

การวิเคราะห์ตัวกรองฮาร์โมนิกส์
Harmonics Filter Analysis



โดย
นาย นรินทร หวังนุช
นางสาว รุ่งทิพย์ เพ็ชรทิม
นางสาว รุจิพร เตชทวีฤทธิ์

วัน เดือน ปี..... 30.06.2539
เลขทะเบียน..... 038259
เลขเรียกหนังสือ..... T 30 279 ๗ ๒3 ก.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกแห่งที่ปรากฏไปใช้

038259

ปีการศึกษา 2539

การวิเคราะห์การกรองฮาร์มอนิกส์
Harmonics Filter Analysis



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. ศิริวัฒน์ โทธิเวชกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ปริญญาบัตรปีการศึกษา 2539

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์การกรองฮาร์มอนิกส์

ผู้จัดทำ

- 
1. นาย นรินทร์ หวังนุช
 2. นางสาว รุ่งทิพย์ เพ็ชรทิม
 3. นางสาว รุจิพร เตชทวีฤทธิ์



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์การกรองฮาร์มอนิกส์

นาย นรินทร หวังนุช
นางสาว รุ่งทิพย์ เพ็ชรทิม
นางสาว รุจิพร เตชทวีฤทธิ์
ผศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2539

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันนี้มีการใช้โหลดที่ไม่ต่อเนื่องมีมากขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดฮาร์มอนิกส์ขึ้นในระบบไฟฟ้าทำให้เกิดผลเสีย ดังนั้น โครงการนี้จะทำการศึกษาถึงพฤติกรรมของฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าเพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์การกรองฮาร์มอนิกส์มิให้เข้าสู่ระบบไฟฟ้า

ในโครงการนี้เราได้ทำการศึกษาและทดลองวงจรกรองฮาร์มอนิกส์แบบจูน โดยใช้รีแอกเตอร์ที่ปรับค่าได้ เพื่อให้เกิดการรีโซแนนซ์อนุกรมที่ฮาร์มอนิกส์ที่ต้องการ ด้วยหลักการของการอิมิตัวในแกนเหล็ก โดยการกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

HARMONICS FILTER ANALYSIS

Narintorn Wangnuch

Roongtip Phettim

Rujiphorn Techathaweerit

Assis.Prof. Siriwat Potivejakul Advisor

1996

ABSTRACT

Nowaday , the used of non-linear load is increasing which is generate harmonics that effect to the power system. Therefore , this project have researched the behavior of harmonics in the power system that lead to the harmonics filter analysing that protect the power system from harmonics by tune filter.

In this project , we have studied and test tuned filter by the variable reactor that make the series resonance at the desired harmonics. By the principle of the saturable reactor which is a variable inductance that uses the saturation in iron core by controlled the direct current

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญภาพ	III
สารบัญตาราง	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 นิยามและปริมาณต่างๆเกี่ยวกับฮาร์มอนิกส์	3
2.1.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับฮาร์มอนิกส์	3
2.1.2 ศัพท์และปริมาณต่างๆ	6
2.1.3 ประเภทของฮาร์มอนิกส์	11
2.2 แหล่งกำเนิดและผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า	17
2.2.1 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์	17
2.2.2 ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์	19
2.3 หลักการกำจัดและการลดปริมาณฮาร์มอนิกส์	26
2.3.1 กำจำกัดความเบื้องต้นของวงจรกรอง (Filter)	27
2.3.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบในการปรับตัวกรอง	28
2.3.3 การเกิดรีโซแนนซ์ขนานระหว่างคาปาซิเตอร์กับหม้อแปลง	29
2.3.4 ชนิดของฟิลเตอร์	30
บทที่ 3 รีแอกเตอร์ที่มีการอิมตัวในแกนเหล็ก	50
3.1 รีแอกเตอร์ที่มีการอิมตัวในแกนเหล็ก	50
3.2 ค่าความเหนี่ยวนำในแกนเหล็ก	51
3.3 การใช้ขดลวดกระแสตรงช่วยควบคุมการอิมตัวของรีแอกเตอร์	54
3.4 การออกแบบรีแอกเตอร์ที่มีการอิมตัวในแกนเหล็ก	57
3.5 ขนาดของรีแอกเตอร์ที่มีการอิมตัวในแกนเหล็ก	58
บทที่ 4 การคำนวณและการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกส์	61
4.1 การหาขนาดและพิกัดของรีแอกเตอร์และคาปาซิเตอร์	61
4.2 การออกแบบรีแอกเตอร์	67
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	73

	หน้า
5.1 การวัดฮาร์มอนิกส์จากอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งใช้เป็นตัวสร้างฮาร์มอนิกส์ใน โครงการนี้	73
5.1.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์	73
5.1.2 ผลการทดลองการวัดฮาร์มอนิกส์ที่มุมเฟส 90°	75
5.2 ผลการทดลองค่าอินดักแตนซ์ของรีแอคเตอร์ที่ใช้ในวงจรกรอง	76
5.3 ผลการทดลองเมื่อใส่วงจรกรองในระบบ	77
5.3.1 ผลการทดลองการกรองฮาร์มอนิกส์เมื่อมีวงจรคอนเวอร์เตอร์เป็นตัวสร้าง ฮาร์มอนิกส์	78
บทที่ 6 สรุป วิจัยและปัญหาที่พบ	83
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
หนังสืออ้างอิง	



สารบัญญภาพ

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปคลื่นแรงดันและกระแสแบบรูปไซน์	3
รูปที่ 2.2 รูปคลื่นแรงดันแบบสี่เหลี่ยม	4
รูปที่ 2.3 รูปคลื่นแบบขอดแบน	4
รูปที่ 2.4 รูปคลื่นแบบขอดแหลม	5
รูปที่ 2.5 รูปแบบของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่หลักมูล	7
รูปที่ 2.6 รูปแบบของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์	7
รูปที่ 2.7 การต่อคาปาซิเตอร์ขนานเข้าไปในระบบ	8
รูปที่ 2.8 การควบคุมกระแสที่ไหลผ่านโหลดแบบ Integral Cycle Control	11
รูปที่ 2.9 a) วงจรตัวเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟส	12
b) รูปคลื่นของแรงดันขาออก (ในอุดมคติ)	13
c) รูปคลื่นของกระแสทางด้าน AC (เป็นรูปคลื่นในอุดมคติ)	13
รูปที่ 2.10 a) แสดงรูปวงจรถูกอินโทรเรกติไฟเออร์และ	14
b) ซิงเกิลไดโอดเอกรวม	15
รูปที่ 2.11 แสดงรูปคลื่นของกระแสของวงจรถูกอินโทรเรกติไฟเออร์	15
รูปที่ 2.12 รีโชนั้นซ์ขนานที่จุด PCC	21
รูปที่ 2.13 วงจรรีโชนั้นซ์อนุกรม	22
รูปที่ 2.14 a) วงจรฟิลเตอร์ ซิงเกิลจูน	27
b) วงจรฟิลเตอร์ ซิงเกิลจูนกับค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่	27
รูปที่ 2.15 a) รูปวงจรมีความถี่สูง	28
b) กราฟระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่	28
รูปที่ 2.16 วงจรรีโชนั้นซ์แบบขนาน	29
รูปที่ 2.17 วงจรกรองฮาร์มอนิกส์	31
รูปที่ 2.18 วงจรแสดงการไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบ	33
รูปที่ 2.19 วงจรแสดงการไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบที่มีการต่อคาปาซิเตอร์เพื่อ แก้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์	35
รูปที่ 2.20 วงจรแสดงการไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบที่มีการต่อวงจรกรอง ฮาร์มอนิกส์	37
รูปที่ 2.21 วงจรกรองฮาร์มอนิกส์แบบป้องกันระบบ	39

