค่าสูงกว่าพิกัด ซึ่งอาจสังเกตได้จากการที่องค์ประกอบฮาร์มอนิกในแรงดันมีค่าสูงเกินค่ามาตรฐาน โดยขณะที่ยังไม่มีการต่อแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกในระบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะไม่พิจารณาถึงปริมาณฮาร์มอนิกส์จากภายนอกที่ไหลผ่านตัวกรองฮาร์มอนิกส์ในขณะที่ยังไม่มีการต่อแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์ภายในระบบ

1.7 คำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา

นิยามข้อกำหนดต่างๆที่จะกล่าวถึงนี้ถูกปรับปรุงขึ้นเพื่อใช้กับฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นโดยเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้าแบบสถิตย์ที่ความถี่หลักมูลของผู้ผลิตไฟฟ้า และส่วนอื่นๆของนิยามที่มีประโยชน์จะพบได้ใน IEEE Std 100-1992 , IEEE Std 223-1996 , IEEE Std 59-1962 , ANSI C34.2-1968 , and IEEE Std 444-1973

1.7.1 **Commutation.** การย้ายการนำกระแสระหว่างไทรสเตอร์ (หรือไดโอด) ในวงจรของเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้าที่มีลำดับติดต่อกัน

1.7.2 **Converter.** อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนรูปของพลังงานไฟฟ้าจากแบบหนึ่งไปอีกแบบหนึ่ง, “Semiconductor Converter” คือ เครื่องแปลงผันทางไฟฟ้าที่ใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเป็นอุปกรณ์ในขบวนการแปลงผัน

1.7.3 **Deviation from sin wave.** เป็นค่าหนึ่งที่ใช้แสดงความผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณซายน์ซอไซด์ (sinusoid) เนื่องจากฮาร์มอนิกส์, มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของค่าสัมบูรณ์ของความแตกต่างสูงสุดของค่ายอดของรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนกับรูปคลื่นที่ความถี่หลักมูล

1.7.4 **Deviation from sin wave, maximum theoretical.** เป็นค่าอัตราส่วนของผลรวมของขนาด (rms) ของฮาร์มอนิกส์ทั้งหมดต่อขนาด (rms) ขององค์ประกอบที่ความถี่หลักมูล

1.7.5 **Distortion factor (Harmonic factor).** เป็นค่าอัตราส่วนของค่าประสิทธิผลขององค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ต่อค่าประสิทธิผลขององค์ประกอบที่ความถี่หลักมูล โดยแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบที่ความถี่หลักมูล [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร

$$DF = \sqrt{\frac{\text{sum of squares of amplitudes of all harmonics}}{\text{square of amplitude of fundamental}}} \cdot 100\% \quad (1.1)$$

1.7.6 Filter. เป็นค่าที่ใช้โดยทั่วไปที่มีความหมายถึงอุปกรณ์ที่มีหน้าที่ในการลดกระแสฮาร์โมนิกส์และหรือแรงดันฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

1.7.7 Filter, damped. ฟิวเจอร์โดยทั่วไปที่ประกอบขึ้นด้วย ตัวเก็บประจุ, ตัวเหนี่ยวนำ และตัวต้านทานซึ่งถูกออกแบบให้แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ำในช่วงความถี่ที่กว้าง โดยจะมีค่าแฟคเตอร์คุณภาพ ($Q = X/R$) ที่ค่อนข้างต่ำ

1.7.8 Filter effectiveness (shunt) กำหนดโดยพารามิเตอร์ 2 ตัวคือ

1.7.8.1 pf = อัตราส่วนของค่าอิมพีแดนซ์ที่กำหนดค่ากระแสเปอร์ยูนิคที่ไหลผ่านฟิวเจอร์แบบต่อขนาน (ควรจะมีค่าเข้าใกล้ 1)

1.7.8.2 ps = อัตราส่วนของค่าอิมพีแดนซ์ที่กำหนดค่ากระแสเปอร์ยูนิคที่ไหลกลับเข้าไปในระบบไฟฟ้า (ควรจะมีค่าต่ำที่ความถี่ที่จูนไว้)

1.7.9 Filter, high-pass. ฟิวเจอร์ที่แสดงช่วงในการส่งผ่านกำลังงานขยายออกจากความถี่คัทออฟ (ไม่เท่ากับศูนย์) ไปจนถึงความถี่อินฟินิต

1.7.10 Filter, series. เป็นฟิวเจอร์ชนิดหนึ่งที่ใช้ลดปริมาณฮาร์โมนิกส์โดยใช้วิธีต่ออนุกรมอิมพีแดนซ์ค่าสูงเข้าไประหว่างแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์กับระบบไฟฟ้า

1.7.11 Filter, shunt. เป็นฟิวเจอร์ชนิดหนึ่งที่ใช้ลดปริมาณฮาร์โมนิกส์โดยใช้วิธีต่อขนานอิมพีแดนซ์ค่าต่ำเพื่อเลี่ยงทางเดินกระแสฮาร์โมนิกส์ไม่ให้ไหลเข้าไปในระบบ

1.7.12 Filter, tuned. ฟิวเจอร์โดยทั่วไปที่ประกอบขึ้นด้วย ตัวเก็บประจุ, ตัวเหนี่ยวนำ และตัวต้านทานซึ่งถูกออกแบบให้แสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่ค่อนข้างต่ำ หรือ สูง ที่ความถี่หนึ่งความถี่หรือมากกว่า โดยสำหรับฟิวเจอร์แบบขนานอิมพีแดนซ์จะมีค่าต่ำ และฟิวเจอร์แบบอนุกรมจะมีค่าสูง ซึ่งโดยทั่วไปฟิวเจอร์ชนิดนี้จะมีค่าแฟคเตอร์คุณภาพสูง ($Q = X/R$)

1.7.13 Harmonic. หมายถึงองค์ประกอบฟังก์ชันไซน์ของรูปคลื่นรายคาบ หรือ องค์ประกอบซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล

1.7.14 Harmonic, characteristic. คือกลุ่มของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานของเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้าแบบใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ในสภาวะปกติ ซึ่งมีอันดับของฮาร์โมนิกส์ (h) ดังสมการ [2]

$$h = kq \pm 1 \quad (1.2)$$

k = จำนวนเต็มใดๆ

q = จำนวนของพัลส์ของเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้า ลักษณะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เช่น ในเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้าแบบ 6 ขั้นก็จะสร้างฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5^{th} , 7^{th} , 11^{th} , 13^{th} , etc.

1.7.15 Harmonic, noncharacteristic. . คือกลุ่มของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานในสภาวะที่ไม่ปกติของเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้าแบบใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้เนื่องจาก การกระเพื่อมของความถี่; ความไม่สมดุลในระบบไฟฟ้ากำลัง; มุมจุดชนวนของอุปกรณ์ที่ไม่สมมาตร; หรือการทำงานของเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้าแบบไซโคล (cycloconverter)

1.7.16 Harmonic Factor. คือค่าอัตราส่วนของผลรวมของ กำลังสองของปริมาณฮาร์โมนิกส์ทั้งหมดกับ ค่าประสิทธิผลของปริมาณที่ความถี่หลักมูล [2]

$$\text{Harmonic Factor (for voltage)} = \frac{\sqrt{E_3^2 + E_5^2 + E_7^2 \dots}}{E_1} \quad (1.3)$$

$$\text{Harmonic Factor (for current)} = \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 \dots}}{I_1} \quad (1.4)$$

1.7.17 I*T Product. ผลกระทบโดยการเหนี่ยวนำที่แสดงอยู่ในรูปผลคูณของค่ากระแสประสิทธิผล(amp) กับค่า TIF (telephone influence factor)

1.7.18 kV*T. ผลกระทบโดยการเหนี่ยวนำที่แสดงอยู่ในรูปผลคูณของค่าแรงดันประสิทธิผล (kV) กับค่า TIF (telephone influence factor)

1.7.19 Line Voltage Notch. คือการลดลงชั่วขณะของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้า เนื่องจากการลัดวงจรระหว่างสายชั่วขณะหนึ่งในขณะที่มีการคอมมิวเตท หรือการลดลงชั่วขณะของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้า เนื่องจากแรงดันตกคร่อมค่าความเหนี่ยวนำภายในแหล่งจ่ายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้าอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาที่มีการคอมมิวเตท

1.7.20 Nonlinear Load. คือ โหลดที่มีลักษณะรูปคลื่นของกระแสทางด้านเข้าไม่เป็นรูปไซน์ โดยที่ลักษณะของรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าทางด้านเข้าเป็นรูปคลื่นไซน์

1.7.21 Notch Depth. ค่าเฉลี่ยความลึกของรอยเว้าของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายที่ต่างจากรูปคลื่นไซน์

1.7.22 Notch area. ค่าพื้นที่ของรอยเว้าของแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย ซึ่งคำนวณได้จากผลคูณของ notch depth (โวลต์) กับความกว้างของรอยเว้า (ไมโครวินาที)

1.7.23 Power Factor, Displacement. เป็นค่าอัตราส่วนระหว่าง ค่ากำลังงานไฟฟ้าจริงของออกฤทธิ์เป็นเอกสารที่ส่วนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่นับค่านี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณค่าองค์ประกอบที่ความถี่หลักมูล (วัตต์) กับ ค่ากำลังงานไฟฟ้าปรากฏที่ความถี่หลักมูล (โวลต์แอมป์) ไม่วากรณ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7.24 Power Factor, Total. เป็นค่าอัตราส่วนระหว่าง ค่ากำลังงานไฟฟ้าจริงด้านเข้ารวม กับ ค่ากำลังงาน

ไฟฟ้าปรากฏด้านเข้ารวม

1.7.25 Pulse Number. คือค่าผลรวมของจำนวนครั้งในการคอมมิวเตทที่เกิดขึ้นไม่พร้อมกันในวงจรของเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้าต่อ 1 คาบ เมื่อการทำงานแบบที่ไม่มีการควบคุมมูมเฟส, ซึ่งจะเท่ากับอันดับของฮาร์มอนิกส์หลักในแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง นั่นคือจำนวนของพัลส์ที่ปรากฏในแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านออกต่อ 1 คาบของแรงดันอินพุตทางด้านเข้า

1.7.26 Quality Factor. สามารถคำนวณได้จาก 2π คูณ อัตราส่วนของค่าพลังงานสะสมสูงสุดกับ พลังงานที่ถูกใช้ให้หมดไปต่อ 1 คาบ หรืออาจคำนวณได้จากอัตราส่วนของค่าความถี่เรโซแนนซ์ กับ ค่าแบนด์วิดท์ของความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งคือจุดที่มีค่าแตกต่างจากจุดเรโซแนนซ์เท่ากับ 3 dB, ถ้าวางจรเรโซแนนซ์ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำ, ตัวเก็บประจุ อนุกรมอยู่กับค่าความต้านทาน อาจคำนวณได้จาก [2]

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1.5)$$

1.7.27 Short Circuit Ratio. สำหรับเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้าแบบสารกึ่งตัวนำ, คือค่าอัตราส่วนของความสามารถในการลัดวงจรของบัสที่เป็นจุดต่อของเครื่อง (kVA) กับ พิกัดกำลังของเครื่อง (MW)

1.7.28 Telephone Influence Factor (TIF). สำหรับรูปคลื่นแรงดัน ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้า, คือค่าอัตราส่วนระหว่าง รากที่สองของผลรวมของค่ากำลังสองของค่าประสิทธิผล (weighted) ของทุกองค์ประกอบในรูปคลื่น กับ ค่าประสิทธิผล (unweighted) ของรูปคลื่นทั้งหมด

1.7.29 Total Demand Distortion (TDD). คือค่ารากที่สองของผลรวมของค่ากำลังสองขององค์ประกอบกระแสฮาร์มอนิกส์ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับความต้องการกระแสสูงสุด (คิดค่าความต้องการในช่วง 15 หรือ 30 นาที)

1.7.30 Total Harmonic Distortion (THD). เป็นค่าที่นิยมใช้ในการกำหนดตัวประกอบความผิดเพี้ยน (Distortion Factor) ของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

พื้นฐานเกี่ยวกับฮาร์มอนิกส์

ปัจจุบันปัญหาฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้า กำลังเริ่มได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องมาจากการขยายตัวของเศรษฐกิจในประเทศ ยังผลให้มีการเติบโตทางด้านอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว การใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ตัวอย่างอุปกรณ์เหล่านั้น ได้แก่ เครื่องจักรกลไฟฟ้า , เครื่องเชื่อมแบบอาร์ค อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คอนเวอร์เตอร์หรือเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้า ที่ใช้งานกันอย่างกว้างขวางตั้งแต่ในบ้านจนถึงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ อุปกรณ์ที่ยกตัวอย่างมานี้ ล้วนแล้วแต่ก่อให้เกิดฮาร์มอนิกส์ในลักษณะต่างๆ กันออกไป ตามชนิดของโหลดตัวนั้นๆ, ผลกระทบเนื่องจากฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง เกิดขึ้นได้หลายลักษณะ เช่นการทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้น , ผลกระทบต่ออายุการใช้งานของฉนวนไฟฟ้า, การทำงานผิดพลาดของอุปกรณ์ควบคุม และการเกิดเรโซแนนซ์ขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง(ซึ่งทำให้ปริมาณฮาร์มอนิกส์เกิดการขยายตัวมากขึ้นจากเดิม) ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาลักษณะและปริมาณของฮาร์มอนิกส์ ที่เกิดจากโหลดชนิดต่างๆ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการควบคุมปริมาณของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้น ให้มีค่าอยู่ในระดับที่เหมาะสมเพื่อมิให้ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าในระดับที่สูงมากเกินไป [5], [13]

2.1 ลักษณะของฮาร์มอนิกส์

ฮาร์มอนิกส์คือส่วนประกอบของสัญญาณ ที่มีความถี่ต่างไปจากความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency), ระบบไฟฟ้าในประเทศไทยใช้ความถี่ 50 Hz.

โดยปริมาณของฮาร์มอนิกส์ทั้งหมด นิยมกล่าวอยู่ในรูปแบบของค่า %THD (Total Harmonic Distortion) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.1 [2]

$$\%THD = \left[100 \times \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (U_n)^2} \right] \frac{1}{U_1} \quad (2.1)$$

เอกสาร U_1 เป็นค่า ส่วนประกอบของสัญญาณความถี่หลักมูล นั้น ไม่นับเอาค่านี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณ
ไม่ว่า $U_2 - U_n$ เป็น ส่วนประกอบของสัญญาณความถี่ฮาร์มอนิกส์ ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

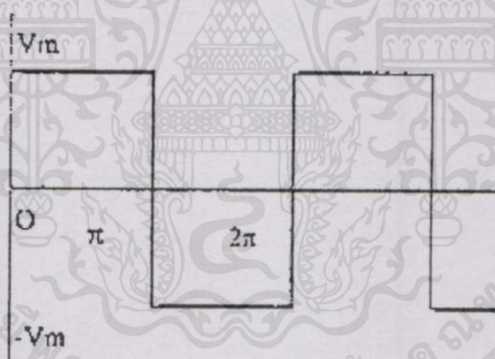
ในการที่จะอธิบายว่ารูปคลื่นร่ายคาบใดๆ มีฮาร์มอนิกส์อันดับที่เท่าไร และขนาดเท่าใดปนกันอยู่บ้างนั้น เราสามารถอธิบายได้โดยใช้อนุกรมฟูริเยร์ [13]

$$V(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos \left(\frac{2n\pi t}{T} \right) + b_n \sin \left(\frac{2n\pi t}{T} \right) \right] \tag{2.2}$$

- V(t) = ฟังก์ชันของรูปคลื่นร่ายคาบใดๆ
- a₀ = ค่าเฉลี่ยหรือองค์ประกอบดีซีของ V(t)
- n = อันดับของฮาร์มอนิกส์

ตัวอย่างการใช้อนุกรมฟูริเยร์กับรูปคลื่นแรงดันแบบสี่เหลี่ยม แสดงดังในรูปที่ 2.1 จะทำให้ได้อนุกรมฟูริเยร์คือ [13]

$$V(t) = \frac{4}{\pi} V_m \left[\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right] \tag{2.3}$$



รูปที่ 2.1 รูปคลื่นสัญญาณสี่เหลี่ยม

ซึ่งจากสมการจะเห็นว่าส่วนของสัญญาณความถี่หลักมูลก็คือ $\frac{4}{\pi} V_m \sin \omega t$ ส่วนของสัญญาณที่เหลือออกนั้นจะเป็นสัญญาณฮาร์มอนิกส์

2.2 ฮาร์มอนิกส์แบ่งออกได้เป็น 5 ประเภท [13]

2.2.1 Harmonic เป็นส่วนประกอบของสัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าลงตัว ของสัญญาณความถี่หลักมูล (Fundamental) ซึ่งตัวอย่างของฮาร์มอนิกส์ประเภทนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 2.1

2.2.2 Interharmonic เป็นส่วนประกอบของสัญญาณที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าลงตัว ของสัญญาณความถี่หลักมูล เนื่องจากคาบสัญญาณของเวลาไม่เท่ากันในทุกคาบ ซึ่งจะพบได้ในโหลดประเภทเตาหลอมแบบอาร์ค และในการควบคุมที่เป็นแบบ integral cycle control

2.2.3 Characteristic Harmonic เป็นฮาร์มอนิกส์ที่ถูกสร้างโดยเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้า โดยอันดับของฮาร์มอนิกส์จะเป็นไปตามสมการที่ 2.4 [13]

$$n = k \cdot p \pm 1 \quad (2.4)$$

p = จำนวนพัลส์ของเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้าต่อหนึ่งคาบ

k = เลขจำนวนเต็มบวกใดๆ

ตัวอย่างของโหลดที่สร้างฮาร์มอนิกส์ในกลุ่มนี้คือ คอนเวอร์เตอร์, อินเวอร์เตอร์ และบูทีเอส

2.2.4 Noncharacteristic Harmonic คือฮาร์มอนิกส์ที่ถูกสร้างโดยเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้า โดยอันดับของฮาร์มอนิกส์จะไม่เป็นไปตามสมการที่ 2.4

2.2.5 Triplen Harmonic คือฮาร์มอนิกส์กลุ่มที่มีอันดับที่หารด้วย 3 ลงตัว เช่น 3, 6, 9, ซึ่งในระบบสามเฟสสมมูลย์ฮาร์มอนิกส์กลุ่มนี้มักจะรวมกัน ($I_n = I_{A_3} + I_{B_3} + I_{C_3}$) โหลดอยู่ในสายนิวตรอน

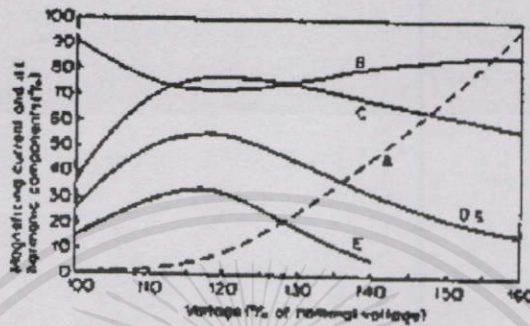
2.3 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ (Harmonic Source) [13]

ในทางปฏิบัติพบว่ากระแสในสภาวะคงตัวที่ไหลผ่านโหลดที่เป็นเชิงเส้น (Linear Load) นั้นจะมีฟังก์ชันเช่นเดียวกับแรงดันไฟฟ้า แต่ถ้ระบบต่อเข้ากับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Load) กระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ดังกล่าว จะมีลักษณะผิดเพี้ยน (Distortion) ไปจากฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งการผิดเพี้ยนของสัญญาณนี้จะทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์ขึ้นภายในระบบไฟฟ้ากำลัง

ตัวกำเนิดฮาร์มอนิกส์ที่สำคัญ ในปัจจุบันก็คือ เรกติไฟเออร์, อินเวอร์เตอร์ และการควบคุมกำลังงานไฟฟ้าแบบการควบคุมมุมเฟส (phase angle controlled) โดยรูปคลื่นที่เกิดขึ้นสามารถใช้วิธีวิเคราะห์โดยอนุกรมฟูเรียร์ได้โดยตรง แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ที่สำคัญได้แก่

2.3.1 อุปกรณ์ประเภทแม่เหล็ก อุปกรณ์ประเภทแม่เหล็ก ที่นิยมใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังคือ เครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหมุน , ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้า โดยภายใต้การทำงานที่สภาวะคงตัว ปกติแล้วจะไม่ทำให้เกิดปัญหาในการรบกวนระบบไฟฟ้า แต่ในสภาวะการทำงานที่ผิดปกติชั่วขณะ หรือการทำงานนอกขอบเขตปกติ จะสามารถทำให้เกิดการรบกวนต่อระบบไฟฟ้ากำลังได้

โดยตัวอย่างของการเกิดขึ้นของฮาร์มอนิกส์ ที่เกิดจากโหลดประเภทแม่เหล็กแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นการแสดงปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกส์ของกระแสกระตุ้นวงจรแม่เหล็ก เทียบกับปริมาณของเปอร์เซ็นต์โวลต์แดงที่เกินไปจากระดับแรงดันใช้งานปกติ



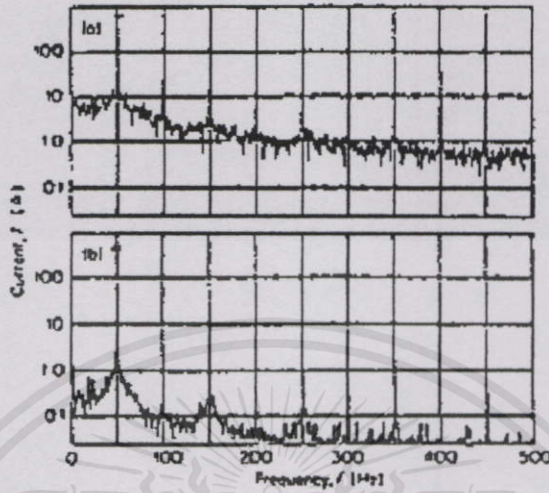
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบฮาร์มอนิกส์ของ Magnetizing Current

- A : Magnetizing Current
- B : ส่วนประกอบกระแสที่มีความถี่หลักมูล
- C : 3rd ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3
- D : 5th ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5
- E : 7th ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 7

2.3.2 อุปกรณ์ประเภทอาร์ค ตัวอย่างของแหล่งฮาร์มอนิกส์ประเภทนี้ที่สำคัญได้แก่เตาหลอมแบบอาร์ค และเครื่องเชื่อมไฟฟ้า โดยฮาร์มอนิกส์จะเกิดขึ้นจากความไม่เชิงเส้นของลำอาร์ค ซึ่งตัวอย่างของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นสำหรับโหลด (Load) ที่เป็นเตาหลอมแบบอาร์ค แสดงได้ดังรูปที่ 2.3

ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากเตาหลอมโลหะแบบอาร์คจะมีลักษณะที่ไม่สามารถคาดเดาได้ เนื่องจากลักษณะของลำอาร์คมีการเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละคาบเวลา, ลักษณะของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าจะมีลักษณะไม่เป็นคาบเวลา (Non-periodic) และจากการวิเคราะห์จะพบว่าสเปกตรัมของฮาร์มอนิกส์จะประกอบไปด้วยอันดับที่เป็นเลขจำนวนเต็ม (Harmonic) และที่ไม่ใช่เลขจำนวนเต็ม (Interharmonic) โดยเฉพาะฮาร์มอนิกส์อันดับต่ำจะเริ่มตั้งแต่อันดับที่ 2 และสิ้นสุดที่อันดับที่ 7 และจะมีขนาดที่มากกว่ากลุ่มที่มีอันดับไม่ใช่เลขจำนวนเต็ม, เมื่อโลหะที่ถูกหลอมกลายเป็นของเหลวมากขึ้นลำอาร์คก็จะมีลักษณะงอตัวมากขึ้น ซึ่งจะเป็นผลให้ค่าของกระแสไฟฟ้าคงตัวตามไปด้วย โดยค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณจะมีแนวโน้มลดลง และเมื่อลักษณะของกระแสไฟฟ้ามีความสมมาตรรอบแกนศูนย์มากขึ้นก็จะมีผลให้ฮาร์มอนิกส์ที่มีอันดับเป็นเลขคู่ และอันดับที่ไม่ใช่จำนวนเต็มมีค่าลดลง, ในตารางที่ 2.1 แสดงถึงตัวอย่างของกระแสฮาร์มอนิกส์ ของเตาหลอมแบบอาร์ค โดยแบ่งช่วง

การทำงานเป็น 2 ช่วง โดยค่าที่แสดงในตารางสามารถนำไปใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับฮาร์มอนิกส์ได้ ถ้าข้อมูลเฉพาะของเตาหลอมในระบบไม่สามารถที่จะหาได้



รูปที่ 2.3 Frequency Spectra for (a) melting and (b) refining periods

ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าปริมาณของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา melting จะมีค่าสูงกว่าในช่วงเวลา refining

ตารางที่ 2.1 ค่าตัวอย่างของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากเตาหลอมแบบอาร์ค

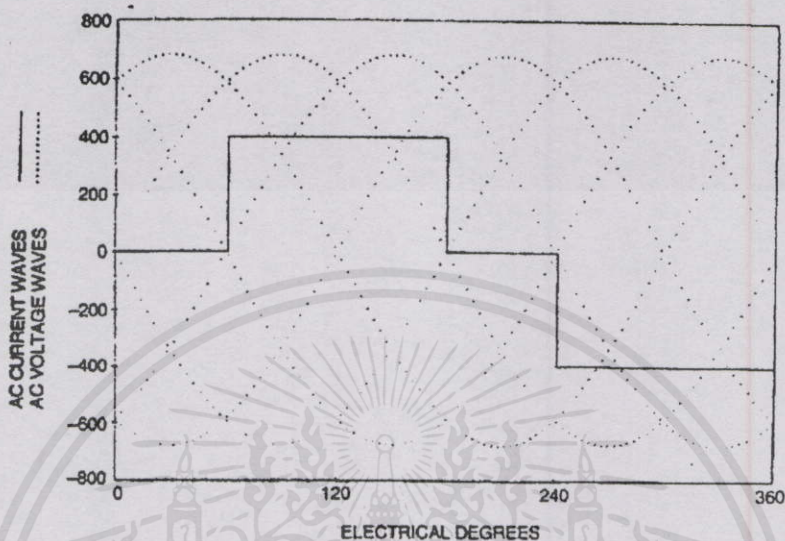
	Harmonic Current % of Fundamental				
	Harmonic Order				
Furnace condition	2	3	4	5	7
Initial melting (active arc)	7.7	5.8	2.5	4.2	3.1
Refining (stable arc)	0.0	2.0	0.0	2.1	0.0

2.3.3 อุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ตัวกำเนิดฮาร์มอนิกส์ที่สำคัญ ในปัจจุบันก็คือ เรคตีไฟเออร์ และอินเวอร์เตอร์ ที่ใช้ในการควบคุมแบบการควบคุมมุมเฟส (phase angle controlled) โดยรูปคลื่นที่เกิดขึ้นสามารถใช้ในการวิเคราะห์โดยอนุกรมฟูเรียร์ได้โดยตรง

โดยทั่วไปอินคักแดนซ์ทางด้าน AC จะมีค่ามากกว่าทางด้าน DC มากๆ ดังนั้นจะสมมุติให้กระแสทางด้านโหลดเป็นกระแสที่มีค่าคงที่ และคอนเวอร์เตอร์จะกระทำตัวเป็นเสมือนแหล่งจ่ายไม่ภาวะดีใจซึ่งอินคักทั้งหมัดให้ลัดแปลงเป็นค่า และตั้งอ้างอิงถึงเข้าของเตาหลอมครั้งที่มีการนำไฟฟ้าแรงดันฮาร์มอนิกส์ทางด้าน DC และเป็นแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกส์ด้าน AC โดยลักษณะรูปคลื่นของคอนเวอร์เตอร์ สำหรับวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 1 ทาง (ในส่วนใหญ่เป็นเส้นทึบ) แสดงได้

ดังรูปที่ 2.4 กระแสส่วนที่เพิ่มเข้ามาที่เป็นเส้นประแสดงถึงรูปกระแส สำหรับคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 ทาง , จากการวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูเรียร์ จะได้อนุกรมฟูเรียร์สำหรับรูปคลื่นกระแสในหน่วยเปอร์เซ็นต์ของกระแส DC (I_d) ดังกล่าวเป็น [13]



รูปที่ 2.4 รูปคลื่นกระแสทางค่าน AC

$$I_a = i_p + I_n = \frac{4}{\pi} \left\{ (\sin \frac{\omega}{2}) (\cos \omega t) + (\frac{1}{3} \sin 3\frac{\omega}{2}) (\cos 3\omega t) - (\frac{1}{5}) (\sin 5\frac{\omega}{2}) (\cos 5\omega t) + \dots \right\} \quad (2.5)$$

i_p = รูปคลื่นกระแสทางค่านบวก

i_n = รูปคลื่นกระแสทางค่านลบ

โดยอันดับของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นสำหรับรูปคลื่นของกระแสที่มีจำนวนขั้นเท่ากับ q จะมีค่าตามสมการ [13]

$$n = kq \pm 1 \quad (2.6)$$

เอกสารนี้: อันดับของสัญญาณฮาร์โมนิกส์ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณี: จำนวนวนขึ้นของรูปคลื่นแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

k : เลขจำนวนเต็มบวก (1, 2, 3...)

และขนาดของกระแส (rms) ของสัญญาณฮาร์มอนิกส์ จะหาได้จากสมการที่ 2.7 [13]

$$I_n = I_1 / n \quad (2.7)$$

2.3.4 Phase Multiplication : ปริมาณฮาร์มอนิกส์ในระบบอาจมีค่าลดลงได้โดยการใช้เทคนิคของการเลื่อนเฟสของสัญญาณ (Phase Multiplication) ถ้ากลุ่มของโพลชนิด 6 พัลส์เรกติไฟเลอร์มีลักษณะดังนี้คือ

2.3.4.1 มีอัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าเท่ากัน

2.3.4.2 ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้ามียุคค่าเท่ากัน

2.3.4.3 มีค่ามุมตำแหน่งเฟสซึ่งกันและกันเท่ากับ “60 องศาต่อด้วยจำนวนชุดทั้งหมดของเรกติไฟเลอร์”

2.3.4.4 ถูกควบคุมให้ทำงานที่ค่ามุมจุดชนวน (Firing Angle) เท่ากัน

2.3.4.5 กระแสเอาต์พุตทางด้านคิซีมีค่าเท่ากัน

โดยที่ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจะมีอันดับเท่ากับ $kq \pm 1$ และค่าจำนวนพัลส์ (q) จะเท่ากับ 6 คูณด้วยจำนวนชุดทั้งหมดของเรกติไฟเลอร์ (ดูเพิ่มเติมใน IEEE Std. 223-1966), อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเงื่อนไขทั้ง 5 ข้ออาจเป็นไปได้ทั้งหมดซึ่งจะมีผลทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์แบบที่ไม่เป็นไปตามคุณลักษณะ (Non-characteristic) ขึ้นในระบบ โดยที่ควรพิจารณาเพื่อควบคุมปริมาณฮาร์มอนิกส์ดังกล่าวไม่ให้มีค่าเกินมาตรฐานที่กำหนด, ตัวอย่างเช่น เรกติไฟเลอร์ 2 ชุดมีเฟสต่างกันเท่ากับ 30 องศา รูปคลื่นสัญญาณรวมที่ได้จะมีลักษณะเป็นแบบ 12 พัลส์ ดังนั้นอันดับของฮาร์มอนิกส์ที่ต่ำที่สุดจะเท่ากับ 11, เรกติไฟเลอร์ 3 ชุดมีเฟสต่างกันเท่ากับ 20 องศา รูปคลื่นสัญญาณรวมที่ได้จะมีลักษณะเป็นแบบ 18 พัลส์ ดังนั้นอันดับของฮาร์มอนิกส์ที่ต่ำที่สุดจะเท่ากับ 17, เรกติไฟเลอร์ 4 ชุดมีเฟสต่างกันเท่ากับ 15 องศา รูปคลื่นสัญญาณรวมที่ได้จะมีลักษณะเป็นแบบ 24 พัลส์ ดังนั้นอันดับของฮาร์มอนิกส์ที่ต่ำที่สุดจะเท่ากับ 23 (ดูเพิ่มเติมใน ANSI C34.2-1968)

2.3.5 TCR (Thyristor-Controlled Reactor) เป็นอุปกรณ์ที่มีการนำไปใช้งานในระบบไฟฟ้าอย่างแพร่หลายเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์ที่ชดเชยขานเข้ากับระบบที่มีการใช้งาน โหลดชนิดเดาหลอมแบบอาร์คหรือในงานอื่นๆ โดยจะทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันไฟฟ้า, ลดแรงดัน Flicker, ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง, แก้ไขความไม่สมดุลย์ของเฟส, และรักษาเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านซุครีแอกเตอร์ใน TCR จะมีมุมต่างเฟสกับแรงดันอยู่เกือบ 90 องศา (กำลังงานสูญเสียต่ำ), ในสภาวะการทำงานโดยทั่วไปผลของการปรับมุมจุดชนวนของ SCR จะทำให้ขนาดของกระแสมีค่าลดลง และยังทำให้รูปคลื่นมีลักษณะผิดเพี้ยนไป ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าอันดับของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจะมีอันดับที่เป็นเลขคู่ โดยถ้ามุมในการจุดชนวนของ SCR ทั้ง 2 ตัว มีค่าเท่ากันจะสามารถคำนวณหาค่า อาร์เอ็มเอสขององค์ประกอบกระแสฮาร์มอนิกส์ได้จากสมการที่ 2.8 [2]

$$I_h = \frac{4}{\pi} \times \frac{V}{X} \left[\frac{\sin(h+1)}{2(h+1)} \times \alpha + \frac{\sin(h-1)}{2(h-1)} \times \alpha - \frac{\cos \alpha \sinh \alpha}{h} \right] \quad (2.8)$$

$h = 3, 5, 7, \dots$

V = ค่าแรงดันระหว่างสายที่ความถี่หลักมูล (โวลต์)

X = ค่ารีแอกแตนซ์รวมต่อเฟส (โอห์ม)

α = ค่ามุมจุดชนวนของเอสซีอาร์ (องศา)

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างค่ากระแสฮาร์มอนิกของ TCR

Furnace condition	Harmonic Current % of Fundamental				
	Harmonic Order				
	2	3	4	5	7
Initial melting (active arc)	7.7	5.8	2.5	4.2	3.1
Refining (stable arc)	0.0	2.0	0.0	2.1	0.0

ตารางที่ 2.2 แสดงถึงค่าปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นสูงสุดถึงอันดับที่ 25 ซึ่งค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นของฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับไม่ได้เกิดขึ้นที่ค่ามุมในการนำกระแสของเอสซีอาร์ที่ค่าเดียวกัน, ในกรณีที่ระบบอยู่ในสภาวะสมดุลค่าฮาร์มอนิกที่แสดงอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ของขนาดกระแสที่ความถี่หลักมูลจะมีค่าเหมือนกันสำหรับกระแสในเฟสและกระแสในสาย โดยในกรณีของฮาร์มอนิกอันดับที่หารด้วย 3 ลงตัว (Triplen) จะปรากฏเฉพาะในกระแสเฟสเท่านั้น

2.3.6 อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ในปัจจุบันมีใช้ทั้งแบบหนึ่งเฟสและแบบ 3 เฟส ลักษณะของเอาต์พุตอาจมีลักษณะของรูปคลื่นที่เป็นฟังก์ชันของไซน์ และมีค่าตัวประกอบกำลังเกือบจะเท่ากับ 1 หรืออาจจะมีเอาต์พุตที่ประกอบด้วยฮาร์มอนิกต่างๆทั้งที่เป็นและไม่ใช่ไปตามคุณลักษณะและค่าตัวประกอบกำลังอาจจะมีค่าต่ำซึ่งอาจจะมีผลกระทบต่อระบบโดยรวม

โดยชนิดของอินเวอร์เตอร์อาจแบ่งได้ดังนี้คือ

2.3.6.1 Line Commutated

2.3.6.2 Pulse Width Modulated

2.3.6.3 Self Commutated High Frequency Link

2.3.6.4 Self Commutated Programed Pulse Switching Amplifier

-อินเวอร์เตอร์แบบหนึ่งเฟส (Single Phase Inverters)

อินเวอร์เตอร์แบบหนึ่งเฟส โดยทั่วไปจะมีพิกัดต่ำกว่า 10 kW และมักไม่ได้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาต่างๆขึ้นในระบบถ้าจำนวนที่ต่อใช้งานนั้นมีไม่มากนัก, อย่างไรก็ตามถ้าจำนวนอินเวอร์เตอร์ที่ต่อใช้งานมีจำนวนมาก ก็อาจจะทำให้ปริมาณฮาร์มอนิกส์มีค่าสูงมากและอาจทำให้เกิดปัญหาต่างๆขึ้นได้

-อินเวอร์เตอร์แบบสามเฟส (Three Phase Inverters)

อินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสโดยทั่วไปจะมีพิกัดอยู่ในช่วง 10kW-1MW และส่วนใหญ่จะเป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับลักษณะของแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในวงจรอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสอาจมีการใช้เทคนิคในการหยุดนำกระแสของเอสซีอาร์แบบ Line-Commutated หรือ Self-Commutated ได้เช่นเดียวกับอินเวอร์เตอร์แบบหนึ่งเฟส และในส่วนของฮาร์มอนิกส์ด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสก็จะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวเช่นเดียวกับแบบหนึ่งเฟส และในส่วนของระบบไฟฟ้าเองก็อาจส่งผลกระทบต่อลักษณะเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ได้ เช่น แรงดันในระบบไม่สมดุล, ลักษณะของแรงดันไฟฟ้าเกินหรือต่ำกว่าปกติ และการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ภายในระบบ

2.3.7 วงจรอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมด้วยเทคนิคการควบคุมมุมเฟส (Electronic Phase Control)

การควบคุมกำลังงานไฟฟ้าที่ส่งให้กับ โหลด โดยใช้วิธีการควบคุมมุมในการนำกระแสของไทรสเตอร์ จะส่งผลให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง ตัวอย่างของวงจรที่ใช้เทคนิคดังกล่าวคือ TCR โดยโหลดจะเป็นแบบตัวเหนี่ยวนำ หรือในบางครั้งอาจจ่ายให้กับโหลดแบบฮีตเตอร์ ซึ่งมีค่า DPF เท่ากับหนึ่ง, ผลของการควบคุมกำลังงานไฟฟ้าโดยใช้วิธีควบคุมมุมเฟสในการนำกระแสของไทรสเตอร์จะทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์ในกลุ่มที่มีอันดับเป็นเลขคี่เท่านั้น และมีขนาดในแต่ละอันดับสัมพันธ์กับลักษณะของโหลดที่ใช้งานด้านเอาต์พุต

2.3.8 ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ (Cycloconverter Harmonics)

สมการที่แสดงถึงการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกส์ของคอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้มีความยุ่งยากซับซ้อนมาก โดยมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามตามอัตราส่วนความถี่ ซึ่งความถี่ของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้จากสมการ [2]

$$f_h = f_1(kq \pm 1) \pm 6nf_o \quad (2.9)$$

f_h : ความถี่ของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบ

k และ n : ค่าจำนวนเต็ม ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

f_o : ความถี่ทางด้านเอาต์พุตของไซโคลคอนเวอร์เตอร์ เองถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

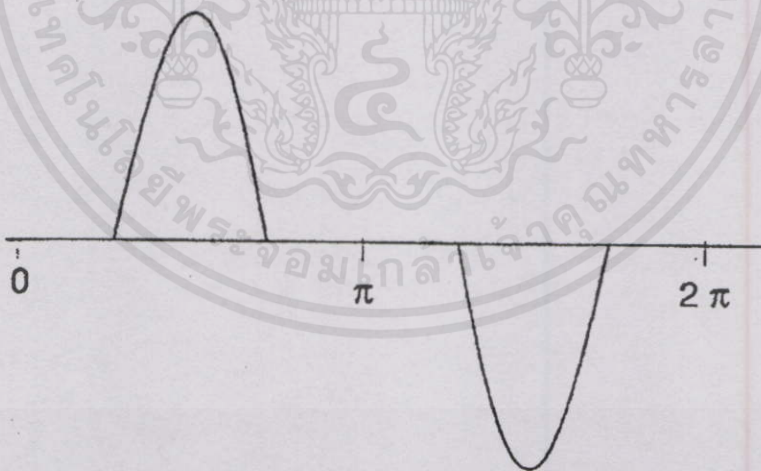
จะสังเกตเห็นว่าเทอมแรกของสมการจะเป็นส่วนที่แสดงถึงความถี่ของฮาร์โมนิกส์ที่เหมือนกับกรณีคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ ส่วนในเทอมที่สองแสดงถึงฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นที่ความถี่ข้างเคียง (Side Band) ฮาร์โมนิกส์ในส่วนแรก

2.3.9 แหล่งจ่ายแบบสวิตโหมด (Switch Mode Power Supply)

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันใช้แหล่งจ่ายแรงดันแบบสวิตโหมดซึ่งมีราคาที่ถูกและสามารถทำงานได้แม้แรงดันในระบบไฟฟ้าอาจมีการเปลี่ยนแปลงบ้าง, ลักษณะของวงจรภายในจะใช้คาปาซิเตอร์ประกอบอยู่ในวงจรเพื่อจ่ายแรงดันให้กับอุปกรณ์ต่างๆ โดยกระแสทางด้านอินพุทจะมีลักษณะไม่ต่อเนื่ององค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ของรูปคลื่นดังกล่าวแสดงแสดงดังรูปที่ 2.5

2.3.10 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบพีดับบลิวเอ็ม (Pulse width Modulated Drive)

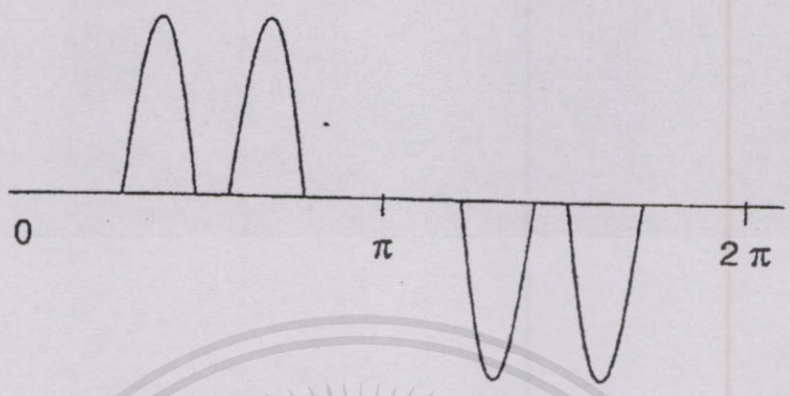
อุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ชนิดนี้ต่างจากเครื่องแปลงผันไฟฟ้าโดยทั่วไปซึ่งวงจรจะประกอบด้วยส่วนของวงจรเรกติไฟเลอร์ซึ่งมีค่าตัวประกอบกำลังสูง, และจะมีการใช้คาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่ต่ออยู่ในส่วนแรงดันดีซีเพื่อลดแรงดันระลอกให้มีค่าต่ำ ดังนั้นที่สภาวะการจ่ายโหลดต่ำๆ (30%-50%) กระแสอินพุทจะมีลักษณะไม่ต่อเนื่องก็จะมีกระแสไหลผ่านไดโอดต่อเนื่องเมื่อแรงดันทางด้านอินพุทมีค่าสูงกว่าแรงดันที่คาปาซิเตอร์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.6, จากลักษณะของรูปคลื่นจะเห็นว่ามีความคล้ายกับรูปคลื่นกระแสของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตโหมดแต่จะต่างกันที่ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบพีดับบลิวเอ็มจะเป็นแบบสามเฟสซึ่งฮาร์โมนิกส์ที่มีค่าสูงที่สุดคืออันดับที่ 5



Harmonic	Magnitude	Harmonic	Magnitude
1	1.000	9	0.157
3	0.810	11	0.024
5	0.606	13	0.063
7	0.370	15	0.079

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไม่ควรเผยแพร่...
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างของรูปคลื่นและค่าฮาร์โมนิกส์ของแหล่งจ่ายแบบสวิตโหมด

และในที่สุดภาวะที่โหดมาก ๆ นั้นลักษณะของกระแสทางด้านอินพุทจะมีความต่อเนื่องมากขึ้น โดยจุดที่กระแสจะมีความต่อเนื่องอาจกำหนดโดยขนาดของอินดักแตนซ์ในส่วนเอาต์พุทของชุดเรกติไฟ์เลอร์



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างของรูปคลื่นของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบที่ดับบลิวเอ็ม

ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันจะเป็นแบบที่ใช้เพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ (Variable-Speed Drive) ซึ่งมีทั้งแบบที่ใช้กับมอเตอร์กระแสตรงและมอเตอร์กระแสสลับ, ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นสำหรับชุดควบคุมทั้งสองแบบจะมีลักษณะคล้ายกัน โดยจุดที่มีความแตกต่างกันที่สำคัญคือ ในแบบที่ใช้กับมอเตอร์กระแสสลับจะใช้ชุดเรกติไฟ์เลอร์แบบไดโอดในการแปลงแรงดันกระแสสลับเป็นกระแสตรง แต่ในแบบที่ใช้กับมอเตอร์กระแสตรงจะใช้ชุดเรกติไฟ์เลอร์แบบที่ใช้เอสซีอาร์ และใช้เทคนิคในการควบคุมแบบปรับมุมเฟสในการนำกระแส ซึ่งในลักษณะของการใช้งานที่มีหลายชุดต่อร่วมกันในระบบ กระแสฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากแต่ละชุดอาจเกิดการหักล้างกันได้ในส่วน ซึ่งจะต่างกับในแบบที่ใช้ไดโอดซึ่งมีโอกาสหักล้างกับในระดับที่ต่ำมากเนื่องจากไม่มีการควบคุมในส่วนวงจรเรกติไฟ์เลอร์

อีกส่วนหนึ่งที่เป็นความแตกต่างกันระหว่างชุดขับเคลื่อนทั้งสองแบบคือค่าตัวประกอบกำลังในส่วนองค์ประกอบความถี่หลักมูล (DPF), ซึ่งในแบบที่ใช้กับมอเตอร์กระแสตรงจะมีค่าดังกล่าวค่อนข้างต่ำซึ่งจะมีผลกระทบให้เกิดกำลังงานสูญเสียที่หม้อแปลงไฟฟ้าและทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระดับแรงดันที่จุดต่อในระบบ ดังนั้นทำให้การต่อชุดควบคุมฮาร์มอนิกส์สำหรับโหดชนิดนี้เหมาะสมที่จะต่อตำแหน่งเดียวกับจุดที่ต่อโหด ซึ่งจะแตกต่างกับแบบที่ใช้กับมอเตอร์กระแสสลับซึ่งมีค่า DPF (Displacement Power Factor) ที่สูง

2.4 ผลกระทบเนื่องจากฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง [13]

ถ้าเราสามารถรู้ถึงข้อมูลแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์ และขนาดของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นแล้ว ดังนั้นข้อมูลที่ได้จะต้องถูกแปลงให้อยู่ในรูปของผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังและการทำงานของ

อุปกรณ์ภายในระบบ และจากนั้นอุปกรณ์ทุกตัวในระบบจะต้องถูกนำมาพิจารณาในเรื่องของความสัมพันธ์ของฮาร์มอนิกส์ เพื่อจะได้นำผลที่ได้ไปเป็นเกณฑ์สำหรับการแนะนำระดับของฮาร์มอนิกส์ ที่อุปกรณ์ต่างๆ นั้นจะต้องยอมรับได้ ผลกระทบที่สำคัญที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสและโวลต์เตจฮาร์มอนิกส์ ในระบบพอจะสรุปได้ดังนี้

2.4.1 ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อการเกิดเรโซแนนซ์ (Resonance Effect)

ตัวเก็บประจุที่ใช้ในการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ในระบบไฟฟ้า อาจเกิดการเรโซแนนซ์เฉพาะแห่งขึ้นซึ่งจะเป็นสาเหตุให้คาปาซิเตอร์ได้รับกระแสที่มากเกินไป และจะเป็นเหตุให้คาร์ปาซิเตอร์ได้รับความเสียหายได้

การเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ (Resonance) ที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ของฮาร์มอนิกส์ ในระบบไฟฟ้าโดยสามารถคำนวณได้จากสมการ [13]

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.10)$$

f_c : ความถี่เรโซแนนซ์ (Hz)

L : ค่าอินดักแตนซ์ในวงจรเรโซแนนซ์ (Henry)

C : ค่าคาปาซิแตนซ์ในวงจรเรโซแนนซ์ (Farad)

ซึ่งผลของการเรโซแนนซ์ก็จะทำให้ระดับของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ นั้นสูงขึ้นซึ่งจะส่งผลให้อุปกรณ์ในระบบเกิดความเสียหายโดยเฉพาะอย่างยิ่งชุดของคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ลักษณะการเรโซแนนซ์แบ่งได้เป็น 2 แบบหลักๆ คือ

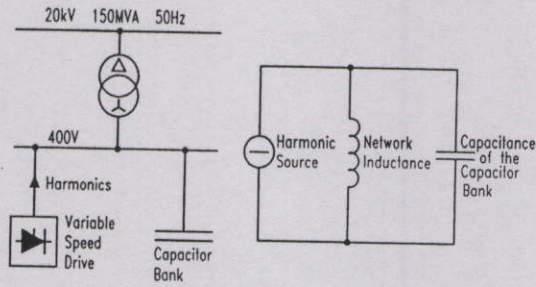
2.4.1.1 เรโซแนนซ์แบบขนาน : เรโซแนนซ์แบบขนานมักจะเกิดขึ้นระหว่างค่าความเหนี่ยวนำของระบบรวมกับของหม้อแปลงทางด้านอินพุตขนานกับคาปาซิเตอร์ที่ใช้ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 และผลของการ เรโซแนนซ์จะทำให้เกิดการขยายตัวของกระแสฮาร์มอนิกส์ในคาปาซิเตอร์ที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ตามสมการที่ 2.11 [1]

$$I_c = \frac{jX_L}{jX_L + (-jX_C)} I_h \quad (2.11)$$

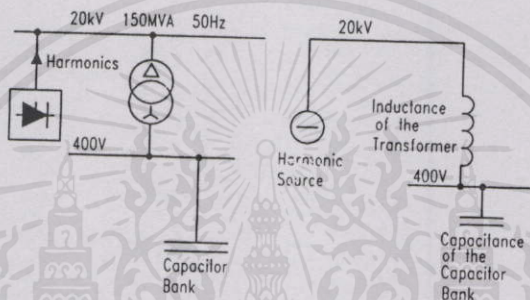
ซึ่งในทางปฏิบัติค่าของกระแสในสมการที่ 2.11 อาจมีการขยายตัวขึ้นไปถึงในช่วง 10-20 เท่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในทางอื่น อกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.2 เรโซแนนซ์แบบอนุกรม : เรโซแนนซ์แบบอนุกรมอาจเกิดขึ้นได้ในระบบที่มีลักษณะดังรูปที่ 2.8 ซึ่ง แสดงถึงการเรโซแนนซ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนำในหม้อแปลงทางด้านอิน

พหุกับคาปาซิเตอร์ที่ใช้แก้ค่าตัวประกอบกำลังซึ่งผลจากการเรโซแนนซ์จะทำให้กระแสและแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่คาปาซิเตอร์มีค่าสูงซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายขึ้นได้เช่นกัน

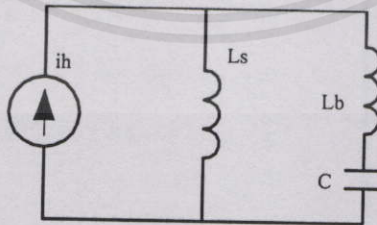


รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการเรโซแนนซ์แบบขนาน



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

จากปัญหาของปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ที่มีมักจะเกิดขึ้นกับระบบที่ต้องการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังโดยใช้ชุดตัวเก็บประจุ (Capacitor Banks) และมีโหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ต่ออยู่ด้วยทำให้วิธีในการปรับปรุงค่าตัวประกอบต้องเปลี่ยนจากเดิมที่ใช้ชุดของตัวเก็บประจุอย่างเดียวเป็นการต่อรีแอกแตนซ์อนุกรมเข้ากับชุดของตัวเก็บประจุเพื่อทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนห่างออกไปจากความถี่ของฮาร์โมนิกส์ในระบบซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การต่อรีแอกเตอร์ร่วมกับชุดตัวเก็บประจุ

ความถี่ในการเรโซแนนซ์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.12 ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_s + L_b)C}} \tag{2.12}$$

L_b : รีแอกเตอร์ที่ใช้คู่ร่วมกับชุดของตัวเก็บประจุ (Henry)

2.4.2 ทำให้เกิดความร้อนขึ้นในระบบไฟฟ้า (Heating Effect)

กระแสฮาร์มอนิกส์จะสร้างผลกระทบเนื่องจากกระแส 2 อย่างคือ

2.4.2.1 เพิ่มความสูญเสียของสายส่งจากการเพิ่มขึ้นจากค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสไฟฟ้า

2.4.2.2 เกิดแรงดันฮาร์มอนิกส์ตกคร่อมที่อิมพีแดนซ์ต่างๆ ในวงจร ดังนั้นระบบที่อ่อนแอ (weak system) จะเกิดการกระทบกระเทือนของแรงดันได้มากกว่าระบบที่แข็งแรง (stiff system) โดยระบบที่อ่อนแอ หมายถึงมีค่าอิมพีแดนซ์มากและมีระดับการฟอลท์ต่ำ ส่วนระบบที่แข็งแรงก็จะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ ในกรณีสายส่งเป็นระบบเคเบิล แรงดันฮาร์มอนิกส์ก็จะทำให้ความเครียดของฉนวนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสัดส่วนกับค่ายอดของรูปคลื่น จะทำให้อายุการใช้งานของสายเคเบิลสั้นลง และฮาร์มอนิกส์ยังมีผลกระทบต่อระดับการเกิดโคโรน่าด้วย

2.4.2.3 หม้อแปลงไฟฟ้า แรงดันฮาร์มอนิกส์จะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน ฮิสเตอร์รีซิสและความเครียดของฉนวน ส่วนกระแสฮาร์มอนิกส์ก็จะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียในทองแดง โดยเฉพาะในกรณีเป็นหม้อแปลงของคอนเวอร์เตอร์ เพราะว่าตัวหม้อแปลงจะไม่ได้รับประโยชน์จากฟลักเตอร์ ซึ่งปกติจะต่ออยู่ทางด้านไพรมารี

2.4.3 ผลกระทบต่ออายุการใช้งานของฉนวนไฟฟ้า (Insulator Effect)

ผลของแรงดันฮาร์มอนิกส์ ในระบบไฟฟ้าอาจจะทำให้ค่ายอดของสัญญาณแรงดันไฟฟ้า มีค่าเพิ่มสูงขึ้น จากระดับแรงดันปกติ ซึ่งเป็นผลให้ความเครียดของฉนวนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และผลของความร้อนที่เพิ่มขึ้นในฉนวน เนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกส์จะทำให้อายุการใช้งานของฉนวนที่ใช้ในระบบไฟฟ้างดงกล่าวลดลง

2.4.4 ผลกระทบที่ทำให้การทำงานของโรงจักรผิดพลาด (Mal-operation)

2.4.4.1 สวิตช์เกียร์ : ผลกระทบของกระแสฮาร์มอนิกส์อาจจะทำให้ di/dt ในจุดที่กระแสมีค่าเป็นศูนย์นั้น มีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้การทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดคอนวงจรทำได้ยากขึ้น

2.4.4.2 ฟิวส์ : กระแสฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง จะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ฟิวส์ ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุทำให้คุณสมบัติของการทำงานของฟิวส์ (time current characteristic) มีค่าเปลี่ยนแปลงไป

2.4.4.3 รีเลย์ในระบบป้องกัน : กระแสฮาร์มอนิกส์อาจจะทำให้หม้อแปลงกระแส ที่ใช้ร่วมกับคิสแตนท์รีเลย์ในระบบไฟฟ้ากำลังเกิดการอิ่มตัวขึ้นได้ ซึ่งจะทำให้การทำงานของรีเลย์ผิดพลาดไปจากที่ทำการเซ็ทค่าไว้ที่ความถี่หลักมูล และอีกตัวอย่างหนึ่งก็คือ ในกรณีการใช้คิฟเฟอร์เรนเซียลรีเลย์ในการป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งผลของ inrush current อาจจะทำให้รีเลย์ทำการปลดวงจรออกในขณะที่เริ่มจ่ายพลังงานให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจาก inrush current จะทำให้เกิดผลต่างระหว่างกระแสทางด้านเข้า และทางด้านออกของหม้อแปลงมีค่าสูง

2.4.4.4 เครื่องวัดทางไฟฟ้า : เครื่องวัดทางไฟฟ้าในแบบเข็มชี้หรือในแบบที่แสดงผลเป็นตัวเลขทั่วไป เช่น โวลท์มิเตอร์, แอมป์มิเตอร์, วัตต์มิเตอร์ อาจแสดงค่าที่ผิดพลาดจากที่เป็นจริงได้ เนื่องจากเครื่องวัดดังกล่าวมักถูกออกแบบให้ใช้วัดเฉพาะสัญญาณที่มีความถี่หลักมูล (50Hz) เท่านั้น โดยเมื่อสัญญาณมีลักษณะผิดเพี้ยนเนื่องจากฮาร์มอนิกส์จะต้องใช้เครื่องมือที่ระบุถึงความสามารถในการวัดฮาร์มอนิกส์ได้เท่านั้น เช่น TRUE RMS, Harmonic Analyzer (สำหรับฮาร์มอนิกส์อันดับที่เป็นจำนวนเต็ม) และ Spectrum Analyzer (สำหรับฮาร์มอนิกส์อันดับทั้งที่เป็นและไม่เป็นจำนวนเต็ม)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

คุณสมบัติในการตอบสนองของระบบ (System Response Characteristics)

3.1 รายละเอียดโดยทั่วไป

โดยทั่วไปลักษณะของผลกระทบเนื่องจากฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติในการตอบสนองของระบบซึ่งสัมพันธ์กับองค์ประกอบหลายๆส่วนในระบบ โดยแรงดันฮาร์มอนิกส์ในระบบที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ และค่าอิมพีแดนซ์ของระบบในแต่ละความถี่ของฮาร์มอนิกส์ [2]

3.1.1 ค่ากระแสลัดวงจรของระบบ (System Short Circuit Capacity)

ค่ากระแสลัดวงจรของระบบเป็นค่าที่แสดงถึงอิมพีแดนซ์ของระบบที่ความถี่หลักมูล โดยในระบบที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ ค่ากระแสลัดวงจรของระบบก็จะมีค่าสูง ซึ่งทำให้แรงดันฮาร์มอนิกส์ในระบบมีค่าต่ำซึ่งเรียกระบบที่มีลักษณะดังกล่าวว่า Stiffer System, ส่วนในระบบที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง ค่ากระแสลัดวงจรของระบบก็จะมีค่าต่ำ ซึ่งทำให้แรงดันฮาร์มอนิกส์ในระบบมีค่าสูงซึ่งเรียกระบบที่มีลักษณะดังกล่าวว่า Weaker System

3.1.2 คาปาซิเตอร์ของชุดคาปาซิเตอร์และในสายตัวนำ (Capacitor Bank and Insulated Cable)

คาปาซิเตอร์แบบคั่นนิยมต่อในระบบเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง และควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบ, การต่อคาปาซิเตอร์ในระบบอาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการเรโซแนนซ์ระหว่างคาปาซิเตอร์ดังกล่าวกับอินดักเตอร์ในระบบโดยจะมีผลให้ฮาร์มอนิกส์ในระบบมีค่าสูงขึ้นซึ่งสามารถพิจารณาได้จากผลตอบสนองทางความถี่ของอิมพีแดนซ์ในระบบ, ส่วนคาปาซิเตอร์แฝงที่เกิดระหว่างสายตัวนำแบบหุ้มฉนวน (โดยเฉพาะการเดินสายแบบใต้ดิน) โดยทั่วไปจะเป็นแพคเคอร์ที่จะมีผลต่อการตอบสนองทางความถี่ของอิมพีแดนซ์ในระบบ

3.1.3 คุณสมบัติของโหลด (Load Characteristic)

คุณสมบัติของโหลดมีผลต่อการตอบสนองทางความถี่ของอิมพีแดนซ์ในระบบ 2 ลักษณะคือ โหลดที่เป็นตัวต้านทาน (Resistive Loads) จะมีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์โดยรวมของระบบที่ความถี่ต่างๆ และโหลดแบบตัวเหนี่ยวนำ (Inductive Loads) จะมีผลต่อการเลื่อนไปของความถี่เรโซแนนซ์ในระบบเนื่องจากต่ออยู่ในลักษณะที่ขนานอยู่กับอิมพีแดนซ์ของระบบเมื่อพิจารณาจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์

3.1.4 สภาวะของระบบแบบสมดุลย์และไม่สมดุลย์ (Balanced vs. Unbalance System Condition)

ในการวิเคราะห์ถึงปัญหาฮาร์มอนิกส์ระบบโดยทั่วไปมักจะต้องการการวิเคราะห์ที่อยู่ 2 ลักษณะคือ ผลการตอบสนองทางความถี่ของอิมพีแดนซ์ในระบบ และปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆของระบบ

แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาฮาร์มอนิกส์ในระบบโดยปกติจะเป็นแบบ 1 เฟส ยกเว้นในกรณีที่สำคัญเช่น เกิดความไม่สมดุลย์ของอิมพีแดนซ์ระบบ, โหลดที่ใช้ในระบบ และแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ ซึ่งจำเป็นจะต้องใช้แบบจำลองแบบ 3 เฟส, ซึ่งแบบจำลองที่จะใช้ในการวิเคราะห์สำหรับระบบจำหน่ายและระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมจะเป็นรายละเอียดเฉพาะในส่วนด้านแรงดันต่ำ และเป็นการประมาณค่าอิมพีแดนซ์ระบบแบบง่าย เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์, ในสภาวะแบบสมดุลย์ฮาร์มอนิกส์ในแต่ละอันดับจะมีคุณสมบัติเกี่ยวกับลำดับที่แตกต่างกันซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเกี่ยวกับลำดับที่แตกต่างกัน

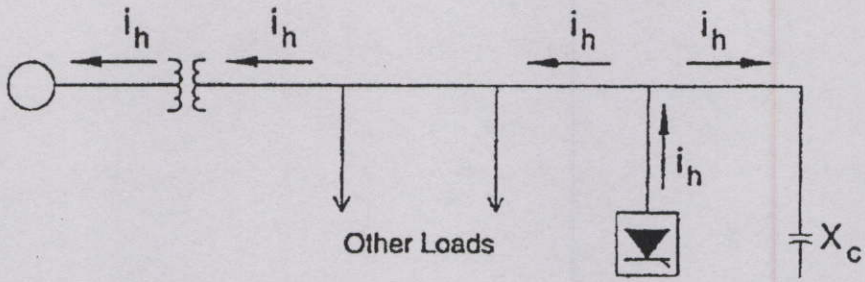
Harmonic Order	Frequency Hz	Sequence Network	Stator Harmonic	Harmonic Rotation	Rotor Harmonic
1	60	+	1	Forward	—
5	300	-	5	Backward	6
7	420	+	7	Forward	6
11	660	-	11	Backward	12
13	780	+	13	Forward	12
17	1020	-	17	Backward	18
19	1140	+	19	Forward	18
23	1380	-	23	Backward	24
25	1500	+	25	Forward	24

3.2 สภาวะเรโซแนนซ์ (Resonance Condition)

การเกิดเรโซแนนซ์ขึ้นในระบบไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อปริมาณฮาร์มอนิกส์ในระบบ ในทางปฏิบัติเรโซแนนซ์แบบขนานเป็นแบบที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งและมีความสำคัญกล่าวคือ จะเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ขยายตัว (Amplification) ขึ้นสูงซึ่งมีผลให้ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกส์มีปริมาณสูงตามไปด้วย

3.2.1 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ปกติในระบบ (Normal Flow of Harmonic Current)

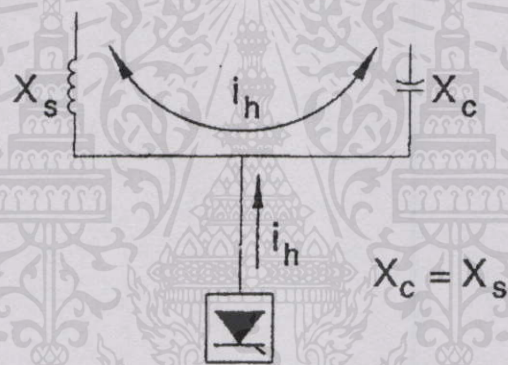
เมื่อเกิดกระแสฮาร์มอนิกส์ขึ้นในระบบทางเดินในการไหลส่วนใหญ่ของกระแสดังกล่าวก็จะต้องไปในทางเดินที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.1 จะเห็นว่าทางเดินที่ค่าอิมพีแดนซ์ต่ำที่สุดนั้นปกติก็คือการไหลไปยังแหล่งจ่ายแรงดัน และสำหรับฮาร์มอนิกส์ที่มีความถี่สูงๆก็มักจะไหลผ่านคาปาซิเตอร์ที่ต่ออยู่ในระบบ



รูปที่ 3.1 ทางเดินปกติของกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบ

3.2.2 เรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance)

จากรูปที่ 3.2 กระแสฮาร์มอนิกส์ที่มีความถี่ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ขนาน ($X_s = X_c$) จะขยายตัวและไหลวน (Oscillate) ระหว่างคาปาซิเตอร์และอินดักเตอร์ในทางเดินของวงจรขนาน ทำให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกส์ตกคร่อมอุปกรณ์ในระบบมีค่าสูง



รูปที่ 3.2 เรโซแนนซ์แบบขนาน

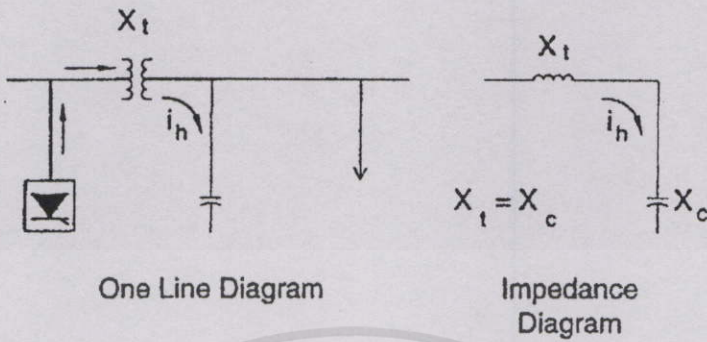
3.2.3 เรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series Resonance)

กระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบที่มีความถี่ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์อนุกรมระหว่างอินดักแตนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้ากับคาปาซิเตอร์ในระบบ จะเห็นค่าอิมพีแดนซ์รวมดังกล่าวมีค่าต่ำซึ่งลักษณะดังกล่าวคล้ายกับหลักการของตัวกรองฮาร์มอนิกส์แบบผ่านความถี่เดียว (Single Tuned Filter) ผลที่เกิดขึ้นตามมาก็คือปริมาณฮาร์มอนิกส์แรงดันที่อินดักแตนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า และคาปาซิเตอร์ในระบบจะมีค่าสูงซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.3

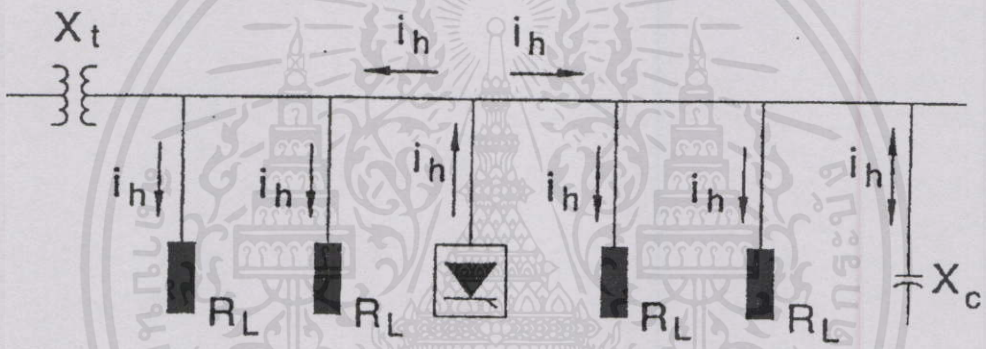
3.3 ผลกระทบเนื่องจากโหลดที่ต่ออยู่ในระบบ (Effect of System Loading)

โหลดที่ต่ออยู่ในระบบโดยส่วนใหญ่จะไม่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนองทางความถี่ของอิมพีแดนซ์ในระบบมากนักยกเว้นในช่วงความถี่ที่ใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิกส์ในระบบ โดยองค์

ประกอบของระบบที่เห็นจากการมองผ่านขดลวดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านอินพุท แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 เรโซแนนซ์แบบอนุกรม



รูปที่ 3.4 องค์ประกอบของระบบที่เห็นจากการมองผ่านขดลวดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านอินพุท

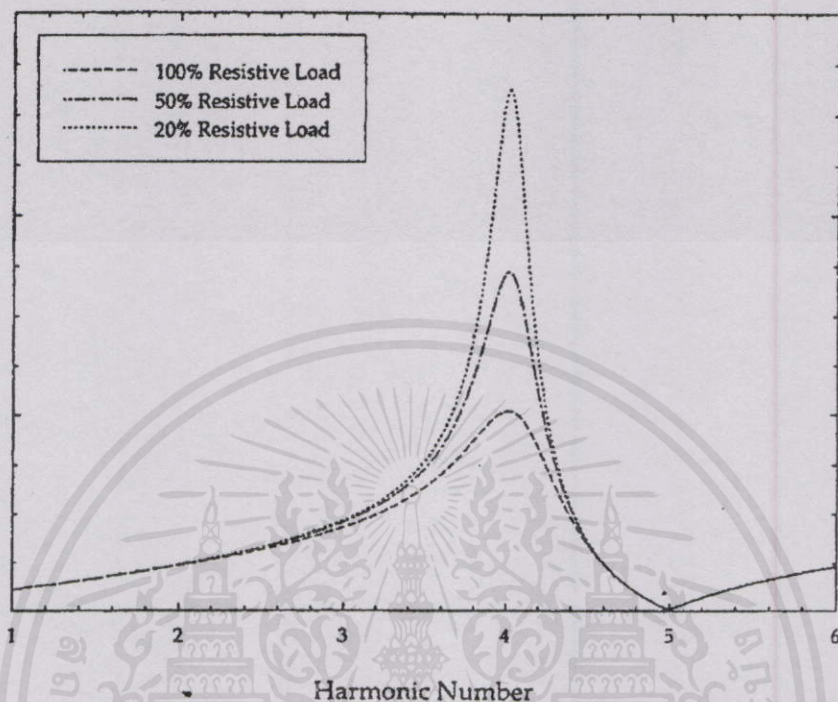
3.3.1 หม้อแปลงลดระดับแรงดันไฟฟ้า (The Step Down Transformer)

วงจรสมมูลย์ของหม้อแปลงไฟฟ้าจะถูกแสดงด้วยค่าความต้านทานภายในขดลวด (Winding Resistance) อนุกรมกับค่ารีแอกแตนซ์เนื่องจากฟลักซ์รั่วไหล (Leakage Reactance) ที่ความถี่ของฮาร์โมนิกส์มีค่าต่ำๆ ค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงก็จะมีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดในระบบ และในทางกลับกันค่ารีแอกแตนซ์จะมีค่าสูงขึ้นที่ความถี่ของฮาร์โมนิกส์ในระบบมีค่าสูงๆ ดังนั้นจะเห็นว่าหม้อแปลงจะทำหน้าที่เหมือนการแยกโหลดออกจากระบบที่ความถี่สูง

3.3.2 องค์ประกอบส่วนที่เป็นความต้านทาน (The Resistive Component)

โดยปกติแล้ว โหลดแบบตัวต้านทานทั่วไปไม่ใช่ทางเดินหลักของกระแสฮาร์โมนิกส์แต่จะเป็นทางเดินของกระแสฮาร์โมนิกส์ในกรณีเกิดเรโซแนนซ์ขนานในระบบ, ซึ่งถ้าโหลดแบบตัวต้านทานที่ต่ออยู่ในระบบมีพิกัดกำลังสูงจะมีผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์รวมของระบบที่ความถี่ใกล้เคียงความถี่เร

โซแนนซ์แบบขนานมีค่าต่ำ, รูปที่3.5 แสดงถึงความสัมพันธ์ของผลตอบสนองทางความถี่ของระบบที่พิกัดต่างๆของโหลดแบบตัวต้านทาน



รูปที่3.5 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบที่พิกัดต่างๆของโหลดแบบตัวต้านทาน

3.3.3 องค์ประกอบส่วนที่เป็นมอเตอร์ (The Motor Component)

วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์มักถูกแทนด้วยค่ารีแอกแตนซ์อนุกรม, องค์ประกอบของโหลดที่สำคัญในระบบส่วนที่เป็นมอเตอร์ โดยปกติจะมีผลต่อคุณสมบัติในการตอบสนองรวมของระบบไม่มาก เว้นแต่ในกรณีที่ระบบอยู่ใกล้กับสภาวะเรโซแนนซ์แบบขนาน โดยตัวเหนี่ยวนำจะมีผลต่อการเลื่อนค่าความถี่เรโซแนนซ์เนื่องจากค่ออยู่ในลักษณะขนานกับอิมพีแดนซ์ของระบบ ในส่วนของโหลดที่เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าโดยปกติมักจะแทนด้วยค่า Sub-transient Reactance หรือในกรณีของมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำอาจใช้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการทดสอบแบบบล็อกโรเตอร์, ในรูปแบบการสร้างแบบจำลองอย่างง่ายจะพิจารณาเฉพาะโหลด (ทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น) ที่มีขนาดใหญ่เช่น มอเตอร์ที่มีขนาดมากกว่า 25 แรงม้า

3.4 ระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรม (Industrial System)

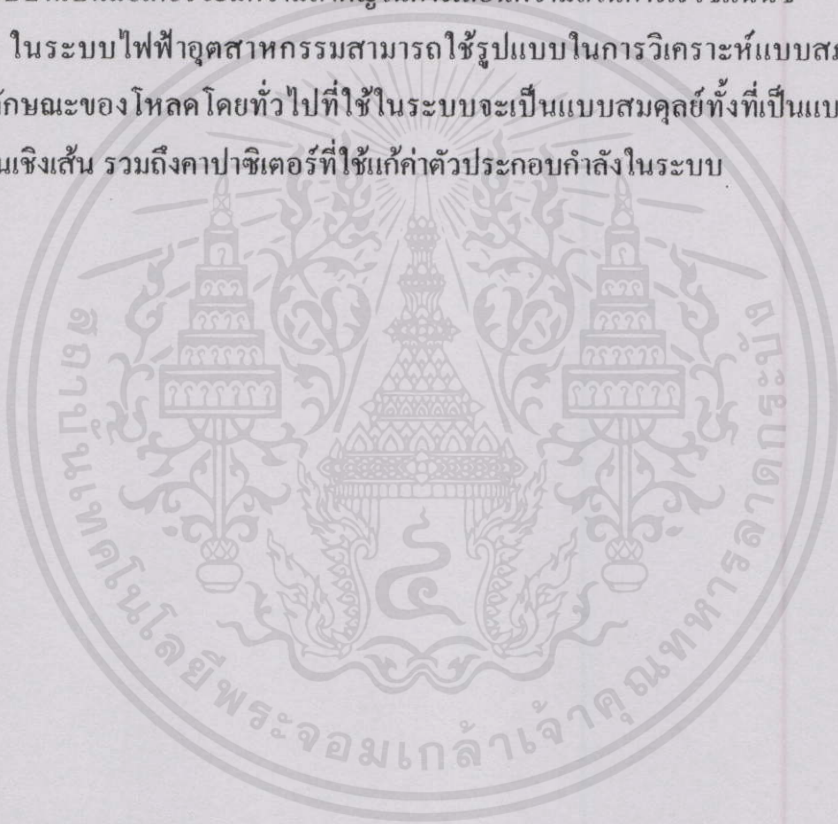
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมมีความคล้ายคลึงกับระบบจำหน่ายขนาดเล็ก โดยมีความแตกต่างกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่สำคัญคือ

3.4.1 คุณสมบัติของอิมพีแดนซ์ในการตอบสนองต่อความถี่ของระบบจะขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์หลักคือคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่ในระบบ และค่ารีแอคแตนซ์ลัคขจรของระบบ, ความถี่เรโซแนนท์ในระบบจะอยู่ในช่วงความถี่ของฮาร์โมนิกส์อันดับต่ำๆซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าตัวประกอบกำลังของระบบ และอิมพีแดนซ์ของสายค่านำในระบบมักไม่นำมาประกอบการพิจารณา

3.4.2 โหลดหลายๆที่สำคัญที่ต่ออยู่ในระบบจะเป็นโหลดชนิดไม่เป็นเชิงเส้น เช่น ชุดเรกติไฟลด์เออร์, เตาลอมแบบอาร์ค และชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์

3.4.3 ในระบบมักจะประกอบไปด้วยโหลดแบบตัวต้านทานไม่มากซึ่งทำให้คุณสมบัติในการหน่วง (Damping) ต่ำ ดังนั้นจึงทำให้ฮาร์โมนิกส์ที่อยู่ใกล้ความถี่เรโซแนนซ์มีปริมาณสูงมาก โดยโหลดในแบบที่เป็นมอเตอร์จะมีความสำคัญในการเลื่อนความถี่ในการเรโซแนนซ์

3.4.4 ในระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมสามารถใช้รูปแบบในการวิเคราะห์แบบสภาวะสมดุลย์, เนื่องจากลักษณะของโหลดโดยทั่วไปที่ใช้ในระบบจะเป็นแบบสมดุลย์ทั้งที่เป็นแบบเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้น รวมถึงคาปาซิเตอร์ที่ใช้แก้ค่าตัวประกอบกำลังในระบบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

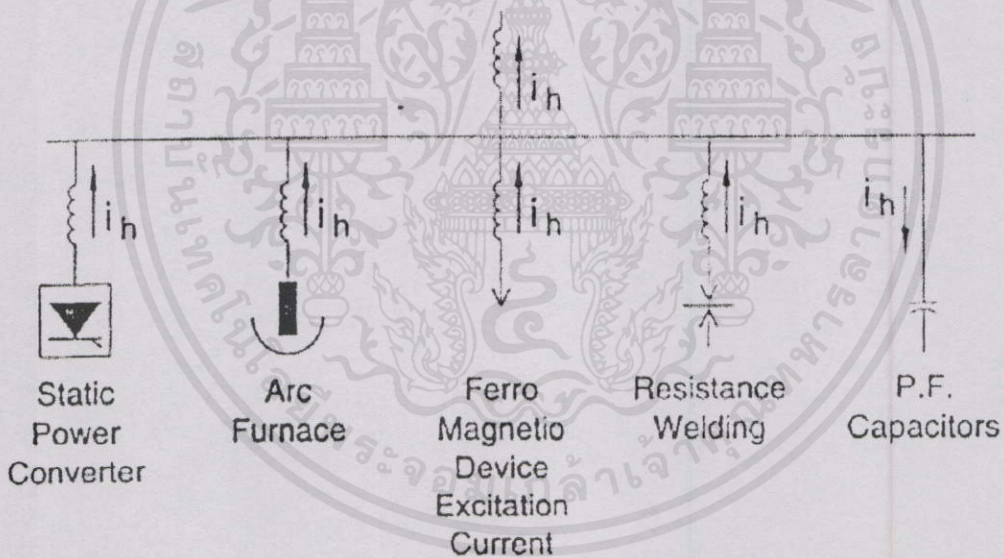
วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์

(Analysis Method)

ในการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณฮาร์มอนิกส์ในจุดต่างๆของระบบจำเป็นต้องทราบข้อมูลที่สำคัญในระบบคือ คุณสมบัติของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ในระบบ และคุณสมบัติในการตอบสนองทางความถี่ของอิมพีแดนซ์ในระบบ [2]

4.1 การคำนวณค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ (Harmonic Current Calculation)

ในการวิเคราะห์ระบบนั้นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบส่วนใหญ่สามารถแสดงด้วยแหล่งจ่ายกระแสสลับแบบคงที่ (Ideal Current Source) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบ

จากข้อสมมุติดังกล่าวเป็นการแสดงถึงกรณีสภาวะแรงดันไฟฟ้าของระบบไม่มีการผิดเพี้ยน ซึ่งในการวิเคราะห์สำหรับโหลดไม่เป็นเชิงเส้นโดยมากนั้น ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะมีความถูกต้องอย่างมากเมื่อค่าผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงถึง 10%

แหล่งกำเนิดของฮาร์มอนิกส์สามารถจัดเป็นกลุ่มได้โดยทั่วไป 3 กลุ่มคือ

4.1.1 โหลดแบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

4.1.2 อุปกรณ์ประเภทอาร์ค

4.1.3 อุปกรณ์ประเภทแม่เหล็ก

ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นของโหลดประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลังสามารถทำการวิเคราะห์ได้ แต่สำหรับโหลดแบบอุปกรณ์ประเภทอาร์คและอุปกรณ์ประเภทแม่เหล็ก โดยทั่วไปมักจะต้องใช้ตัวอย่างของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจริง

4.2 การคำนวณผลการตอบสนองทางความถี่ของระบบ (System Frequency Response Calculations)

เมื่อเราทราบถึงข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของฮาร์มอนิกส์แล้วข้อมูลที่ควรพิจารณาต่อคือผลการตอบสนองทางความถี่ของระบบที่มีต่อแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์, พารามิเตอร์ที่สำคัญในระบบที่ต้องใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อการคำนวณคือ

4.2.1 ค่าอิมพีแดนซ์ลัดลงจรของระบบ (System Short Circuit Equivalent Impedance)

4.2.2 คาปาซิเตอร์สำหรับปรับค่าตัวประกอบกำลัง (Capacitor Banks)

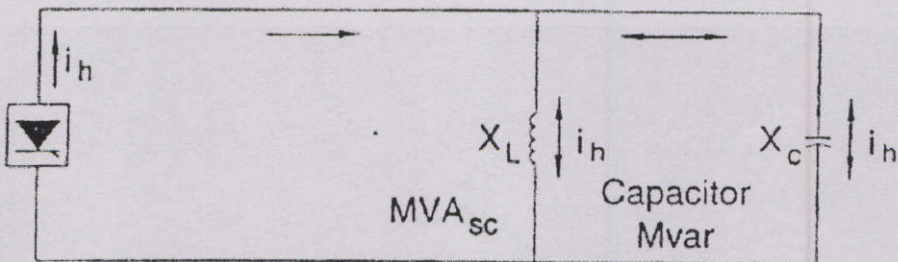
4.2.3 คุณสมบัติของสายตัวนำที่ใช้ในระบบ (Lines and Cables on the System)

4.2.4 คุณสมบัติของโหลดในระบบ (Load Characteristics)

รูปแบบในการคำนวณปริมาณฮาร์มอนิกส์ในระบบสามารถใช้การคำนวณอย่างง่ายโดยคำนวณมือสำหรับระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมและระบบจำหน่ายที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน, และคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งมีข้อดีกว่าในการแสดงถึงการวิเคราะห์ระบบที่หลายๆความถี่ของฮาร์มอนิกส์พร้อมกัน

4.3 การคำนวณอย่างง่าย (Simple Calculation)

การคำนวณอย่างง่ายมักจะใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาลักษณะดังในรูปที่ 4.2 ซึ่งพบได้โดยมากในระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมซึ่งมักจะมีการใช้งานคาปาซิเตอร์อยู่ในระบบ



รูปที่ 4.2 การคำนวณปริมาณฮาร์มอนิกอย่างง่าย

สิ่งสำคัญที่วิเคราะห์ได้จากวงจรดังกล่าวคือความถี่ โชนแนนซ์ในระบบซึ่งคำนวณได้จากสมการ [2]

$$h_r = \sqrt{\frac{MVA_{sc}}{M \text{ var}_{cap}}} = \frac{X_C}{X_{sc}} \quad (4.1)$$

- h_r : ความถี่เรโซแนนซ์ คิดเป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล
 MVA_{sc} : พิกัดกำลังลัดวงจรที่จุดศึกษาปริมาณฮาร์มอนิกส์
 $M \text{ var}_{cap}$: พิกัดคาปาซิเตอร์ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบ
 X_C : ค่าคาปาซิทีฟ-รีแอกแตนซ์ที่ความถี่หลักมูล
 X_{sc} : ค่ารีแอกแตนซ์ลัดวงจรของระบบ

ในกรณีที่ผลการคำนวณค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่มีค่าสอดคล้องกับฮาร์มอนิกส์หลักในระบบควรมีการพิจารณาป้องกันหรือแก้ไขปัญหาที่จะตามมา, ขั้นตอนถัดไปคือการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ซึ่งคำนวณได้จาก [2]

$$Z(\omega) = \frac{R + j\omega L}{1 - \omega^2(LC) + j\omega RC} \quad (4.2)$$

โดยแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์สามารถคำนวณได้จาก [2]

$$V_h = I_h \times Z_h \quad (4.3)$$

และพารามิเตอร์ที่ควรจะคำนวณอีกค่าหนึ่งคือ %Total Harmonic Distortion (%THD)

4.4 การจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Simulation)

ในกรณีที่ระบบที่ต้องการวิเคราะห์มีลักษณะยุ่งยากซับซ้อนกว่าระบบในหัวข้อ 4.3 การวิเคราะห์ระบบด้วยคอมพิวเตอร์จะมีความเหมาะสมมากกว่า โดยคอมพิวเตอร์สามารถวิเคราะห์ระบบได้ดังนี้คือ

4.4.1 การหาผลตอบสนองทางความถี่ของระบบ (Frequency Scan for System Response)

4.4.2 ผลการตอบสนองต่อแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์หลายๆชุด (Response to Multiple Harmonic Source)

4.4.3 การวิเคราะห์ระบบในกรณีหลายเฟสและกรณีระบบไม่สมดุลย์ (Multiphase and Balance System Solutions)

วิธีที่นิยมใช้โดยส่วนใหญ่ที่ใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ในระบบคือการวิเคราะห์ Admittance Matrix ของระบบที่ความถี่หลายๆค่า, ในกรณีนี้จะใช้แบบ

จำลองในการแทนโพลคแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยแหล่งจ่ายกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าแบบอุดมคติที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ โดยอิมพีแดนซ์ส่วนต่างๆในระบบที่ขึ้นอยู่กับความถี่ควรจะถูกนำมาพิจารณาด้วย แม้ว่าจะอยู่บนข้อสมมุติว่ามีลักษณะเป็นเชิงเส้น, อีกวิธีหนึ่งในการวิเคราะห์ระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์คือการวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิกส์ในระบบ (Load Flow) วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ Newton-Raphson Iterative Method ซึ่งใช้วิเคราะห์ได้สำหรับระบบที่มีความสมดุลง่ายๆ และโดยทั่วไปมักเป็นการวิเคราะห์ในระบบสายส่งมากกว่าที่จะเป็นในระบบจำหน่าย

4.5 การสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ (Model Guidelines for Harmonic Analysis)

ในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่าจุดยากของงานดังกล่าว คือพารามิเตอร์ที่มีความเกี่ยวข้องกับการตอบสนองของระบบมีจำนวนมาก แต่อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์หลักจำเป็นจะต้องใช้ในแบบจำลองเพื่อการวิเคราะห์

4.5.1 ความยุ่งยากทั้งหมดในการทำแบบจำลอง (Overall Modeling Complexity)

ในระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรม และระบบจำหน่ายรายละเอียดของแบบจำลองที่ต้องการใช้จะเป็นเฉพาะรายละเอียดทางด้านแรงดันค่าของหม้อแปลงเท่านั้น โดยส่วนต่างๆในระบบที่มีความสำคัญเกี่ยวกับการวิเคราะห์คือ อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าโดยทั่วไปจะพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการทดสอบแบบลัดวงจรก็เพียงพอเนื่องจากเป็นค่าหลักของอิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุท, อิมพีแดนซ์ของทุกบัสที่มีการต่อคาปาซิเตอร์ รวมถึงคาปาซิเตอร์ที่ต่ออยู่ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง เนื่องจากจะมีลักษณะเหมือนตัวกรองฮาร์มอนิกส์เมื่อพิจารณาจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์, อิมพีแดนซ์ที่บัสที่มีโพลขนาดใหญ่ออกอยู่ และอิมพีแดนซ์ระหว่างสายตัวนำที่มีลักษณะที่ยาวมากๆ

4.5.2 การเปรียบเทียบแบบจำลองแบบ 1 เฟส กับแบบ 3 เฟส (Three Phase vs. Single Phase System Models)

แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาฮาร์มอนิกส์ในระบบโดยปกติจะเป็นแบบ 1 เฟส (Positive Sequence System Model) ยกเว้นในกรณีที่สำคัญคือ เป็นการศึกษาถึงผลกระทบต่อระบบสื่อสารซึ่งต้องพิจารณาองค์ประกอบลำดับศูนย์, การใช้คาปาซิเตอร์ในระบบแบบ 1 เฟส, เกิดความไม่สมดุลย์ของอิมพีแดนซ์ระบบหรือโพลคแบบไม่เป็นเชิงเส้น และกรณีมีการพิจารณาถึงผลกระทบเนื่องจากฮาร์มอนิกส์แบบ Triplen ซึ่งจำเป็นจะต้องใช้แบบจำลองแบบ 3 เฟส