	หน้า
รูปที่ 2.22 วงจรแสดงกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบ	40
รูปที่ 2.23 วงจรกรองฮาร์มอนิกส์แบบจูนเพื่อป้องกันระบบ	43
รูปที่ 2.24 วงจรกรองฮาร์มอนิกส์แบบป้องกันคาปาซิเตอร์	45
รูปที่ 2.25 วงจรที่มีการต่อคาปาซิเตอร์เพื่อแก้ค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์	46
รูปที่ 2.26 วงจรกรองฮาร์มอนิกส์แบบดีจูนเพื่อป้องกันคาปาซิเตอร์	48
รูปที่ 3.1 รีแอกเตอร์แบบแกนเดี่ยว	50
รูปที่ 3.2 รีแอกเตอร์แบบ 2 แกนที่มีขดลวดต่อแบบขนาน	50
รูปที่ 3.3 รีแอกเตอร์แบบ 2 แกนที่มีขดลวดต่ออนุกรม	51
รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็ก	52
รูปที่ 3.5 a) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กและความเข้มของสนามแม่เหล็ก	53
b) คลื่นแรงดันกระแสสลับแสดงถึงสถานะเมื่อเกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็ก	53
รูปที่ 3.6 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของเส้น โค้งกำเนิดแม่เหล็ก	54
รูปที่ 3.7 แสดงการเพิ่มไฟกระแสตรงช่วยในการอิ่มตัวของแกนเหล็ก	55
รูปที่ 3.8 คำสัญญาณออกของรีแอกเตอร์กับคำสัญญาณควบคุม	56
รูปที่ 3.9 แสดงรูปแกนเหล็ก E-I	58
รูปที่ 3.10 แสดงขนาดของแกนเหล็กที่ต้องการ	59
รูปที่ 4.1 รูปวงจรกรองฮาร์มอนิกส์	61
รูปที่ 4.2 วงจรกรองฮาร์มอนิกส์	64
รูปที่ 4.3 ปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่มากที่สุดเมื่อทำการต่อโหลด 2 ตัว	65
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงคุณภาพของตัวกรอง (Q)	71
รูปที่ 4.5 รูปรีแอกเตอร์ที่ได้ทำการออกแบบ	72
รูปที่ 5.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์	73
รูปที่ 5.2 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง คือ เครื่องวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์	73
รูปที่ 5.3 แผงวงจรที่ใช้ในการทดลอง	74
รูปที่ 5.4 โหลดที่ใช้ในการทดลอง	74
รูปที่ 5.5 ปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่มุมเฟส 90°	75
รูปที่ 5.6 รูปคลื่นกระแสฮาร์มอนิกส์ที่มุมเฟส 90°	75

	หน้า
รูปที่ 5.7 รูปแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	77
รูปที่ 5.8 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบเมื่อกรองฮาร์มอนิกส์ที่ 3	78
รูปที่ 5.9 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบเมื่อกรองฮาร์มอนิกส์ที่ 5	79
รูปที่ 5.10 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบเมื่อกรองฮาร์มอนิกส์ที่ 7	79
รูปที่ 5.11 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ไหลลงฟิลเตอร์ที่ฮาร์มอนิกส์ที่ 3	80
รูปที่ 5.12 ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกส์ตกคร่อมฟิลเตอร์ที่ฮาร์มอนิกส์ที่ 3	80
รูปที่ 5.13 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ไหลลงฟิลเตอร์ที่ฮาร์มอนิกส์ที่ 5	81
รูปที่ 5.14 ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกส์ตกคร่อมฟิลเตอร์ที่ฮาร์มอนิกส์ที่ 5	81
รูปที่ 5.15 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ไหลลงฟิลเตอร์ที่ฮาร์มอนิกส์ที่ 7	82
รูปที่ 5.16 ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกส์ตกคร่อมฟิลเตอร์ที่ฮาร์มอนิกส์ที่ 7	82
รูปที่ 6.1 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ก่อนใส่วงจรกรอง	83
รูปที่ 6.2 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อกรองฮาร์มอนิกส์ที่ 3	84
รูปที่ 6.3 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อกรองฮาร์มอนิกส์ที่ 5	84
รูปที่ 6.4 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อกรองฮาร์มอนิกส์ที่ 7	85

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงขนาดพิกัดของคาปาซิเตอร์และรีแอคเตอร์	66
ตารางที่ 5.1 ค่าอินดักแตนซ์ของรีแอคเตอร์ที่ใช้ในวงจรกรอง	76
ตารางที่ 5.2 ค่าอินดักแตนซ์ของรีแอคเตอร์ที่ถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรง	76



บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีในด้านต่าง ๆ ได้เจริญก้าวหน้าไปอย่างมาก การนำเทคโนโลยีทางอิเล็กทรอนิกส์ มาใช้ในด้านอุตสาหกรรมและเครื่องใช้ในสำนักงาน การนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังไปใช้ในการควบคุมเครื่องจักรกลในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากประสิทธิภาพที่ได้ค่อนข้างดี แต่มิได้หมายความว่าจะมีแต่ประโยชน์เท่านั้น เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้ไม่มีความเป็นเชิงเส้นของกระแสและแรงดัน เพราะความสัมพันธ์ระหว่างค่าชั่วขณะของกระแสและแรงดันไม่คงที่ โหลดที่ไม่มีความเป็นเชิงเส้นและมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสสูง การเปลี่ยนแปลงของกระแสอย่างฉับพลันเป็นผลทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์หรือสัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐานในระบบไฟฟ้า และความไม่เป็นเชิงเส้นจะทำให้กระแสไฟฟ้าเกิดการผิดเพี้ยนไป ดังนั้นโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นจึงเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ (Harmonic Source) ให้แก่ระบบ

อุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นสามารถแบ่งได้สามประเภทดังนี้

1. อุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power electronic Device) เช่น เครื่องแปรผัน (Convertor) สามารถใช้งานได้มากหลาย เช่น ตัวเรียงกระแส (Rectifier) คอนเวอร์เตอร์กำลังผลิต (Static Power Convertor) เครื่องควบคุมกำลังกระแสสลับใช้ไทรสเตอร์ (Thyristor A.C. power controlled) และ อินเวอร์เตอร์ (Invertor)
2. อุปกรณ์ประเภทแม่เหล็ก (Magnetizing device) อุปกรณ์จำพวกนี้ ได้แก่ หม้อแปลงมอเตอร์ เมื่อหม้อแปลงได้รับแรงดันมากเกินไปก็ทำให้เกิดกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetizing current) เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็ก
3. อุปกรณ์ประเภทอาร์ค (Arc Device) เช่น พุกเตาหลอม (Arc furnances) จะกำเนิดฮาร์มอนิกส์จำนวนมากเพราะสาเหตุจากไม่เป็นเชิงเส้น