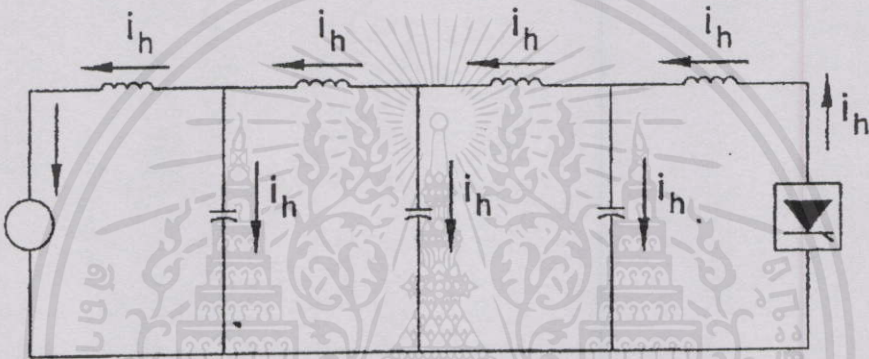
4.5.3 แบบจำลองของมอเตอร์และเครื่องจักรกลไฟฟ้า (Motor & Machine Models)

แบบจำลองของโพลคที่เป็นมอเตอร์และเครื่องจักรกลไฟฟ้ามักจะแทนด้วยค่า Sub Transient Reactance ของตัวอุปกรณ ซึ่งปกติจะเป็นค่าเฉลี่ยของรีแอกแตนซ์ 2 ส่วนคือ Direct axis กับ Quadrature โดยในกรณีของมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำถ้าไม่สามารถหาค่ารีแอกแตนซ์ดังกล่าวได้อาจ

ใช้อิมพีแดนซ์ในส่วนที่ได้จากการทดสอบแบบลอคโรเตอร์ หลักพื้นฐานที่สำคัญประการหนึ่งก็คือ ในกรณีมอเตอร์ขนาดใหญ่ควรจะใช้แบบจำลองที่มีค่าความถูกต้องมากกว่า

4.5.4 แบบจำลองของสายตัวนำในระบบ (Line and Cable Models)

ในกรณีที่พิจารณาองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่ต่ำและ/หรือเป็นสายส่งระยะสั้น แบบจำลองที่เหมาะสมจะใช้เป็นแบบอิมพีแดนซ์อนุกรมอย่างง่าย และในกรณีพิจารณาฮาร์มอนิกส์ตั้งแต่อันดับที่ 25 ขึ้นไป ควรจะคำนึงถึงผลของคาปาซิแตนซ์ระหว่างสายตัวนำประกอบด้วย, ในกรณีของสายตัวนำในระบบสายส่ง (Transmission Line) ผลของการทรานส์โพสิชันและคาปาซิแตนซ์ระหว่างสายจะนำมาประกอบการพิจารณาเพื่อความถูกต้องมากขึ้นซึ่งแสดงดังรูปที่4.3



รูปที่4.3 การคำนึงถึงผลของคาปาซิแตนซ์ระหว่างสายตัวนำ

4.5.5 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Models)

ในส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าอิมพีแดนซ์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่เกิดจากฟลักซ์รั่วไหล (Leakage Impedance) และส่วนที่เกิดจากการสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetizing Impedance) โดยส่วนที่เป็นส่วนสำคัญที่ใช้วิเคราะห์ในแบบจำลองโดยทั่วไปจะใช้เฉพาะในส่วนรีแอกแตนซ์เนื่องจากฟลักซ์รั่วไหล (Leakage Reactance), ในส่วนของความต้านทานจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของฮาร์มอนิกส์ ในทางปฏิบัติมักจะสมมุติให้ค่าอัตราส่วนของรีแอกแตนซ์และความต้านทาน มีค่าคงที่ในหลักสิบ ในแต่ละความถี่ของฮาร์มอนิกส์ เช่นหม้อแปลงที่สายส่งจะมีค่าอยู่ในช่วง 20-30 และหม้อแปลงในระบบจำหน่ายจะมีค่าอยู่ในช่วง 5-10, ถ้าในกรณีที่ต้องการพิจารณาถึงผลของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากหม้อแปลงแบบจำลองที่ใช้จะมีส่วนที่เป็นการสร้างสนามแม่เหล็ก ซึ่งอาจแสดงด้วยแหล่งจ่ายกระแสแบบอุดมคติ, และในส่วนของการต่อหม้อแปลง 3 เฟสแบบต่างก็จะมีผลต่อฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นเช่นการต่อหม้อแปลงแบบเดลต้าวายก็จะมีผลต่อฮาร์มอนิกแบบ Triplen หรือ องค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์ โดยจะทำให้เกิดการแยกทางเดินของกระแสฮาร์มอนิกส์ออกไม่ให้ไหลผ่านจากระดับแรงดันหนึ่งไปสู่ีกระดับแรงดันที่ต่อถัดไป

4.5.6 แบบจำลองของโหลดในระบบ (Load Models)

ส่วนของโหลดที่มีความสำคัญที่ควรจะนำมาพิจารณาคือ

4.5.6.1 หม้อแปลงปรับลดระดับแรงดัน

4.5.6.2 ส่วนของโหลดที่เป็นค่าความต้านทาน

4.5.6.3 ส่วนของโหลดที่เป็นมอเตอร์

โดยทั่วไปโหลดที่ต่ออยู่ในระบบมักมีผลกระทบต่อผลตอบสนองทางความถี่ของระบบไม่มากนักในกรณีที่ระบบอยู่ในสภาวะเรโซแนนซ์ ซึ่งผลกระทบดังกล่าวเนื่องจากโหลดในระบบจะมีอยู่ 2 ลักษณะคือ Damping เนื่องจากค่าความต้านทานซึ่งจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดของระบบมีค่าต่ำลง และผลของการเลื่อนความถี่ในการเรโซแนนซ์เนื่องจากค่ารีแอกแตนซ์

4.5.7 การคำนวณค่าความเหนี่ยวนำของแหล่งจ่ายแรงดัน และของหม้อแปลง สำหรับแรงดัน

600 โวลต์ และต่ำกว่า (Calculation of Source Inductance and Transformer

Reactance)

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบ Dry Type ที่ใช้สำหรับจ่ายให้กับชุดคอนเวอร์เตอร์ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าช่วงนี้จะมีค่ารีแอกแตนซ์ใกล้เคียงกับค่าความต้านทานเมื่อพิจารณาคุณสมบัติในช่วงคอนมิตเวตชั่นซึ่งสามารถคำนวณค่าอินดักแตนซ์ได้จากสมการที่ 4.4 [2]

$$\text{Transformer Inductance} = \frac{X}{\sqrt{2} \times (2\pi f)} \times \frac{E_L}{\sqrt{3}I_1} \quad (4.4)$$

X = ค่าเปอร์ยูนิตของค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่เนมเพลท

EL = พิกัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย

II = พิกัดกระแสไฟฟ้า

f = ความถี่แรงดันไฟฟ้าของระบบ

4.5.8 การคำนวณค่ารีแอกแตนซ์ของสายตัวนำ (Calculation of Line Inductance)

ตัวอย่างค่ารีแอกแตนซ์ของสายต่อเฟสในระบบกระแสสลับแบบ 3 เฟส คือ 0.3mH/ฟุต หรือ 1μH/m

4.5.9 ค่าแดมปีงแฟกเตอร์ของระบบ (System Damping Factor)

ในการคำนวณค่า แดมปีงแฟกเตอร์ และความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ของระบบนั้น อาจไม่จำเป็นต้องพิจารณาถึงค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงในระบบจำหน่าย เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ในหม้อแปลงของชุดเรกติไฟเลอร์รวมกับอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำมักจะมีค่ามากกว่า ในวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้คือ [2]

$$Damping_factor = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \tag{4.5}$$

$$Natural_frequency = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \tag{4.6}$$

สำหรับในระบบแรงดันต่ำเมื่อความถี่ต่ำกว่า 2100 Hz (อันดับที่ 35 ของระบบ 60 Hz) ค่าแอมป์นิ่งแฟลคเตอร์ควรมีค่ามากกว่า 0.5 โดยถ้าความถี่มีค่าสูงขึ้นกว่าอันดับที่ 35 ควรพิจารณาผลของความต้านทานที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากผลของ Skin Effect

4.5.10 การคำนวณค่าตัวประกอบกำลังแบบดิสเพลสเม้นท์ (Displacement Power Factor Improvement Calculation)

ปัญหาที่เกิดขึ้นสำหรับการใช้งานชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้คอนเวอร์เตอร์แบบที่ใช้ไทรสเตอร์คือ ค่าตัวประกอบกำลังจะไม่คงที่โดยจะแปรเปลี่ยนไปตามความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ (อาจมากกว่า 100%) ดังนั้น การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังจึงไม่สามารถใช้คาปาซิเตอร์เพียงค่าเดียวในการต่อกับชุดควบคุมตัวกล่วเพื่อให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าคงที่ได้ ซึ่งจะแตกต่างกับคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ไดโอดคู่ร่วมกับคาปาซิเตอร์ทางด้านเอาต์พุท

อย่างไรก็ดีกลุ่มของโหลดชนิดดังกล่าวอาจทำให้เกิดลักษณะของความต้องการกำลังงานรีแอกทีฟในรูปแบบที่เป็นอันเดียวกัน ข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดกำลังงานไฟฟ้าโดยเฉพาะจากผู้ผลิตไฟฟ้าที่เรียกเก็บเงินจะเป็นตัวช่วยในการออกแบบอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังแบบค่าเดียวคงที่ให้มีความเหมาะสมในการทำงานรวมถึงในแง่ของการลงทุน

ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของ โหลดแต่ละตัวในการทำงานแต่ละแบบอาจถูกรวบรวมและนำมาวิเคราะห์การทำงานโดยรวมทั้งหมดเพื่อที่จะใช้ในการออกแบบค่ากำลังงานรีแอกทีฟที่เหมาะสมในการชดเชยให้กับระบบดังกล่าว, ตัวอย่างของข้อมูลทางไฟฟ้าที่วัดได้ของระบบไฟฟ้าตัวอย่างแสดงไว้ดังนี้คือ

มอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ

1200 kW @ 0.80 PF = 900 kvar

900kW @ 0.70 PF = 918 kvar

ชุดควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบใช้ไทรสเตอร์

600 kW @ 0.70 PF = 612 kvar

1100kW @ 0.50 PF = 1902 kvar

โหลดอื่น ๆ

เอกสารที่ส่งงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด 1300 kW ทั้ง @ 0.90 PF = 630 kvar ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวม

5100kW @ 0.716 PF = 4965 kvar

จากข้อมูลค่าตัวประกอบกำลังเดิมคือ 0.7165 และต้องการที่จะปรับค่าตัวประกอบกำลังเป็น 0.95 (ขึ้นอยู่กับบิลที่เรียกเก็บเงินซึ่งอาจทำให้ค่าที่เหมาะสมคือ 1.0 PF), โดยค่ากำลังงานที่ต้องใช้ในการชดเชยด้วยคาปาซิเตอร์คือ 3289kvar ซึ่งขนาดของคาปาซิเตอร์ที่หาได้ตามมาตรฐานคือ 3300kvar, จากการคำนวณจะพบว่าถ้าต่อคาปาซิเตอร์ดังกล่าวใช้งานที่บัสระดับแรงดัน 4160 โวลต์ และถ้าพิกัดกำลังลัดวงจรของระบบเท่ากับ 80MVA จะเกิดเรโซแนนซ์ขนานตรงกับฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 [2]

$$H_{res} = \frac{MVA_{sc}}{MVA_{cap}} = \frac{80}{3.3} = 4.92$$

และจะเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 7 ถ้าพิกัดกำลังลัดวงจรของระบบเท่ากับ 150MVA

$$H_{res} = \frac{MVA_{sc}}{MVA_{cap}} = \frac{150}{3.3} = 6.74$$

ปัญหาดังกล่าวอาจแก้ไขได้โดยการต่อรีแอกเตอร์อนุกรมเข้ากับคาปาซิเตอร์ในแต่ละเฟสเพื่อเลื่อนความถี่เรโซแนนซ์ให้เปลี่ยนไป โดยในที่นี้ควรเลื่อนไปที่ความถี่ที่ทำให้ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 มีค่าลดลง หรืออาจแก้ปัญหานี้โดยการปรับเปลี่ยนค่าคาปาซิเตอร์ให้ลดลงจากเดิมซึ่งจะมีผลกระทบต่อค่าตัวประกอบกำลังที่ต้องการ

การต่อรีแอกเตอร์อนุกรมกับคาปาซิเตอร์จะต้องคำนึงถึงผลที่จะทำให้อำนาจงานรีแอกทีฟที่ตัวคาปาซิเตอร์สูงขึ้นซึ่งโดยทั่วไปสามารถเพิ่มขึ้นได้จากค่าพิกัดที่ระบุในแผ่นป้ายบอกพิกัด ประมาณ 5% โดยค่ารีแอกเตอร์ที่ต้องการสามารถคำนวณได้ดังนี้คือ

$$X_{cap} = \frac{kV^2}{MVA} = \frac{416^2}{(3.3 \times 1.05)} = 4.99\Omega$$

$$X_r = \frac{X_c}{h^2} = \frac{4.99}{25} = 0.20\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ผู้ใช้ได้รับจากใช้งานเพื่อการเรียนการสอนไปก่อนอย่าได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 X_r : ค่ารีแอกแตนซ์ที่ใช้ต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์ที่ความถี่หลักมูล
 ไม่วางรวมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิกัดกระแสของรีแอกเตอร์ดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับพิกัดกระแสของคาปาซิเตอร์, ซึ่งการต่อคาปาซิเตอร์เข้าสู่ระบบนั้นจะไม่มีผลต่อการตอบสนองทางเวลาของคอนเวอร์เตอร์ เว้นแต่จะเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ในระบบที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์

(Harmonic Measurement)

5.1 บทนำ

การวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์ทั้งส่วนแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในการพิจารณาถึงปัญหาด้านคุณภาพของระบบไฟฟ้ากำลังเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องกระทำ โดยมีเหตุผลที่สำคัญเกี่ยวกับการที่ต้องทำการวัดดังกล่าวคือ [2]

5.1.1 วัดปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจริงในระบบและทำการเปรียบเทียบค่าที่กำหนดตามมาตรฐาน

5.1.2 ทำการทดสอบคุณสมบัติของโหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์

5.1.3 ทำการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นและหาแนวทางแก้ไขปัญหาดังกล่าว

5.1.4 ฝ้าติดตามสังเกตปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบในช่วงเวลาต่างๆเช่นในแต่ละวัน, แต่ละเดือน และในแต่ละฤดูกาล

5.1.5 ทำการวัดเพื่อพิสูจน์เทียบกับผลที่ได้จากการจำลองระบบในกรณีที่น่าสนใจจะศึกษาซึ่งรวมถึงการศึกษาถึงการไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบ

5.1.6 การวัดปริมาณแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกส์ทั้งในส่วนขนาดและมุมเฟสซึ่งอาจเป็นการวัดในขณะที่มีหรือไม่มีโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อนำข้อมูลที่ได้กำหนดค่าอิมพีแดนซ์ในจุดต่างๆของระบบที่ต้องการวิเคราะห์

เทคนิคต่างๆที่เกี่ยวกับการวัดฮาร์มอนิกส์โดยทั่วไปจะมีความแตกต่างกับการวัดฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง, อันดับของฮาร์มอนิกส์ที่ควรพิจารณาถึงในการทำการวัดสำหรับฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลัง (ทั้งแรงดัน, กระแส และกำลังงานไฟฟ้า) ควรจะมีช่วงความถี่ถึง 3 kHz โดยฮาร์มอนิกส์ที่สำคัญจะมีค่าความถี่ใกล้เคียงกับความถี่หลักมูลในระบบ

5.2 อุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์แรงดันและกระแสฮาร์มอนิกส์

5.2.1 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากการวัดด้วยออสซิลโลสโคปจะทำให้ทราบถึงข้อมูลที่สำคัญเกี่ยวกับระดับและชนิดของความผิดเพี้ยนของสัญญาณ ซึ่งอาจจะทำให้ทราบถึงการเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ในระบบได้ จากการพิจารณารูปคลื่นของสัญญาณดังกล่าว

5.2.2 สเปกตรัมแอนาไลเซอร์ (Spectrum Analyzers)

ลักษณะการแสดงผลของสเปกตรัมอนาไลเซอร์จะเป็นการแสดงถึงปริมาณของสัญญาณที่ความถี่ต่างๆความถี่ ซึ่งผลของการสแกนในช่วงความถี่ที่แน่นอนจะทำให้ทราบถึงข้อมูลของฮาร์โมนิกส์ทุกองค์ประกอบ (Harmonic & Interharmonic) ในรูปคลื่นสัญญาณ

5.2.3 ฮาร์โมนิกส์อนาไลเซอร์ (Harmonic Analyzers or Wave Analyzers)

เครื่องวัดชนิดนี้จะสามารถแสดงทั้งขนาดและมุมเฟสของแรงดันและกระแสฮาร์โมนิกส์สำหรับรูปคลื่นสัญญาณที่เป็นรายคาบ โดยจะแสดงอยู่ในรูปของสเปกตรัม และสามารถที่จะบันทึกค่าต่างๆที่วัดได้

5.2.4 ดิสทอร์ชันอนาไลเซอร์ (Distortion Analyzers)

เป็นเครื่องวัดที่แสดงถึงค่าความผิดเพี้ยนรวมของสัญญาณเนื่องจากฮาร์โมนิกส์ (%THD) โดยตรง

5.2.5 เครื่องวัดฮาร์โมนิกส์แบบดิจิทัล (Digital Harmonics Measuring Equipment)

การวิเคราะห์ทางดิจิทัลมีเทคนิคที่ใช้อยู่ 2 แบบคือ

5.2.5.1 วิธีที่ใช้ตัวกรองทางดิจิทัล (Digital Filter)

วิธีนี้เป็นวิธีที่คล้ายกับการใช้ตัวกรองทางอนาล็อก, ตัววิเคราะห์สัญญาณทางดิจิทัลจะต้องมีส่วนของตัวกรองทางดิจิทัลอยู่ภายใน, ในการทำการวัดในเฉพาะงาน ช่วงความถี่จะถูกวัดเพื่อปรับตั้งตัวกรองแบบดิจิทัลในช่วงความถี่ที่ต้องการ และแบนด์วิดจ์จะถูกปรับเปลี่ยนให้มีความเหมาะสมในการวัดฮาร์โมนิกส์ที่มีขนาดต่ำในกรณีที่ต้องการองค์ประกอบความถี่หลักมูลมีค่าสูง

5.2.5.2 วิธีการแปลงฟูเรียร์แบบลัด (Fast Fourier Transform, FFT)

เป็นวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัมแบบ Real Time ซึ่งมีความเร็วสูงซึ่งสามารถที่จะประมวลผลข้อมูลจำนวนมากๆได้ดี โดยองค์ประกอบที่สำคัญในส่วนของ การรับข้อมูลเข้ามาประมวลผลอาจต้องใช้อุปกรณ์แปลงสัญญาณแบบ Multichannel analog-digital ร่วมกับคอมพิวเตอร์

เมื่อข้อมูลเกี่ยวกับรูปคลื่นสัญญาณที่วัดได้ (On line) ถูกแปลงให้เป็นข้อมูลทางดิจิทัลแล้ว เราสามารถใช้วิธี FFT คำนวณพารามิเตอร์ต่างๆทางวิศวกรรม, การคำนวณทางสถิติ, การพล็อตกราฟ และการพิมพ์ข้อมูล ได้ในห้องปฏิบัติการหลังจากการวัด (Off line)

5.3 ความต้องการเกี่ยวกับการตอบสนองของเครื่องวัด (Requirement for Instrument Response)

เพื่อความถูกต้องของข้อมูลที่ได้ออกจากการวัด เครื่องมือวัดที่จะใช้ควรมีคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้คือ

1. **5.3.1 ความถูกต้อง (Accuracy)** เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงจำของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือที่ใช้ในการวัดฮาร์โมนิกส์ที่มีค่าคงที่ (สภาวะคงตัว) ควรจะมีค่าความผิดพลาดที่เหมาะสมกับระดับของฮาร์โมนิกส์ที่ขอมให้ได้ตามมาตรฐาน (Permissible Limit) โดยทั่วไปเครื่องมือวัดควรมีค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) ไม่เกิน 5 % ของข้อกำหนดที่เหมาะสม ยกตัวอย่างเช่น ในระบบสามเฟสที่แรงดันไฟฟ้า 480 โวลต์ มีข้อกำหนดของแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่ 11 ตามมาตรฐานเท่ากับ 0.7% หรือคิดในกรณีคิดเป็นแรงดันต่อเฟสจะมีค่ามาตรฐานเท่ากับ 1.94 โวลต์ ดังนั้นเครื่องมือวัดที่จะใช้ในการวัดสำหรับระบบนี้จะต้องมีค่าความไม่แน่นอนต่ำกว่า $\pm (0.05 \times 1.94) = \pm 0.097$ โวลต์

5.3.2 การคัดเลือกข้อมูล (Selectivity)

เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของเครื่องมือวัดในการคัดเลือกหรือแยกแยะข้อมูลของฮาร์โมนิกส์ในแต่ละองค์ประกอบที่ความถี่ต่างๆ เพื่อความแน่ใจว่าเครื่องมือวัดจะมีความสามารถในการแยกแยะข้อมูลอยู่ในเกณฑ์ที่ดีควรจะต้องกำหนดค่าอัตราลดทอนต่ำสุดของความถี่ของสัญญาณ (Injected Frequency) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าอัตราลดทอนต่ำสุด

Injected Frequency (Hz)	Frequency-Domain Instrument	Time-Domain Instrument
60	0	0
30	50	60
120 to 720	30	60
720 to 1200	20	40
1200 to 2400	15	35

โดยทั่วไปในทางปฏิบัติปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์ในระบบเมื่อเทียบกับองค์ประกอบที่ความถี่หลักมูลจะมีค่าต่ำกว่ามาก แต่ในบางครั้งปริมาณฮาร์โมนิกส์ก็อาจจะสูงมากจนทำให้เกิดผลกระทบต่างๆ ในระบบได้เช่นกัน ดังนั้นเครื่องมือวัดที่ใช้งานในระบบควรจะมีการปรับเปลี่ยนช่วงของการวัดเองได้ตามความเหมาะสม โดยเครื่องมือวัดปริมาณฮาร์โมนิกส์โดยทั่วไปควรมีค่าอัตราลดทอนต่ำสุดเท่ากับ 60 dB (0.1 % ขององค์ประกอบความถี่หลักมูล) และในแบบที่มีราคาสูง จะมีค่าอัตราลดทอนต่ำสุดเท่ากับ 90 dB (0.00316 % ขององค์ประกอบความถี่หลักมูล)

5.3.3 ค่าเฉลี่ย (Averaging or Snapshot)

ถ้าหากว่าค่าปริมาณฮาร์โมนิกส์ที่วัดได้มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เครื่องวัดฮาร์โมนิกส์ควรมีความสามารถในการปรับค่าดังกล่าวที่เปลี่ยนแปลงอย่างมากให้มีค่าเฉลี่ยที่คงที่ (Smooth out) โดยปัจจัยสำคัญเกี่ยวข้อง 2 ประการคือ การตอบสนองแบบไดนามิก และแบนด์วิดท์ หรือความกว้างแถบความถี่ ของเครื่องมือวัด

5.3.3.1 การตอบสนองแบบไดนามิก

ยกตัวอย่างถ้าต้องการค่าเฉลี่ยของการวัดภายในช่วงเวลา 3 วินาที ดังนั้นการตอบสนองของเครื่องวัดจะต้องมีคุณสมบัติเหมือนกับ ตัวกรองความถี่แบบผ่านความถี่ต่ำอันดับที่ 1 (First order low-pass filter) ด้วยค่าคงตัวทางเวลาเท่ากับ 1.5 ± 0.15 วินาที

5.3.3.2 แบนด์วิดธ์หรือความกว้างแถบความถี่ของเครื่องมือวัด

เมื่อฮาร์โมนิกส์ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมีค่าเปลี่ยนแปลงลักษณะขึ้นๆลงๆ ค่าแบนด์วิดธ์ของเครื่องวัดจะมีผลอย่างมากต่อค่าที่อ่านได้ ซึ่งในกรณีนี้เครื่องมือวัดที่เหมาะสมควรมีค่าแบนด์วิดธ์ที่คงที่ตลอดช่วงความถี่ทั้งหมด โดยค่าแบนด์วิดธ์ควรจะมีค่าเท่ากับ 3 ± 0.5 Hz ระหว่างจุด -3 dB กับ จุดที่มีค่าลดทอนต่ำสุดเท่ากับ 40 dB ที่ความถี่เท่ากับ $6\text{h} \pm 15$ Hz และในกรณีที่ในระบบมีฮาร์โมนิกส์แบบ Inter Harmonic และฮาร์โมนิกส์ที่เกิดในสภาวะชั่วขณะ เครื่องมือวัดที่มีค่าแบนด์วิดธ์ที่กว้างจะมีค่าผิดพลาดในเชิงบวก (Positive Error) มากตามไปด้วย

ความสามารถของเครื่องมือวัดในการหาค่าเฉลี่ยเป็นสิ่งที่จำเป็นมากเมื่อการวัดปกตินั้นไม่สามารถที่จะอ่านค่าได้จากจอแสดงผลของเครื่องวัดเนื่องจากปริมาณฮาร์โมนิกส์เปลี่ยนแปลงขึ้นๆลงๆ โดยเครื่องมือวัดแบบที่มีความสามารถในการเลือกค่าเวลาในการเฉลี่ยหรือจำนวนคาบเวลาในการเฉลี่ยได้จะเป็นเครื่องมือวัดแบบเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบดิจิทัล 2 แชนแนล (Dual - Channel Digital Signal Analyzer)

5.4 การแสดงข้อมูลของฮาร์โมนิกส์

ข้อมูลของฮาร์โมนิกส์ที่วัดได้โดยเครื่องวัดอาจแสดงผลอยู่ในรูปของตารางหรือรูปแบบกราฟก็ได้ ซึ่งลักษณะของการแสดงผลแบบตาราง และการแสดงผลของอนาลิเซอร์แบบเชิงเวลา (Time Domain) แสดงดังตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.1

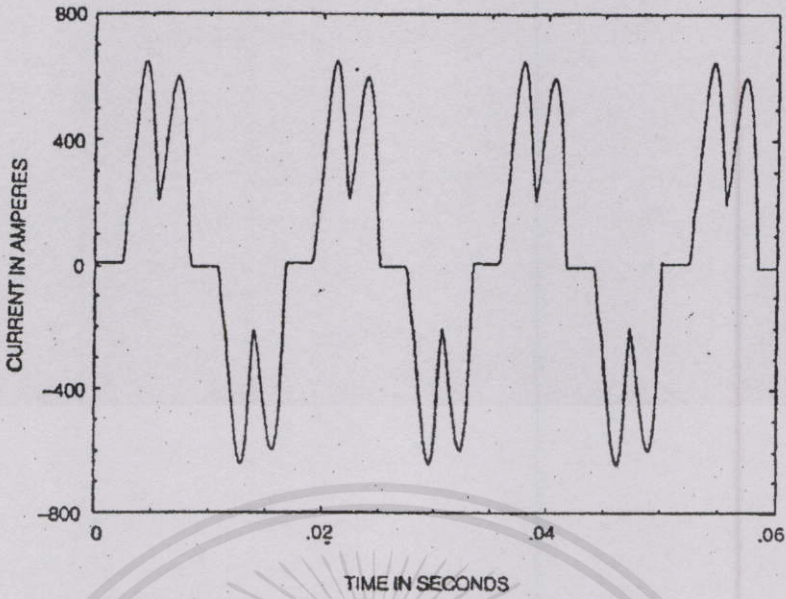
ตารางที่ 5.2 ตารางสเปกตรัมของกระแสฮาร์โมนิกส์

Current Harmonic Spectrum

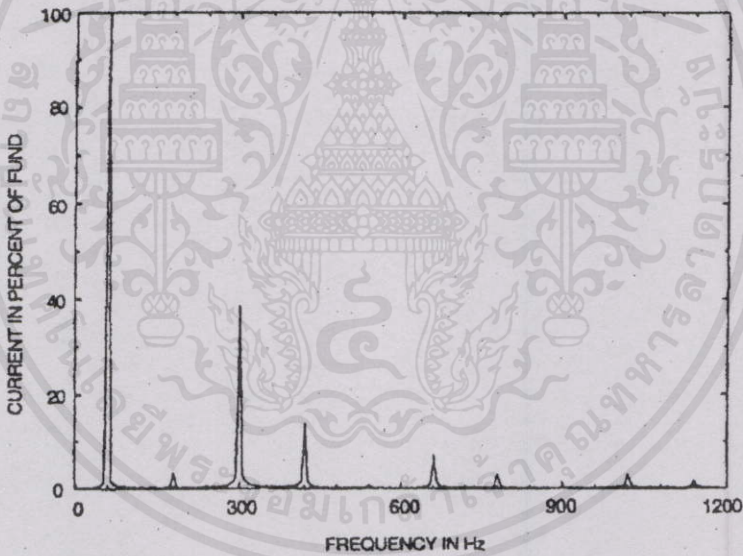
Frequency (Hz)	60	180	420	540	660	780	1020	1140
Amplitude (A)	305	10.3	42.4	2.0	21.7	9.5	9.2	4.6

ภาคแสดงผลในลักษณะสเปกตรัมของกระแสฮาร์โมนิกส์แสดงดังรูปที่ 5.2 โดยเป็นกรณีที่แกนนอนเป็นแบบเชิงเส้น, ซึ่งในบางกรณีลักษณะของแกนนอนจะเป็นแบบลอการิทึมเพื่อประโยชน์ในการแสดงปริมาณฮาร์โมนิกส์อันดับสูงๆที่มีปริมาณต่ำกว่า 5% ได้อย่างรวดเร็ว

ฮาร์โมนิกส์ที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา (Time-variable harmonics) มักจะแสดงอยู่ในรูปฟังก์ชันของเวลา ค่าทางสถิติสามารถนำมาใช้ได้ ในกรณีที่ฮาร์โมนิกส์ที่วัดได้มีลักษณะขึ้นๆลงๆไม่



รูปที่ 5.1 เอาท์พุทของสเปกตรัมอนาไลเซอร์แบบ Time Domain



รูปที่ 5.2 เอาท์พุทของสเปกตรัมอนาไลเซอร์แบบ Frequency Domain

แน่นอน, โดยกำหนดให้ช่วงคาบเวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลทั้งหมด (T_D) ถูกแบ่งออกเป็นช่วงเวลาย่อยๆ (m) ดังนั้นช่วงเวลารวมทั้งหมดที่ใช้ในการเก็บข้อมูลสามารถคำนวณได้จาก $mT = T_D$, ค่าเฉลี่ยของกระแสในแต่ละช่วงเวลาย่อยคือ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาในเอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากคณะกรรมาธิการฯ

$$I_h(\text{mean}) = \sum_1^k \frac{I_{kh}}{k} \quad (5.1)$$

โดยในช่วงเวลาย่อย T มีจำนวนครั้งในการวัดเท่ากับ k , และค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง (mean square) เท่ากับ [2]

$$I_h(\text{mean square}) = \sum_1^k \frac{I_{kh}^2}{k} \quad (5.2)$$

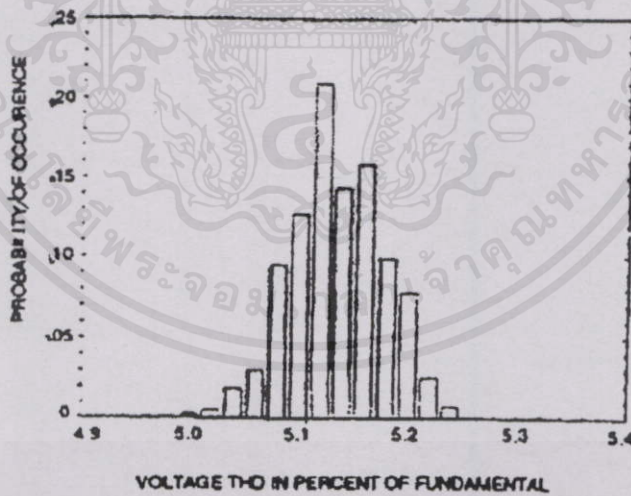
ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานได้จากสมการ [2]

$$I_h = \sqrt{I_{h\max}^2 - I_{h\min}^2} \quad (5.3)$$

$I_{h\max}$: ค่าสูงสุดของกระแสฮาร์มอนิกส์สำหรับข้อมูลการวัด k ครั้ง

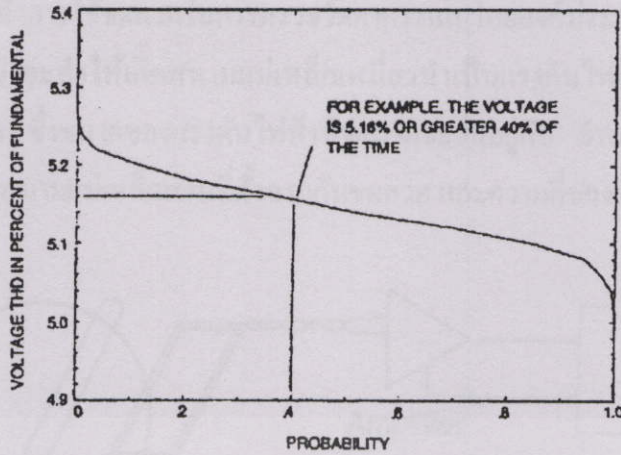
$I_{h\min}$: ค่าต่ำสุดของกระแสฮาร์มอนิกส์สำหรับข้อมูลการวัด k ครั้ง

รูปที่ 5.3 แสดงตัวอย่างของข้อมูลที่บอกให้ทราบถึงความเป็น (Probability) ของปริมาณฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าซึ่งอยู่ในรูปของกราฟแท่งที่แสดงถึงปริมาณฮาร์มอนิกส์ค่าต่างๆเทียบกับระดับของความน่าจะเป็นไปได้ (Histogram)



รูปที่ 5.3 ฮิสโตแกรมของแรงดันฮาร์มอนิกส์

รูปที่ 5.4 เป็นการแสดงข้อมูลที่คล้ายกับฮิสโตแกรมแต่ข้อมูลของความน่าจะเป็นจะเปลี่ยนมาอยู่ที่แกนนอนและแสดงด้วยกราฟเส้น ซึ่งเป็นรูปแบบที่นิยมใช้ในทางปฏิบัติ ในการนำไปใช้พิจารณาถึงผลกระทบที่มีต่ออุปกรณ์ที่สำคัญในระบบ เช่น คาปาซิเตอร์, มอเตอร์ และหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 5.4 ข้อมูลความน่าจะเป็นของปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกส์แบบกราฟเส้น

5.5 ทรานส์ดิวเซอร์สำหรับการวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์ (Transducers for Harmonic Measurement)

5.5.1 การวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ (Current Measurement)

5.5.1.1 การวัดด้วยหม้อแปลงกระแสไฟฟ้า (Current Transformer)

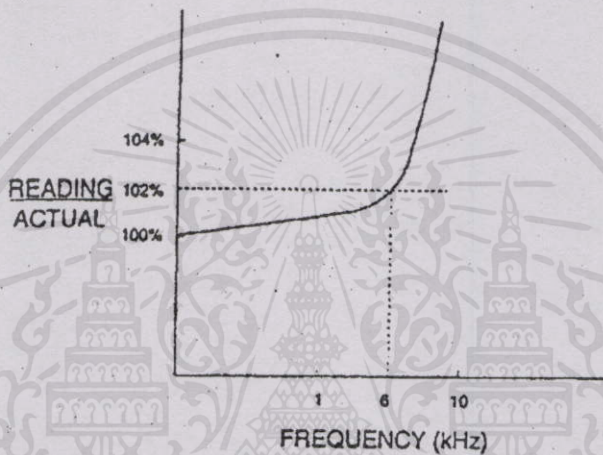
ในการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ที่มีความถี่สูงถึง 10 kHz ด้วยหม้อแปลงกระแสแบบที่ใช้ระบบไฟฟ้าแบบปกติธรรมดาจะมีค่าความถูกต้องดีกว่า 3 %, โดยถ้าโหลดที่ต่อสำหรับหม้อแปลงกระแส (Burden) นั้นเป็นแบบตัวเหนี่ยวนำ มุมเฟสของสัญญาณที่เลื่อนไปก็จะมีค่าต่ำ, การเชื่อมต่อสัญญาณที่ได้จากหม้อแปลงกระแสทางด้านทุติยภูมิเข้าสู่เครื่องวัดอาจใช้ Hall Effect หรือหม้อแปลงกระแสอีกตัวหนึ่งลดทอนสัญญาณ โดยคล้องเข้าที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสตัวแรก

สายตัวนำแบบที่มีเกราะป้องกันสัญญาณรบกวน เช่น สายโคแอกเชียล สายไทแอกเชียล จะมีผลให้การวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์มีความถูกต้องสูงขึ้น โดยรูปแบบของการใช้สายแบบมีเกราะป้องกันรบกวนจากภายนอกและการต่อกราวด์ที่ถูกต้อง จะมีประโยชน์ต่อการลดผลกระทบเนื่องจากแรงดันที่สูงขึ้นจากพาราสิติกแอมเพอ (Parasitic) ในการวัด (IEEE Std. 518-1992)

การใช้งานสายโคแอกเชียลมีความเหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการใช้ระยะทางของสายตัวนำสั้นๆ โดยถ้าในกรณีที่ระยะทางของสายตัวนำที่ต้องการอยู่ในช่วง 10 – 100 เมตร หรือเป็นการวัดที่ตัวเซ็นเซอร์อยู่ใกล้ระบบไฟฟ้าแรงดันสูง รูปแบบของการวัดที่เหมาะสมควรมีลักษณะดังนี้คือ ระดับสัญญาณเอาต์พุตที่ตัวเซ็นเซอร์จะถูกแปลงให้เป็นค่าความถี่ (voltage to frequency) จากนั้นจะส่งผ่านไปโนสายใยแก้วนำแสงแบบ Nonmetallic และที่ภาครับปลายทาง ความถี่ของสัญญาณก็จะถูกแปลงกลับเป็นแรงดันไฟฟ้าอีกครั้ง ซึ่งวิธีดังกล่าวจะช่วยป้องกันการถูกรบกวนจากภายนอกได้เป็นอย่างดี

5.5.1.2 ขดลวดที่ใช้ในการตรวจวัดค่ากระแส (Search Coils)

ความถี่หลักมูล ดังนั้นในการนำมาประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์อาจเกิดปัญหาในการใช้งานได้เช่น การเกิดเรโซแนนซ์ขึ้นระหว่างค่าอินดักแตนซ์ของขดลวดกับคาปาซิเตอร์ในระบบซึ่งจะมีผลให้เกิดความผิดพลาดในการวัดขึ้นมากทั้งในส่วนอัตราการลดทอนแรงดันและการเลื่อนของมุมเฟส, รูปที่5.6 แสดงถึงตัวอย่างของค่าความผิดพลาดของอัตราการลดทอนแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลงเทียบกับความถี่ของแรงดันที่ทำการวัด เกณฑ์ในทางปฏิบัติที่เป็นข้อกำหนดเกี่ยวกับการใช้หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าในการใช้ร่วมทำการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่มีความถี่ต่ำกว่า 5kHz ก็จะต้องมีค่าความถูกต้องไม่เกิน 3 % จึงจะเพียงพอที่จะนำมาใช้งาน



รูปที่5.6 ค่าความผิดพลาดของอัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าเทียบกับความถี่

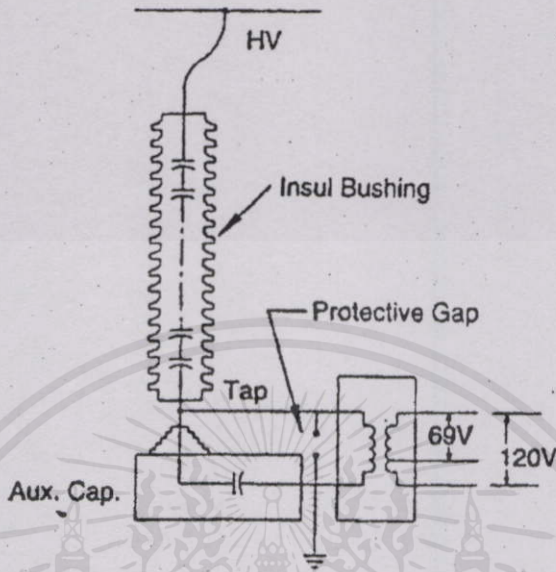
5.5.2.2 หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าแบบใช้ตัวคาปาซิเตอร์ (Capacitive Voltage Transformers)

อุปกรณ์ชนิดนี้ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการวัดแรงดันฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าเนื่องจากมักจะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ขึ้นในระบบในช่วงความถี่ต่ำ เช่นช่วงความถี่ที่ต่ำที่สุดจะต่ำกว่า 200Hz

5.5.2.3 อุปกรณ์แบ่งแรงดันแบบใช้คาปาซิเตอร์ (Capacitive Voltage Divider)

รูปที่5.7 แสดงตัวอย่างของอุปกรณ์ชนิดนี้ และการต่อใช้งานในระบบไฟฟ้าแรงดันสูง, ในโครงสร้างของบรูซซึ่งที่เป็นฉนวนจะประกอบด้วยคาปาซิเตอร์หลายๆตัวต่ออนุกรมกันอยู่ภายในเพื่อลดทอนแรงดันไฟฟ้าให้จ่ายต่อการทำการวัด, เครื่องมือวัดที่จะนำมาต่อทางด้านแรงดันเอาท์พุทความถี่จะมีภาคขยายสัญญาณแบบมีอิมพีแดนซ์ด้านเข้าที่สูง และเครื่องมือวัดนี้ควรจะทำงานโดยใช้แหล่งจ่ายพลังงานจากแบตเตอรี่ หรือควรจะมีอุปกรณ์แยกกราวด์ (Isolator) และอุปกรณ์ป้องกันการรบกวน (Shield) ให้กับแหล่งจ่ายพลังงาน, สายไฟที่เชื่อมต่อระหว่างคาปาซิเตอร์กับภาคขยายสัญญาณ ควรจะมีระยะทางที่สั้นเท่าที่จะเป็นไปได้ และสายไฟที่เชื่อมต่อระหว่างภาคขยายสัญญาณเข้ากับเครื่องมือวัดที่สั้นก็จะช่วยลดค่าความผิดพลาดในส่วนของการเลื่อนมุมเฟส สาเหตุที่ภาคขยายสัญญาณ

จะต้องมีอิมพีแดนซ์ด้านเข้าสูงก็เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ลดทอนสัญญาณชนิดนี้คือเรื่องของ โหลด (Burden) ที่จะนำมาต่อจะต้องไม่ทำให้เกิดสภาวะอิ่มตัวขึ้น



รูปที่ 5.7 อุปกรณ์แบ่งแรงดันแบบใช้คาปาซิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

ตัวกรองฮาร์มอนิกและขั้นตอนการออกแบบ (Harmonic Filter and Design Procedure)

6.1 วัตถุประสงค์ในการใช้งานตัวกรองฮาร์มอนิก

เป้าหมายหลักของการใช้งานตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า คือการใช้เพื่อลดขนาดของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าที่มีความถี่คงที่ความถี่เดียวหรือหลายๆความถี่พร้อมกัน ในการแก้ปัญหาของฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลังที่นิยมโดยทั่วไปก็คือการใช่วงจรกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ โดยสามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้ดังนี้คือ [1-13]

6.1.1 ตัวกรองฮาร์มอนิกส์แบบอนุกรม (Series Filter)

จะประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำต่อขนานกับตัวเก็บประจุและค่ออนุกรมเข้ากับระบบเพื่อทำหน้าที่ควบคุมฮาร์มอนิกความถี่ใดความถี่หนึ่ง โดยเฉพาะไม่ให้ไหลเข้าสู่ส่วนใดส่วนหนึ่งของระบบไฟฟ้า โดยตัวกรองชนิดนี้จะแสดงตัวเป็นอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงที่ความถี่ที่สอดคล้องกับความถี่ของฮาร์มอนิกดังกล่าว, โดยการแก้ปัญหาด้วยวิธีนี้มีข้อจำกัดในการใช้คือไม่สามารถนำไปใช้ควบคุมปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกได้ เนื่องจากฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกโดยปกติจะเกิดขึ้นพร้อมกันหลายอันดับ, และข้อเสียของตัวกรองแบบอนุกรมอีกอย่างหนึ่งก็คือตัวกรองชนิดนี้จะต้องสามารถทนค่ากระแสที่กักตัวของระบบได้ รวมถึงการฉนวนจะต้องคำนึงถึงแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายสูงสุดของระบบ

6.1.2 ตัวกรองฮาร์มอนิกส์แบบขนาน (Shunt Filter)

เป็นตัวกรองแบบที่ต่อขนานเข้ากับระบบเพื่อทำหน้าที่ควบคุมปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์จากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ไม่ให้ไหลเข้าไปในส่วนต่างๆของระบบ โดยตัวกรองชนิดนี้จะแสดงตัวเป็นอิมพีแดนซ์ค่าต่ำที่ความถี่ฮาร์มอนิกดังกล่าวเพื่อเบี่ยงเบนทางเดินของกระแสฮาร์มอนิกไม่ให้ไหลกลับสู่ระบบ, โดยข้อดีของตัวกรองชนิดนี้คือพิกัดกระแสขององค์ประกอบของตัวกรองจะมีค่าต่ำแบบที่ต่ออนุกรม ดังนั้นค่าใช้จ่ายที่ใช้จะมีค่าต่ำกว่า รวมถึงตัวกรองชนิดนี้สามารถชดเชยกำลังงานรีแอกทีฟให้กับระบบที่ความถี่หลักมูล ซึ่งทำให้ตัวกรองชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้มากกว่าในทางปฏิบัติ, ในบางกรณีอาจประยุกต์ตัวกรองฮาร์มอนิกทั้งแบบอนุกรมและแบบขนานเพื่อใช้ในการควบคุมปริมาณกระแสและแรงดันฮาร์มอนิก แต่จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูงขึ้นมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม ผู้ที่นำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 นิยามและข้อกำหนดต่างๆ

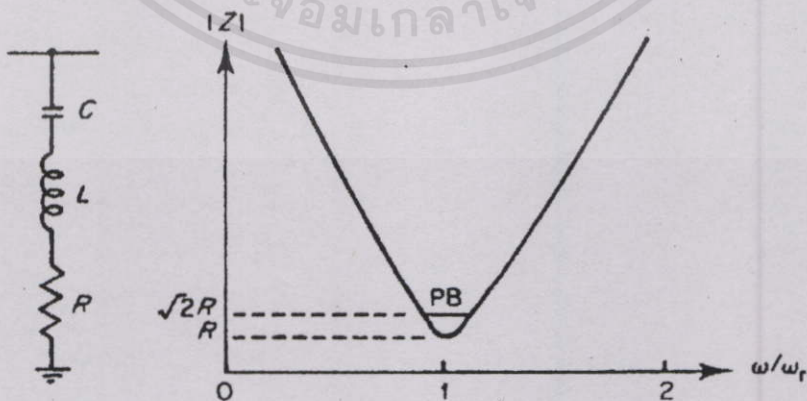
ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบขนาน (Shunt Filter) อาจกล่าวได้ว่าเป็นตัวกรองแบบที่ถูกรับปรับไป ยังความถี่ที่ทำให้ค่ารีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์เท่ากับรีแอกแตนซ์ของอินดักเตอร์

คุณภาพของตัวกรอง (Q) จะเป็นแฟคเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดความคม (Sharpness) ในการจูน ของตัวกรอง ซึ่งในที่นี้ตัวกรองที่มีใช้งานอาจเป็นได้ทั้งแบบที่มีค่าแฟคเตอร์คุณภาพสูง และแบบที่มีค่าต่ำ, ในแบบที่มีค่าแฟคเตอร์คุณภาพสูงนั้นคือตัวกรองแบบที่มีความคมในการจูนมาก โดยมักใช้ ในการจูนเพื่อกรองฮาร์มอนิกที่ความถี่ใดความถี่หนึ่งในช่วงความถี่ต่ำๆเช่นอันดับที่ 5, โดยตัวอย่าง ของค่าแฟคเตอร์คุณภาพของตัวกรองชนิดนี้จะอยู่ในช่วง 30-60, ตัวกรองฮาร์มอนิกในแบบที่มีค่า แฟคเตอร์คุณภาพต่ำคือช่วง 0.5-5 จะใช้ในการจูนเพื่อกรองฮาร์มอนิกที่หลากหลายความถี่ในช่วงกว้าง โดยปกติมักใช้ในช่วงความถี่สูงๆเช่นอันดับที่ 17 ขึ้นไป ดังนั้นในบางครั้งจึงมักถูกเรียกว่าตัวกรอง แบบผ่านความถี่สูง (High pass)

ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบขนานที่นิยมนำมาใช้ในทางปฏิบัติคือแบบกรองผ่านความถี่เดียว (Single-Tuned or Notch Filter) และ แบบกรองผ่านความถี่สูง (High pass or Damped Filter) ซึ่งข้อ ดีที่เห็นได้ชัดเจนคือการออกแบบที่ง่าย และค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำ

6.3 ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบกรองผ่านความถี่เดียว (Single-Tuned or Notch Filter)

ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบกรองผ่านความถี่เดียวจะประกอบด้วย RLC คอแบบอนุกรม โดยจูน เพื่อให้กรองฮาร์มอนิกส์เพียงความถี่เดียว, นิยมใช้ในการกรองฮาร์มอนิกในอันดับต้นๆและมี ปริมาณสูงเช่น 3^{rd} , 5^{th} , 7^{th} เป็นตัวกรองชนิดที่มีค่า Q-Factor สูง (30-60) ซึ่งหมายถึงมีความสามารถในการกรองที่ดี และมีค่ากำลังงานสูญเสียที่ต่ำ, รูปที่ 6.1 แสดงลักษณะของตัวกรองฮาร์มอนิก และ ความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองกับความถี่ของแหล่งจ่าย



เอกสารนี้เป็นเอกสารตัวอย่างที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 6.1 (a) ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบกรองผ่านความถี่เดียว, (b) ความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์กับ ความถี่

ค่าอิมพีแดนซ์รวม (Z_1) ของตัวกรองหาได้จาก [13]

$$Z_1 = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \quad (6.1)$$

ซึ่งที่ความถี่เรโซแนนท์ (f_c) ของค่า Z_1 จะมีค่าเท่ากับค่า R โดยค่า f_c หาจากสมการที่ 6.2 [13]

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (6.2)$$

กำหนดให้อันดับของฮาร์โมนิก (n) คือค่าอัตราส่วนของความถี่ฮาร์โมนิกต่อค่าความถี่หลักมูล, ดังนั้นค่ารีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ และอินดักเตอร์สามารถคำนวณได้จาก [1]

$$X_{Ln} = n\omega L \quad (6.3)$$

$$X_{Cn} = \frac{1}{n\omega C} \quad (6.4)$$

เนื่องจากที่ความถี่เรโซแนนซ์ค่ารีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์เท่ากับค่ารีแอคแตนซ์ของอินดักเตอร์ที่ความถี่ดังกล่าว ($n = r$) ซึ่งคำนวณได้จาก [1]

$$X_{Lr} = X_{Cr} \quad (6.5)$$

ดังนั้นจากเงื่อนไขดังกล่าวทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างรีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ (X_C) และค่ารีแอคแตนซ์ของอินดักเตอร์ (X_L) ที่ความถี่หลักมูล (f_c) คือ [1]

$$r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (6.6)$$

จากความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์และความถี่ของตัวกรอง (รูปที่ 6.1) จะสามารถสรุปคุณสมบัติต่างๆ ได้ดังนี้คือ

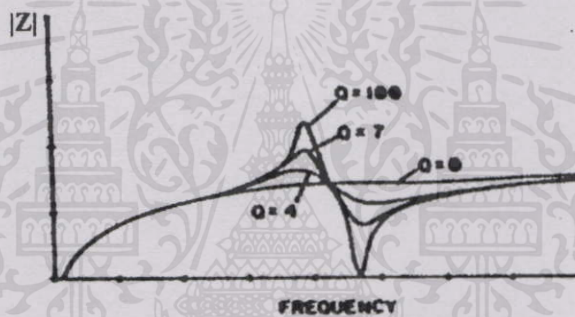
6.3.1 ที่ความถี่ถูกจูนอิมพีแดนซ์ของตัวกรองจะมีค่าต่ำมาก $Z=R$, (ซึ่งความต้านทานดังกล่าวมักเป็นค่าความต้านทานภายในอินดักเตอร์) ทำให้สามารถเบี่ยงเบนทางเดินกระแสฮาร์โมนิกให้ไหลผ่านตัวกรองที่ความถี่ดังกล่าวได้อย่างมาก

$$Z = \sqrt{2R}$$

ω_0 = ความถี่เรโซแนนซ์ (rad/sec)

การเลือกค่าแฟคเตอร์คุณภาพเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของตัวกรองฮาร์มอนิกที่สำคัญดังนี้คือ

1. ค่าของแฟคเตอร์คุณภาพมักไม่ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาถึงความสามารถในการกรองฮาร์มอนิกมากนั้ก (Filtering Action) เนื่องจากเนื่องจากค่าแฟคเตอร์คุณภาพนั้นสัมพันธ์กับค่าความต้านทานของตัวกรองฮาร์มอนิก ซึ่งการกำหนดคุณสมบัติของตัวกรองฮาร์มอนิกในลักษณะต่างๆอาจมีผลให้เกิดกำลังงานสูญเสียที่ตัวกรองสูงขึ้น
2. จากกราฟผลการตอบสนองทางความถี่รูปที่ 6.3, ตัวกรองฮาร์มอนิกที่มีค่าแฟคเตอร์คุณภาพที่สูงกว่าจะมีลักษณะของกราฟที่เป็นลักษณะการเว้าลงมาที่ความถี่ที่จูนไว้ชัดเจนขึ้น



รูปที่ 6.3 ตัวอย่างของผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 4.7 ที่ค่าแฟคเตอร์คุณภาพต่างๆ

3. โดยทั่วไปค่าความต้านทานของตัวกรองฮาร์มอนิกจะประกอบด้วยค่าความต้านทานภายในอินดักเตอร์เพียงอย่างเดียว, ซึ่งจะเห็นว่าค่าแฟคเตอร์คุณภาพของตัวกรองฮาร์มอนิกจะมีค่าเท่ากับ r เท่าของอัตราส่วน X/R ของตัวอินดักเตอร์ (r : อัตราส่วนของความถี่เรโซแนนซ์ต่อความถี่ลักษณะ) ซึ่งเป็นผลให้ค่าแฟคเตอร์คุณภาพของตัวกรองฮาร์มอนิกโดยปกติจะมีค่าสูงและมีความสามารถในการกรองฮาร์มอนิกที่ดี

4. ลักษณะของผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองฮาร์มอนิกที่ค่าแฟคเตอร์คุณภาพเท่ากับ 25 จะมีความแตกต่างกับกรณี 100 น้อยมาก โดยจุดที่แตกต่างกันนั้นจะเป็นเฉพาะในส่วนค่ายอดของกราฟ

ข้อควรพิจารณาที่สำคัญเมื่อต่อตัวกรองชนิดนี้ในระบบคือ ตัวกรองฮาร์มอนิกและอิมพีแดนซ์ในระบบ (Z) จะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ขนานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ที่จูนไว้ (รูปที่ 6.2 และ 6.3) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ [1], [11], [13]

$$f_{sys} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(L_s + L)C}} \quad (6.9)$$

โดยค่าแฟคเตอร์คุณภาพของช่วงเรโซแนนซ์ดังกล่าวคำนวณได้จากสมการ [1]

$$Q_{sys} = \frac{1}{(R + R_s)} \sqrt{\frac{(L_s + L)}{C}} \quad (6.10)$$

ซึ่งจะเห็นว่าช่วงห่างของความถี่ที่จูนไว้กับความถี่เรโซแนนซ์ขนานขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบเพียงค่าเดียว, ปัญหาที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากเรโซแนนซ์ขนานดังกล่าวคือ ถ้าตัวกรองฮาร์มอนิกถูกจูนให้มีค่าตรงพอดีกับฮาร์มอนิกที่ต้องการจะกรอง และเกิดการเลื่อนของความถี่ที่จูนไว้ไปทางด้านความถี่ที่สูงขึ้นซึ่งอาจเกิดจากสาเหตุหลักๆคือ ฟิวส์ภายในของคาปาซิเตอร์เกิดความเสียหายซึ่งทำให้ค่าคาปาซิแตนซ์รวมมีค่าลดลง, ค่าผิดพลาดของตัวคาปาซิเตอร์และอินดักเตอร์จากบริษัทผู้ผลิต, การเปลี่ยนแปลงของความถี่หลักมูล และการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์เนื่องจากอุณหภูมิและอายุการใช้งาน ซึ่งจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่มองจากฮาร์มอนิกมีค่าสูงขึ้นมาก โดยถ้ายอดแหลมของเรโซแนนซ์ขนานตรงกับความถี่ของฮาร์มอนิกก็จะทำให้เกิดการขยายตัวของแรงดันฮาร์มอนิก (Voltage Amplification) และอาจทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ในระบบ ดังนั้นในทางปฏิบัติมักจะแก้ปัญหารีโซแนนซ์ดังกล่าว โดยการเลื่อนความถี่ที่ต้องการจูนให้ต่ำลงจากที่ต้องการเล็กน้อย โดยขอให้คุณสมบัติในการกรองเปลี่ยนแปลงไปบ้าง ซึ่งตัวอย่างที่นิยมใช้ในทางปฏิบัติคือประมาณ 3-10%, โดยค่าความถี่ในการจูนที่เลื่อนไปจากความถี่ของฮาร์มอนิกที่ต้องการกรองจะแสดงอยู่ในรูปของค่า δ (Filter Detuning Factor) ซึ่งคำนวณเทียบกับความถี่ของฮาร์มอนิกที่ต้องการกรอง (ω_n) เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ดังสมการ [13]

$$\delta = (\omega - \omega_n) / \omega_n = \frac{\Delta f}{f_n} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right) \quad (6.11)$$

δ = de-tuning factor

ω = ความถี่เรโซแนนซ์ (rad/sec)

$\frac{\Delta f}{f_n}$ = frequency tolerance

$\frac{\Delta L}{L_n}$ = inductor temperature coefficient (%/°C)

$\frac{\Delta C}{C_n}$ = Capacitor temperature coefficient (%/°C)

6.4 ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบกรองผ่านความถี่สูง (High pass or Damped Filter)

ตัวกรองแบบนี้จะมีคุณสมบัติของอิมพีแดนซ์ต่ำในช่วงกว้างของความถี่โดยนิยมใช้ในการกรองฮาร์มอนิกทั้งหมด หรือตั้งแต่ความถี่ที่ถูกรงไว้ (Corner Frequency)

ข้อดีของการใช้งาน Damped filter จะมีอยู่หลายประการที่สำคัญคือ

1. สมรรถนะในการทำงานมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ, การเปลี่ยนแปลงความถี่, ความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์, การสูญเสียของค้ประกอบย่อยในคาปาซิเตอร์

2. มันจะแสดงค่าอิมพีแดนซ์ที่มีค่าต่ำในช่วงกว้างของความถี่ฮาร์มอนิกส์ หรือสามารถกรองฮาร์มอนิกได้หลายอันดับ โดยไม่จำเป็นต้องมีวงจรกรองอื่นๆต่อขนานเพิ่มเข้าไปอีก ซึ่งทำให้ไม่จำเป็นต้องมีส่วนเพิ่มของชุดสวิทช์และปัญหาการซ่อมบำรุง

3. ในการใช้งานตัวกรองฮาร์มอนิกแบบกรองผ่านความถี่เดียว มักจะทำให้เกิดการเรโซแนนซ์แบบขนานระหว่างตัวกรองเอง กับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ที่ถูกรงไว้ ซึ่งในกรณีดังกล่าวการใช้ตัวกรองแบบผ่านความถี่สูง จึงเป็นทางเลือกที่นิยมใช้กัน

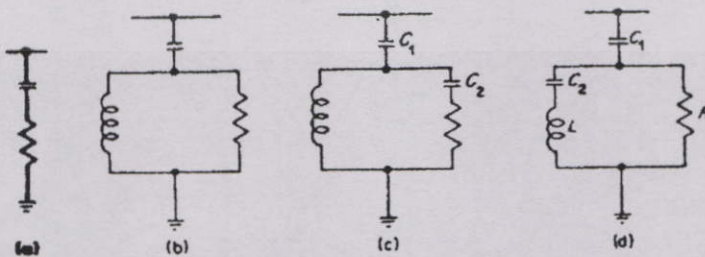
ซึ่งข้อเสียของการใช้งาน Damped filter จะมีดังนี้คือ

1. เพื่อให้จะให้ความสามารถในการกรองฮาร์มอนิกคล้ายกับตัวกรองแบบกรองผ่านความถี่เดียว ตัวกรองแบบนี้จะต้องถูกออกแบบให้มีค่าพิคกิ้งกำลัง (VA) ที่ความถี่หลักมูลสูงกว่า, แม้ว่าอาจจะมีความสามารถในการกรองที่อยู่ในระดับที่ต้องการ โดยค่ากำลังบนรีแอคทิฟที่ต้องชดเชยต่อระบบยังไม่เกินระดับที่ต้องการ, แต่โดยคุณสมบัติทั่วไปแล้วค่าอิมพีแดนซ์ต่ำที่สุดของตัวกรองชนิดนี้จะสูงกว่าแบบกรองผ่านความถี่เดียวที่ความถี่ที่ถูกรงไว้เสมอ

2. ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ตัวต้านทานและในอินดักเตอร์ปัดจะมีความสูงกว่า

6.4.1 ชนิดของตัวกรองแบบผ่านความถี่สูง

ชนิดของตัวกรองแบ่งออกเป็น 4 ชนิดคือ อันดับที่1, อันดับที่2, อันดับที่3 และแบบซี (C-type) แสดงดังรูปที่6.4 [1], [11], [13]



รูปที่6.4 ตัวกรองแบบผ่านความถี่สูง (a) แบบอันดับที่1, (b) แบบอันดับที่2, (c) แบบอันดับที่3, (d) แบบซี (C-type)

6.4.1.1 ตัวกรองแบบผ่านความถี่สูงอันดับที่1

โดยปกติแล้วตัวกรองชนิดนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้โดยมีข้อเสียคือ คาปาซิเตอร์ที่ใช้จะมีค่ามาก และกำลังงานสูญเสียที่ความถี่หลักมูลจะมีค่าสูง

6.4.1.2 ตัวกรองแบบผ่านความถี่สูงอันดับที่2

ตัวกรองชนิดนี้จะมีคุณสมบัติในการกรองดีที่สุด แต่ค่ากำลังงานสูญเสียที่ความถี่หลักมูลจะมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับแบบอันดับที่3, ซึ่งในทางปฏิบัติเป็นชนิดที่นิยมใช้มากที่สุด

6.4.1.3 ตัวกรองแบบผ่านความถี่สูงอันดับที่3

ข้อดีของตัวกรองชนิดนี้เมื่อเทียบกับแบบอันดับที่2คือค่ากำลังงานสูญเสียที่ความถี่หลักมูลที่มีค่าต่ำกว่า เนื่องอิมพีแดนซ์ที่เพิ่มขึ้นจากคาปาซิเตอร์ C_2 โดยที่ค้ำของคาปาซิเตอร์ C_2 จะต่ำกว่ามากเมื่อเทียบกับ C_1

6.4.1.4 ตัวกรองแบบผ่านความถี่สูงแบบซี (C-type)

ตัวกรองชนิดนี้จะมีคุณสมบัติในการกรองอยู่ระหว่างแบบที่ 2 กับแบบที่ 3, ข้อดีของตัวกรองชนิดนี้คือค่ากำลังงานสูญเสียที่ความถี่หลักมูลจะมีค่าต่ำเนื่องจากผลของการอนุกรมของ C_2 และ L วนไปที่ความถี่หลักมูล, แต่ก็จะมีข้อเสียในด้านการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติได้มากเมื่อค่าขององค์ประกอบ และความถี่หลักมูลเปลี่ยนแปลงไป

ตัวอย่างของผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบกรองผ่านความถี่สูงอันดับที่ 2 แสดงดังรูปที่ 6.5

ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองดังกล่าวแสดงดังสมการ [1], [11], [13]

$$Z = \frac{1}{j\omega C} + \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} \right)^{-1} \quad (6.12)$$

ความถี่ที่ตัวกรองถูกจูนให้กรองฮาร์มอนิก (Corner Frequency) คำนวณได้จากสมการที่ 6.3 และค่าแฟคเตอร์คุณภาพของตัวกรองชนิดนี้คือ

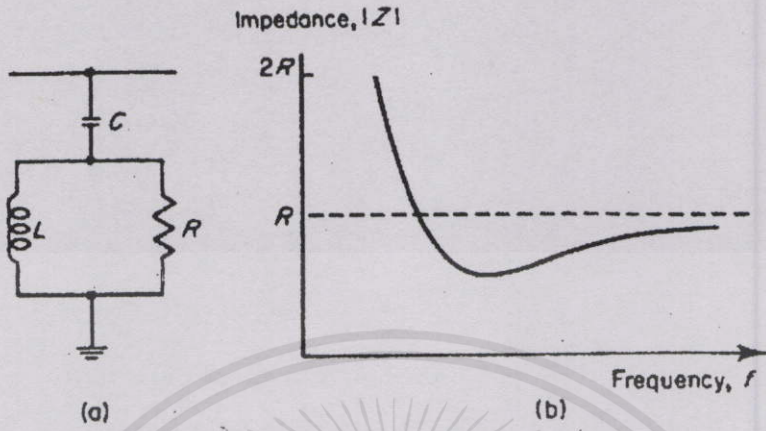
$$Q = \frac{R}{\sqrt{L/C}} = \frac{R}{X_L} = \frac{R}{X_C} \quad (6.13)$$

โดยสมการที่ใช้ในการออกแบบค่าคาปาซิแตนซ์และค่าอินดักแตนซ์ของตัวกรองสามารถใช้สมการที่ 6.6 ได้เช่นเดียวกัน

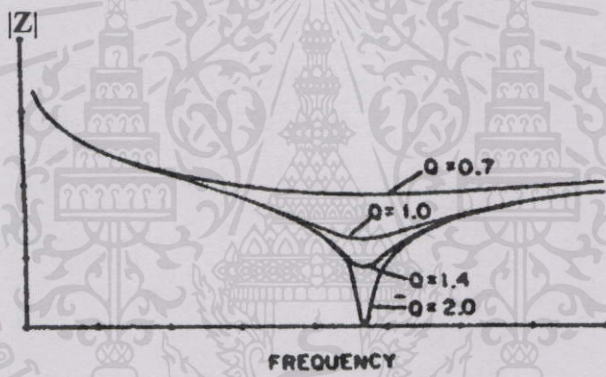
รูปที่ 6.6 และ 6.7 แสดงถึงผลของค่ารีซิสแตนซ์ในวงจรกรองกรณีก่อนและหลังการต่อตัวกรองเข้าสู่ระบบตามลำดับ

จากรูปที่ 6.7 จะเห็นว่าอิมพีแดนซ์ของระบบก็จะส่งผลกระทบต่อการตอบสนองต่อความถี่คล้ายกับที่เกิดขึ้นในกรณีตัวกรองแบบกรองผ่านความถี่เดียว, ตัวอย่างค่าแฟคเตอร์คุณภาพของตัว

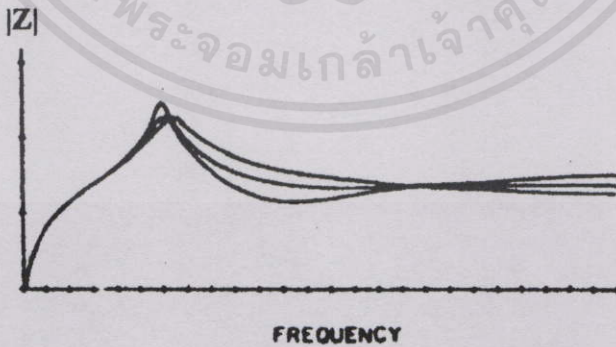
กรองชนิดนี้คือ 0.5-2.0 ซึ่งหมายถึงว่ากรณีมีค่าเท่ากับ 2 ตัวกรองก็จะมีคุณสมบัติในการกรองฮาร์โมนิกที่ดี ที่ความถี่ที่จูนไว้ และที่ความถี่ที่สูงขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ก็จะมีค่าสูงขึ้นและค่อนข้างคงที่,



รูปที่ 6.5 ตัวกรองแบบผ่านความถี่สูงอันดับที่2



รูปที่ 6.6 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองที่ค่าความต้านทานต่างๆ



รูปที่ 6.7 ผลตอบสนองทางความถี่ของตัวกรองเมื่อต่อเข้าสู่ระบบที่ค่าความต้านทานต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่า ส่วนในกรณีค่าแฟคเตอร์คุณภาพเท่ากับ 0.5 ลักษณะของอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ที่จูนไว้จะไม่ต่ำลงจนเห็นได้ชัดเจนซึ่งคุณสมบัติในการกรองก็จะต่ำกว่ากรณีข้างต้น เมื่อความถี่สูงขึ้นอิมพีแดนซ์จะมีแนวโน้มที่ไม่เปลี่ยนแปลง (ค่อนข้างคงที่เมื่อเปรียบเทียบกับอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ที่จูนไว้)

6.5 เกณฑ์ในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์ (Filter Design Criteria)

ขนาดของตัวกรองฮาร์มอนิกส์จะระบุตามค่ากำลังงานไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power) ขององค์ประกอบที่ความถี่หลักมูลที่ซึ่งชดเชยโดยตัวกรองเอง ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่ามีค่าประมาณค่ากำลังงานไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายออกมาจากคาปาซิเตอร์ที่เป็นองค์ประกอบในตัวกรองฮาร์มอนิก ดังนั้นขนาดโดยรวมของฟิลเตอร์ทุกอันคัมรวมกันจะถูกกำหนดโดยปริมาณของกำลังงานไฟฟ้าเสมือนที่ต้องการจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ และความสามารถในการจ่ายกำลังงานไฟฟ้าเสมือนดังกล่าวจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (ส่วนของผู้ผลิตไฟฟ้า) [13]

เกณฑ์ในการออกแบบฮาร์มอนิกส์ในทางอุดมคติคือ เพื่อขจัดผลกระทบที่ทำให้เกิดความเสียหายทั้งหมด ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความผิดเพี้ยนไปของรูปคลื่นสัญญาณเนื่องฮาร์มอนิกส์ในระบบ โดยรวมถึงผลกระทบที่เกิดในระบบการสื่อสารซึ่งในทางปฏิบัติเป็นสิ่งที่ไม่ได้ยาก จะอย่างไรก็ตาม เกณฑ์ในการออกแบบ แบบอุดมคติไม่สามารถทำให้เกิดความเหมาะสมได้พร้อมกันทั้งเหตุผลใน ส่วนทางด้านเทคนิคและค่าใช้จ่ายในการลงทุน, ในมุมมองทางด้านเทคนิคที่ใช้สิ่งที่จะกระทำได้ยากคือการประมาณค่าล่วงหน้าของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบทั้งหมด, ในส่วนมุมมองทางด้านค่าใช้จ่ายในการลงทุนพบว่าในการลดปัญหาการรบกวนในระบบสื่อสารในทางปฏิบัติทั่วไปเพื่อให้เกิดความเหมาะสมของค่าใช้จ่าย (Economical) สามารถทำได้ด้วยการวัดปริมาณฮาร์มอนิกบางส่วน ของระบบสื่อสารและบางส่วนของระบบไฟฟ้ากำลัง

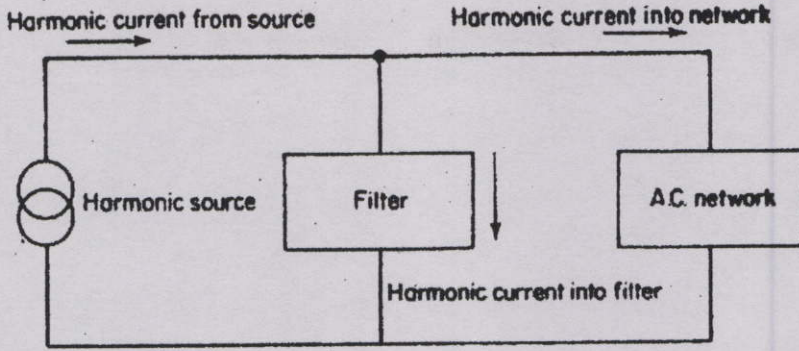
ปัญหาที่เกิดขึ้น โดยมากในทางปฏิบัติเกี่ยวกับการควบคุมปริมาณฮาร์มอนิกให้อยู่ในระดับที่ กำหนด ณ จุดต่อร่วมกับระบบไฟฟ้าอื่นๆ ซึ่งมักจะมีอยู่ในรูปของปริมาณแรงดันฮาร์มอนิก, กระแสฮาร์มอนิก หรือในบางครั้งอาจหมายถึงทั้งสองอย่าง, เกณฑ์ในการออกแบบมักจะกล่าวถึงการควบคุมปริมาณแรงดันฮาร์มอนิก มากกว่าในรูปของกระแสฮาร์มอนิก เนื่องจากการควบคุมปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกจะเป็นไปได้ง่ายกว่าการควบคุมกระแสฮาร์มอนิก ในขณะที่อิมพีแดนซ์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงไป

เพื่อการแสดงถึงการควบคุมปริมาณฮาร์มอนิกให้อยู่ในระดับที่ต้องการ การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกมักจะต้องประกอบไปด้วยขั้นตอนดังนี้คือ

6.5.1 การคำนวณค่าแรงดันฮาร์มอนิก จะกระทำโดยพิจารณาจากรวมที่แสดงถึงกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นจ่ายกระแสเข้าสู่ระบบที่ซึ่งประกอบไปด้วยตัวกรองฮาร์มอนิกส์ และอิมพีแดนซ์ของระบบที่ความถี่ที่สอดคล้องกับฮาร์มอนิก ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6.8

6.5.2 ผลที่ได้จากการคำนวณจากหัวข้อข้างต้นจะถูกนำไปคำนวณพารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่น ความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิก (Voltage Distortion, D) หรือ TIF และ IT ใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณ

6.5.3 การคำนวณแรงดันและกระแสที่ส่วนประกอบของตัวกรองจะต้องได้รับ ก็สำหรับตัวต้านทาน, ตัวเหนี่ยวนำ และคาปาซิเตอร์ จากนั้นก็จะเป็นการคำนวณพิคคของอุปกรณ์ดังกล่าวและกำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้น



รูปที่ 6.8 วงจรที่ใช้ในการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิก

โดยค่าพารามิเตอร์สามส่วนที่จะต้องใช้ในการคำนวณสำหรับการออกแบบตัวกรองคือ ค่ากระแสฮาร์มอนิก, อิมพีแดนซ์ของตัวกรองฮาร์มอนิก และอิมพีแดนซ์ของระบบ โดยข้อมูลเกี่ยวกับแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกควรจะพิจารณาตลอดช่วงการทำงานของโหลด, และในส่วนของอิมพีแดนซ์รวมของตัวกรองฮาร์มอนิกกับอิมพีแดนซ์ของระบบควรจะพิจารณาถึงช่วงความถี่ของฮาร์มอนิกที่อิมพีแดนซ์ดังกล่าวมีค่าสูงที่สุด ซึ่งอาจจะเป็นกรณีที่มีความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าสูงที่สุด โดยอาจทำการพล็อตกราฟของอิมพีแดนซ์ดังกล่าวในช่วงความถี่ที่พิจารณาเพื่อประโยชน์ในการกำหนดลักษณะของตัวกรองที่เหมาะสม ซึ่งในทางปฏิบัติปัญหาที่เกิดขึ้นคือการหาค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่ถูกต้องทำให้เกิดลักษณะของการพิจารณาได้หลายลักษณะซึ่งเกี่ยวข้องกับความต้องการที่ได้

ในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกอาจเห็นได้ว่า สามารถที่จะใช้ตัวกรองเพียงตัวเดียวที่มีช่วงความถี่ที่กว้างในการกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นทั้งหมด เช่นตั้งแต่อันดับที่ 5 สำหรับแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกแบบเครื่องแปลงผันแรงดันแบบ 6 ชั้น, อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวจะทำให้ขนาดของคาปาซิเตอร์ที่ใช้จะมีขนาดใหญ่มาก ซึ่งปกติแล้วในทางปฏิบัติถ้าพิจารณาถึงค่าใช้จ่าย (Economical) มักจะใช้ตัวกรองแบบกรองความถี่เดียว (Single Tuned Filter) กรองฮาร์มอนิกที่มีความถี่ต่ำๆ

6.6 IEEE 519-1992 สำหรับการควบคุมฮาร์มอนิกส์

มาตรฐาน IEEE 519-1992 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System [2] เป็นฉบับที่ปรับปรุงมาจาก IEEE 519-1981 โดยมีส่วนสำคัญที่เพิ่มขึ้นมาคือข้อกำหนดของปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ผู้ใช้แต่ละราย (Individual Consumers) จะสามารถจ่ายกลับคืนสู่ระบบได้ที่จุดต่อร่วมของทั้งสองฝ่าย ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้องค์ประกอบฮาร์มอนิกส์ในแรงดันไฟฟ้าของระบบมีค่าสูงขึ้น

มาตรฐานนี้มีขึ้นเพื่อใช้สำหรับระบบไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยโหลดแบบเชิงเส้นและที่ไม่เป็นเชิงเส้นต่อร่วมกัน โดยจะพิจารณาเน้นการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานของปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่จุดต่อร่วมของโหลดทั้งสองชนิด (Point of Common Coupling, PCC) หรืออาจใช้ในความหมายอื่นเช่น จุดที่มีการติดตั้งเครื่องวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์, จุดอื่นๆในระบบที่ต้องการพิจารณาปริมาณฮาร์มอนิก หรือในระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมนิยมใช้ในความหมายของจุดต่อระหว่างโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นกับโหลดชนิดอื่น ทั้งในกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะคงตัว (Steady State) เพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนกันระหว่างอุปกรณ์ไฟฟ้าของระบบ

ตารางที่ 6.1 เกณฑ์มาตรฐานของฮาร์มอนิกส์ในแรงดันไฟฟ้า

Voltage Distortion Limits

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
69 kV and below	3.0	5.0
69.001 kV through 161 kV	1.5	2.5
161.001 kV and above	1.0	1.5

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

ตารางที่ 6.2 เกณฑ์มาตรฐานของฮาร์มอนิกส์ในกระแสไฟฟ้า

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_h/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
$<20^*$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L .

where

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC.