ในระบบที่มีการรบกวนของฮาร์มอนิกส์สูงจะทำให้เกิดความร้อนสูงในตัวหม้อแปลงและสายนิวทรัลในระบบสามเฟสสี่สายได้ ซึ่งกรณีที่มีการกระชากของกระแสสูง ๆ อาจทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดวงจรได้

การป้องกันฮาร์มอนิกส์ที่ศึกษา คือ ป้องกันระบบไฟฟ้าไม่ให้ฮาร์มอนิกส์ไหลเข้าระบบ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สายไฟมีพื้นที่การใช้งานน้อยลง เนื่องจากฮาร์มอนิกส์ขี้อยู่ กระแสเต็มไวทำให้สายไฟและหม้อแปลงไหม้ได้ ทั้ง ๆ ที่ กระแสหลักมูลไม่มากนัก

วิธีการแก้ปัญหาระบบฮาร์โมนิกส์ โดยการใช่วงจรกรองฮาร์โมนิกส์แบบป้องกันระบบหรือ จูนฟิลเตอร์ (Tuned Filter) เพื่อไม่ให้กระแสฮาร์โมนิกส์ไหลเข้าไปรบกวนระบบโดยปรับค่ารีแอกเตอร์ให้เกิดรีโซแนนซ์อนุกรมกับคาปาซิเตอร์ที่ตรงกับระดับฮาร์โมนิกส์ที่มีในระบบ โดยรีแอกเตอร์ จะเป็นตัวเหนี่ยวนำที่มีการปรับค่าได้ ซึ่งอาศัยการอิมิตวในแกนเหล็กโดยใช้การปรับกระแสในขดลวดชุดควบคุม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

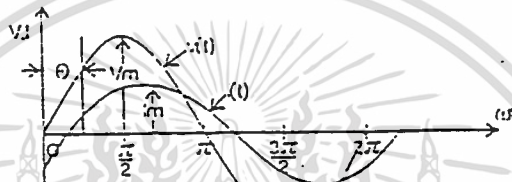
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 นิยามและปริมาณต่างๆเกี่ยวกับฮาร์มอนิกส์

2.1.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับฮาร์มอนิกส์

ไฟฟ้ากระแสสลับที่เราใช้งานกันอยู่ทุกวันนี้ โดยทั่วไปจะมีรูปคลื่นแรงดันและกระแสเป็นรูปไซน์ (Sinusoidal wave) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปคลื่นแรงดันและกระแสแบบรูปไซน์

รูปคลื่นของแรงดันและกระแส ในรูปที่ 2.1 นี้สามารถเขียนเป็นสมการแสดงขนาดที่แปรเปลี่ยนตามเวลาได้ดังนี้

$$v(t) = V_m \sin(\omega t) \quad \text{.....(2.1)}$$

หรือ

$$v(t) = V_m \sin(2\pi f t)$$

$$i(t) = I_m \sin(\omega t - \theta) \quad \text{.....(2.2)}$$

หรือ

$$i(t) = I_m \sin(2\pi f t - \theta)$$

เมื่อ

$$v(t) = \text{ขนาดของแรงดันในเวลา } t \text{ ใดๆ}$$

$$V_m = \text{ขนาดสูงสุดหรือค่ายอดของแรงดัน}$$

$$i(t) = \text{ขนาดของกระแส ณ เวลา } t \text{ ใดๆ}$$

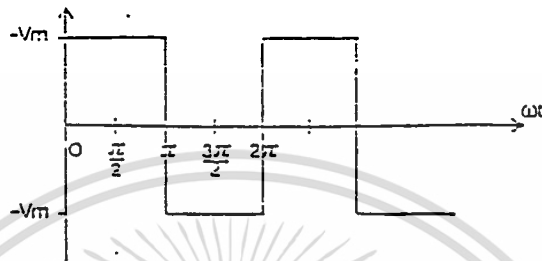
$$I_m = \text{ขนาดสูงสุด หรือ ค่ายอดของกระแส}$$

$$f = \text{ความถี่ของแรงดันและกระแส}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

θ = ขนาดของมุมที่กระแสตามหลังแรงดัน
 t = เวลา

สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ รูปคลื่นของแรงดันและกระแสไม่จำเป็นต้องเป็นรูปไซน์ อาจเป็นรูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (Square wave) ดังรูปที่ 2.2



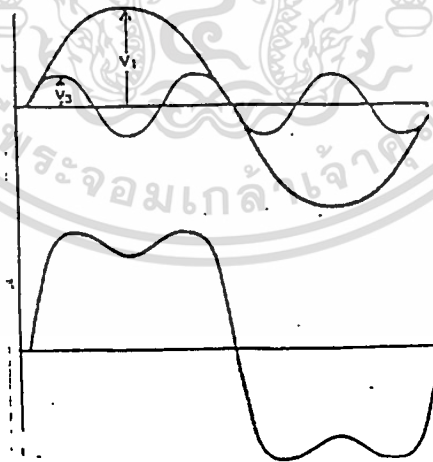
รูปที่ 2.2 รูปคลื่นของแรงดันสี่เหลี่ยม

สามารถเขียนสมการที่แปรเปลี่ยนตามเวลาได้ดังนี้

$$v(t) = \frac{4}{\pi} V_m \left[\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \dots \right] \quad \dots (2.3)$$

จากรูปที่ 2.2 พบว่าแรงดันที่รูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยมจะประกอบด้วยรูปคลื่นแบบไซน์ที่มีขนาดและความถี่ต่างๆจำนวนมากมาย

รูปที่ 2.3 เป็นรูปคลื่นแบบขดแบนเกิดจากรูปคลื่นแบบไซน์จำนวนสองชุดที่มีความถี่ต่างกันสามเท่ารวมกัน

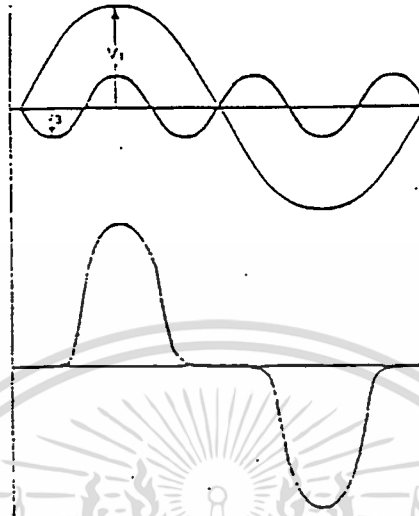


รูปที่ 2.3 รูปคลื่นแบบขดแบน

จะได้สมการว่า

$$v(t) = V_1 \sin(\omega t) + V_2 \sin(3\omega t) \quad \dots (2.4)$$

รูปที่ 2.4 รูปคลื่นแบบขอดแหลมเกิดจากรูปคลื่นแบบไซน์จำนวนสองชุดที่มีความถี่ต่างกัน
สามเท่ามารวมกันแต่มีแอมพลิจูดต่างกันดังรูป



รูปที่ 2.4 รูปคลื่นแบบขอดแหลม

จะได้สมการ

$$v(t) = V_1 \sin(\omega t) - V_3 \sin(3\omega t) \quad \dots(2.5)$$

จากรูปคลื่นต่างๆสรุปได้ว่าคลื่นแบบไซน์ แบบสามเหลี่ยม แบบขอดแบน แบบขอดแหลม
ต่างเกิดจากรูปคลื่นแบบไซน์ที่มีขนาดและความถี่ต่างๆจำนวนมากมารวมกัน

รูปคลื่น $V_m \sin(\omega t)$ ในสมการที่ 2.1 หรือ $V_m \sin(\omega t)$ ในสมการที่ 2.3 หรือ $V_1 \sin(\omega t)$ ใน
สมการที่ 2.4 และ 2.5 เราเรียกเป็น รูปคลื่นความถี่หลักมูล (Fundamental wave) รูปคลื่นอื่นๆที่มี
ความถี่ต่างไปจากรูปคลื่นความถี่หลักมูลเป็นจำนวน n เท่า โดยที่ $n = 2, 3, 4, \dots$ เช่น $4/\pi$
 $V_m (1/3) \sin(3\omega t)$ ในสมการที่ 2.3 หรือ $V_3 \sin(3\omega t)$ ในสมการที่ 2.4 และ 2.5 ที่มีความถี่เป็นสาม
เท่าของความถี่หลักมูล เราเรียกเป็นรูปคลื่นฮาร์โมนิกส์โดยมีลำดับฮาร์โมนิกส์เป็น สาม

ดังนั้น ฮาร์โมนิกส์ คือ ขนาดของแรงดันหรือกระแสที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่
หลักมูล (Fundamental frequency)

ฟังก์ชันต่างๆที่เกิดขึ้นและเป็นปัญหาในทางวิศวกรรมที่พบเห็นส่วนใหญ่ มักเป็นฟังก์ชัน
คาบ (Periodic function) ซึ่งฟังก์ชันเหล่านี้สามารถแทนให้อยู่ในเทอมของฟังก์ชันคาบของสัญญาณ
ไซน์และโคไซน์ ซึ่งสัญญาณทั้งสองนี้ ในทางปฏิบัติจะมีความสำคัญมาก และในแต่ละเทอม
ของอนุกรม (Series) ของฟังก์ชันโคไซน์และไซน์ เกิดขึ้นเนื่องจากความคิดของนักฟิสิกส์ชาว
ฝรั่งเศสชื่อ Joseph Fourier ดังนั้นเราจึงเรียกฟังก์ชันดังกล่าวว่า อนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series)

ดังนั้นรูปคลื่นของแรงดันหรือกระแสที่เป็นคาบที่มีความถี่สามารถแสดงโดยการใช้ทฤษฎีฟูรีเยร์ (Fourier theorem) ได้ โดยอาศัยอนุกรมฟูรีเยร์ตรีโกณมิติ (Trigonometric Fourier Series) ดังสมการ

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad \dots(2.6)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad \dots(2.7)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n\omega t) dt \quad \dots(2.8)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(n\omega t) dt \quad \dots(2.9)$$

เมื่อ

$f(t)$	=	อนุกรมฟูรีเยร์ของฟังก์ชัน $f(t)$
a_0	=	ค่าเฉลี่ยของ $f(t)$
a_n, b_n	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูรีเยร์
T	=	คาบเวลาของรูปคลื่น $f(t)$
n	=	เลขจำนวนเต็มบวกใดๆ (ลำดับของฮาร์โมนิกส์)

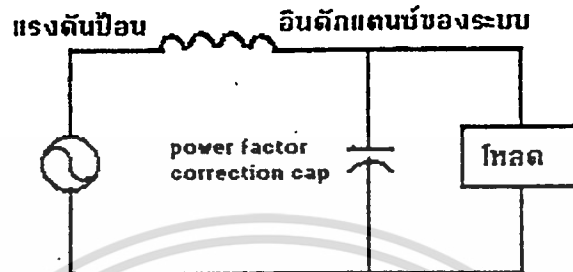
2.1.2 ศัพท์และปริมาณต่างๆ

1. ฮาร์โมนิกส์ (Harmonics)

วิชาทางไฟฟ้า ฮาร์โมนิกส์ คือ สัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล เช่น ความถี่มูลฐาน คือ 50 เฮิร์ตซ์ ฮาร์โมนิกส์ คือ 100 , 200 เฮิร์ตซ์ เป็นต้น ความถี่มูลฐานเรียกว่า ฮาร์โมนิกส์ที่ 1 ส่วนฮาร์โมนิกส์ลำดับอื่นๆก็หาได้จากการเอาเลขจำนวนเต็มบวกคูณกับความถี่มูลฐาน การวัดความถี่ฮาร์โมนิกส์สามารถทำได้หลายวิธีที่แตกต่างกันออกไป แต่โดยส่วนมากจะใช้วัดความถี่ฮาร์โมนิกส์รวม (Total harmonic distortion) ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆกัน ปริมาณของขนาดจะแสดงด้วยจำนวนเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่หลักมูลและเครื่องมือวัดฮาร์โมนิกส์ทั้งหลาย จะแสดงผลของความถี่ฮาร์โมนิกส์รวมและความถี่ฮาร์โมนิกส์แต่ละส่วนด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่หลักมูลเช่นกัน

เมื่อโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ถูกป้อนด้วยแรงดันหลักมูลบริสุทธิ์โดยแหล่งจ่ายซึ่งไม่มีค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ จะมีผลทำให้รูปร่างของกระแสมีความแตกต่างไปจากแรงดันที่ป้อนให้ ความถี่ของกระแสจะมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบจ่าย เมื่ออิมพีแดนซ์ของระบบถูกเพิ่มเข้ามา ความถี่ของกระแสจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ตัวอิมพีแดนซ์นี้จะมีผลทำ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เกิดความเพี้ยนของแรงดันดังแสดงในรูปที่ 2.5 ด้วยเหตุนี้ โหลดไม่เป็นเชิงเส้นหรือตัวผลิตฮาร์โมนิกส์จะถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสฮาร์โมนิกส์ ด้วยอิมพีแดนซ์ของระบบที่เหมาะสมดังในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 รูปแบบของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่หลักมูล



รูปที่ 2.6 รูปแบบของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์

2. กระแสฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Current)

ฮาร์โมนิกส์ที่อยู่ในรูปของกระแสในไลน์ในระบบไฟฟ้าเกิดขึ้นจากอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Devices) ซึ่งอาจเป็นโหลดหรือแหล่งกำเนิดก็ได้ ในอดีตที่ไม่มีการศึกษาฮาร์โมนิกส์อย่างจริงจัง เนื่องจากอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นมีจำนวนน้อย ทำให้ผลของฮาร์โมนิกส์ต่อระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อย แต่ในช่วงสิบปีที่ผ่านมาอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับเครื่องแปลงผัน (Converter) ได้ขยายตัวอย่างมากเป็นผลให้เกิดกระแสฮาร์โมนิกส์ขึ้นอย่างมาก

3. แรงดันฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Voltage)

เกิดจากการที่กระแสฮาร์โมนิกส์ไหลผ่านค่ารีแอกแตนซ์ (Reactance) ของระบบ (รีแอกแตนซ์ของแหล่งจ่ายของสายส่ง หรือรีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่ต่อขนานเข้าไปในระบบเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง (Power factor) และแรงดันให้ดีขึ้น) ทำให้เกิดความผิดเพี้ยน

ของรูปแรงดัน อันเนื่องมาจากรีแอกแตนซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ส่วนค่าความต้านทานไม่เปลี่ยนแปลง