I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

ลักษณะของค่าที่กำหนดในมาตรฐานจะแสดงถึงความเข้มงวดกับระบบที่มีขนาดใหญ่กว่า โดยขนาดของระบบจะพิจารณาจากอัตราส่วนของค่ากระแสลัดวงจรที่จุด PCC (I_{sc}) กับค่าเฉลี่ยต่อปีของกระแสอาร์เอ็มเอสสูงสุดที่ความถี่หลักมูลที่ระบบต้องการ (I_L) หรือในกรณีของระบบที่เริ่มใช้งานไม่ครบ 1 ปีอาจหมายถึงกระแสอาร์เอ็มเอสสูงสุดที่ความถี่หลักมูลที่ระบบต้องการ, โดยค่าเกณฑ์มาตรฐานสำหรับแรงดันฮาร์มอนิกส์ และกระแสฮาร์มอนิกส์ (สำหรับระบบ 120-69,000 โวลต์) ของ IEEE Std. 519-1992 แสดงดังตารางที่ 1 และ 2

ในตารางที่ 1 ที่แรงดันไฟฟ้าในระบบต่ำกว่า 69 kV ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกส์ในระบบแต่ละอันดับจะถูกกำหนดไว้ไม่เกิน 3% และปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกส์โดยรวม (%THD) ต้องไม่เกิน 5% (เทียบกับแรงดันที่ความถี่หลักมูล), ส่วนในตารางที่ 2 ที่แรงดันไฟฟ้าในระบบต่ำกว่า 69 kV ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบแต่ละอันดับจะถูกกำหนดไว้เป็นช่วงๆ โดยเมื่ออันดับสูงขึ้นค่าที่กำหนดในมาตรฐานก็จะมีแนวโน้มสูงขึ้น และปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์โดยรวมจะกำหนดด้วยค่า %TDD (Total Demand Distortion) (เปอร์เซ็นต์ดังกล่าวเทียบกับค่ากระแส I_L) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ [2]

$$\%TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \times 100 \quad (6.14)$$

I_n : กระแสฮาร์มอนิกส์อันดับที่ n (A_{rms})

I_L : ค่าเฉลี่ยต่อปีของกระแสอาร์เอ็มเอสสูงสุดที่ความถี่หลักมูลที่ระบบต้องการ (15 or 30 minute demand)

ค่ามาตรฐานในตารางเป็นค่าที่ใช้สำหรับการออกแบบในระบบกรณีเป็นสภาวะที่มีปัญหามากที่สุด (Worst case) และจะต้องเป็นสภาวะการทำงานของระบบที่คงตัวแล้ว (มากกว่า 1 ชั่วโมง), ซึ่งในกรณีเป็นสภาวะการทำงานที่ยังไม่คงตัวเช่น ช่วงเริ่มต้นการทำงาน หรือ สภาวะการทำงานที่ไม่ปกติ ค่ามาตรฐานในตารางอาจเพิ่มขึ้นจากเดิมได้อีกประมาณ 50%

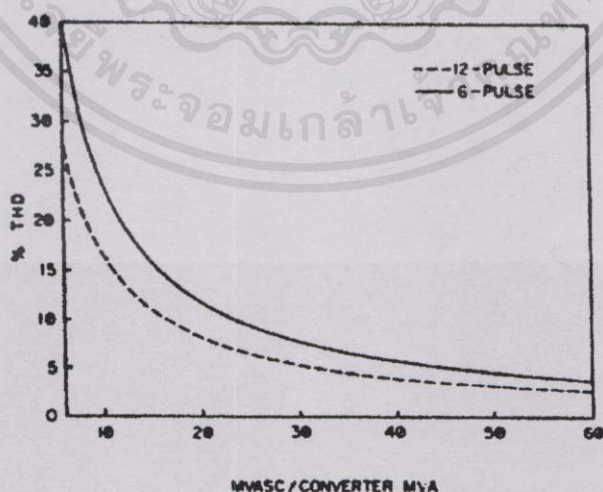
ค่าในตารางมาตรฐานนี้เป็นค่าที่ใช้กำหนดปริมาณฮาร์มอนิกส์สำหรับโหลดที่ใช้เป็นแบบ เรคตีไฟลเลอร์ 6 พัลส์ และโหลดอื่นๆโดยทั่วไป โดยในกรณีที่มีการใช้เทคนิคการเลื่อนเฟสของสัญญาณด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า หรือ ใช้คอนเวอร์เตอร์ที่มีจำนวนพัลส์ (q) มากกว่า 6, ค่ามาตรฐานในตารางสำหรับฮาร์มอนิกส์อันดับที่เป็นไปตามคุณลักษณะ (Characteristic Harmonic Orders) จะต้องใช้ค่าที่สูงขึ้นจากเดิมโดยเป็นค่าที่คูณด้วย $\sqrt{q/6}$, เช่น ในกรณีคอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์ ค่ามาตรฐานสำหรับกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 11 (ยกตัวอย่างกรณี $I_{sc}/I_L < 20$) จะมีค่าเท่ากับ $2.0\% \times \sqrt{12/6} = 2.828\%$

6.7 การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบไม่คำนึงถึงค่ากำลังงานเสมือน (Minimum Filter Design)

Minimum Filter [1] คือการออกแบบที่มีเป้าหมายของการออกแบบที่การควบคุมฮาร์มอนิก โดยใช้ค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด โดยมีการชดเชยค่ากำลังงานไฟฟ้าเสมือนบ้างบางส่วนจากที่ระบบต้องการทั้งหมด, โดยจุดที่มีการพิจารณาเป็นส่วนสำคัญคือขนาดของชุดคาปาซิเตอร์ (Capacitor Bank) โดยขนาดดังกล่าวจะถูกกำหนดโดยกำลังงานไฟฟ้าเสมือนที่ความถี่หลักมูลบวกด้วยของค์ประกอบส่วนของฮาร์มอนิกที่แบ่งออกมาจากระบบ, ขนาดของกระแสที่ความถี่หลักมูลจะขึ้นอยู่กับขนาดของชุดคาปาซิเตอร์ และขนาดของชุดคาปาซิเตอร์ที่แท้จริงจะได้จากการใช้ขั้นตอนของการทำซ้ำ (Iterative Process)

กราฟในรูปที่ 6.9 แสดงถึงความสัมพันธ์ของปริมาณฮาร์มอนิกรวมในแรงดันไฟฟ้า (%THD_v) กับค่าอัตราส่วนพิกัดกำลังลัดวงจรต่อพิกัดกำลังของคอนเวอร์เตอร์ (MVA_{sc}/MVA) ซึ่งจะเห็นได้ว่าในกรณีคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ และค่ามาตรฐานที่กำหนดโดยทั่วไปของ % THD_v คือ 5%, เมื่ออัตราส่วน $MVA_{sc}/MVA > 45$, ค่า % THD_v จะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน (5%) โดยไม่จำเป็นต้องต่อตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบ

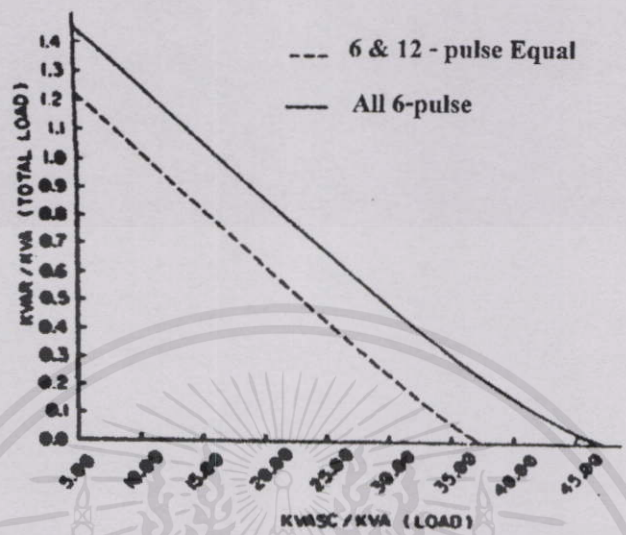
ค่าพิกัดกำลังเสมือนที่แท้จริงของ Minimum Filter สามารถกำหนดได้จากข้อมูลในกราฟรูปที่ 6.10 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของ อัตราส่วนพิกัดกำลังของคาปาซิเตอร์ต่อพิกัดกำลังของคอนเวอร์เตอร์ ($kvar/MVA$) และค่าอัตราส่วนพิกัดกำลังลัดวงจรต่อพิกัดกำลังของคอนเวอร์เตอร์ (MVA_{sc}/MVA) ที่ซึ่ง % THD_v มีค่าต่ำกว่า 5%, โดยเงื่อนไขที่ใช้ในการสร้างกราฟข้อมูลนี้คือ



รูปที่ 6.9 การเปลี่ยนแปลงของค่า %THD_v ที่สัมพันธ์กับอัตราส่วนพิกัดกำลังลัดวงจร
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ใช้เป็นแบบกรองผ่านความถี่เดียว และถูกจูนไว้ที่ฮาร์มอนิกอันดับ 4.7

- 2. ไม่มีฮาร์โมนิกที่ความถี่ต่ำกว่าอันดับที่ 5
- 3. ไม่มีการต่อคาปาซิเตอร์อื่นๆในระบบ



รูปที่ 6.10 พิกัดกำลังของคาปาซิเตอร์ที่ต้องการสำหรับตัวกรองฮาร์โมนิกที่สัมพันธ์กับอัตราส่วนพิกัดกำลังลัดวงจร

กราฟในรูปที่ 6.10 เป็นกรณีโหลดที่ต่ออยู่ในระบบมี 2 ลักษณะคือ โหลดฮาร์โมนิกรวมจากแหล่งกำเนิดแบบ 6 พัลส์ชนิดเดียว และแบบโหลดฮาร์โมนิกรวมจากแหล่งกำเนิดแบบ 6 พัลส์ กับแบบ 12 พัลส์จำนวนเท่าๆกัน

ข้อมูลในรูปที่ 6.10 แสดงความหมายถึงการที่พิกัดกำลังเสมือนของตัวกรองมีค่าสูงขึ้นจากตำแหน่งในกราฟก็จะทำให้ %THD มีค่าลดลงจากระดับ 5% และถ้าพิกัดกำลังเสมือนของตัวกรองมีค่าต่ำลงก็จะให้ผลในลักษณะตรงกันข้าม, ซึ่งผลของการเพิ่มพิกัดกำลังเสมือนของตัวกรองจะทำให้พิกัดแรงดันที่คาปาซิเตอร์ต้องสูงขึ้น โดยรายละเอียดในการพิจารณาของประเด็นนี้จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

6.8 พิกัดต่างๆสำหรับส่วนประกอบของตัวกรองฮาร์โมนิก

6.8.1 ส่วนคาปาซิเตอร์

ข้อจำกัดเกี่ยวกับ แรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า และกำลังงานไฟฟ้า ของคาปาซิเตอร์ที่ยอมให้เกินพิกัดได้ตามมาตรฐาน (IEEE Std. 18-1992 Standard for Shunt Power Capacitors) มีดังนี้คือ

kvar	135%
rms voltage	110%
sum of peak voltage	120%
rms current	180%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดจุดประสงค์อื่น ยกเว้นให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่กำหนดดังกล่าวเป็นค่าที่ควรจะมีการตรวจสอบเมื่อคาปาซิเตอร์จะต่อใช้งานอยู่ในระบบที่มีฮาร์มอนิกเกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่นำคาปาซิเตอร์ไปใช้เป็นส่วนประกอบของตัวกรองฮาร์มอนิก, ในการที่นำคาปาซิเตอร์ไปใช้เป็นส่วนประกอบของตัวกรองฮาร์มอนิก โดยตัวรีแอคเตอร์อนุกรมเข้าไปจะทำให้แรงดันที่ตัวคาปาซิเตอร์มีค่าสูงขึ้นซึ่งสามารถคำนวณได้จาก [1]

$$V_{cap} = \frac{n^2}{n^2 - 1} V_{sys} \quad (6.15)$$

ดังนั้นค่ากำลังงานเสมือนที่จ่ายโดยคาปาซิเตอร์ก็จะสูงขึ้นตามไปด้วยซึ่งคำนวณได้จาก

$$k \text{ var}_{cap} = \frac{(V_{cap L-L})^2}{Z_C - Z_L} \quad (6.16)$$

และค่ากำลังงานเสมือนที่จ่ายโดยตัวกรองฮาร์มอนิกสามารถคำนวณได้จาก [1]

$$k \text{ var}_{gr} = \frac{(V_{L-L})^2}{Z_C - Z_L} \quad (6.17)$$

ดังนั้นในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกที่คำนึงถึงการชดเชยค่ากำลังงานเสมือนผู้ออกแบบอาจจะต้องมีการทำซ้ำเกี่ยวกับการเลือกค่าคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมก่อนที่จะกำหนดพิกัดต่างที่คาปาซิเตอร์

ในส่วนความสามารถในการทนกระแสจริงของคาปาซิเตอร์โดยปกติแล้วจะมีค่าต่ำกว่า 180% (ข้อกำหนดของมาตรฐาน) เนื่องจากฟิวส์ที่อยู่ภายในชุดคาปาซิเตอร์แต่ละวงจรย่อยจะมีพิกัดกระแสอยู่ที่ 125-165%

ในการออกแบบเพื่อกำหนดค่าของชนิดจำกัดที่ตัวคาปาซิเตอร์จะสามารถรับได้ในส่วนของ แรงดัน และกระแสอาร์เอ็มเอส, ผลรวมของค่าขอของแรงดัน ควรจะเลือกให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าพิกัดที่ระบุที่ตัวคาปาซิเตอร์ เพื่อประโยชน์เกี่ยวกับความสามารถในการทนสภาวะการเกินพิกัดในกรณีแรงดันเกินในระบบ และกรณีชุดคาปาซิเตอร์ไม่สมดุลซึ่งจะทำให้ปริมาณฮาร์มอนิกไม่สมดุลตามไปด้วย

6.8.1 ส่วนรีแอคเตอร์

รีแอคเตอร์ที่นิยมใช้เป็นส่วนประกอบของตัวกรองฮาร์มอนิกคือแบบแกนอากาศ ซึ่งจะมีคุณสมบัติแบบเชิงเส้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับความถี่ และปริมาณกระแสไฟฟ้า, ในทางปฏิบัติรีแอคเตอร์ที่นำมาใช้ในระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมจะมีขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่าความผิดพลาดเท่า

กับ $\pm 5\%$ และค่าอัตราส่วน X/R ปกติแล้วจะอยู่ในช่วง 50-150 ซึ่งถ้าต้องการค่าที่ต่ำกว่านี้ก็สามารถทำได้โดยอนุกรมตัวต้านทานเข้าไปกับรีแอกเตอร์

การกำหนดพิกัดของรีแอกเตอร์ควรจะต้องเลือกรีแอกเตอร์สามารถทนต่อสภาวะการลัดวงจรที่จุดต่อระหว่างรีแอกเตอร์กับคาปาซิเตอร์ และการระบุถึงระดับการฉนวนของรีแอกเตอร์ (BIL) ก็ควรจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับกรณีที่ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ระดับแรงดันไฟฟ้าเดียวกัน ซึ่งพารามิเตอร์ที่ควรระบุเกี่ยวกับพิกัดของรีแอกเตอร์มีดังนี้คือ

1. กระแสอาร์เอ็มเอสที่ความถี่หลักมูล
2. กระแสอาร์เอ็มเอสที่ความถี่ฮาร์มอนิก
3. พิกัดกระแสลัดวงจร
4. ค่าอัตราส่วน X/R
5. ระดับแรงดันที่ใช้งาน
6. BIL (The Basic Impulse Isolation Level)

6.9 การเลือกตัวกรองฮาร์มอนิกและการหาค่าประสิทธิผลของตัวกรอง

ก่อนที่จะมีการเลือกลักษณะของตัวกรองฮาร์มอนิกส์ (Filter Scheme) ผู้ออกแบบควรจะต้องทำการศึกษาเกี่ยวกับค่าตัวประกอบกำลังในระบบเสียก่อน เพื่อที่จะได้กำหนดค่าเป้าหมายในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกที่ต้องการที่จะชดเชยค่าตัวประกอบกำลังหรือไม่ โดยถ้าเป็นกรณีระบบดังกล่าวต้องการการชดเชยค่าตัวประกอบกำลังการออกแบบก็จะต้องกำหนดค่าพิกัดกำลังเสมือนที่ตัวกรองฮาร์มอนิกให้สอดคล้องกับความต้องการด้วย แต่ถ้าเป็นกรณีที่ระบบไม่ต้องการการชดเชยค่าตัวประกอบกำลังการออกแบบควรจะใช้วิธี Minimum Design Filter ซึ่งเป็นวิธีที่การออกแบบไม่คำนึงถึงพิกัดกำลังเสมือนที่ตัวกรองฮาร์มอนิกจะต้องจ่ายให้กับระบบ

ในการกำหนดค่าประสิทธิผลของตัวกรองฮาร์มอนิกสุดท้ายแล้วจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการลดปริมาณฮาร์มอนิกในระบบ โดยจะคำนึงถึงในส่วนของการเปลี่ยนแปลงลักษณะของระบบด้วย โดยเมื่อระบบส่วนที่เป็นแหล่งจ่ายมีการเปลี่ยนแปลง ค่าอิมพีแดนซ์ที่มองจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์กลับไปยังแหล่งจ่ายต้นทางก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย และผลในลักษณะดังกล่าวก็เกิดขึ้นเช่นกันเมื่อระบบจ่ายโหลดเปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่ที่ระดับต่ำๆ (Light Load) จนถึงที่พิกัดของระบบ, ฯลฯ ดังนั้นการพิจารณาถึงสมรรถนะของตัวกรองฮาร์มอนิกจะต้องพิจารณาถึงสภาวะอื่นๆ ในระบบด้วย

ในการพิจารณาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของระบบ ควรจะมีการประสานงานกับส่วนของผู้ผลิตและควบคุมระบบไฟฟ้าเพื่อขอข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับค่าพิกัดกำลังลัดวงจรแบบสามเฟสที่จุดต่อของระบบ ทั้งค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด เพื่อคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่จะนำมาวิเคราะห์สมรรถนะของตัวกรองฮาร์มอนิก, ในขั้นถัดไปก็จะเป็นการรวบรวมสภาวะต่างๆ

ของระบบที่เป็นไปได้เพื่อจัดลักษณะของระบบที่จะทำการวิเคราะห์ให้สอดคล้อง โดยลักษณะของการวิเคราะห์ที่ควรจะทำคือการหาผลตอบสนองทางความถี่ของระบบ (Frequency Scans)

รายละเอียดโดยทั่วไปในการหาผลตอบสนองทางความถี่ของระบบควรจะทำที่แต่ละจุดของระบบที่มีปัญหาเมื่อมีการต่อแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในระบบ โดยสิ่งที่จะได้รับจากการวิเคราะห์ที่สำคัญคือสภาวะการเกิดเรโซแนนซ์เมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลง และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง, โดยสิ่งสำคัญที่ควรระวังคือการเลื่อนไปของความถี่เรโซแนนซ์ขนาบเมื่อพารามิเตอร์ในระบบเปลี่ยนไป เช่นในกรณีมีการใช้งานโหลดเต็มพิกัด ความถี่เรโซแนนซ์ขนาบจะตรงกับฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 6 แต่ในกรณีระบบจ่ายโหลดเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของพิกัด ความถี่เรโซแนนซ์ขนาบจะตรงกับฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 4.8 ซึ่งจะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงโหลดในช่วงดังกล่าวจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์มีโอกาสตรงกับฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ซึ่งสอดคล้องกับแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในชนิดที่เป็นคอนเวอร์เตอร์แบบ 3 และ 6 พัลส์ ซึ่งทำให้เกิดฮาร์มอนิกในอันดับดังกล่าว โดยข้อมูลที่ได้ดังกล่าวก็จะเป็นแนวทางในการปรับเปลี่ยนแก้ไขการออกแบบในตอนแรก หรือไม่ก็จะเป็นการกำหนดเงื่อนไขในการทำงานของระบบเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดปัญหาเนื่องจากเรโซแนนซ์แบบขนาบ

ขั้นตอนต่อไปที่ควรพิจารณาคือการคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้น ทั้งในส่วนองค์ประกอบที่ความถี่หลักมูล และองค์ประกอบที่ความถี่ฮาร์มอนิก โดยโพลาร์ทที่แสดงถึงขั้นตอนในการออกแบบตามที่ได้กล่าวมาแสดงดังรูปที่ 6.11 และรูปที่ 6.12

6.10 การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์ด้วยวิธีวิเคราะห์ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของระบบ

Transfer Function [11] เป็นวิธีที่ใช้ในการกำหนดจำนวนชุดและชนิดของตัวกรองฮาร์มอนิกให้สอดคล้องกับข้อกำหนดของมาตรฐาน (ในงานวิจัยนี้คือ IEEE Std. 519-1992) โดยพิจารณาจากการพล็อตกราฟ Current Divider Transfer Function (H_{cds}) เทียบกับค่า Minimum Filter Attenuation Ratio หรือ Current Spectrum Transfer Function (H_{spec}) ที่ฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ซึ่งเมื่อพิจารณาตามรูปที่ 6.13 (Thevenin Equivalent System Network Impedance), H_{cds} สามารถหาได้จากสมการที่ 6.18 [11]

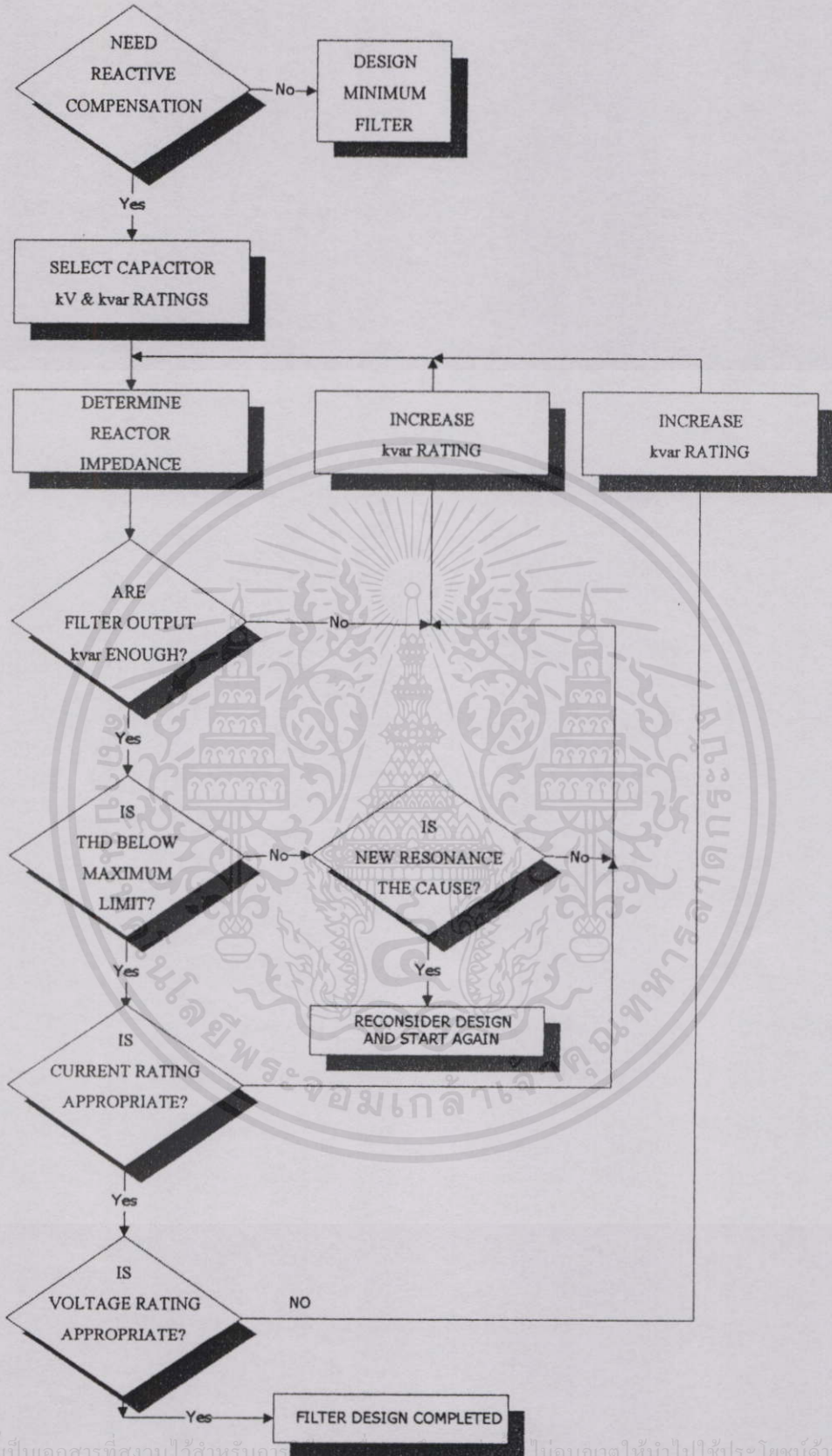
$$H_{cds}(s) = \frac{I_s(s)}{I(s)} = \frac{Z_f(s)}{Z_f(s) + Z_s(s)} \quad (6.18)$$

$I_s(s)$: กระแสที่ไหลเข้าระบบ, แอมป์

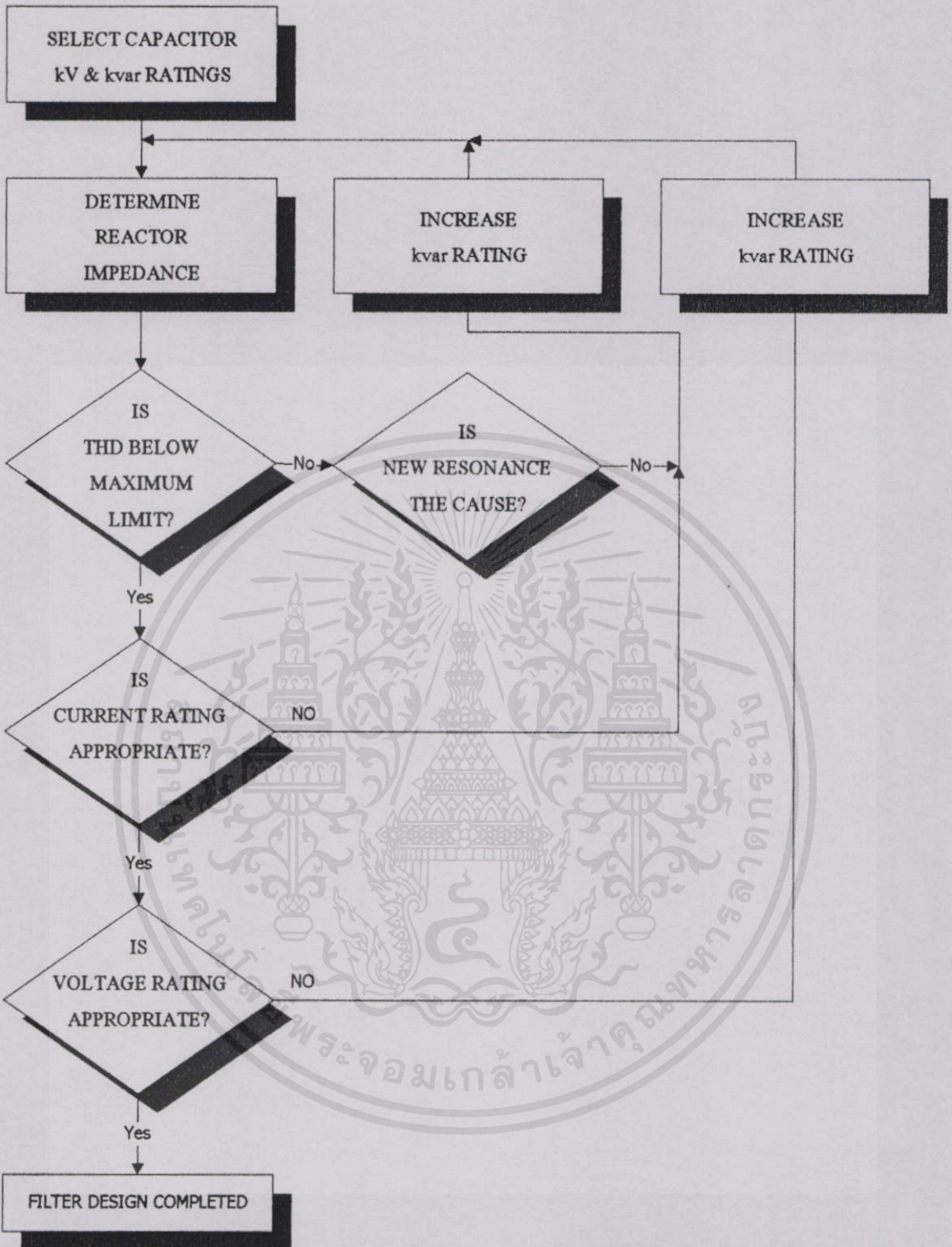
$I(s)$: เป็นเอกสารที่ กระแสที่ป้อนเข้าในระบบ, แอมป์

$Z_f(s)$: ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองฮาร์มอนิก, โอห์ม

$Z_s(s)$: ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ, โอห์ม

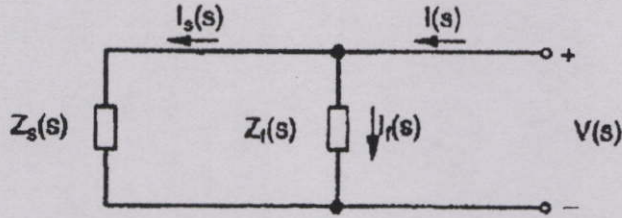


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 6.11 ลำดับขั้นในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกกรณีคำนึงถึงการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง



รูปที่ 6.12 ลำดับขั้นตอนการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกกรณีไม่คำนึงถึงการปรับตัวประกอบกำลัง

เอกสารโดยค่า H_{spec} เป็นค่าที่มีความหมายถึงอัตราส่วนของกระแสฮาร์มอนิกที่ขอมให้ไหลกลับสู่ระบบได้ตามมาตรฐาน IEEE-519 ต่อกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในระบบที่ฮาร์มอนิกแต่ละอันดับ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 6.19 [11]



รูปที่ 6.13 วงจรเสมือนของระบบเมื่อต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์

$$H_{spec} = \frac{|I_{IEEE-519}|}{|I|} \quad (6.19)$$

$|I_{IEEE-519}|$: ค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ขอมให้ไหลเข้าระบบตามมาตรฐาน IEEE519-1992 แอมป์, (Based on I_L)

$|I|$: ค่ากระแสฮาร์มอนิกที่จ่ายเข้าในระบบจากแหล่งกำเนิด, แอมป์, (Based on I_L)
ค่าที่ได้จากสมการที่ 2 และ 3 ก่อนที่จะนำไปพล็อต กราฟเทียบกันจะต้องทำให้เป็นหน่วย dB เสียก่อน (คูณด้วย 20Log_{10})

6.10.1 เงื่อนไขในการพิจารณา

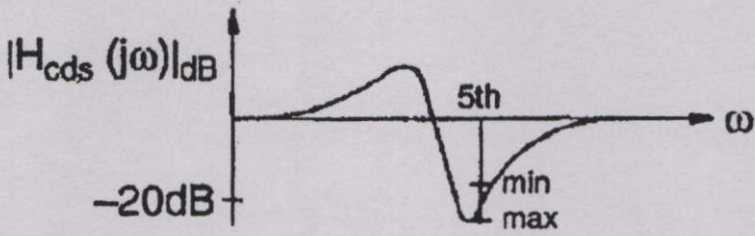
6.10.1.1 ถ้า $H_{cds} > 0\text{dB}$: $I_s(s) > I(s)$, หมายถึงค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ไหลกลับสู่ระบบสูงกว่า ค่ากระแสฮาร์มอนิกที่แหล่งกำเนิด ซึ่งระบบอาจเกิดการเรโซแนนซ์แบบขนาน

6.10.1.2 ถ้าค่า $H_{spec} > 0\text{dB}$: $|I_{IEEE-519}| > |I|$, หมายถึงค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ไหลกลับสู่ระบบตามมาตรฐาน สูงกว่าค่ากระแสฮาร์มอนิกที่แหล่งกำเนิด ซึ่งหมายถึงฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นที่แหล่งกำเนิด ต่ำกว่ามาตรฐานที่จุด PCC ในกรณีนี้ก็ไม่จำเป็นต้องต่อตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบ

6.10.1.3 ถ้า $H_{cds} > H_{spec}$ (เส้นกราฟ H_{cds} มีระดับสูงกว่าค่า H_{spec}) : หมายถึงกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลกลับสู่ระบบที่จุด PCC สูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ซึ่งจะต้องมีการพิจารณาต่อตัวกรองฮาร์มอนิกเข้าในระบบ

6.10.1.4 ถ้า $H_{cds} < H_{spec}$ (เส้นกราฟ H_{cds} มีระดับต่ำกว่าค่า H_{spec}) : หมายถึงกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลกลับสู่ระบบที่จุด PCC ต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ซึ่งอาจเป็นผลจากการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกเข้าในระบบ (ดูรูปที่ 6.14)

รูปที่ 6.14 แสดงตัวอย่างในกรณีพิจารณาฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5th อันดับเดียว ซึ่งเป็นกรณีกราฟ H_{cds} ในที่นี้มีค่าเท่ากับ -20dB ต่ำกว่า H_{spec} (ทั้งค่าต่ำสุดและสูงสุด) ที่ความถี่ของฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5 ซึ่งมีความหมายตรงกับหัวข้อที่ 6.10.1.4



รูปที่ 6.14 ตัวอย่างของการพล็อตกราฟ H_{cds} เทียบกับค่า H_{spec} ที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5th

6.10.2 ขั้นตอนในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์

6.10.2.1 เริ่มจากการนำข้อมูลของระบบและข้อมูลของฮาร์มอนิกที่วัดได้ในระบบมาสร้างแบบจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (PSPICE) และกำหนดจุดที่จะพิจารณาปริมาณฮาร์มอนิก (PCC Point)

6.10.2.2 กำหนดค่า H_{spec} (dB) ที่ฮาร์มอนิกอันดับต่างๆที่ต้องการพิจารณา จากนั้นนำค่า H_{spec} พล็อตลงในกราฟที่ฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ เพื่อพิจารณาถึงปริมาณฮาร์มอนิกว่ามีอันดับใดบ้างที่เกินมาตรฐาน ($H_{spec} < 0$)

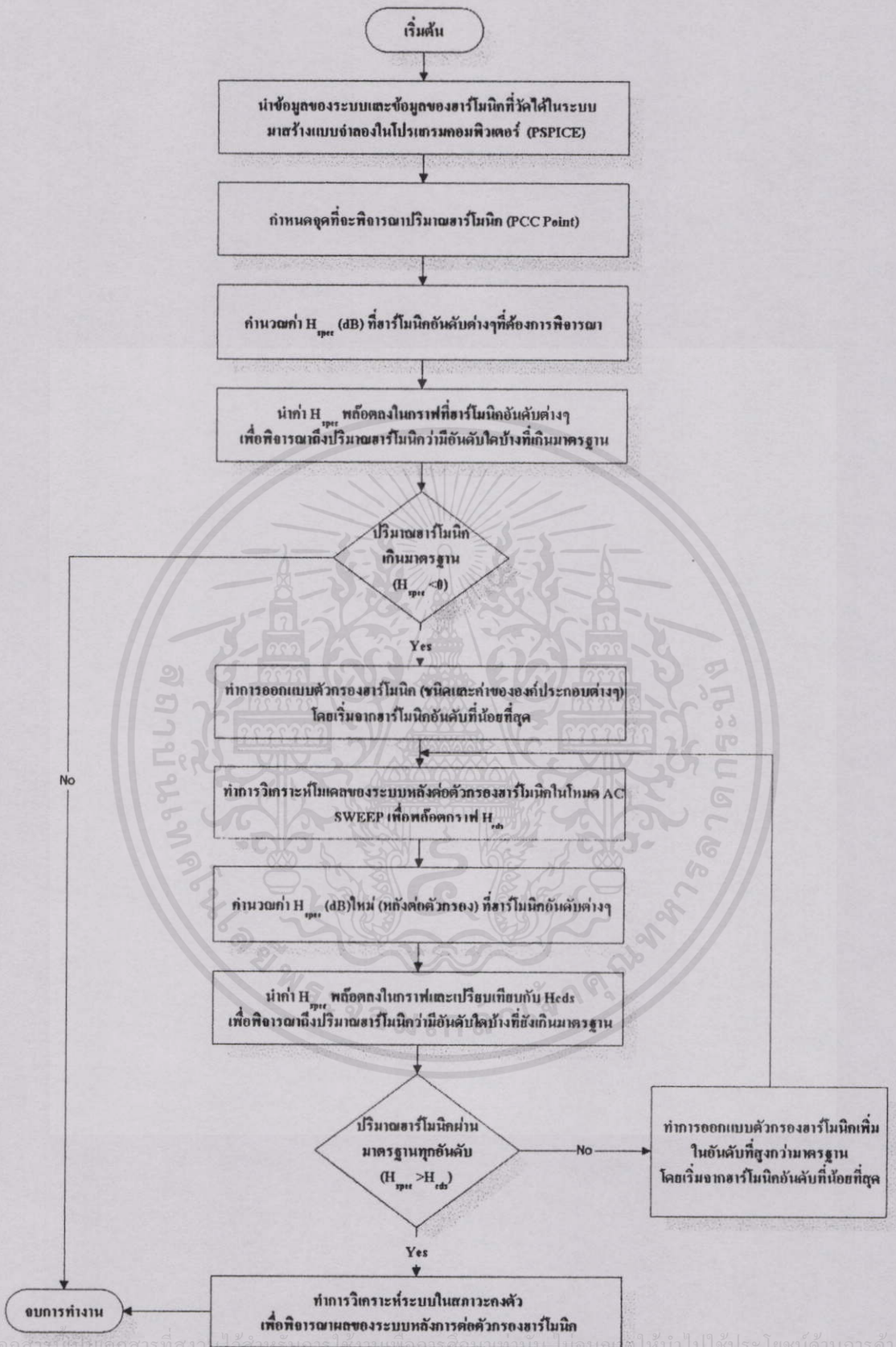
6.10.2.3 ในกรณีมีฮาร์มอนิกบางอันดับเกินค่ามาตรฐาน ให้ทำการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก (ชนิดและค่าขององค์ประกอบต่างๆ) โดยเริ่มจากฮาร์มอนิกอันดับที่น้อยที่สุด

6.10.2.4 นำเอาแบบจำลองของระบบในกรณีต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ดังกล่าว วิเคราะห์หาผลตอบสนองทางความถี่ในโหมด AC Sweep เพื่อพล็อตกราฟ H_{cds} (ในที่นี้คือ $20 \log_{10} I_{Lys}/I_{V2}$), จากนั้นนำข้อมูลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ตัวกำเนิดและกระแสฮาร์มอนิกส์ตาม IEEE Std. ของระบบที่จุด PCC กำหนดค่า H_{spec} ที่อันดับต่างๆ กรณีหลังต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์และนำไปพล็อตเทียบกับกราฟ H_{cds}

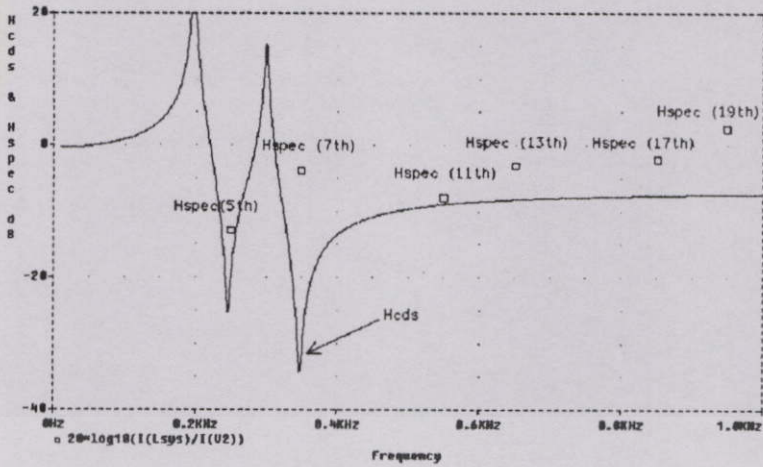
6.10.2.5 เปรียบเทียบ H_{cds} กับค่า H_{spec} อีกครั้ง โดยอาจพิจารณาเพิ่มอันดับของตัวกรองเพื่อให้ $H_{cds} < H_{spec}$ สำหรับฮาร์มอนิกทุกอันดับ และอาจมีการใช้ตัวกรองชนิด High Pass สำหรับฮาร์มอนิกตั้งแต่อันดับที่ 11 ซึ่งเรียกขั้นตอนการออกแบบในช่วงนี้ว่าวิธี "Iterative" (การแบ่งกำลังงานรีแอกทีฟที่ต้องชดเชยในระบบให้กับตัวกรองอาจแบ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เท่ากันหรือพิจารณาตามปริมาณฮาร์มอนิกส์ในระบบ)

6.10.2.6 ทำการวิเคราะห์ระบบในสภาวะคงตัว เพื่อพิจารณาผลของระบบหลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกในส่วนของการามีเตอร์ที่สำคัญคือ %THD_v, %THD_i, DPF, PF, P1, Q1 and S1

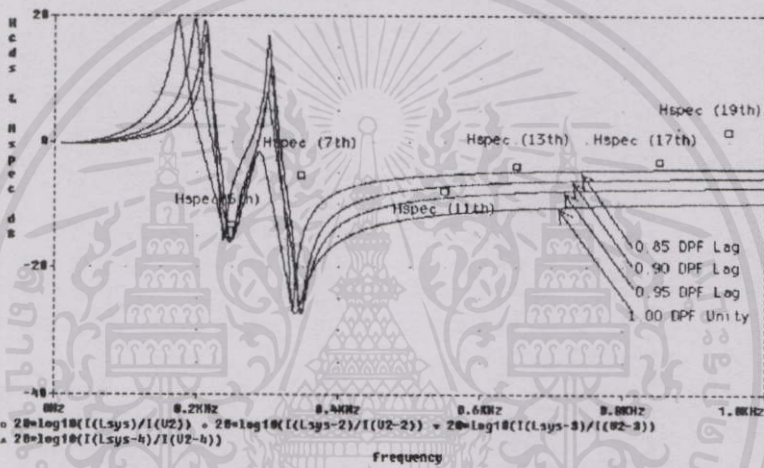
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



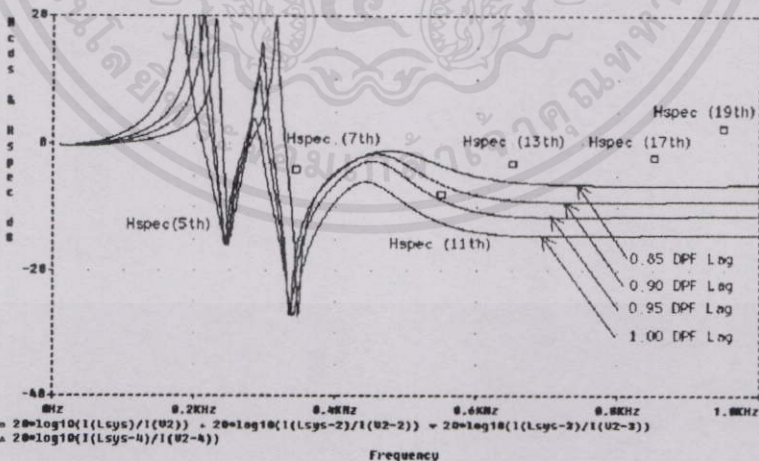
รูปที่ 6.15 โพลซาร์ทขั้นตอนการออกแบบด้วยวิธีการวิเคราะห์ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของระบบ



รูปที่ 6.16 ตัวอย่างการออกแบบครณีตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5th, 7th DPF = 0.95



รูปที่ 6.17 ตัวอย่างการออกแบบครณีตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5th, 7th DPF = 0.85-1.00



รูปที่ 6.18 ตัวอย่างการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5th, 7th, damped 11th DPF = 0.85-1.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ต่างรูปที่ 6.16 แสดงตัวอย่างของผลการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกด้วยวิธีการวิเคราะห์ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของแบ่งกระแสในระบบ (Current Divider Transfer function, H_{cds} & H_{spec}) โดยในกรณี

นี้จะเห็นว่า $H_{cdfs} < H_{spec}$ (ปริมาณกระแสฮาร์โมนิกต่ำกว่าค่ามาตรฐาน) สำหรับฮาร์โมนิกทุกอันดับเมื่อติดตั้งตัวกรองแบบความถี่เดียว ในอันดับที่ 5th และ 7th รวม 2 อันดับ และปรับปรุงค่า DPF ให้มีค่าเท่ากับ 0.95 (Lagging) โดยค่ากำลังงานรีแอกทีฟ (Q_r) ที่ชดเชยโดยตัวกรองแต่ละตัวเท่ากับ 50% ของกำลังงานรีแอกทีฟรวม

ประโยชน์ที่จะได้รับจากการออกแบบตัวกรองฮาร์โมนิกด้วยวิธีนี้อีกส่วนหนึ่งก็คือการกำหนดค่าแฟคเตอร์คุณภาพให้กับตัวกรองแต่ละชุดให้มีความเหมาะสม ซึ่งในที่นี้หมายถึงการออกแบบค่ากำลังงานรีแอกทีฟให้กับตัวกรองแต่ละชุดเพื่อให้ได้คุณสมบัติในการตอบสนองทางความถี่ที่ดีที่สุดในการควบคุมปริมาณฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบ โดยค่าตัวประกอบกำลังของระบบยังคงอยู่ในช่วง 0.85 (Lagging)-1.00 (Unity) ซึ่งแสดงตัวอย่างดังรูปที่ 6.17 (กรณี 5th, 7th Single Tuned) และรูปที่ 6.18 (กรณี 5th, 7th Single Tuned and Second Order Damped Filter 11th) ซึ่งจากทั้งสองกรณีจะเห็นว่า $H_{cdfs} < H_{spec}$ สำหรับฮาร์โมนิกทุกอันดับที่เฉพาะค่า DPF 0.95Lagging และ 1.00 Unity

โดยสรุปในการออกแบบตัวกรองฮาร์โมนิกส์ด้วยการวิเคราะห์ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของระบบจะทำให้สามารถวิเคราะห์ปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบตัวกรองได้ 6 ประการคือ

1. ชุดตัวกรองฮาร์โมนิกส์ (ชนิด และจำนวน) เพื่อให้ปริมาณฮาร์โมนิกส์ต่ำกว่ามาตรฐาน
2. กำลังงานรีแอกทีฟรวมที่ต้องการจ่ายให้กับระบบ
3. กำลังงานรีแอกทีฟสำหรับตัวกรองแต่ละชุด (Q-factor) เพื่อกำหนดคุณสมบัติให้เหมาะสม
4. การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในการกรองฮาร์โมนิกส์ เนื่องจากค่าผิดพลาดของ L-C
5. การเกิดเรโซแนนซ์ขนานตรงกับฮาร์โมนิกส์ที่จะกรองเนื่องจากค่าผิดพลาดของ L-C
6. การเกิดเรโซแนนซ์ขนานตรงกับความถี่ต่ำกว่าความถี่ที่จูนไว้ที่ตัวกรอง

6.11 การวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ของปริมาณฮาร์โมนิกส์กับค่าเปอร์เซ็นต์โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น

เป็นการวิเคราะห์ระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (PSPICE) เพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของปริมาณฮาร์โมนิก (%THDv & %THDi) กับค่าเปอร์เซ็นต์ของโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นต่างๆ กันโดยการวิเคราะห์ควรจะทำทั้งก่อนและหลังการแก้ปัญหาฮาร์โมนิกในระบบ ซึ่งสามารถแบ่งการวิเคราะห์นี้ออกเป็น 2 ลักษณะคือ

6.11.1 กรณีพิกัดกำลังของโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นคงที่ [4]

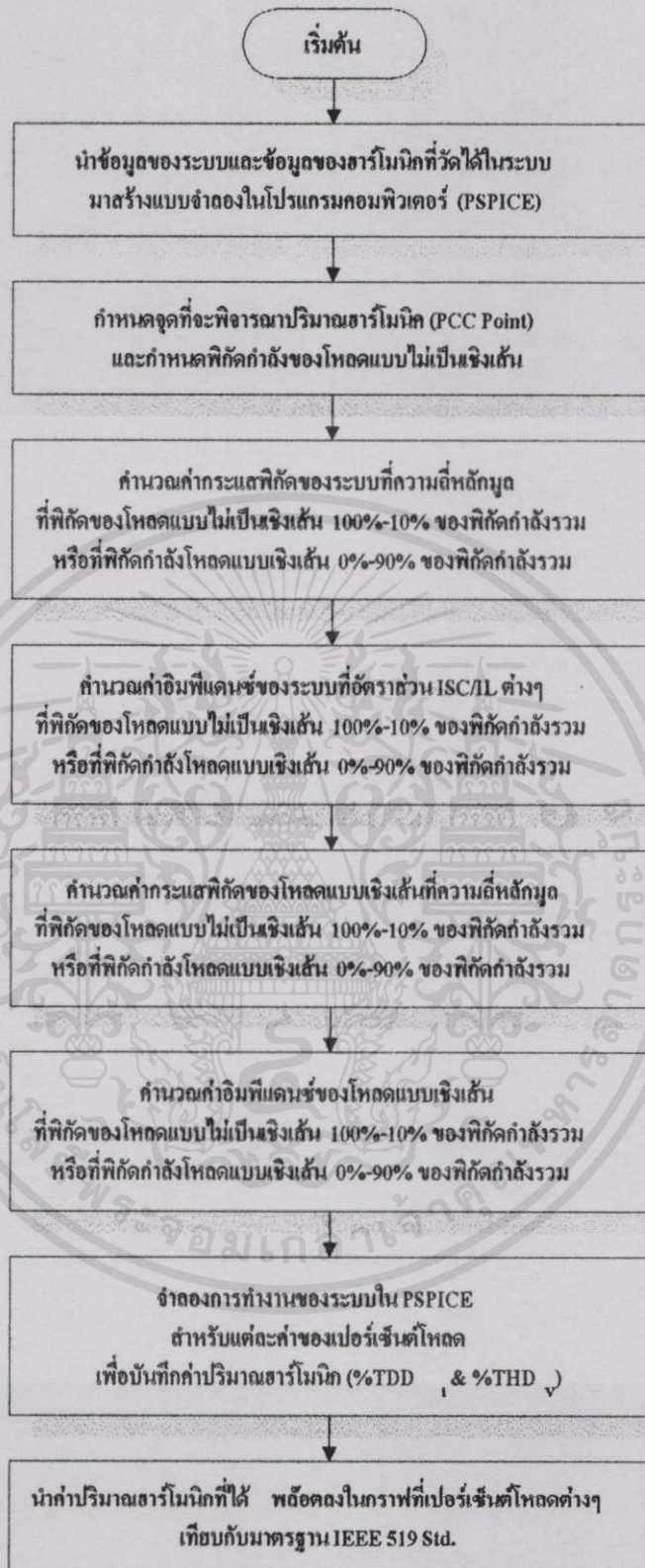
เป็นการวิเคราะห์ระบบเพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของปริมาณฮาร์โมนิก (%THDv & %THDi หรือฮาร์โมนิกอันดับหลักๆ) กับค่าเปอร์เซ็นต์โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นในระบบ ที่ค่าอัตราส่วน I_{sc}/I_L ค่าต่างๆ โดยพิกัดกำลังของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นจะมีค่าคงที่ เช่นมีพิกัดเท่ากับ 1kVA ดังนั้น ความหมายของ 80% Non linear load ก็จะหมายถึงมีการใช้งานโหลดแบบไม่เป็นเชิง

เส้น 1kVA โดยคิดเป็น80% ของพิกัดกำลังรวม และมีการใช้งานโหลดแบบเชิงเส้น 20% ซึ่งเท่ากับ $20 \times 1\text{kVA} / 80 = 0.25\text{kVA}$ โดยจะเห็นว่าพิกัดกำลังรวมจะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้ค่าอัตราส่วนเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งขั้นตอนในการดำเนินงานแสดงดังรูปที่6.19

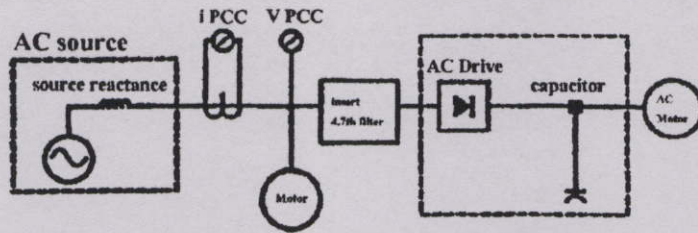
โดยระบบตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์เป็นกรณีตัวอย่างแสดงดังรูปที่6.20, เป็นระบบแบบสามเฟส สมดุลย์ มีโหลดต่อใช้งานสองแบบคือ โหลดแบบเชิงเส้น (มอเตอร์ไฟฟ้าพิกัดอยู่ในช่วง 0-900hp) และโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (ไดโอดเรกติไฟเลอร์แบบสามเฟส ควบคุมมอเตอร์ขนาด 100hp, ไม่มีโซลิตที่ส่วนแรงดันคัสซี และคาปาซิเตอร์ขนาด 7,500 μF)



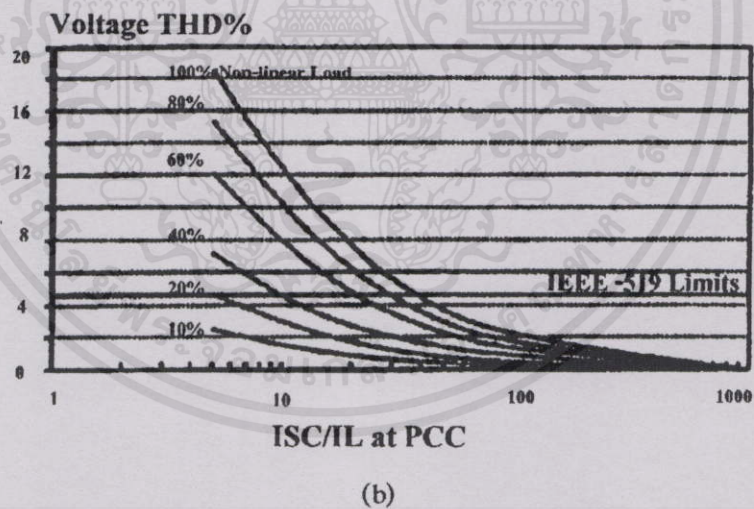
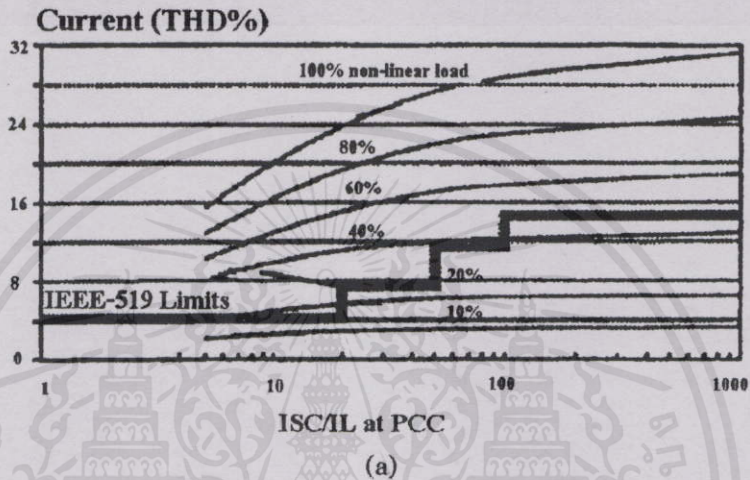
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และข้อมูลอ้างอิงในเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 6.19 ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณสารไอออนิกส์เทียบกับเปอร์เซ็นต์โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น
 กรณีพิกัดกำลังของ โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นคงที่



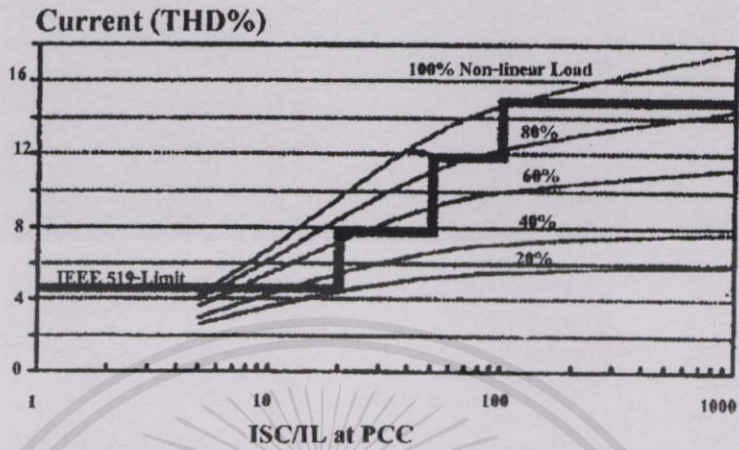
รูปที่ 6.20 ตัวอย่างระบบที่วิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิก



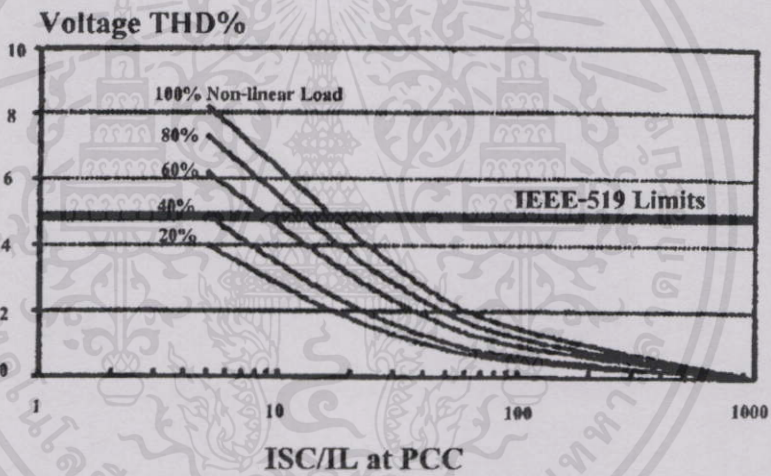
รูปที่ 6.21 ตัวอย่างปริมาณฮาร์มอนิก (%THD_v & %THD_i) กับค่าเปอร์เซ็นต์โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นในระบบสำหรับระบบที่มีค่า I_{sc}/I_L ต่างๆกัน กรณีไม่มีตัวกรองฮาร์มอนิก

ซึ่งตัวอย่างของกราฟที่ได้แสดงดังรูปที่ 6.21 จะพบว่า %THD_v จะมีค่าต่ำกว่าระดับมาตรฐานตลอดช่วง I_{sc}/I_L ที่เปอร์เซ็นต์โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นประมาณ 25 % และในกรณีค่า I_{sc}/I_L ตั้งแต่ 50 ขึ้นไป เปอร์เซ็นต์โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ระดับฮาร์มอนิกไม่เกินมาตรฐานมีค่าประมาณต่ำ

กว่า 40 % เล็กน้อย, และในส่วนของ %THD_v จะเห็นว่าปริมาณฮาร์มอนิกจะต่ำกว่ามาตรฐานตลอดช่วง I_{sc}/I_L เมื่อมีการใช้งานโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นต่ำกว่า 20%



(a)

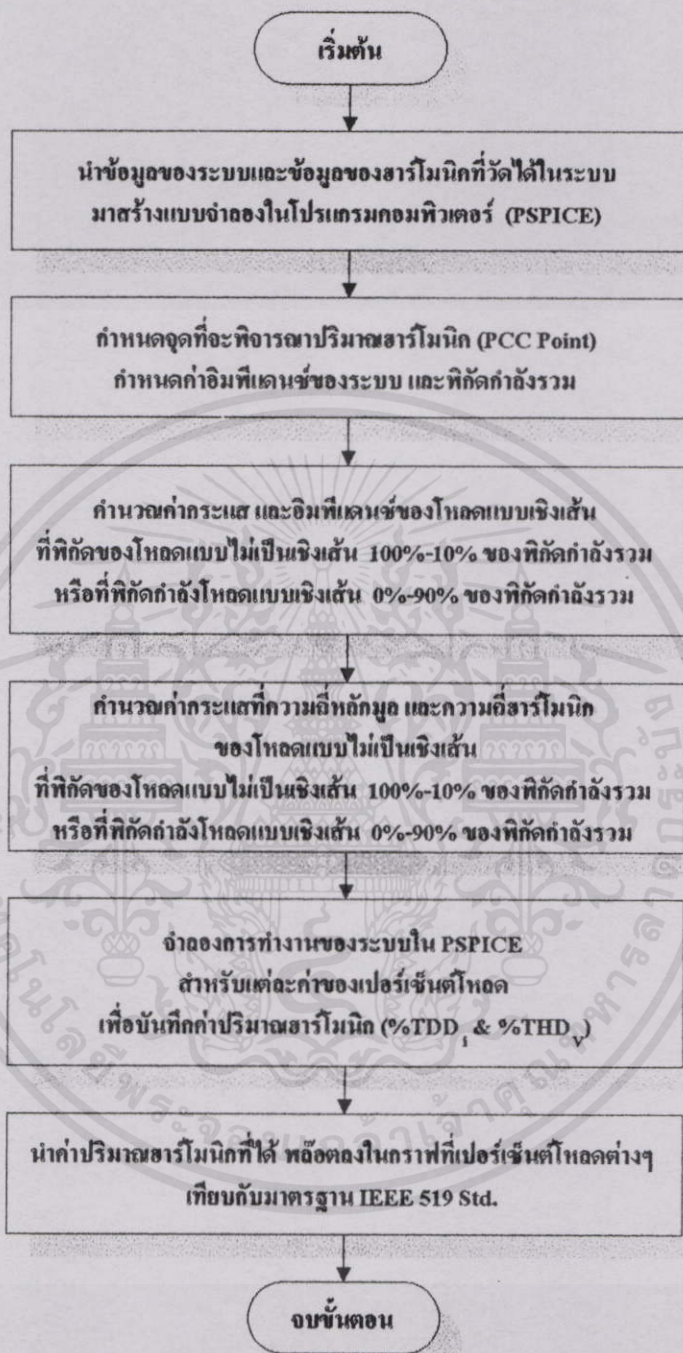


(b)

รูปที่ 6.22 ตัวอย่างปริมาณฮาร์มอนิก (%THD_v & %THD_i) กับค่าเปอร์เซ็นต์โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นในระบบสำหรับระบบที่มีค่า I_{sc}/I_L ต่างๆกัน กรณีมีตัวกรองฮาร์มอนิก 4.7th

และในรูปที่ 6.22 เป็นตัวอย่างของกราฟที่ได้กรณีหลังมีการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 4.7th ซึ่งจะพบว่า %THD_i จะมีค่าต่ำกว่าระดับมาตรฐานตลอดช่วง I_{sc}/I_L ที่เปอร์เซ็นต์โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นประมาณ 40% และในกรณีเปอร์เซ็นต์โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นในช่วง 40%-100% ระดับฮาร์มอนิกไม่เกินมาตรฐานที่ค่า I_{sc}/I_L เป็นบางช่วง, และในส่วนของ %THD_v จะเห็นว่าปริมาณฮาร์มอนิกจะต่ำกว่ามาตรฐานตลอดช่วง I_{sc}/I_L เมื่อมีการใช้งานโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นต่ำกว่า 60% แต่ถ้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.11.2 กรณีพิกัดกำลังของระบบโดยรวมครั้งที่ [12]

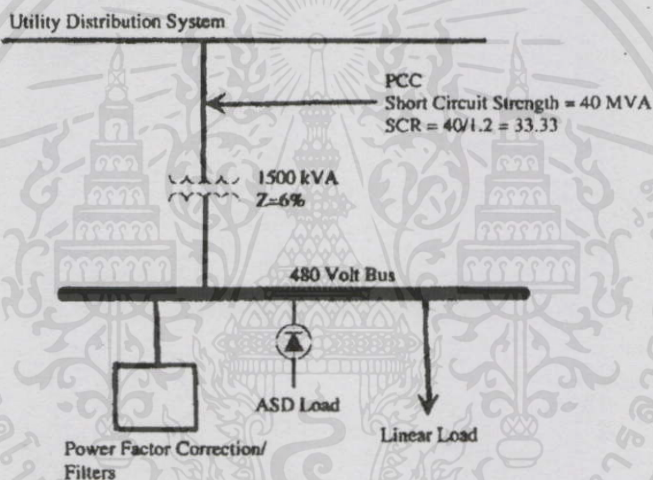


รูปที่ 6.23 ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณฮาร์โมนิกส์เทียบกับเปอร์เซ็นต์โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น กรณีพิกัดกำลังของระบบมีค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เป็นการวิเคราะห์ระบบเพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของปริมาณฮาร์โมนิก (%THD_v & %THD_i หรือฮาร์โมนิกอันดับหลักๆ) กับค่าเปอร์เซ็นต์โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นในระบบ ที่ค่าอัตราส่วน I_{sc}/I_L คงที่ค่าเดียวเท่านั้น โดยพิกัดกำลังของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นจะมีค่าไม่คงที่ โดยแปร

เปลี่ยนไปตามพิกัดกำลังของโหลดแบบเชิงเส้นเพื่อให้พิกัดกำลังรวมคงที่ เช่นระบบพิกัดรวมเท่ากับ 1kVA ดังนั้น ความหมายของ 80% Non linear load ก็จะหมายถึงมีการใช้งานโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น 800VA โดยคิดเป็น 80% ของพิกัดกำลังรวม และมีการใช้งานโหลดแบบเชิงเส้น 20% ซึ่งเท่ากับ $20 \times 1\text{kVA}/100 = 200\text{VA}$ ซึ่งขั้นตอนในการดำเนินงานแสดงดังรูปที่ 6.23

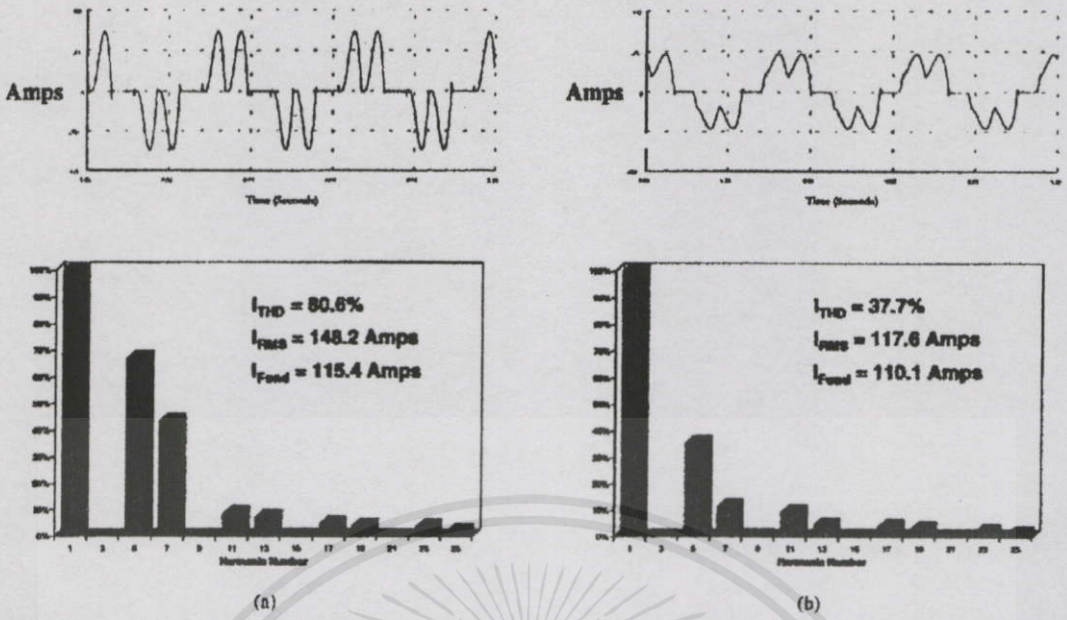
โดยระบบตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์เป็นกรณีตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 6.24, เป็นระบบแบบสามเฟส สมดุลย์ ความต้องการกำลังงานสูงสุดเฉลี่ยคือ 1,200kVA 480V_{L-L} พิกัดกำลังลัดวงจรที่จุด PCC เท่ากับ 40MVA ค่าอัตราส่วน $I_{sc}/I_L = 40/1.2 = 33.33$ มีโหลดต่อใช้งานสองแบบคือ โหลดแบบเชิงเส้น และโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ, ASD, ซึ่งมี 2 ประเภทคือ ASD ขนาด 100-hp ไม่มีใช้ในส่วนแรงดันดีซี (แบบที่ 1) และ ASD ขนาด 100-hp มีใช้ 3% ในส่วนแรงดันดีซี (แบบที่ 2), ความแตกต่างของฮาร์มอนิกของโหลดทั้งสองประเภทแสดงดังรูปที่ 6.25



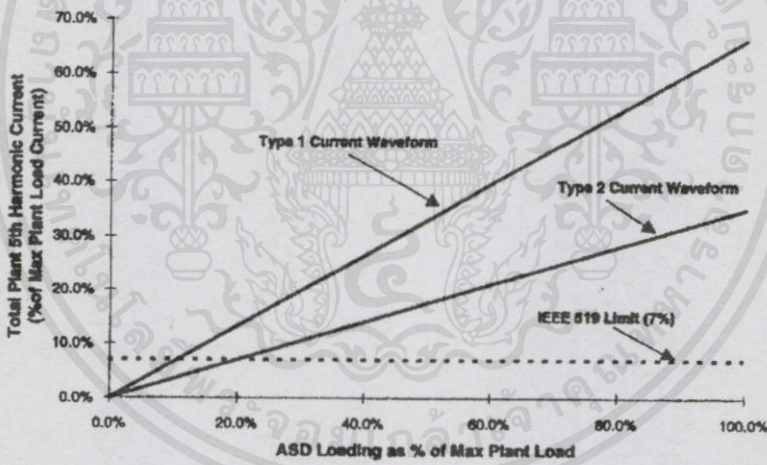
รูปที่ 6.24 ตัวอย่างระบบที่วิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิก

ผลการวิเคราะห์สำหรับค่า %H_{d5} (กรณีตัวอย่าง) เทียบกับมาตรฐาน IEEE 519 Limits ที่ได้แสดงดังรูปที่ 6.26 ซึ่งจะเห็นว่าในกรณีที่ยังไม่มีมาตรการกรองฮาร์มอนิกในระบบ ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 จะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานเมื่อมีการใช้งานโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นไม่เกิน 10% สำหรับแบบที่ 1 และไม่เกิน 20% สำหรับแบบที่ 2 ซึ่งมีค่าค่อนข้างจะต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



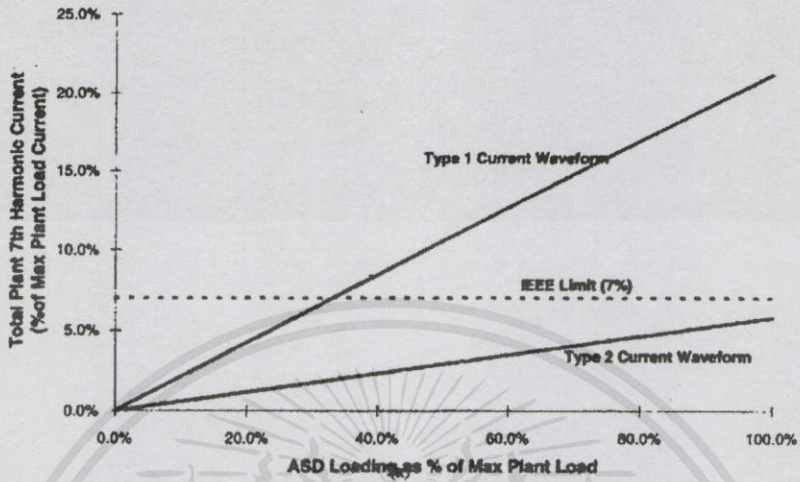
รูปที่ 6.25 ASD ขนาด 100-hp ไม่มีโซ่ในส่วนแรงดันคัตซี (a) และ ASD ขนาด 100-hp มีโซ่ 3% ในส่วนแรงดันคัตซี (b)



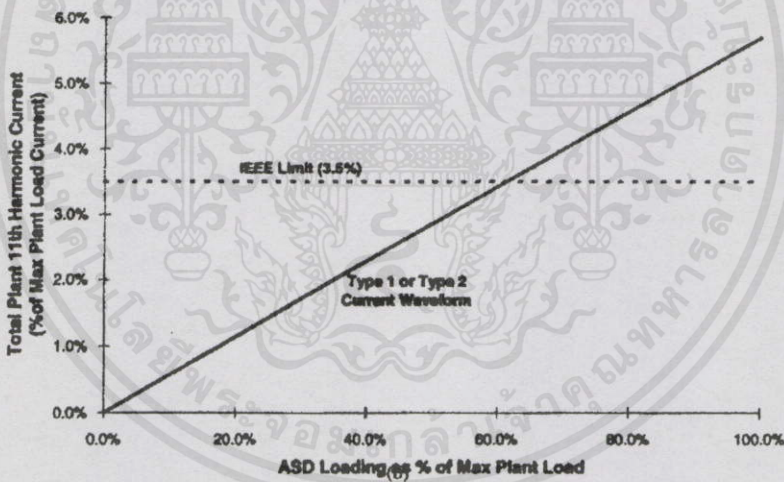
รูปที่ 6.26 ความสัมพันธ์ของ %Hd₅ กับ เปอร์เซนต์โหลดแบบไม่เชิงเส้นจาก 0-100% เมื่อยังไม่มีการชดเชยฮาร์มอนิกในระบบ

รูปที่ 6.27 และ 6.28 เป็นตัวอย่างที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของปริมาณกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 7th และ 11th เทียบกับเปอร์เซนต์โหลดแบบไม่เชิงเส้นเมื่อมีการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกแบบกรองผ่านความถี่เดียวโดยจุดไปที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 4.7 และมีขนาดเท่ากับ 500-kvar ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณฮาร์มอนิกดังกล่าวจะไม่เกินค่ามาตรฐานเมื่อมีการใช้งาน โหลดแบบไม่เชิงเส้นไม่เกิน 35% สำหรับแบบที่ 1 และสามารถใช้ได้ถึง 100% สำหรับแบบที่ 2, ส่วนในกรณีกระแสฮาร์มอนิก

อันดับที่11th จะไม่เกินค่ามาตรฐานเมื่อมีการใช้งานโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นไม่เกิน 60% สำหรับแบบที่1 และแบบที่2



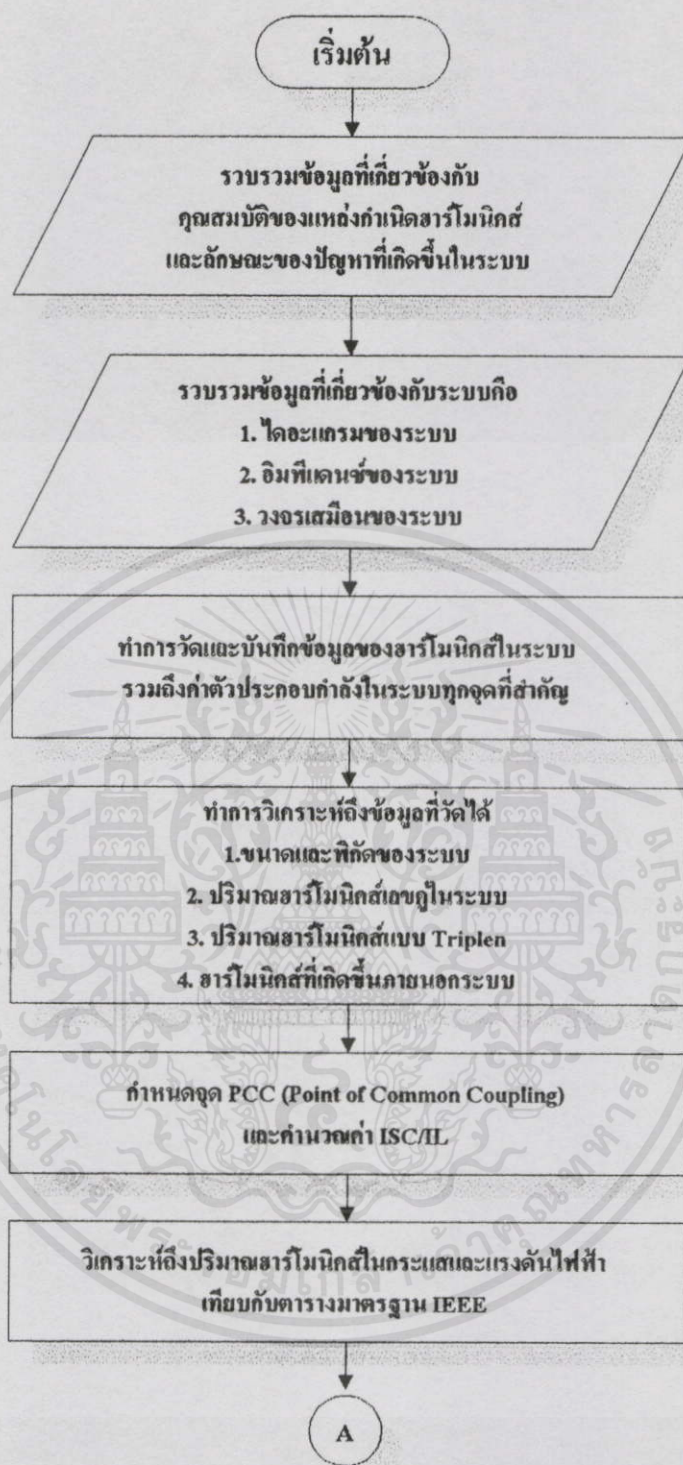
รูปที่6.27 ความสัมพันธ์ของ %Hd₇ กับ เปอร์เซนต์โหลดแบบไม่เชิงเส้นจาก 0-100% เมื่อมีตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่4.7th ในระบบ



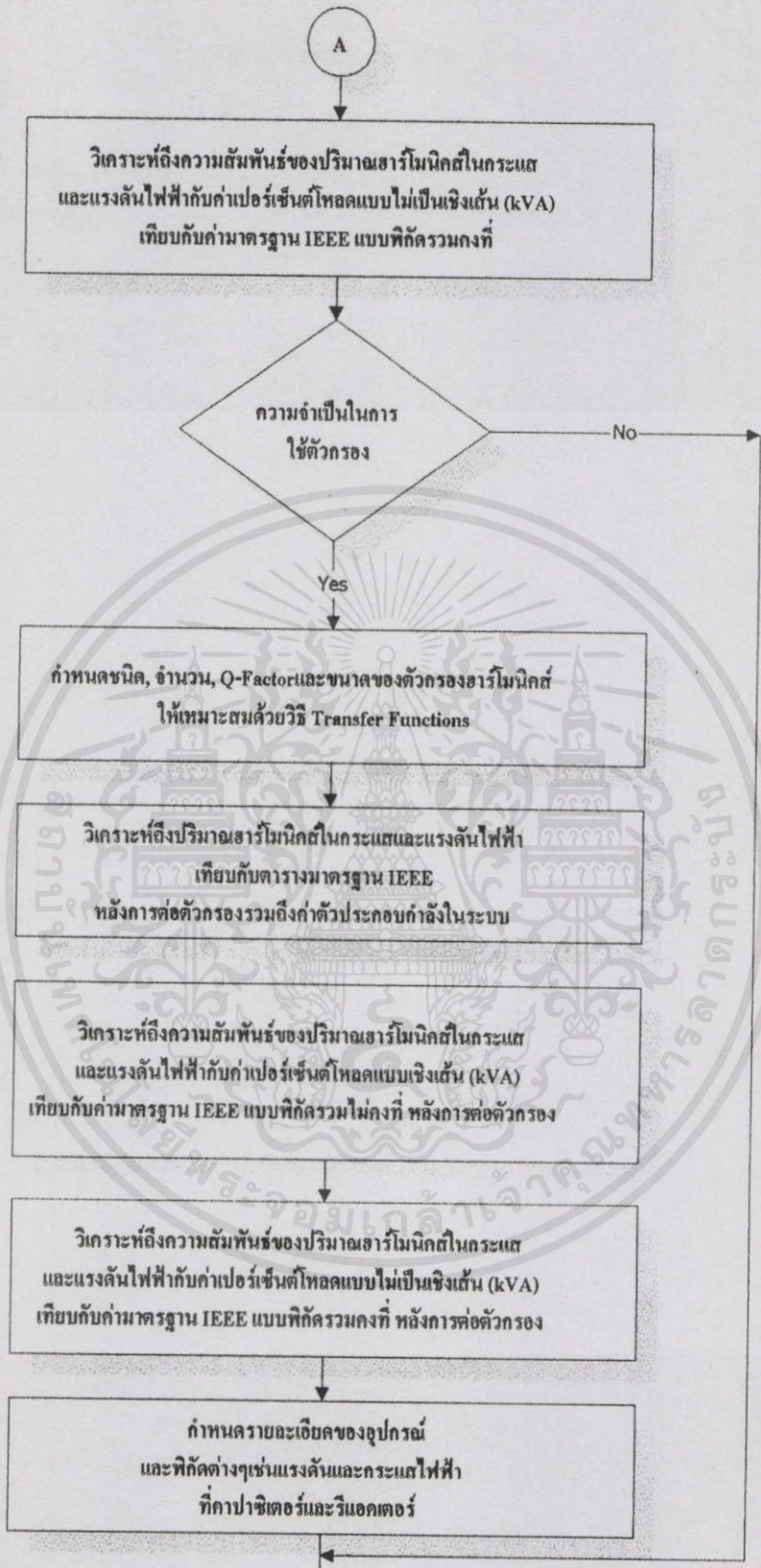
รูปที่6.28 ความสัมพันธ์ของ %Hd₁₁ กับ เปอร์เซนต์โหลดแบบไม่เชิงเส้นจาก 0-100% เมื่อมีตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่4.7th ในระบบ

จากรายละเอียดของเทคนิคต่างๆเกี่ยวกับการวิเคราะห์ระบบและการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น จะสามารถเรียบเรียงเป็นขั้นตอนในการออกแบบที่จะใช้สำหรับกรณีตัวอย่างในงานวิจัยนี้ได้ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคคลเฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบหรือเผยแพร่ข้อมูลซึ่งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

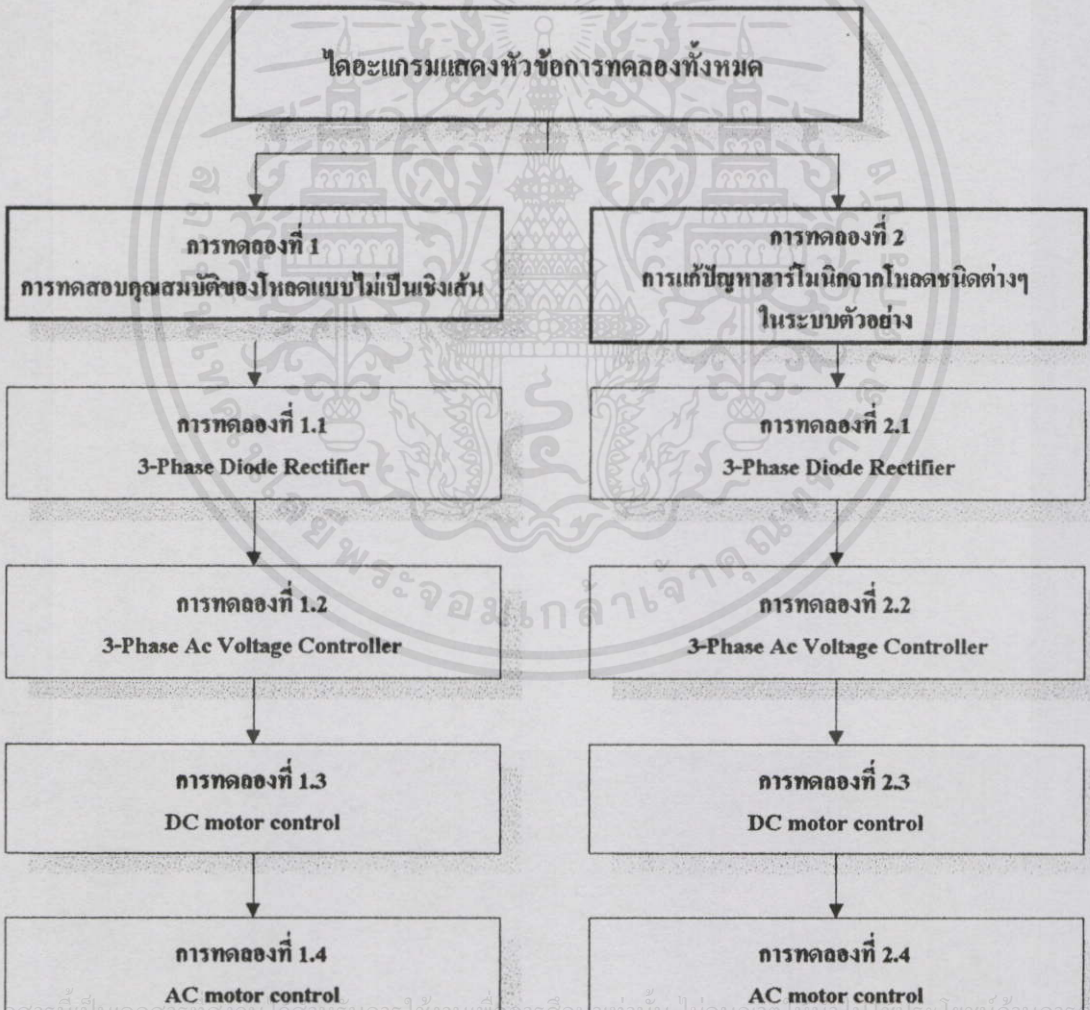
รูปที่ 6.29 โพลชาร์ตที่จะใช้ในการออกแบบกับกรณีศึกษา

บทที่ 7

การทดลอง และผลการทดลอง (Experimentals and Results)

7.1 รายละเอียดของหัวข้อการทดลอง

การทดลองทั้งหมดจะแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อหลักๆคือ การทดสอบเพื่อศึกษาคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ที่กักกำลังในการใช้งานค่าต่างๆ โดยจะเน้นพิจารณาถึงปริมาณแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับ และเปอร์เซ็นต์โดยรวม, ค่าตัวประกอบกำลัง และค่ากำลังงานไฟฟ้าในระบบ

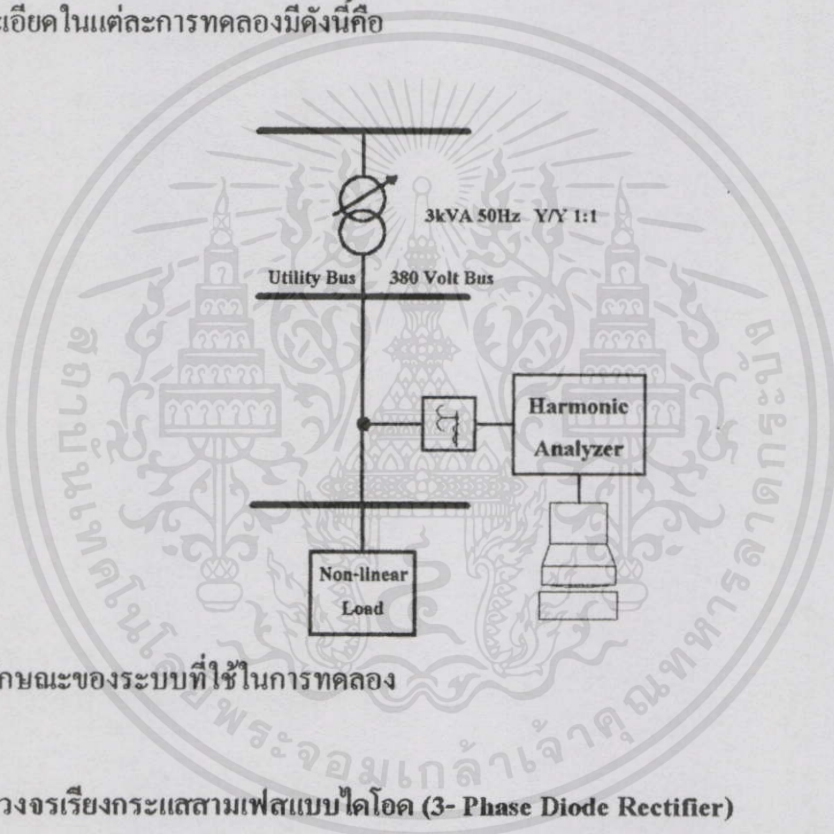


รูปที่ 7.1 ไดอะแกรมของหัวข้อการทดลอง

จากนั้นจะเป็นการทดลองในหัวข้อที่ 2 ซึ่งเกี่ยวข้องกับปัญหาและการแก้ปัญหาสำหรับแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกชนิดต่างๆในระบบที่จำลองขึ้น ซึ่งรายละเอียดของหัวการทดลองแสดงดังรูปที่ 7.1

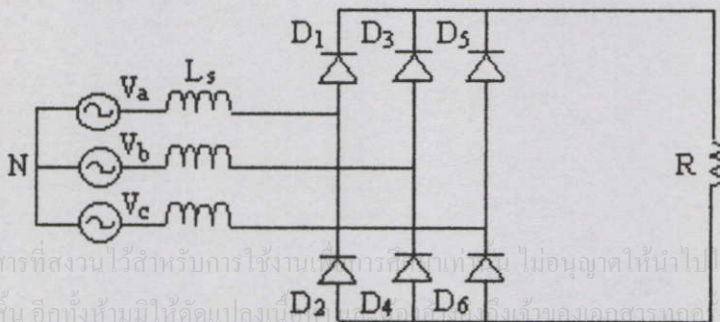
7.2 การทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติของโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นแบบต่างๆ

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติต่างๆของ โหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่สำคัญในปัจจุบันทั้งหมด 4 ชนิดโดยลักษณะของโหลดที่นำมาใช้จะเป็นแบบที่ใช้ในระบบ 3 เฟส 380/220V 50 Hz พิกัดกำลังเท่ากับ 3kVA แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดที่ความถี่หลักมูล 220 โวลต์ คงที่ และ $\%THD_v < 5\%$, ลักษณะของระบบที่ใช้ในการทดลอง และการบันทึกผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 7.2 โดยรายละเอียดในแต่ละการทดลองมีดังนี้คือ



รูปที่ 7.2 ลักษณะของระบบที่ใช้ในการทดลอง

7.2.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไดโอด (3-Phase Diode Rectifier)

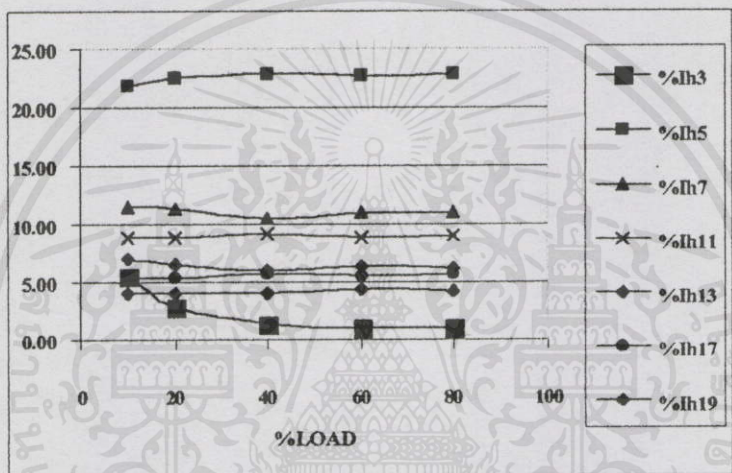


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาใดๆในเอกสารฉบับนี้ ซึ่งเจ้าของเอกสารขอสงวนสิทธิ์ในการนำไปใช้

รูปที่ 7.3 ลักษณะของวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไดโอด

ลักษณะของโหลดที่ใช้ในการทดลองนี้จะเป็แบบที่ใช้ไดโอด 6 ตัวทำหน้าที่แปลงผันแรงดันไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง ทางด้านเอาต์พุต (ไม่มีคาปาซิเตอร์) จ่ายให้กับโหลดแบบตัวต้านทานในที่นี่คือหลอดอินแคนเดสเซ็นต์ ผลการทดสอบที่ค่าเปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆที่ได้แสดงดังรูปที่ 7.4 และ 7.5

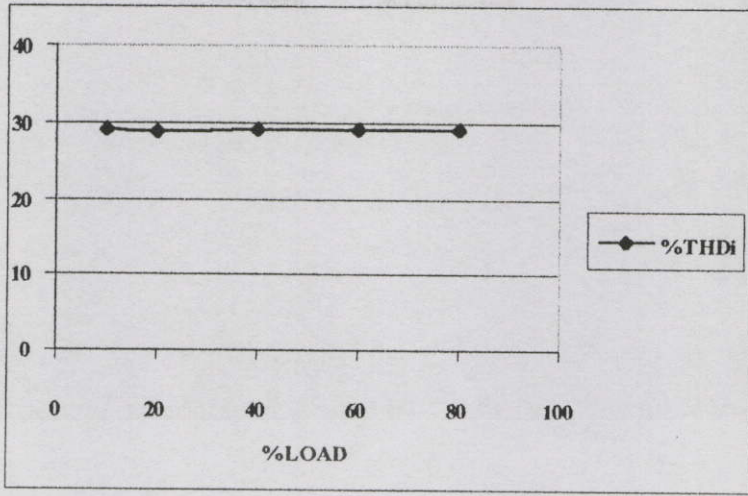
จากผลการทดลองพอจะสรุปได้ดังนี้คือ กระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่สำคัญที่มีปริมาณสูงคืออันดับที่ 5 (23%), และอันดับที่ 7 (12%) โดยมีค่าก่อนข้างคงที่ ค่าตัวประกอบกำลังก่อนข้างสูง และก่อนข้างคงที่คือ 1.00 สำหรับ DPF และ 0.95 สำหรับ PF, ปริมาณฮาร์โมนิก โดยรวมทั้งสองค่าก่อนข้างคงที่คือ 29% สำหรับ %THD_v และ 2% สำหรับ %THD_i



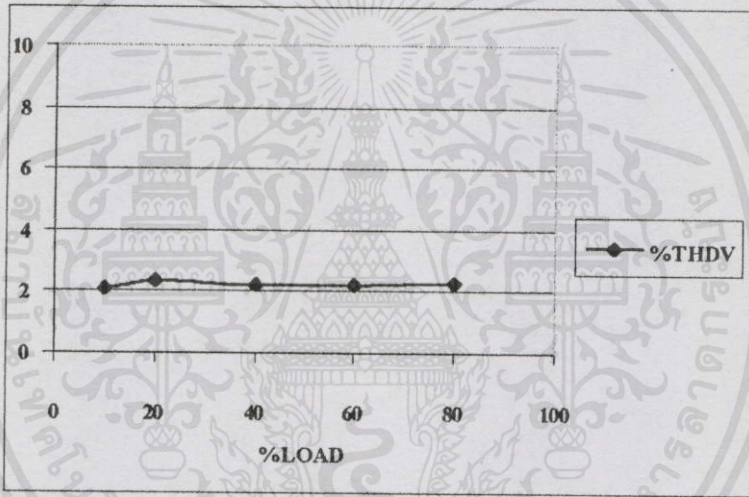
(ก)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ (ก) วิชาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

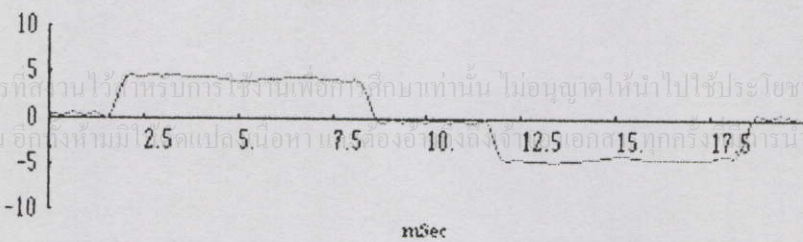


(ง)

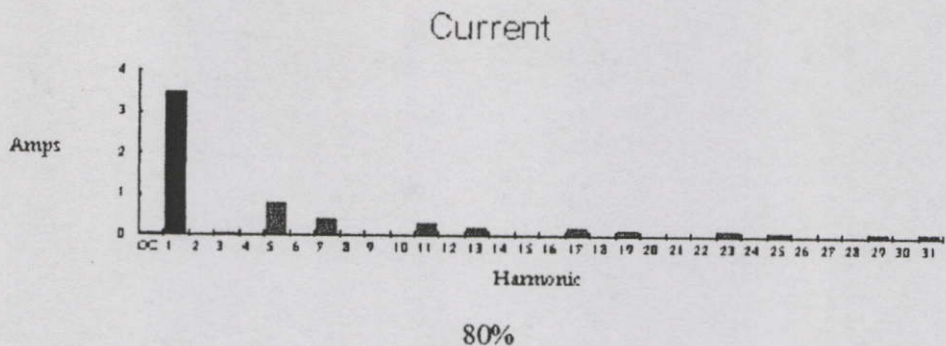
รูปที่ 7.4 ผลการทดลอง โหลดแบบวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไดโอด

- (ก) กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 3-19
- (ข) ค่าตัวประกอบกำลัง (PF & DPF)
- (ค) ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกโดยรวม
- (ง) ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกโดยรวม

Current



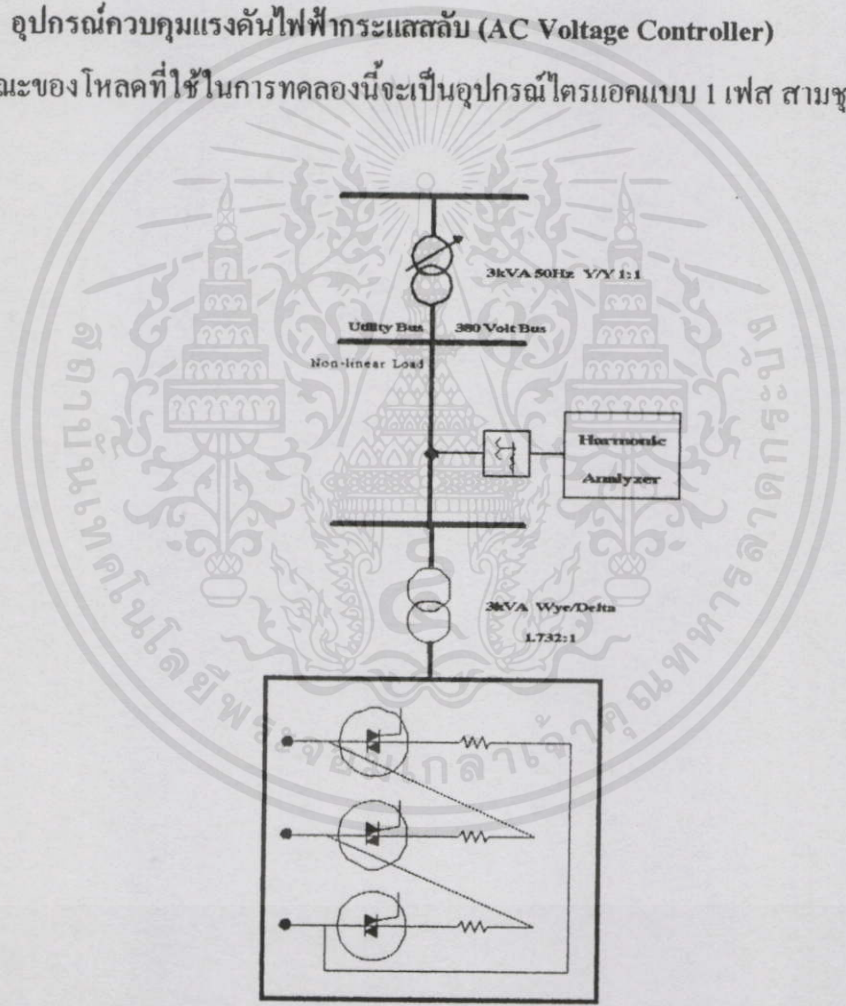
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้าม 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5



รูปที่ 7.5 ตัวอย่างรูปคลื่น และสเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุทที่ พิกัดกำลัง 80%

7.2.2 อุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Voltage Controller)

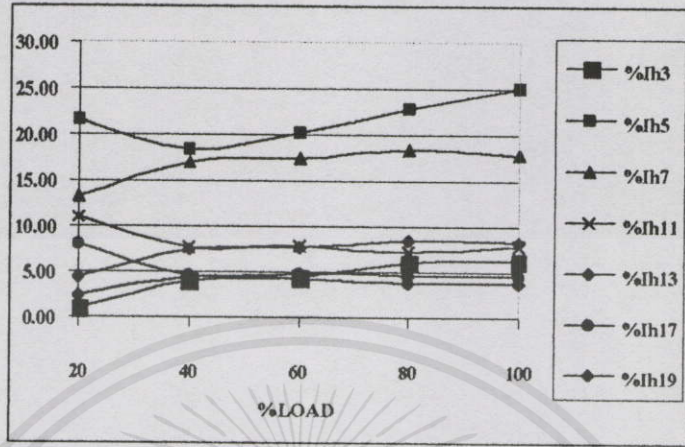
ลักษณะของโหลดที่ใช้ในการทดลองนี้จะเป็นอุปกรณ์ไดรแอกแบบ 1 เฟส สามชุดต่อร่วมกันใน