กระแสฮาร์โมนิกที่ไหลในระบบนั้นจะเป็นตัวสร้างทำให้เกิดความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิก (Harmonic Voltage Distortion) ซึ่งเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$V_n = Z_n I_n \quad \dots(2.10)$$

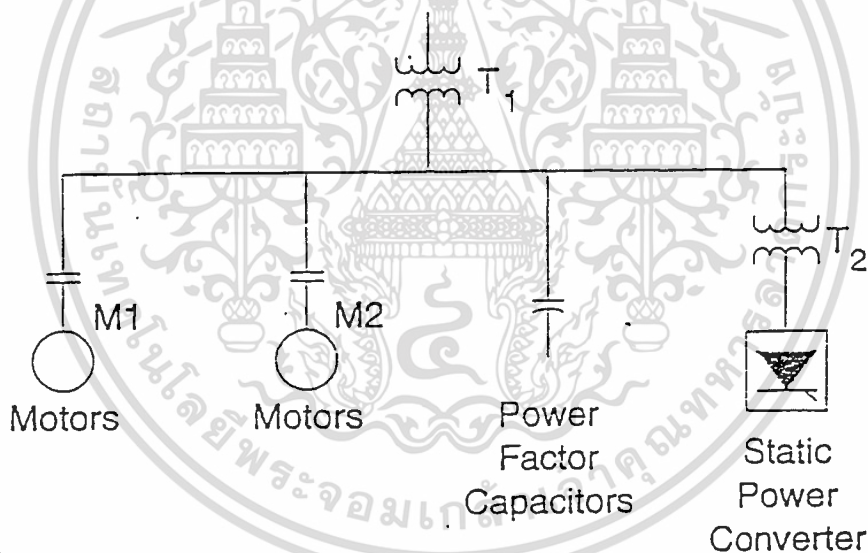
เมื่อ

$$V_n = \text{แรงดันฮาร์โมนิก}$$

$$I_n = \text{กระแสฮาร์โมนิกในระบบ}$$

$$Z_n = \text{ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ}$$

ถ้าในระบบไฟฟ้าใช้คาปาซิเตอร์ต่อขนานเข้าไปในระบบ เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง จะทำให้มีอิทธิพลต่อระดับฮาร์โมนิกในระบบจำหน่าย คาปาซิเตอร์มิได้เป็นตัวกำเนิดฮาร์โมนิก แต่จากการต่อวงจรในระบบมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดเงื่อนไขเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel resonance) ระหว่างคาปาซิเตอร์และรีแอกแตนซ์ของระบบดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การต่อคาปาซิเตอร์ขนานเข้าไปในระบบ

เมื่อพิจารณาให้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นแหล่งจ่ายกระแสฮาร์โมนิก ถ้ารีโซแนนซ์แบบขนานเกิดที่ความถี่เดียวกันหรือใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์โมนิกของโหลดไม่เป็นเชิงเส้น จะทำให้เกิดกระแสจำนวนมากไหลผ่านระหว่างรีแอกแตนซ์ของระบบและรีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ กระแสนี้จะรวมกับกระแสฮาร์โมนิกของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมรีแอกแตนซ์ของระบบ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดันมีค่ามาก (Distortion Factor)

4. ตัวประกอบความเพี้ยน (Distortion Factor) DF

ตัวประกอบฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Factor) HF

ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ทั้งหมด (Total Harmonic Distortion) THD

ความหมายทั้งสามตัวนั้นมาตรฐานของ IEEE ได้ให้ความหมายไว้เหมือนกัน กล่าวคือ ค่าที่บอกถึงปริมาณของฮาร์โมนิกส์ที่มีอยู่ทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับค่า rms ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล

IEEE 519-1992

Harmonic voltage และ Harmonic current

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

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

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

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

IEC 555-1:1992

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับมาตรฐาน IEC ได้ให้ความหมายทั้งสามตัวว่า มันคือความเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Distortion) HD กล่าวคือ บอกถึงปริมาณของฮาร์โมนิกส์ที่มีอยู่ทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับค่า rms ของปริมาณทั้งหมด

5. ลำดับฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Order)

ลำดับฮาร์โมนิกส์ คือ อัตราส่วนของความถี่ฮาร์โมนิกส์ และความถี่หลักมูล เช่น เมื่อเอ่ยถึงฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 หากความถี่หลักมูลเป็น 50 เฮิร์ตซ์ จะได้ความถี่ของฮาร์โมนิกส์ที่ 3 เป็น 150 เฮิร์ตซ์

6. ตัวประกอบกำลัง (Power Factor)

หมายถึง อัตราส่วนของกำลังงานจริง (W หรือ kW) ต่อกำลังงานปรากฏ (VA หรือ kVA) อย่างไรก็ตามหากรูปคลื่นของแรงดันและกระแสมีลักษณะรูปคลื่นไซน์ เราอาจพูดถึงตัวประกอบกำลังในเทอมค่าโคไซน์ (cosine) ของมุมเฟสระหว่างแรงดันและกระแสก็ได้

PF คือ อัตราส่วนกำลังงานจริงต่อกำลังงานปรากฏ

Displacement Power Factor (DPF) คือ อัตราส่วนของกำลังงานจริงของรูปคลื่นความถี่หลักมูลต่อกำลังงานปรากฏของรูปคลื่นความถี่หลักมูล หรืออาจกล่าวได้ว่า DPF คือ ค่าโคไซน์ของมุมเฟสของแรงดันความถี่หลักมูลกับกระแสความถี่หลักมูล

$$DPF = \frac{\text{Active Power}}{\text{Apparent Power (Fund)}}$$

$$\text{Total PF} = \frac{\text{Active Power}}{\text{Apparent Power (Total)}}$$

เมื่อ

พิกัดกำลังงานจริง (Active Power) = ผลคูณของ rms แรงดันกับ rms กระแสที่ Inphase กัน (watt)

พิกัดกำลังงานที่ปรากฏ (Apparent Power) = ผลคูณของ rms แรงดันกับ rms ของกระแส (volt-amp)

พิกัดกำลังที่ปรากฏ (Fund) ได้จาก rms ของแรงดันคูณกับ rms ของกระแสของ Fundamental

พิกัดกำลังที่ปรากฏ (Total) ได้จากการรวมเอาฮาร์โมนิกส์มาด้วยเช่น $V_1 \times \sqrt{i_1^2 + i_2^2 + i_3^2 + \dots}$

2.1.3 ประเภทของฮาร์โมนิกส์

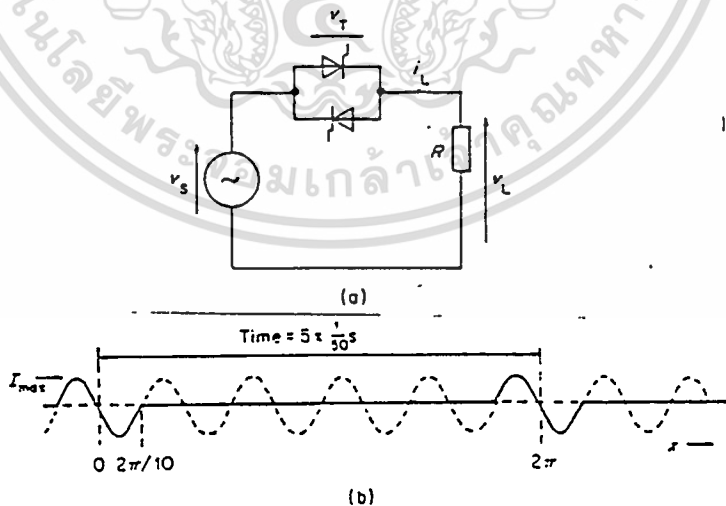
ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นปะปนอยู่ในกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าอาจแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆดังต่อไปนี้

1. ฮาร์โมนิกส์ (Harmonics)

หมายถึง ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใดๆ ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของความถี่หลักมูล เช่น รูปคลื่นสี่เหลี่ยมในรูปที่ 2.2 จะมีฮาร์โมนิกส์ปนอยู่มากตั้งแต่ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2,3,4 หรือรูปคลื่นในรูปที่ 2.3 และ 2.4 จะมีเฉพาะฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 ปนอยู่เท่านั้น

2. อินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ (Interharmonics)

หมายถึง ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใดๆ ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของความถี่หลักมูล อินเตอร์ฮาร์โมนิกส์นี้ส่วนมากจะพบในกระแสเตาหลอมแบบอาร์ค (Arc furnace) เนื่องจากในระหว่างหลอมเหล็ก โดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้นการหลอมกระแสอาร์คจะยังไม่เสถียร ทำให้คาบของกระแสไม่แน่นอน กล่าวคือ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ คาบจะกินเวลา 20 มิลลิวินาที แต่กระแสอาร์คจะมีคาบเวลาไม่เป็น 20 มิลลิวินาทีทุกคาบ ทำให้เกิดอินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ขึ้น นอกจากนี้ก็จะพบอินเตอร์ฮาร์โมนิกส์ในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการควบคุมการทำงานแบบ Integral Cycle Control หรือ Burst firing ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การควบคุมกระแสที่ไหลผ่านโหลดแบบ Integral Cycle Control

ถ้าให้ N คือจำนวน cycle ที่ ON และ M คือจำนวน cycle ที่ pattern ของรูปคลื่นกลับมาซ้ำเดิม จะคำนวณหากระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_n = - I_{max} \frac{2M \sin((N/M)n\pi)}{\pi (M^2 - N^2)} \dots(2.11)$$

จากกระแสฮาร์โมนิกส์ที่วิเคราะห์ออกมาจะพบว่ากระแสฮาร์โมนิกส์ที่ลำดับเป็นเลขลงตัวของความถี่หลักมูล 50 เฮิร์ตซ์ จะเป็นศูนย์ แต่กระแสฮาร์โมนิกส์ที่มีความถี่หรือมีลำดับไม่เป็นเลขลงตัวของความถี่หลักมูลจะมีค่าดังเช่น ฮาร์โมนิกส์ความถี่ 10 เฮิร์ตซ์ จะมีลำดับเป็น 1/5 ของความถี่หลักมูล เราจึงเรียกฮาร์โมนิกส์เหล่านี้ว่า อินเตอร์ฮาร์โมนิกส์

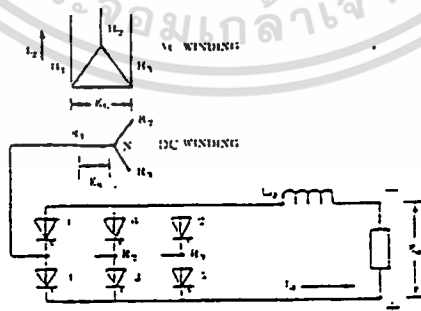
3. ฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะ (Characteristic Harmonic)

หมายถึง ฮาร์โมนิกส์ที่สร้างโดยเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้า (แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงหรือกลับกัน โดยใช้สารกึ่งตัวนำ เช่น ไคโอด , SCR เป็นสวิตช์ตัดต่อกระแส) ในสภาวะการทำงานปกติลำดับของฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะสามารถหาได้จาก

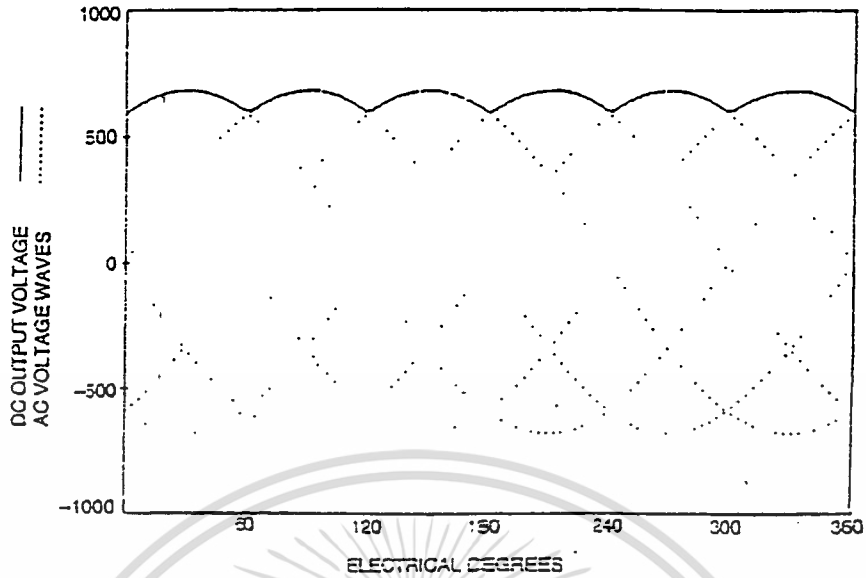
$$n = kp \pm 1 \dots(2.12)$$

เมื่อ

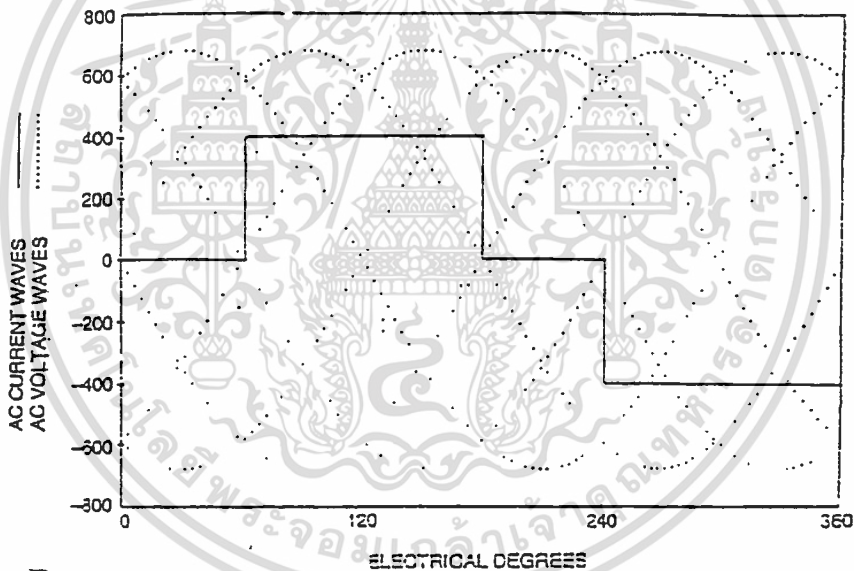
- n = ลำดับของฮาร์โมนิกส์
- k = เลขจำนวนเต็มบวกใดๆ (1,2,3,...)
- p = จำนวนพัลส์ (pulse number) ของเครื่องแปลงผันไฟฟ้า