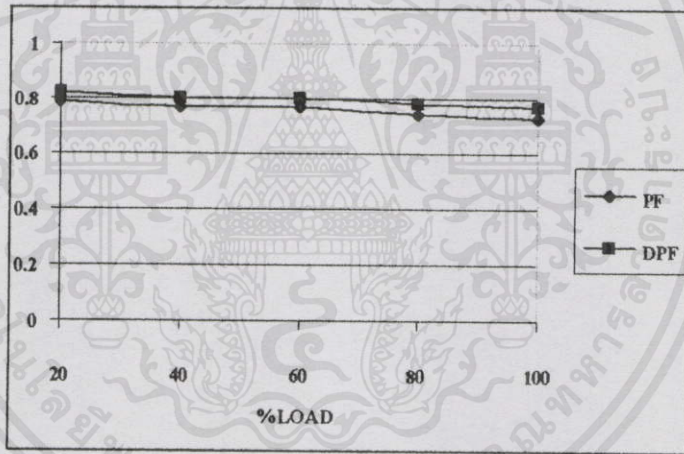
รูปที่ 7.6 ลักษณะของวงจรชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

ระบบ 3 เฟส ในลักษณะเป็นวงจรเซลล์ โดยรับกำลังงานจากระบบผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟสแบบ วาย-เดลต้า (อัตราส่วน 1:1) ซึ่ง โหลดชนิดนี้ทำหน้าที่แปลงผันแรงดันไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสสลับอีกค่าหนึ่งโดยใช้หลักการในการควบคุมมุมเฟสในการนำกระแส (Phase Control), ในการทดลองนี้กำหนดให้มีความเท่ากับ 90 องศา, ทางด้านเอาต์พุท จ่ายให้กับโหลดแบบตัว

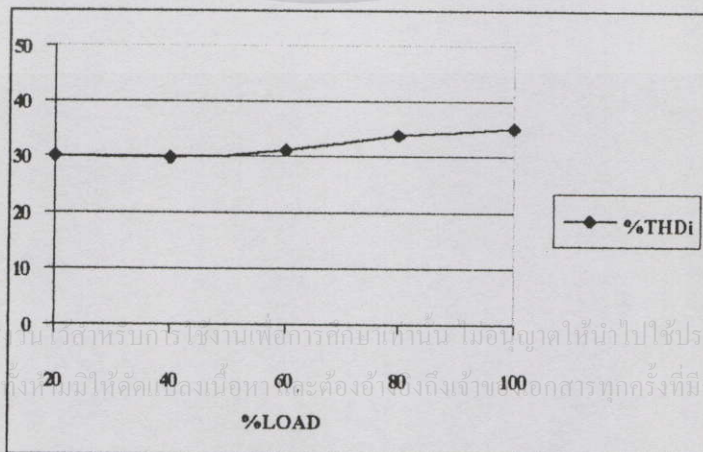
ด้านทานในทันทีคือหลอดอินแคนเดสเซ็นต์ ผลการทดสอบที่ค่าเปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆที่ได้แสดงดังรูปที่ 7.7 และ 7.8



(ก)

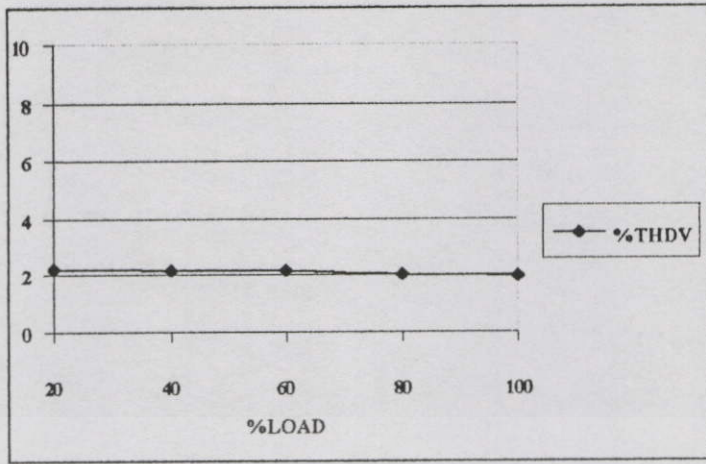


(ข)



(ค)

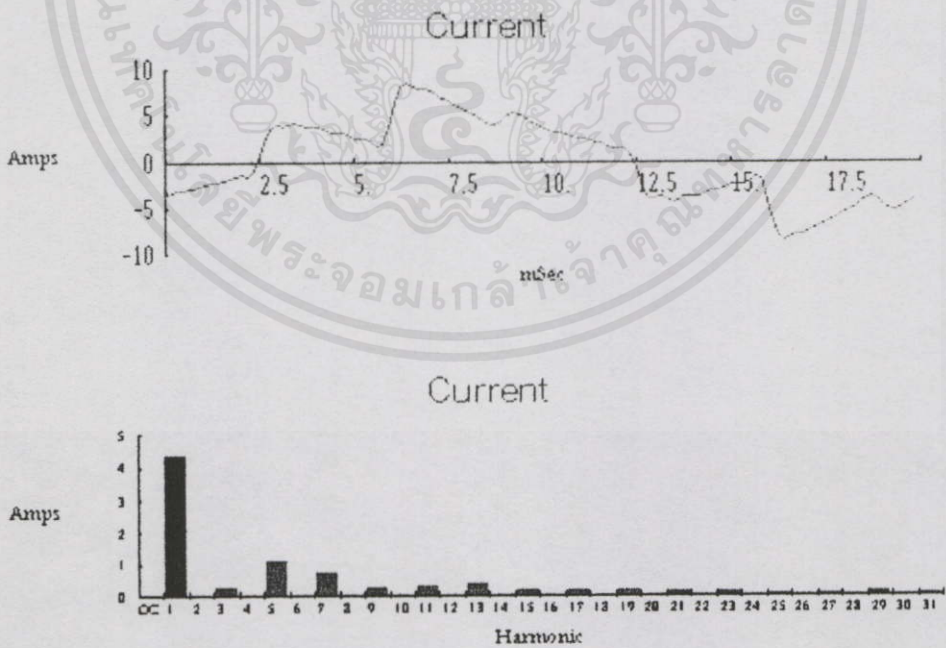
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดลอกเนื้อหาจะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง)

รูปที่ 7.7 ผลการทดลองโหลดแบบอุปกรณ์ควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

- (ก) กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 3-19
- (ข) ค่าตัวประกอบกำลัง (PF & DPF)
- (ค) ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกโดยรวม
- (ง) ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกโดยรวม



รูปที่ 7.8 ตัวอย่างรูปคลื่น และสเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุตที่ พิกัดกำลัง 100% ถ้าไม่จำกัดไว้ทั้งสี่ อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

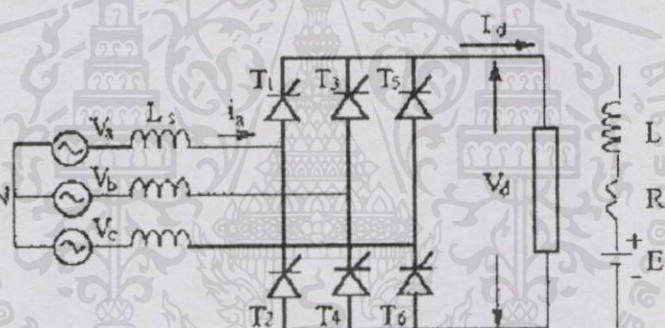
จากผลการทดลองพอจะสรุปได้ดังนี้คือ กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่สำคัญที่มีปริมาณสูงคือ อันดับที่ 5 (18-25%), และอันดับที่ 7 (13-17%) โดยมีเปลี่ยนแปลงไปตามเปอร์เซ็นต์โหลดบ้าง, ค่า

ตัวประกอบกำลังก่อนข้างคงที่เท่ากับ 0.80 สำหรับ DPF และ PF, ปริมาณฮาร์มอนิกโดยรวมทั้งสองค่าก่อนข้างคงที่คือ 30-35% สำหรับ %THD_v และ 2% สำหรับ %THD_i

7.2.3 ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Drive)

ลักษณะของโพลที่ใช้ในการทดลองนี้จะเป็นชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกขดลวดกระตุ้น (Separate Excite) ซึ่งโพลชนิดนี้ภายในจะประกอบด้วยชุดแปลงผันแรงดันไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง ซึ่งเป็นลักษณะที่ประกอบขึ้นด้วยเอสซีอาร์ทั้งหมด 6 ตัว (Three Phase Full Converter) โดยใช้หลักการในการควบคุมมุมเฟสในการนำกระแส (Phase Control) เพื่อควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์, ในการทดลองนี้กำหนดให้ทำงานที่ความเร็วรอบคงที่เท่ากับ 1200rpm, ผลการทดสอบที่ค่าเปอร์เซ็นต์โพลต่าง ๆ ที่ได้แสดงดังรูปที่ 7.10 และ 7.11

Line Commutated Converters



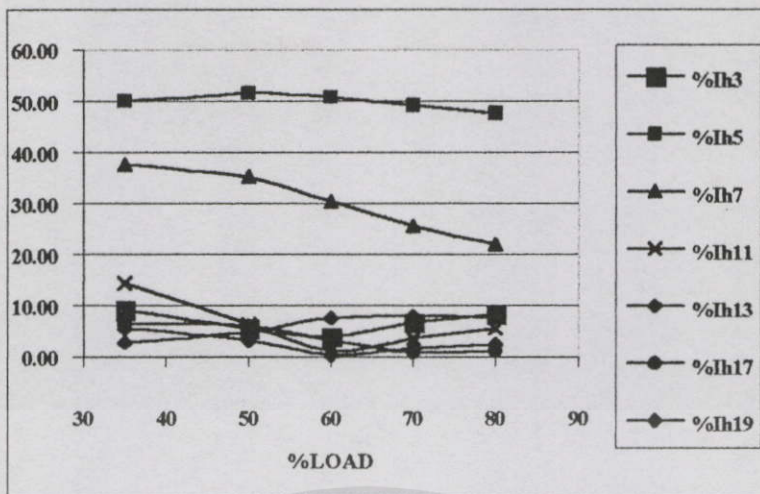
$$i_a(t) = \sum_h \frac{I_1}{h} \sin(h\omega_s t + \delta_h)$$

Characteristic harmonics: $h = pn \pm 1$

รูปที่ 7.9 ลักษณะวงจรของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากผลการทดลองพอจะสรุปได้ดังนี้คือ กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่สำคัญที่มีปริมาณสูงคือ อันดับที่ 5 (47-51%), และอันดับที่ 7 (20-38%) โดยมีเปลี่ยนแปลงลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์โพลสูงขึ้น, ค่าตัวประกอบกำลังก่อนข้างคงที่เท่ากับ 0.75 สำหรับ DPF และ 0.6 สำหรับ PF, ปริมาณฮาร์มอนิกโดยรวมก่อนข้างคงที่สำหรับ %THD_v และอยู่ในช่วง 55-65% สำหรับ %THD_i

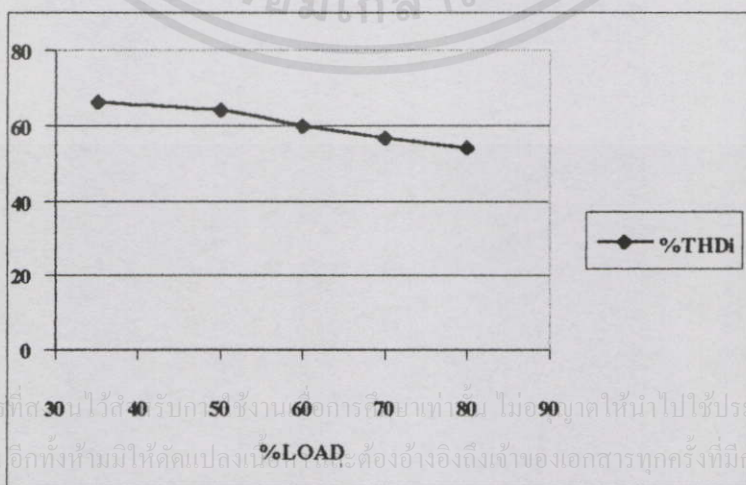
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

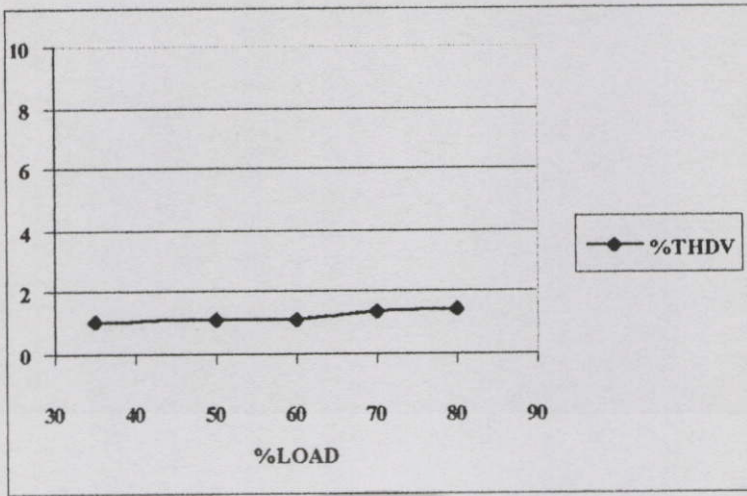


(ข)



(ค)

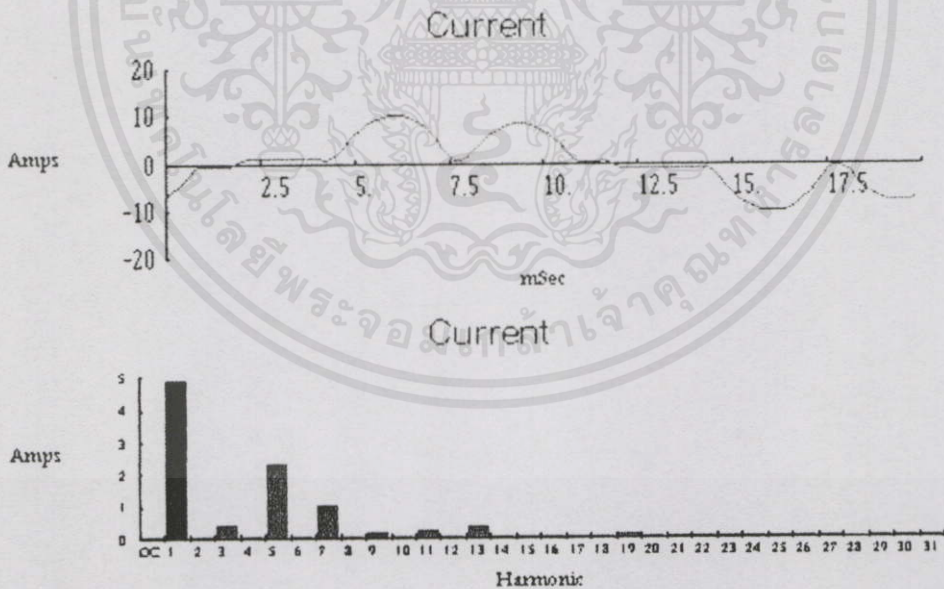
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส 30 น 40 50 60 70 80 90 ไม่ควรนำ ไปใช้ประโยชน์ด้านกรรค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง)

รูปที่ 7.10 ผลการทดลองโหลดแบบซัคควมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Drive)

- (ก) กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 3-19
- (ข) ค่าตัวประกอบกำลัง (PF & DPF)
- (ค) ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกโดยรวม
- (ง) ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกโดยรวม



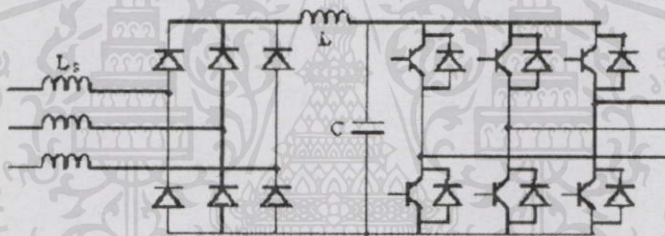
รูปที่ 7.11 ตัวอย่างรูปคลื่น และสเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทางค่านินพุทที่ พิกัดกำลัง 80%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

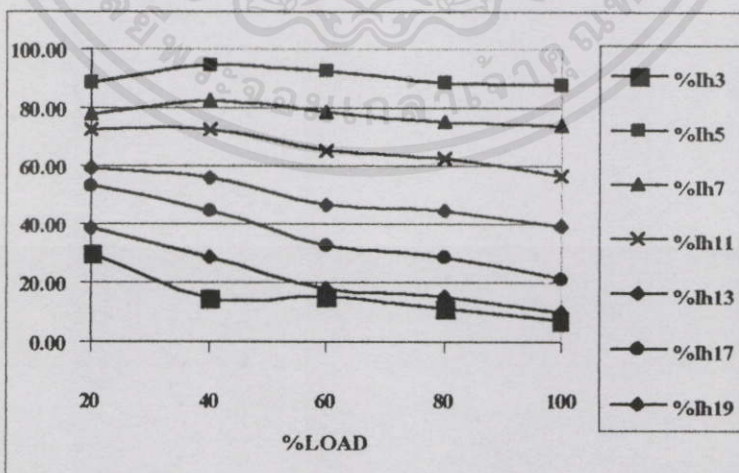
7.2.4 ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Drive)

ลักษณะของโพลที่ใช้ในการทดลองนี้จะเป็นชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำกระแสสลับแบบ 3 เฟส ซึ่งโพลชนิดนี้ภายในจะประกอบด้วยเครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้าสองชุดคือชุดแปลงผันแรงดันไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรงแบบมีคาปาซิเตอร์ทางด้านอินพุท ซึ่งเป็นลักษณะวงจรที่ประกอบขึ้นด้วยไดโอดทั้งหมด 6 ตัว (Three Phase Diode Rectifier with Capacitor) และชุดที่สองคือ เครื่องแปลงผันแรงดันไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับ (Inverter) โดยใช้หลักการในการควบคุมแบบที่ดับบลิวเอ็ม (Pulse Width Modulation) เพื่อควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ โดยจะควบคุมอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้ากับค่าความถี่ให้มีค่าคงที่, โดยในการทดลองนี้กำหนดให้ทำงานที่ความเร็วรอบคงที่เท่ากับ 1200rpm, ผลการทดสอบที่ค่าเปอร์เซ็นต์โพลต่างๆที่ได้แสดงดังรูปที่ 7.13 และ 7.14

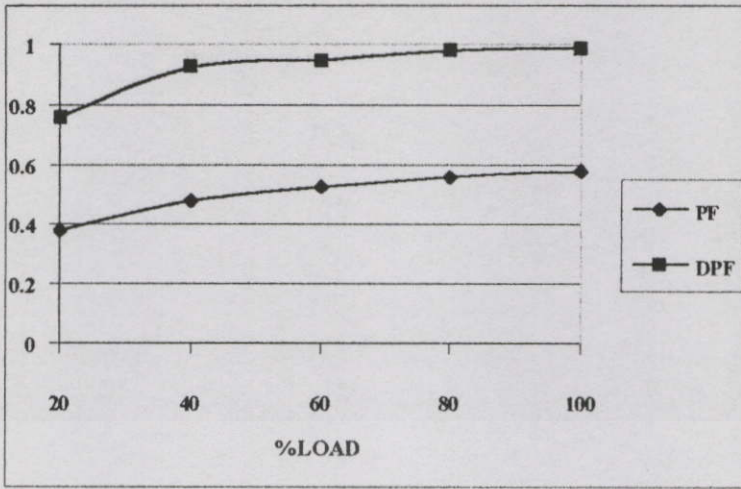
Pulse-Width Modulated Converters



รูปที่ 7.12 ลักษณะวงจรของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
(ก)
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ค)



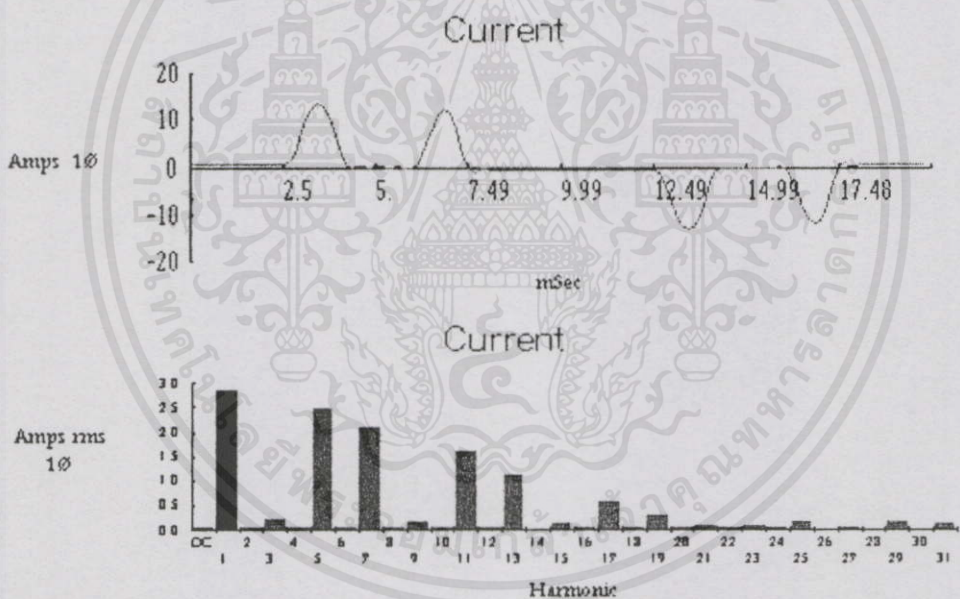
(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูงและต้องอภัยถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7.13 ผลการทดลองโหลดแบบหาคะควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Drive)

- (ก) กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 3-19
- (ข) ค่าตัวประกอบกำลัง (PF & DPF)
- (ค) ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกโดยรวม
- (ง) ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกโดยรวม

จากผลการทดลองพอจะสรุปได้ดังนี้คือ กระแสฮาร์มอนิกมีปริมาณค่อนข้างสูงหลายอันดับดังนี้คือ อันดับที่ 5 (90%), อันดับที่ 7 (80%), อันดับที่ 11 (40-60%), อันดับที่ 13 (40-60%), อันดับที่ 17 (20-55%) และ อันดับที่ 9 (10-40%) โดยแนวโน้มจะเปลี่ยนแปลงลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์โหลดสูงขึ้น, ค่าตัวประกอบกำลังค่อนข้างคงที่เท่ากับ 0.8 สำหรับ DPF และ 0.4-0.6 สำหรับ PF, ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกโดยรวมค่อนข้างคงที่และมีค่าสูงโดยอยู่ในช่วง 150% สำหรับ %THD_v และมีค่าเท่ากับ 2% สำหรับ %THD_i



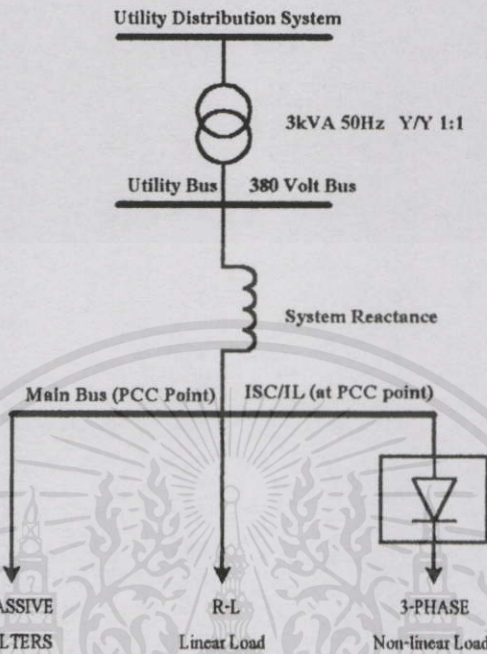
รูปที่ 7.14 ตัวอย่างรูปคลื่น และสเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทางค่านินพุทที่ พิกัดกำลัง 100%

7.3 การกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบและพิกัดของโหลดที่ใช้ในระบบ

7.3.1 ลักษณะของระบบจำลองที่จะใช้ในกรณีศึกษา

ลักษณะของระบบที่จำลองขึ้นเพื่อทำการวิเคราะห์และออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกเป็นกรณีตัวอย่างจะเป็นระบบแบบสามเฟสสี่สายแบบสมดุล มีพิกัดต่างๆที่ Utility Bus ดังนี้คือแรงดันไฟฟ้า 380/220 โวลต์ 50Hz, พิกัดกำลังของระบบเท่ากับ 3kVA โดยจ่ายกำลังงานผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 3kVA (ในการทดลองจริงคือหม้อแปลงไฟฟ้าแบบออโต้, วาย-วาย) เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าความถี่มูลฐานทางค่านินพุทภูมิที่เท่ากับ 380 โวลต์ และจ่ายผ่านอิมพีแดนซ์จำลองของระบบไฟฟ้า

รวมทั้งหมุดทางด้านอินพุท (System Reactance) ซึ่งในที่นี้จะจำลองโดยใช้อินดักเตอร์แบบแกนเหล็ก (Iron Core Inductor), โหลดในระบบแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ โหลดแบบเชิงเส้น (R-L Linear



รูปที่ 7.15 โดอะแกรมของระบบไฟฟ้าจำลอง

Loads) ประกอบไปด้วยตัวต้านทานต่ออยู่กับตัวเหนี่ยวนำ และโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาทั้งหมด 4 ชนิดดังที่กล่าวมาแล้วในตอนต้น, ลักษณะของระบบดังที่กล่าวข้างต้นแสดงดังรูปที่ 7.15

7.3.2 การกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ

จากตารางมาตรฐานข้อกำหนดของ IEEE 519-1992 จะแบ่งแยกระบบออกโดยใช้ค่า I_{sc}/I_L ซึ่งในกรณีที่พิกัดกำลังของระบบถูกกำหนดแล้วอัตราส่วนดังกล่าวก็จะมีค่าหมายถึงค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ โดยในกรณีที่อัตราส่วนดังกล่าวมีค่าสูงก็จะหมายถึงอิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าต่ำ (Stiff System) และในกรณีที่มีค่าต่ำก็จะหมายถึงอิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าสูง (Weak System) โดยในการจำลองระบบในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบต่างๆดังนี้คือ

7.3.2.1 กรณีโหลดแบบไดโอดเรกติไฟลเลอร์ กำหนดให้มีค่าอิมพีแดนซ์โดยรวมทางด้านอินพุท (L_{sys}) เท่ากับ 3mH และพิกัดกระแสของระบบ (I_L) เท่ากับ $(3kVA/\sqrt{3} \times 380V) = 4.55$ แอมป์ ดังนั้นจะมีค่าอัตราส่วน $I_{sc}/I_L = [220 / (2\pi f (3mH))] / [4.55] = 51.3$

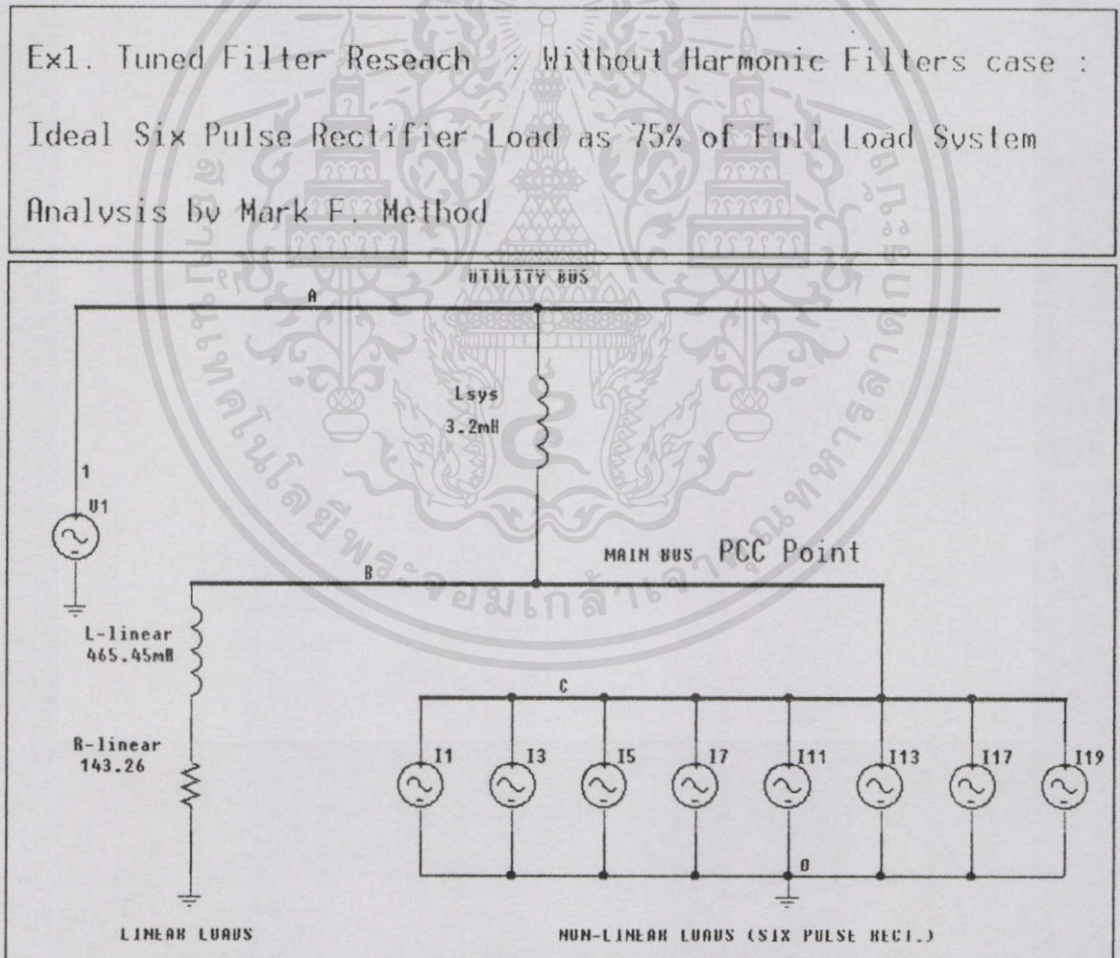
ไม่ว่ากรณี 7.3.2.2 กรณีโหลดแบบชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ กำหนดให้มีค่าอิมพีแดนซ์โดยรวมทางด้านอินพุท (L_{sys}) เท่ากับ 3mH และพิกัดกระแสของระบบ (I_L) เท่ากับ $(3kVA/\sqrt{3} \times 380V) = 4.55$ แอมป์ ดังนั้นจะมีค่าอัตราส่วน $I_{sc}/I_L = [220 / (2\pi f (3mH))] / [4.55] = 51.3$

7.3.2.3 กรณีโหลดแบบชดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง กำหนดให้มีค่าอิมพีแดนซ์โดยรวมทางด้านอินพุท (L_{sys}) เท่ากับ 3mH และพิกัดกระแสของระบบ (I_L) เท่ากับ $(3kVA/\sqrt{3} \times 380V) = 4.55$ แอมป์ ดังนั้นจะมีค่าอัตราส่วน $I_{sc}/I_L = [220 / (2\pi f (3mH))] / [4.55] = 51.3$

7.3.2.4 กรณีโหลดแบบชดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ กำหนดให้มีค่าอิมพีแดนซ์โดยรวมทางด้านอินพุท (L_{sys}) เท่ากับ 16mH และพิกัดกระแสของระบบ (I_L) เท่ากับ $(3kVA/\sqrt{3} \times 380V) = 4.55$ แอมป์ ดังนั้นจะมีค่าอัตราส่วน $I_{sc}/I_L = [220 / (2\pi f (16mH))] / [4.55] = 9.62$

7.3.3 การกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์โหลดที่ใช้ในระบบ

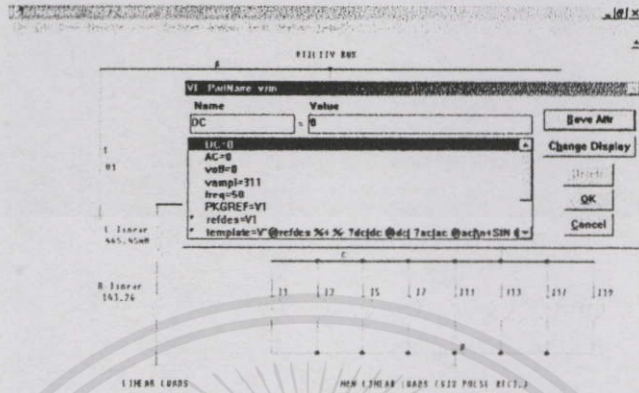
จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ในหัวข้อที่ 7.2 และค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้ในหัวข้อที่แล้วสามารถนำมาวิเคราะห์ถึงปริมาณฮาร์มอนิกส์โดยรวมของแรงดันและกระแสไฟฟ้า (ณ จุด PCC, Point of Common Coupling) ที่เกิดขึ้นที่ค่าเปอร์เซ็นต์โหลดที่ใช้งานร่วมกันระหว่าง



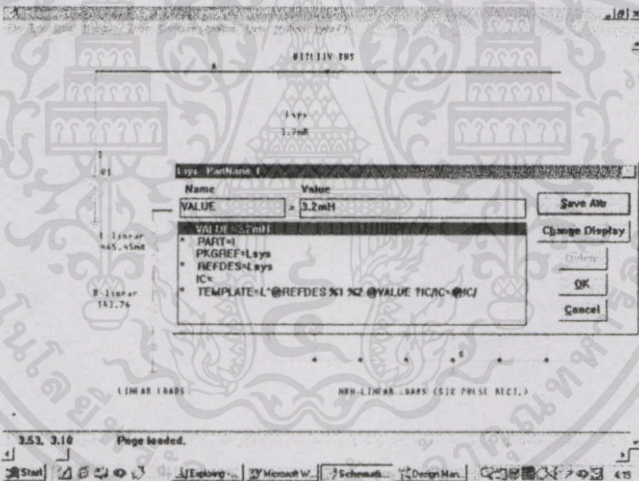
รูปที่ 7.16 ตัวอย่างของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกส์ ไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหลดแบบเชิงเส้นและโหลดแบบไม่เชิงเส้นต่างๆ (พิกัดโดยรวมคงที่) เพื่อนำเอาข้อมูลที่ได้มาใช้กำหนดค่าเปอร์เซ็นต์โหลดที่ใช้งานจริงสำหรับกรณีตัวอย่าง โดยโหลดแบบเชิงเส้นที่ใช้จะเป็นแบบ

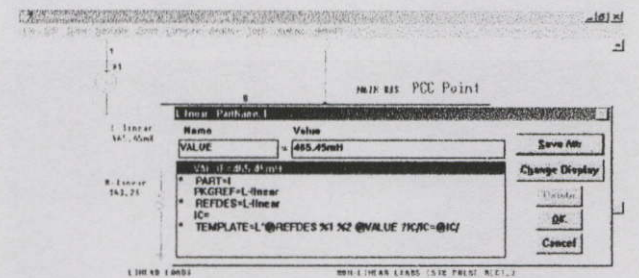
R-L อุนุกรม และกำหนดให้ค่า DPF มีค่าเท่ากับ 0.7 ส้าหลัง, ลักษณะของ โหลดที่ใช้เป็นแบบตัวต้านทานต่อร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ, ตัวอย่างของแบบจำลองของระบบที่จะใช้วิเคราะห์หาปริมาณฮาร์โมนิกที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 7.16



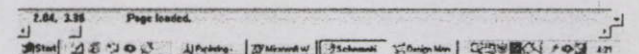
รูปที่ 7.17 ตัวอย่างของการป้อนค่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าในแบบจำลอง



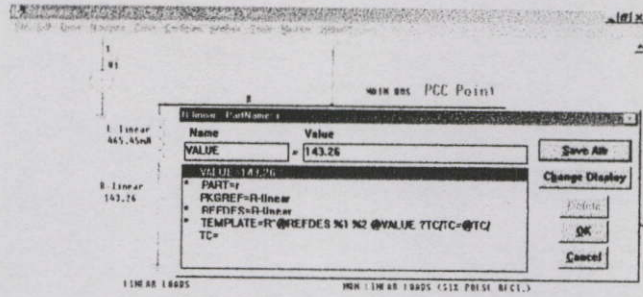
รูปที่ 7.18 ตัวอย่างของการป้อนค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ในแบบจำลอง



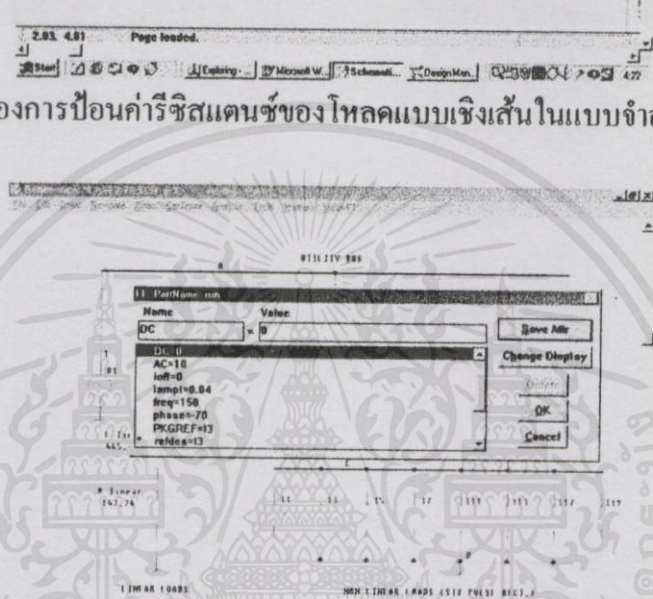
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



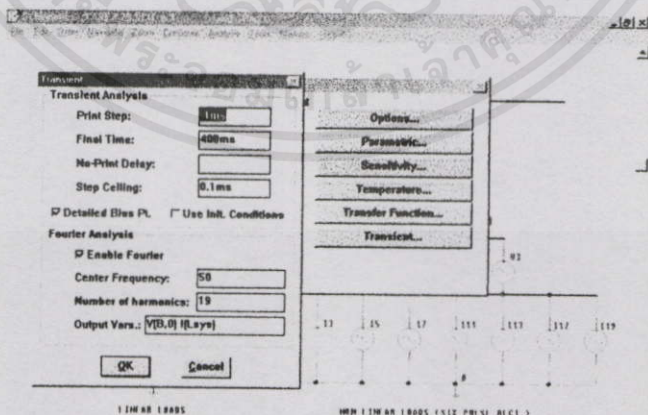
รูปที่ 7.19 ตัวอย่างของการป้อนค่าอินดักแตนซ์ของ โหลดแบบเชิงเส้นในแบบจำลอง



รูปที่ 7.20 ตัวอย่างของการป้อนค่ารีซิสแดนซ์ของโหลดแบบเชิงเส้นในแบบจำลอง



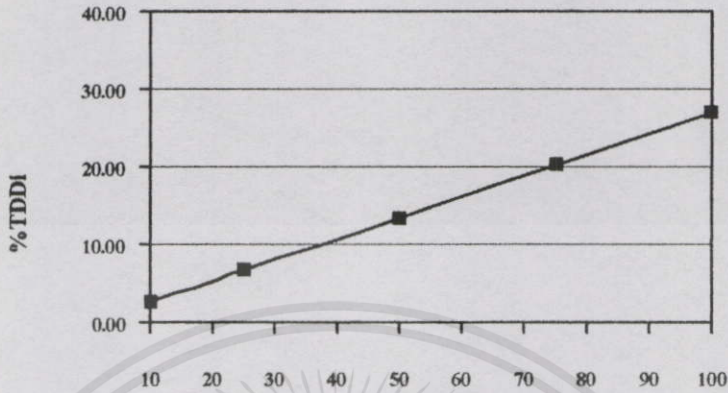
รูปที่ 7.21 ตัวอย่างของการป้อนค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ที่ 3 ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นในแบบจำลอง



รูปที่ 7.22 ตัวอย่างของการตั้งค่าการประมวลผลแบบทรานเซียนในแบบจำลอง
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

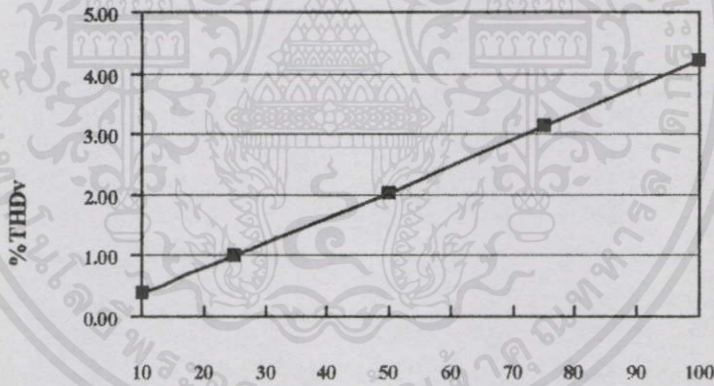
7.3.4 ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

7.3.4.1 กรณีโหลดแบบไดโอดเรกติไฟ์เลอร์ จากตารางมาตรฐาน IEEE 519-1992 ใน



Non Linear Loading as % of Max Plant Load

(ก)



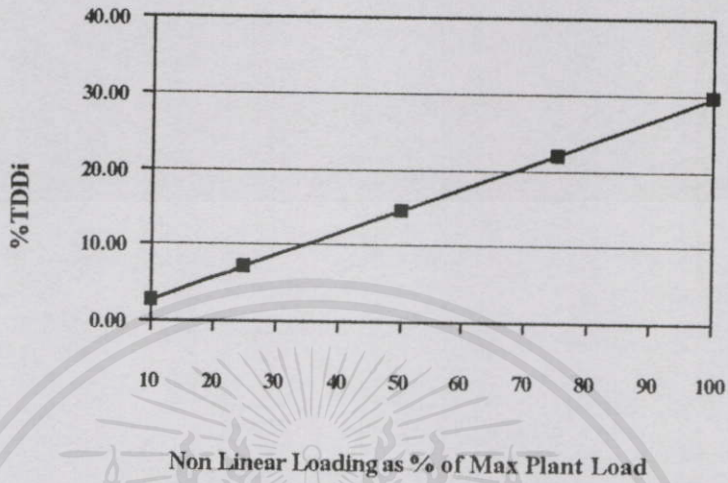
Non Linear Loading as % of Max Plant Load

(ข)

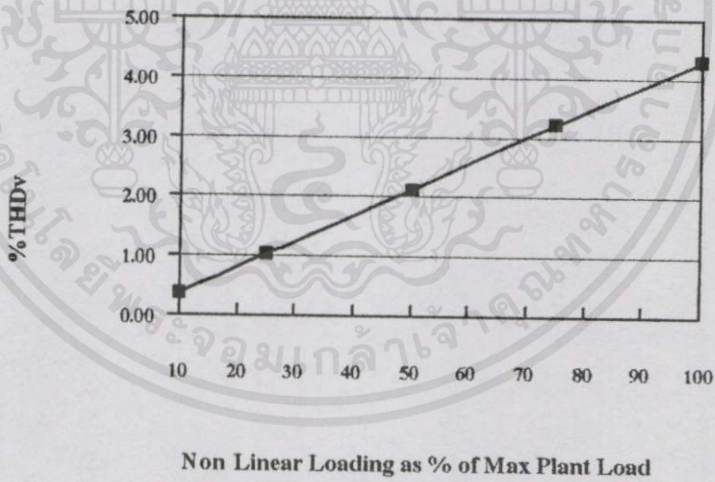
รูปที่ 7.23 ปริมาณฮาร์มอนิกส์โดยรวมที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า

กรณี I_c/I_L อยู่ในช่วง 50-100 ปริมาณฮาร์มอนิกส์โดยรวมของกระแสและแรงดันไฟฟ้าต้องไม่เกิน 12% และ 5% ตามลำดับ ดังนั้นจากผลการทดลองที่ได้พบว่าปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์โดยรวมจะมีค่าเกินมาตรฐานที่เปอร์เซ็นต์ใช้งานของโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นสูงกว่า 45% และ ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกส์โดยรวมจะมีต่ำกว่ามาตรฐานที่เปอร์เซ็นต์ใช้งานของโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นตลอดช่วง จาก 10-100%

7.3.4.2 กรณีโหลดแบบชดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จากตารางมาตรฐาน IEEE 519-1992 ในกรณี I_{sc}/I_L อยู่ในช่วง 50-100 ปริมาณฮาร์มอนิกโดยรวมของกระแสและแรงดันไฟฟ้า



(ก)

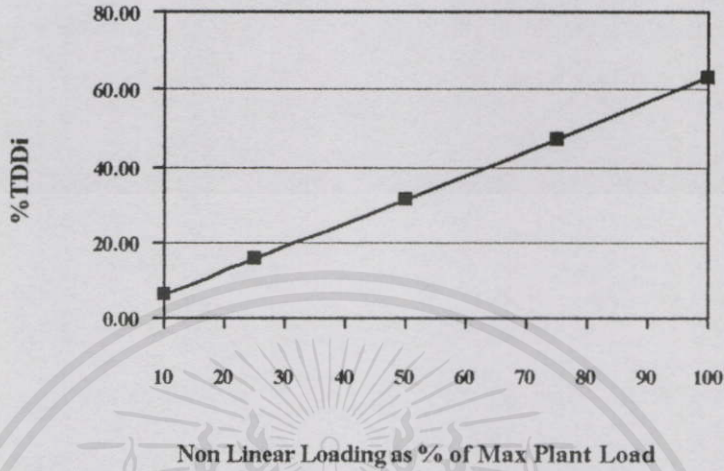


(ข)

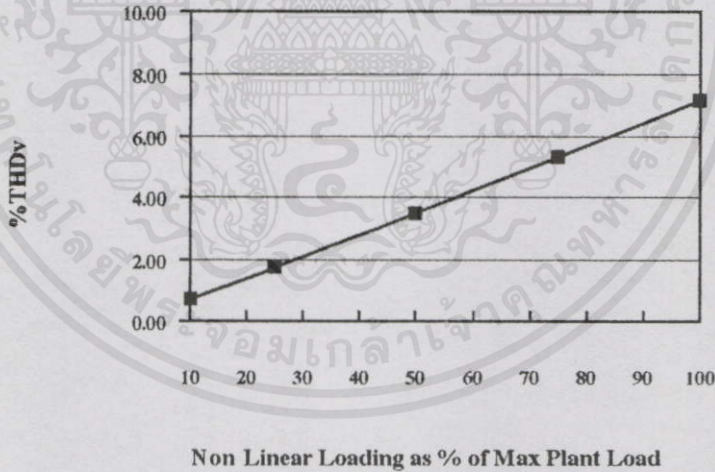
รูปที่ 7.24 ปริมาณฮาร์มอนิกส์โดยรวมที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า

ต้องไม่เกิน 12% และ 5% ตามลำดับ ดังนั้นจากผลการทดลองที่ได้พบว่าปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์โดยรวมจะมีค่าเกินมาตรฐานที่เปอร์เซ็นต์ใช้งานของโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นสูงกว่า 45% และปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกส์โดยรวมจะมีต่ำกว่ามาตรฐานที่เปอร์เซ็นต์ใช้งานของโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นตลอดช่วงจาก 10-100% ซึ่งคล้ายกับกรณีข้างต้น

7.3.4.3 กรณีโหลดแบบหาคควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จากตารางมาตรฐาน IEEE 519-1992 ในกรณี I_c/I_L อยู่ในช่วง 50-100 ปริมาณฮาร์มอนิกโดยรวมของกระแสและแรงดันไฟฟ้า



(ก)

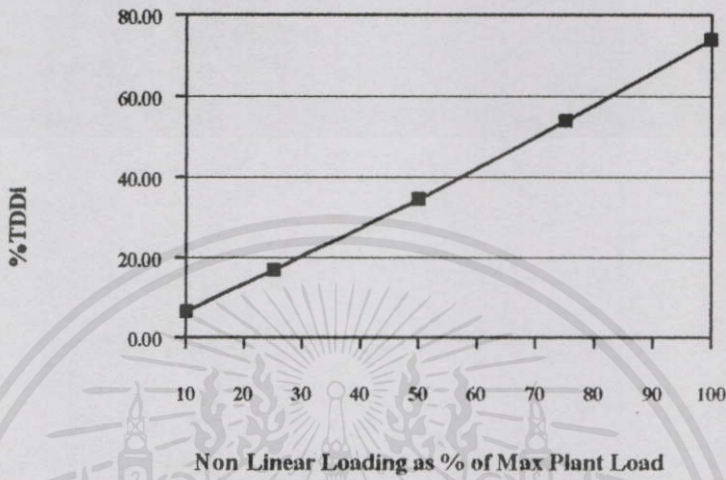


(ข)

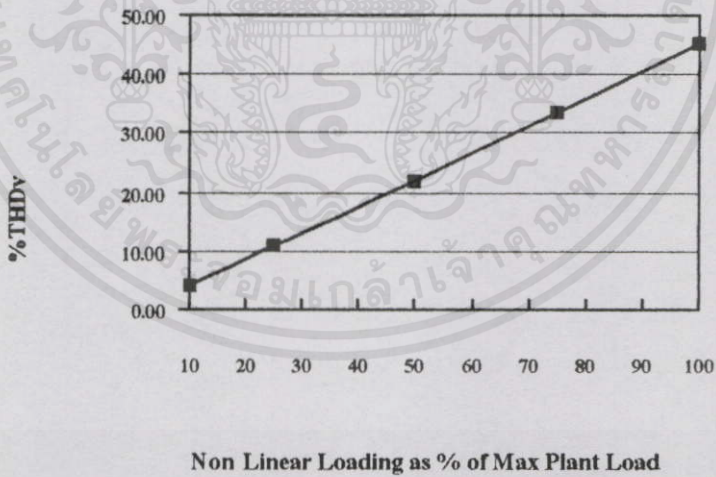
รูปที่ 7.25 ปริมาณฮาร์มอนิกส์โดยรวมที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า

ต้องไม่เกิน 12% และ 5% ตามลำดับ ดังนั้นจากผลการทดลองที่ได้พบว่าปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์โดยรวมจะมีค่าเกินมาตรฐานที่เปอร์เซ็นต์ใช้งานของโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นสูงกว่า 15% และปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกส์โดยรวมจะมีค่าเกินมาตรฐานที่เปอร์เซ็นต์ใช้งานของโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นสูงกว่า 65%

7.3.4.4 กรณีโหลดแบบชุกควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ จากตารางมาตรฐาน IEEE 519-1992 ในกรณี I_{UL} อยู่ในช่วง <20 ปริมาณฮาร์มอนิกโดยรวมของกระแสและแรงดันไฟฟ้าต้องไม่เกิน 5% และ 5% ตามลำดับ ดังนั้นจากผลการทดลองที่ได้พบว่าปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์



(ก)



(ข)

รูปที่ 7.26 ปริมาณฮาร์มอนิกส์โดยรวมที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยรวมจะมีค่าเกินมาตรฐานที่เปอร์เซ็นต์ใช้งานของโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นสูงกว่า 10% และ ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกส์โดยรวมจะมีค่าเกินมาตรฐานที่เปอร์เซ็นต์ใช้งานของโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นสูงกว่า 10% ซึ่งในกรณีนี้มีค่าเปอร์เซ็นต์โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นต่ำที่สุดเนื่องจากปริมาณ

ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นของโหนดชนิดนี้มีค่าสูงที่สุด รวมถึงระบบนี้เป็นระบบที่มีค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสูง ซึ่งทำให้ปริมาณแรงดันฮาร์โมนิกส์โดยรวมสูงตามไปด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4 ตัวอย่างของระบบจำลองและการแก้ปัญหา

จากข้อมูลที่ได้ทั้งหมดในตอนต้น สามารถนำมาใช้ในการจำลองระบบให้มีปริมาณฮาร์มอนิกที่สูงกว่ามาตรฐานในระดับที่เหมาะสม, โดยลักษณะของระบบจะเป็นแบบสามเฟส สี่สาย สมดุลย์ 380/220 โวลต์ 3kVA 50Hz แรงดันไฟฟ้าความถี่หลักมูลที่ Utility Bus คงที่, เพื่อเป็นตัวอย่างในการวิเคราะห์และแก้ปัญหาในแบบที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ได้ดังนี้คือ

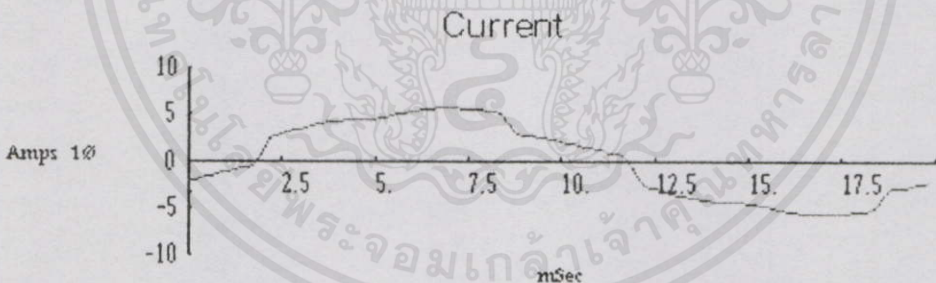
7.4.1 กรณีโหลดเป็นแบบไดโอดเรกติไฟเลอร์

พิกัดสำหรับโหลดแบบเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับระบบนี้จะเลือกที่ 50% : 50% ตามลำดับ ซึ่งตัวอย่างผลการทดลอง ณ จุด PCC ที่วัดได้จริงในห้องปฏิบัติการแสดงดังรูปที่ 7.27

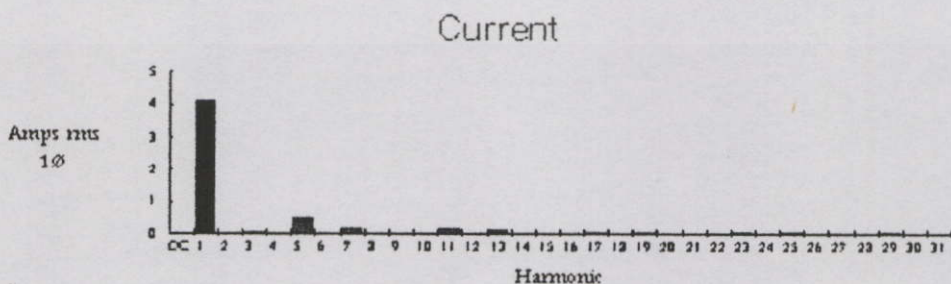
7.4.1.1 การเปรียบเทียบปริมาณฮาร์มอนิกที่วัดได้กับตารางมาตรฐาน :

ในมาตรฐาน IEEE 519-1992 ได้กำหนดตัวอย่างของตารางเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบข้อมูลของฮาร์มอนิกที่บันทึกได้จากการวัดกับค่ามาตรฐาน ซึ่งเมื่อนำข้อมูลที่ได้ในกรณีนี้ไปเปรียบเทียบจะได้ดังตารางที่ 7.1 และ 7.2 ตามลำดับ

จากตารางจะเห็นว่าปริมาณกระแสสูงสุดที่ระบบต้องการ I_L จริงจะเท่ากับ 4.07 แอมป์ ค่ามาตรฐานของกระแสฮาร์มอนิกที่ใช้จะอยู่ในช่วง I_{Lc}/I_L 50-100 ซึ่งพบว่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5, 11 และปริมาณกระแสฮาร์มอนิกโดยรวมมีค่าเกินมาตรฐาน โดยในส่วนของแรงดันฮาร์มอนิกและปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกโดยรวมทั้งหมดยังไม่เกินค่ามาตรฐาน



(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Single Phase Readings

			Voltage	Current
Frequency	49.99	RMS	216.8	4.11
Power		Peak	303.2	5.89
KW	0.81	DC Offset	-0.1	-0.03
KVA	0.89	Crest	1.4	1.43
KVAR	0.36	THD Rms	3.13	13.97
Peak KW	1.62	THD Fund	3.13	14.11
Phase	24๓ lag	HRMS	6.8	0.57
Total PF	0.91	KFactor	2.30	
DPF	0.91			

(ก)

รูปที่ 7.27 ผลการทดลองที่วัดได้ในระบบจำลองที่จุด PCC

(ก) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้า

(ข) สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้า

(ค) พารามิเตอร์อื่นๆที่สำคัญที่ได้จากการวัด

ตารางที่ 7.1 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกส์ที่วัดได้กับค่ามาตรฐาน

Current Distortion Calculation for a Industrial Plant at PCC (120V-69,000V)													
Six Pulse Rectifier as Non-linear Load													
System Size		Ratio	Total Demand		Non-linear Load		RMS. Harmonic Current (Amp.)						
kVAsc	Isc(A)	Isc/TL	KVA	IL(Fun))	kW	I(Fun)	5th	7th	11th	13th	17th	19th	
			2.67	4.07	1.35	2.08	0.47	0.19	0.18	0.11	0.1	0.07	
							Harmonic Current Distortion (in % of IL)						
							5th	7th	11th	13th	17th	19th	%TDD
							11.55	4.67	4.42	2.70	2.46	1.72	14.11
							IEEE limit (in % of IL) (<20)						
							4	4	2	2	1.5	1.5	5
144.51	219	54	IEEE limit (in % of IL) (20-50)				7	7	3.5	3.5	2.5	2.5	8
							IEEE limit (in % of IL) (50-100)						
							10	10	4.5	4.5	4	4	12
							IEEE limit (in % of IL) (100-1000)						
							12	12	5.5	5.5	5	5	15
							IEEE limit (in % of IL) (>1000)						
							15	15	7	7	6	6	20

7.4.1.2 การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก :

จากผลของการเปรียบเทียบปริมาณฮาร์มอนิกส์กับค่ามาตรฐานจะเห็นว่าในกรณีนี้เพื่อให้ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ต่ำกว่ามาตรฐานในทุกอันดับจะต้องต่อตัวกรองฮาร์มอนิก โดยเริ่มต้นในอันดับที่ 5

ตารางที่ 7.2 เปรียบเทียบแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่วัดได้กับค่ามาตรฐาน

Voltage Distortion Calculation for a Industrial Plant, 220V PCC Bus System														
Six Pulse Rectifier as Non-linear Load														
System Size		Ratio	Z _{sys}	%Z _{sys}	V _L (PCC)	Harmonic Voltage at PCC BUS (Volt)						THD _v	IEEE STD.	
kVA _{sc}	I _{sc} (A)	I _{sc} /I _L	(Ohm)	(1kVA) _b	(Volt)	5th	7th	11th	13th	17th	19th	(%)	%Ind.	%THD
144.51	218.95	54	1.00	2.08	216.67	4.64	2.61	2.05	1.36	1.91	1.27			
						Harmonic Voltage at PCC BUS (%)								
						2.14	1.20	0.95	0.63	0.88	0.59	3.13	3	5

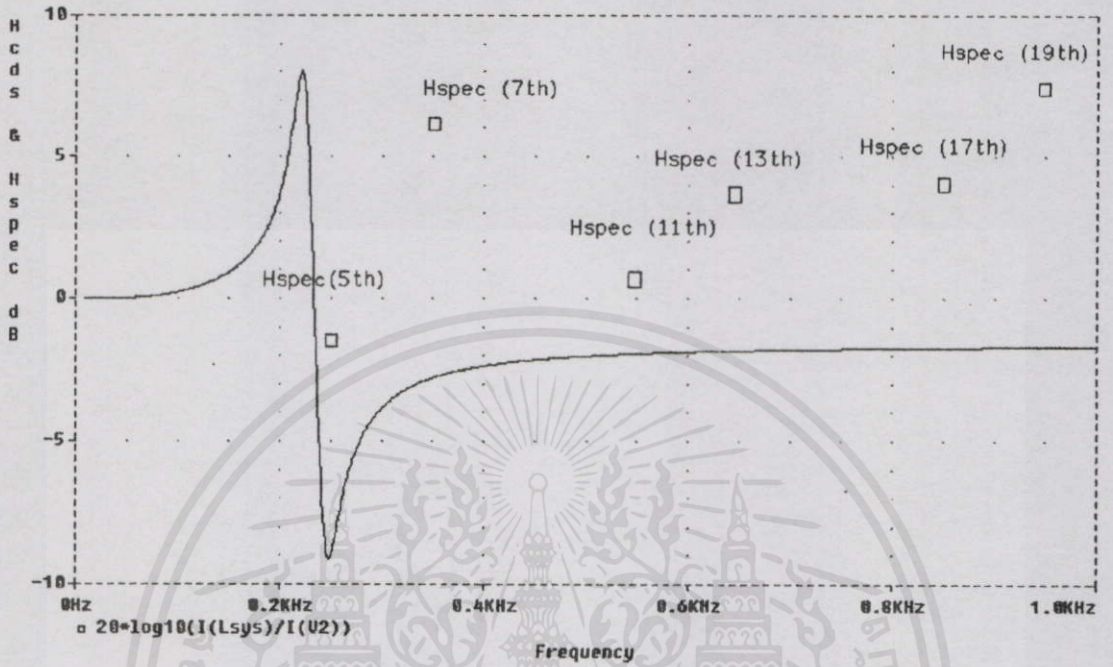
ในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีในการวิเคราะห์ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของอัตราในการแบ่งกระแสสองชนิด ที่จุด PCC คืออัตราการแบ่งกระแสฮาร์มอนิกส์เข้าสู่ระบบที่เกิดขึ้น (กราฟ H_{cds}) กับ อัตราการแบ่งกระแสฮาร์มอนิกส์ได้สูงสุดตามมาตรฐาน (H_{spec}) โดย H_{spec} (dB) ที่คำนวณได้สำหรับระบบนี้แสดงดังตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 การคำนวณค่าอัตราการแบ่งกระแสฮาร์มอนิกส์ได้สูงสุดตามมาตรฐาน (H_{spec})

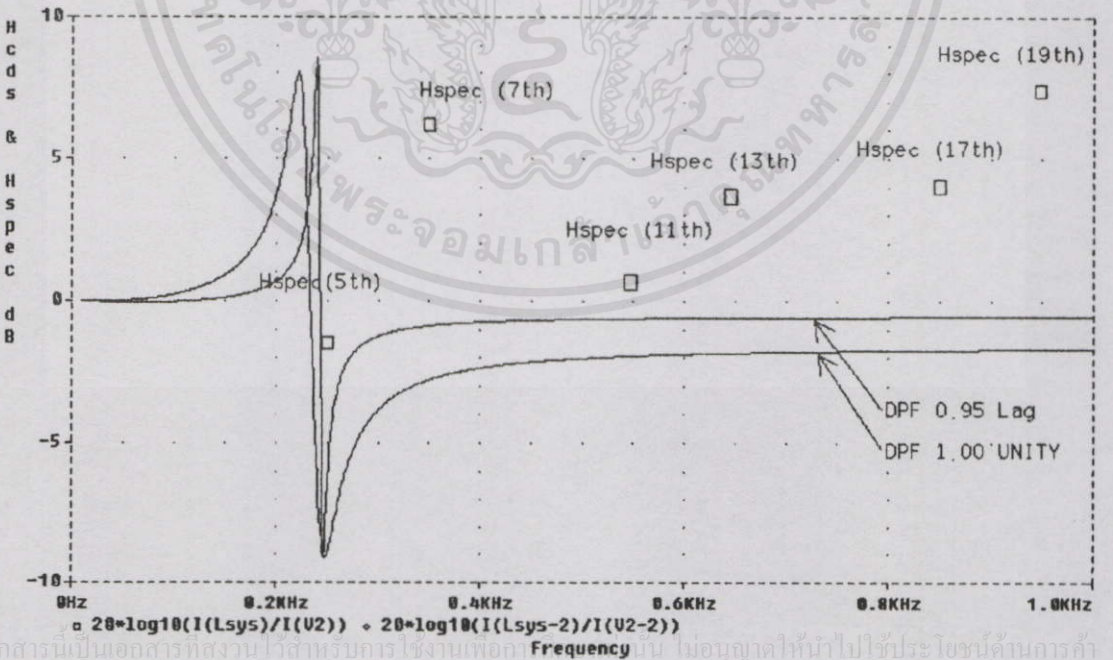
ตารางที่ใช้ในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์โดยใช้วิธี Transfer Function						
Current Demand at PCC (Amp), I_L	4.07					
Current Demand at Harmonic Source (Amp)	2.08					
Harmonic-order	5th	7th	11th	13th	17th	19th
IEEE limit (in % of I_L) (ค่านี้ $I_{sc}/I_L = 50-100$)	10	10	4.5	4.5	4	4
RMS. Harmonic Current at Harmonic Source (Amp.)	0.48	0.20	0.17	0.12	0.10	0.07
RMS. Harmonic Current at Harmonic Source (in % of I_L)	11.79	4.91	4.18	2.95	2.46	1.72
H_{spec}	0.85	2.04	1.08	1.53	1.63	2.33
H_{spec} (dB)	-1.43	6.17	0.65	3.67	4.23	7.33

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองไปปรับปรุงกระแสฮาร์มอนิกส์ในแบบจำลองที่ใช้ในโปรแกรมและพิจารณาต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5 โดยกำหนดให้ปรับค่า DPF จาก 0.91 เป็น 1.00 เพื่อสร้างกราฟอัตราการแบ่งกระแสฮาร์มอนิกส์เข้าสู่ระบบที่เกิดขึ้นจริง (H_{cds}) และนำค่า H_{spec} มาเปรียบเทียบ จะได้ดังรูปที่ 7.28 จากกราฟกรณีที่ว่า H_{spec} มีค่ามากกว่าศูนย์จะแสดงถึงปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานตั้งแต่ก่อนการต่อตัวกรองฮาร์มอนิก และ ผลของการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ที่ทำให้ปริมาณฮาร์มอนิกส์ต่ำกว่ามาตรฐานพิจารณาได้จากที่กราฟ H_{cds} มีค่าต่ำกว่า H_{spec} ที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ในระบบ, วิธีที่ใช้ในการออกแบบนี้ยังสามารถแสดงการเปรียบเทียบการเลือกใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกส์ชนิดอื่นๆ หรือที่ค่าแฟกเตอร์คุณภาพอื่นๆ (พิจารณาจาก DPF) เทียบกันได้ ซึ่งแสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 7.29 ซึ่งจะเห็นว่ากรณีที่ DPF เท่ากับ 0.95 มีการเผื่อความสามารถในการกรองน้อยกว่า และมีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติได้ง่ายกว่าในกรณี DPF เท่ากับ 1.00 ซึ่งเหมาะสมกว่า และผลการเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกส์ภายหลังต่อตัวกรองแสดงดังรูปที่ 7.30, ดังนั้นในกรณีนี้จะเลือกใช้ตัวกรองตัวกรองฮาร์มอนิกส์ความถี่เดียวกรณี DPF

เท่ากับ 1.00 ซึ่งมีรายละเอียดของตัวกรองดังนี้คือ คาปาซิเตอร์ 25 μ F, อินดักเตอร์ 17 mH อันดับเท่ากับ 4.8 แพลตฟอร์มคุณภาพเท่ากับ 15

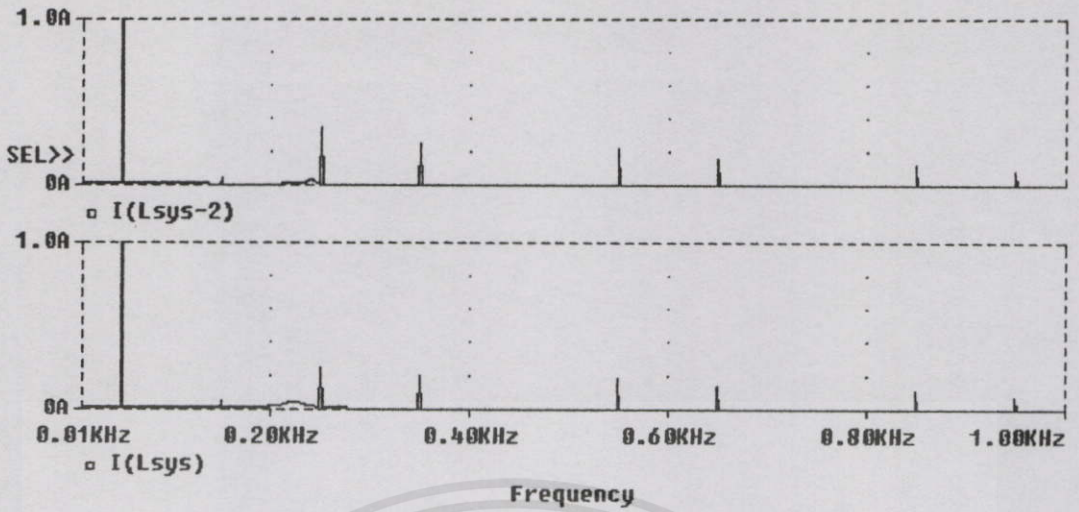


รูปที่ 7.28 การเปรียบเทียบ H_{cds} กับ H_{spec} กรณีค่า DPF = 1.00



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

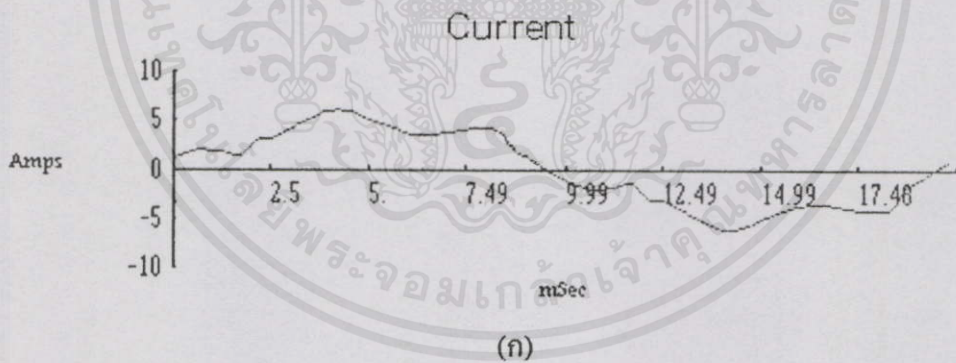
รูปที่ 7.29 การเปรียบเทียบ H_{cds} กับ H_{spec} กรณีค่า DPF = 1.00 และ 0.95



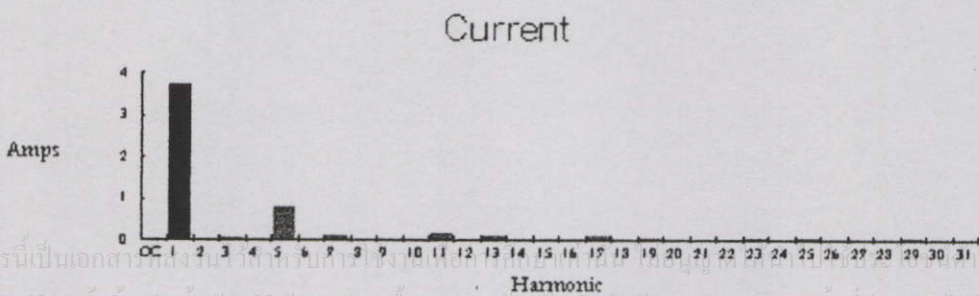
รูปที่ 7.30 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกส์กรณีค่า DPF = 1.00 [I(Lsys)] และ 0.95 [I(Lsys-2)]

7.4.1.3 ผลการทดลองหลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์เปรียบเทียบกับมาตรฐาน :

เมื่อได้จัดสร้างตัวกรองฮาร์มอนิกส์ตามที่ได้ออกแบบ และทำการทดสอบคุณสมบัติตัวกรองฮาร์มอนิกส์แล้ว ต่อจากนั้นจะเป็นการทดลองกรณีภายหลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ในระบบเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานในตาราง ซึ่งตัวอย่างของผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 7.31



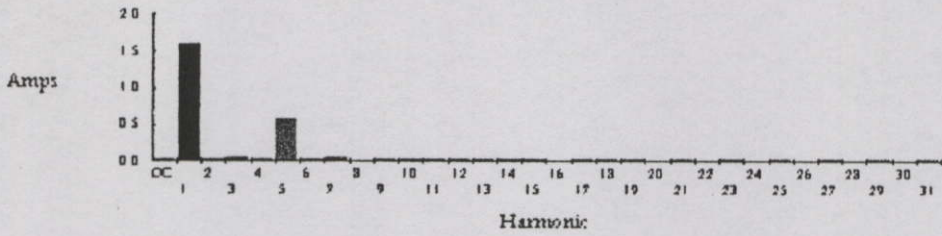
(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การงานวิจัยของวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกร้นำไปใช้

Current



$$I_{H5total} = I_{H5} - I_{H5external}$$

$$I_{H5total} = 0.78\angle 86 - 0.57\angle 76 = 0.24\angle 110$$

(ค)

Current



(ง)

Single Phase Readings

	Voltage	Current
Frequency	49.99	RMS 220.4
Power		Peak 310.4
KW	0.35	DC Offset 0.1
KVA	0.38	Crest 1.41
KVAR	0.03	THD Rms 0.85
Peak KW	0.96	THD Fund 0.85
Phase	4ฐ lead	HRMS 1.9
Total PF	0.94	KFactor 3.75
DPF	1.00	

(จ)

รูปที่ 7.31 ผลการทดลองที่วัดได้ในระบบจำลองที่จุด PCC

(ก) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้า

(ข) สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้า การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

(ค) สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้ากรณีไม่ต่อแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์เพื่อวัดฮาร์มอนิกส์จากภายนอก

(ง) สเปกตรัมของกระแสที่ตัวกรองฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5

(จ) พารามิเตอร์อื่นๆที่สำคัญที่ได้จากการวัด

จากผลการทดลองจะเห็นว่าปริมาณฮาร์มอนิกส์ทุกอันดับและปริมาณโดยรวมมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานทุกอันดับ และค่าตัวประกอบกำลัง DPF มีค่าสูงขึ้นเป็น 1.00 ตามที่ได้ออกแบบไว้, โดยในกรณีฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5 จะนำไปหักลบออกจากปริมาณฮาร์มอนิกส์จากภายนอกที่วัดได้ (โดยการปลดแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ในระบบออก) ซึ่งแสดง ในรูปที่ 7.31 (ค)

ตารางที่ 7.4 เปรียบเทียบกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่วัดได้กับค่ามาตรฐานหลังต่อตัวกรอง

Distortion Calculation for a Industrial Plant at PCC (120V-69,000V)													
Six Pulse Rectifier as Non-linear Load													
System Size		Ratio	Total Demand		Non-linear Load		RMS. Harmonic Current (Amp.)						
kVA _{sc}	I _{sc} (A)	I _{sc} /I _L	KVA	IL(Fun)	kW	I(Fun)	5th	7th	11th	13th	17th	19th	%TDD&THDv
			2.52	4.07	1.35	2.04	0.24	0.09	0.14	0.09	0.08	0.06	
			Harmonic Current (in % of IL)				5.90	2.21	3.44	2.21	1.97	1.47	7.90
144.51	219	54	Current limit (in % of IL) (50<100)				10	10	4.5	4.5	4	4	12
			Harmonic Voltage at PCC BUS (%)				0.86	0.89	0.72	0.57	0.72	0.53	2.07
			IEEE Voltage limit (%)				3	3	3	3	3	3	5

7.4.1.4 การวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกส์หลังต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ :

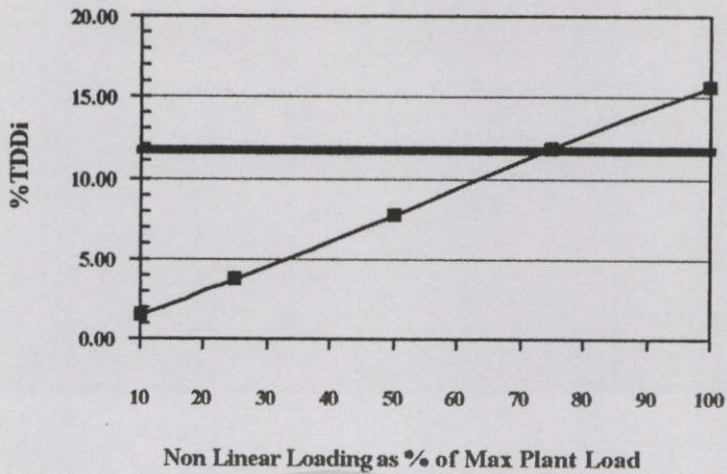
เพื่อให้ทราบถึงปริมาณฮาร์มอนิกส์ในอนาคต เมื่อระบบอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมหลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ดังกล่าว เพื่อประโยชน์ในการเตรียมการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกส์ต่อไปควรจะมีการวิเคราะห์ถึงปริมาณฮาร์มอนิกส์ใน 2 กรณีที่สำคัญคือ

1. เมื่อเปอร์เซ็นต์การใช้งานระหว่างโหลดแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้นเปลี่ยนไป โดยพิกัดกำลังรวมของระบบคงที่

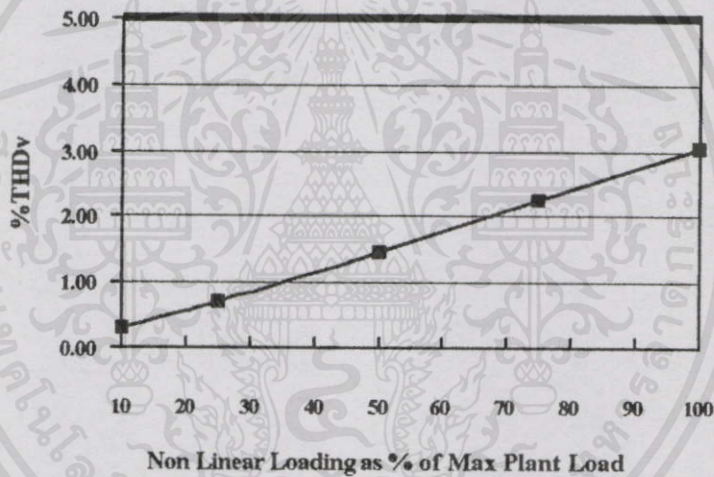
2. เมื่อระบบมีการต่อใช้งานโหลดแบบเชิงเส้นเพิ่มขึ้น และมีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของระบบเปลี่ยนไป

ซึ่งการวิเคราะห์กรณีดังกล่าวโดยใช้แบบจำลองด้วยโปรแกรม PSPICE จะได้ผลดังรูปที่ 7.32 และ 7.33 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

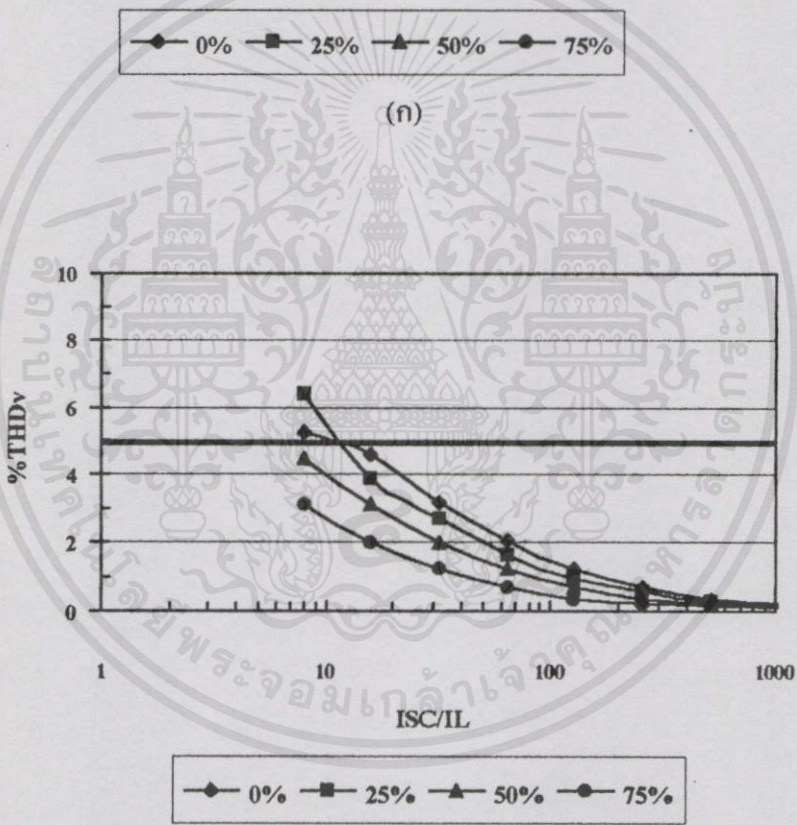
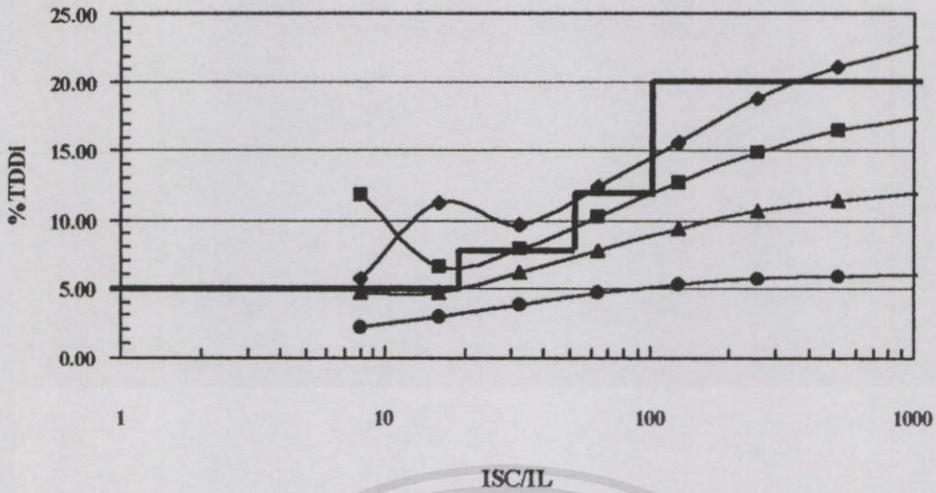


(ข)

รูปที่ 7.32 ปริมาณฮาร์มอนิกส์โดยรวมที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า

จากผลการทดลองในรูปที่ 7.32 พอจะสรุปได้ว่า เพื่อให้ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์โดยรวมมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ระบบนี้จะสามารถใช้โหลดแบบไม่เชิงเส้นได้ไม่เกิน 75% (เค็ม 45%) และปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกส์โดยรวมจะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานตลอดช่วงตั้งแต่ 10-100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 7.33 ปริมาณฮาร์มอนิกส์โดยรวมที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า

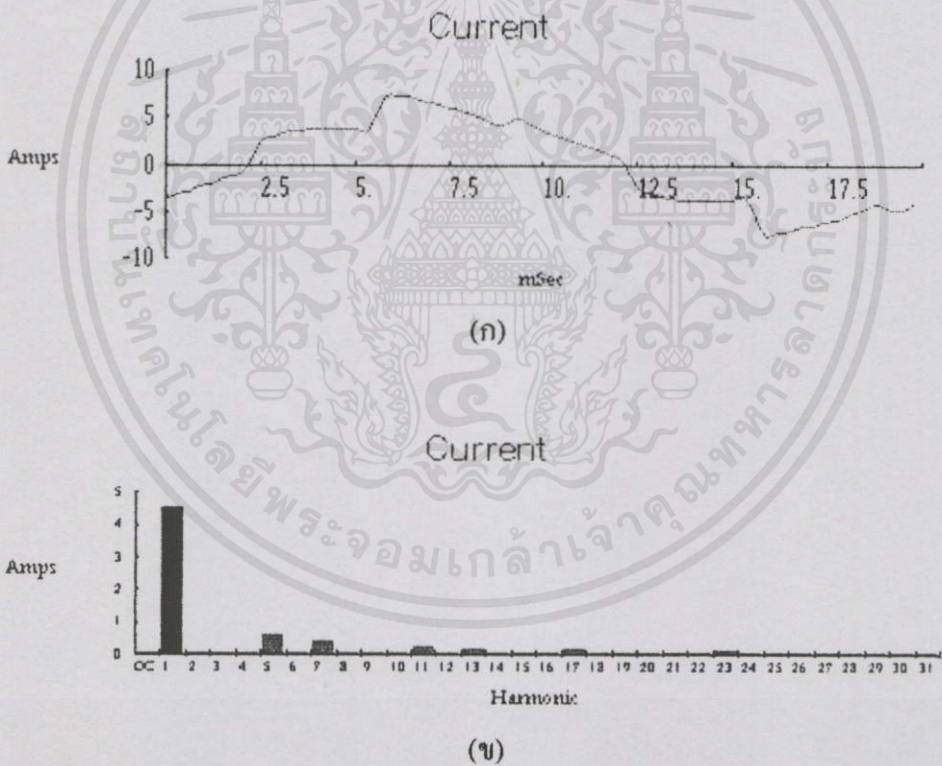
และจากผลการทดลองในรูปที่ 7.33 พอจะสรุปได้ว่า เพื่อให้ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์โดยรวมมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ในช่วง I_{sc}/I_L 10-1000, ระบบนี้จะต้องใช้โหลดแบบเชิงเส้นไม่น้อยกว่า 50% (พิกัดโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นเดิมคิดเทียบเป็น 50% ของพิกัดโดยรวม) และ ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกส์โดยรวมจะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานเกือบตลอดช่วง I_{sc}/I_L 10-1000 ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์โหลดแบบเชิงเส้น 0-75%

7.4.2 กรณีโหลดเป็นแบบชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

พิกัดสำหรับ โหลดแบบเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับระบบนี้จะเลือกที่ 40% : 60% ตามลำดับ ซึ่งตัวอย่างผลการทดลอง ณ จุด PCC ที่วัดได้จริงในห้องปฏิบัติการแสดงดังรูปที่ 7.34

7.4.2.1 การเปรียบเทียบปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่วัดได้กับตารางมาตรฐาน :

ในมาตรฐาน IEEE 519-1992 ได้กำหนดตัวอย่างของตารางเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบข้อมูลของฮาร์มอนิกส์ที่บันทึกได้จากการวัดกับค่ามาตรฐาน ซึ่งเมื่อนำข้อมูลที่ได้ในกรณีนี้ไปเปรียบเทียบจะได้ดังตารางที่ 7.5 และ 7.6 ตามลำดับจากตารางจะเห็นว่าปริมาณกระแสสูงสุดที่ระบบต้องการ I_L จริงจะเท่ากับ 4.52 แอมป์ ค่ามาตรฐานของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ใช้จะอยู่ในช่วง I_h/I_L 50-100 ซึ่งพบว่ากระแสฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5, 7, 11, 13, 17 และปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์โดยรวมมีค่าเกินมาตรฐาน โดยในส่วนของแรงดันฮาร์มอนิกส์ ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกส์โดยรวมยังไม่เกินค่ามาตรฐาน ยกเว้นอันดับที่ 5 อันดับเดียว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Single Phase Readings

		Voltage		Current	
Frequency	49.99	RMS	216.8		4.59
Power		Peak	314.4		7.71
KW	0.80	DC Offset	0.0		-0.03
KVA	1.00	Crest	1.45		1.68
KVAR	0.56	THD Rms	4.38		18.25
Peak KW	2.24	THD Fund	4.38		18.56
Phase	35° lag	HRMS	9.5		0.84
Total PF	0.80	KFactor	3.66		
DPF	0.82				

(ค)

รูปที่ 7.34 ผลการทดลองที่วัดได้ในระบบจ่ายที่จุด PCC

- (ก) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้า
- (ข) สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้า
- (ค) พารามิเตอร์อื่นๆที่สำคัญที่ได้จากการวัด

ตารางที่ 7.5 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกส์ที่วัดได้กับค่ามาตรฐาน

Current Distortion Calculation for a Industrial Plant at PCC (120V-69,000V)													
AC Voltage Controller Rectifier as Non-linear Load													
System Size		Ratio	Total Demand		Non-linear Load		RMS. Harmonic Current (Amp.)						
kVAsc	Isc(A)	Isc/IL	KVA	IL(Fun)	kW	I(Fun)	5th	7th	11th	13th	17th	19th	
			3	4.52	1.38	2.65	0.6	0.42	0.26	0.18	0.16	0.09	
							Harmonic Current Distortion (in % of IL)						
							5th	7th	11th	13th	17th	19th	%TDD
							13.27	9.29	5.75	3.98	3.54	1.99	18.56
							IEEE limit (in % of IL) (<20)						
							4	4	2	2	1.5	1.5	5
154.14	234	52	IEEE limit (in % of IL) (20-50)				7	7	3.5	3.5	2.5	2.5	8
							IEEE limit (in % of IL) (50-100)						
							10	10	4.5	4.5	4	4	12
							IEEE limit (in % of IL) (100-1000)						
							12	12	5.5	5.5	5	5	15
							IEEE limit (in % of IL) (>1000)						
							15	15	7	7	6	6	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.6 เปรียบเทียบแรงดันฮาร์มอนิกที่วัดได้กับค่ามาตรฐาน

Voltage Distortion Calculation for a Industrial Plant, 220V PCC Bus System														
AC Voltage Controller as Non-linear Load														
System Size		Ratio	Z _{ys}	%Z _{ys}	V1(PCC)	Harmonic Voltage at PCC BUS (Volt)						THD _v	IEEE STD.	
kVA _{sc}	I _{sc} (A)	I _{sc} /I _L	(Ohm)	(1kVA) _b	(Volt)	5th	7th	11th	13th	17th	19th	(%)	%Ind.	%THD
154.14	233.55	52	0.94	1.95	216.55	6.66	2.70	2.72	2.33	2.75	1.67			
						Harmonic Voltage at PCC BUS (%)								
						3.08	1.25	1.26	1.08	1.27	0.77	4.38	3	5

7.4.2.2 การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก :

จากผลของการเปรียบเทียบปริมาณฮาร์มอนิกกับค่ามาตรฐานจะเห็นว่าในกรณีนี้เพื่อให้ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกต่ำกว่ามาตรฐานในทุกอันดับจะต้องเริ่มจากตัวกรองฮาร์มอนิกในอันดับที่ 5 และเป็นไปได้ อาจจะต้องต่อ อันดับที่ 7 ด้วย

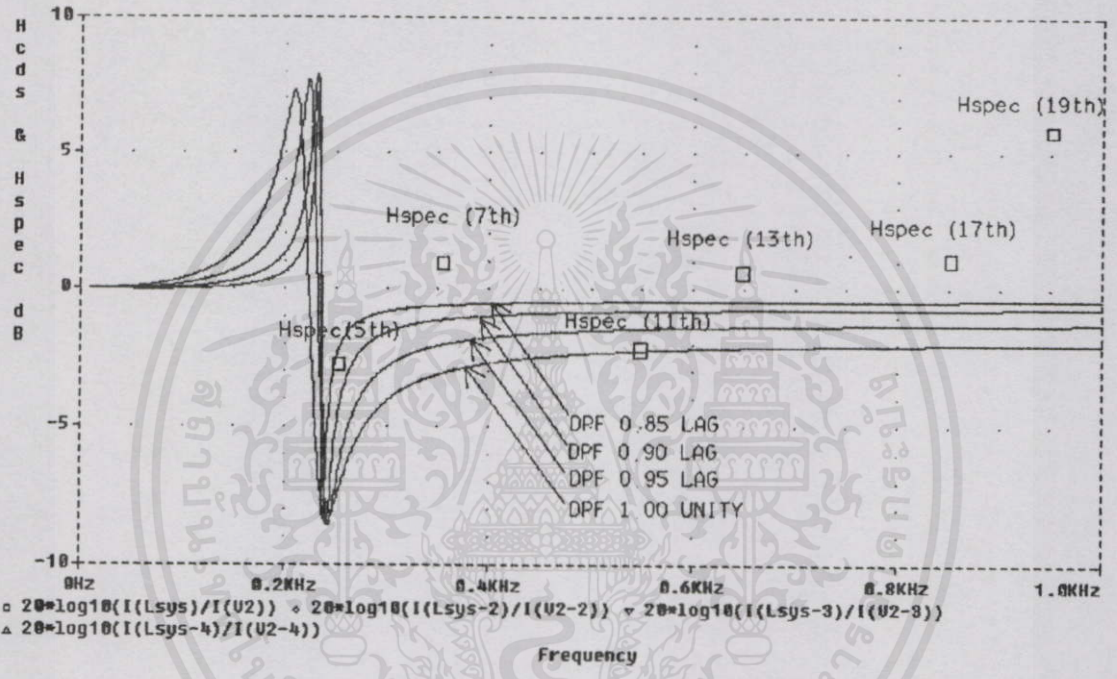
ในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีในการวิเคราะห์ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของอัตราในการแบ่งกระแสสองชนิด ที่จุด PCC คืออัตราการแบ่งกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบที่เกิดขึ้นจริง (กราฟ H_{ods}) กับ อัตราการแบ่งกระแสฮาร์มอนิกได้สูงสุดตามมาตรฐาน (H_{spec}) โดย H_{spec} (dB) ที่คำนวณได้สำหรับระบบนี้แสดงดังตารางที่ 7.7

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองไปปรับปรุงกระแสฮาร์มอนิกในแบบจำลองที่ใช้ในโปรแกรมและพิจารณาตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 โดยกำหนดให้ปรับค่า DPF จาก 0.82 เป็น 1.00 เพื่อสร้างกราฟอัตราการแบ่งกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบที่เกิดขึ้นจริง (H_{ods}) และนำค่า H_{spec} มาเปรียบเทียบ จากกราฟกรณีที่ว่า H_{spec} มีค่ามากกว่าคุณบ่งชี้จะแสดงถึงปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานตั้งแต่ก่อนการต่อตัวกรองฮาร์มอนิก และ ผลของการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกที่ทำให้ปริมาณฮาร์มอนิกต่ำกว่ามาตรฐานพิจารณาได้จากที่กราฟ H_{ods} มีค่าต่ำกว่า H_{spec} ที่ความถี่ฮาร์มอนิกในระบบ, วิธีที่ใช้ในการออกแบบนี้ยังสามารถแสดงการเปรียบเทียบการ

ตารางที่ 7.7 การคำนวณค่าอัตราการแบ่งกระแสฮาร์มอนิกได้สูงสุดตามมาตรฐาน (H_{spec})

ตารางที่ใช้ในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกโดยใช้วิธี Transfer Function						
Current Demand at PCC (Amp), I_L	4.52					
Current Demand at Harmonic Source (Amp)	2.65					
Harmonic-order	5th	7th	11th	13th	17th	19th
IEEE limit (in % of I_L) (กรณี I_{sc}/I_L 50-100)	10	10	4.5	4.5	4	4
RMS. Harmonic Current at Harmonic Source (Amp.)	0.62	0.41	0.26	0.19	0.16	0.09
RMS. Harmonic Current at Harmonic Source (in % of I_L)	13.72	9.07	5.75	4.20	3.54	1.99
H_{spec}	0.73	1.10	0.78	1.07	1.13	2.01
H_{spec} (dB)	-2.75	0.85	-2.13	0.59	1.06	6.06

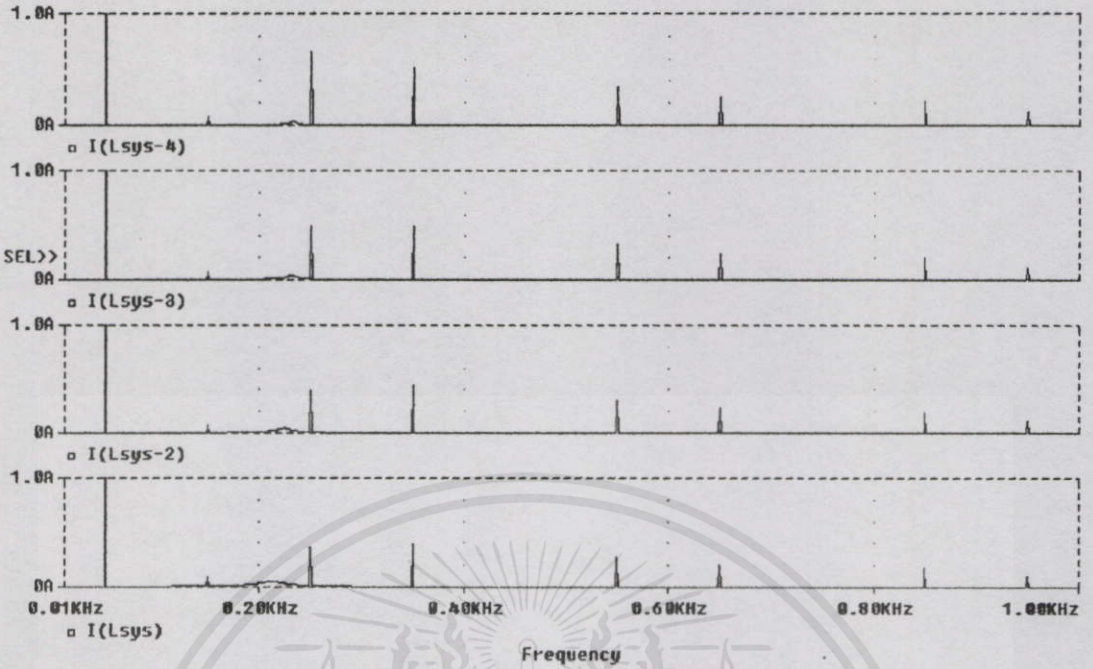
เลือกใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดอื่นๆ หรือที่ค่าแฟกเตอร์คุณภาพอื่นๆ (พิจารณาจาก DPF) เทียบกันได้ ซึ่งแสดงตัวอย่างผลการเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกสภายหลังต่อตัวกรองอันดับที่ 5 ดังรูปที่ 7.35 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อพิจารณาเบื้องต้นกรณีที่มี DPF เท่ากับ 1.00 มีความเหมาะสมกว่าในกรณี DPF 0.85, 0.9 และ 0.95 และผลการเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกสภายหลังต่อตัวกรองแสดงดังรูปที่ 7.36 แต่อย่างไรก็ตามกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ก็ยังสูงกว่ามาตรฐาน ดังนั้นจึงพิจารณาต่อตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 เพิ่มเติม



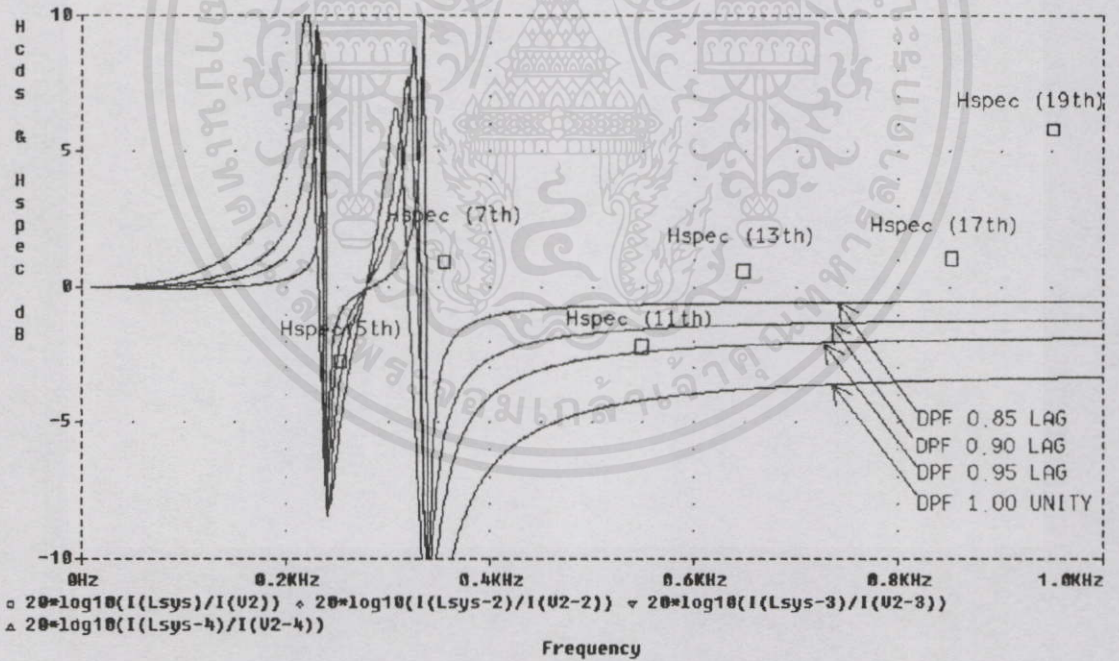
รูปที่ 7.35 การเปรียบเทียบ H_{cds} กับ H_{spec} กรณีค่า DPF = 1.00, 0.95, 0.90 และ 0.85

ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกสภายหลังต่อตัวกรองอันดับที่ 5 และ 7 ที่ค่า DPF ต่างๆแสดงดังรูปที่ 7.37 และผลการเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกสภายหลังต่อตัวกรองแสดงดังรูปที่ 7.38, ซึ่งจะเห็นว่ากรณีที่มี DPF เท่ากับ 1.00 มีความเหมาะสมกว่าในกรณี DPF 0.85, 0.9 และ 0.95 ดังนั้นในกรณีนี้จะเลือกใช้ตัวกรองตัวกรองฮาร์มอนิกความถี่เดียว 2 อันดับดังกล่าว ซึ่งมีรายละเอียดของตัวกรองดังนี้คือ อันดับที่ 5 คาปาซิเตอร์ 20 μ F, อินดักเตอร์ 22 mH อันดับเท่ากับ 4.8 แฟกเตอร์คุณภาพเท่ากับ 20 และอันดับที่ 7 คาปาซิเตอร์ 22 μ F, อินดักเตอร์ 11 mH อันดับเท่ากับ 6.79 แฟกเตอร์คุณภาพเท่ากับ 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

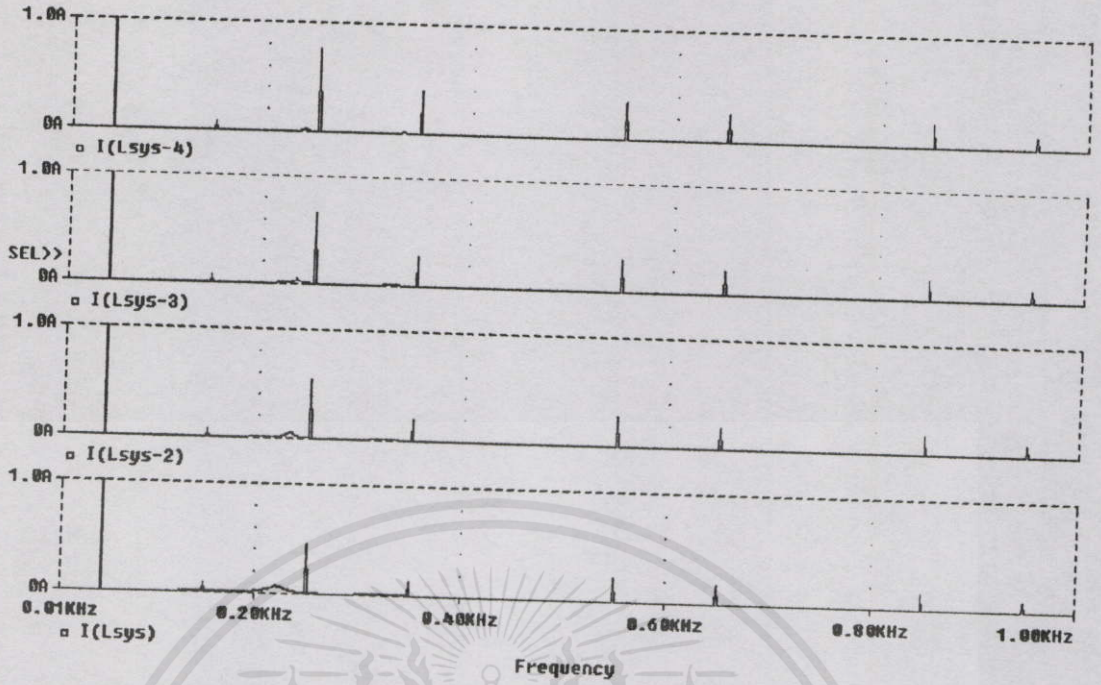


รูปที่ 7.26 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกสัณฐานค่า DPF 1.00-0.85 [I(Lsys)-I(Lsys-4)]



รูปที่ 7.37 การเปรียบเทียบ H_{ods} กับ H_{spec} กรณีค่า DPF = 1.00, 0.95, 0.90 และ 0.85

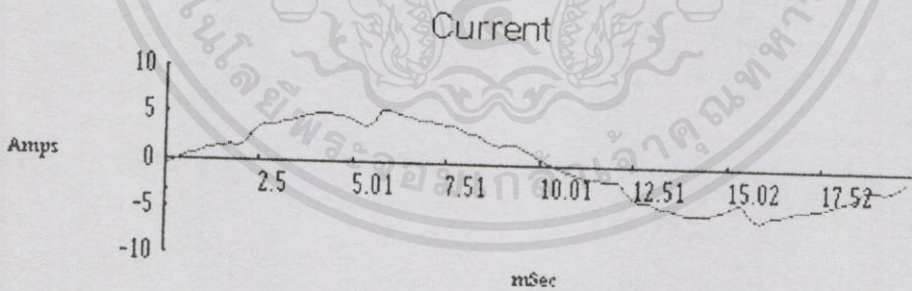
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



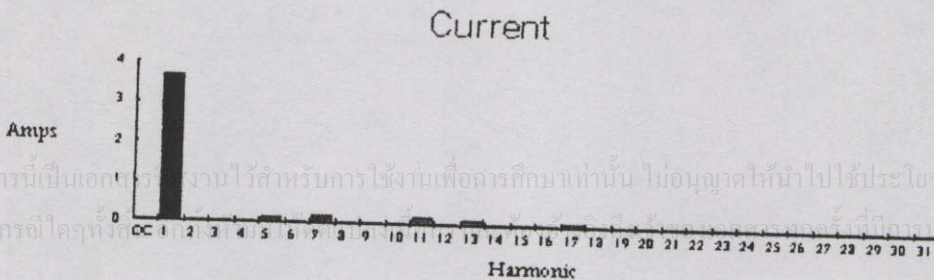
รูปที่ 7.38 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์โมนิกส์กรณีค่า DPF 1.00-0.85 [$I(Lsys)$ - $I(Lsys-4)$]

7.4.2.3 ผลการทดลองหลังการต่อตัวกรองฮาร์โมนิกส์เปรียบเทียบกับมาตรฐาน :

เมื่อได้จัดสร้างตัวกรองฮาร์โมนิกส์ตามที่ได้ออกแบบ และทำการทดสอบคุณสมบัติตัวกรองฮาร์โมนิกส์แล้ว ต่อจากนั้นจะเป็นการทดลองกรณีภายหลังการต่อตัวกรองฮาร์โมนิกส์ในระบบเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานในตาราง ซึ่งตัวอย่างของผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 7.39

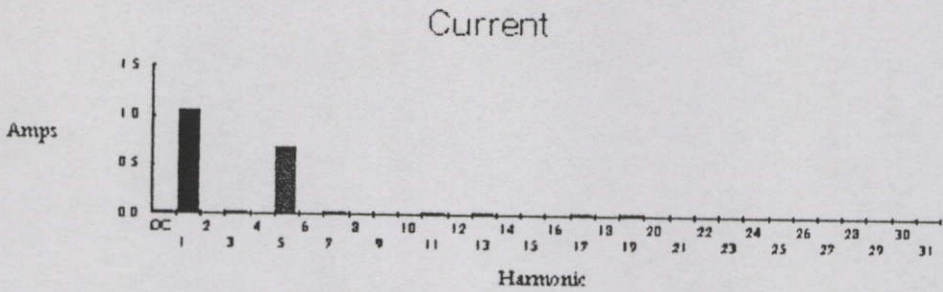


(ก)

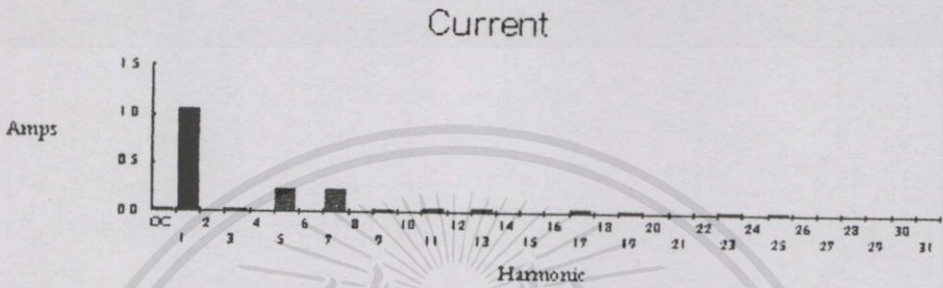


(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น



(ก)



(ง)

Single Phase Readings - 01/05/80 05:51:38

		Voltage		Current
Frequency	49.94	RMS	217.8	3.67
Power		Peak	316.7	5.76
KW	0.79	DC Offset	0.3	-0.02
KVA	0.80	Crest	1.45	1.57
KVAR	0.11	THD Rms	2.93	11.43
Peak KW	1.70	THD Fund	2.93	11.50
Phase	8ฐ lag	HRMS	6.4	0.42
Total PF	0.98	KFactor	2.90	
DPF	0.99			

(จ)

รูปที่ 7.39 ผลการทดลองที่วัดได้ในระบบจำลองที่จุด PCC

(ก) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้า

(ข) สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

(ค) สเปกตรัมของกระแสที่ตัวกรองฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5

ไม่อาจรู้ได้ว่าทางอื่น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ง) สเปกตรัมของกระแสที่ตัวกรองฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 7

(จ) พารามิเตอร์อื่นๆที่สำคัญที่ได้จากการวัด

จากผลการทดลองและการเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานดังตารางที่ 7.8 หลังการต่อตัวกรองฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 และ 7 จะเห็นว่าปริมาณฮาร์โมนิกส์ทุกอันดับและปริมาณอาร์โมนิกส์โดยรวมมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน และค่าตัวประกอบกำลัง DPF มีค่าสูงขึ้นเป็น 0.99 สำหรับ โกล์เคียงตามที่ได้ออกแบบไว้

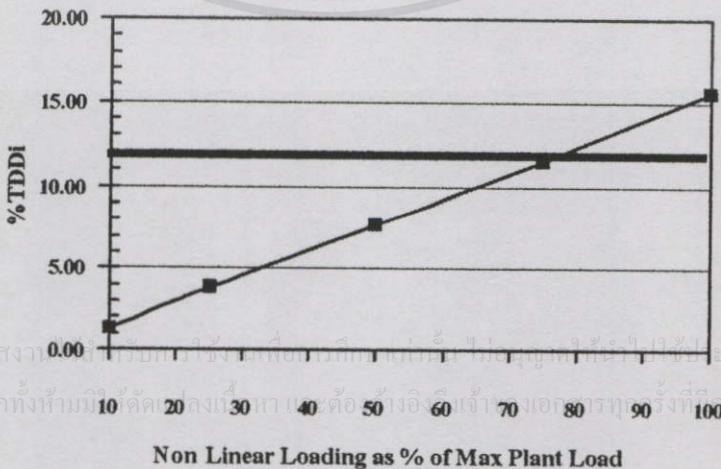
ตารางที่ 7.8 เปรียบเทียบกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่วัดได้กับค่ามาตรฐานหลังต่อตัวกรอง

Distortion Calculation for a Industrial Plant at PCC (120V-69,000V)													
AC Voltage Controller as Non-linear Load													
System Size		Ratio		Total Demand		Non-linear Load		RMS. Harmonic Current (Amp.)					
kVA _{sc}	I _{sc} (A)	I _{sc} /I _L	kVA	IL(Fun))	kW	I(Fun)	5th	7th	11th	13th	17th	19th	%TDD&THDv
			2.4	4.52	1.38	2.66	0.17	0.22	0.2	0.13	0.12	0.07	
			Harmonic Current (in % of IL)				3.76	4.87	4.42	2.88	2.65	1.55	9.26
154.14	234	52	IEEE limit (in % of IL) (50-100)				10	10	4.5	4.5	4	4	12
			Harmonic Voltage at PCC BUS (%)				1.96	0.45	0.87	0.79	0.96	0.57	3.93
			IEEE Voltage limit (%)				3	3	3	3	3	3	5

7.4.2.4 การวิเคราะห์ปริมาณฮาร์โมนิกส์หลังต่อตัวกรองฮาร์โมนิกส์

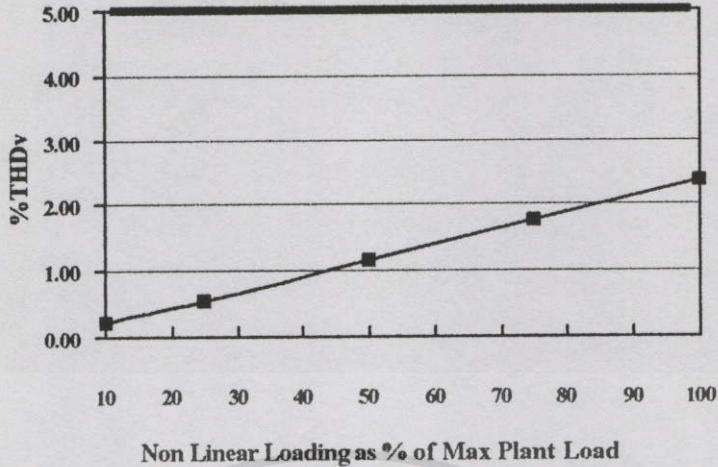
เพื่อให้ทราบถึงปริมาณฮาร์โมนิกส์ในอนาคต เมื่อระบบอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมหลังการต่อตัวกรองฮาร์โมนิกส์ดังกล่าว เพื่อประโยชน์ในการเตรียมการแก้ปัญหาฮาร์โมนิกส์ต่อไปควรจะมีการวิเคราะห์ถึงปริมาณฮาร์โมนิกส์ใน 2 กรณีที่สำคัญคือ

1. เมื่อเปอร์เซ็นต์การใช้งานระหว่างโหลดแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้นเปลี่ยนไป โดยพิกัดกำลังรวมของของระบบคงที่
2. เมื่อระบบมีการต่อใช้งาน โหลดแบบเชิงเส้นเพิ่มขึ้น และมีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของระบบเปลี่ยนไป



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทน โดยขอสงวนสิทธิ์ในการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำข้อมูลไปเผยแพร่ต่อสื่อมวลชนหรือบุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต



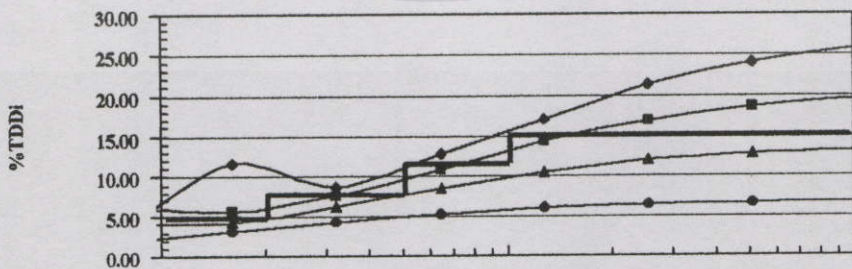
(ข)

รูปที่ 7.40 ปริมาณฮาร์มอนิกส์โดยรวมที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า

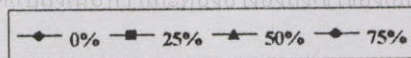
ซึ่งการวิเคราะห์กรณีดังกล่าวโดยใช้แบบจำลองด้วยโปรแกรม PSPICE จะได้ผลดังรูปที่ 7.40 และ 7.41 ตามลำดับ

จากผลการทดลองในรูปที่ 7.40 พอจะสรุปได้ว่า เพื่อให้ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์โดยรวมมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ระบบนี้จะสามารถใช้โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นได้ไม่เกิน 75% (เดิม 45%) และปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกส์โดยรวมจะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานตลอดช่วงตั้งแต่ 10-100%

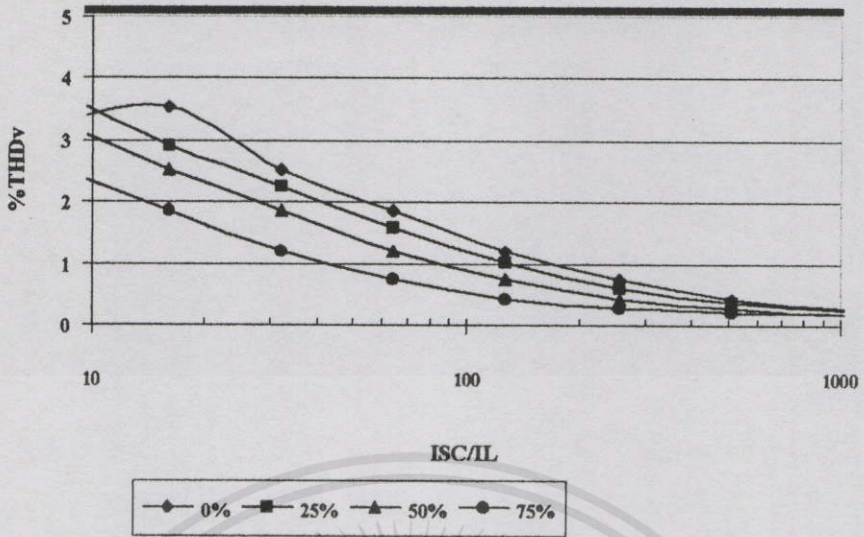
และจากผลการทดลองในรูปที่ 7.41 พอจะสรุปได้ว่า เพื่อให้ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์โดยรวมมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ในช่วง I_{sc}/I_L 10-1000, ระบบนี้จะต้องใช้โหลดแบบเชิงเส้นไม่น้อยกว่า 50% (พิกัดโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นเดิมคิดเทียบเป็น 50% ของพิกัดโดยรวม) และ ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกส์โดยรวมจะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานตลอดช่วง I_{sc}/I_L 10-1000 ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์แบบเชิงเส้น 0-75%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา แต่ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

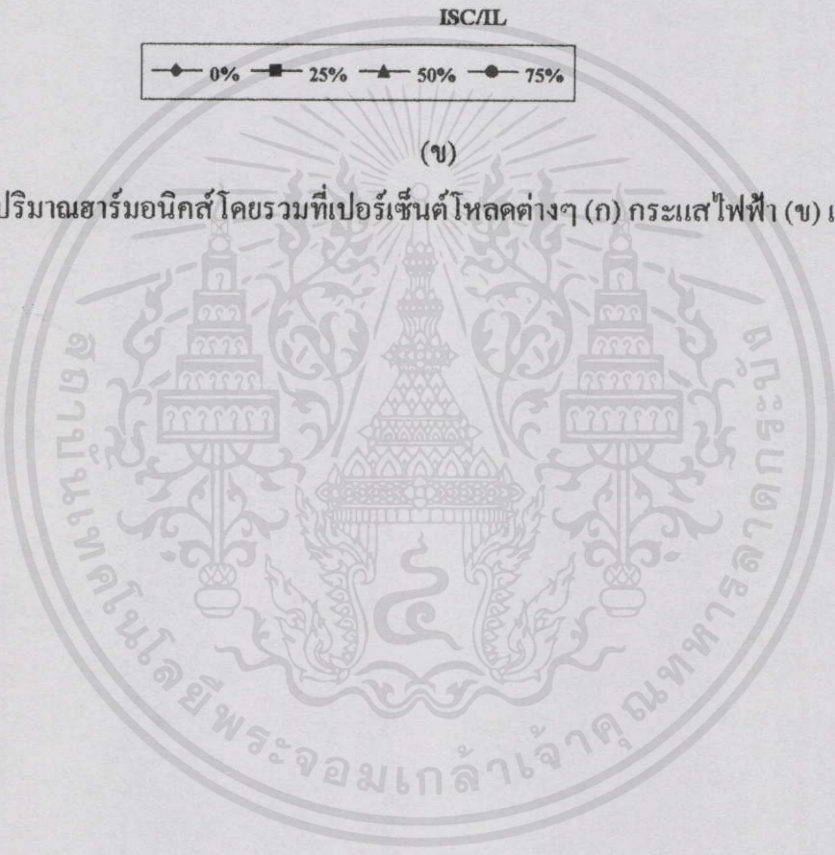


(ก)



(ข)

รูปที่ 7.41 ปริมาณฮาร์โมนิกส์ โดยรวมที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4.3 กรณีโหลดเป็นแบบชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

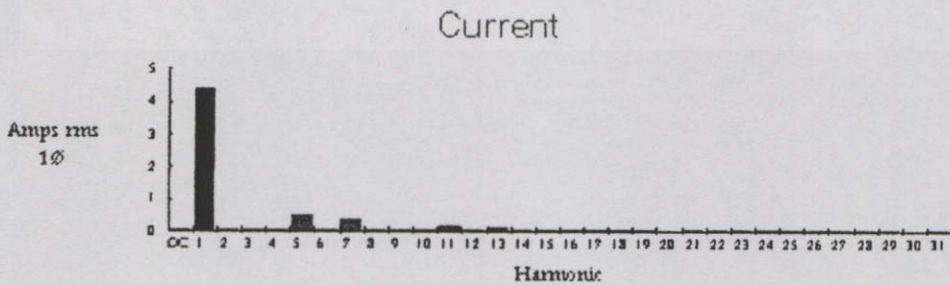
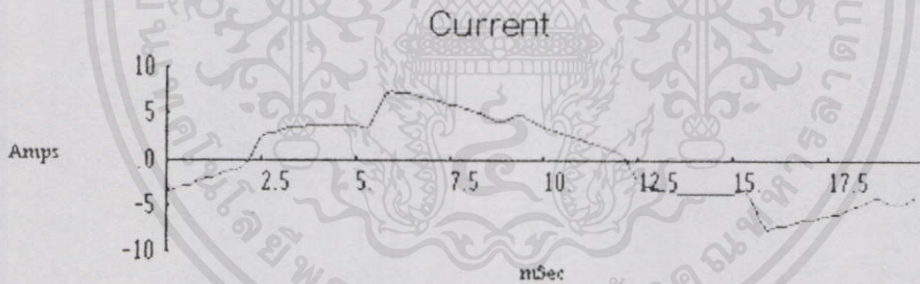
พิกัดสำหรับ โหลดแบบเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับระบบนี้จะเลือกที่ 80% : 20% ตามลำดับ ซึ่งตัวอย่างผลการทดลอง ณ จุด PCC ที่วัดได้จริงในห้องปฏิบัติการแสดงดังรูปที่ 7.42

7.4.3.1 การเปรียบเทียบปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่วัดได้กับตารางมาตรฐาน :

ในมาตรฐาน IEEE 519-1992 ได้กำหนดตัวอย่างของตารางเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบข้อมูลของฮาร์มอนิกส์ที่บันทึกได้จากการวัดกับค่ามาตรฐาน ซึ่งเมื่อนำข้อมูลที่ได้ในกรณีนี้ไปเปรียบเทียบจะได้ดังตารางที่ 7.9 และ 7.10 ตามลำดับจากตารางจะเห็นว่าปริมาณกระแสสูงสุดที่ระบบต้องการ I_L จริงจะเท่ากับ 4.43 แอมป์ ค่ามาตรฐานของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ใช้จะอยู่ในช่วง I_x/I_L 50-100 ซึ่งพบว่ากระแสฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5, 7, 11 และปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์โดยรวมมีค่าเกินมาตรฐาน โดยในส่วนของแรงดันฮาร์มอนิกส์ และปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกส์โดยรวมทั้งหมดยังไม่เกินค่ามาตรฐาน

7.4.3.2 การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก :

จากผลของการเปรียบเทียบปริมาณฮาร์มอนิกส์กับค่ามาตรฐานจะเห็นว่าในกรณีนี้เพื่อให้ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ต่ำกว่ามาตรฐานในทุกอันดับจะต้องเริ่มจากตัวกรองฮาร์มอนิกในอันดับที่ 5 และเป็นไปได้ว่าจะต้องต่อ อันดับที่ 7 ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Single Phase Readings

			Voltage	Current
Frequency	49.94	RMS	217.9	4.48
Power		Peak	306.7	7.12
KW	0.68	DC Offset	0.3	-0.04
KVA	0.98	Crest	1.41	1.59
KVAR	0.68	THD Rms	3.13	14.55
Peak KW	2.06	THD Fund	3.13	14.70
Phase	45 μ lag	HRMS	6.8	0.65
Total PF	0.70	KFactor	2.07	
DPF	0.71			

(ก)

รูปที่ 7.42 ผลการทดลองที่วัดได้ในระบบจำลองที่จุด PCC

(ก) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้า

(ข) สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้า

(ค) พารามิเตอร์อื่นๆที่สำคัญที่ได้จากการวัด

ตารางที่ 7.9 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกส์ที่วัดได้กับค่ามาตรฐาน

Current Distortion Calculation for a Industrial Plant at PCC (120V-69,000V)													
DC Drive as Non-linear Load													
System Size		Ratio	Total Demand		Non-linear Load		RMS. Harmonic Current (Amp.)						
kVA _{sc}	I _{sc} (A)	I _{sc} /IL	KVA	IL(Fund)	kW	I(Fund)	5th	7th	11th	13th	17th	19th	
			2.94	4.43	0.33	0.58	0.47	0.38	0.19	0.1	0.03	0.03	
							Harmonic Current Distortion (in % of IL)						
							5th	7th	11th	13th	17th	19th	%TDD
							10.61	8.58	4.29	2.26	0.68	0.68	14.70
			IEEE limit (in % of IL) (<20)				4	4	2	2	1.5	1.5	5
154.14	234	53	IEEE limit (in % of IL) (20-50)				7	7	3.5	3.5	2.5	2.5	8
			IEEE limit (in % of IL) (50-100)				10	10	4.5	4.5	4	4	12
			IEEE limit (in % of IL) (100-1000)				12	12	5.5	5.5	5	5	15
			IEEE limit (in % of IL) (>1000)				15	15	7	7	6	6	20

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกหนึ่งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีในการวิเคราะห์ที่ราสเฟอร์ฟังก์ชันของอัตราในการแบ่งกระแสสองชนิด ที่จุด PCC คืออัตราการแบ่งกระแสฮาร์มอนิกส์เข้าสู่ระบบที่

เกิดขึ้นจริง (กราฟ H_{ods}) กับ อัตราการแบ่งกระแสฮาร์มอนิกส์ได้สูงสุดตามมาตรฐาน (H_{spec}) โดย H_{spec} (dB) ที่คำนวณได้สำหรับระบบนี้แสดงดังตารางที่ 7.11

ตารางที่ 7.10 เปรียบเทียบแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่วัดได้กับค่ามาตรฐาน

Voltage Distortion Calculation for a Industrial Plant, 220V PCC Bus System														
DC Drive as Non-linear Load														
System Size		Ratio	Z _{sys}	%Z _{sys}	V1(PCC)	Harmonic Voltage at PCC BUS (Volt)						THDv	IEEE STD.	
kVA _{sc}	I _{sc} (A)	I _{sc} /I _L	(Ohm)	(1kVA) _b	(Volt)	5th	7th	11th	13th	17th	19th	(%)	%Ind.	%THD
154.14	233.55	53	0.94	1.95	217.84	4.92	3.39	2.22	1.44	0.50	0.70			
						Harmonic Voltage at PCC BUS (%)								
						2.26	1.56	1.02	0.66	0.23	0.32	3.13	3	5

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองไปปรับปรุงกระแสฮาร์มอนิกส์ในแบบจำลองที่ใช้ในโปรแกรม และพิจารณาต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5 โดยกำหนดให้ปรับค่า DPF จาก 0.71 เป็น 1.00 เพื่อสร้างกราฟอัตราการแบ่งกระแสฮาร์มอนิกส์เข้าสู่ระบบที่เกิดขึ้นจริง (H_{ods}) และนำค่า H_{spec} มาเปรียบเทียบ จากกราฟกรณีที่ค่า H_{spec} มีค่ามากกว่าศูนย์จะแสดงถึงปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานตั้งแต่ก่อนการต่อตัวกรองฮาร์มอนิก และ ผลของการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกที่ทำให้ปริมาณฮาร์มอนิกส์ต่ำกว่ามาตรฐานพิจารณาได้จากที่กราฟ H_{ods} มีค่าต่ำกว่า H_{spec} ที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ในระบบ, วิธีที่ใช้ในการออกแบบนี้ยังสามารถแสดงการเปรียบเทียบการเลือกใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกส์ชนิดอื่นๆ หรือที่ค่าแฟคเตอร์คุณภาพอื่นๆ (พิจารณาจาก DPF) เทียบกันได้ ซึ่งแสดงตัวอย่างผลการเปรียบเทียบภายหลังต่อตัวกรองอันดับที่ 5 ดังรูปที่ 7.43 ซึ่งจะเห็นว่ากรณีที่ DPF เท่ากับ 1.00 มีความเหมาะสมกว่าในกรณี DPF 0.85, 0.9 และ 0.95 และผลการเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกส์ภายหลังต่อตัวกรองแสดงดังรูปที่ 7.44

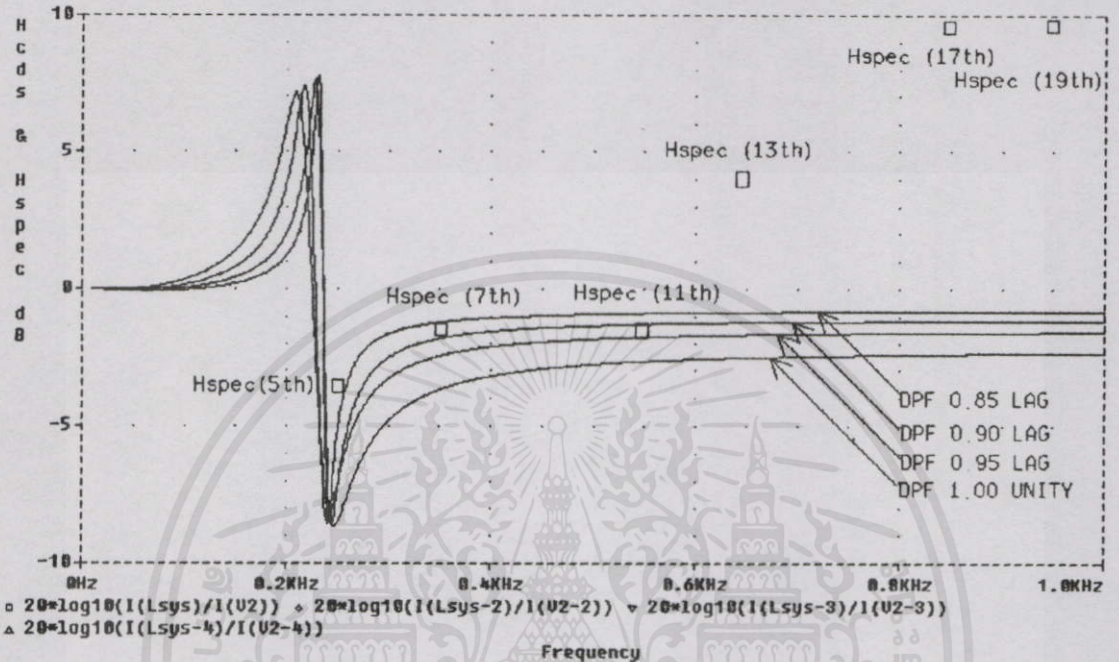
ตารางที่ 7.11 การคำนวณค่าอัตราการแบ่งกระแสฮาร์มอนิกส์ได้สูงสุดตามมาตรฐาน (H_{spec})

ตารางที่ใช้ในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์โดยใช้วิธี Transfer Function						
Current Demand at PCC (Amp), I_L	4.43					
Current Demand at Harmonic Source (Amp)	0.58					
Harmonic-order	5th	7th	11th	13th	17th	19th
IEEE limit (in % of I_L) (กรณี I _{sc} /I _L 20-50)	7	7	3.5	3.5	2.5	2.5
RMS. Harmonic Current at Harmonic Source (Amp.)	0.46	0.36	0.18	0.10	0.03	0.03
RMS. Harmonic Current at Harmonic Source (in % of I_L)	10.38	8.13	4.06	2.26	0.68	0.68
H_{spec}	0.67	0.86	0.86	1.55	3.69	3.69
H_{spec} (dB)	-3.43	-1.30	-1.30	3.81	11.34	11.34

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 7.43 ลักษณะกราฟ H_{ods} จะมีค่าสูงกว่าค่าศูนย์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3 เท่ากับ 1.5dB (กระแสฮาร์มอนิกส์ที่ไหลกลับระบบสูงกว่าที่แหล่งกำเนิด 20%) ซึ่งเป็นผล

ของปรากฏการณ์เรโซแนนซ์แบบขนานเมื่อต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ในระบบ โดยอาจพิจารณาแก้ไขได้ด้วยการลดค่ากำลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ตัวกรองอันดับที่ 5 ลงครึ่งหนึ่ง และมาชดเชยเพิ่มเติมที่ตัวกรองอันดับที่ 7

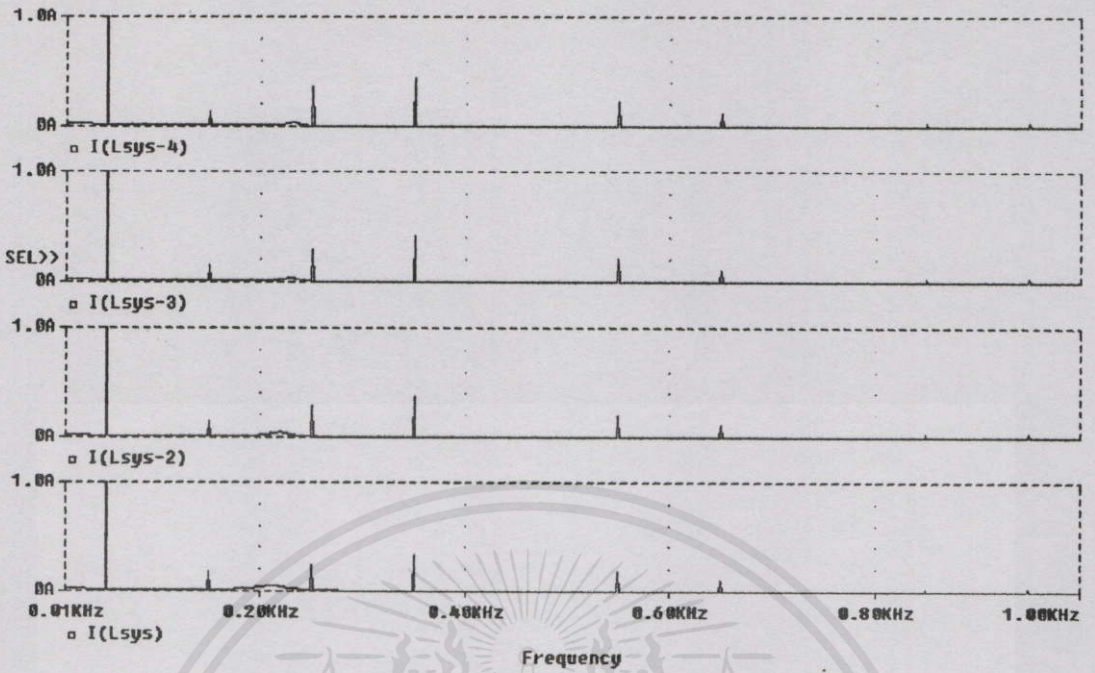


รูปที่ 7.43 การเปรียบเทียบ H_{ods} กับ H_{spec} กรณีค่า DPF = 1.00, 0.95, 0.90 และ 0.85

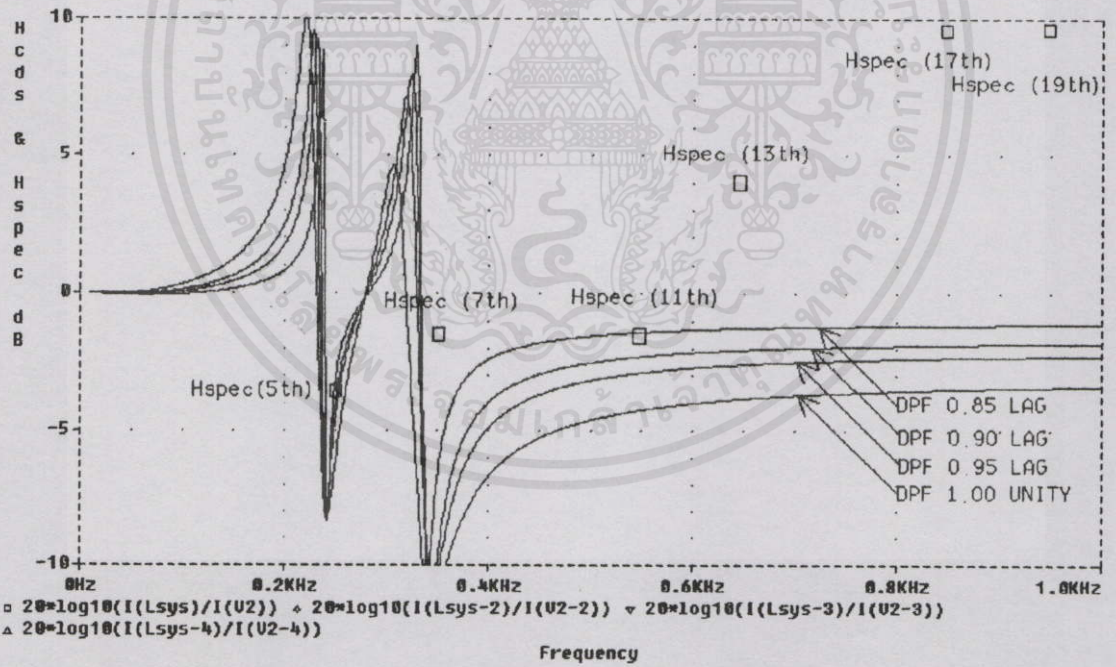
ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบภายหลังต่อตัวกรองอันดับที่ 5 และ 7 ที่ค่า DPF ต่างๆแสดงดังรูปที่ 7.45 และผลการเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกส์ภายหลังต่อตัวกรองแสดงดังรูปที่ 7.46, ซึ่งจะเห็นว่ากรณี DPF เท่ากับ 1.00 มีความเหมาะสมกว่าในกรณี DPF 0.85, 0.9 และ 0.95 แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าช่วงของกราฟ H_{ods} ตรงความถี่ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5 จะมีช่วงแคบมาก ซึ่งผลของการดีขึ้นไปเนื่องจากองค์ประกอบของตัวกรองอาจทำให้ไม่สามารถกรองฮาร์มอนิกส์ดังกล่าวได้ตามที่ต้องการ

โดยแนวทางแก้ไขที่ควรนำมาใช้คือการแบ่งกำลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ตัวกรองฮาร์มอนิกตามเปอร์เซ็นต์ของกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบ ซึ่งในที่นี้จะแบ่งกำลังงานดังกล่าวที่ตัวกรองอันดับที่ 5 และ 7 ด้วยอัตราส่วน 80 : 20 (จากเดิม 50 : 50)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

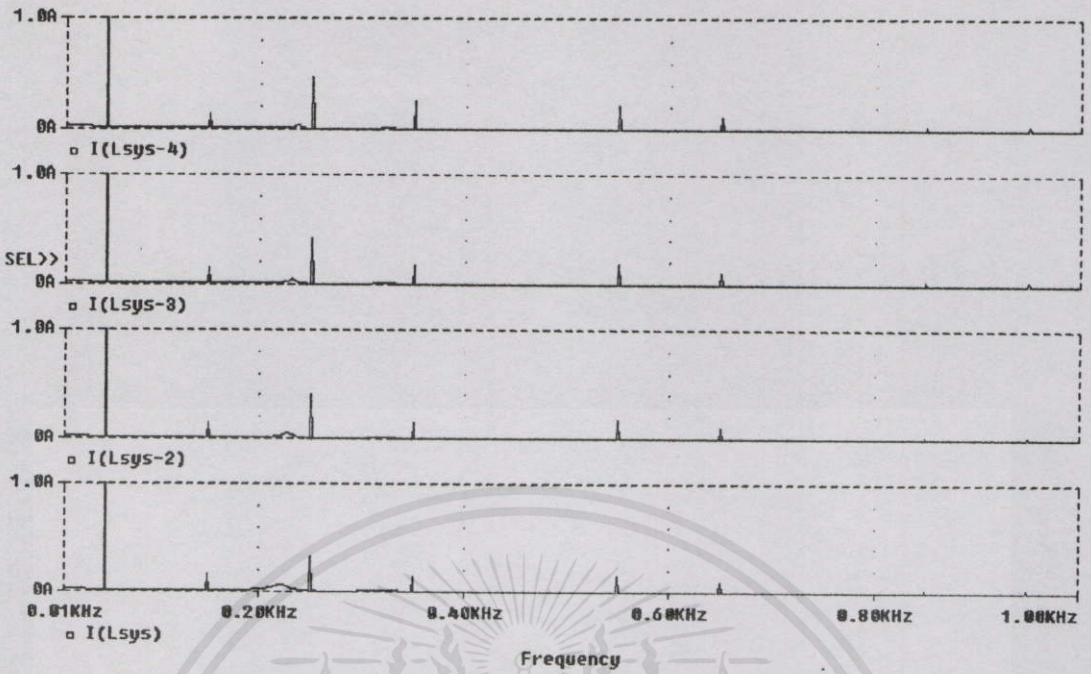


รูปที่ 7.44 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกอันดับค่า DPF 1.00-0.85 [I(Lsys)- I(Lsys-4)]

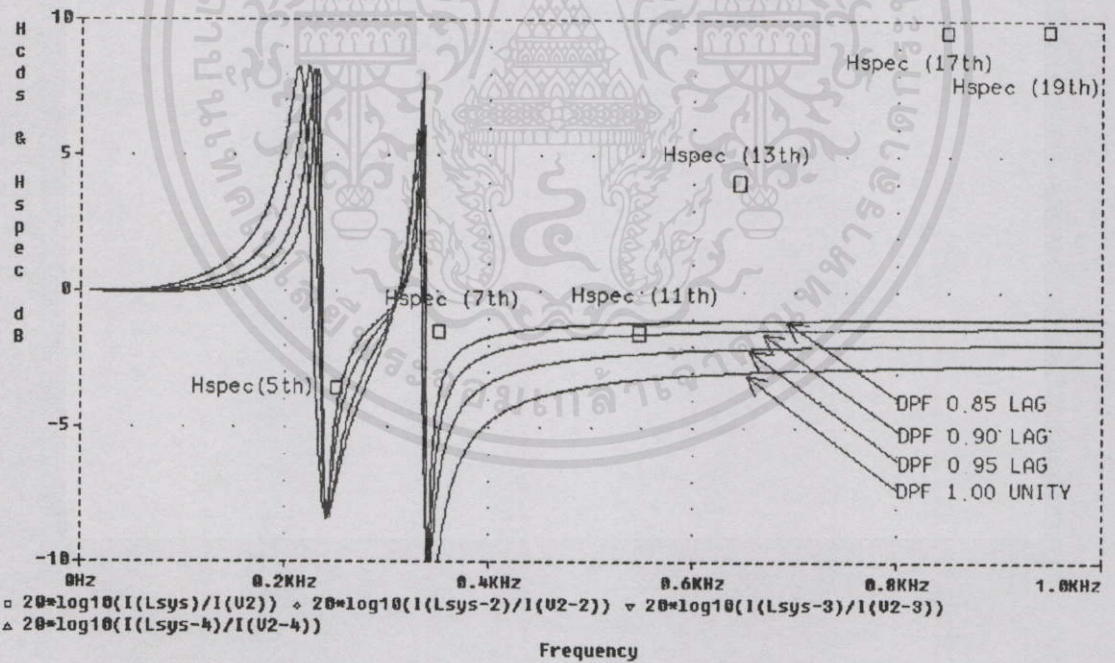


รูปที่ 7.45 การเปรียบเทียบ H_{ods} กับ H_{spec} กรณีค่า DPF = 1.00, 0.95, 0.90 และ 0.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



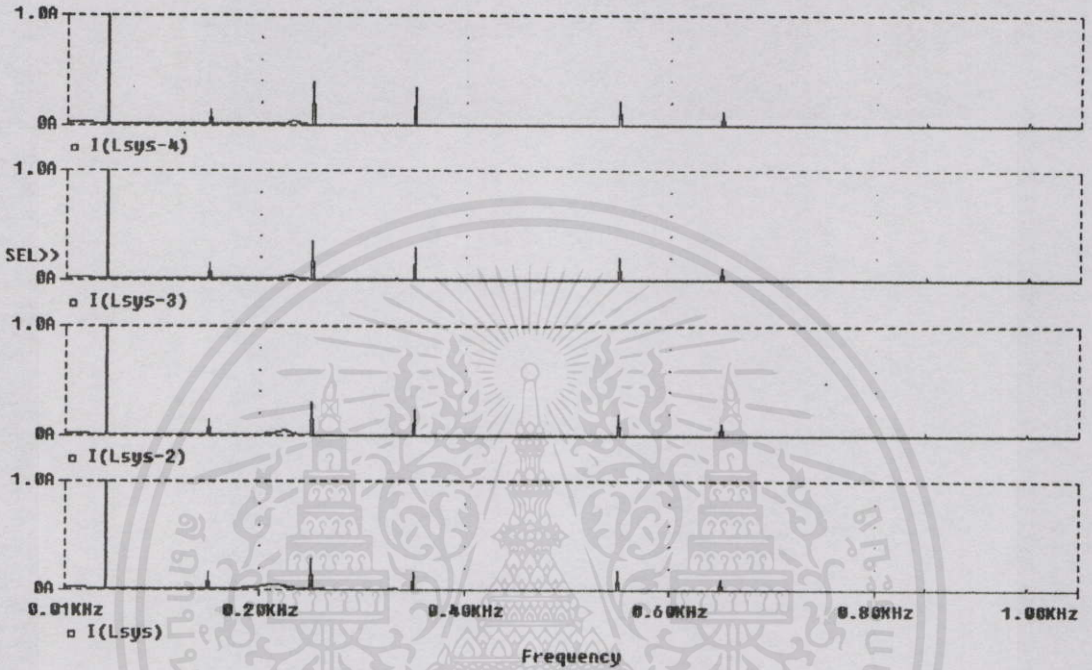
รูปที่ 7.46 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกสักรณีก่า DPF 1.00-0.85 [I(Lsys)- I(Lsys-4)]



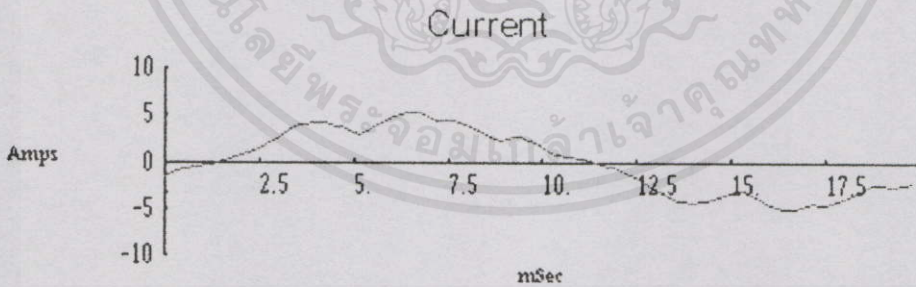
รูปที่ 7.47 การเปรียบเทียบ H_{ods} กับ H_{spec} กรณีก่า DPF = 1.00, 0.95, 0.90 และ 0.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ปรากฏตัวอย่างผลการเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกสักรณีก่าหลังต่อตัวกรองอันดับที่ 5 และ 7 ที่ค่า DPF
 ต่างๆแสดงดังรูปที่ 7.47 และผลการเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกสักรณีก่าหลังต่อตัวกรองแสดงดังรูปที่
 7.48, ซึ่งจะเห็นว่ากรณีก่า DPF เท่ากับ 0.95 และ 1.00 มีความเหมาะสมกว่าในกรณีก่า DPF 0.85 และ

0.90 ดังนั้นจึงเลือกตัวกรองฮาร์มอนิกส์แบบกรองความถี่เดียว 2 อันดับ ที่ DPF เท่ากับ 0.95 ล้างหลัง ซึ่งมีรายละเอียดของตัวกรองดังนี้คือ อันดับที่5 คาปาซิเตอร์ 20 μ F, อินดักเตอร์ 22mH อันดับเท่ากับ 4.8 แฟลคเตอร์คุณภาพเท่ากับ 17 และอันดับที่7 คาปาซิเตอร์ 5 μ F, อินดักเตอร์ 44mH อันดับเท่ากับ 6.79 แฟลคเตอร์คุณภาพเท่ากับ 35

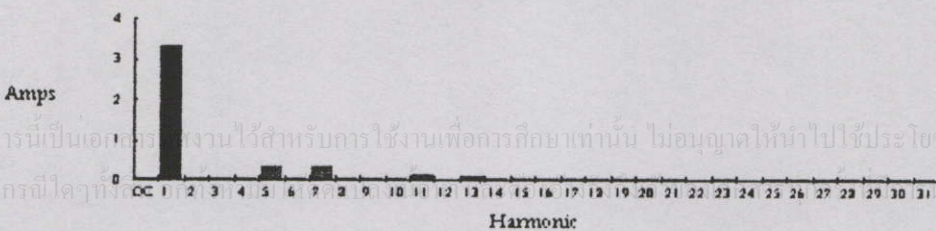


รูปที่7.48 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกส์กรณีค่า DPF 1.00-0.85 [I(Lsys)- I(Lsys-4)]



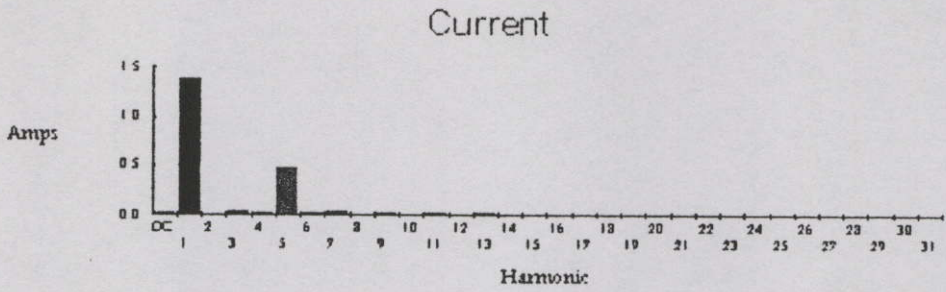
(ก)

Current

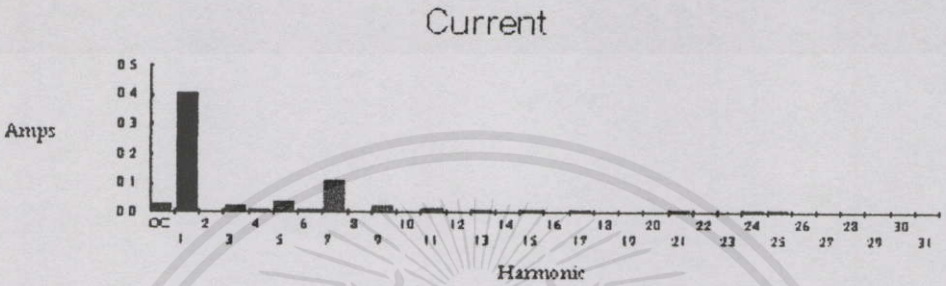


(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ



(ค)



(ง)

Single Phase Readings

	Voltage	Current
Frequency	49.99	
Power		
KW	0.68	
KVA	0.73	
KVAR	0.27	
Peak KW	1.51	
Phase	22 μ lag	
Total PF	0.92	
DPF	0.93	
	RMS	3.36
	Peak	5.38
	DC Offset	-0.03
	Crest	1.60
	THD Rms	15.59
	THD Fund	15.79
	HRMS	0.52
	KFactor	2.32

(จ)

รูปที่ 7.49 ผลการทดลองที่วัดได้ในระบบจำลองที่จุด PCC

(ก) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้า

(ข) สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้า

(ค) สเปกตรัมของกระแสที่ตัวกรองฮาร์โมนิกอันดับที่ 5

(ง) สเปกตรัมของกระแสที่ตัวกรองฮาร์โมนิกอันดับที่ 7

(จ) พารามิเตอร์อื่นๆที่สำคัญที่ได้จากการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ระบุไว้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าทางตรงหรือทางอ้อม หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำขออภัยและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.4.3.3 ผลการทดลองหลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์เปรียบเทียบกับมาตรฐาน :

เมื่อได้จัดสร้างตัวกรองฮาร์มอนิกส์ตามที่ได้ออกแบบ และทำการทดสอบคุณสมบัติตัวกรองฮาร์มอนิกส์แล้ว ต่อจากนั้นจะเป็นการทดลองกรณีภายหลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ในระบบเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานในตาราง ซึ่งตัวอย่างของผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 7.49

จากผลการทดลองและการเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานดังตารางที่ 7.12 หลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5 และ 7 จะเห็นว่าปริมาณฮาร์มอนิกส์ทุกอันดับและปริมาณฮาร์มอนิกส์โดยรวมมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน และค่าตัวประกอบกำลัง DPF มีค่าสูงขึ้นเป็น 0.93 ล้าหลัง ใกล้เคียงตามที่ได้ออกแบบไว้

ตารางที่ 7.12 เปรียบเทียบกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่วัดได้กับค่ามาตรฐานหลังต่อตัวกรอง

Distortion Calculation for a Industrial Plant at PCC (120V-69,000V)													
DC Drive as Non-linear Load													
System Size		Ratio	Total Demand		Non-linear Load		RMS. Harmonic Current (Amp.)						
kVA _{sc}	I _{sc} (A)	I _{sc} /I _L	kVA	IL(Fun)	kW	I(Fun)	5th	7th	11th	13th	17th	19th	%TDD&THD _v
			2.19	4.43	0.33	0.57	0.34	0.33	0.15	0.1	0.02	0.02	
			Harmonic Current (in % of IL)				7.67	7.45	3.39	2.26	0.45	0.45	11.83
154.14	234	53	IEEE limit (in % of IL) (50-100)				10	10	4.5	4.5	4	4	12
			Harmonic Voltage at PCC BUS (%)				1.42	0.64	0.81	0.65	0.19	0.23	2.03
			IEEE Voltage limit (%)				3	3	3	3	3	3	5

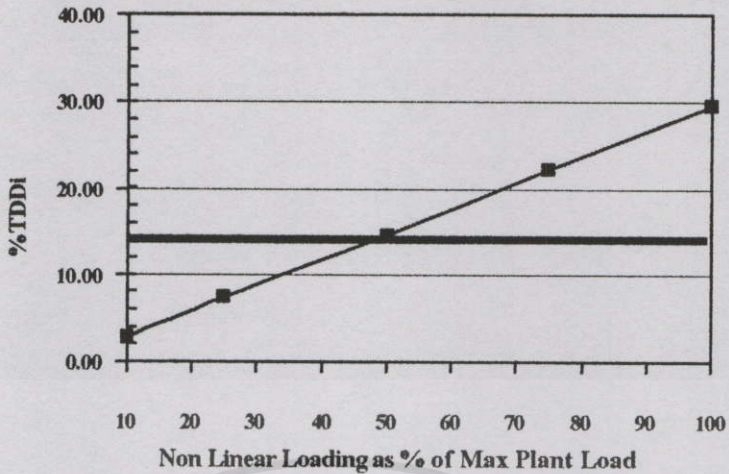
7.4.3.4 การวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกส์หลังต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์

เพื่อให้ทราบถึงปริมาณฮาร์มอนิกส์ในอนาคต เมื่อระบบอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมหลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ดังกล่าว เพื่อประโยชน์ในการเตรียมการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกส์ต่อไปควรมีการวิเคราะห์ถึงปริมาณฮาร์มอนิกส์ใน 2 กรณีที่สำคัญคือ

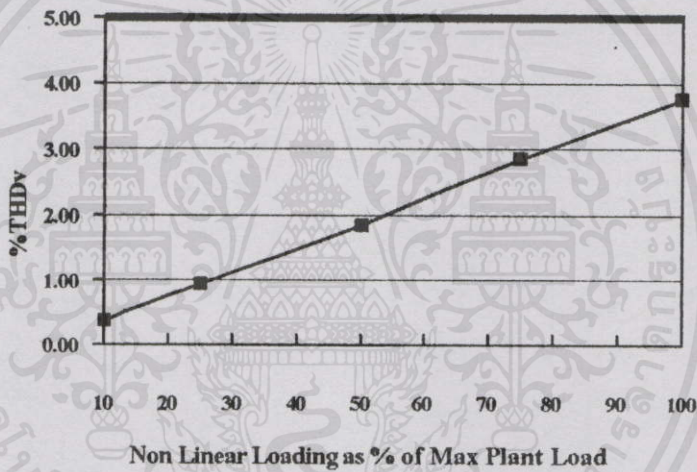
1. เมื่อเปอร์เซ็นต์การใช้งานระหว่างโหลดแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้นเปลี่ยนไป โดยพิกัดกำลังรวมของของระบบคงที่
2. เมื่อระบบมีการต่อใช้งานโหลดแบบเชิงเส้นเพิ่มขึ้น และมีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของระบบเปลี่ยนไป

ซึ่งการวิเคราะห์กรณีดังกล่าวโดยใช้แบบจำลองด้วยโปรแกรม PSPICE จะได้ผลดังรูปที่ 7.50 และ 7.51 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

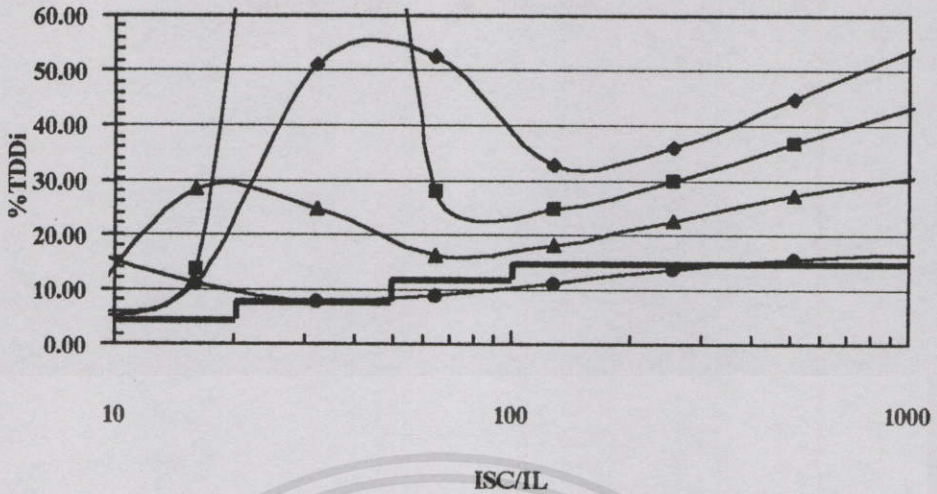


(ข)

รูปที่ 7.50 ปริมาณฮาร์มอนิกส์โดยรวมที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า

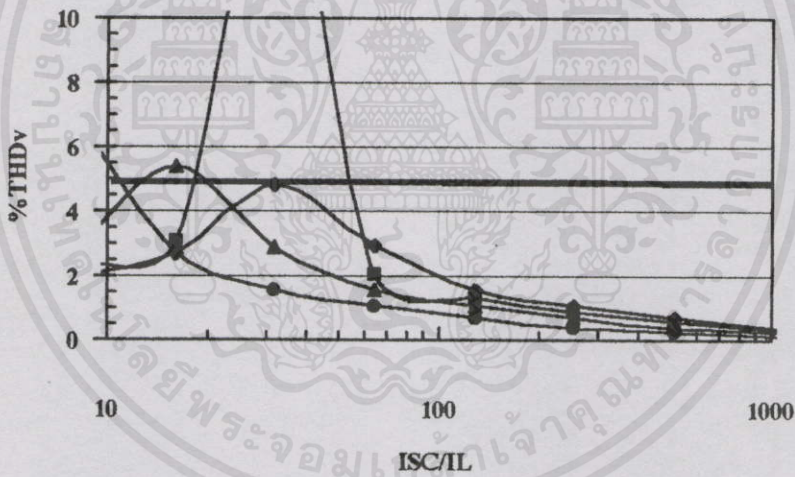
จากผลการทดลองในรูปที่ 7.50 พอจะสรุปได้ว่า หลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ทั้งสองอันดับในระบบแล้ว เพื่อให้ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์โดยรวมมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ระบบนี้จะสามารถใช้โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นได้ไม่เกิน 45% (เดิม 15%) และ ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกส์โดยรวมจะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานตลอดช่วงตั้งแต่ 10-100% (เดิม 65%)

และจากผลการทดลองในรูปที่ 7.51 พอจะสรุปได้ว่า เพื่อให้ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์โดยรวมมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ตลอดช่วง I_{s}/I_L 10-1000, ระบบนี้จะต้องใช้โหลดแบบเชิงเส้นไม่น้อยกว่า 75% (พิกัดโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นเดิมคิดเทียบเป็น 25% ของพิกัดโดยรวม) และ ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกส์โดยรวมจะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานเกือบตลอดช่วง I_{s}/I_L 10-1000 ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์แบบเชิงเส้น 0-75% โดยกราฟที่สูงขึ้นในบางช่วงเกิดจากผลเรโซแนนซ์ขนานเมื่ออิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าสูงขึ้น



—◆— 0% —■— 25% —▲— 50% —●— 75%

(ก)



—◆— 0% —■— 25% —▲— 50% —●— 75%

(ข)

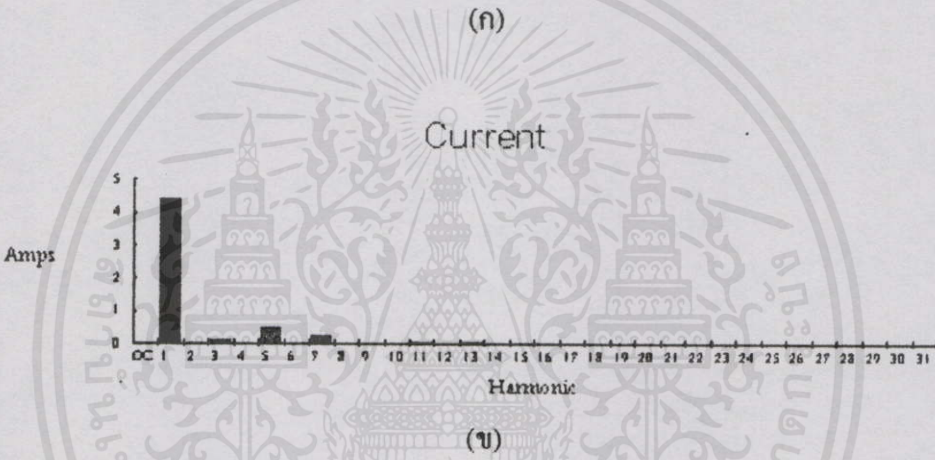
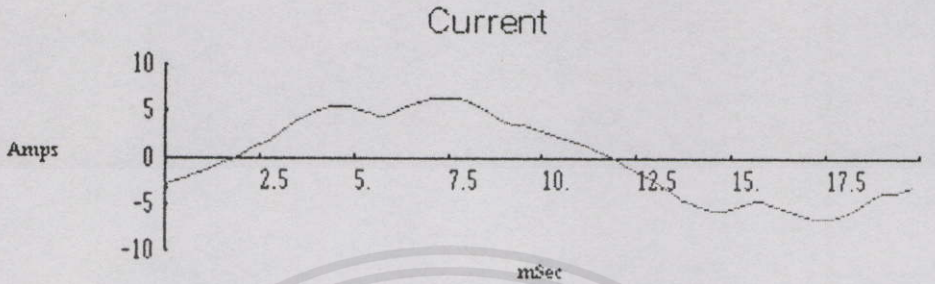
รูปที่ 7.51 ปริมาณฮาร์มอนิกส์โดยรวมที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า

7.4.4 กรณีโหลดเป็นแบบชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 พิกัดสำหรับ โหลดแบบเชิงเส้นและแบบไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับระบบนี้จะเลือกที่ 70% และ 30%
 ตามลำดับ ซึ่งตัวอย่างผลการทดลอง ณ จุด PCC ที่วัด ได้จริง ในห้องปฏิบัติการแสดงดังรูปที่ 7.52

7.4.4.1 การเปรียบเทียบปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่วัดได้กับตารางมาตรฐาน :

ในมาตรฐาน IEEE 519-1992 ได้กำหนดตัวอย่างของตารางเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบข้อมูลของฮาร์มอนิกส์ที่บันทึกได้จากการวัดกับค่ามาตรฐาน ซึ่งเมื่อนำข้อมูลที่ได้ในกรณีนี้ไปเปรียบเทียบจะได้ดังตารางที่ 7.13 และ 7.14 ตามลำดับ



Single Phase Readings

			Voltage	Current
Frequency	50.00	RMS	206.0	4.45
Power		Peak	320.4	6.64
KW	0.79	DC Offset	0.0	-0.03
KVA	0.92	Crest	1.55	1.49
KVAR	0.46	THD Rms	6.25	12.87
Peak KW	1.76	THD Fund	6.27	12.98
Phase	30 องศา lag	HRMS	12.9	0.57
Total PF	0.86	KFactor	1.55	
DPF	0.86			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาแต่อย่างใด อนึ่งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 รูปที่ 7.52 ผลการทดลองที่วัดได้ในระบบจำลองที่จุด PCC

(ก) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้า

- (ข) สเปคตรัมของกระแสไฟฟ้า
- (ค) พารามิเตอร์อื่นๆที่สำคัญที่ได้จากการวัด

จากตารางจะเห็นว่าปริมาณกระแสสูงสุดที่ระบบต้องการ I_L จริงจะเท่ากับ 4.42 แอมป์ ค่ามาตรฐานของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ใช้จะอยู่ในช่วง $I_h/I_L < 20$ ซึ่งพบว่ากระแสฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5, 7 และปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์โดยรวมมีค่าเกินมาตรฐาน โดยในส่วนของแรงดันฮาร์มอนิกส์ พบว่าแรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5, 7 และปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกส์โดยรวมมีค่าเกินมาตรฐาน

7.4.4.2 การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก :

จากผลของการเปรียบเทียบปริมาณฮาร์มอนิกส์กับค่ามาตรฐานจะเห็นว่าในกรณีนี้เพื่อให้ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ต่ำกว่ามาตรฐานในทุกอันดับจะต้องเริ่มด้วยการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกในอันดับที่ 5 โดยอาจจะต้องพิจารณาต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 7 เพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 7.13 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกส์ที่วัดได้กับค่ามาตรฐาน

Current Distortion Calculation for a Industrial Plant at PCC (120V-69,000V)													
AC Drive as Non-linear Load													
System Size		Ratio	Total Demand		Non-linear Load		RMS. Harmonic Current (Amp.)						
kVA _{sc}	I _{sc} (A)	I _{sc} /I _L	KVA	IL(Fun)	kW	I(Fun)	5th	7th	11th	13th	17th	19th	
			2.76	4.42	0.72	1.19	0.48	0.25	0.08	0.07	0.03	0.02	
							Harmonic Current Distortion (in % of IL)						
							5th	7th	11th	13th	17th	19th	%TDD
							10.86	5.66	1.81	1.58	0.68	0.45	12.98
28.90	44	10	IEEE limit (in % of IL) (<20)				4	4	2	2	1.5	1.5	5
			IEEE limit (in % of IL) (20-50)				7	7	3.5	3.5	2.5	2.5	8
			IEEE limit (in % of IL) (50-100)				10	10	4.5	4.5	4	4	12
			IEEE limit (in % of IL) (100-1000)				12	12	5.5	5.5	5	5	15
			IEEE limit (in % of IL) (>1000)				15	15	7	7	6	6	20

ตารางที่ 7.14 เปรียบเทียบแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่วัดได้กับค่ามาตรฐาน

Voltage Distortion Calculation for a Industrial Plant, 220V PCC Bus System														
AC Drive as Non-linear Load														
System Size		Ratio	Z _{sys}	%Z _{sys}	V1(PCC)	Harmonic Voltage at PCC BUS (Volt)						THD _v	IEEE STD.	
kVA _{sc}	I _{sc} (A)	I _{sc} /I _L	(Ohm)	(1kVA) _b	(Volt)	5th	7th	11th	13th	17th	19th	(%)	%Ind.	%THD
28.90	43.79	10	5.02	10.38	205.63	7.92	6.34	4.05	3.61	2.58	1.83			
						Harmonic Voltage at PCC BUS (%)								
						3.85	3.08	1.97	1.76	1.25	0.89	6.27	3	5

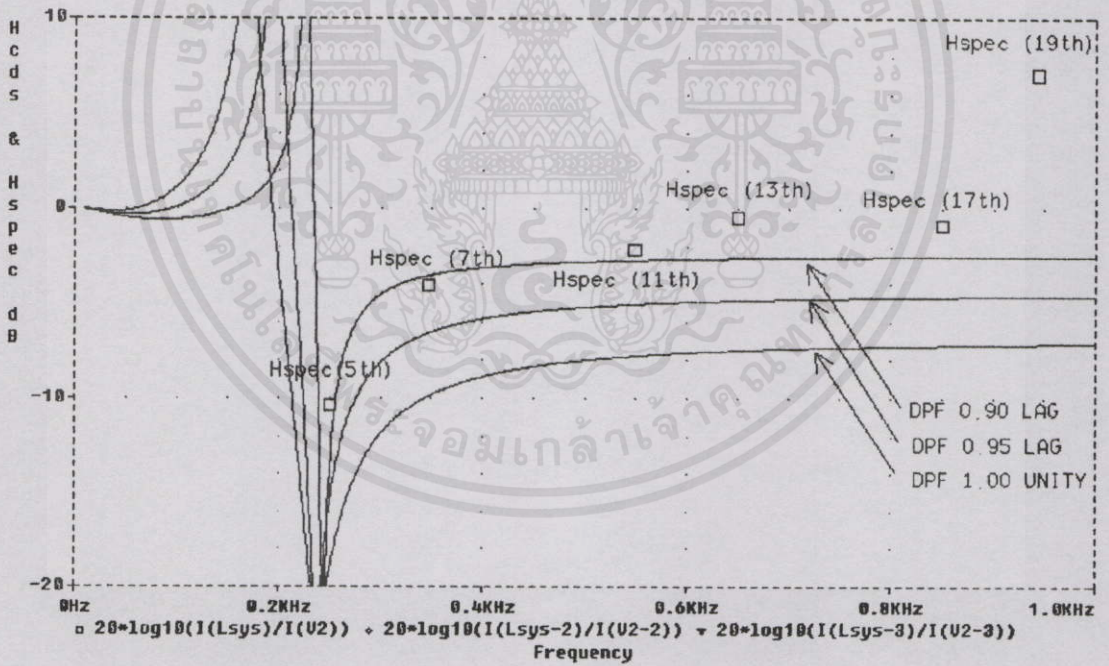
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีในการวิเคราะห์ทราสเฟอร์ฟังก์ชันของอัตราในการแบ่งกระแสสองชนิด ที่จุด PCC คืออัตราการแบ่งกระแสฮาร์มอนิกส์เข้าสู่ระบบที่

เกิดขึ้น (กราฟ H_{obs}) กับ อัตราการแบ่งกระแสฮาร์มอนิกส์ได้สูงสุดตามมาตรฐาน (H_{spec}) โดย H_{spec} (dB) ที่คำนวณได้สำหรับระบบนี้แสดงดังตารางที่ 7.15

ตารางที่ 7.15 การคำนวณค่าอัตราการแบ่งกระแสฮาร์มอนิกส์ได้สูงสุดตามมาตรฐาน (H_{spec})

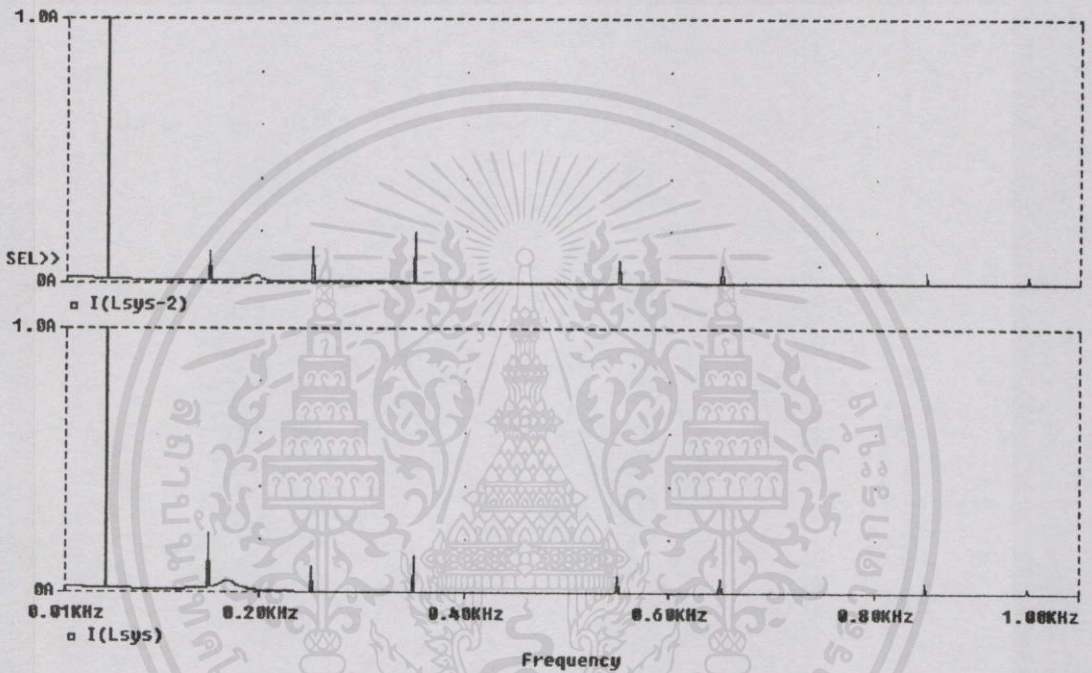
ตารางที่ใช้ในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์โดยใช้วิธี Transfer Function						
Current Demand at PCC (Amp), I_L	4.42					
Current Demand at Harmonic Source (Amp)	1.19					
Harmonic-order	5th	7th	11th	13th	17th	19th
IEEE limit (in % of I_L) (กรณี $I_{sc}/I_L < 20$)	4.00	4.00	2.00	2.00	1.50	1.50
RMS. Harmonic Current at Harmonic Source (Amp.)	0.57	0.29	0.11	0.09	0.06	0.03
RMS. Harmonic Current at Harmonic Source (% I_L)	12.90	6.56	2.49	2.04	1.36	0.68
H_{spec}	0.31	0.61	0.80	0.98	1.11	2.21
H_{spec} (dB)	-10.17	-4.30	-1.90	-0.16	0.87	6.89



รูปที่ 7.53 การเปรียบเทียบ H_{obs} กับ H_{spec} กรณีค่า DPF = 0.90-1.00

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองไปปรับปรุงกระแสฮาร์มอนิกส์ในแบบจำลองที่ใช้ในโปรแกรม PSPICE และพิจารณาต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5 โดยกำหนดให้ปรับค่า DPF จาก 0.86 เป็น 1.00 เพื่อสร้างกราฟอัตราการแบ่งกระแสฮาร์มอนิกส์เข้าสู่ระบบที่เกิดขึ้นจริง (H_{obs}) และนำค่า H_{spec} มาเปรียบเทียบ จากกราฟกรณีค่า H_{spec} มีค่ามากกว่าศูนย์จะแสดงถึงปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจาก

แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานตั้งแต่ก่อนการต่อตัวกรองฮาร์มอนิก และ ผลของการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกที่ทำให้ปริมาณฮาร์มอนิกส์ต่ำกว่ามาตรฐานพิจารณาได้จากกราฟ H_{cts} มีค่าต่ำกว่า H_{spec} ที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ในระบบ, วิธีที่ใช้ในการออกแบบนี้ยังสามารถแสดงการเปรียบเทียบการเลือกใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกส์ชนิดอื่นๆ หรือที่ค่าแฟคเตอร์คุณภาพอื่นๆ (พิจารณาจาก DPF) เทียบกันได้ ซึ่งแสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 7.53 ซึ่งจะเห็นว่ากรณีที่ DPF เท่ากับ 0.90 และ 0.95 มีการเผื่อความสามารถในการกรองน้อยกว่าในกรณี DPF เท่ากับ 1.00 ซึ่งเหมาะสมกว่า

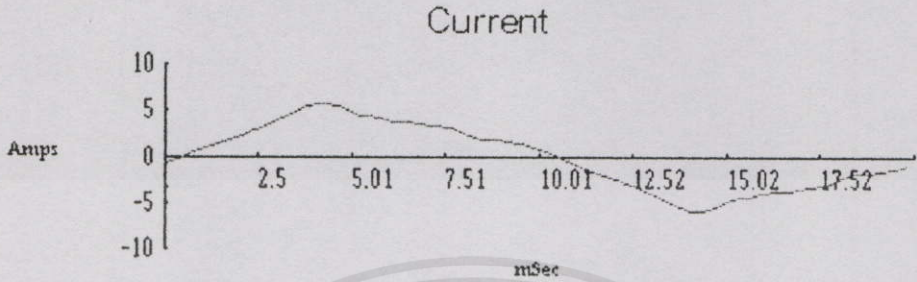


รูปที่ 7.54 การเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกส์กรณีค่า DPF = 1.00 [I(Lsys)] และ 0.95 [I(Lsys-2)]

แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นว่ากราฟ H_{cts} จะมีค่ามากกว่าศูนย์เท่ากับ 8dB (กระแสฮาร์มอนิกส์ที่ไหลกลับสู่ระบบสูงกว่าที่แหล่งกำเนิด 2.5เท่า) ในช่วงความถี่ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3 เนื่องจากผลของเรโซแนนซ์แบบขนาน ซึ่งถ้าในระบบมีฮาร์มอนิกส์อันดับดังกล่าวอยู่ในปริมาณใกล้เคียงกับข้อกำหนดในมาตรฐานก็อาจทำให้เกิดการขยายตัวขึ้นในระดับที่อาจจะสูงเกินมาตรฐาน, ผลการเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกส์ภายหลังต่อตัวกรองแสดงดังรูปที่ 7.44 ดังนั้นในกรณีนี้จะเลือกใช้ตัวกรองตัวกรองฮาร์มอนิกส์ความถี่เดียว ซึ่งมีรายละเอียดของตัวกรองดังนี้คือ คาปาซิเตอร์ 30 μ F, อินดักเตอร์ 15 mH อันดับเท่ากับ 4.75 แฟคเตอร์คุณภาพเท่ากับ 10

7.4.4.3 ผลการทดลองหลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์เปรียบเทียบกับมาตรฐาน : งานการค่า เมื่อได้จัดสร้างตัวกรองฮาร์มอนิกส์ตามที่ได้ออกแบบ และทำการทดสอบคุณสมบัติตัวกรองฮาร์มอนิกส์แล้ว ต่อจากนั้นจะเป็นการทดลองกรณีภายหลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ในระบบเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานในตาราง ซึ่งตัวอย่างของผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 7.55

จากผลการทดลองและการเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานคิงตารางที่ 7.16 หลังการต่อตัวกรองฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 จะเห็นว่าปริมาณฮาร์โมนิกส์ทุกอันดับมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน โดยยกเว้นอันดับที่ 7 ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานเล็กน้อย และปริมาณฮาร์โมนิกส์โดยรวมซึ่งสูงกว่ามาตรฐานพอสมควร