รูปที่ 2.9 (a) วงจรตัวเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟส



รูปที่ 2.9 (b) รูปคลื่นของแรงดันขาออก (ในอุดมคติ)



รูปที่ 2.9 (c) รูปคลื่นของกระแสทางด้าน AC (เป็นรูปคลื่นในอุดมคติ)

รูปที่ 2.9 (ก) แสดงวงจรตัวเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟส ใช้ SCR จำนวน 6 ตัว ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดกระแส ดังนั้นใน 1 cycle ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จะเกิดกระแสไหลผ่าน SCR ในลักษณะกระแสพัลส์ จำนวน 6 ครั้ง จึงมีค่า P_1 เป็น 6 ในรูปที่ 2.9 (ข) แสดงรูปคลื่นของแรงดันขาออกจะเป็นแรงดันตรงที่มีความพริ้ว (Ripple) ซึ่งอยู่ ความพริ้วนี้มีการเปลี่ยนแปลง 6 cycle ใน 1 cycle ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ความพริ้ว 6 cycle จะส่งผลถึงฮาร์มอนิกส์ของกระแสทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับด้วย รูปที่ 2.9 (ค) แสดงรูปคลื่นของกระแสทางด้านกระแสสลับจากรูปคลื่นนี้เมื่อแตกออกเป็นอนุกรมฟูเรียร์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_1 = i_1 \sin(\omega t) - \frac{1}{5} \sin(5\omega t) - \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \frac{1}{11} \sin(11\omega t) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t) + \dots \quad (2.13)$$

จะพบว่ากระแสฮาร์โมนิกจะมีเฉพาะลำดับที่ $6k \pm 1$ หรือ 5,7,11,13,17,19,... เท่านั้น เราเรียกกระแสฮาร์โมนิกที่มีลำดับเหล่านี้ว่า ฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะ

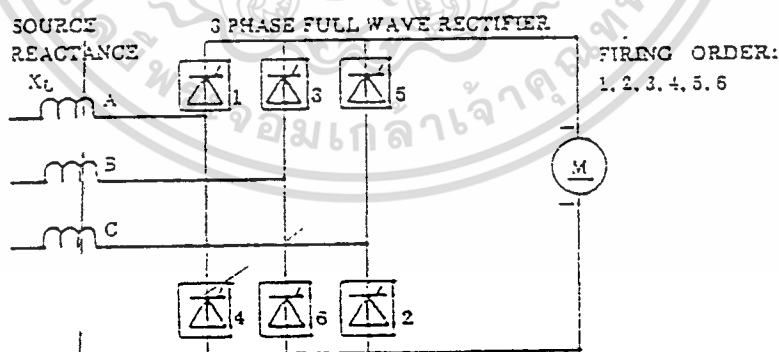
6. ฮาร์โมนิกส์ที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ (Noncharacteristic Harmonics)

หมายถึง ฮาร์โมนิกส์ที่ถูกสร้างโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้าที่ไม่เป็นไปตามสมการ $n = kp \pm 1$ เช่น เครื่องแปลงผันไฟฟ้าชนิด 12 พัลส์ ควรมีเฉพาะฮาร์โมนิกส์คุณลักษณะที่มีลำดับ 11,13,23,25,35,37 ดังนั้นถ้ามีฮาร์โมนิกส์ที่มีลำดับเป็น 5,7,17,19 ปนมาด้วย ฮาร์โมนิกส์เหล่านี้ถือว่าเป็นฮาร์โมนิกส์ที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ

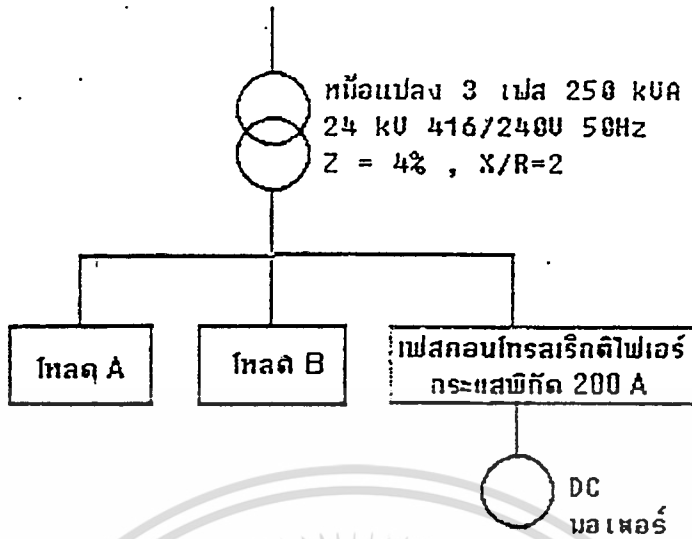
7. ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่สามหารลงตัว (Triplen Harmonics)

หมายถึง ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่สามหารลงตัว ได้แก่ ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3,6,9 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มที่มีลำดับ (sequence) เป็นศูนย์ ในกรณีที่เป็นระบบ 3 เฟส 4 สาย ฮาร์โมนิกส์กลุ่มนี้จะรวมกันไหลอยู่ในสายนิวทรัล ทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบไฟฟ้าได้เช่น สายนิวทรัลร้อน ฉนวนเสียหาย เกิดลัดวงจร เป็นต้น

ในการคำนวณหาค่าปริมาณต่างๆของวงจรเฟสคอนโทรลเรกติไฟเออร์ (Phase-Controlled Rectifier) ดังรูป

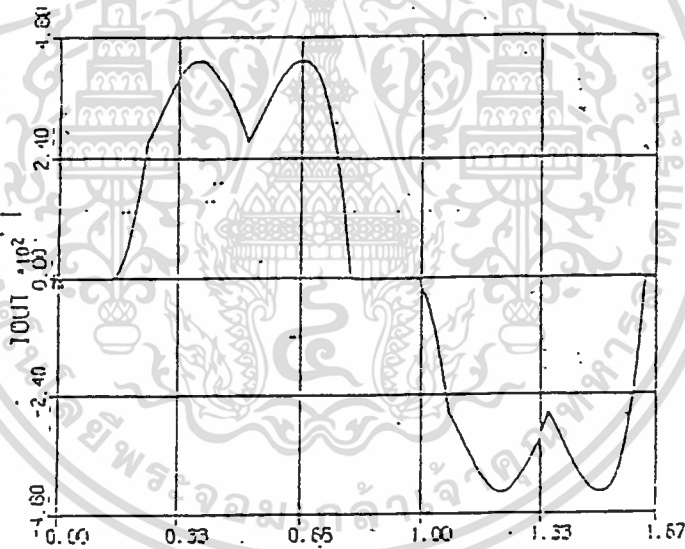


(a)



(b)

รูปที่ 2.10 (a) แสดงรูปร่างเฟสคอนโทรลเรกติไฟเออร์และ (b) ซิงเกิลไลน์ไดอะแกรม



รูปที่ 2.11 แสดงรูปคลื่นของกระแสของวงจรเฟสคอนโทรลเรกติไฟเออร์

ให้ระบบจ่ายไฟโหลด A และ B เป็นโหลดเชิงเส้น (Linear Load) และสามารถหา %THD กระแสและแรงดันที่จุด PCC ได้ดังนี้