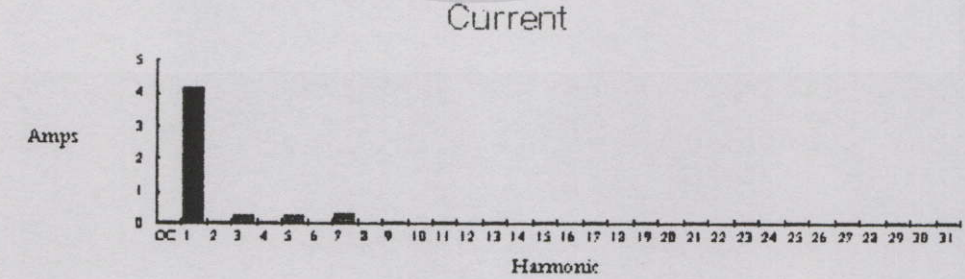
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Single Phase Readings

			Voltage	Current
Frequency	49.94	RMS	215.0	3.51
Power		Peak	331.1	5.96
KW	0.74	DC Offset	0.2	-0.03
KVA	0.75	Crest	1.54	1.70
KVAR	0.03	THD Rms	4.92	16.43
Peak KW	1.82	THD Fund	4.93	16.65
Phase	2 lag	HRMS	10.6	0.58
Total PF	0.98	KFactor	1.51	
DPF	1.00			

(จ)

รูปที่ 7.55 ผลการทดลองที่วัดได้ในระบบจำลองที่จุด PCC

- (ก) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้า
 (ข) สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้า
 (ค) สเปกตรัมของกระแสที่ตัวกรองฮาร์โมนิกอันดับที่ 5
 (ง) สเปกตรัมของกระแสที่จุด PCC กรณีใช้ DPF = 0.95
 (จ) พารามิเตอร์อื่นๆที่สำคัญที่ได้จากการวัด

ตารางที่ 7.16 เปรียบเทียบกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกที่วัดได้กับค่ามาตรฐานหลังต่อตัวกรอง

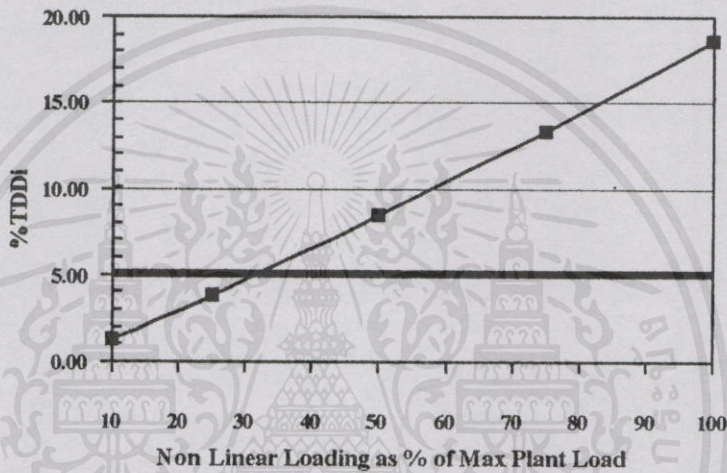
Distortion Calculation for a Industrial Plant at PCC (120V-69,000V)													
AC DRIVE as Non-linear Load													
System Size		Ratio	Total Demand		Non-linear Load		RMS. Harmonic Current (Amp.)						
kVA _{ac}	I _{sc} (A)	I _{sc} /IL	kVA	IL(Fun)	kW	I(Fun)	5th	7th	11th	13th	17th	19th	%THD
			2.25	4.42	0.54	0.86	0.17	0.21	0.05	0.04	0.03	0.03	
Harmonic Current (in % of IL)							3.85	4.75	1.13	0.90	0.68	0.68	13.03
28.90	44	10	IEEE Current limit (in % of IL) (<20)				4	4	2	2	1.5	1.5	5
Harmonic Voltage at PCC BUS (%)							0.74	2.10	0.24	1.11	0.43	1.06	4.93
IEEE Voltage limit (%)							3	3	3	3	3	3	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ซึ่งสาเหตุส่วนหนึ่งที่เห็นได้จากการทดลองจะมาจากกรณีที่ฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 มีค่าสูงขึ้น
 ซึ่งสาเหตุนี้สอดคล้องกับข้อสมมุติฐานในตอนแรกคือผลของเรโซแนนซ์ขนาน (จากรูปที่ 7.55(ข)
 ค่าฮาร์โมนิกอันดับที่ 3 จะสูงขึ้นมาเกินระดับของมาตรฐาน, 0.17แอมป์) แนวทางการแก้ไข

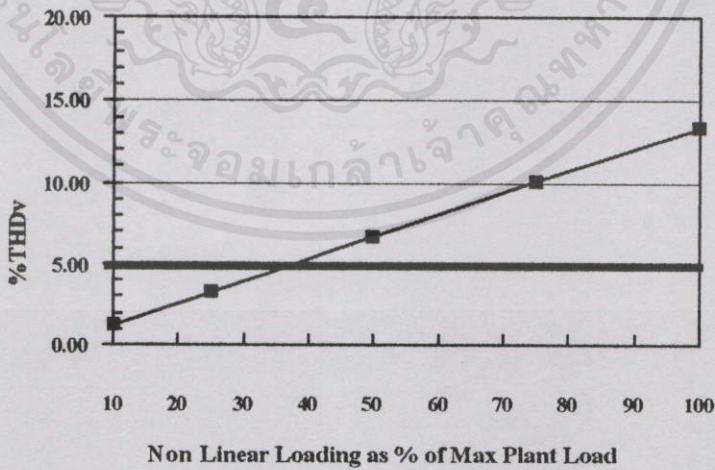
สำหรับกรณีนี้อาจใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกส์ในกรณี DPF 0.95 แทนกรณี 1.00 ซึ่งมีรายละเอียดของตัวกรองดังนี้คือ คาปาซิเตอร์ 15 μ F, อินดักเตอร์ 30 mH อันดันเท่ากับ 4.75 แฟลคเตอร์คุณภาพเท่ากับ 25 โดยผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 7.55(ง)

7.4.4.4 การวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกส์หลังต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ :

เพื่อให้ทราบถึงปริมาณฮาร์มอนิกส์ในอนาคต เมื่อระบบอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมหลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ดังกล่าว เพื่อประโยชน์ในการเตรียมการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกส์ต่อไปควรจะมีการวิเคราะห์ถึงปริมาณฮาร์มอนิกส์ใน 2 กรณีที่สำคัญคือ



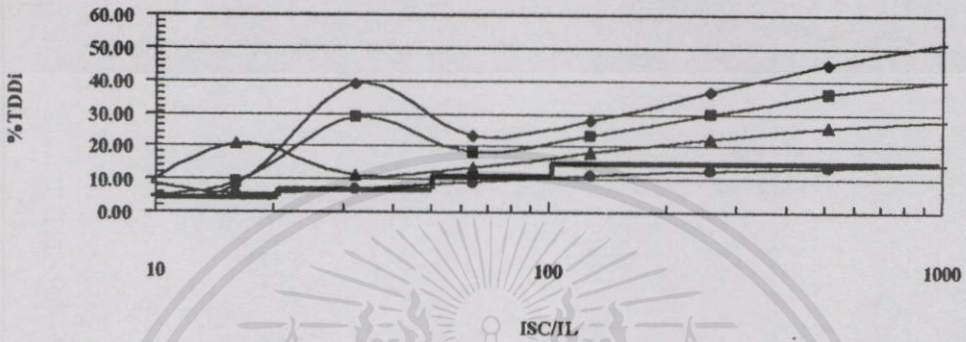
(ก)



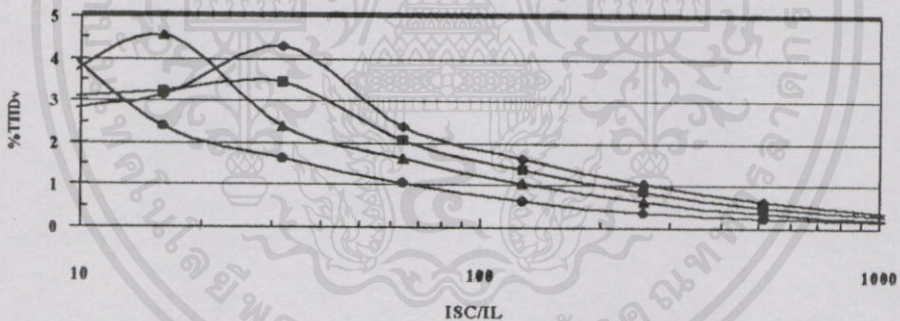
(ข)

รูปที่ 7.56 ปริมาณฮาร์มอนิกส์ โดยรวมที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า

1. เมื่อเปอร์เซ็นต์การใช้งานระหว่างโหลดแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้นเปลี่ยนไป โดยพิถีพิถันกำลังรวมของของระบบคงที่
2. เมื่อระบบมีการต่อใช้งาน โหลดแบบเชิงเส้นเพิ่มขึ้น และมีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของระบบเปลี่ยนไป



(ก)



(ข)

รูปที่ 7.57 ปริมาณฮาร์มอนิกส์โดยรวมที่เปอร์เซ็นต์โหลดต่างๆ (ก) กระแสไฟฟ้า (ข) แรงดันไฟฟ้า

ซึ่งการวิเคราะห์กรณีดังกล่าวโดยใช้แบบจำลองด้วยโปรแกรม PSPICE จะได้ผลดังรูปที่ 7.56 และ 7.57 ตามลำดับ

จากผลการทดลองในรูปที่ 7.56 พอจะสรุปได้ว่า เพื่อให้ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์โดยรวมมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ระบบนี้จะสามารถใช้โหลดแบบไม่เชิงเส้นได้ไม่เกิน 30% (เดิม 10%) และเพื่อให้ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกส์โดยรวมจะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน จะสามารถใช้โหลดแบบไม่เชิงเส้นได้ไม่เกิน 38% (เดิม 10%)

และจากผลการทดลองในรูปที่ 7.57 พอจะสรุปได้ว่า เพื่อให้ปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์โดยรวมมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานเกือบตลอดช่วง I_{sc}/I_L 10-1000, ระบบนี้จะต้องใช้โหลดแบบเชิงเส้นไม่น้อยกว่า 75% (พิกัดโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นเดิมคิดเทียบเป็น 25% ของพิกัดโดยรวม) และ ปริมาณแรงดันฮาร์โมนิกส์โดยรวมจะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานตลอดช่วง I_{sc}/I_L 10-1000 ตั้งแต่เปอร์เซ็นต์โหลดแบบเชิงเส้น 0-75%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

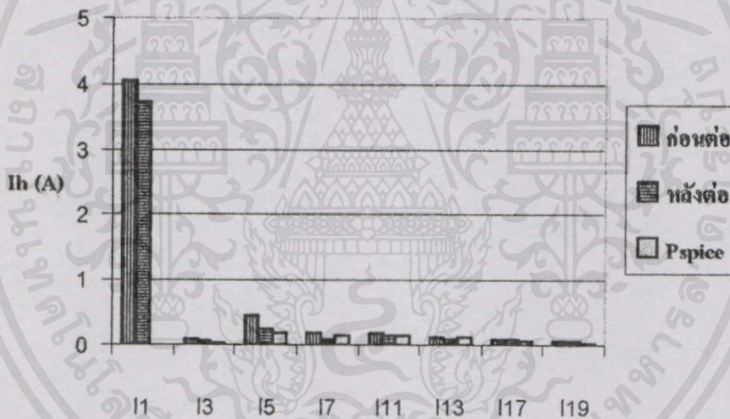
บทวิเคราะห์ผลการทดลอง

8.1 บทนำ

เพื่อให้ทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในการดำเนินงานได้อย่างชัดเจน จึงจำเป็นต้องนำผลการทดลองที่ได้ในส่วนต่างๆมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกัน และรวมถึงการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ระบบใน PSPICE โดยประเด็นสำคัญที่ควรพิจารณาในครั้งนี้คือ

8.2 การเปรียบเทียบถึงปริมาณฮาร์มอนิกส์ก่อนและหลังการต่อตัวกรองที่จุด PCC

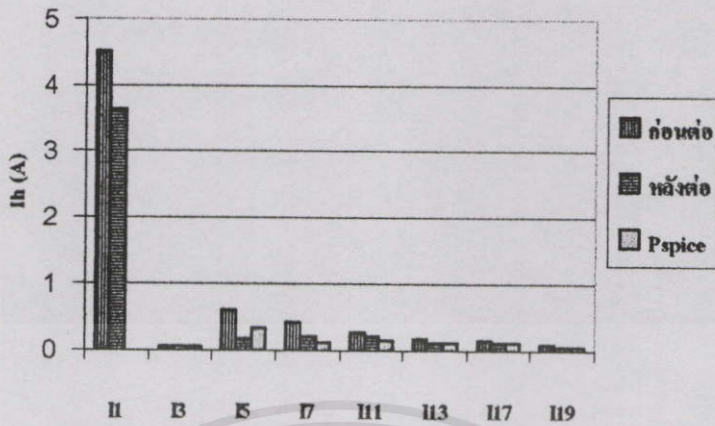
8.2.1 กรณีนวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส



รูปที่ 8.1 ฮาร์มอนิกส์ก่อนและหลังต่อตัวกรองที่จุด PCC กรณีนวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.2.2 กรณีหาค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 8.2 ฮาร์มอนิกส์ก่อนและหลังต่อตัวกรองที่จุด PCC กรณีหาค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

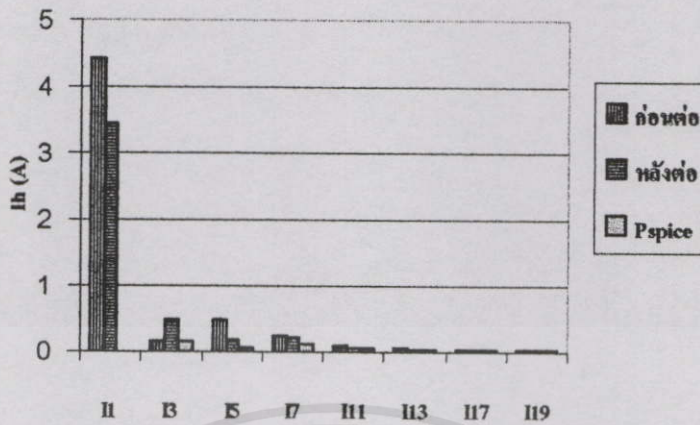
8.2.3 กรณีหาค่าความถี่ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



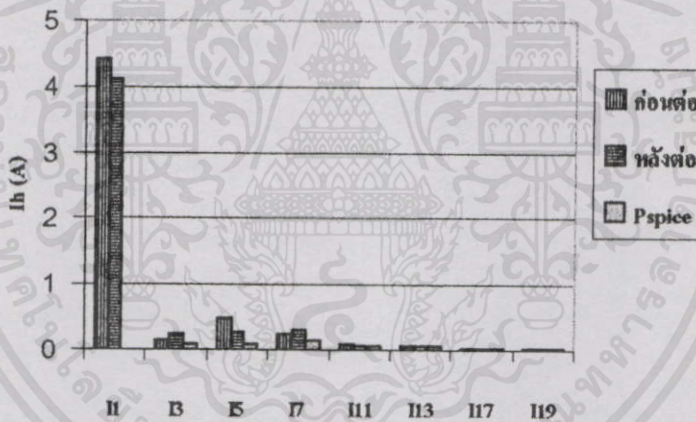
รูปที่ 8.3 ฮาร์มอนิกส์ก่อนและหลังต่อตัวกรองที่จุด PCC กรณีหาค่าความถี่ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.2.4 กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 8.4 ฮาร์โมนิกส์ก่อนและหลังต่อตัวกรองที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ค่า DPF 1.00

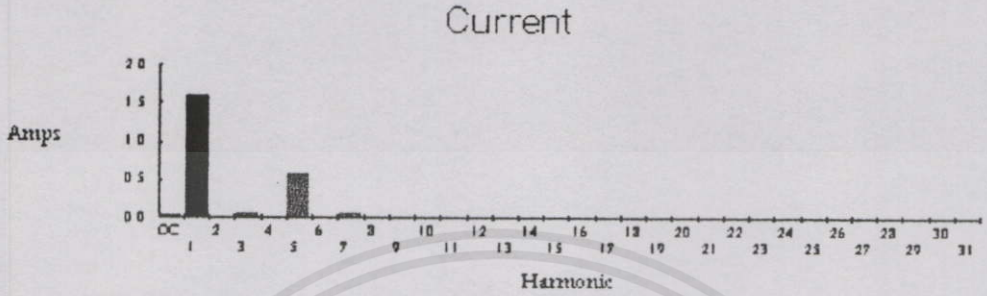


รูปที่ 8.5 ฮาร์โมนิกส์ก่อนและหลังต่อตัวกรองที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ค่า DPF 0.90 Lag

จากข้อมูลที่ได้พบว่าปริมาณฮาร์โมนิกส์ที่ได้จากการทดลองจริงและจากการจำลองระบบใน PSPICE มีค่าใกล้เคียงกัน โดยแนวโน้มแล้วค่าที่ได้จากการจำลองระบบใน PSPICE จะมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย ยกเว้นในกรณีฮาร์โมนิกส์ที่ 3 ของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ DPF 1.00 เนื่องจากผลของการเกิดเรโซแนนซ์ขนานดังที่ได้กล่าวแล้ว ซึ่งในกรณีที่แก้ไขเป็น DPF 0.95 ก็จะมีค่าความแตกต่างของข้อมูลที่ไม่มากนัก โดยความแตกต่างหลักๆของพารามิเตอร์ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์กับระบบที่ทดลองจริงนั่นคือ ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์, ค่าอิมพีแดนซ์แฝงในโหลดแบบเชิงเส้น และกระแสฮาร์โมนิกส์จากแหล่งกำเนิด

8.3 การเปรียบเทียบถึงปริมาณฮาร์มอนิกส์จากภายนอกที่จุด PCC หลังการต่อตัวกรองที่จุด PCC

8.3.1 กรณีวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส



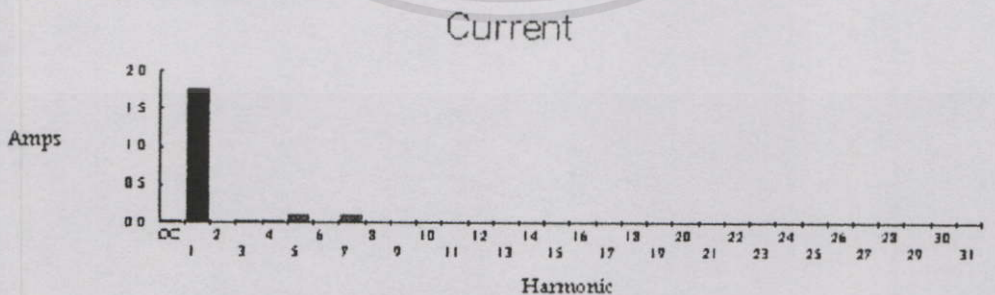
รูปที่ 8.6 ฮาร์มอนิกส์ภายนอกหลังต่อตัวกรองที่จุด PCC กรณีวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส

8.3.2 กรณีชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 8.7 ฮาร์มอนิกส์ภายนอกหลังต่อตัวกรองที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

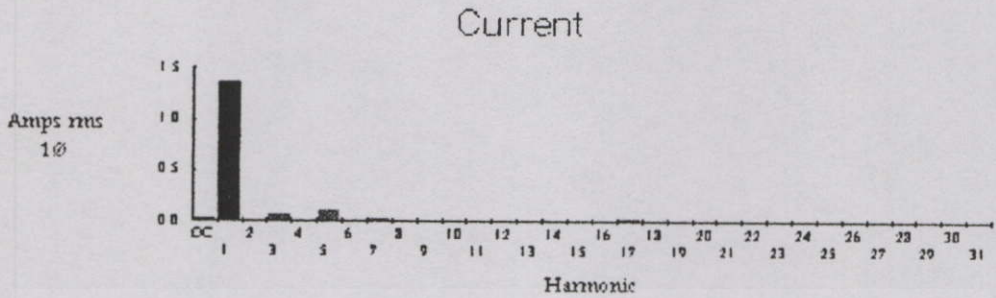
8.3.3 กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 8.8 ฮาร์มอนิกส์ภายนอกหลังต่อตัวกรองที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.3.4 กรณีหาคความคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ



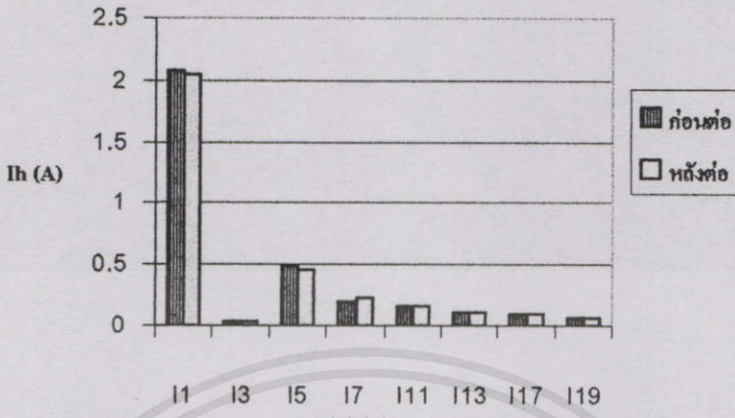
รูปที่ 8.9 ฮาร์มอนิกส์ภายนอกหลังต่อตัวกรองที่จุด PCC กรณีหาคความคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

จากข้อมูลที่ได้เป็นกรณีที่วัดได้ด้วยการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์เข้าในระบบ แต่ยังไม่ได้อัดต่อแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ภายในระบบ ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่ากระแสฮาร์มอนิกส์จากภายนอกที่ไหลเข้าสู่ระบบจำลองจะมีอันดับที่สอดคล้องกับอันดับของตัวกรองฮาร์มอนิกส์ที่ต่ออยู่ในระบบ ซึ่งฮาร์มอนิกส์ในส่วนนี้จะป็นสาเหตุให้ตัวกรองฮาร์มอนิกส์ต้องรับภาระเพิ่มขึ้นในส่วนดังกล่าว และทำให้ปริมาณฮาร์มอนิกส์โดยรวมอาจมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน โดยเฉพาะในกรณีโหลดเป็นแบบวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส (อันดับที่ 5 ประมาณ 40%) ซึ่งจะต้องนำค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ที่วัดได้ในตอนแรกลบด้วยส่วนของฮาร์มอนิกส์ภายนอกนี้เสียก่อนที่จะนำไปเทียบกับตารางมาตรฐานดังรายละเอียดที่กล่าวแล้ว

8.4 การเปรียบเทียบถึงปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่แหล่งกำเนิด กรณีก่อนและหลังการต่อตัวกรองที่จุด PCC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.4.1 กรณีวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส



รูปที่8.10 กระแสฮาร์มอนิกส์ที่แหล่งกำเนิด กรณีวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส

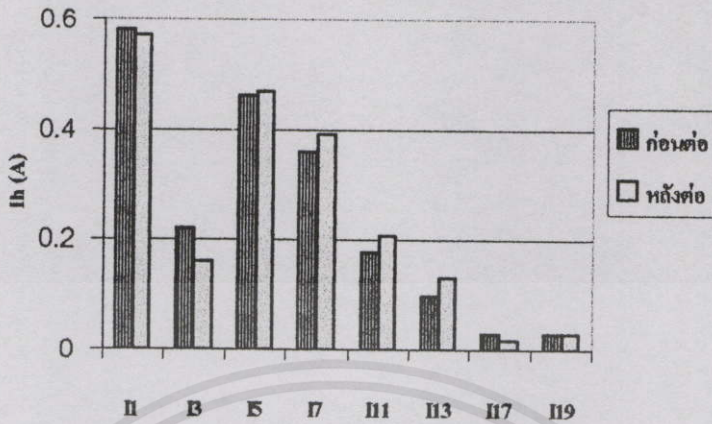
8.4.2 กรณีชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่8.11 กระแสฮาร์มอนิกส์ที่แหล่งกำเนิด กรณีชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

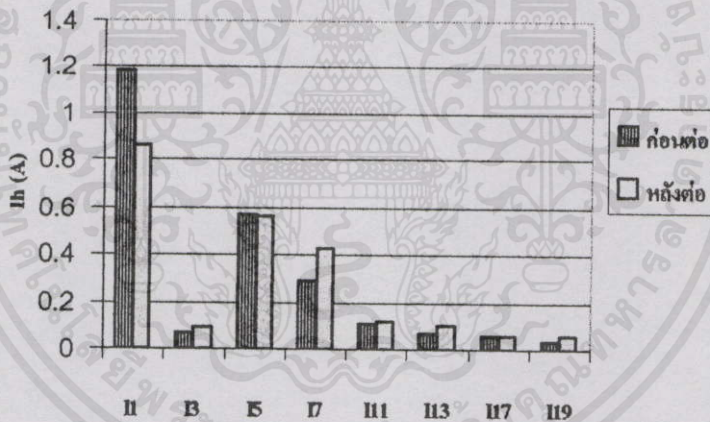
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.4.3 กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 8.12 กระแสฮาร์มอนิกส์ที่แหล่งกำเนิด กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

8.4.4 กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

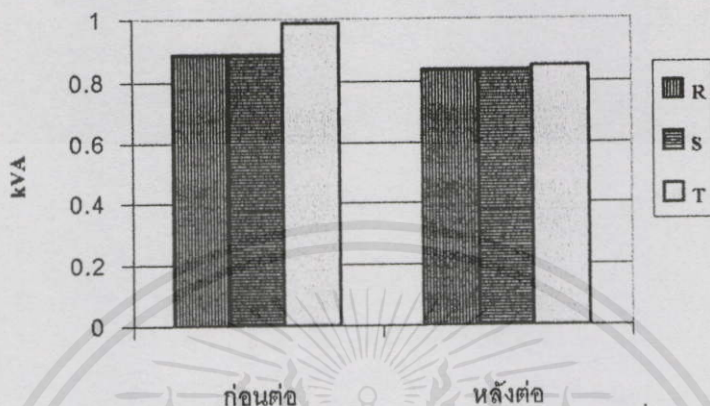


รูปที่ 8.13 กระแสฮาร์มอนิกส์ที่แหล่งกำเนิด กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

จากข้อมูลที่ได้พบว่าปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่จ่ายจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ในกรณีก่อนและหลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งข้อมูลในส่วนนี้จะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในส่วนของกระแสฮาร์มอนิกส์ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ที่สมมุติให้เป็นแหล่งกำเนิดกระแสกึ่งที่ ซึ่งอาจส่งผลให้ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์หลังต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ในบางกรณียังคงสูงกว่าค่ามาตรฐาน โดยในที่นี้สอดคล้องกับกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 7 ในกรณีโพลคือเป็นชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับทำให้ปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่วัดได้จริงเมื่อเทียบกับตารางมาตรฐานแล้วจะมีค่าสูงกว่ามาตรฐานเล็กน้อย

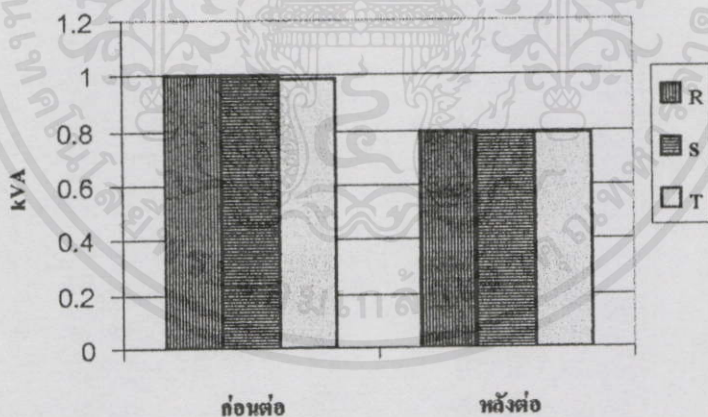
8.5 การเปรียบเทียบถึงกำลังงานไฟฟ้าปรากฏทั้งสามเฟสที่จุด PCC กรณีก่อนและหลังการต่อตัวกรอง

8.5.1 กรณีวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส



รูปที่ 8.14 กำลังงานไฟฟ้าปรากฏ 3 เฟสที่จุด PCC กรณีวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส

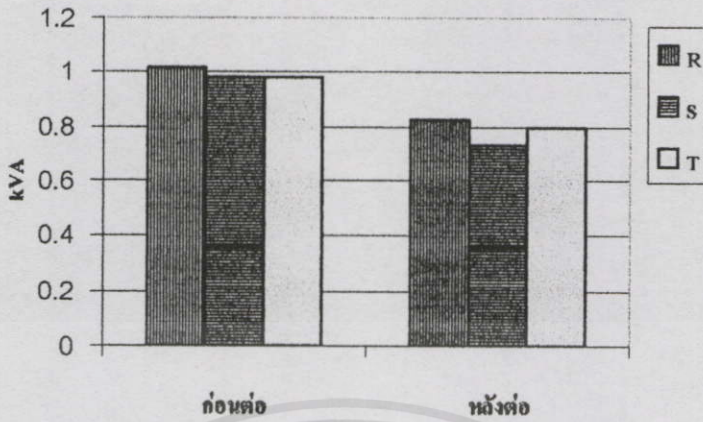
8.5.2 กรณีชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสกลับ



รูปที่ 8.15 กำลังงานไฟฟ้าปรากฏ 3 เฟสที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสกลับ

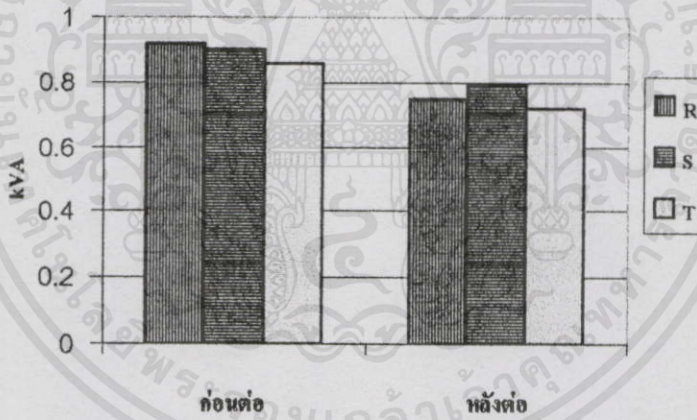
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.5.3 กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 8.16 กำลังงานไฟฟ้าปรากฏ 3 เฟสที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

8.5.4 กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ



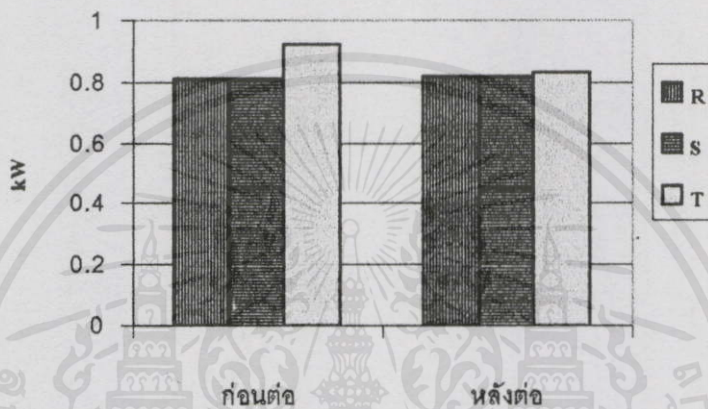
รูปที่ 8.17 กำลังงานไฟฟ้าปรากฏ 3 เฟสที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

จากข้อมูลที่ได้จะพบว่าค่ากำลังงานไฟฟ้าปรากฏทั้งสามเฟสมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันทั้งก่อนและหลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ โดยในกรณีหลังการต่อตัวกรองจะลดลงเล็กน้อยเนื่องจากผลของการชดเชยกำลังงานไฟฟ้าเสมือนของตัวกรอง, โดยค่าความแตกต่างในแต่ละเฟสในกรณีโหลดแบบวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟสจะมีค่ามากที่สุดประมาณ 0.1kVA, ซึ่งข้อมูลในส่วนนี้จะแสดงถึงความสมดุลย์ของระบบที่ทำการศึกษา ซึ่งจะเห็นว่าแม้จะมีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบที่มีความถี่หลักมูลให้มีค่าคงที่แต่กำลังงานไฟฟ้าของระบบอาจมีความแตกต่างกันได้ซึ่งสาเหตุหลักๆก็คือ อิมพีแดนซ์จำลองของระบบด้านอินพุท, อิมพีแดนซ์ของโหลดแบบเชิงเส้น และไม่เป็นเชิงเส้น,

ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องจากความไม่สมดุลของระบบในช่วงแคบๆนี้จะมีผลกระทบน้อยลงเมื่อระบบมีพิกัดกำลังสูงขึ้น

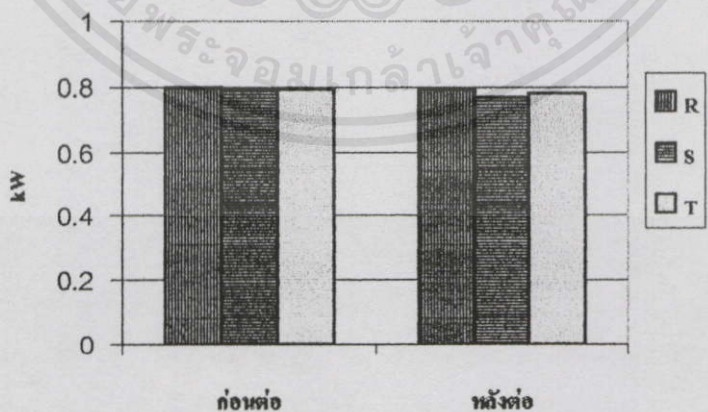
8.6 การเปรียบเทียบถึงกำลังงานไฟฟ้าจริงทั้งสามเฟสที่จุด PCC กรณีก่อนและหลังการต่อตัวกรอง

8.6.1 กรณีวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส



รูปที่ 8.18 กำลังงานไฟฟ้าจริง 3 เฟสที่จุด PCC กรณีวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส

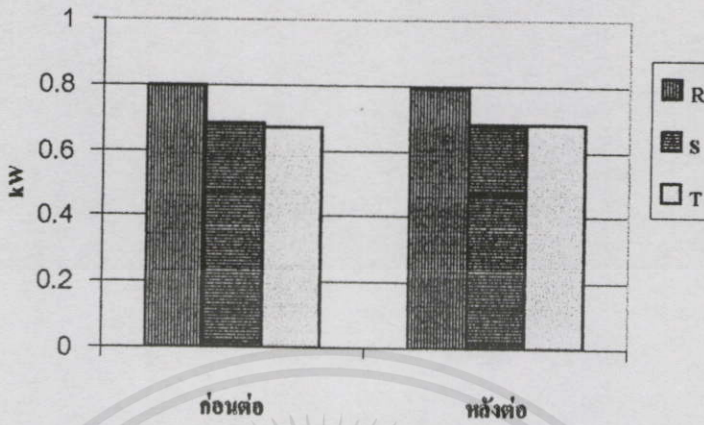
8.6.2 กรณีชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 8.19 กำลังงานไฟฟ้าจริง 3 เฟสที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

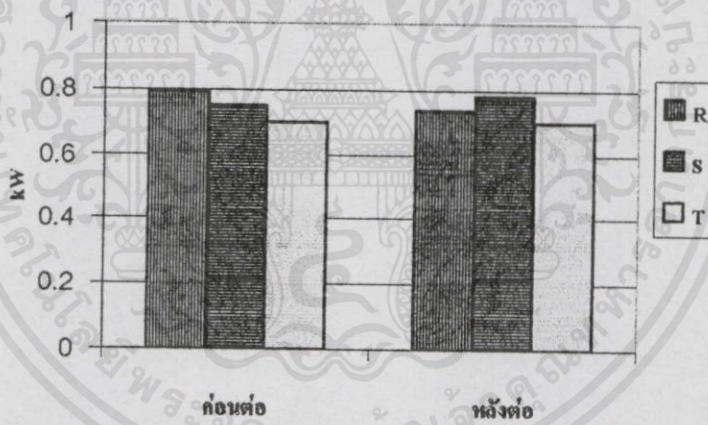
นี่ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.6.3 กรณีหาค่าควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 8.20 กำลังงานไฟฟ้าจริง 3 เฟสที่จุด PCC กรณีหาค่าควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

8.6.4 กรณีหาค่าควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ



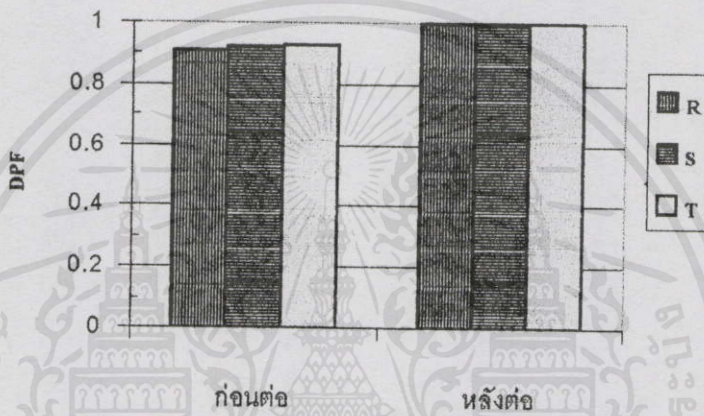
รูปที่ 8.21 กำลังงานไฟฟ้าจริง 3 เฟสที่จุด PCC กรณีหาค่าควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

จากข้อมูลที่ได้จะพบว่าค่ากำลังงานไฟฟ้าปรากฏทั้งสามเฟสมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันทั้งก่อนและหลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ โดยในกรณีหลังการต่อตัวกรองกำลังงานไฟฟ้าจริงอาจจะลดลงจากกรณีก่อนต่อเล็กน้อยเนื่องจากผลของการชดเชยกำลังงานไฟฟ้าเสมือนของตัวกรองทำให้ค่ากระแสรวมในระบบมีค่าต่ำลง หรืออาจจะเพิ่มขึ้นได้เล็กน้อยเนื่องจากค่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นในตัวกรอง, โดยค่าความแตกต่างในแต่ละเฟสจะมีค่ามากที่สุดประมาณ 0.1kVA, ซึ่งข้อมูลในส่วนนี้จะแสดงถึงความสมดุลของระบบที่ทำการศึกษา และกำลังงานสูญเสียโดยรวมของระบบก่อนและหลังการต่อตัวกรอง ซึ่งจะเห็นว่าแม้จะมีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าในระบบที่ความถี่หลักมูลให้มีค่าคงที่แต่กำลังงานไฟฟ้าจริงของระบบอาจมีความแตกต่างกันได้ซึ่งสาเหตุหลักๆก็คือความแตกต่าง

ของอิมพีแดนซ์จำลองของระบบด้านอินพุท, อิมพีแดนซ์ของโหลดแบบเชิงเส้น และไม่เชิงเส้น, ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องจากความไม่สมดุลของระบบในช่วงแคบๆ นี้จะมีผลกระทบน้อยลงเมื่อระบบมีพิกัดกำลังสูงขึ้น

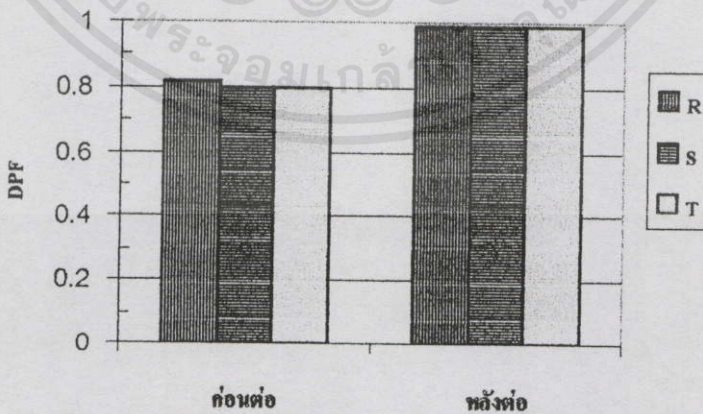
8.7 การเปรียบเทียบถึงค่าตัวประกอบกำลัง (DPF) ทั้งสามเฟสที่จุด PCC กรณีก่อนและหลังการต่อตัวกรอง

8.7.1 กรณีวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส



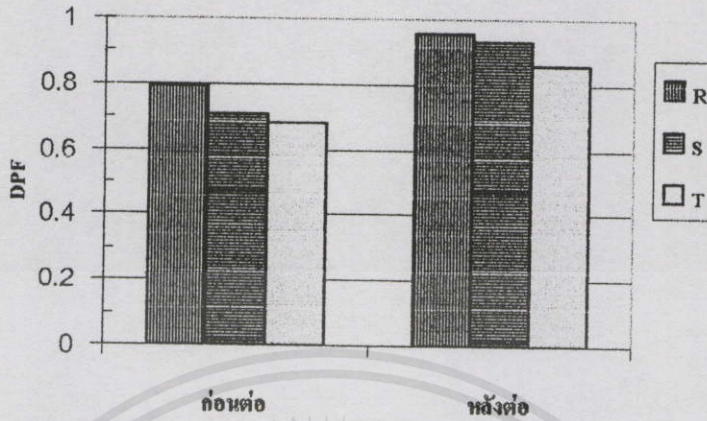
รูปที่ 8.22 ค่าตัวประกอบกำลังทั้ง 3 เฟสที่จุด PCC กรณีวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส

8.7.2 กรณีชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



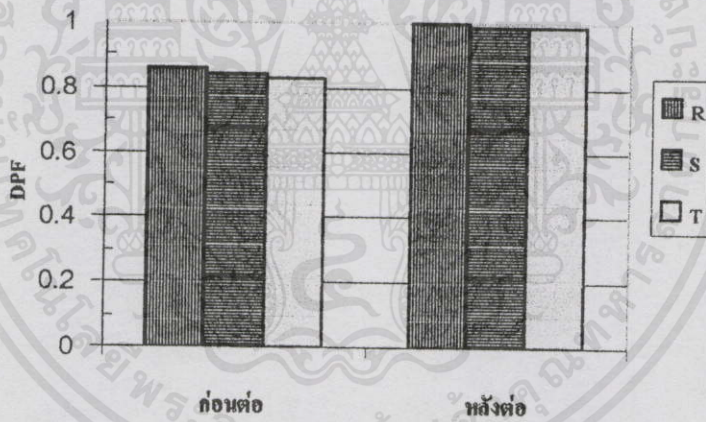
รูปที่ 8.23 ค่าตัวประกอบกำลังทั้ง 3 เฟสที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

8.7.3 กรณีหาคความคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 8.24 ค่าตัวประกอบกำลังทั้ง 3 เฟสที่จุด PCC กรณีหาคความคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

8.7.4 กรณีหาคความคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

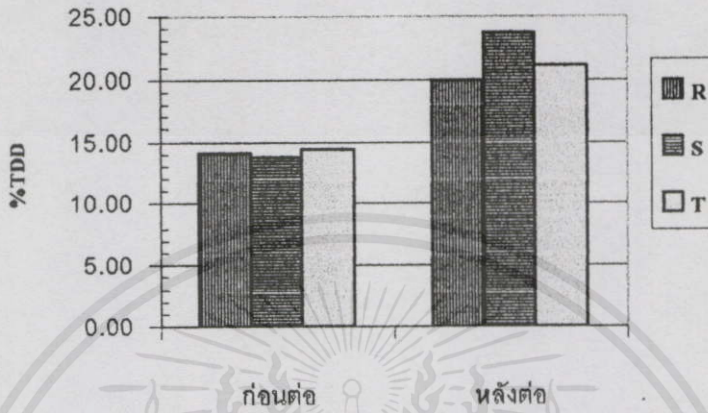


รูปที่ 8.25 ค่าตัวประกอบกำลังทั้ง 3 เฟสที่จุด PCC กรณีหาคความคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

จากข้อมูลที่ได้จะพบว่าค่าตัวประกอบกำลังในแต่ละเฟสมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันทั้งก่อนและหลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ ในกรณีที่มีความแตกต่างมากคือกรณีหาคความคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 0.1, โดยในกรณีหลังการต่อตัวกรองตัวประกอบกำลังจะเพิ่มขึ้นในระดับที่สอดคล้องกันการออกแบบ เนื่องจากผลของการชดเชยกำลังงานไฟฟ้าเสมือนของตัวกรอง, ซึ่งข้อมูลในส่วนนี้จะแสดงถึงความสมดุลของชุดตัวกรองฮาร์มอนิกส์ที่ต่อเข้าในระบบที่ทำการศึกษา ซึ่งสาเหตุหลักๆของความไม่สมดุลก็คือความแตกต่างของอิมพีแดนซ์ขององค์ประกอบของตัวกรองแบบพาสซีฟซึ่งในที่นี้คือ อินดักเตอร์และคาปาซิเตอร์โดยในงานวิจัยนี้ ค่าความแตกต่างดังกล่าวอยู่ในช่วงน้อยมาก

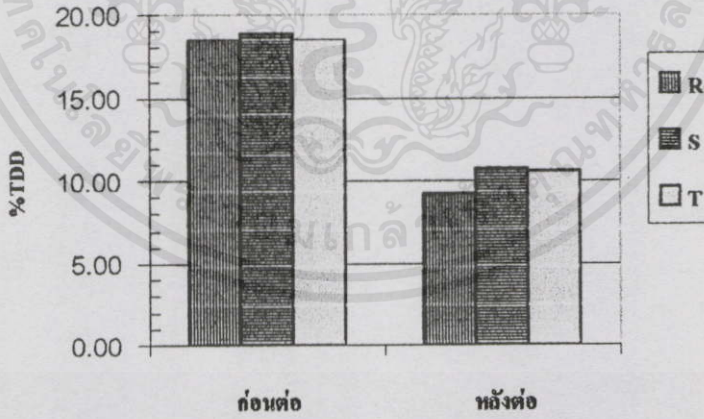
8.8 การเปรียบเทียบถึงค่าปริมาณกระแสฮาร์มอนิกโดยรวม (%TDD) ทั้งสามเฟสที่จุด PCC กรณีก่อนและหลังการต่อตัวกรอง

8.8.1 กรณีวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส



รูปที่ 8.26 ฮาร์มอนิกโดยรวมทั้ง 3 เฟสที่จุด PCC กรณีวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส

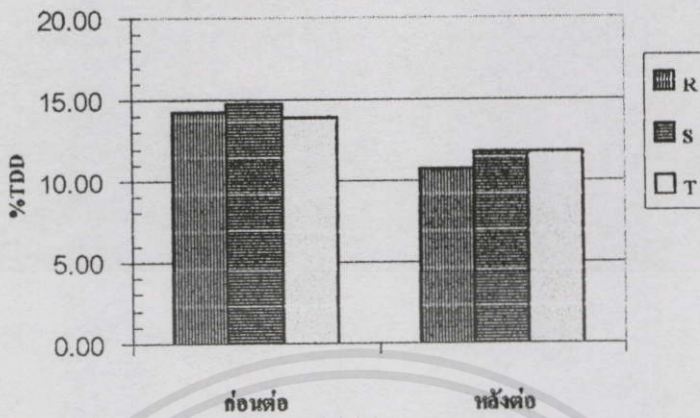
8.8.2 กรณีชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 8.27 ฮาร์มอนิกโดยรวมทั้ง 3 เฟสที่จุด PCC กรณีชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

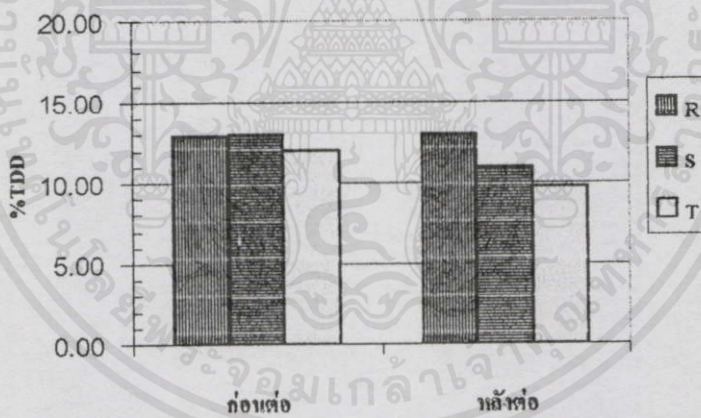
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะวิธีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.8.3 กรณีหาคความคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 8.28 ฮาร์มอนิกส์โดยรวมทั้ง 3 เฟสที่จุด PCC กรณีหาคความคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

8.8.4 กรณีหาคความคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 8.29 ฮาร์มอนิกส์โดยรวมทั้ง 3 เฟสที่จุด PCC กรณีหาคความคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

จากข้อมูลที่ได้ของค่าปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์โดยรวมเมื่อเทียบกับค่ากระแสสูงสุดของระบบ (%TDD) ในที่นี้เป็นกรณีที่พิจารณาถึงค่าที่วัดได้จริงที่จุด PCC ทั้งก่อนและหลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ ซึ่งจะพบว่าโดยตามหน้าที่ของตัวกรองฮาร์มอนิกส์นั้นจะทำให้ปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่จ่ายกลับคืนสู่ระบบต่ำลง ซึ่งในที่นี้สอดคล้องกับกรณี หาคความคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และหาคความคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง, โดยในกรณีของวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟสปริมาณฮาร์มอนิกส์มีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งจากข้อมูลที่ได้มาในคอนค้นพบว่าสอดคล้องกับปัญหาของกระแส

ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 จากภายนอก ซึ่งเมื่อทำการหักลบแล้วปริมาณฮาร์โมนิกส์ดังกล่าวจะลดลงต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ตั้งที่อธิบายไว้แล้วในการทดลอง, ในส่วนของกรณีชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับปริมาณฮาร์โมนิกส์โดยรวมมีแนวโน้มที่ต่ำลงเพียงเล็กน้อยโดยเมื่อพิจารณาถึงฮาร์โมนิกส์ภายนอกในกรณีนี้ก็ที่มีผลกระทบน้อยมาก ซึ่งสาเหตุของปัญหาอาจอธิบายได้จากข้อมูลที่แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 หลังการต่อตัวกรองฮาร์โมนิกส์ (DPF = 1.00) เนื่องจากผลของการเรโซแนนซ์แบบขนาน ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการปรับจุดในการทำงานเป็นกรณี DPF = 0.95 ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้แล้วในการทดลอง ดังนั้นในการบันทึกค่าปริมาณฮาร์โมนิกส์โดยรวมจากการทดลองอาจได้ผลการทดลองที่ไม่เป็นไปตามข้อสมมุติฐานตามทฤษฎีได้เนื่องจากเหตุผลดังกล่าว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 9

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ เป็นการวิเคราะห์เพื่อแก้ปัญหาฮาร์มอนิกส์ในระบบจากโหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ที่สำคัญ 4 ชนิดคือ วงจรเรกติไฟเลอร์แบบไดโอด, ชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ, ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของระบบช่วยในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์แบบพาสซีฟ, ในการศึกษาดังกล่าวได้ทำการจำลองระบบขึ้นมาโดยมีลักษณะของระบบดังนี้คือ เป็นระบบ 3 เฟส ลีสาย 380/220 โวลต์ 50Hz พิกัดกำลัง 3 kVA โหลดที่ต่ออยู่ในระบบแบ่งออกเป็นสองกลุ่มคือ โหลดแบบเชิงเส้นในที่นี้ใช้เป็นแบบ R-L ซึ่งในการทดลองอุปกรณ์ที่นำมาใช้คือ หลอดไส้และชุดบัลลาสต์ของหลอดฟลูออเรสเซนต์ และโหลดอีกส่วนคือโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีทั้งหมด 4 ชนิดตามที่ได้กล่าวแล้ว

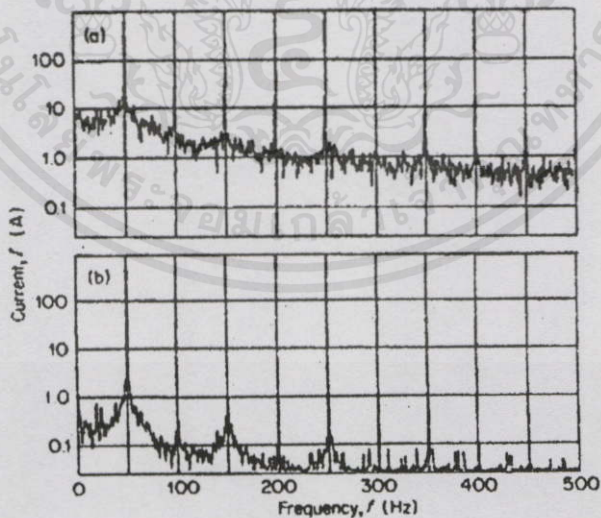
ระดับของฮาร์มอนิกส์ที่ใช้เป็นข้อกำหนดสำหรับฮาร์มอนิกส์ในระบบในงานวิจัยนี้คือ มาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 ซึ่งเน้นการควบคุมปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่จ่ายกลับคืนสู่ระบบที่จุดต่อร่วมของโหลดทั้งสองกลุ่ม (PCC) โดยอุปกรณ์ที่จะใช้ในการควบคุมฮาร์มอนิกส์ในงานวิจัยนี้คือตัวกรองฮาร์มอนิกส์แบบพาสซีฟ โดยแบบที่นิยมใช้ในการกรองฮาร์มอนิกส์อันดับต่ำๆคือแบบ Single Tuned Shunt Filter และ ชนิดที่นิยมใช้ในการกรองฮาร์มอนิกส์อันดับสูงๆหลายๆ ความถี่คือแบบ Second Order Damped Filter

ขั้นตอนที่ใช้ในการวิเคราะห์และการออกแบบทั้งหมดได้มาจากรวบรวมเรียบเรียงจากงานวิจัยทั้งในระดับประเทศ และระดับนานาชาติ รวมถึงข้อมูลที่ได้จากบริษัทภายนอกที่ได้ดำเนินงานทางด้านนี้โดยเฉพาะ โดยส่วนสำคัญที่สุดของขั้นตอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือการกำหนด ชนิด, ขนาด, และจำนวน ของตัวกรองฮาร์มอนิกส์โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของอัตราส่วนการแบ่งกระแสสู่ระบบที่เกิดขึ้นจริง กับอัตราส่วนการแบ่งกระแสสู่ระบบสูงสุดตามมาตรฐาน ซึ่งช่วยให้การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์ทำได้ง่ายขึ้น และ มีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ดี โดยวิธีดังกล่าวยังสามารถประยุกต์ใช้ในการกำหนดค่าแฟลคเตอร์คุณภาพ (พิจารณาอยู่ในรูปค่า DPF ของระบบ) ของตัวกรองฮาร์มอนิกส์ให้มีความเหมาะสมในแต่ละกรณีปัญหาของระบบ ซึ่งทำให้จุดเด่นที่สำคัญของวิธีดังกล่าวโดยสรุปคือ การที่สามารถพิจารณาแฟลคเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกส์ได้ในเวลาเดียวกัน ซึ่งทำให้ผลที่ได้รับคือการออกแบบจะมีประสิทธิภาพมากขึ้น มีความชัดเจนถึงผลที่ได้และลดความยุ่งยากและเวลาที่ใช้ให้น้อยลง โดยจากผลการทดลองจะพบว่าในบางกรณีการกำหนดค่ากำลังงานรีแอกทีฟที่ต้องชดเชยจากตัวกรองแต่ละตัวมีความเป็นไปได้ในหลายกรณีที่จะสามารถทำให้ปริมาณฮาร์มอนิกส์ต่ำกว่าข้อกำหนดในมาตรฐาน

ในส่วนของปัญหาที่เกิดขึ้นกับการดำเนินงานวิจัยมีอยู่หลายประการที่สำคัญ โดยประการแรกคือปัญหาที่เกี่ยวกับความไม่คงตัวในการทำงานของโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นและผลของความไม่สมดุลของระบบตามอุดมคติ เพราะเนื่องจากระบบจำลองที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นระบบขนาดเล็กลักษณะกำลังต่ำ จึงมีโอกาสที่โหลดดังกล่าวจะทำงานที่ผิดปกติต่างๆ ซึ่งจะต่างกับในทางปฏิบัติที่ผลกระทบดังกล่าวจะน้อยกว่ามาก โดยในงานวิจัยนี้พยายามแก้ปัญหาดังกล่าวโดยกำหนดช่วงเวลาในการทำงานของระบบก่อนการบันทึกผลการทดลองจริงประมาณ 10-15 นาที;

ประการที่สองคือปัญหาของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ไหลมาจากภายนอกในขณะที่ต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์เข้าไปในระบบจำลอง เนื่องจากระบบจำลองนั้นก็จะเป็นระบบที่ต่อเชื่อมอยู่กับระบบไฟฟ้ากำลังจริงดังนั้นในบางช่วงเวลาเมื่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์เข้าสู่ระบบก็จะเกิดปัญหาดังกล่าวซึ่งในงานวิจัยนี้จะได้รับผลกระทบบ้างเป็นบางกรณี ซึ่งสามารถตรวจวัดได้โดยการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์เข้าสู่ระบบเพียงอย่างเดียวก็จะเห็นว่าเกิดกระแสฮาร์มอนิกส์ในอันดับที่สอดคล้องกับอันดับของตัวกรองไหลเข้าสู่ระบบอยู่ระดับหนึ่ง ซึ่งการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกส์สุทธิที่ไหลกลับสู่ระบบต้องนำค่ากระแสฮาร์มอนิกส์จากภายนอกดังกล่าวมาหักลบทางเวกเตอร์เสียก่อน

และในประการสุดท้ายคือผลกระทบเนื่องจากข้อสมมุติในการวิเคราะห์ที่กำหนดให้กระแสฮาร์มอนิกส์เป็นแหล่งจ่ายกระแสแบบคงที่, มีอันดับของฮาร์มอนิกส์เฉพาะอันดับที่เป็นเลขคี่ และพิจารณาอินพุตอิมพีแดนซ์ของระบบเฉพาะส่วนของรีแอกเตอร์ที่จำลองขึ้น ซึ่งจะมีความแตกต่างกับสภาวะจริงในระบบไฟฟ้ากำลังดังนี้คือ



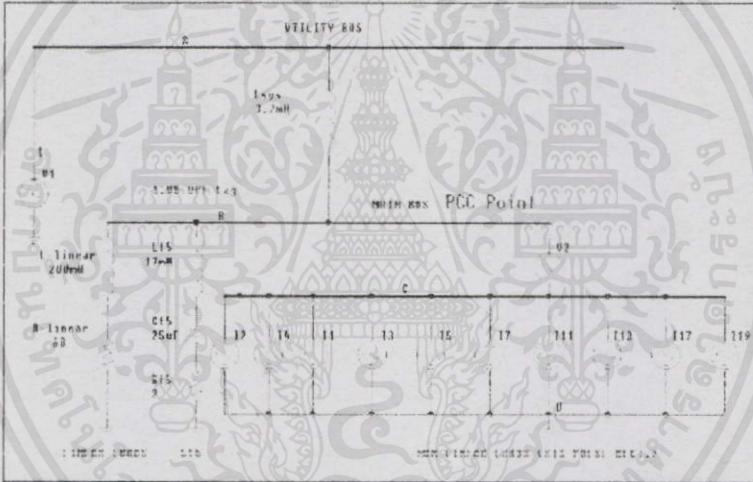
รูปที่ 9.1 ตัวอย่างของกระแสฮาร์มอนิกส์จากโหลดแบบเตาหลอมแบบอาร์ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าในระบบไฟฟ้ากำลังจริงแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์อาจต่ออยู่ร่วมกันในระบบได้หลายชนิดโดยชนิดที่สำคัญคือแบบที่ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกส์ในอันดับที่เป็นเลขคู่เช่น เครื่องเชื่อมแบบอาร์ค

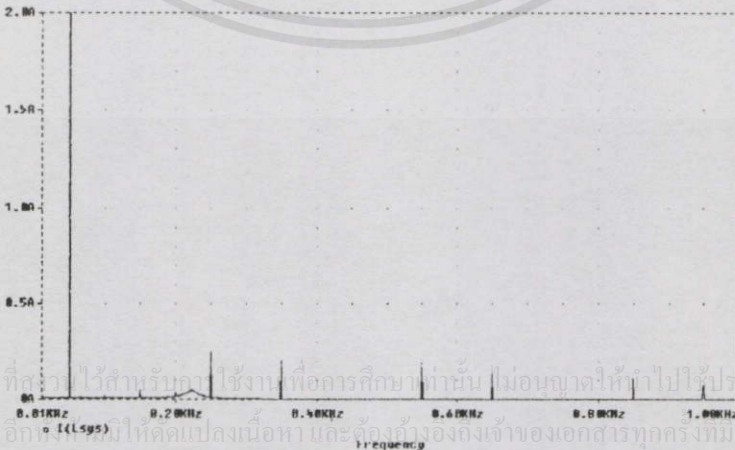
ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดเกิดการเรโซแนนซ์แบบขนานขึ้นและทำให้ปริมาณฮาร์มอนิกส์ในอันดับคี่ กล่าวว่ามีค่าสูงและอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ได้

ในประการที่สองเกี่ยวกับอินพุทอิมพีแดนซ์ของระบบนั้นในทางปฏิบัติเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่ถูกต้องจะต้องทำการติดต่อกับองค์กรที่ทำหน้าที่ควบคุมระบบไฟฟ้า ซึ่งในทางปฏิบัติข้อมูลที่ควรพิจารณาถึงต่อเนื่องคือสภาวะต่างๆของปัญหาที่จะเกิดขึ้นได้กับอิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุทของระบบซึ่งอาจทำให้ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ผ่านตัวกรองมีค่าสูงขึ้น ซึ่งในขั้นตอนของการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินควรจะต้องคำนึงถึงในส่วนนี้ด้วย

โดยตัวอย่างในการปรับแก้ให้แบบจำลองในคอมพิวเตอร์มีการคำนึงถึงกระแสฮาร์มอนิกส์ในอันดับที่เป็นเลขคู่ (ในที่นี้คือ อันดับที่ 2 และ 4, 0.45%, กรณีวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส) และผลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงคิงรูปที่ 9.2 และ 9.3 ตามลำดับ



รูปที่ 9.2 ตัวอย่างของแบบจำลองในกรณีพิจารณาถึงฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2 และ 4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สร้างไว้สำหรับศึกษาใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งไม่รับผิดชอบต่อผลที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 9.3 ตัวอย่างสเปกตรัมกระแสฮาร์มอนิกส์ที่จุด PCC หลังต่อตัวกรองอันดับที่ 5

จากรูปที่ 9.3 จะเห็นว่าความถี่เรโซแนนซ์ขนานที่เกิดจากการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์อาจอยู่ในตำแหน่งที่ทำให้ฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 4 เกิดการขยายตัวขึ้นได้และกระแสดังกล่าวอาจมีค่าสูงมากเมื่อแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์เป็นแบบที่แสดงดังรูปที่ 9.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Damian A. Gonzalez and John C. Mccall, "Design of Filters to Reduce Harmonic Distortion in Industrial Power", IEEE Trans. on Industrial Application, vol. IA-23, no.3, MAY/JUNE 1987.
- [2] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System, IEEE STD. 519-1992.
- [3] Justo Benitez "Application of Capacitors for Power Factor Correction of Industrial Electrical Distribution System", IEEE 1992.
- [4] Michael Z. Lowenstein and John F. Hibbard, "Modeling and Application of Passive Harmonic Trap Filters for Harmonic Reduction and Power Factor Improvement", IEEE 1993.
- [5] Paul B. Steciuk, Kevin A. Puskarich and W. Edwar reid "Harmonic Considerations on low Voltage Systems", IEEE.
- [6] Malcolm M. Cameron, "Trends in Power Factor Correction with Harmonic Filtering", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.29, No.1, January/February 1993
- [7] R. Kingston, Y. Baghzouz, "Power Factor and Harmonic Compensation in Industrial Power Systems with Nonlinear Loads", IEEE 1994.
- [8] T. Tran-Quoc, L. Pierrat, A. Montmeat, A. Giard, "Harmonic Overvoltages in Industrial Power System with Capacitors and Saturated Transformers", 0-7803-3008-0/95 \$4.00, 1995 IEEE
- [9] Robert G. Ellis, "Harmonic Analysis of Industrial Power Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.32, No.2, March/April 1996
- [10] Martti Tuomainen Nokian Capacitors "Harmonics and Reactive Power Compensation in Practice", November 27, 1996.
- [11] James K. Phipps, "A transfer Function Approach to Harmonic Filter Design", IEEE Industry Applications Magazine, March/April 1997.
- [12] Mark F. McGranaghan and David R. Mueller, "Designing Harmonic Filters for Adjustable Speed Drives to Comply with IEEE 519 Harmonic Limits", IEEE Trans. on Industrial Application, vol. 35, no.2, March/April 1999.

[13] J. Arrillaga, D.A. Bradley, P.S. Bodger, Power System Harmonic, John Wiley & Son

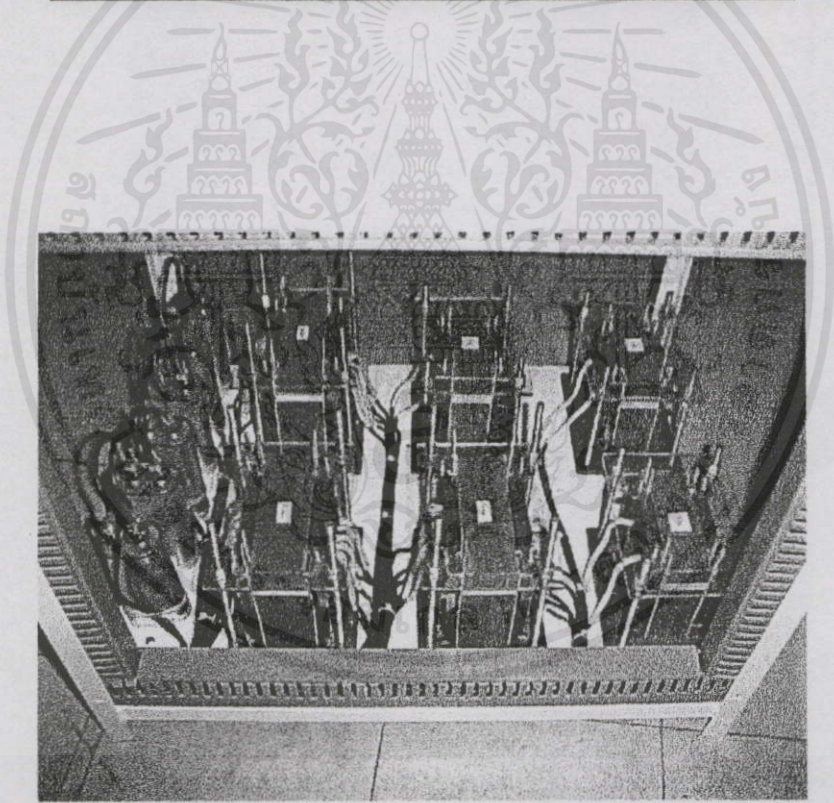
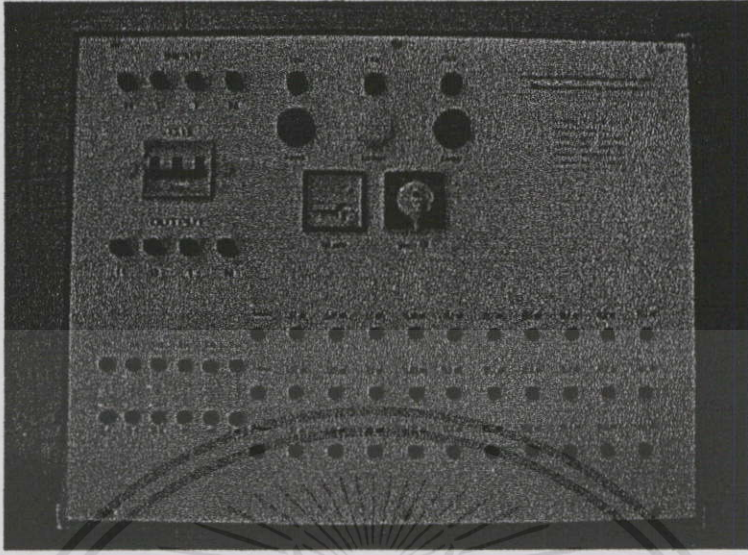
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ตัวกรองฮาร์โมนิกส์ และตัวอย่างการทดสอบ



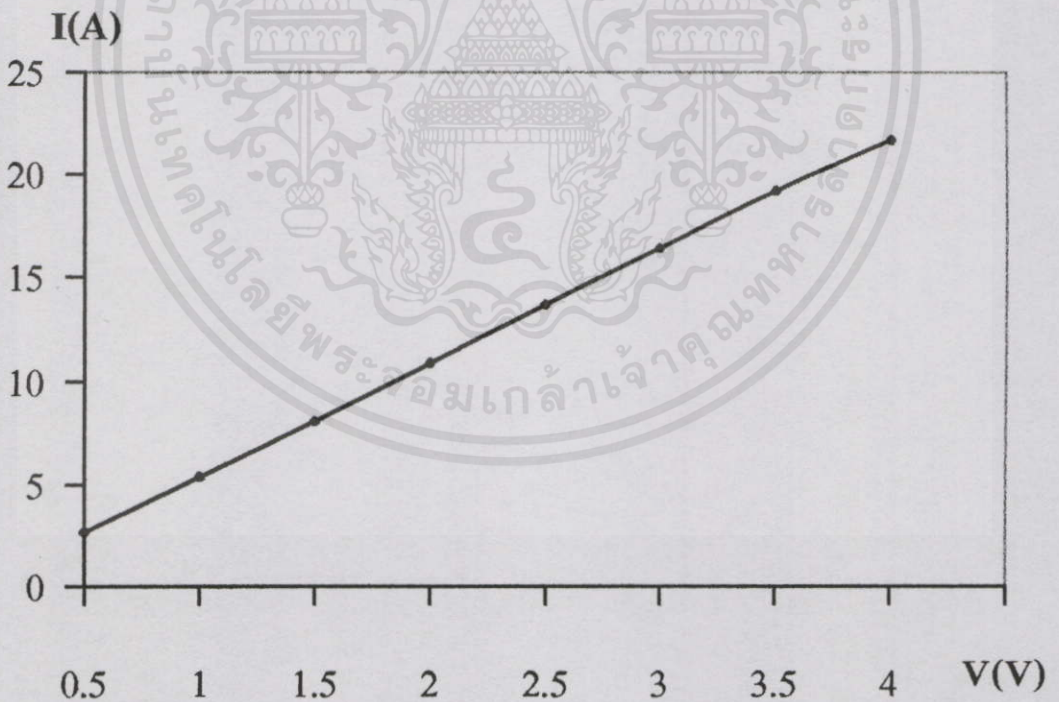
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ ก-1 ตัวกรองฮาร์โมนิกส์สำหรับโหลดแบบ 3-Phase Diode Rectifier ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

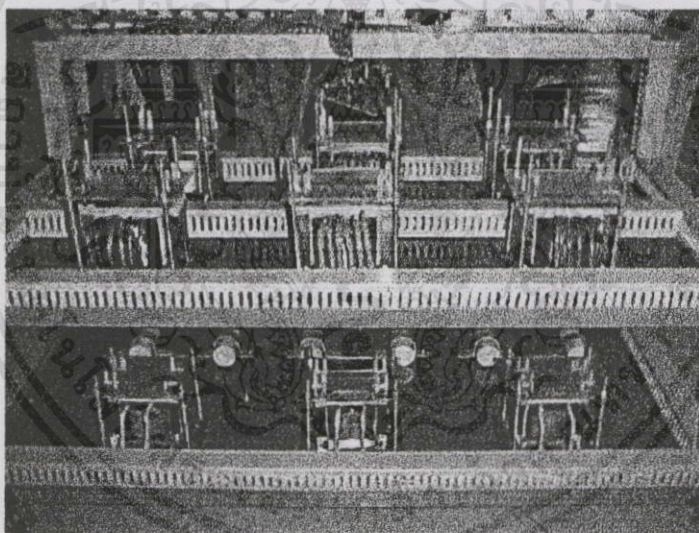
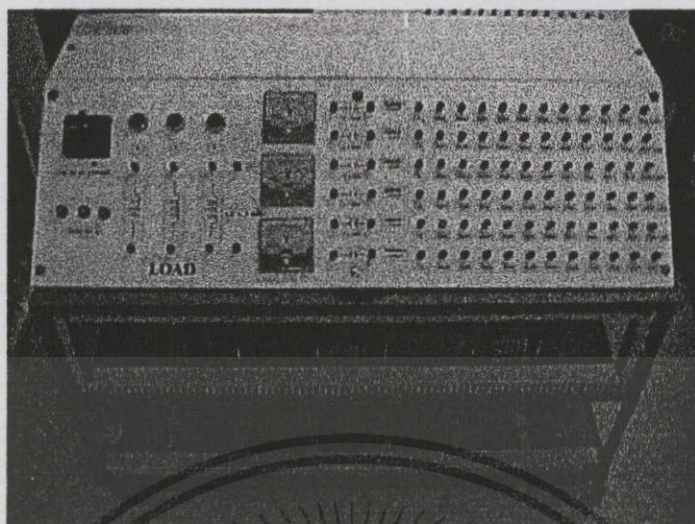
ค่าที่ได้จากวัด			ค่าที่ได้จากการคำนวณ		
$I_{rms}(A)$	$V_{rms}(V)$	Phase	$R(\Omega)$	$X_L(\Omega)$	$L(mH)$
0.5	2.7	70.73	1.782	5.097	16.23
1	5.4	73.74	1.512	5.184	16.51
1.5	8.1	75.52	1.35	5.228	16.65
2	10.9	75.52	1.36	5.277	16.81
2.5	13.7	75.52	1.37	5.3	16.88
3	16.4	75.52	1.36	5.293	16.86
3.5	19.2	75.52	1.37	5.311	16.91
4	21.7	76.11	1.3	5.266	16.77

ค่าเฉลี่ยโดยรวม $R = 1.26 \Omega$, $L = 16.70 \text{ mH}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก-2 ตัวอย่างการทดสอบคุณสมบัติของอินดักเตอร์ของตัวกรองอันดับที่ 5

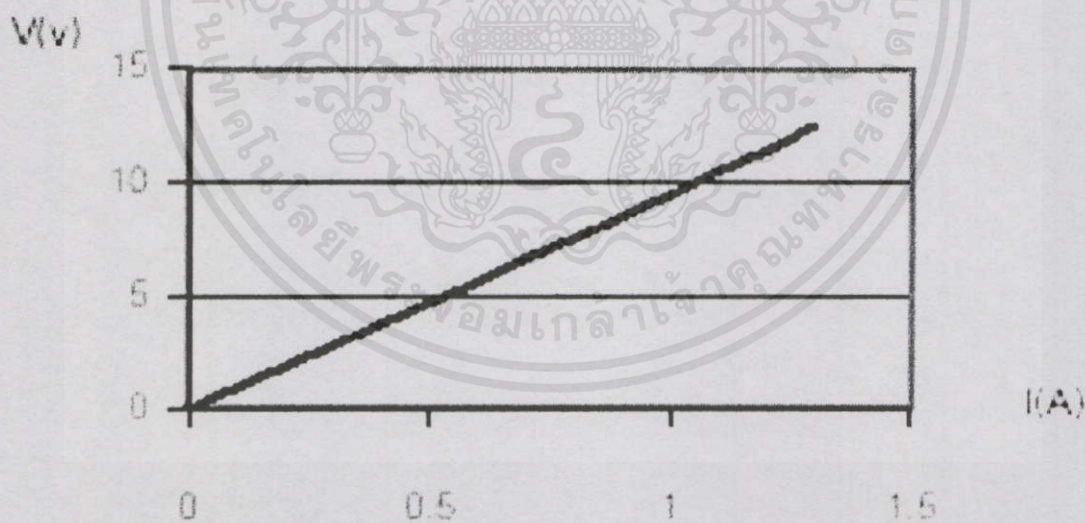


รูปที่ ก-3 ตัวกรองฮาร์โมนิกส์สำหรับโหลดแบบ AC Voltage Controller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่ได้จากการวัด			ค่าที่ได้จากการคำนวณ		
I (A)	V (V)	Phase	XL	R (ohm)	L (mH)
0.5	4.7	83.107	9.3320	1.128	29.70
0.6	5.6	83.107	9.2658	1.120	29.49
0.7	6.7	83.107	9.5022	1.148	30.24
0.8	7.6	83.107	9.4313	1.140	30.02
0.9	8.6	83.107	9.4864	1.146	30.19
1.0	9.6	83.107	9.5306	1.152	30.33
1.1	10.4	83.107	9.3862	1.134	29.87
1.2	11.5	83.107	9.5140	1.150	30.28
1.3	12.5	83.107	9.5458	1.154	30.38

ค่าเฉลี่ยโดยรวม = 30.05 mH



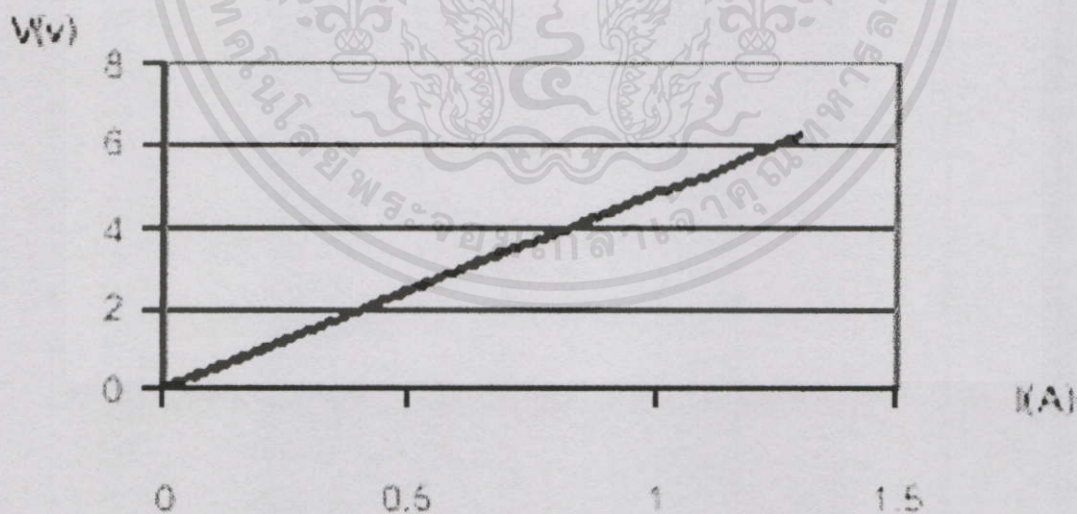
รูปที่ ก-4 ตัวอย่างการทดสอบคุณสมบัติของอินดักเตอร์ของตัวกรองอันดับที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

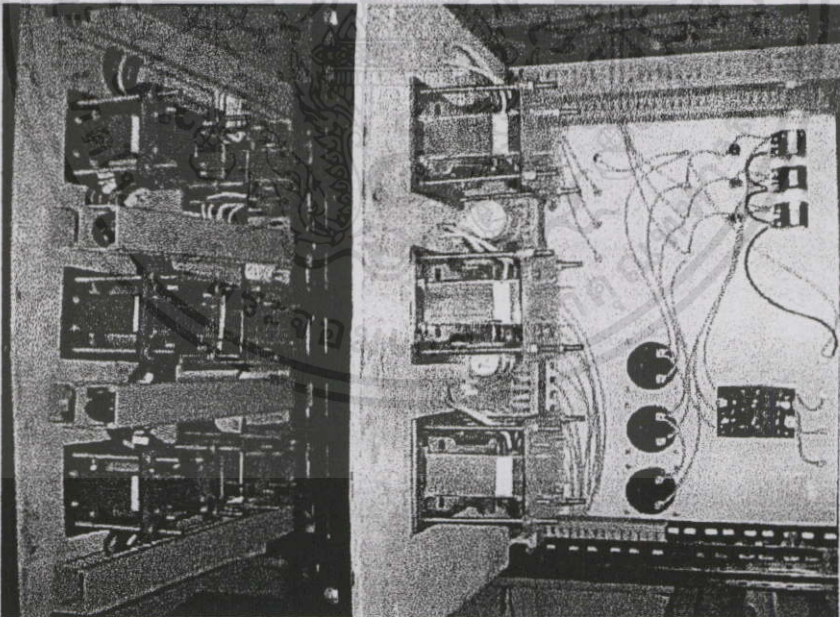
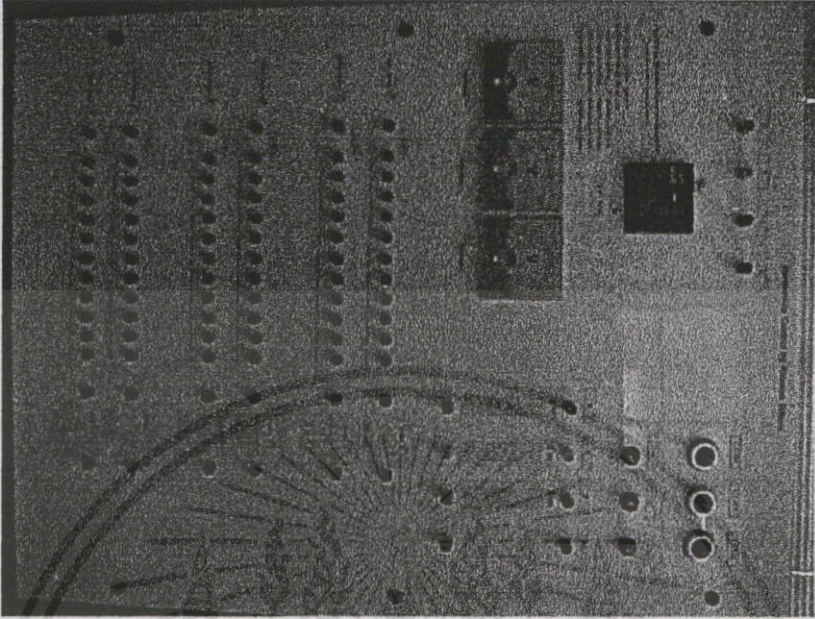
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่ได้จากการวัด			ค่าที่ได้จากการคำนวณ		
I (A)	V (V)	Phase	XL	R (ohm)	L (mH)
0.5	2.4	82.530	4.7592	0.624	15.14
0.6	2.9	82.530	4.7923	0.628	15.25
0.7	3.4	82.530	4.8159	0.631	15.32
0.8	3.8	82.530	4.7096	0.617	14.99
0.9	4.3	82.530	4.7372	0.621	15.07
1.0	4.8	82.530	4.7592	0.624	15.14
1.1	5.2	82.530	4.6870	0.614	14.91
1.2	5.7	82.530	4.7096	0.617	14.99
1.3	6.2	82.530	4.7287	0.620	15.05

ค่าเฉลี่ยโดยรวม = 15.09 mH

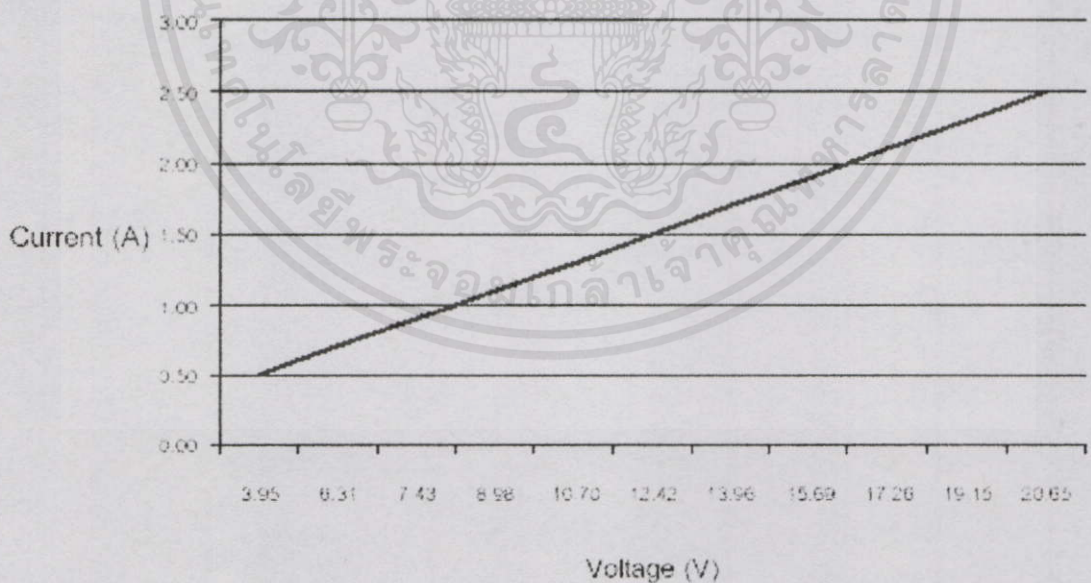


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ ก-5 ตัวอย่างการทดสอบคุณสมบัติของอินดักเตอร์ของตัวกรองอันดับที่ 7



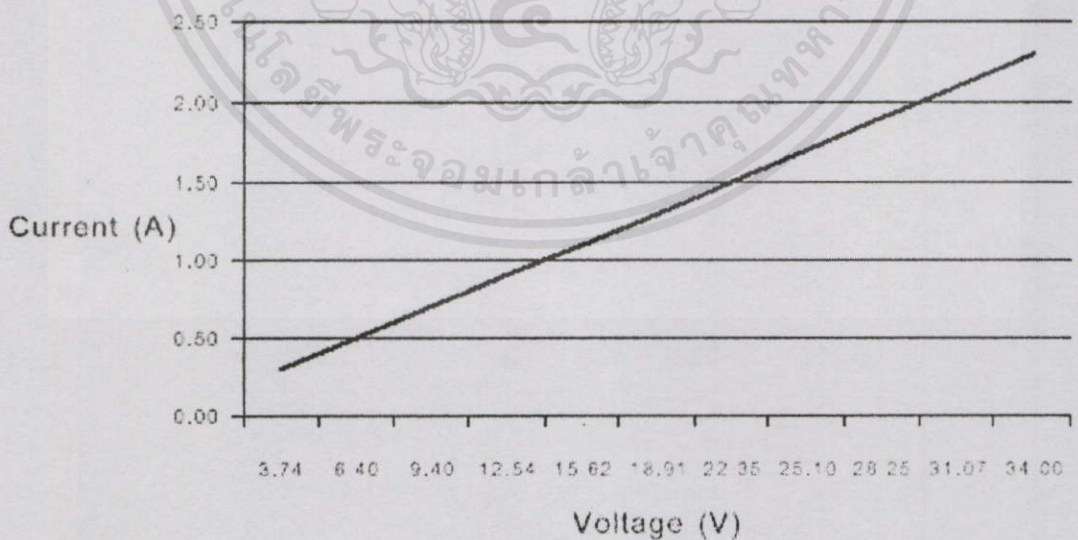
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าในวิธีใดทั้งสิ้น อีกครั้งก็ขอแจ้งเตือนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 6-6 ตัวกรองฮาร์โมนิกสำหรับโหลดแบบ DC Drive

ค่าที่ได้จากการวัด			ค่าที่ได้จากการคำนวณ				
V (V)	I (A)	Phase	R(Ω)	X _L (Ω)	L (mH)	B (T)	H (A/m)
3.95	0.50	80	1.3718	7.7800	24.7644	0.1448	30.000
6.31	0.70	80	1.5653	8.8773	28.2574	0.2313	42.000
7.43	0.90	80	1.4336	8.1301	25.8790	0.2724	54.000
8.98	1.10	80	1.4176	8.0396	25.5909	0.3292	66.000
10.70	1.30	81	1.2876	8.1294	25.8768	0.3922	78.000
12.42	1.50	81	1.2953	8.1781	26.0316	0.4553	90.000
13.96	1.70	81	1.2846	8.1107	25.8170	0.5117	102.000
15.69	1.90	81	1.2918	8.1562	25.9621	0.5752	114.000
17.26	2.10	82	1.1439	8.1391	25.9074	0.6327	126.000
19.15	2.30	82	1.1588	8.2451	26.2448	0.7020	138.000



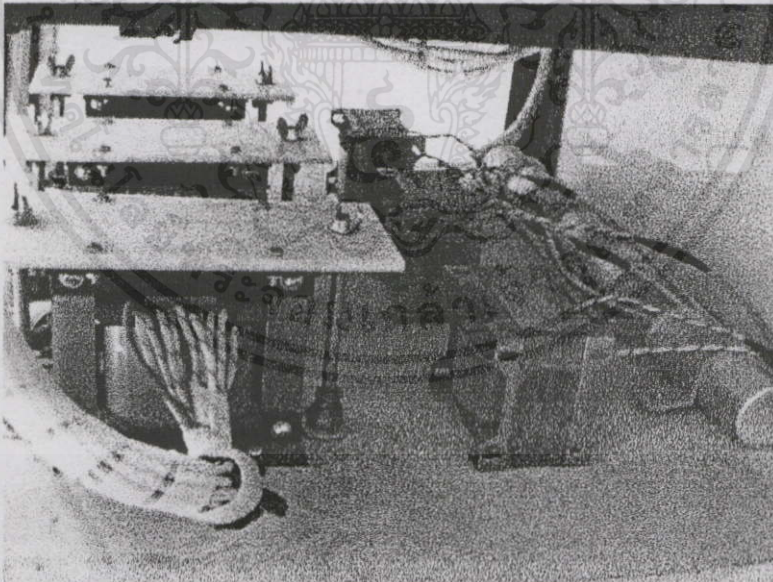
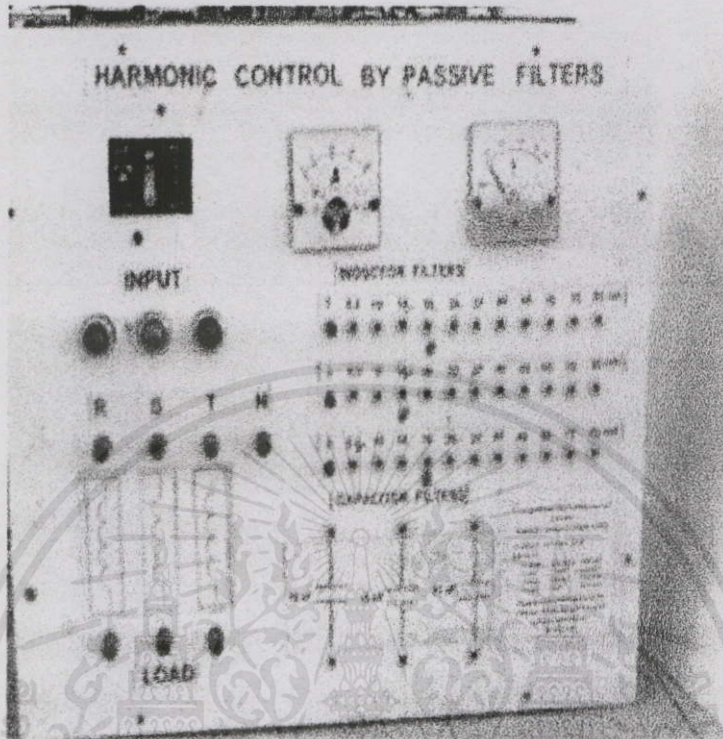
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ ก-7 ตัวอย่างการทดสอบคุณสมบัติของอินดักเตอร์ของตัวกรองอันดับที่ 5 รั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่ได้จากการวัด			ค่าที่ได้จากการคำนวณ				
V (V)	I (A)	Phase	R(Ω)	X _L (Ω)	L (mH)	B (T)	H (A/m)
3.74	0.30	80	2.1648	12.2773	39.0798	0.1371	18,000
6.40	0.50	78	2.6613	12.5203	39.8533	0.2346	30,000
9.40	0.70	79	2.5623	13.1819	41.9591	0.3446	42,000
12.54	0.90	79	2.6586	13.6773	43.5363	0.4597	54,000
15.62	1.10	80	2.4658	13.9843	44.5133	0.5726	66,000
18.91	1.30	80	2.5259	14.3252	45.5984	0.6932	78,000
22.35	1.50	80	2.5874	14.6736	46.7076	0.8193	90,000
25.10	1.70	81	2.3097	14.5829	46.4189	0.9201	102,000
28.25	1.90	81	2.3259	14.6854	46.7450	1.0356	114,000
31.07	2.10	81	2.3145	14.6131	46.5149	1.1390	126,000



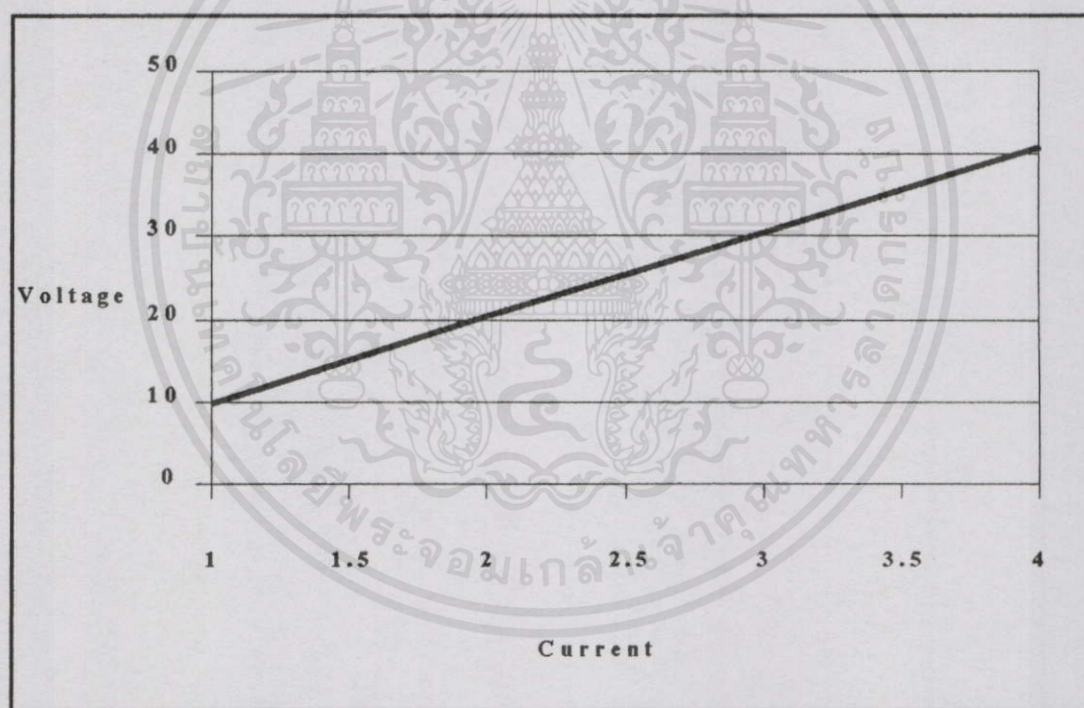
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเปลี่ยนแปลง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก-8 ตัวอย่างการทดสอบคุณสมบัติของอินดักเตอร์ของตัวกรองอันดับที่ 7



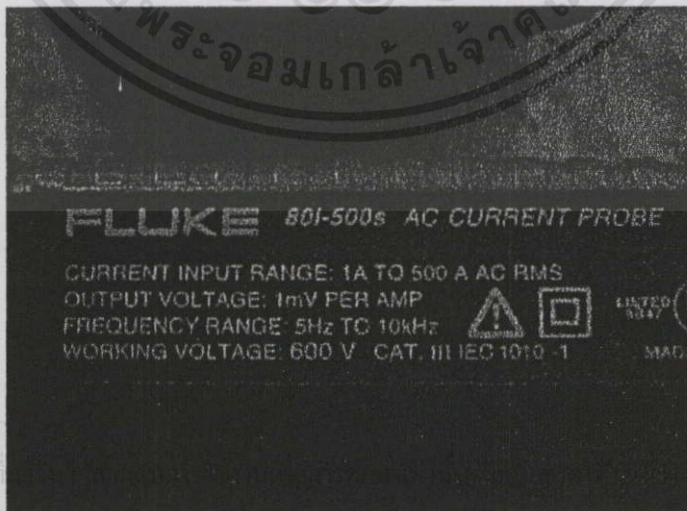
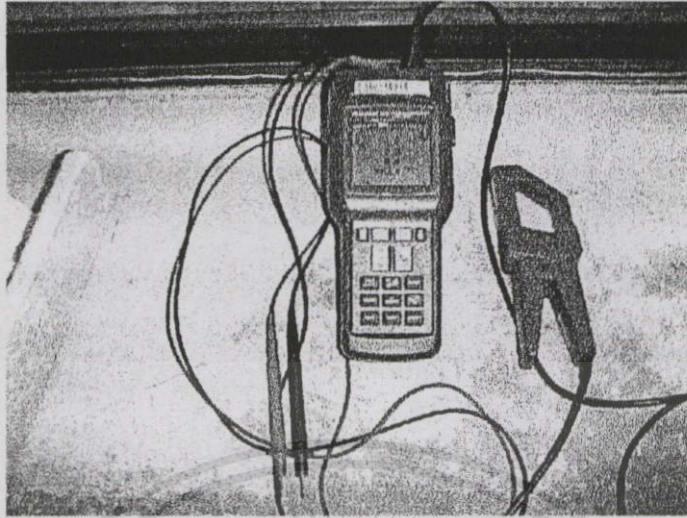
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตทั้งสิ้น อีกขั้นที่ทำได้คือไปขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ ก-9 ตัวกรองฮาร์โมนิกสำหรับอินเวอร์เตอร์ (AC Drive)

ค่าที่ได้จากการวัด			ค่าที่ได้จากการคำนวณ		
Irms(A)	Vrms(V)	Phase	R	X L	L (mH)
1	9.63	-78	2.01	9.42	29.99
2	20.34	-79	1.95	9.98	31.79
3	30.32	-79	1.94	9.92	31.59
4	40.84	-79	1.96	10.02	31.91



รูปที่ ก-10 ตัวอย่างการทดสอบคุณสมบัติของอินดักเตอร์ของตัวกรองอันดับที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะได้มาที่...
รูปที่ ก-11 เครื่องมือวัดปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่ใช้ในงานวิจัย

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลของระบบที่วัดได้ทั้งสามเฟลทั้งก่อนและหลังต่อตัวกรองสารโฆนิกส์ที่จุด PCC



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Single Phase Readings - 02/24/02 20:28:27

Summary Information

		Voltage	Current
Frequency	49.99	RMS 216.8	4.11
Power (1 Phase)		Peak 303.2	5.89
KW	0.81	DC Offset -0.1	-0.03
KVA	0.89	Crest 1.4	1.43
KVAR	0.36	THD Rms 3.13	13.97
Peak KW	1.62	THD Fund 3.13	14.11
Phase	24.5 lag	HRMS 6.8	0.57
Total PF	0.91	KFactor	2.30
DPF	0.91		

Record Information

	Max	Average	Min
V RMS			
A RMS			
V Peak			
A Peak			
V THD-R%			
A THD-R%			
KWatts			
KVA			
TPF			
DPF			
Frequency			

Harmonic Information

	Freq.	V Mag	%V RMS	V _{rms}	I Mag	%I RMS	I _{rms}	Power (KW)
DC	0.00	0.06	0.03	0	0.03	0.79	0	0.00
1	49.99	216.67	99.95	0	4.07	99.00	-24	0.81
2	99.98	0.08	0.04	-127	0.00	0.05	-37	0.00
3	149.97	0.86	0.40	71	0.08	1.89	-55	0.00
4	199.96	0.02	0.01	-94	0.00	0.02	22	0.00
5	249.95	4.64	2.14	112	0.47	11.54	161	0.00
6	299.94	0.02	0.01	159	0.00	0.06	105	0.00
7	349.94	2.61	1.20	34	0.19	4.50	136	0.00
8	399.93	0.03	0.01	-160	0.00	0.05	44	0.00
9	449.92	0.14	0.06	-149	0.01	0.29	15	0.00
10	499.91	0.02	0.01	-96	0.00	0.03	-115	0.00
11	549.90	2.05	0.94	-141	0.18	4.27	-49	0.00
12	599.89	0.03	0.01	99	0.00	0.02	103	0.00
13	649.88	1.36	0.63	-161	0.11	2.66	-68	0.00
14	699.87	0.03	0.01	131	0.00	0.02	180	0.00
15	749.86	0.08	0.04	120	0.01	0.20	145	0.00
16	799.85	0.03	0.01	-44	0.00	0.02	14	0.00
17	849.84	1.91	0.88	9	0.10	2.33	101	0.00
18	899.83	0.02	0.01	-137	0.00	0.05	-13	0.00
19	949.82	1.27	0.58	-6	0.07	1.64	83	0.00
20	999.82	0.02	0.01	-124	0.00	0.03	-91	0.00
21	1049.81	0.17	0.08	-157	0.01	0.14	-85	0.00
22	1099.80	0.00	0.00	11	0.00	0.02	-173	0.00
23	1149.79	1.50	0.69	155	0.06	1.44	-109	0.00
24	1199.78	0.02	0.01	-54	0.00	0.03	120	0.00
25	1249.77	1.02	0.47	148	0.04	1.05	-123	0.00
26	1299.76	0.05	0.02	8	0.00	0.02	32	0.00
27	1349.75	0.13	0.06	-58	0.00	0.09	49	0.00
28	1399.74	0.03	0.01	-51	0.00	0.03	5	0.00
29	1449.73	1.23	0.57	-53	0.04	0.94	39	0.00
30	1499.72	0.05	0.02	-168	0.00	0.03	-99	0.00
31	1549.71	0.94	0.43	-62	0.03	0.62	18	0.00

รูปที่ข-1 ก่อนต่อตัวกรอง-3 Phase Rectifier-Phase-R

Single Phase Readings - 02/24/02 20:30:47

Summary Information

		Voltage	Current
Frequency	49.99	RMS 218.2	4.07
Power (1 Phase)		Peak 308.4	5.74
KW	0.81	DC Offset 0.1	-0.03
KVA	0.89	Crest 1.41	1.41
KVAR	0.35	THD Rms 3.28	13.82
Peak KW	1.57	THD Fund 3.28	13.96
Phase	23 lag	HRMS 7.2	0.56
Total PF	0.92	KFactor	2.29
DPF	0.92		

Record Information

	Max	Average	Min
V RMS			
A RMS			
V Peak			
A Peak			
V THD-R%			
A THD-R%			
KWatts			
KVA			
TPF			
DPF			
Frequency			

Harmonic Information

	Freq.	V Mag	%V RMS	1 Phase V _{rms}	I Mag	%I RMS	1 Phase I _{rms}	1 Phase Power (KW)
DC	0.00	0.06	0.03	0	0.03	0.72	0	0.00
1	49.99	218.05	99.93	0	4.03	99.05	-23	0.81
2	99.98	0.03	0.01	68	0.00	0.06	180	0.00
3	149.97	1.14	0.52	-153	0.11	2.64	-68	0.00
4	199.96	0.09	0.04	167	0.00	0.08	162	0.00
5	249.95	5.16	2.36	99	0.46	11.19	153	0.00
6	299.94	0.13	0.06	40	0.00	0.06	8	0.00
7	349.94	2.66	1.22	30	0.19	4.76	131	0.00
8	399.93	0.03	0.01	-39	0.00	0.08	-8	0.00
9	449.92	0.30	0.14	-31	0.02	0.43	88	0.00
10	499.91	0.06	0.03	170	0.00	0.06	-107	0.00
11	549.90	1.80	0.82	-148	0.16	3.97	-61	0.00
12	599.89	0.02	0.01	96	0.00	0.05	-158	0.00
13	649.88	1.44	0.66	-171	0.12	2.92	-79	0.00
14	699.87	0.03	0.01	-20	0.00	0.05	124	0.00
15	749.86	0.31	0.14	148	0.01	0.35	-110	0.00
16	799.85	0.06	0.03	-49	0.00	0.02	82	0.00
17	849.84	1.66	0.76	-14	0.08	2.01	82	0.00
18	899.83	0.03	0.01	-51	0.00	0.06	-23	0.00
19	949.82	1.45	0.67	-21	0.08	1.86	65	0.00
20	999.82	0.03	0.01	174	0.00	0.02	95	0.00
21	1049.81	0.20	0.09	-41	0.01	0.34	46	0.00
22	1099.80	0.03	0.01	105	0.00	0.03	-154	0.00
23	1149.79	1.33	0.61	130	0.05	1.17	-134	0.00
24	1199.78	0.03	0.01	73	0.00	0.05	162	0.00
25	1249.77	1.34	0.62	124	0.05	1.18	-150	0.00
26	1299.76	0.03	0.01	0	0.00	0.03	36	0.00
27	1349.75	0.31	0.14	107	0.01	0.29	-167	0.00
28	1399.74	0.06	0.03	-86	0.00	0.03	-69	0.00
29	1449.73	0.94	0.43	-84	0.03	0.80	9	0.00
30	1499.72	0.03	0.01	180	0.00	0.03	-83	0.00
31	1549.71	1.13	0.52	-94	0.04	0.86	-4	0.00

รูปที่ข-2 ก่อนต่อตัวกรอง-3 Phase Rectifier-Phase-S

Single Phase Readings - 02/24/02 20:31:12

Summary Information

			Voltage	Current
Frequency	49.99	RMS	217.7	4.57
Power (1 Phase)		Peak	305.8	6.30
KW	0.92	DC Offset	0.0	-0.03
KVA	0.99	Crest	1.4	1.38
KVAR	0.35	THD Rms	3.01	12.89
Peak KW	1.77	THD Fund	3.01	13.00
Phase	21.5 lag	HRMS	6.5	0.59
Total PF	0.93	KFactor		2.09
DPF	0.93			

Record Information

	Max	Average	Min
V RMS			
A RMS			
V Peak			
A Peak			
V THD-R%			
A THD-R%			
KWatts			
KVA			
TPF			
DPF			
Frequency			

Harmonic Information

	1 Phase				1 Phase		1 Phase	
	Freq.	V Mag	%V RMS	V, ฐ	I Mag	%I RMS	I, ฐ	Power (KW)
DC	0.00	0.03	0.01	0	0.03	0.67	0	0.00
1	49.99	217.53	99.94	0	4.53	99.14	-21	0.92
2	99.98	0.13	0.06	100	0.00	0.04	65	0.00
3	149.97	0.33	0.15	129	0.13	2.96	-68	0.00
4	199.96	0.14	0.06	-155	0.00	0.07	-178	0.00
5	249.95	4.42	2.03	95	0.47	10.39	150	0.00
6	299.94	0.08	0.04	-144	0.00	0.07	-110	0.00
7	349.94	2.55	1.17	24	0.19	4.17	124	0.00
8	399.93	0.03	0.01	83	0.00	0.03	-70	0.00
9	449.92	0.39	0.18	-120	0.01	0.27	-15	0.00
10	499.91	0.02	0.01	-85	0.00	0.01	148	0.00
11	549.90	1.92	0.88	-160	0.18	3.96	-70	0.00
12	599.89	0.05	0.02	101	0.00	0.04	30	0.00
13	649.88	1.42	0.65	180	0.11	2.38	-89	0.00
14	699.87	0.05	0.02	-57	0.00	0.03	35	0.00
15	749.86	0.22	0.10	40	0.01	0.19	105	0.00
16	799.85	0.05	0.02	11	0.00	0.04	70	0.00
17	849.84	1.84	0.85	-24	0.10	2.15	68	0.00
18	899.83	0.05	0.02	115	0.00	0.03	-154	0.00
19	949.82	1.27	0.58	-37	0.07	1.45	52	0.00
20	999.82	0.02	0.01	-15	0.00	0.05	-95	0.00
21	1049.81	0.36	0.17	149	0.01	0.23	-162	0.00
22	1099.80	0.05	0.02	118	0.00	0.01	112	0.00
23	1149.79	1.50	0.69	116	0.06	1.35	-153	0.00
24	1199.78	0.06	0.03	-131	0.00	0.03	150	0.00
25	1249.77	1.05	0.48	99	0.04	0.83	-167	0.00
26	1299.76	0.03	0.01	-21	0.00	0.05	-11	0.00
27	1349.75	0.20	0.09	-74	0.01	0.22	-19	0.00
28	1399.74	0.02	0.01	116	0.00	0.03	8	0.00
29	1449.73	1.20	0.55	-110	0.04	0.89	-16	0.00
30	1499.72	0.02	0.01	-53	0.00	0.00	49	0.00
31	1549.71	0.86	0.39	-115	0.03	0.56	-30	0.00

รูปที่ข-3 ก่อนต่อตัวกรอง-3 Phase Rectifier-Phase-T

Single Phase Readings - 02/24/02 20:44:35

Summary Information

		Voltage	Current
Frequency	50.05	RMS 219.5	3.81
Power (1 Phase)		Peak 311.0	6.27
KW	0.82	DC Offset 0.1	-0.03
KVA	0.84	Crest 1.42	1.65
KVAR	0.04	THD Rms 2.07	21.40
Peak KW	1.91	THD Fund 2.07	21.91
Phase	3ϕ lead	HRMS 4.5	0.82
Total PF	0.98	KFactor	2.77
DPF	1.00		

Record Information

	Max	Average	Min
V RMS			
A RMS			
V Peak			
A Peak			
V THD-R%			
A THD-R%			
KWatts			
KVA			
TPF			
DPF			
Frequency			

Harmonic Information

	Freq.	V Mag	%V RMS	1 Phase V,ϕ	I Mag	%I RMS	1 Phase I,ϕ	1 Phase Power (KW)
DC	0.00	0.06	0.03	0	0.03	0.75	0	0.00
1	50.05	219.44	99.95	0	3.72	97.63	3	0.82
2	100.09	0.13	0.06	168	0.00	0.02	53	0.00
3	150.14	0.70	0.32	74	0.05	1.34	-42	0.00
4	200.18	0.17	0.08	-140	0.01	0.30	-70	0.00
5	250.23	1.89	0.86	46	0.78	20.48	86	0.00
6	300.28	0.02	0.01	-44	0.00	0.05	157	0.00
7	350.32	1.95	0.89	38	0.09	2.36	155	0.00
8	400.37	0.03	0.01	42	0.00	0.08	-22	0.00
9	450.41	0.22	0.10	176	0.01	0.16	117	0.00
10	500.46	0.03	0.01	-157	0.00	0.03	-84	0.00
11	550.51	1.59	0.73	-126	0.14	3.67	-38	0.00
12	600.55	0.02	0.01	117	0.00	0.02	180	0.00
13	650.60	1.25	0.57	-142	0.09	2.38	-54	0.00
14	700.64	0.05	0.02	51	0.00	0.07	157	0.00
15	750.69	0.11	0.05	143	0.01	0.28	114	0.00
16	800.74	0.00	0.00	-27	0.00	0.05	153	0.00
17	850.78	1.58	0.72	25	0.08	2.10	119	0.00
18	900.83	0.03	0.01	122	0.00	0.02	-94	0.00
19	950.87	1.17	0.53	14	0.06	1.53	103	0.00
20	1000.92	0.06	0.03	-127	0.00	0.03	-45	0.00
21	1050.97	0.11	0.05	169	0.01	0.15	-137	0.00
22	1101.01	0.05	0.02	-165	0.00	0.03	-67	0.00
23	1151.06	1.27	0.58	-177	0.05	1.43	-91	0.00
24	1201.10	0.02	0.01	172	0.00	0.03	165	0.00
25	1251.15	1.05	0.48	172	0.04	0.98	-102	0.00
26	1301.20	0.03	0.01	4	0.00	0.02	21	0.00
27	1351.24	0.06	0.03	-53	0.00	0.03	143	0.00
28	1401.29	0.03	0.01	-56	0.00	0.03	11	0.00
29	1451.33	1.08	0.49	-21	0.03	0.89	66	0.00
30	1501.38	0.05	0.02	-6	0.00	0.03	-39	0.00
31	1551.43	0.89	0.41	-37	0.02	0.56	51	0.00

รูปที่ข-4 หลังต่อตัวกรอง-3 Phase Rectifier-Phase-R

Single Phase Readings - 02/24/02 20:43:59

Summary Information

		Voltage	Current
Frequency	49.99	RMS 220.6	3.83
Power (1 Phase)		Peak 316.2	6.53
KW	0.82	DC Offset 0.2	-0.03
KVA	0.84	Crest 1.43	1.71
KVAR	0.04	THD Rms 2.22	25.70
Peak KW	2.03	THD Fund 2.22	26.60
Phase	3 ϕ lead	HRMS 4.9	0.98
Total PF	0.97	KFactor	3.18
DPF	1.00		

Record Information

	Max	Average	Min
V RMS			
A RMS			
V Peak			
A Peak			
V THD-R%			
A THD-R%			
KWatts			
KVA			
TPF			
DPF			
Frequency			

Harmonic Information

	1 Phase				1 Phase			1 Phase
	Freq.	V Mag	%V RMS	V $\sqrt{3}$	I Mag	%I RMS	I $\sqrt{3}$	Power (KW)
DC	0.00	0.19	0.09	0	0.03	0.69	0	0.00
1	49.99	220.48	99.97	0	3.70	96.61	3	0.81
2	99.98	0.17	0.08	97	0.01	0.18	108	0.00
3	149.97	1.28	0.58	-150	0.14	3.66	-60	0.00
4	199.96	0.31	0.14	-169	0.02	0.59	-115	0.00
5	249.95	2.64	1.20	26	0.95	24.78	72	0.00
6	299.94	0.03	0.01	12	0.00	0.05	27	0.00
7	349.94	2.00	0.91	35	0.09	2.30	144	0.00
8	399.93	0.05	0.02	107	0.00	0.07	-23	0.00
9	449.92	0.20	0.09	22	0.02	0.51	135	0.00
10	499.91	0.06	0.03	-150	0.00	0.03	-27	0.00
11	549.90	1.42	0.64	-136	0.13	3.33	-51	0.00
12	599.89	0.05	0.02	-115	0.00	0.05	43	0.00
13	649.88	1.22	0.55	-159	0.10	2.50	-64	0.00
14	699.87	0.05	0.02	-49	0.00	0.05	116	0.00
15	749.86	0.27	0.12	-167	0.01	0.29	-82	0.00
16	799.85	0.03	0.01	80	0.00	0.02	-159	0.00
17	849.84	1.30	0.59	8	0.07	1.88	101	0.00
18	899.83	0.02	0.01	168	0.00	0.03	158	0.00
19	949.82	1.25	0.57	-4	0.06	1.57	88	0.00
20	999.82	0.05	0.02	178	0.00	0.05	-124	0.00
21	1049.81	0.27	0.12	-8	0.01	0.28	91	0.00
22	1099.80	0.02	0.01	82	0.00	0.07	-95	0.00
23	1149.79	1.09	0.50	160	0.04	1.14	-119	0.00
24	1199.78	0.05	0.02	162	0.00	0.05	-72	0.00
25	1249.77	1.09	0.50	148	0.04	1.09	-125	0.00
26	1299.76	0.05	0.02	-64	0.00	0.03	23	0.00
27	1349.75	0.31	0.14	141	0.01	0.33	-145	0.00
28	1399.74	0.03	0.01	-37	0.00	0.02	20	0.00
29	1449.73	0.88	0.40	-51	0.03	0.67	23	0.00
30	1499.72	0.06	0.03	39	0.00	0.05	54	0.00
31	1549.71	0.98	0.45	-63	0.03	0.67	23	0.00

รูปที่ข-5 หลังต่อตัวกรอง-3 Phase Rectifier-Phase-S

Single Phase Readings - 02/24/02 20:43:38

Summary Information

		Voltage	Current
Frequency	49.94	RMS 219.6	3.86
Power (1 Phase)		Peak 312.5	6.43
KW	0.83	DC Offset 0.2	-0.03
KVA	0.85	Crest 1.42	1.67
KVAR	0.04	THD Rms 2.02	22.21
Peak KW	1.98	THD Fund 2.02	22.78
Phase	3 ϕ lead	HRMS 4.4	0.86
Total PF	0.97	KFactor	2.89
DPF	1.00		

Record Information

	Max	Average	Min
V RMS			
A RMS			
V Peak			
A Peak			
V THD-R%			
A THD-R%			
KWatts			
KVA			
TPF			
DPF			
Frequency			

Harmonic Information

	1 Phase				1 Phase			1 Phase	
	Freq.	V Mag	%V RMS	V $\sqrt{3}$	I Mag	%I RMS	I $\sqrt{3}$	Power (KW)	
DC	0.00	0.20	0.09	0	0.03	0.70	0	0.00	
1	49.94	219.53	99.99	0	3.76	97.49	3	0.82	
2	99.87	0.20	0.09	85	0.00	0.11	106	0.00	
3	149.81	0.22	0.10	-168	0.13	3.48	-62	0.00	
4	199.74	0.23	0.11	-172	0.01	0.28	-114	0.00	
5	249.68	2.09	0.95	20	0.81	21.02	72	0.00	
6	299.61	0.02	0.01	134	0.01	0.16	100	0.00	
7	349.55	1.83	0.83	29	0.10	2.49	139	0.00	
8	399.48	0.06	0.03	23	0.00	0.06	-61	0.00	
9	449.42	0.22	0.10	-128	0.00	0.11	35	0.00	
10	499.36	0.05	0.02	-167	0.00	0.03	4	0.00	
11	549.29	1.63	0.74	-142	0.15	3.89	-57	0.00	
12	599.23	0.02	0.01	-32	0.00	0.06	35	0.00	
13	649.16	1.16	0.53	-167	0.09	2.28	-74	0.00	
14	699.10	0.05	0.02	-8	0.00	0.03	122	0.00	
15	749.03	0.09	0.04	50	0.01	0.36	104	0.00	
16	798.97	0.03	0.01	66	0.00	0.05	99	0.00	
17	848.90	1.52	0.69	0	0.09	2.35	91	0.00	
18	898.84	0.06	0.03	113	0.00	0.05	168	0.00	
19	948.77	1.05	0.48	-14	0.06	1.44	75	0.00	
20	998.71	0.03	0.01	128	0.00	0.05	156	0.00	
21	1048.65	0.22	0.10	168	0.01	0.24	-123	0.00	
22	1098.58	0.03	0.01	-154	0.00	0.03	-105	0.00	
23	1148.52	1.30	0.59	145	0.06	1.47	-127	0.00	
24	1198.45	0.03	0.01	-174	0.00	0.03	-48	0.00	
25	1248.39	0.92	0.42	133	0.04	0.91	-145	0.00	
26	1298.32	0.03	0.01	-64	0.00	0.03	8	0.00	
27	1348.26	0.22	0.10	-49	0.00	0.13	34	0.00	
28	1398.19	0.05	0.02	-30	0.00	0.02	77	0.00	
29	1448.13	1.09	0.50	-66	0.04	0.99	18	0.00	
30	1498.07	0.05	0.02	20	0.00	0.03	71	0.00	
31	1548.00	0.72	0.33	-79	0.02	0.55	11	0.00	

รูปที่ข-6 หลังต่อตัวกรอง-3 Phase Rectifier-Phase-T

Single Phase Readings - 01/05/80 05:40:49

Summary Information

		Voltage	Current
Frequency	49.99	RMS 216.8	4.59
Power (1 Phase)		Peak 314.4	7.71
KW	0.80	DC Offset 0.0	-0.03
KVA	1.00	Crest 1.45	1.68
KVAR	0.56	THD Rms 4.38	18.25
Peak KW	2.24	THD Fund 4.38	18.56
Phase	35 ^ล lag	HRMS 9.5	0.84
Total PF	0.80	KFactor	3.66
DPF	0.82		

Record Information

	Max	Average	Min
V RMS			
A RMS			
V Peak			
A Peak			
V THD-R%			
A THD-R%			
KWatts			
KVA			
TPF			
DPF			
Frequency			

Harmonic Information

DC	1 Phase				1 Phase			1 Phase	
	Freq.	V Mag	%V RMS	V _r	I Mag	%I RMS	I _r	Power (KW)	
1	49.99	216.55	99.89	0	4.52	98.30	-35	0.80	
2	99.98	0.16	0.07	-162	0.01	0.30	-39	0.00	
3	149.97	0.45	0.21	153	0.05	1.02	-115	0.00	
4	199.96	0.05	0.02	162	0.01	0.15	-67	0.00	
5	249.95	6.66	3.07	98	0.60	13.05	-162	0.00	
6	299.94	0.09	0.04	111	0.02	0.35	-162	0.00	
7	349.94	2.70	1.25	-57	0.42	9.20	23	0.00	
8	399.93	0.00	0.00	-49	0.01	0.15	86	0.00	
9	449.92	0.44	0.20	176	0.04	0.88	-98	0.00	
10	499.91	0.09	0.04	-32	0.01	0.14	74	0.00	
11	549.90	2.72	1.25	-131	0.26	5.77	-42	0.00	
12	599.89	0.14	0.06	-137	0.01	0.29	-50	0.00	
13	649.88	2.33	1.07	33	0.18	4.00	126	0.00	
14	699.87	0.13	0.06	114	0.01	0.15	-166	0.00	
15	749.86	0.52	0.24	-94	0.04	0.76	9	0.00	
16	799.85	0.09	0.04	90	0.00	0.11	178	0.00	
17	849.84	2.75	1.27	-23	0.16	3.47	68	0.00	
18	899.83	0.19	0.09	-23	0.01	0.27	62	0.00	
19	949.82	1.67	0.77	160	0.09	1.90	-108	0.00	
20	999.82	0.14	0.06	-141	0.01	0.16	-37	0.00	
21	1049.81	0.63	0.29	30	0.03	0.61	122	0.00	
22	1099.80	0.11	0.05	-165	0.00	0.11	-68	0.00	
23	1149.79	2.23	1.03	90	0.10	2.11	177	0.00	
24	1199.78	0.28	0.13	89	0.01	0.22	-179	0.00	
25	1249.77	1.70	0.79	-70	0.07	1.52	18	0.00	
26	1299.76	0.19	0.09	-15	0.01	0.16	73	0.00	
27	1349.75	0.72	0.33	153	0.02	0.52	-115	0.00	
28	1399.74	0.13	0.06	-34	0.00	0.10	39	0.00	
29	1449.73	1.72	0.79	-150	0.06	1.32	-64	0.00	
30	1499.72	0.30	0.14	-150	0.01	0.19	-59	0.00	
31	1549.71	1.55	0.71	43	0.05	1.02	133	0.00	

รูปที่ข-7 ก่อนต่อตัวกรอง-AC Voltage Controller-R

Single Phase Readings - 01/05/80 05:41:55

Summary Information

		Voltage	Current
Frequency	49.94	RMS 216.7	4.59
Power (1 Phase)		Peak 313.9	7.72
KW	0.79	DC Offset 0.2	-0.02
KVA	1.00	Crest 1.45	1.68
KVAR	0.59	THD Rms 4.39	18.57
Peak KW	2.22	THD Fund 4.39	18.90
Phase	37.5 lag	HRMS 9.5	0.85
Total PF	0.79	KFactor 3.61	
DPF	0.80		

Record Information

	Max	Average	Min
V RMS			
A RMS			
V Peak			
A Peak			
V THD-R%			
A THD-R%			
KWatts			
KVA			
TPF			
DPF			
Frequency			

Harmonic Information

	Freq.	V Mag	%V RMS	1 Phase V _r	I Mag	%I RMS	1 Phase I _r	1 Phase Power (KW)
DC	0.00	0.22	0.10	0	0.02	0.53	0	0.00
1	49.94	216.53	99.91	0	4.51	98.24	-37	0.78
2	99.87	0.23	0.11	91	0.02	0.34	142	0.00
3	149.81	0.08	0.04	-79	0.08	1.76	-49	0.00
4	199.74	0.13	0.06	153	0.01	0.18	136	0.00
5	249.68	6.92	3.19	91	0.63	13.78	-168	0.00
6	299.61	0.13	0.06	72	0.01	0.12	155	0.00
7	349.55	2.25	1.04	-62	0.39	8.56	14	0.00
8	399.48	0.09	0.04	78	0.00	0.08	-116	0.00
9	449.42	0.41	0.19	-43	0.02	0.54	75	0.00
10	499.36	0.11	0.05	140	0.01	0.19	-146	0.00
11	549.29	2.97	1.37	-148	0.29	6.25	-55	0.00
12	599.23	0.06	0.03	163	0.00	0.08	-106	0.00
13	649.16	2.13	0.98	16	0.16	3.44	105	0.00
14	699.10	0.08	0.04	-98	0.00	0.08	-9	0.00
15	749.03	0.36	0.17	112	0.02	0.54	-171	0.00
16	798.97	0.08	0.04	-123	0.01	0.15	-31	0.00
17	848.90	2.98	1.38	-44	0.18	3.86	50	0.00
18	898.84	0.14	0.06	-125	0.00	0.08	-17	0.00
19	948.77	1.09	0.50	124	0.06	1.24	-141	0.00
20	998.71	0.05	0.02	13	0.00	0.07	101	0.00
21	1048.65	0.52	0.24	-141	0.02	0.54	-60	0.00
22	1098.58	0.11	0.05	-15	0.01	0.12	70	0.00
23	1148.52	2.64	1.22	65	0.11	2.44	155	0.00
24	1198.45	0.11	0.05	10	0.00	0.10	86	0.00
25	1248.39	1.05	0.48	-100	0.04	0.87	-16	0.00
26	1298.32	0.06	0.03	125	0.00	0.01	180	0.00
27	1348.26	0.53	0.25	-28	0.02	0.49	51	0.00
28	1398.19	0.11	0.05	83	0.00	0.08	-169	0.00
29	1448.13	2.11	0.97	178	0.07	1.61	-91	0.00
30	1498.07	0.09	0.04	102	0.00	0.07	-153	0.00
31	1548.00	0.77	0.35	-1	0.02	0.52	91	0.00

รูปที่ข-8 ก่อนต่อตัวกรอง-AC Voltage Controller-S

Single Phase Readings - 01/05/80 05:42:26

Summary Information

		Voltage	Current
Frequency	49.99	RMS 217.2	4.58
Power (1 Phase)		Peak 314.8	7.66
KW	0.79	DC Offset 0.0	-0.03
KVA	0.99	Crest 1.45	1.67
KVAR	0.59	THD Rms 4.33	18.34
Peak KW	2.23	THD Fund 4.33	18.65
Phase	37.5 lag	HRMS 9.4	0.84
Total PF	0.79	KFactor	3.73
DPF	0.80		

Record Information

	Max	Average	Min
V RMS			
A RMS			
V Peak			
A Peak			
V THD-R%			
A THD-R%			
KWatts			
KVA			
TPF			
DPF			
Frequency			

Harmonic Information

	Freq.	V Mag	%V RMS	1 Phase V, 5	I Mag	%I RMS	1 Phase I, 5	1 Phase Power (KW)
DC	0.00	0.02	0.01	0	0.03	0.64	0	0.00
1	49.99	216.92	99.89	0	4.50	98.30	-37	0.78
2	99.98	0.06	0.03	-162	0.02	0.52	54	0.00
3	149.97	0.45	0.21	98	0.10	2.09	-59	0.00
4	199.96	0.19	0.09	163	0.02	0.41	-147	0.00
5	249.95	6.63	3.05	87	0.59	12.84	-175	0.00
6	299.94	0.14	0.06	-113	0.02	0.40	1	0.00
7	349.94	2.33	1.07	-70	0.43	9.40	6	0.00
8	399.93	0.14	0.06	58	0.01	0.33	137	0.00
9	449.92	0.33	0.15	-75	0.02	0.49	44	0.00
10	499.91	0.11	0.05	-142	0.01	0.31	-43	0.00
11	549.90	2.59	1.19	-160	0.25	5.57	-68	0.00
12	599.89	0.19	0.09	2	0.02	0.38	96	0.00
13	649.88	2.52	1.16	-2	0.20	4.34	93	0.00
14	699.87	0.16	0.07	152	0.01	0.29	-121	0.00
15	749.86	0.34	0.16	77	0.03	0.56	141	0.00
16	799.85	0.20	0.09	-39	0.01	0.26	60	0.00
17	849.84	2.70	1.24	-62	0.16	3.44	29	0.00
18	899.83	0.23	0.11	103	0.01	0.27	-161	0.00
19	949.82	1.80	0.83	107	0.09	2.06	-163	0.00
20	999.82	0.25	0.12	-103	0.01	0.22	-18	0.00
21	1049.81	0.28	0.13	143	0.02	0.37	-127	0.00
22	1099.80	0.20	0.09	64	0.01	0.20	152	0.00
23	1149.79	2.28	1.05	37	0.10	2.20	125	0.00
24	1199.78	0.28	0.13	-146	0.01	0.26	-71	0.00
25	1249.77	1.66	0.76	-138	0.07	1.47	-49	0.00
26	1299.76	0.23	0.11	5	0.01	0.23	88	0.00
27	1349.75	0.30	0.14	-104	0.02	0.37	-27	0.00
28	1399.74	0.27	0.12	172	0.01	0.19	-106	0.00
29	1449.73	1.88	0.86	141	0.06	1.39	-133	0.00
30	1499.72	0.28	0.13	-44	0.01	0.22	41	0.00
31	1549.71	1.61	0.74	-37	0.05	1.11	50	0.00

รูปที่ข-9 ก่อนต่อตัวกรอง-AC Voltage Controller-T

Single Phase Readings - 01/05/80 05:51:38

Summary Information

		Voltage	Current
Frequency	49.94	RMS 217.8	3.67
Power (1 Phase)		Peak 316.7	5.76
KW	0.79	DC Offset 0.3	-0.02
KVA	0.80	Crest 1.45	1.57
KVAR	0.11	THD Rms 2.93	11.43
Peak KW	1.70	THD Fund 2.93	11.50
Phase	8๙ lag	HRMS 6.4	0.42
Total PF	0.98	KFactor	2.90
DPF	0.99		

Record Information

	Max	Average	Min
V RMS			
A RMS			
V Peak			
A Peak			
V THD-R%			
A THD-R%			
KWatts			
KVA			
TPF			
DPF			
Frequency			

Harmonic Information

	Freq.	V Mag	%V RMS	1 Phase V,๙	I Mag	%I RMS	1 Phase I,๙	1 Phase Power (KW)
DC	0.00	0.27	0.12	0	0.02	0.65	0	0.00
1	49.94	217.67	99.93	0	3.64	99.27	-8	0.79
2	99.89	0.14	0.06	98	0.01	0.36	-28	0.00
3	149.83	0.36	0.16	154	0.06	1.75	-101	0.00
4	199.77	0.13	0.06	158	0.01	0.26	-64	0.00
5	249.71	4.27	1.96	89	0.17	4.77	148	0.00
6	299.66	0.05	0.02	162	0.02	0.61	-166	0.00
7	349.60	0.98	0.45	-76	0.22	6.04	-8	0.00
8	399.54	0.06	0.03	33	0.01	0.20	55	0.00
9	449.48	0.28	0.13	-174	0.04	0.95	-99	0.00
10	499.43	0.06	0.03	-15	0.01	0.19	90	0.00
11	549.37	1.89	0.87	-126	0.20	5.38	-38	0.00
12	599.31	0.16	0.07	-145	0.01	0.36	-37	0.00
13	649.26	1.73	0.80	34	0.13	3.54	129	0.00
14	699.20	0.08	0.04	72	0.01	0.15	-175	0.00
15	749.14	0.48	0.22	-89	0.03	0.87	-2	0.00
16	799.08	0.11	0.05	92	0.00	0.14	-157	0.00
17	849.03	2.09	0.96	-18	0.12	3.23	72	0.00
18	898.97	0.17	0.08	-15	0.01	0.32	74	0.00
19	948.91	1.23	0.57	162	0.07	1.92	-108	0.00
20	998.85	0.13	0.06	-156	0.01	0.20	-56	0.00
21	1048.80	0.47	0.22	35	0.02	0.68	131	0.00
22	1098.74	0.13	0.06	-136	0.00	0.14	-67	0.00
23	1148.68	1.70	0.78	94	0.07	2.04	-176	0.00
24	1198.63	0.25	0.11	98	0.01	0.26	-162	0.00
25	1248.57	1.28	0.59	-68	0.05	1.40	18	0.00
26	1298.51	0.17	0.08	-32	0.01	0.17	61	0.00
27	1348.45	0.63	0.29	153	0.02	0.63	-123	0.00
28	1398.40	0.13	0.06	-12	0.00	0.12	55	0.00
29	1448.34	1.34	0.62	-146	0.05	1.24	-61	0.00
30	1498.28	0.28	0.13	-143	0.01	0.26	-59	0.00
31	1548.22	1.16	0.53	49	0.04	1.04	136	0.00

รูปที่ข-10 หลังต่อตัวกรอง-AC Voltage Controller-R

Single Phase Readings - 01/05/80 05:53:21

Summary Information

		Voltage	Current
Frequency	49.88	RMS 217.6	3.61
Power (1 Phase)		Peak 314.9	5.56
KW	0.77	DC Offset 0.2	-0.02
KVA	0.79	Crest 1.45	1.54
KVAR	0.10	THD Rms 3.02	13.39
Peak KW	1.63	THD Fund 3.02	13.51
Phase	8.5 lag	HRMS 6.6	0.48
Total PF	0.98	KFactor	3.04
DPF	0.99		

Record Information

	Max	Average	Min
V RMS			
A RMS			
V Peak			
A Peak			
V THD-R%			
A THD-R%			
KWatts			
KVA			
TPF			
DPF			
Frequency			

Harmonic Information

	Freq.	1 Phase			1 Phase			1 Phase	
		V Mag	%V RMS	V, 5	I Mag	%I RMS	I, 5	Power (KW)	
DC	0.00	0.23	0.11	0	0.02	0.64	0	0.00	
1	49.88	217.45	99.93	0	3.58	99.05	-8	0.77	
2	99.76	0.23	0.11	91	0.02	0.47	147	0.00	
3	149.64	0.22	0.10	173	0.10	2.82	-49	0.00	
4	199.52	0.25	0.11	124	0.03	0.83	168	0.00	
5	249.40	4.59	2.11	89	0.28	7.79	154	0.00	
6	299.29	0.13	0.06	22	0.01	0.40	98	0.00	
7	349.17	0.84	0.39	-83	0.23	6.33	-18	0.00	
8	399.05	0.05	0.02	82	0.00	0.09	-70	0.00	
9	448.93	0.25	0.11	-40	0.01	0.22	124	0.00	
10	498.81	0.08	0.04	114	0.00	0.14	-146	0.00	
11	548.69	2.03	0.93	-146	0.21	5.75	-53	0.00	
12	598.57	0.05	0.02	176	0.00	0.12	-104	0.00	
13	648.45	1.59	0.73	13	0.11	3.18	103	0.00	
14	698.33	0.06	0.03	-86	0.00	0.09	4	0.00	
15	748.21	0.17	0.08	110	0.02	0.54	-152	0.00	
16	798.09	0.09	0.04	-134	0.00	0.14	-35	0.00	
17	847.97	2.28	1.05	-43	0.13	3.62	49	0.00	
18	897.86	0.06	0.03	-112	0.00	0.10	-13	0.00	
19	947.74	0.88	0.40	120	0.05	1.42	-146	0.00	
20	997.62	0.02	0.01	-23	0.00	0.07	101	0.00	
21	1047.50	0.41	0.19	-143	0.01	0.38	-78	0.00	
22	1097.38	0.11	0.05	-39	0.00	0.12	60	0.00	
23	1147.26	2.05	0.94	65	0.09	2.47	154	0.00	
24	1197.14	0.08	0.04	-11	0.00	0.07	83	0.00	
25	1247.02	0.75	0.34	-103	0.03	0.88	-26	0.00	
26	1296.90	0.03	0.01	134	0.00	0.02	-126	0.00	
27	1346.78	0.41	0.19	-34	0.02	0.43	58	0.00	
28	1396.66	0.09	0.04	88	0.00	0.09	172	0.00	
29	1446.55	1.73	0.80	175	0.06	1.64	-100	0.00	
30	1496.43	0.14	0.06	103	0.00	0.14	-172	0.00	
31	1546.31	0.63	0.29	-5	0.02	0.66	80	0.00	

รูปที่ข-11 หลังต่อตัวกรอง-AC Voltage Controller-S

Single Phase Readings - 01/05/80 05:53:59

Summary Information

		Voltage	Current
Frequency	49.94	RMS 218.1	3.63
Power (1 Phase)		Peak 316.7	5.61
KW	0.78	DC Offset 0.0	-0.03
KVA	0.79	Crest 1.45	1.54
KVAR	0.10	THD Rms 3.16	13.19
Peak KW	1.67	THD Fund 3.16	13.30
Phase	85 lag	HRMS 6.9	0.48
Total PF	0.98	KFactor 3.14	
DPF	0.99		

Record Information

	Max	Average	Min
V RMS			
A RMS			
V Peak			
A Peak			
V THD-R%			
A THD-R%			
KWatts			
KVA			
TPF			
DPF			
Frequency			

Harmonic Information

	Freq.	1 Phase			1 Phase			1 Phase
		V Mag	%V RMS	V _{rms}	I Mag	%I RMS	I _{rms}	Power (KW)
DC	0.00	0.02	0.01	0	0.03	0.81	0	0.00
1	49.94	218.05	99.96	0	3.60	99.14	-8	0.78
2	99.87	0.11	0.05	-133	0.02	0.65	53	0.00
3	149.81	0.34	0.16	109	0.11	2.91	-59	0.00
4	199.74	0.30	0.14	115	0.04	1.10	-162	0.00
5	249.68	4.81	2.21	80	0.23	6.45	136	0.00
6	299.61	0.16	0.07	-141	0.03	0.72	-39	0.00
7	349.55	0.92	0.42	-87	0.26	7.26	-21	0.00
8	399.48	0.06	0.03	52	0.01	0.24	138	0.00
9	449.42	0.25	0.11	-59	0.00	0.12	60	0.00
10	499.36	0.08	0.04	-135	0.01	0.24	-42	0.00
11	549.29	1.81	0.83	-158	0.19	5.16	-65	0.00
12	599.23	0.16	0.07	20	0.01	0.34	91	0.00
13	649.16	1.95	0.90	0	0.14	3.97	94	0.00
14	699.10	0.16	0.07	158	0.01	0.26	-123	0.00
15	749.03	0.20	0.09	72	0.01	0.40	159	0.00
16	798.97	0.17	0.08	-37	0.01	0.28	51	0.00
17	848.90	2.11	0.97	-59	0.12	3.22	30	0.00
18	898.84	0.20	0.09	118	0.01	0.31	-166	0.00
19	948.77	1.44	0.66	107	0.08	2.19	-164	0.00
20	998.71	0.16	0.07	-101	0.01	0.21	-20	0.00
21	1048.65	0.31	0.14	151	0.02	0.43	-138	0.00
22	1098.58	0.16	0.07	66	0.01	0.19	160	0.00
23	1148.52	1.78	0.82	41	0.08	2.22	129	0.00
24	1198.45	0.23	0.11	-150	0.01	0.28	-60	0.00
25	1248.39	1.38	0.63	-141	0.05	1.46	-54	0.00
26	1298.32	0.20	0.09	-12	0.01	0.17	89	0.00
27	1348.26	0.23	0.11	-112	0.01	0.21	-24	0.00
28	1398.19	0.19	0.09	162	0.01	0.17	-110	0.00
29	1448.13	1.48	0.68	142	0.05	1.38	-133	0.00
30	1498.07	0.25	0.11	-48	0.01	0.19	33	0.00
31	1548.00	1.27	0.58	-37	0.04	1.15	51	0.00

รูปที่ข-12 หลังต่อตัวกรอง-AC Voltage Controller-T

Single Phase Readings - 03/12/02 18:33:11

Summary Information

Frequency	49.99
Power (1 Phase)	
KW	0.80
KVA	1.02
KVAR	0.62
Peak KW	2.08
Phase	38 ^ล lag
Total PF	0.79
DPF	0.79

Record Information

	Max	Average	Min
V RMS			
A RMS			
V Peak			
A Peak			
V THD-R%			
A THD-R%			
KWatts			
KVA			
TPF			
DPF			
Frequency			

Harmonic Information

DC	1 Phase				1 Phase			1 Phase	
	Freq.	V Mag	%V RMS	V _r	I Mag	%I RMS	I _r	Power (KW)	
DC	0.00	0.19	0.09	0	0.04	0.96	0	0.00	
1	49.99	217.58	99.94	0	4.63	99.05	-38	0.79	
2	99.98	0.03	0.01	77	0.03	0.72	-53	0.00	
3	149.97	0.48	0.22	-180	0.25	5.33	-35	0.00	
4	199.96	0.23	0.11	-169	0.02	0.51	-63	0.00	
5	249.95	4.38	2.01	174	0.38	8.15	-65	0.00	
6	299.94	0.17	0.08	-128	0.03	0.55	-24	0.00	
7	349.94	2.89	1.33	-51	0.36	7.68	8	0.00	
8	399.93	0.14	0.06	-77	0.01	0.25	8	0.00	
9	449.92	0.94	0.43	167	0.10	2.04	-95	0.00	
10	499.91	0.05	0.02	-51	0.00	0.07	32	0.00	
11	549.90	2.36	1.08	-98	0.20	4.22	-11	0.00	
12	599.89	0.08	0.04	8	0.00	0.07	98	0.00	
13	649.88	1.19	0.55	-51	0.10	2.04	39	0.00	
14	699.87	0.08	0.04	111	0.00	0.11	-136	0.00	
15	749.86	0.63	0.29	-169	0.04	0.88	-85	0.00	
16	799.85	0.14	0.06	115	0.01	0.17	-139	0.00	
17	849.84	0.31	0.14	9	0.02	0.51	89	0.00	
18	899.83	0.16	0.07	-178	0.01	0.16	-98	0.00	
19	949.82	0.48	0.22	-117	0.03	0.63	-27	0.00	
20	999.82	0.02	0.01	-110	0.00	0.05	-49	0.00	
21	1049.81	0.84	0.39	131	0.04	0.80	-146	0.00	
22	1099.80	0.06	0.03	41	0.00	0.01	0	0.00	
23	1149.79	1.03	0.47	-172	0.04	0.85	-82	0.00	
24	1199.78	0.06	0.03	60	0.00	0.04	94	0.00	
25	1249.77	0.36	0.17	-111	0.01	0.32	-30	0.00	
26	1299.76	0.11	0.05	84	0.00	0.05	158	0.00	
27	1349.75	0.48	0.22	139	0.02	0.37	-138	0.00	
28	1399.74	0.11	0.05	66	0.01	0.12	157	0.00	
29	1449.73	0.23	0.11	-45	0.01	0.27	29	0.00	
30	1499.72	0.11	0.05	96	0.00	0.07	-180	0.00	
31	1549.71	0.23	0.11	-163	0.01	0.19	-89	0.00	

รูปที่ข-13 ก่อนต่อตัวกรอง-DC Drive-R

Single Phase Readings - 03/12/02 18:34:01

Summary Information

		Voltage	Current
Frequency	49.94	RMS 217.9	4.48
Power (1 Phase)		Peak 306.7	7.12
KW	0.68	DC Offset 0.3	-0.04
KVA	0.98	Crest 1.41	1.59
KVAR	0.68	THD Rms 3.13	14.55
Peak KW	2.06	THD Fund 3.13	14.70
Phase	45 $\frac{5}{8}$ lag	HRMS 6.8	0.65
Total PF	0.70	KFactor	2.07
DPF	0.71		

Record Information

	Max	Average	Min
V RMS			
A RMS			
V Peak			
A Peak			
V THD-R%			
A THD-R%			
KWatts			
KVA			
TPF			
DPF			
Frequency			

Harmonic Information

	Freq.	V Mag	%V RMS	1 Phase V $\frac{5}{8}$	I Mag	%I RMS	1 Phase I $\frac{5}{8}$	1 Phase Power (KW)
DC	0.00	0.27	0.12	0	0.04	0.98	0	0.00
1	49.94	217.84	99.97	0	4.43	98.93	-45	0.68
2	99.87	0.25	0.11	96	0.03	0.63	-150	0.00
3	149.81	0.47	0.22	-142	0.01	0.15	114	0.00
4	199.74	0.19	0.09	-140	0.03	0.61	45	0.00
5	249.68	4.92	2.26	167	0.47	10.54	-82	0.00
6	299.61	0.19	0.09	49	0.03	0.71	158	0.00
7	349.55	3.39	1.56	-51	0.38	8.49	11	0.00
8	399.48	0.03	0.01	65	0.01	0.18	-69	0.00
9	449.42	0.34	0.16	65	0.06	1.24	-172	0.00
10	499.36	0.16	0.07	94	0.01	0.22	149	0.00
11	549.29	2.22	1.02	-105	0.19	4.17	-17	0.00
12	599.23	0.06	0.03	-116	0.00	0.08	-10	0.00
13	649.16	1.44	0.66	-44	0.10	2.18	48	0.00
14	699.10	0.09	0.04	61	0.01	0.20	140	0.00
15	749.03	0.66	0.30	-45	0.04	0.89	45	0.00
16	798.97	0.11	0.05	-131	0.01	0.18	-31	0.00
17	848.90	0.50	0.23	56	0.03	0.63	155	0.00
18	898.84	0.16	0.07	8	0.01	0.20	86	0.00
19	948.77	0.70	0.32	-98	0.03	0.77	-12	0.00
20	998.71	0.05	0.02	65	0.00	0.07	165	0.00
21	1048.65	0.47	0.22	15	0.02	0.46	110	0.00
22	1098.58	0.13	0.06	22	0.00	0.08	115	0.00
23	1148.52	0.86	0.39	-176	0.03	0.75	-84	0.00
24	1198.45	0.03	0.01	-141	0.00	0.08	-27	0.00
25	1248.39	0.53	0.24	-129	0.02	0.52	-51	0.00
26	1298.32	0.13	0.06	15	0.00	0.10	101	0.00
27	1348.26	0.53	0.24	-112	0.02	0.42	-22	0.00
28	1398.19	0.13	0.06	160	0.00	0.08	-106	0.00
29	1448.13	0.44	0.20	-21	0.02	0.36	71	0.00
30	1498.07	0.06	0.03	-58	0.00	0.07	27	0.00
31	1548.00	0.58	0.27	-137	0.02	0.38	-48	0.00

รูปที่ข-14 ก่อนต่อตัวกรอง-DC Drive-S

Single Phase Readings - 03/12/02 18:34:36

Summary Information

				Record Information		
		Voltage	Current	Max	Average	Min
Frequency	49.99	RMS	216.9	4.53	V RMS	
Power (1 Phase)		Peak	303.5	6.82	A RMS	
KW	0.67	DC Offset	0.0	-0.05	V Peak	
KVA	0.98	Crest	1.4	1.51	A Peak	
KVAR	0.71	THD Rms	3.02	13.57	V THD-R%	
Peak KW	1.84	THD Fund	3.02	13.69	A THD-R%	
Phase	47.5 lag	HRMS	6.6	0.61	KWatts	
Total PF	0.68	KFactor		1.89	KVA	
DPF	0.68				TPF	
					DPF	
					Frequency	

Harmonic Information

	Freq.	V Mag	%V RMS	V, 5	I Mag	%I RMS	I, 5	Power (KW)
DC	0.00	0.03	0.01	0	0.05	1.09	0	0.00
1	49.99	216.77	99.94	0	4.49	99.07	-47	0.66
2	99.98	0.05	0.02	-70	0.01	0.23	129	0.00
3	149.97	1.38	0.63	148	0.32	7.16	-78	0.00
4	199.96	0.09	0.04	-167	0.01	0.25	137	0.00
5	249.95	4.31	1.99	162	0.33	7.40	-95	0.00
6	299.94	0.03	0.01	86	0.01	0.18	153	0.00
7	349.94	3.33	1.53	-53	0.31	6.96	8	0.00
8	399.93	0.05	0.02	-30	0.00	0.10	-159	0.00
9	449.92	1.09	0.50	-48	0.11	2.47	46	0.00
10	499.91	0.08	0.04	122	0.00	0.07	-102	0.00
11	549.90	2.16	0.99	-112	0.19	4.08	-24	0.00
12	599.89	0.06	0.03	144	0.00	0.04	-129	0.00
13	649.88	0.97	0.45	-61	0.07	1.60	37	0.00
14	699.87	0.03	0.01	-50	0.00	0.06	37	0.00
15	749.86	0.48	0.22	59	0.03	0.69	155	0.00
16	799.85	0.08	0.04	-24	0.00	0.11	55	0.00
17	849.84	0.91	0.42	13	0.05	1.06	98	0.00
18	899.83	0.06	0.03	9	0.00	0.10	59	0.00
19	949.82	0.33	0.15	-110	0.02	0.37	-20	0.00
20	999.82	0.05	0.02	60	0.00	0.04	122	0.00
21	1049.81	1.00	0.46	-114	0.04	0.91	-28	0.00
22	1099.80	0.05	0.02	59	0.00	0.07	-174	0.00
23	1149.79	1.06	0.49	170	0.04	0.90	-99	0.00
24	1199.78	0.06	0.03	55	0.00	0.04	131	0.00
25	1249.77	0.48	0.22	-139	0.02	0.47	-53	0.00
26	1299.76	0.05	0.02	-49	0.00	0.03	24	0.00
27	1349.75	0.52	0.24	2	0.02	0.43	77	0.00
28	1399.74	0.03	0.01	-91	0.00	0.03	-18	0.00
29	1449.73	0.81	0.37	-75	0.03	0.58	15	0.00
30	1499.72	0.06	0.03	-91	0.00	0.06	-7	0.00
31	1549.71	0.39	0.18	-89	0.01	0.23	-11	0.00

รูปที่ข-15 ก่อนต่อตัวกรอง-DC Drive-T

Single Phase Readings - 04/04/02 19:55:04

Summary Information

		Voltage	Current
Frequency	50.10	RMS 218.8	3.78
Power (1 Phase)		Peak 308.1	5.46
KW	0.79	DC Offset -0.1	-0.03
KVA	0.83	Crest 1.41	1.44
KVAR	0.23	THD Rms 2.03	12.61
Peak KW	1.61	THD Fund 2.03	12.71
Phase	16 μ lag	HRMS 4.4	0.48
Total PF	0.95	KFactor	1.83
DPF	0.96		

Record Information

	Max	Average	Min
V RMS			
A RMS			
V Peak			
A Peak			
V THD-R%			
A THD-R%			
KWatts			
KVA			
TPF			
DPF			
Frequency			

Harmonic Information

	Freq.	1 Phase			1 Phase			1 Phase	
		V Mag	%V RMS	V \angle	I Mag	%I RMS	I \angle	Power (KW)	
DC	0.00	0.09	0.04	0	0.03	0.88	0	0.00	
1	50.10	218.72	99.96	0	3.75	99.17	-16	0.79	
2	100.20	0.28	0.13	-127	0.04	1.19	-37	0.00	
3	150.30	0.59	0.27	150	0.30	8.04	-41	0.00	
4	200.41	0.13	0.06	176	0.06	1.60	-87	0.00	
5	250.51	2.89	1.32	162	0.05	1.32	-130	0.00	
6	300.61	0.27	0.12	-124	0.05	1.26	-31	0.00	
7	350.71	1.67	0.76	-52	0.28	7.46	-19	0.00	
8	400.81	0.06	0.03	-57	0.01	0.23	52	0.00	
9	450.91	0.72	0.33	-176	0.08	2.13	-82	0.00	
10	501.01	0.13	0.06	-105	0.01	0.23	-45	0.00	
11	551.11	1.86	0.85	-94	0.16	4.15	-9	0.00	
12	601.22	0.06	0.03	20	0.00	0.07	168	0.00	
13	651.32	1.30	0.59	-37	0.09	2.31	51	0.00	
14	701.42	0.14	0.06	148	0.01	0.18	-107	0.00	
15	751.52	0.52	0.24	-158	0.03	0.83	-79	0.00	
16	801.62	0.16	0.07	133	0.01	0.30	-138	0.00	
17	851.72	0.50	0.23	-6	0.03	0.83	90	0.00	
18	901.82	0.22	0.10	-165	0.01	0.38	-86	0.00	
19	951.92	0.22	0.10	-101	0.01	0.40	-2	0.00	
20	1002.03	0.03	0.01	-80	0.00	0.02	180	0.00	
21	1052.13	0.75	0.34	158	0.03	0.81	-129	0.00	
22	1102.23	0.08	0.04	164	0.00	0.07	-96	0.00	
23	1152.33	0.80	0.36	-169	0.03	0.84	-74	0.00	
24	1202.43	0.08	0.04	25	0.00	0.10	122	0.00	
25	1252.53	0.42	0.19	-80	0.02	0.55	5	0.00	
26	1302.63	0.13	0.06	81	0.01	0.15	179	0.00	
27	1352.73	0.42	0.19	-174	0.01	0.31	-89	0.00	
28	1402.84	0.20	0.09	53	0.01	0.15	143	0.00	
29	1452.94	0.38	0.17	-72	0.02	0.43	13	0.00	
30	1503.04	0.22	0.10	148	0.01	0.15	-147	0.00	
31	1553.14	0.06	0.03	156	0.00	0.13	-90	0.00	

รูปที่ข-16 หลังต่อตัวกรอง-DC Drive-R

Single Phase Readings - 04/04/02 19:56:15

Summary Information

		Voltage	Current
Frequency	49.99	RMS 218.7	3.36
Power (1 Phase)		Peak 313.0	5.38
KW	0.68	DC Offset 0.0	-0.03
KVA	0.73	Crest 1.43	1.60
KVAR	0.27	THD Rms 2.03	15.59
Peak KW	1.51	THD Fund 2.03	15.79
Phase	22 lag	HRMS 4.4	0.52
Total PF	0.92	KFactor	2.32
DPF	0.93		

Record Information

	Max	Average	Min
V RMS			
A RMS			
V Peak			
A Peak			
V THD-R%			
A THD-R%			
KWatts			
KVA			
TPF			
DPF			
Frequency			

Harmonic Information

	Freq.	V Mag	%V RMS	1 Phase V, ฐ	I Mag	%I RMS	1 Phase I, ฐ	1 Phase Power (KW)
DC	0.00	0.00	0.00	0	0.03	1.00	0	0.00
1	49.99	218.61	99.97	0	3.32	98.73	-22	0.67
2	99.98	0.16	0.07	131	0.05	1.49	-144	0.00
3	149.97	0.31	0.14	-153	0.03	0.95	-65	0.00
4	199.96	0.20	0.09	-91	0.05	1.43	14	0.00
5	249.95	3.11	1.42	108	0.34	10.19	150	0.00
6	299.94	0.27	0.12	50	0.03	0.84	132	0.00
7	349.94	1.39	0.64	-72	0.33	9.91	-26	0.00
8	399.93	0.09	0.04	172	0.01	0.41	-94	0.00
9	449.92	0.31	0.14	57	0.06	1.79	-176	0.00
10	499.91	0.06	0.03	49	0.00	0.15	112	0.00
11	549.90	1.77	0.81	-115	0.15	4.37	-23	0.00
12	599.89	0.02	0.01	-80	0.00	0.07	-59	0.00
13	649.88	1.42	0.65	-39	0.10	2.96	46	0.00
14	699.87	0.08	0.04	69	0.01	0.19	141	0.00
15	749.86	0.52	0.24	-39	0.03	0.82	44	0.00
16	799.85	0.17	0.08	-157	0.01	0.30	-64	0.00
17	849.84	0.41	0.19	8	0.02	0.58	91	0.00
18	899.83	0.17	0.08	-25	0.01	0.26	63	0.00
19	949.82	0.50	0.23	-76	0.02	0.61	-8	0.00
20	999.82	0.13	0.06	67	0.00	0.13	169	0.00
21	1049.81	0.53	0.24	-1	0.03	0.80	101	0.00
22	1099.80	0.09	0.04	-44	0.00	0.07	27	0.00
23	1149.79	0.72	0.33	163	0.03	0.82	-117	0.00
24	1199.78	0.03	0.01	-143	0.00	0.02	146	0.00
25	1249.77	0.48	0.22	-122	0.01	0.41	-27	0.00
26	1299.76	0.09	0.04	8	0.00	0.09	85	0.00
27	1349.75	0.28	0.13	-112	0.01	0.30	-18	0.00
28	1399.74	0.20	0.09	112	0.01	0.19	-156	0.00
29	1449.73	0.48	0.22	-57	0.02	0.50	13	0.00
30	1499.72	0.09	0.04	-99	0.00	0.09	-6	0.00
31	1549.71	0.59	0.27	-134	0.02	0.60	-51	0.00

รูปที่ข-17 หลังต่อตัวกรอง-DC Drive-S

Single Phase Readings - 04/04/02 19:57:25

Summary Information

		Voltage		Current		Record Information		
						Max	Average	Min
Frequency	50.05	RMS	217.4	3.66	V RMS			
Power (1 Phase)		Peak	308.2	5.15	A RMS			
KW	0.68	DC Offset	0.1	-0.03	V Peak			
KVA	0.80	Crest	1.42	1.41	A Peak			
KVAR	0.40	THD Rms	2.22	14.36	V THD-R%			
Peak KW	1.45	THD Fund	2.22	14.51	A THD-R%			
Phase	31 lag	HRMS	4.8	0.53	KWatts			
Total PF	0.86	KFactor		2.01	KVA			
DPF	0.86				TPF			
					DPF			
					Frequency			

Harmonic Information

	1 Phase			1 Phase			1 Phase	
	Freq.	V Mag	%V RMS	V, ฐ	I Mag	%I RMS	I, ฐ	Power (KW)
DC	0.00	0.08	0.04	0	0.03	0.85	0	0.00
1	50.05	217.30	99.94	0	3.62	98.94	-31	0.68
2	100.09	0.16	0.07	4	0.03	0.85	79	0.00
3	150.14	1.09	0.50	137	0.34	9.35	-87	0.00
4	200.18	0.09	0.04	11	0.03	0.84	139	0.00
5	250.23	2.52	1.16	110	0.21	5.68	135	0.00
6	300.28	0.08	0.04	-149	0.00	0.14	-154	0.00
7	350.32	2.30	1.06	-54	0.26	7.01	-7	0.00
8	400.37	0.08	0.04	9	0.01	0.34	136	0.00
9	450.41	0.80	0.37	-65	0.08	2.17	34	0.00
10	500.46	0.11	0.05	144	0.01	0.20	-149	0.00
11	550.51	2.06	0.95	-123	0.17	4.68	-34	0.00
12	600.55	0.05	0.02	-178	0.00	0.02	-143	0.00
13	650.60	1.11	0.51	-68	0.07	1.84	23	0.00
14	700.64	0.03	0.01	-129	0.00	0.05	-37	0.00
15	750.69	0.47	0.22	48	0.03	0.90	139	0.00
16	800.74	0.14	0.06	-28	0.00	0.14	70	0.00
17	850.78	0.88	0.40	-18	0.05	1.26	76	0.00
18	900.83	0.06	0.03	-33	0.00	0.07	68	0.00
19	950.87	0.30	0.14	-83	0.02	0.53	4	0.00
20	1000.92	0.11	0.05	-32	0.01	0.15	38	0.00
21	1050.97	0.75	0.34	-132	0.03	0.82	-45	0.00
22	1101.01	0.17	0.08	58	0.01	0.17	121	0.00
23	1151.06	1.03	0.47	148	0.04	1.11	-124	0.00
24	1201.10	0.08	0.04	65	0.00	0.05	149	0.00
25	1251.15	0.45	0.21	-160	0.02	0.46	-82	0.00
26	1301.20	0.03	0.01	18	0.00	0.02	-167	0.00
27	1351.24	0.48	0.22	-33	0.02	0.48	53	0.00
28	1401.29	0.11	0.05	-136	0.00	0.09	-15	0.00
29	1451.33	0.86	0.40	-105	0.03	0.73	-18	0.00
30	1501.38	0.05	0.02	-161	0.00	0.03	-71	0.00
31	1551.43	0.47	0.22	-121	0.02	0.44	-38	0.00

รูปที่ข-18 หลังต่อตัวกรอง-DC Drive-T

Single Phase Readings - 04/04/02 15:41:38

Summary Information

		Voltage		Current		Record Information		
						Max	Average	Min
Frequency	50.00	RMS	206.0	4.45	V RMS			
Power (1 Phase)		Peak	320.4	6.64	A RMS			
KW	0.79	DC Offset	0.0	-0.03	V Peak			
KVA	0.92	Crest	1.55	1.49	A Peak			
KVAR	0.46	THD Rms	6.25	12.87	V THD-R%			
Peak KW	1.76	THD Fund	6.27	12.98	A THD-R%			
Phase	30 lag	HRMS	12.9	0.57	KWatts			
Total PF	0.86	KFactor		1.55	KVA			
DPF	0.86				TPF			
					DPF			
					Frequency			

Harmonic Information

DC	1 Phase				1 Phase			1 Phase	
	Freq.	V Mag	%V RMS	V.ร	I Mag	%I RMS	I.ร	Power (KW)	
DC	0.00	0.03	0.02	0	0.04	0.79	0	0.00	
1	50.00	205.63	99.81	0	4.42	99.18	-30	0.78	
2	100.01	0.03	0.02	-133	0.00	0.10	98	0.00	
3	150.01	4.25	2.06	126	0.15	3.44	-105	0.00	
4	200.02	0.06	0.03	-23	0.00	0.06	36	0.00	
5	250.02	7.92	3.85	15	0.48	10.72	110	0.00	
6	300.03	0.06	0.03	16	0.00	0.03	32	0.00	
7	350.03	6.34	3.08	143	0.25	5.68	-114	0.00	
8	400.04	0.13	0.06	152	0.00	0.07	-171	0.00	
9	450.04	0.94	0.46	-124	0.03	0.73	18	0.00	
10	500.05	0.06	0.03	119	0.00	0.06	175	0.00	
11	550.05	4.05	1.96	-179	0.08	1.70	-90	0.00	
12	600.06	0.08	0.04	153	0.00	0.03	155	0.00	
13	650.06	3.61	1.75	-112	0.07	1.54	-25	0.00	
14	700.06	0.05	0.02	-141	0.00	0.01	-51	0.00	
15	750.07	1.08	0.52	6	0.01	0.34	117	0.00	
16	800.07	0.03	0.02	114	0.00	0.03	-74	0.00	
17	850.08	2.58	1.25	-69	0.03	0.70	39	0.00	
18	900.08	0.02	0.01	-151	0.00	0.03	-86	0.00	
19	950.09	1.83	0.89	-33	0.02	0.43	63	0.00	
20	1000.09	0.03	0.02	-28	0.00	0.01	52	0.00	
21	1050.10	0.61	0.30	91	0.00	0.06	150	0.00	
22	1100.10	0.05	0.02	-38	0.00	0.04	56	0.00	
23	1150.11	1.14	0.55	66	0.01	0.18	149	0.00	
24	1200.11	0.03	0.02	-101	0.00	0.03	-30	0.00	
25	1250.11	0.97	0.47	89	0.01	0.28	180	0.00	
26	1300.12	0.03	0.02	92	0.00	0.01	-84	0.00	
27	1350.12	0.39	0.19	-128	0.00	0.08	-106	0.00	
28	1400.13	0.03	0.02	84	0.00	0.03	165	0.00	
29	1450.13	0.52	0.25	-146	0.00	0.11	0	0.00	
30	1500.14	0.02	0.01	41	0.00	0.03	96	0.00	
31	1550.14	0.53	0.26	-145	0.00	0.11	-18	0.00	

รูปที่ข-19 ก่อนต่อตัวกรอง-AC Drive-R

Single Phase Readings - 04/04/02 15:42:22

Summary Information

		Voltage	Current
Frequency	50.05	RMS 204.4	4.39
Power (1 Phase)		Peak 316.5	6.94
KW	0.75	DC Offset -0.1	-0.04
KVA	0.90	Crest 1.55	1.58
KVAR	0.47	THD Rms 6.57	13.12
Peak KW	1.56	THD Fund 6.59	13.23
Phase	32.5 lag	HRMS 13.4	0.58
Total PF	0.84	KFactor	1.56
DPF	0.84		

Record Information

	Max	Average	Min
V RMS			
A RMS			
V Peak			
A Peak			
V THD-R%			
A THD-R%			
KWatts			
KVA			
TPF			
DPF			
Frequency			

Harmonic Information

	1 Phase			1 Phase			1 Phase	
	Freq.	V Mag	%V RMS	V, ฐ	I Mag	%I RMS	I, ฐ	Power (KW)
DC	0.00	0.06	0.03	0	0.04	0.86	0	0.00
1	50.05	203.86	99.73	0	4.35	99.10	-32	0.75
2	100.09	0.08	0.04	-112	0.00	0.10	106	0.00
3	150.14	1.20	0.59	150	0.13	2.99	-12	0.00
4	200.18	0.11	0.05	-61	0.00	0.04	-65	0.00
5	250.23	9.05	4.43	24	0.50	11.39	118	0.00
6	300.28	0.03	0.02	-70	0.00	0.10	-103	0.00
7	350.32	6.56	3.21	142	0.22	5.10	-116	0.00
8	400.37	0.05	0.02	-133	0.00	0.04	22	0.00
9	450.41	1.02	0.50	123	0.01	0.20	157	0.00
10	500.46	0.03	0.02	80	0.00	0.04	106	0.00
11	550.51	4.84	2.37	-178	0.09	2.08	-83	0.00
12	600.55	0.03	0.02	-10	0.00	0.03	-108	0.00
13	650.60	3.34	1.64	-117	0.06	1.31	-28	0.00
14	700.64	0.02	0.01	-12	0.00	0.03	-72	0.00
15	750.69	1.08	0.53	-151	0.01	0.33	-72	0.00
16	800.74	0.02	0.01	108	0.00	0.04	49	0.00
17	850.78	3.05	1.49	-65	0.03	0.77	31	0.00
18	900.83	0.02	0.01	124	0.00	0.01	129	0.00
19	950.87	2.08	1.02	-41	0.02	0.43	40	0.00
20	1000.92	0.03	0.02	-120	0.00	0.04	126	0.00
21	1050.97	0.58	0.28	-72	0.01	0.20	-4	0.00
22	1101.01	0.03	0.02	-83	0.00	0.01	-162	0.00
23	1151.06	1.31	0.64	66	0.01	0.29	155	0.00
24	1201.10	0.00	0.00	26	0.00	0.03	-15	0.00
25	1251.15	0.95	0.47	79	0.01	0.20	-172	0.00
26	1301.20	0.02	0.01	-136	0.00	0.00	77	0.00
27	1351.24	0.39	0.19	72	0.01	0.14	155	0.00
28	1401.29	0.00	0.00	-143	0.00	0.06	-115	0.00
29	1451.33	0.41	0.20	-154	0.00	0.07	28	0.00
30	1501.38	0.05	0.02	92	0.00	0.01	-180	0.00
31	1551.43	0.52	0.25	-133	0.01	0.14	-36	0.00

รูปที่ข-20 ก่อนต่อตัวกรอง-AC Drive-S

Single Phase Readings - 04/04/02 15:42:49

Summary Information

		Voltage	Current
Frequency	50.05	RMS 205.5	4.19
Power (1 Phase)		Peak 322.6	6.46
KW	0.70	DC Offset -0.2	-0.03
KVA	0.86	Crest 1.57	1.54
KVAR	0.47	THD Rms 6.74	12.76
Peak KW	1.52	THD Fund 6.76	12.87
Phase	34.5 lag	HRMS 13.8	0.53
Total PF	0.82	KFactor	1.55
DPF	0.83		

Record Information

	Max	Average	Min
V RMS			
A RMS			
V Peak			
A Peak			
V THD-R%			
A THD-R%			
KWatts			
KVA			
TPF			
DPF			
Frequency			

Harmonic Information

	Freq.	V Mag	%V RMS	V _{rms}	I Mag	%I RMS	I _{rms}	Power (KW)
DC	0.00	0.16	0.08	0	0.03	0.81	0	0.00
1	50.05	204.88	99.71	0	4.15	99.13	-34	0.71
2	100.09	0.16	0.08	-116	0.00	0.12	37	0.00
3	150.14	3.70	1.80	142	0.14	3.26	-78	0.00
4	200.18	0.09	0.05	-49	0.00	0.03	132	0.00
5	250.23	9.30	4.52	22	0.45	10.87	119	0.00
6	300.28	0.09	0.05	58	0.00	0.01	-78	0.00
7	350.32	6.52	3.17	149	0.21	5.11	-111	0.00
8	400.37	0.03	0.02	-40	0.00	0.04	126	0.00
9	450.41	0.47	0.23	-160	0.01	0.24	46	0.00
10	500.46	0.09	0.05	176	0.00	0.06	-110	0.00
11	550.51	4.77	2.32	-169	0.09	2.23	-69	0.00
12	600.55	0.03	0.02	127	0.00	0.01	-68	0.00
13	650.60	2.88	1.40	-109	0.05	1.11	-22	0.00
14	700.64	0.11	0.05	130	0.00	0.03	-145	0.00
15	750.69	0.38	0.18	-3	0.01	0.22	150	0.00
16	800.74	0.13	0.06	-110	0.00	0.01	-22	0.00
17	850.78	3.66	1.78	-55	0.04	1.08	41	0.00
18	900.83	0.09	0.05	-143	0.00	0.03	-42	0.00
19	950.87	1.06	0.52	-20	0.01	0.27	59	0.00
20	1000.92	0.02	0.01	180	0.00	0.01	65	0.00
21	1050.97	0.39	0.19	111	0.00	0.10	-134	0.00
22	1101.01	0.09	0.05	22	0.00	0.03	-51	0.00
23	1151.06	1.44	0.70	70	0.01	0.31	180	0.00
24	1201.10	0.06	0.03	-43	0.00	0.03	11	0.00
25	1251.15	0.67	0.33	89	0.01	0.15	174	0.00
26	1301.20	0.03	0.02	-104	0.00	0.03	138	0.00
27	1351.24	0.22	0.11	-130	0.00	0.04	65	0.00
28	1401.29	0.03	0.02	129	0.00	0.03	152	0.00
29	1451.33	0.75	0.37	-150	0.01	0.15	-62	0.00
30	1501.38	0.03	0.02	105	0.00	0.01	180	0.00
31	1551.43	0.27	0.13	-113	0.00	0.12	-39	0.00

รูปที่ข-21 ก่อนต่อตัวกรอง-AC Drive-T

Single Phase Readings - 04/04/02 19:07:56

Summary Information

		Voltage	Current
Frequency	49.94	RMS 215.0	3.51
Power (1 Phase)		Peak 331.1	5.96
KW	0.74	DC Offset 0.2	-0.03
KVA	0.75	Crest 1.54	1.70
KVAR	0.03	THD Rms 4.92	16.43
Peak KW	1.82	THD Fund 4.93	16.65
Phase	2 π lag	HRMS 10.6	0.58
Total PF	0.98	KFactor	1.51
DPF	1.00		

Record Information

	Max	Average	Min
V RMS			
A RMS			
V Peak			
A Peak			
V THD-R%			
A THD-R%			
KWatts			
KVA			
TPF			
DPF			
Frequency			

Harmonic Information

	Freq.	V Mag	%V RMS	1 Phase V π	I Mag	%I RMS	1 Phase I π	1 Phase Power (KW)
DC	0.00	0.19	0.09	0	0.03	0.82	0	0.00
1	49.94	214.73	99.89	0	3.46	98.63	-2	0.74
2	99.87	0.19	0.09	64	0.01	0.28	125	0.00
3	149.81	7.72	3.59	146	0.50	14.37	-118	0.00
4	199.74	0.14	0.07	129	0.01	0.21	-167	0.00
5	249.68	1.58	0.73	27	0.17	4.77	89	0.00
6	299.61	0.06	0.03	-64	0.00	0.04	144	0.00
7	349.55	4.52	2.10	-164	0.21	5.96	-65	0.00
8	399.48	0.05	0.02	-23	0.00	0.04	82	0.00
9	449.42	0.52	0.24	-14	0.01	0.23	105	0.00
10	499.36	0.00	0.00	36	0.00	0.05	178	0.00
11	549.29	2.67	1.24	-53	0.05	1.42	21	0.00
12	599.23	0.03	0.01	134	0.00	0.00	-37	0.00
13	649.16	2.38	1.10	44	0.04	1.14	147	0.00
14	699.10	0.05	0.02	166	0.00	0.07	-117	0.00
15	749.03	0.81	0.38	173	0.01	0.37	-98	0.00
16	798.97	0.03	0.01	-144	0.00	0.02	-49	0.00
17	848.90	1.97	0.92	103	0.03	0.84	-161	0.00
18	898.84	0.03	0.01	39	0.00	0.04	58	0.00
19	948.77	2.27	1.05	-147	0.03	0.73	-60	0.00
20	998.71	0.05	0.02	-129	0.00	0.02	180	0.00
21	1048.65	1.03	0.48	-36	0.01	0.30	82	0.00
22	1098.58	0.06	0.03	15	0.00	0.02	13	0.00
23	1148.52	1.41	0.65	-115	0.01	0.28	-26	0.00
24	1198.45	0.03	0.01	-141	0.00	0.02	-123	0.00
25	1248.39	1.48	0.69	8	0.02	0.48	105	0.00
26	1298.32	0.05	0.02	57	0.00	0.04	110	0.00
27	1348.26	0.64	0.30	110	0.00	0.12	180	0.00
28	1398.19	0.03	0.01	-173	0.00	0.00	136	0.00
29	1448.13	0.53	0.25	20	0.01	0.16	98	0.00
30	1498.07	0.06	0.03	-69	0.00	0.02	167	0.00
31	1548.00	0.91	0.42	164	0.00	0.05	-146	0.00

รูปที่ข-22 หลังต่อตัวกรอง-AC Drive-R

Single Phase Readings - 04/04/02 19:08:18

Summary Information

		Voltage		Current		Record Information		
						Max	Average	Min
Frequency	49.94	RMS	214.4	3.71	V RMS			
Power (1 Phase)		Peak	331.7	5.84	A RMS			
KW	0.78	DC Offset	0.2	-0.03	V Peak			
KVA	0.79	Crest	1.55	1.58	A Peak			
KVAR	0.09	THD Rms	4.62	13.11	V THD-R%			
Peak KW	1.80	THD Fund	4.63	13.22	A THD-R%			
Phase	6.5 lag	HRMS	9.9	0.49	KWatts			
Total PF	0.99	KFactor		1.41	KVA			
DPF	0.99				TPF			
					DPF			
					Frequency			

Harmonic Information

	Freq.	V Mag	%V RMS	1 Phase V _{LL}	I Mag	%I RMS	1 Phase I _{LL}	1 Phase Power (KW)
DC	0.00	0.16	0.07	0	0.03	0.76	0	0.00
1	49.94	214.08	99.87	0	3.67	99.13	-6	0.78
2	99.89	0.25	0.12	76	0.01	0.35	135	0.00
3	149.83	6.17	2.88	173	0.38	10.27	-91	0.00
4	199.77	0.08	0.04	152	0.00	0.02	0	0.00
5	249.71	1.88	0.87	37	0.20	5.53	105	0.00
6	299.66	0.00	0.00	109	0.00	0.02	-70	0.00
7	349.60	5.03	2.35	-164	0.21	5.55	-55	0.00
8	399.54	0.03	0.01	-32	0.00	0.05	70	0.00
9	449.48	0.25	0.12	-30	0.01	0.20	-120	0.00
10	499.43	0.03	0.01	76	0.00	0.02	40	0.00
11	549.37	2.86	1.33	-54	0.05	1.42	27	0.00
12	599.31	0.03	0.01	-47	0.00	0.05	22	0.00
13	649.26	2.31	1.08	42	0.03	0.88	148	0.00
14	699.20	0.05	0.02	120	0.00	0.05	-94	0.00
15	749.14	0.30	0.14	107	0.00	0.13	-129	0.00
16	799.08	0.03	0.01	-74	0.00	0.03	76	0.00
17	849.03	2.44	1.14	109	0.04	0.98	-161	0.00
18	898.97	0.05	0.02	48	0.00	0.03	0	0.00
19	948.91	2.14	1.00	-147	0.02	0.61	-60	0.00
20	998.85	0.08	0.04	-103	0.00	0.03	-63	0.00
21	1048.80	0.19	0.09	-117	0.00	0.10	-158	0.00
22	1098.74	0.06	0.03	56	0.00	0.03	-165	0.00
23	1148.68	1.81	0.85	-104	0.02	0.44	-4	0.00
24	1198.63	0.02	0.01	41	0.00	0.00	-14	0.00
25	1248.57	1.34	0.63	6	0.01	0.34	105	0.00
26	1298.51	0.06	0.03	78	0.00	0.02	137	0.00
27	1348.45	0.06	0.03	98	0.00	0.07	56	0.00
28	1398.40	0.03	0.01	-92	0.00	0.02	-117	0.00
29	1448.34	1.00	0.47	48	0.01	0.20	129	0.00
30	1498.28	0.03	0.01	79	0.00	0.03	158	0.00
31	1548.22	0.81	0.38	173	0.00	0.05	-121	0.00

รูปที่ข-23 หลังต่อตัวกรอง-AC Drive-S

Single Phase Readings - 04/04/02 19:09:03

Summary Information

		Voltage	Current
Frequency	49.99	RMS 214.8	3.33
Power (1 Phase)		Peak 330.0	5.13
KW	0.70	DC Offset 0.1	-0.03
KVA	0.72	Crest 1.54	1.54
KVAR	0.09	THD Rms 4.44	13.01
Peak KW	1.57	THD Fund 4.44	13.12
Phase	7.5 lag	HRMS 9.5	0.43
Total PF	0.98	KFactor	1.45
DPF	0.99		

Record Information

	Max	Average	Min
V RMS			
A RMS			
V Peak			
A Peak			
V THD-R%			
A THD-R%			
KWatts			
KVA			
TPF			
DPF			
Frequency			

Harmonic Information

	Freq.	V Mag	%V RMS	1 Phase V.ร	I Mag	%I RMS	1 Phase I.ร	1 Phase Power (KW)
DC	0.00	0.06	0.03	0	0.03	0.94	0	0.00
1	49.99	214.58	99.89	0	3.30	99.14	-7	0.70
2	99.98	0.06	0.03	92	0.01	0.28	165	0.00
3	149.97	5.69	2.65	-180	0.33	9.83	-73	0.00
4	199.96	0.03	0.01	94	0.00	0.04	-114	0.00
5	249.95	1.72	0.80	45	0.19	5.79	109	0.00
6	299.94	0.02	0.01	89	0.00	0.06	-22	0.00
7	349.94	4.42	2.06	-158	0.19	5.74	-56	0.00
8	399.93	0.05	0.02	-59	0.00	0.02	86	0.00
9	449.92	0.70	0.33	180	0.02	0.56	-91	0.00
10	499.91	0.05	0.02	9	0.00	0.02	-93	0.00
11	549.90	3.34	1.56	-40	0.06	1.73	42	0.00
12	599.89	0.03	0.01	70	0.00	0.02	-20	0.00
13	649.88	1.67	0.78	62	0.02	0.73	172	0.00
14	699.87	0.05	0.02	174	0.00	0.04	-75	0.00
15	749.86	1.02	0.47	13	0.01	0.38	115	0.00
16	799.85	0.03	0.01	-69	0.00	0.06	-3	0.00
17	849.84	3.08	1.43	129	0.04	1.14	-135	0.00
18	899.83	0.05	0.02	130	0.00	0.04	-61	0.00
19	949.82	1.39	0.65	-124	0.01	0.36	-30	0.00
20	999.82	0.08	0.04	-51	0.00	0.04	-72	0.00
21	1049.81	1.13	0.52	178	0.01	0.36	-115	0.00
22	1099.80	0.03	0.01	65	0.00	0.04	-46	0.00
23	1149.79	2.33	1.08	-77	0.02	0.62	21	0.00
24	1199.78	0.02	0.01	-44	0.00	0.02	-136	0.00
25	1249.77	0.63	0.29	54	0.01	0.23	139	0.00
26	1299.76	0.03	0.01	92	0.00	0.04	176	0.00
27	1349.75	0.80	0.37	-25	0.01	0.21	79	0.00
28	1399.74	0.05	0.02	180	0.00	0.06	144	0.00
29	1449.73	1.14	0.53	82	0.01	0.26	163	0.00
30	1499.72	0.03	0.01	169	0.00	0.04	-100	0.00
31	1549.71	0.34	0.16	-140	0.00	0.06	34	0.00

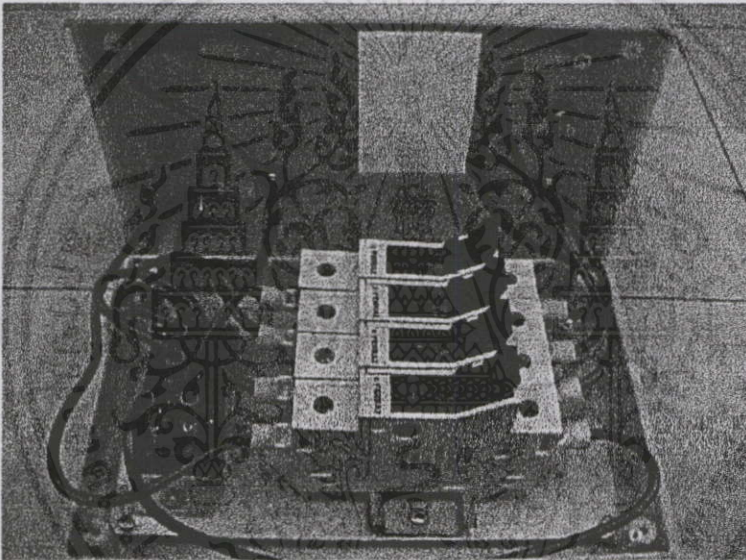
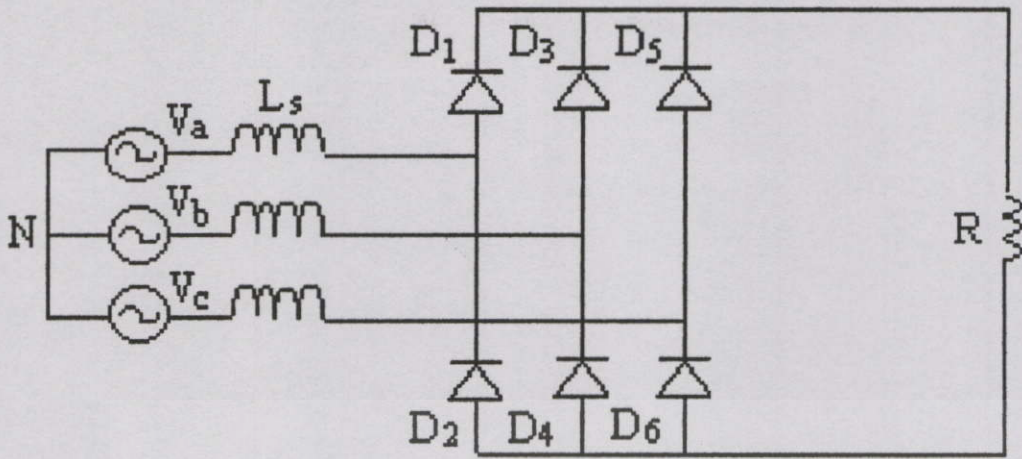
รูปที่ข-24 หลังต่อตัวกรอง-AC Drive-T

ภาคผนวก ก.

แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์

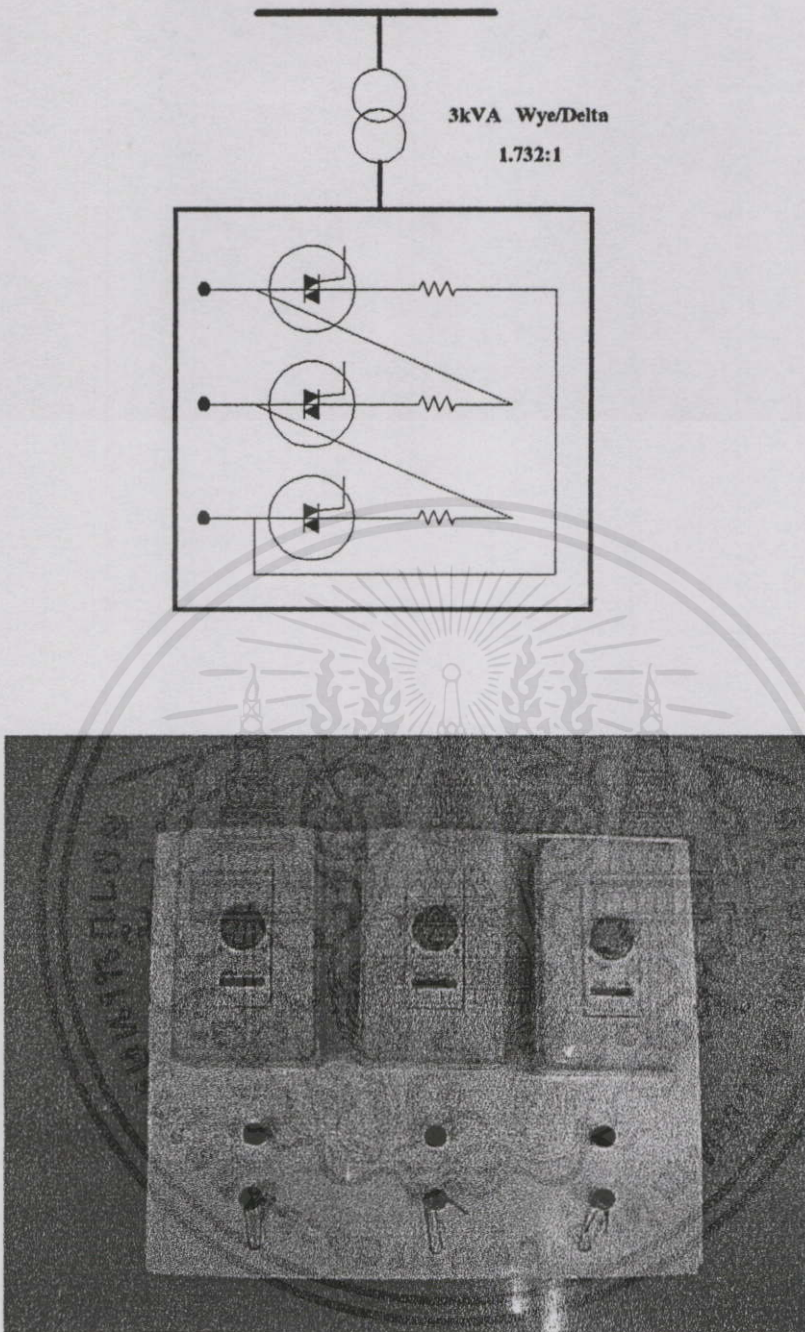


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-1 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ชนิด 3 Phase Diode Rectifier without Capacitor แรงดันอินพุต 380 V_{L-L} พิกัดกำลังทางด้านอินพุต 3kVA

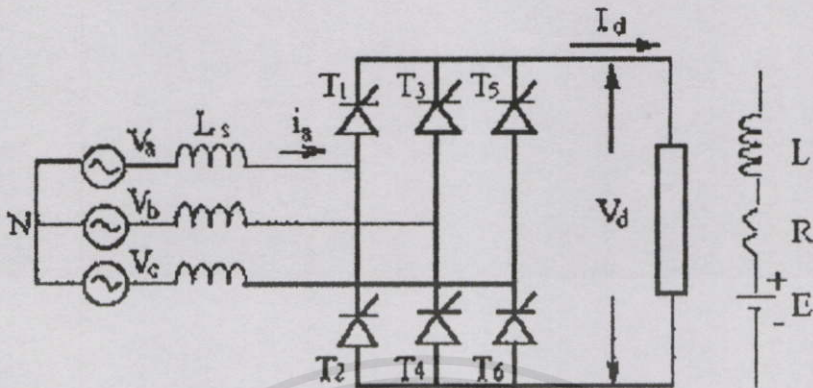
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-2 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ชนิด 3 Phase AC Voltage Controller (Phase Control) แรงดันอินพุต $220 V_{L-L}$ ต่อร่วมกันเป็นแบบเดลต้า, จ่ายกำลังงานจากระบบผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟส แบบ วาย/เดลต้า พิกัดกำลังทางด้านอินพุต 3kVA

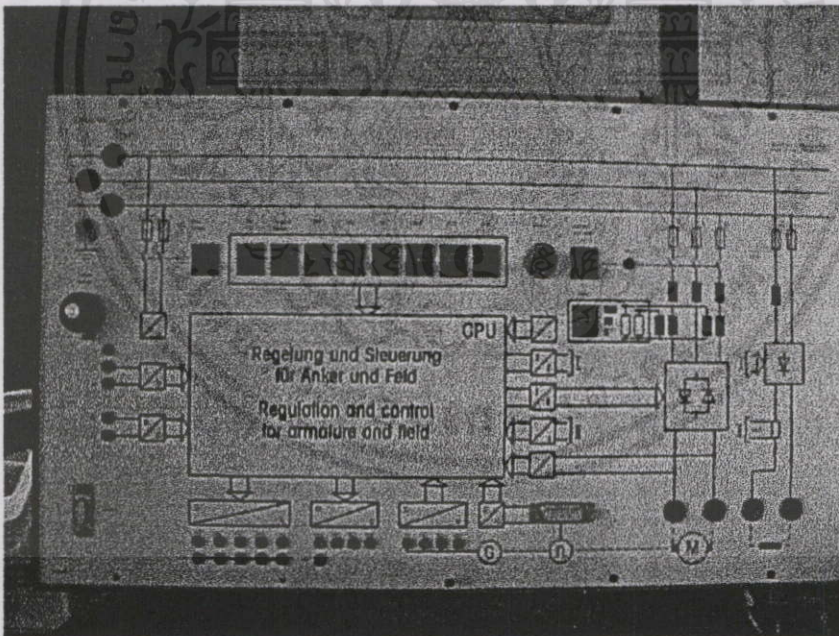
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Line Commutated Converters

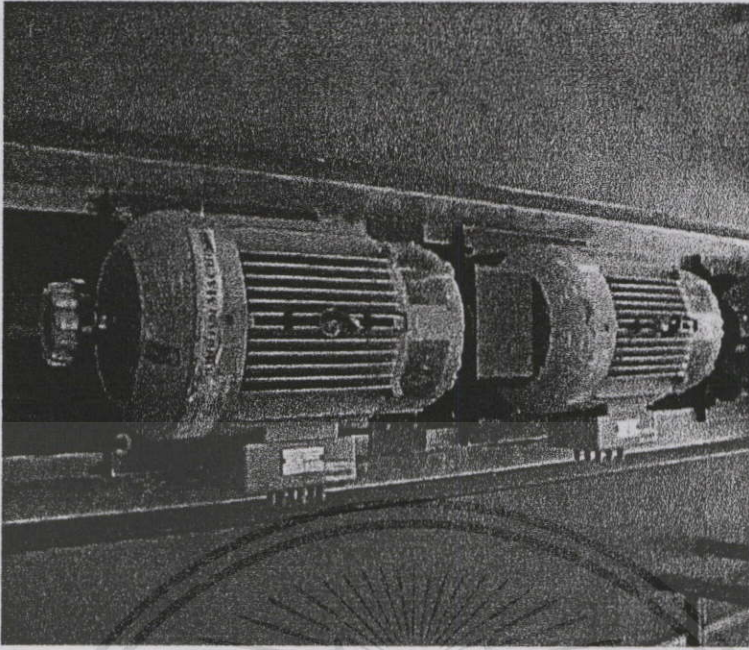


$$i_a(t) = \sum_h \frac{I_1}{h} \sin(h\omega_1 t + \delta_h)$$

Characteristic harmonics: $h = pn \pm 1$



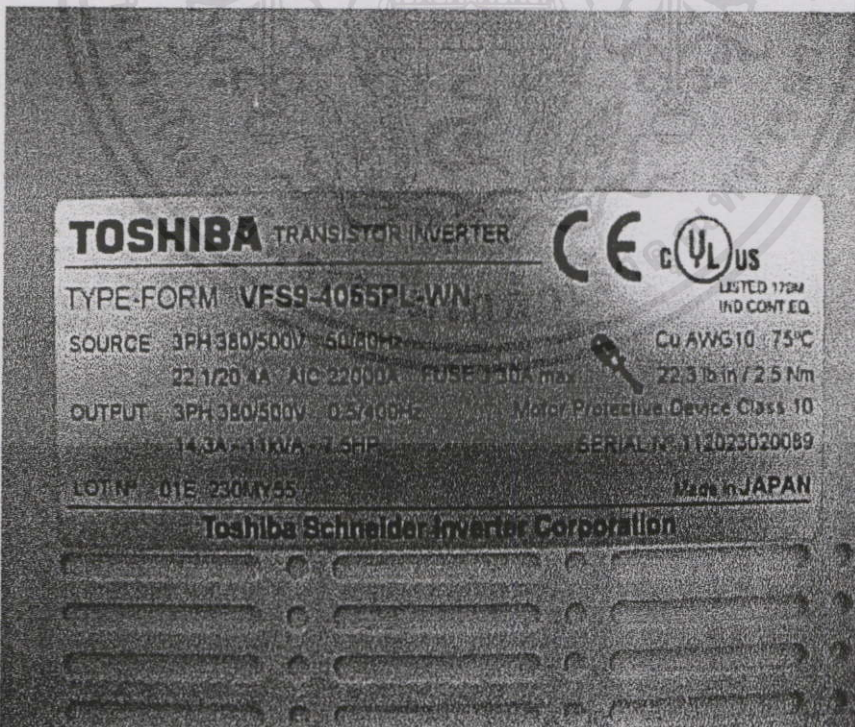
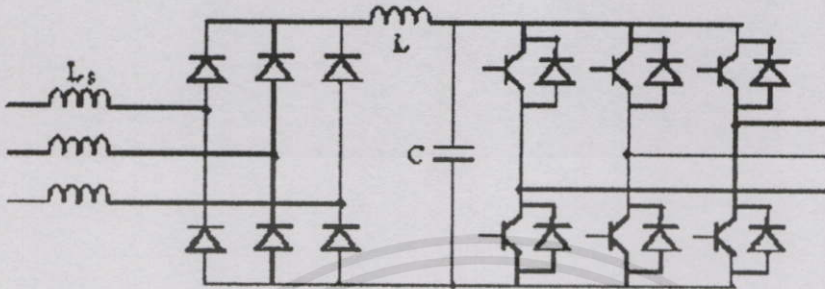
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-3 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ชนิด 3 Phase DC Motor Control (3 Phase Full Controlled)
 แรงดันอินพุท 380 V_{L-L} ต่อควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบแยกขดลวดกระตุ้นขนาดพิกัดกำลัง
 5kW และขับโหลดเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะวิธีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

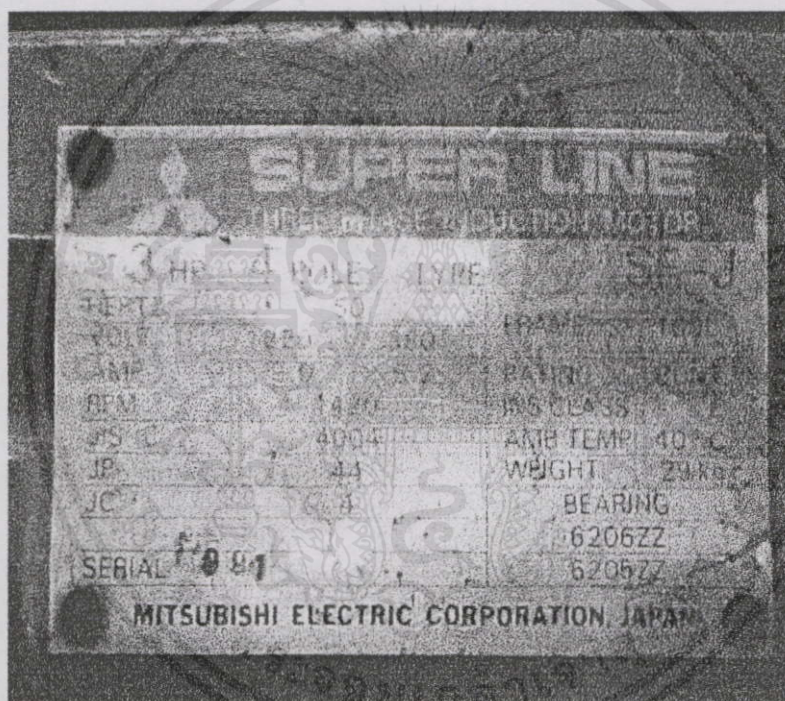
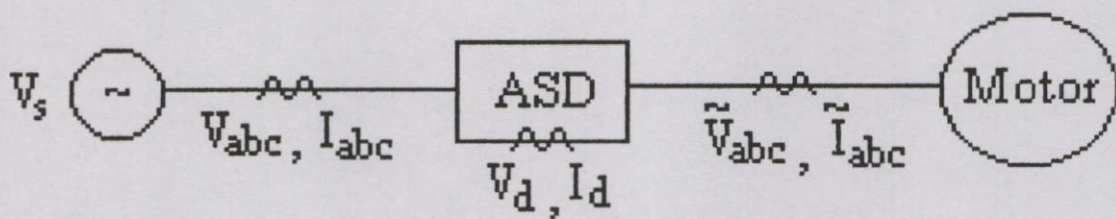
Pulse-Width Modulated Converters



เอกสารนี้

โซฟิต้านการถ้ำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งกการนำไปใช้



รูปที่ ก-4 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกชนิด 3 Phase AC Motor Control (3 Phase Pulse Width Modulated Control) แรงดันอินพุต 380 V_{L-L} ขนาด 11kVA ต่อควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับพิกัดกำลัง 3Hp 4 pole แบบวาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

ตัวอย่างที่มาข้อมูลที่ป้อนให้กับแบบจำลองใน PSPICE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-1 ตารางการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์กระแสฮาร์มอนิกส์, ค่าอิมพีแดนซ์โหลดแบบเชิงเส้น และค่าอัตราส่วน ISC/IL จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ 1.1 (หัวข้อ 7.2.1)

3 Phase Rectifier Load (ค่าที่วัดได้เป็นลบ/ลบ)

Parameter	จุด A (System)(R)	จุด B (PCC)(R)	จุด B, 3ฟาส์ (R)	จุด C (Linear)(T)	จุด D (Non-Linear)(R)	จุด D, 3ฟาส์ (R)
kW	0.74	0.76	2.22	0.33	0.54	1.62
kVA	0.99	0.96	2.88	0.45	1.03	3.09
kVAR	0.635	0.57	1.71	0.3	0.02	0.06
PF	0.74	0.78		0.73	0.52	
DPF	0.76	0.79		0.73	1	
V	220	206		206	220.7	
V1	219.9	204		204.6	220.58	
Phase V1	0	0		0	0	
I	2.86	3.38		2.05	4.68	
I1	4.42	4.58		2.2	2.42	
Phase I1	-48	-25.84		-79	-2	
%THDv	1.19	11.85		11.77	1.17	
%THDi	21.1	21.06		7.78	164.68	
V5	0.48	18.18		17.54	2.83	
	61	53		41	42	
V7	1.46	6.76		7.09	2.05	
	-20	6		-1	0	
V11	0.29	7.92		7.56	0.5	
	-174	169		161	162	
V13	0.53	5.18		5.59	0.94	
	-139	148		139	140	
V17	0.27	5.9		5.28	0.56	
	-173	-79		-91	-91	
V19	0.23	3.78		4.2	0.58	
	-127	-82		97	-95	
I5	0.83	0.88		0.12	2.24	
	134	144		-42	138	
%I5					48.30	
I7	0.25	0.25		0.03	1.92	
	93	103			107	
%I7					42.41	
I11	1.5	0.16		0.04	1.66	
	-118	-98			-110	
%I11					35.47	
I13	0.1	0.09		0.03	0.01	
	-136	-116			-124	
%I13					27.50	
I17	0.07	0.07		0.03	0.89	
	-10	18			-4	
%I17					19.01	
I19	0.05	0.05		0.23	0.56	
	-18	13			-9	
%I19					11.99	
Lsys-2(mH)		16				
XLsys-2		5.024				
Isc		44				
kVAsc		29				
Zlinear		93				
DPF(Linear)	0.191495104					
Rlinear	17.80904468					
XL(linear)	91.27890188					
L(linear) mH	290.6971397					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สถาน วิทยาลัยการช่างานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่สามารถทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2-2 ตารางการคำนวณค่ากระแสสารนิเทศ, ค่าอิมพีแดนซ์โหลดแบบเชิงเส้น ที่ค่าเบรชี่เซนส์โหลดต่างๆเพื่อนำไปวิเคราะห์ใน PSPICE และนำมาพล็อตกราฟเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์โหลดที่เหมาะสมในการสร้างระบบจำลอง (หัวข้อ 7.3.3)

การวิเคราะห์ระบบที่ 2 (Case 2) กรณีที่ค่า IL หรือค่าที่ติดของ (กรณี THM เป็น TRM)

New Loaders Load as Ideal Di Drive 600 Watt without 5th and 7th Harmonic Filter

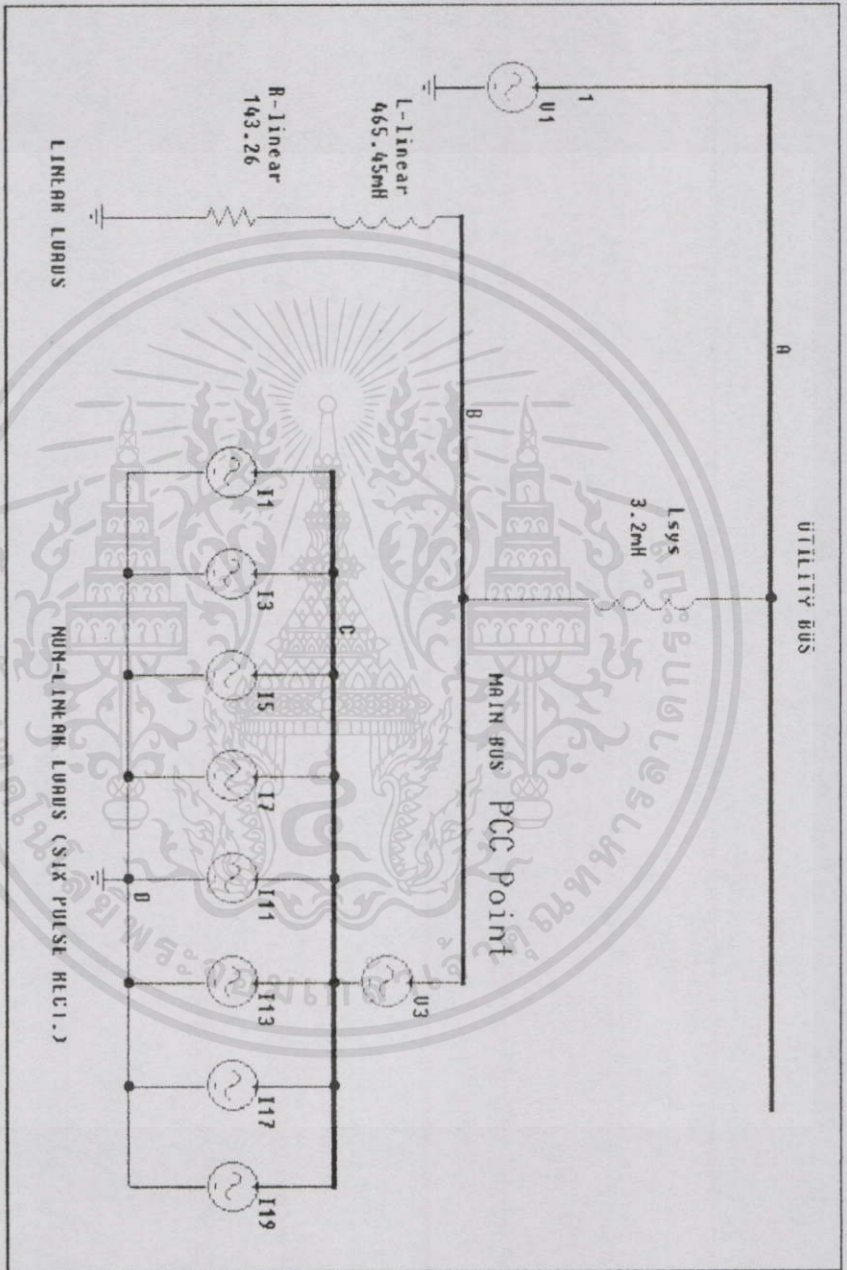
%	Candifiers										Calc. All Harmonic Source										Total Value at PCC Bus				
	IL	ISECFL	Legnth	ICdcm0	ILinesd0	DPS-IL	V.ลบ.4%	BSL	L-Load	L-Load	DPS-Load	%I5	I5	%I7	I7	%I11	I11	%I13	I13	%I17	I17	%I19	I19	%THD	%THDV
10%	4.3	10	3	0.84	0.00	0.10	220	0	9	4.30	1	21.82	0.94	10.53	0.45	2.51	0.87	6.13	0.26	5.23	0.23	4.13	0.12	74.02	45.17
75%	4.3	10	3	0.84	1.02	0.10	220	143.26	465.45	3.23	1	21.82	0.71	10.53	0.34	2.51	0.22	6.13	0.20	5.23	0.17	4.13	0.13	4.01	2.25
50%	4.3	10	3	0.84	2.15	0.10	220	11.63	232.72	2.15	1	21.82	0.47	10.53	0.22	2.51	0.18	6.13	0.13	5.23	0.11	4.13	0.09	13.90	9.99
25%	4.3	10	3	0.84	3.23	0.10	220	47.75	155.15	1.22	1	21.82	0.24	10.53	0.11	2.51	0.09	6.13	0.07	5.23	0.06	4.13	0.04	2.69	0.77
10%	4.3	10	3	0.84	3.27	0.10	220	39.76	120.20	0.43	1	21.82	0.09	10.53	0.05	2.51	0.04	6.13	0.03	5.23	0.02	4.13	0.02	0.83	0.23

ชดเชย	%THDI	ฟิวเจอร์	%ชด	%TDDI	ขนาด	ชด	%THDV
100	27.02	6.079	100	27.01	4.30	100	4.21
75	21.33	5.78	75	20.21	4.07	75	3.15
50	14.25	5.64	50	13.22	3.99	50	2.04
25	7.00	5.72	25	8.59	4.05	25	1.00
10	2.57	5.88	10	2.50	4.14	10	0.39

THD	I	THSDI
2.69	2.47	1.00714

%I3	I3
1.01	0.04
1.01	0.03
1.01	0.02
1.01	0.01
1.01	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา



รูปที่ ง-1 แบบจำลองของระบบใน PSpice ที่ใช้เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์โวลต์ที่หมดสภาพในการสร้างระบบจำลองกรณีเปอร์เซ็นต์โวลต์แบบไม่เป็นเชิงเส้นเท่ากับ 75% (หัวข้อ 7.3.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-3 ตารางการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์กระแสฮาร์โมนิกส์, ค่าอิมพีแดนซ์โหลดแบบเชิงเส้น และค่าอัตราส่วน ISC/IL จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ 2.1 (หัวข้อ 7.4.1)

Six Pulse Rectifier Load (ค่าที่วัดได้เป็นค่า/ผล)

Parameter	จุด A (System) (R)	จุด B (PCC) (R)	จุด D, 3 เฟส (R)	จุด C (Linear) (T)	จุด D (01 or Linear) (R)	จุด D, 3 เฟส (R)
kW	0.8	0.81	2.43	0.38	0.45	1.35
kVA	1	0.89	2.67	0.51	0.47	1.41
kVAR	0.6	0.36	1.08	0.35	0	0
PF	0.79	0.91		0.74	0.96	
DPF	0.8	0.91		0.73	1	
V	219.7	216.8		217.6	217.8	
V1	219.67	216.67		217.53	217.7	
Phase V1	0	0		0	0	
I	4.57	4.11		2.34	2.16	
I1	4.49	4.07		2.34	2.08	
Phase I1	-37	-24		-43	0	
%THDv	1.71	3.13		3.09	3.18	
%THDi	18.63	14.11		4.18	23.29	
V5	3.64	4.64		4.52	4.75	
	93	174		176	96	
V7	0.59	2.61		2.66	2.66	
	32	-51		-50	-61	
V11	0.08	2.05		2.02	2.11	
	33	-98		-98	-135	
V13	0.06	1.36		1.38	1.39	
	-22	-51		-53	28	
V17	0.11	1.91		1.84	1.84	
	-71	9		6	-28	
V19	0.08	1.27		1.31	1.41	
	82	-117		-112	154	
I3	0.05	0.08		0.08	0.03	
	-119	-35		-60	178	
%I3					1.48	
I5	0.6	0.47		0.02	0.43	
	-169	-85		-103	-162	
%I5					22.47	
I7	0.42	0.19		0.03	0.2	
	15	8		-49	24	
%I7					9.50	
I11	0.26	0.18		0.01	0.17	
	-56	-11		-110	-42	
%I11					8.05	
I13	0.19	0.11		0.01	0.12	
	110	39		-89	125	
%I13					5.41	
I17	0.15	0.1		0.01	0.1	
	47	89		-169	67	
%I17					4.46	
I19	0.09	0.07		0.01	0.07	
	-134	-27		-90	-110	
%I19					3.21	
L _{ry-2} (mH)	3.2					
XL _{ry-2}	1.0048					
I _{sc}	219					
kVA _{sc}	145					
Z _{base}	92.96153846					
DPF(Linear)	0.731613127					
R _{base}	68.01188182					
XL(Linear)	63.27374507					
L(Linear) mH	201.8272136					

นี่เป็นเอกสารที่ให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งหากมีการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3-4 ตารางการคำนวณค่าอัตราส่วนการเบี่ยงกระแสฮาร์โมนิกสู่ระบบตามมาตรฐาน [H_{spec} (dB)] จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ 2.1 (หัวข้อ 7.4.1) เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบตัววิธีการวิเคราะห์ที่ทราบเพื่อฟังก์ชันของระบบ (หัวข้อ 7.4.1.2)

ตารางที่ใช้ในการออกแบบตัวกรองฮาร์โมนิกโดยใช้วิธี Transfer Function

Current Demand at PCC (Amp), I _L		2.08						
Current Demand at Harmonic Source (Amp)		2.08						
Harmonic-order		5th	7th	11th	13th	17th	19th	
IEEE limit (in % of I _L) (กรณี I _{sc} /I _L = 50-100)		10	10	4.5	4.5	4	4	
RMS. Harmonic Current at Harmonic Source (Amp.)		0.48	0.20	0.17	0.12	0.10	0.07	
RMS. Harmonic Current at Harmonic Source (in % of I _L)		11.79	4.91	4.18	2.95	2.46	1.72	
H _{spec}		0.85	2.04	1.08	1.53	1.63	2.33	
H _{spec} (dB)		-1.43	6.17	0.65	3.67	4.23	7.33	

ตารางที่ ๕-๕ ตารางการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกที่ค่า DPF ต่างๆ ในกรณีใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ ๓ โดยค่าที่ได้จะนำไปพล็อตกราฟอัตราส่วนการแบ่งกระแสฮาร์มอนิกที่ผู้ระบบจริงใน PSPACE [H_{add} (dB)] ในขั้นตอนของการออกแบบ (หัวข้อ 7.4.1.2)

Single Tuned Shunt Filter 5th only

V1	I1	DPF	PF-NEW	angle	P1	S1	Q1	Shw	Qshw	Tune-order	Q-factor	OC	Xc	Xc new	Cap(uF)	XL	L(μH)	R	C ฟังก์ชัน	L ฟังก์ชัน	Order ฟังก์ชัน
218.07	4.07	0.91	1.00	-24.00	802.48	881.85	354.51	802.48	0.00	4.00	15.00	354.51	-138.64	126.84	23.31	5.88	18.12	1.00	26.00	17.00	4.75

Single Tuned Shunt Filter 5th only

V1	I1	DPF	PF-NEW	angle	P1	S1	Q1	Shw	Qshw	Tune-order	Q-factor	OC	Xc	Xc new	Cap(uF)	XL	L(μH)	R	C ฟังก์ชัน	L ฟังก์ชัน	Order ฟังก์ชัน
218.07	4.07	0.91	0.96	-24.00	802.48	881.85	354.51	844.72	-283.78	4.00	55.00	34.75	-517.03	517.03	8.46	21.53	88.58	1.00	6.00	10.00	4.91

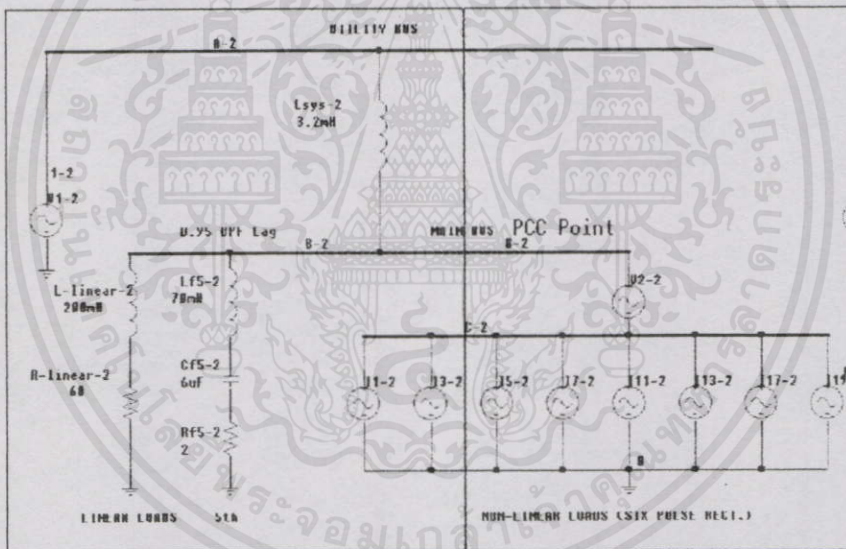
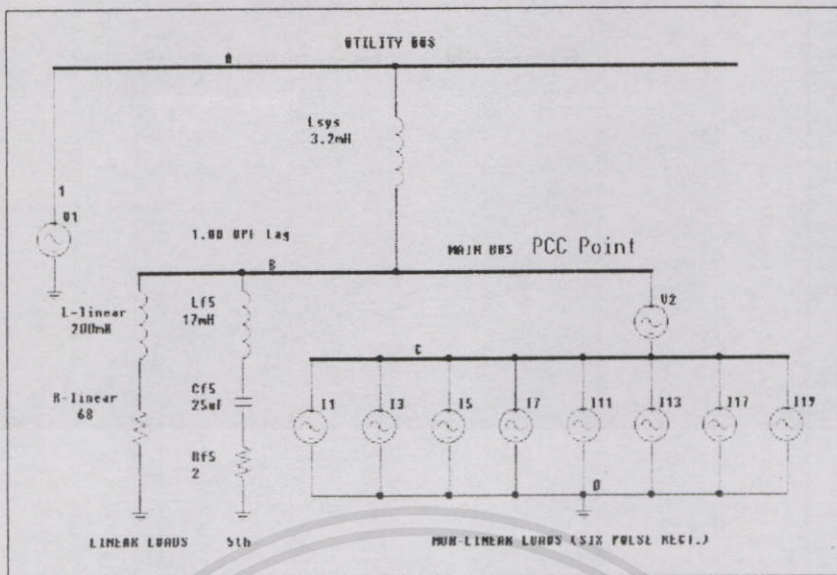
Single Tuned Shunt Filter 5th only

V1	I1	DPF	PF-NEW	angle	P1	S1	Q1	Shw	Qshw	Tune-order	Q-factor	OC	Xc	Xc new	Cap(uF)	XL	L(μH)	R	C ฟังก์ชัน	L ฟังก์ชัน	Order ฟังก์ชัน
218.07	4.07	0.91	1.00	-24.00	802.48	881.85	354.51	802.48	0.00	4.00	10.00	354.51	-138.64	126.84	23.31	5.88	18.12	2.00	30.00	15.00	4.75

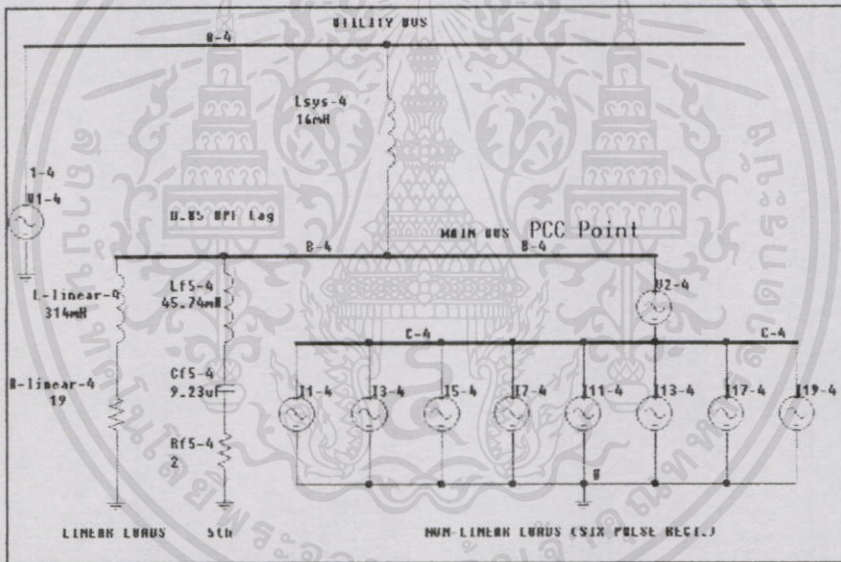
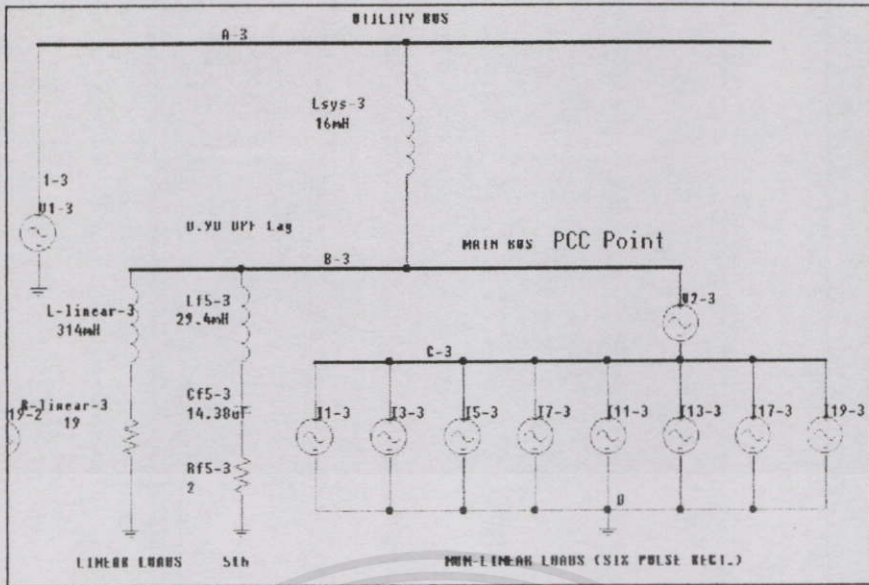
Single Tuned Shunt Filter 5th only

V1	I1	DPF	PF-NEW	angle	P1	S1	Q1	Shw	Qshw	Tune-order	Q-factor	OC	Xc	Xc new	Cap(uF)	XL	L(μH)	R	C ฟังก์ชัน	L ฟังก์ชัน	Order ฟังก์ชัน
218.07	4.07	0.91	1.00	-24.00	802.48	881.85	354.51	802.48	0.00	4.00	10.00	354.51	-138.64	126.84	23.31	5.88	18.12	2.00	30.00	15.00	4.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
 ไม่ว่าการมีใจทั้งหมดนี้ไม่มีให้แค่เพียงนี้ และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารที่นำมาใช้

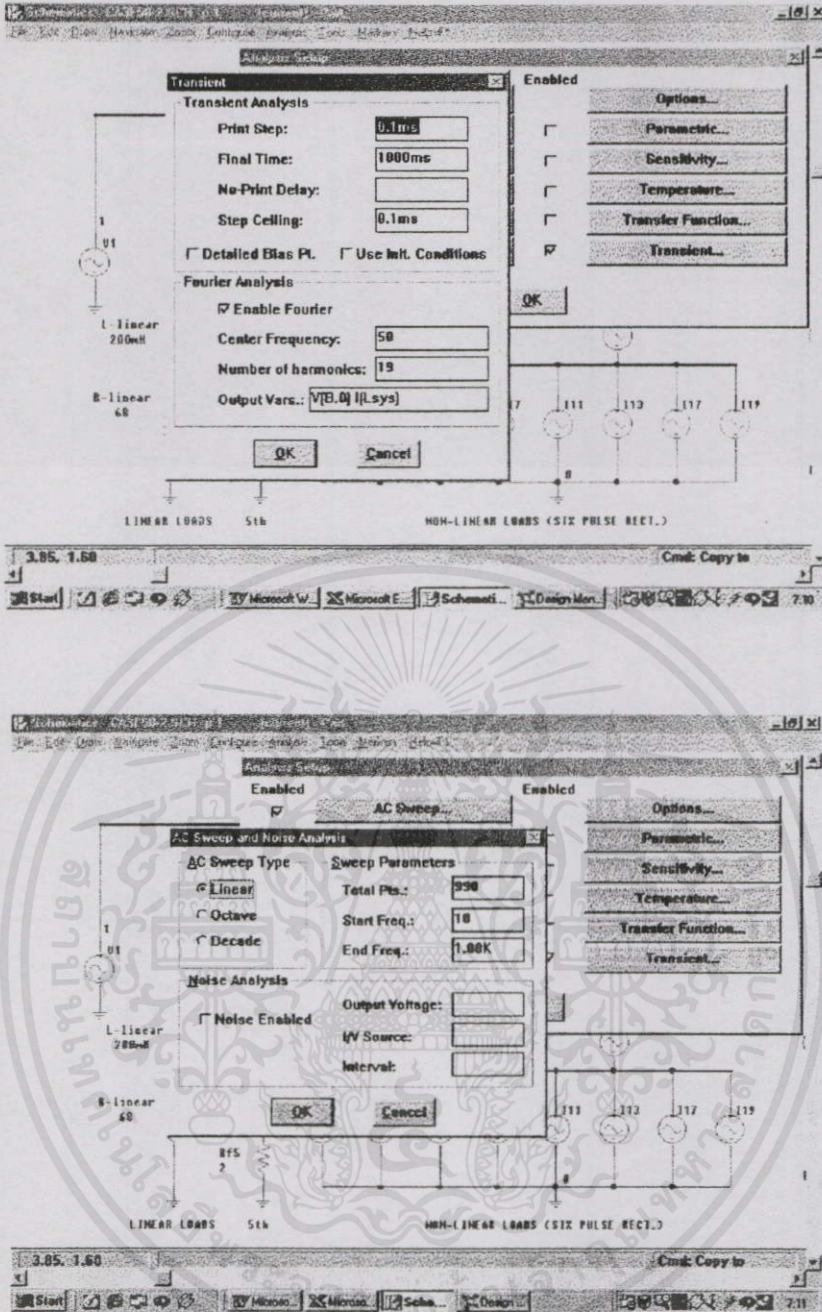


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



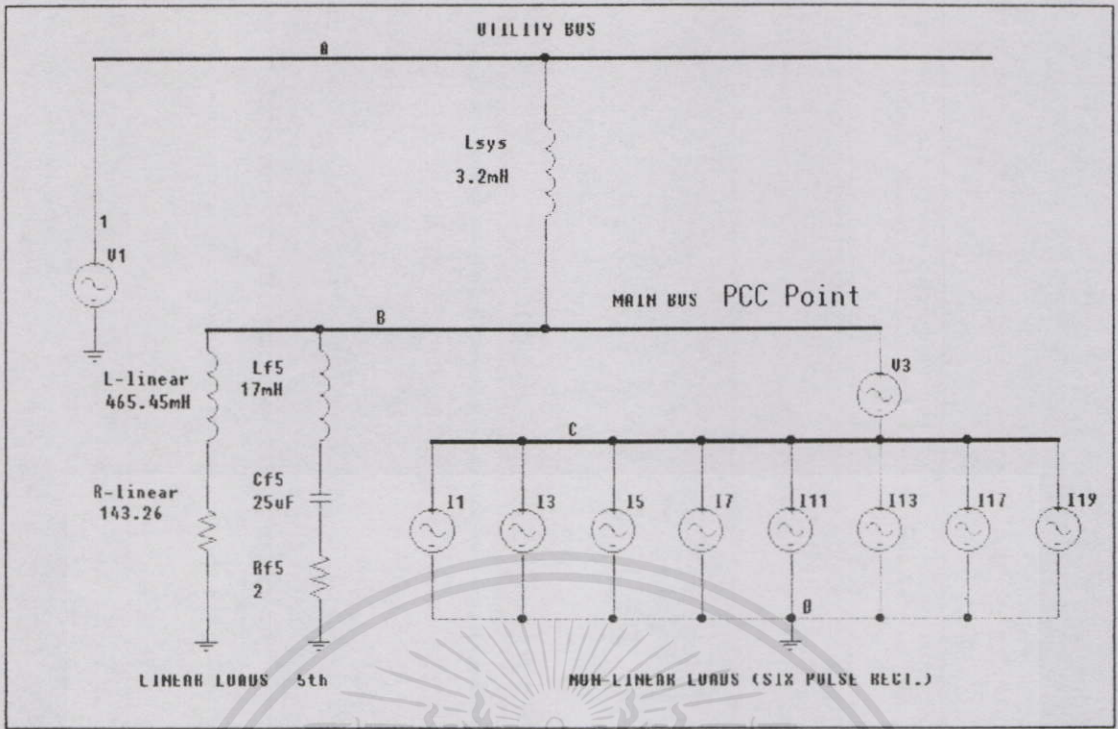
รูปที่ ๗-๒ แบบจำลองของระบบใน PSpice ที่ค่า DPF ต่างๆ (0.85, 0.90, 0.95 และ 1.00) กรณีใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5 เพื่อใช้พล็อตกราฟอัตราส่วนการแบ่งกระแสฮาร์มอนิกส์สู่ระบบจริง [H_{cds} (dB)] ในขั้นตอนของการออกแบบ (หัวข้อ 7.4.1.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-3 ตัวอย่างการกำหนดพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์แบบ Transient และแบบ AC Sweep กรณีใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5 เพื่อพิจารณาถึงสเปคตรัมของกระแสฮาร์มอนิกส์ และพล็อตกราฟ $[H_{cds} \text{ (dB)}]$ ตามลำดับ, ในขั้นตอนของการออกแบบ (หัวข้อ 7.4.1.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-4 ตัวอย่างแบบจำลองกรณีใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5 เพื่อพิจารณาถึงเปอร์เซ็นต์ โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่สามารถใช้ได้ในระบบหลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ กรณีที่กักรวม ของระบบมีค่าคงที่ (หัวข้อ 7.4.1.4)

ตารางที่ ง-6 ตารางบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยรูปที่ ง-4

%non	%THDI	IFUN	%non	%TDDI	Ifun rms	%non	%THDv
100	13.86	6.52	100	15.70	4.61	100	3.05
75	11.69	5.79	75	11.76	4.09	75	2.26
50	8.47	5.21	50	7.67	3.68	50	1.46
25	4.50	4.8	25	3.75	3.39	25	0.71
10	1.88	4.66	10	1.52	3.30	10	0.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7-7 ตารางที่ใช้คำนวณค่า กระแสไฟฟ้า และ อิมพีแดนซ์ของ โหลดแบบเชิงเส้น และอิมพีแดนซ์ของระบบเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาความถี่ของเปอร์เซ็นต์โหลดแบบเชิงเส้นที่นำมาต่อร่วมกับปริมาณฮาร์โมนิกใน PSPICE (หัวข้อที่ 7.4.1-4-2)

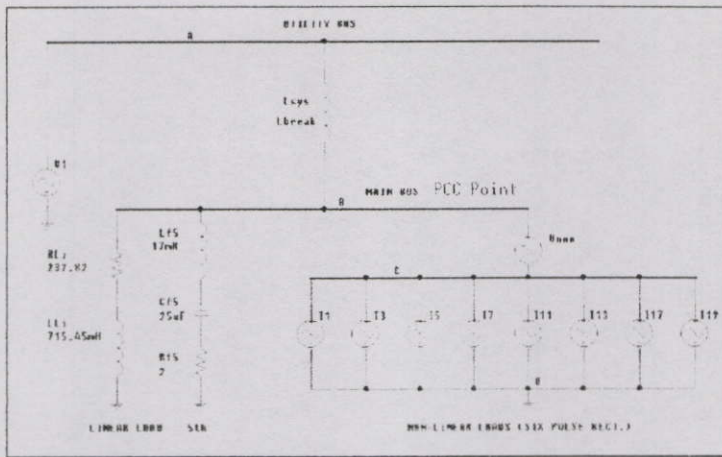
การวิเคราะห์ระบบวิธี Modeling (ตารางคำนวณค่า Isc/IL และ Ls)

Six Pulse Rectifier as Non Linear Load

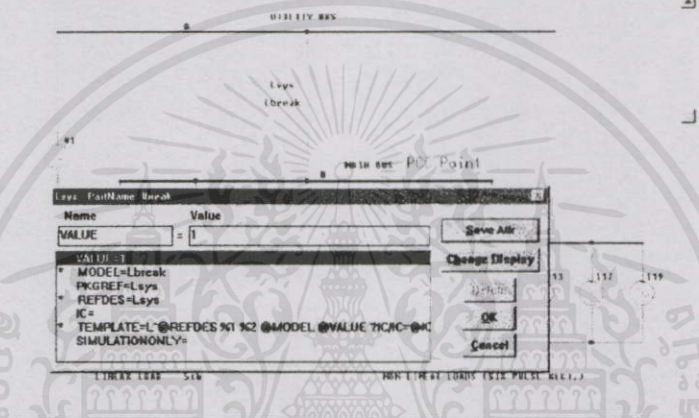
เป้าหมายของตารางคือหาความถี่พรีซอร์ %THD กับค่า Isc/IL และ Demand ของ Linear Load

0% Linear Load			25% Linear Load			50% Linear Load			75% Linear Load		
IL	R _{th}	L _{th}	Filter	IL	R _{th}	L _{th}	Filter	IL	R _{th}	L _{th}	Filter
2.04	-	-	5th,7th	2.72	232.82	715.45	5th,7th	4.08	77.61	238.48	5th,7th
Isc/IL	Isc	X _{d(ohm)}	L _{d(mH)}	Isc/IL	Isc	X _{d(ohm)}	L _{d(mH)}	Isc/IL	Isc	X _{d(ohm)}	L _{d(mH)}
1	2.04	107.84314	343.28	1.00	2.72	80.88	257.46	1.00	4.08	53.92	171.64
2	4.08	53.921569	171.64	2.00	5.44	40.44	128.73	2.00	8.16	26.96	85.82
4	8.16	26.960784	85.82	4.00	10.88	20.22	64.36	4.00	16.32	13.48	42.91
8	16.32	13.480392	42.91	8.00	21.76	10.11	32.18	8.00	32.64	6.74	21.45
16	32.64	6.7401961	21.45	16.00	43.52	5.06	16.09	16.00	65.28	3.37	10.73
32	65.28	3.370098	10.73	32.00	87.04	2.53	8.05	32.00	130.56	1.69	5.36
64	130.56	1.685049	5.36	64.00	174.08	1.26	4.02	64.00	261.12	0.84	2.68
128	261.12	0.8425245	2.68	128.00	348.16	0.63	2.01	128.00	522.24	0.42	1.34
256	522.24	0.4212623	1.34	256.00	696.32	0.32	1.01	256.00	1044.48	0.21	0.67
512	1044.48	0.2106311	0.67	512.00	1392.64	0.16	0.50	512.00	2088.96	0.11	0.34
1024	2088.96	0.1053156	0.34	1024.00	2785.28	0.08	0.25	1024.00	4177.92	0.05	0.17

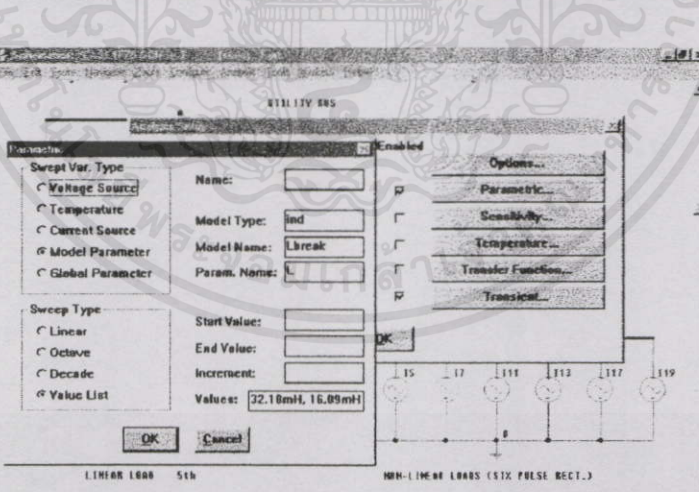
ถ้าหากมีข้อสงสัยเกี่ยวกับวิธีการคำนวณหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อผู้จัดทำเอกสารที่เบอร์โทรศัพท์ 02-2542000 หรือที่เว็บไซต์ www.ace.or.th



รูปที่ 4-24 ตัวอย่างแบบจำลองที่ใช้ในการกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ เพื่อวิเคราะห์ถึงเปอร์เซ็นต์โหลดแบบเชิงเส้นที่สามารถใช้ได้ในระบบหลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ (หัวข้อที่ 7.4.1.4-2) ทั้งหมด อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-24.2.66 ตัวอย่างแบบจำลองที่ใช้ในการกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ เพื่อวิเคราะห์ถึงเปอร์เซ็นต์โหลดแบบเชิงเส้นที่สามารถใช้ได้ในระบบหลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ (หัวข้อที่ 7.4.1.4-2) ทั้งหมด อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-24.1.82 ตัวอย่างแบบจำลองที่ใช้ในการกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ เพื่อวิเคราะห์ถึงเปอร์เซ็นต์โหลดแบบเชิงเส้นที่สามารถใช้ได้ในระบบหลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ (หัวข้อที่ 7.4.1.4-2) ทั้งหมด อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4-24.1.82 ตัวอย่างแบบจำลองที่ใช้ในการกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ เพื่อวิเคราะห์ถึงเปอร์เซ็นต์โหลดแบบเชิงเส้นที่สามารถใช้ได้ในระบบหลังการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์ (หัวข้อที่ 7.4.1.4-2) ทั้งหมด อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ ทม 5145/ว.15



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี

อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

16 พฤษภาคม 2545

เรื่อง แจ้งผลการพิจารณารูปแบบการนำเสนอผลงานวิจัย เพื่อนำเสนอในการประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา
ของประเทศไทย ครั้งที่ 3 และการชำระค่าลงทะเบียน

เรียน นายวสันต์ อู๋ยายโสม

- สิ่งที่ส่งมาด้วย
1. รูปแบบการจัดทำบทความเพื่อตีพิมพ์ในสื่อรวมบทความวิชาการ (Proceeding)
 2. แบบแสดงความจำนงเข้าร่วมการประชุมและรายละเอียดการลงทะเบียน
 3. การจองที่พัก
 4. รายละเอียดการนำเสนอแบบโปสเตอร์และแบบบรรยาย

ตามที่ท่านได้ส่งบทความวิจัย และได้รับการพิจารณาให้นำเสนอในการประชุมเสนอผลงานวิจัย
ระดับบัณฑิตศึกษาของประเทศไทย ครั้งที่ 3 ระหว่างวันที่ 18 - 19 กรกฎาคม 2545 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ความละเอียดทราบแล้ว นั้น

คณะอนุกรรมการฝ่ายวิชาการจัดการประชุมฯ ขอแจ้งผลการพิจารณาการนำเสนอผลงานวิจัย
ดังนี้

ผลงานวิจัยของ นายวสันต์ อู๋ยายโสม เรื่อง การออกแบบชุดตัวกรองฮาร์โมนิกให้สอดคล้อง
กับมาตรฐาน IEEE 519 โดยวิธีการวิเคราะห์ทรานส์ฟอร์มทั้งชั้นของระบบ จัดอยู่ในกลุ่ม
สาขาวิจัยด้าน วิศวกรรมศาสตร์ ได้รับการพิจารณาให้นำเสนอแบบบรรยายในการประชุมเสนอ
ผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาของประเทศไทย ครั้งที่ 3 ระหว่างวันที่ 18 - 19 กรกฎาคม 2545 ณ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เนื่องจากในการประชุมครั้งนี้มีผู้สนใจนำเสนอผลงานวิจัยโดยเฉพาะอย่างยิ่งแบบบรรยายเป็นจำนวนมาก
ดังนั้น เพื่อให้การเตรียมการประชุมเป็นไปอย่างเหมาะสม และสามารถจัดทำสื่อรวมบทความวิชาการ (proceeding)
ของการประชุมได้เสร็จทันตามกำหนดเวลา คณะอนุกรรมการฝ่ายวิชาการจัดการประชุมฯ จึงใคร่ขอความร่วมมือจากท่าน
ดังต่อไปนี้

1. จัดส่งต้นฉบับบทความเพื่อตีพิมพ์ในสื่อรวมบทความวิชาการ (proceeding) ของการประชุม
ครั้งนี้ ภายในวันที่ 30 พฤษภาคม 2545 ดังรายละเอียดการจัดทำและการจัดส่งบทความ
ปรากฏตามเอกสารสิ่งที่ส่งมาด้วย 1. กรณีเกิน 2 หน้า ส่วนที่เกินจะไม่ได้รับการตีพิมพ์ ทั้งนี้
ขอให้จัดส่งภายในวันที่ 30 พฤษภาคม 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อบทความ (ภาษาไทย) การออกแบบชุดตัวกรองฮาร์มอนิกให้สอดคล้องกับมาตรฐาน IEEE 519
 โดยวิธีการวิเคราะห์ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของระบบ
 (ภาษาอังกฤษ) Designing Harmonic Filter to Comply with IEEE Std. 519
 By System Transfer Function Analysis
 กลุ่มสาขาวิจัย วิศวกรรมศาสตร์ (Engineering)
 ผู้นำเสนอบทความ วสันต์ อู๋ชายโสม ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล
 สถาบันการศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทนำ

ในปัจจุบันปริมาณฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นมาก เนื่องจากความนิยมใช้โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นในระบบไฟฟ้ากำลังโดยเฉพาะคอนเวอร์เตอร์ แบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง [1,2] ซึ่งจากสภาวะการณดังกล่าวทำให้ผู้รับผิดชอบเกี่ยวกับการควบคุมคุณภาพของระบบไฟฟ้าจะต้องเตรียมความพร้อมเกี่ยวกับการแก้ไขปัญหาเนื่องจากฮาร์มอนิกในระบบโดยเฉพาะในแบบที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐาน

บทความนี้เป็นการนำเสนอวิธีการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟเพื่อให้ปริมาณฮาร์มอนิกสอดคล้องกับข้อกำหนดของ IEEE Std.519-1992 ด้วยวิธีการวิเคราะห์ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของระบบโดยการใช้โปรแกรม PSPICE โดยจุดเด่นของวิธีดังกล่าวคือการสามารถที่จะพิจารณาปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องในการออกแบบได้พร้อมๆกันทำให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น กล่าวคือ ชุดตัวกรองฮาร์มอนิก (ชนิด และจำนวน) เพื่อให้ปริมาณฮาร์มอนิกต่ำกว่ามาตรฐาน กำลังงานรีแอคทีฟรวมทั้งที่ต้องการจ่ายให้กับระบบ, กำลังงานรีแอคทีฟสำหรับตัวกรองแต่ละชุด (Q-factor) เพื่อกำหนดคุณสมบัติที่เหมาะสม, การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในการกรองฮาร์มอนิก เนื่องจากค่าผิดพลาดของ L-C, การเกิดเรโซแนนซ์ตรงกันกับฮาร์มอนิกที่จะกรองเนื่องจากค่าผิดพลาดของ L-C และการเกิดเรโซแนนซ์ตรงกันกับความถี่ต่ำกว่าความถี่จูนไว้ที่ตัวกรอง ซึ่งในรายละเอียดของบทความจะประกอบไปด้วยการจำลองระบบไฟฟ้าตัวอย่างและการสร้างแบบจำลองของระบบดังกล่าว, ขั้นตอนในการออกแบบตัวกรองให้มีความเหมาะสมสำหรับปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบ โดยแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในระบบจะเป็นชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสแบบเฟสคอลลโทล

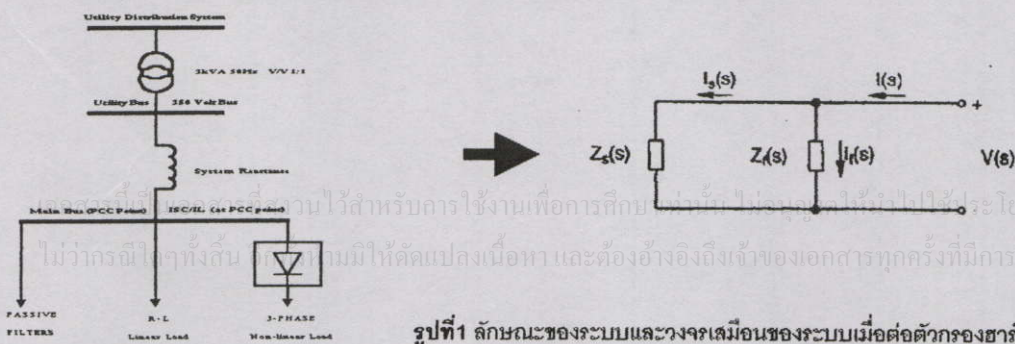
ระเบียบวิธีการวิจัยที่ใช้หรืออุปกรณ์และวิธีการ

ตารางที่ 1 มาตรฐานของกระแสฮาร์มอนิก (120V-69kV)

Maximum Harmonic Current Distortion In Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_h/I_L	<11	11.5h-17	17.5h-23	23.5h-35	35-h	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.5	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	6.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

ลักษณะของค่าที่กำหนดในมาตรฐานจะแสดงถึงความเข้มงวดกับระบบที่มีขนาดใหญ่กว่า โดยขนาดของระบบจะพิจารณาจากอัตราส่วนของค่ากระแสลัดวงจรที่จุด PCC (I_{SC}) กับค่าเฉลี่ยต่อปีของกระแสอาร์เอ็มเอสสูงสุดที่ความถี่หลักมูลที่ระบบต้องการ (I_L) หรือในกรณีของระบบที่เริ่มใช้งานไม่ครบ 1 ปีอาจหมายถึงกระแสอาร์เอ็มเอสสูงสุดที่ความถี่หลักมูลที่ระบบต้องการ ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกโดยรวมจะกำหนดด้วยค่า %TDD (Total Demand Distortion)



รูปที่ 1 ลักษณะของระบบและวงจรเสมือนของระบบเมื่อต่อตัวกรองฮาร์มอนิกส์

Transfer Function [3] เป็นวิธีที่พิจารณาทิศทางกราฟ Current Divider Transfer Function (H_{cdfs}) เทียบกับค่า Minimum Filter Attenuation Ratio หรือ Current Spectrum Transfer Function (H_{spec}) ที่ฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ โดยจากรูปที่ 1 จะได้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของอัตราในการแบ่งกระแสเข้าสู่ระบบ และ ได้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของอัตราในการแบ่งกระแสเข้าสู่ระบบ ตามมาตรฐาน ดังสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$$H_{cdfs}(s) = \frac{I_s(s)}{I(s)} = \frac{Z_f(s)}{Z_f(s) + Z_s(s)} \tag{1}$$

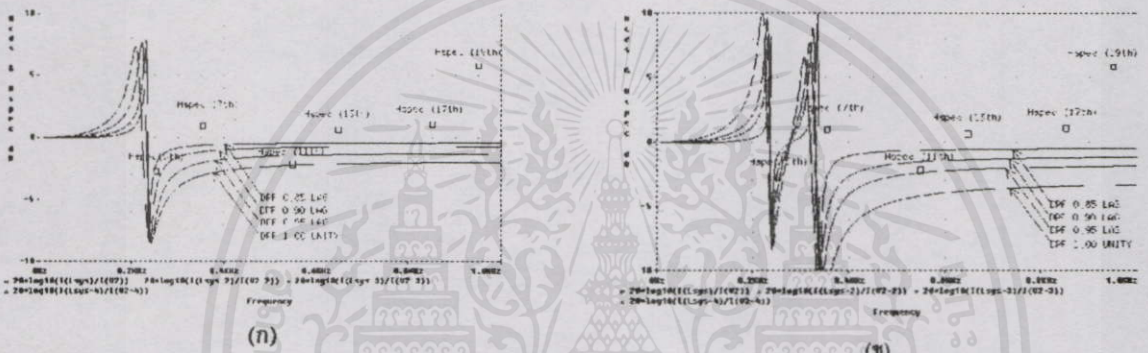
$$H_{spec} = \frac{|I_{IEEE} - 519|}{|I|} \tag{2}$$

เงื่อนไขในการพิจารณา

ถ้า $H_{cdfs} > 0\text{dB}$: $I_s(s) > I(s)$, อาจหมายถึงระบบเกิดการเรโซแนนซ์

ถ้า $H_{cdfs} < H_{spec}$: หมายถึงกระแสฮาร์มอนิกที่จุด PCC ต่ำกว่า Std. ซึ่งอาจเป็นผลจากการต่อตัวกรองฮาร์มอนิกเข้าในระบบ

ผลการวิจัย



รูปที่ 2 H_{cdfs} เทียบกับ H_{spec} กรณีต่อตัวกรองแบบ Single Tuned อันดับที่ 5 และ 7

ตัวอย่างผลการเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกหลังจากต่อตัวกรองอันดับที่ 5 ดังรูปที่ 2(ก) ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อพิจารณาเบื้องต้นกรณี DPF เท่ากับ 1.00 กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ก็ยังสูงกว่ามาตรฐานเล็กน้อย ดังนั้นจึงพิจารณาต่อตัวกรองอันดับที่ 7 เพิ่มเติม ดังรูปที่ 2(ข) ซึ่งจะเห็นว่ากรณี DPF เท่ากับ 1.00 มีความเหมาะสมกว่าในกรณี DPF 0.85, 0.9 และ 0.95

อภิปรายผลและข้อเสนอบน

จากผลการทดลองที่ได้ในรูปที่ 2 จะเห็นว่าวิธีการออกแบบด้วยการวิเคราะห์ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของระบบจะแสดงถึงความเป็นไปได้ของจุดในการทำงาน (DPF) ได้หลายกรณี และกราฟที่ได้ยังช่วยให้การพิจารณาปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบ, ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น, ได้ในเวลาเดียวกัน โดยกรณีที่เราจะเลือกในที่นี้คือ การใช้ตัวกรองแบบกรองความถี่เดียวอันดับที่ 5 และ 7 โดยแบ่งการชดเชยค่ากำลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบแบบเท่ากัน โดยผลที่ได้จากการจัดทำตัวกรองฮาร์มอนิกและทดสอบในห้องทดลองเมื่อเทียบกับที่ได้จากการวิเคราะห์ในโปรแกรม PSPICE ปรากฏว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEEE Std 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power System.
- [2] Damian A. Gonzalez and John C. McCall, "Design of Filters to Reduce Harmonic Distortion in Industrial Power", IEEE Trans. on Industrial Application, vol. IA-23, no.3, MAY/JUNE 1987.
- [3] James K. Phipps, "A transfer Function Approach to Harmonic Filter Design", IEEE Industry Applications , March/April 1997.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาร่วมกัน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

คำสำคัญ : IEEE Std. 519-1992, Current Divider Transfer Function, Current Spectrum Transfer Function
 ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้ : 8/71 ม.3 ข.รามอินทรา 14 แขวงจระเข้บัว เขตลาดพร้าว กรุงเทพฯ 10230
 อีเมล wason@mut.ac.th โทรศัพท์ 01-4399454 โทรสาร 02-9884040



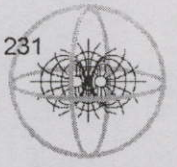
KMITL

**International Conference on
Electromagnetic Compatibility 2002**

(ICEMC 2002)

24th-27th July 2002

The Amari Watergate Hotel, Bangkok, Thailand



ICEMC 2002

Dear Mr. Wasan U-yaisom,

It is my pleasure to inform you that your paper titled “ Designing Harmonic Passive Filter to Comply with IEEE Std. 519 and Conducted EMI Suppression in Power System by System Transfer Function Analysis ”

Authors: W. U-yaisom, W. Khan-ngern and S. Potivajakul

has been accepted for presentation at ICEMC2002.

Author's kit for ICEMC'2002/Bangkok are enclosed herewith. It would be grateful if you could follow the Instruction in preparing your Camera-ready Paper.

Electronic Paper Submission is preferred, and should be sent by May 15th 2002. For E-mail submission, the paper must be in PDF and MSword version, all content in electronic version must be Black and White.

Thank you for your cooperation.

I am looking forward to meet you in ICEMC2002.

Sincerely yours,

Dr. Werachet Khan-ngern
Chairman of the ICEMC2002 Program Committee

Contact Address:

Dr. Werachet Khan-ngern

EMC Laboratory

Reserch Center for Communications and Information Technology (ReCCIT)

King Mongkut's Institute of Technology Lardkrabang (KMITL),

Bangkok, 10520, Thailand.

Phone/Fax: +662 739 2427-8, +662 737 3000 ext. 3322

E-mail: kkveerac@kmitl.ac.th, emc@kmitl.ac.th

Website: <http://www.kmitl.ac.th/~emc>

Designing Harmonic Passive Filter to Comply with IEEE Std. 519 and Conducted EMI Suppression in Power System by System Transfer Function Analysis

W. U-Yaisom, W. Khan-ngern and S. Potivajakul

Faculty of Engineering
King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand
Phone/Fax: +(66) 2 7373000 Ext. 3322

Email: wason@mut.ac.th , kkveerac@kmitl.ac.th

Abstract

This paper presents harmonic filter designing procedure to comply with IEEE Std 519-1992 harmonic limits and conducted EMI suppression by system transfer function analysis through PSPICE program. Development of typical power system, computer model, prediction a feasibility of meeting harmonic specification and compare of harmonics reduction and EMI suppression obtained from simulation and experimental in four example shunt filters schemes are described. AC to DC Converter 3-phase diode rectifier is used as harmonic source in an example power system.

Index Term: IEEE-519 Std., Harmonic Filter, Conducted EMI emission

Corresponding Author:

Asst. Prof. Dr. Werachet Khan-ngern
EMC Laboratory,
Research Center for Communications and Information Technology (ReCCIT)
10th floor, Kromluang Naradhiwas Rajanagarindra Building,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok 10520, Thailand
Phone/Fax : +662 7373000 Ext. 3322, E-mail : kkveerac@kmitl.ac.th I.

I. introduction

Electronic power converters have become one of the major sources of harmonics and electromagnetic interference (EMI) in industrial power system [1-4]. The increasing application of electronic power converter in the industrial power system has led to a growing concern for harmonic distortion and the resulting impacts on system equipment and operation, such as transformer overheating, telephone interference, motor failures, fuse blowing and capacitor failures [1-4].

However, harmonic distortion is quickly becoming very hot topic, especially for system requiring that the load comply with strict harmonic standard, such as those in IEEE Std. 519-1992 [4].

Since the drive manufactures tend to be slow to change their basic designs incorporating new technology and since active filter system still appear to be a few years away from being readily available on the market, passive harmonic filter systems are being used extensively. Shunt filter have advantage of providing the needed reactive compensation required by the harmonic production devices and other loads at PCC (Point of Common Coupling) [2].

This paper describes the design and performance of shunt passive filter to reduce harmonic distortion and conducted EMI suppression in an industrial power system by system transfer function analysis through PSPICE program [4]. Harmonic impedance and current division transfer functions are derived and used in a filter design procedure that incorporates IEEE 519 into the design and component specification process and consequently comparison between various possible shunt filters scheme which are comply to IEEE Std.519-1992 for EMI suppression are presented.

II. Example Power System

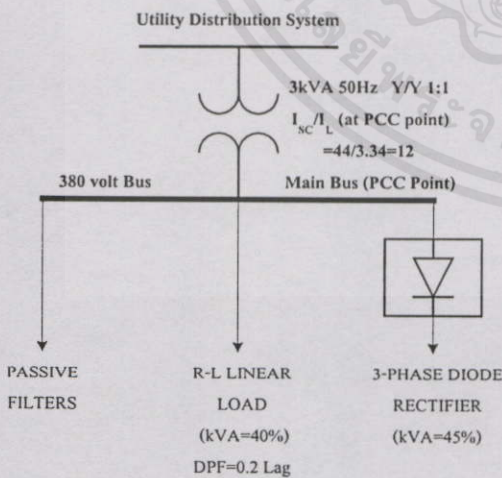


Figure 1: Single Line Diagram of Example Power System for Simulation.

Description of Power System set up and measurement

- A balance three phase 380/220V 3kVA 50Hz supply to linear (R-L) and non-linear loads (three phase diode rectifier) at 0.4 kVA and 0.45 kVA respectively.
- Power Harmonic Analyzer (Fluke41B) is used to harmonics and power measurements in example system illustrated as figure2 (a)-(c)

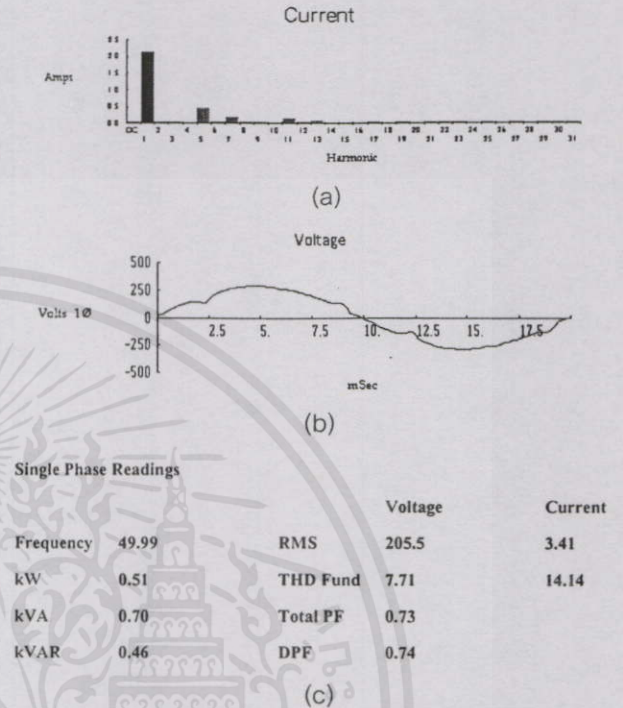


Figure 2: Harmonics Measurement at PCC. (a) Line Current Spectrum of Converter (b) Voltage Waveform at PCC (c) Data Measurement at PCC

III. Harmonic Filter Design

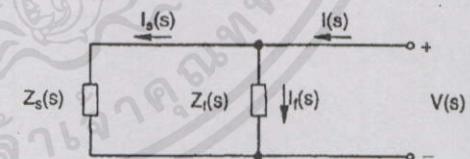


Figure3 : Filter/System impedance representation.

$H_{cds}(s)$ is the ratio of system current to injected current, can be defined as follows:

$$H_{cds}(s) = \frac{I_s(s)}{I(s)} = \frac{Z_f(s)}{Z_f(s) + Z_s(s)} \quad (1)$$

H_{spec} is the minimum filter attenuation ratios required to meet the established distortion limits can then be calculated by

$$H_{spec} = \frac{|I_{IEEE-519}|}{|I|} \quad (2)$$

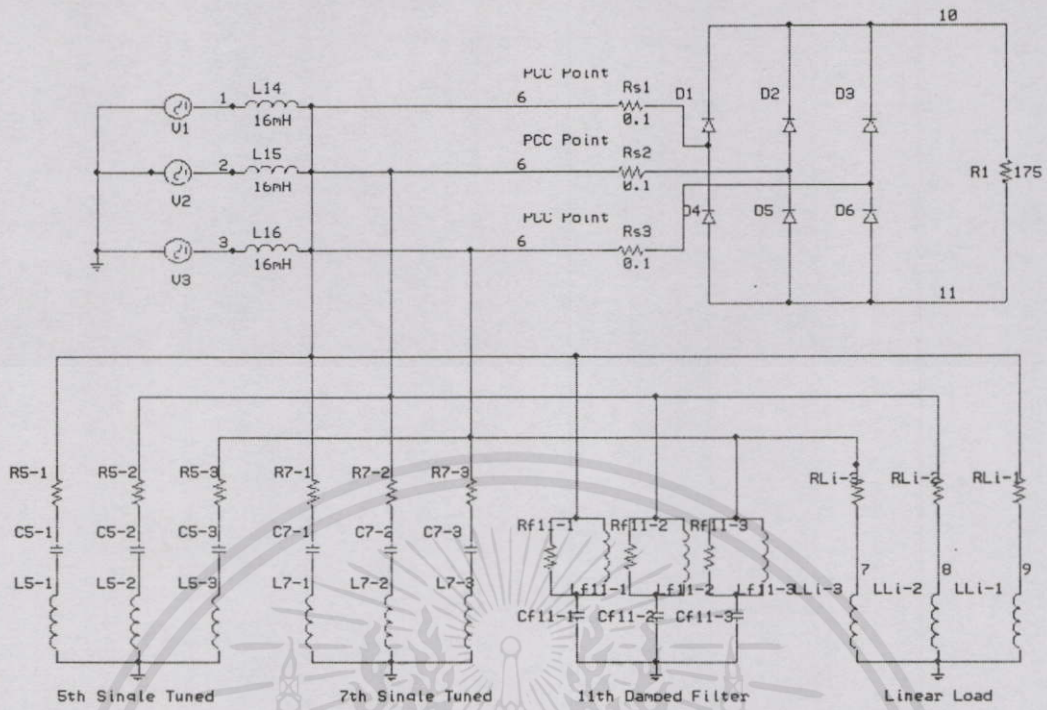


Figure 3: Example of Circuit Model Simulation for H_{cds} Analysis.

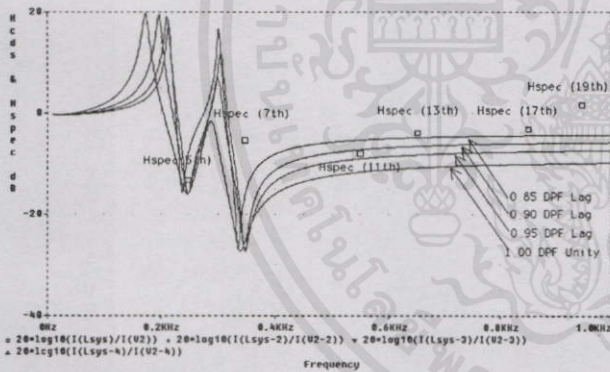


Figure 4: 5th and 7th (Single Tuned) for 0.85, 0.9, 0.95, 1.00 DPF conditions.

-In Figure 4, shows shunt filter scheme included of 5th and 7th single tuned shunt filters and its indicated that harmonic currents are within IEEE Std.519-1992 limits at 0.95 and 1.00 DPF condition only ($H_{cds} < H_{spec}$)

- In Figure 5, shows another shunt filter scheme which are included of 5th, 7th single tuned shunt filters and 11th damped filter and its indicated that harmonic currents are within IEEE Std.519-1992 limits at 0.95 and 1.00 DPF condition only ($H_{cds} < H_{spec}$)

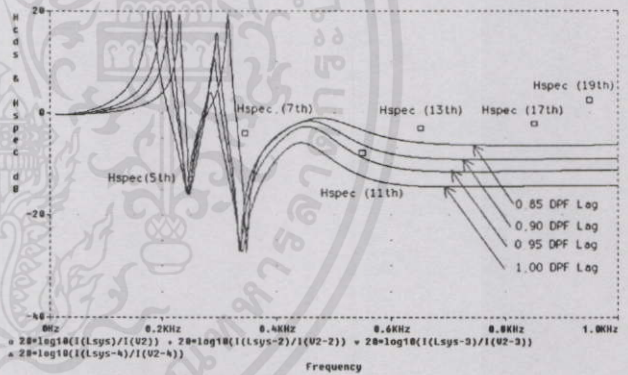


Figure 5: 5th, 7th (Single Tuned) and 11th (Damped) for 0.85, 0.9, 0.95, 1.00 DPF conditions.

-Then, four-shunt filter schemes are using to compare in EMI suppression in next topic as show in table 1.

Table I: Components of each Shunt Filter Scheme

Conditions	Order	R(ohm)	L(mH)	C(uF)
1 without filter	-	-	-	-
2 with single tuned filter (DPF=0.95)	5	4	41.5	10
	7	1.5	21	10
3 with single tuned filter (DPF=1.0)	5	4	26	16
	7	1.5	13	17
4 with single tuned filter + damped (DPF=0.95)	5	4	60	7
	7	1.5	32	7
	11	80	11.95	7
5 with single tuned filter + damped (DPF=1.0)	5	4	38	11
	7	1.5	20	11
	11	50	8	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

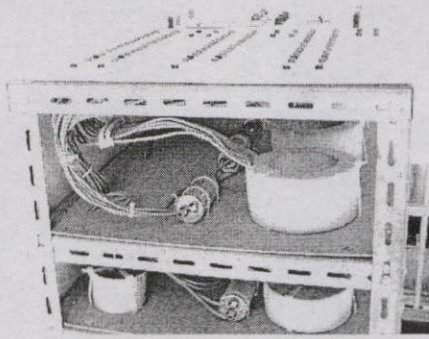


Figure 6: Prototype Shunt Filters.

IV. Conducted EMI

The operations of switching devices are generated dv/dt or di/dt . It is clarified that cause of EMI emission [6], consequently, affected to the system. The two types of propagation for conducted EMI are differential-mode and common-mode. Differential-mode propagation takes place between two conductors and common-mode propagation takes place between a group of conductors and ground, is shown figure 7 [7].

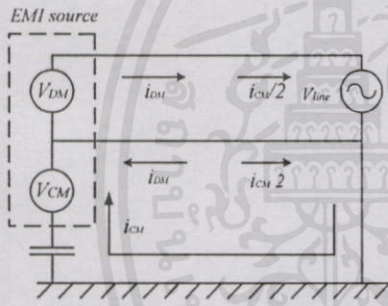


Figure 7: Differential-mode and common-mode conducted EMI

V. Simulations and Experiments

The Simulated information: using PSPICE program is as follow:
 system voltage : 380V_{L-L}
 power Diode : MBR1540
 starting time : 0 μ s
 stopping time : 100 ms
 maximum step : 1 μ s

Table II: Measured Diagram

	Conditions
1	without Shunt Filter
2	with 5 th and 7 th Single Tuned Shunt Filter at 0.95 DPF
3	with 5 th and 7 th Single Tuned Shunt Filter at 1.00 DPF
4	with 5 th , 7 th Single Tuned and 11th Damped Shunt Filter at 0.95 DPF
5	with 5 th , 7 th Single Tuned and 11th Damped Shunt Filter at 1.00 DPF

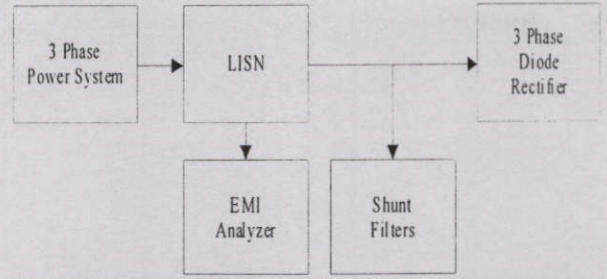
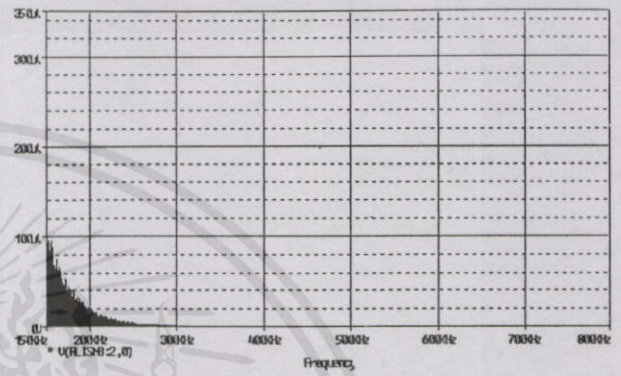
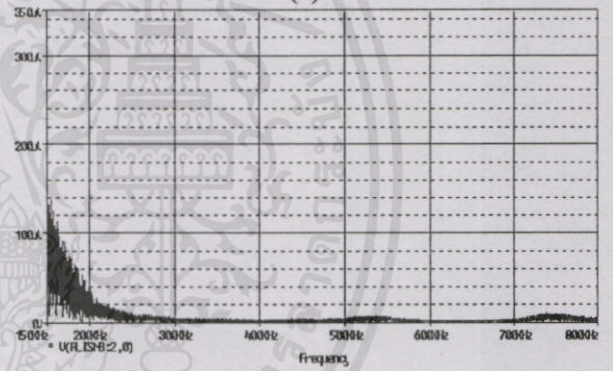


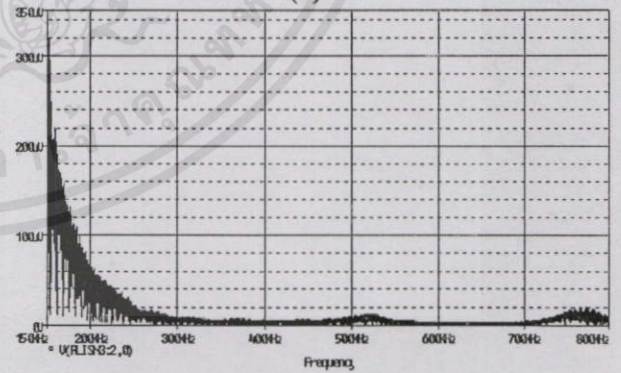
Figure 8: Block diagram of three-phase diode rectifier with shunt filters for EMI testing.



(a)



(b)



(c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ใบวารสารนี้สงวนไว้สำหรับผู้อ่านที่มีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

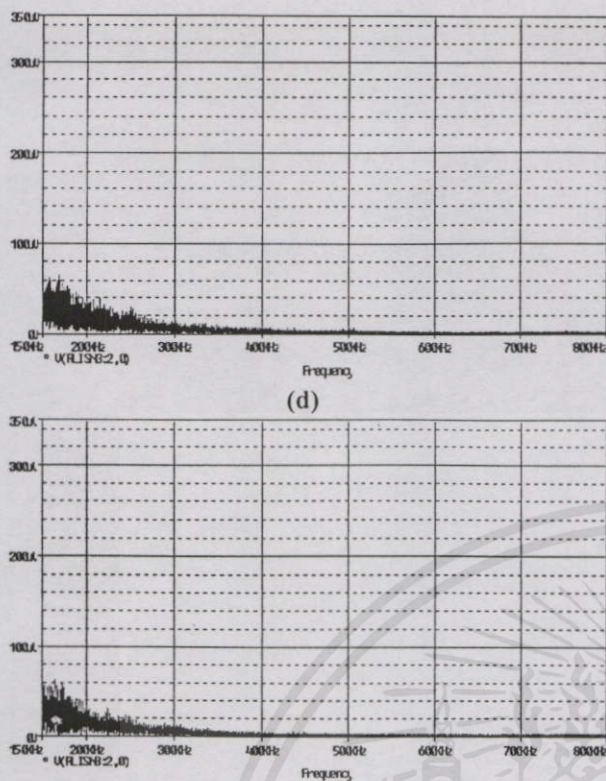


Figure 9: Simulated EMI Noise,
 (a) Simulated EMI noise : without Filter
 (b) Simulated EMI noise : with 5th and 7th (Single Tuned) for 0.95 DPF conditions.
 (c) Simulated EMI noise : with 5th and 7th (Single Tuned) for 1.00 DPF conditions.
 (d) Simulated EMI noise : 5th, 7th (Single Tuned) and 11th (Damped) for 0.95 DPF conditions.
 (e) Simulated EMI noise : 5th, 7th (Single Tuned) and 11th (Damped) for 0.95 DPF conditions.

Figure 9 shows example of the comparisons of conducted EMI between various shunt filter schemes. It is classified that the conducted EMI noise significantly reduced at 150 kHz-800 kHz due to the high-pass response characteristic of 11th damped filter for both 0.95 and 1.00 DPF conditions. It should be noted that conducted EMI noise increasingly in cases of single tuned shunt filter schemes due to system voltage raised as compared to system without filter conditions by power factor correction.

VI. The final paper

The completed results of measured and simulated results of conducted EMI emission will be compared and analyzed under four-shunt filter schemes and will be discussed.

Reference

- [1] IEEE Std 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power System, New York, IEEE, 1993.
- [2] Damian A. Gonzalez and John C. McCall, "Design of Filters to Reduce Harmonic Distortion in Industrial

Power", IEEE Trans. on Industrial Application, vol. IA-23, no.3, MAY/JUNE 1987.

- [3] Michael Z. Lowenstein "Modeling and Application of Passive Harmonic Trap Filters for Harmonic Reduction and Power Factor Improvement", IEEE 1993.
- [4] James K. Phipps, "A transfer Function Approach to Harmonic Filter Design", IEEE Industry Applications Magazine, March/April 1997.
- [5] Mark F. McGranaghan, "Designing Harmonic Filters for Adjustable-Speed drives to Comply with IEEE 519 Harmonic Limits", IEEE Trans. on Ind. App., vol. 35, no.2, March/April 1999.
- [6] Shao J., Lin, R.L., Lee, F.C. and Chan, D.Y. "Characterization of EMI Performance for Hard and Soft Switched Inverters", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2000 APEC2000. Fifteenth Annual IEEE, vol. 2, 2000 pp. 1009-1014.
- [7] Redl, R. "Power Electronics and Electromagnetic Compatibility" Power Electronics Specialists Conference, PESC'96 Record., 27th Annual IEEE, vol.1, pp. 15-21.

ประวัติผู้เขียน

นายวสันต์ อุ้ยยาโยสม เกิดเมื่อวันที่ 15 พฤษภาคม 2515 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (ไฟฟ้ากำลัง) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2537 และ ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ไฟฟ้ากำลัง) จากวิทยาลัยช่างกลปทุมวัน ปี
การศึกษา 2533

ปี พ.ศ. 2538 เข้าทำงานในตำแหน่งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรม
ศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้