กระแสฮาร์มอนิกส์จะมาจากเฟสคอนโทรลเรกติไฟเออร์ ปริมาณกระแสที่ฮาร์มอนิกส์
ลำดับต่างๆเป็นดังนี้

Fundamental	100%
5-TH Harmonic	20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7-TH Harmonic	14.2%
11-TH Harmonic	9.1%
13-TH Harmonic	7.7%

เพราะฉะนั้น

$$I_1 = 100\% \times 200 \text{ A} = 200 \text{ A}$$

$$I_5 = 20\% \times 200 \text{ A} = 40 \text{ A}$$

$$I_7 = 14.2\% \times 200 \text{ A} = 28.4 \text{ A}$$

$$I_{11} = 9.1\% \times 200 \text{ A} = 18.2 \text{ A}$$

$$I_{13} = 7.7\% \times 200 \text{ A} = 15.4 \text{ A}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \%THD(I) &= \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \\ &= \frac{\sqrt{40^2 + 28.4^2 + 18.2^2 + 15.4^2}}{200} \times 100\% \\ &= 27.3\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Rate amp} &= \frac{kVA}{\sqrt{3} \times V_L} \\ &= \frac{250kVA}{\sqrt{3} \times 416V} \\ &= 347 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{/phase} &= \frac{V_p \times \%Z}{\text{Rate amp} \times 100\%} \\ &= \frac{240 \times 4\%}{347 \times 100\%} \\ &= 0.028 \text{ } \Omega/\text{Phase} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{L/phase} &= Z_{/phase} \times \sin[\tan^{-1} \frac{X}{R}] \\ &= 0.028 \times 0.894 \\ &= 0.025 \text{ } \Omega/\text{Phase} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความผิดเพี้ยนของแรงดันที่ PCC หาได้จากการหาแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลงและเนื่องจากรีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ส่วนความต้านทานไม่เปลี่ยน เราคำนวณถึงค่ารีแอกแตนซ์เท่านั้น ที่ฮาร์มอนิกส์ต่างๆมีค่ารีแอกแตนซ์และแรงดันดังนี้คือ

$$n = 5 = I_5 \times 2\pi(5f)L = 40 \times 5 \times 0.025 = 5 \text{ V}$$

$$n = 7 = I_7 \times 2\pi(7f)L = 28.4 \times 7 \times 0.025 = 4.97 \text{ V}$$

$$n = 11 = I_{11} \times 2\pi(11f)L = 18.2 \times 11 \times 0.025 = 5 \text{ V}$$

$$n = 13 = I_{13} \times 2\pi(13f)L = 15.4 \times 13 \times 0.025 = 5 \text{ V}$$

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น \%THD (แรงดัน) ที่ PCC} &= \frac{\sqrt{5^2 + 4.97^2 + 5^2 + 5^2}}{240} \times 100\% \\ &= 4.16\% \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นจะเห็นได้ว่ากระแสฮาร์มอนิกส์ทำให้เกิดความเพี้ยนของแรงดันได้

2.2 แหล่งกำเนิดและผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า

2.2.1 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์

แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลังมีอยู่มากมาย อุปกรณ์ที่ถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์มีดังต่อไปนี้

1. หม้อแปลง (Transformer)

ในสถานะอยู่ตัวปกติ (Normal Steady State) หม้อแปลงไม่ทำให้เกิดการเพี้ยน (Distortion) แก่ขั้ววงจร แต่ขณะสถานะชั่วคราว (Transient) หรือขณะหม้อแปลงทำงานเกินขอบเขตปกติ จะทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์ขึ้น กรณีหม้อแปลงไม่มีโหลด แรงดันปฐมภูมิรูปคลื่นไซน์ของหม้อแปลง จะสร้างฟลักซ์รูปคลื่นไซน์ แต่กระแสปฐมภูมิจะไม่เป็นรูปไซน์ ที่เป็นเช่นนี้เพราะฟลักซ์ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสสร้างอำนาจแม่เหล็ก (Magnetizing Current)

2. เครื่องจักรไฟฟ้า (Electrical Machinery)

เครื่องจักรไฟฟ้ามีลักษณะคล้ายหม้อแปลง นั่นคือในสถานะอยู่ตัวมันไม่ทำให้เกิดการเพี้ยนแก่ขั้ววงจร แต่ในสถานะชั่วคราวหรือขณะเครื่องจักรทำงานเกินขอบเขตจะทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์ขึ้น เครื่องจักรไฟฟ้าจะผลิตกระแสฮาร์มอนิกส์ในทั้งกัซันของความเร็วกับจำนวนร่องของอาร์เมเจอร์ การออกแบบเครื่องจักรไฟฟ้าที่ดีต้องทำให้ระดับกระแสฮาร์มอนิกส์มีค่าน้อยที่สุด ในทางปฏิบัติกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับสามจะได้รับการสกัดกั้น (Block) โดยการต่อกับหม้อแปลงแบบเดลต้า

3. อุปกรณ์อาร์ก (Arc Equipment)

อุปกรณ์อาร์กมีมากมายหลายชนิดซึ่งรวมถึงเตาอาร์กขนาดใหญ่และเครื่องเชื่อม อุปกรณ์ทั้งสองทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกส์และไฟกระพริบ นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์อาร์กอื่นๆซึ่งทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกส์ได้แก่ แสงสว่างอาร์ก ที่ใช้กับถนนและลานจอดรถ การเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกส์เนื่องจากอุปกรณ์อาร์กมีขนาดเท่ากับ 10% ของกระแสฟัดด์ ในอุปกรณ์บางชนิด อาจมีค่าถึง 30% ถ้าวัดแรงดันขาออก (Output Voltage) ของเตาอาร์กจะพบว่าแรงดันฮาร์มอนิกส์เปลี่ยนแปลงอย่างมากและมีค่าไม่แน่นอน ตัวอย่างเช่น

- ขณะเริ่มหลอม (Meltdown) แรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 5 มีขนาด 8% เมื่อเทียบกับแรงดันหลักมูล (Fundamental Voltage)

- เมื่อสิ้นสุดการหลอม (End of Meltdown) แรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 5 มีขนาด 6%

- ขณะถลุงแร่ (Refining) แรงดันฮาร์มอนิกส์อันดับ 5 มีขนาด 2.5%

4. หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent)

หลอดฟลูออเรสเซนต์นิยมใช้มากในบ้านเรือนและในอุตสาหกรรมบางชนิด จึงถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกส์ที่สำคัญ การปล่อยประจุ (Discharge) ในหลอดฟลูออเรสเซนต์ถือว่าเป็นแบบไม่เชิงเส้นอย่างมาก (Highly Non-Linear) ซึ่งทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับคี่ (Odd-Ordered Harmonic Current)

5. เครื่องแปลงผัน (Converter)

เครื่องแปลงผันใช้กันอย่างกว้างขวาง ตั้งแต่ในบ้านจนถึงในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ การที่เครื่องอุปกรณ์นี้ได้รับความนิยมอย่างมากเนื่องจากมันมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง เครื่องแปลงผันขนาดเล็กจะเป็นหนึ่งเฟส โดยใช้กับอุปกรณ์จำพวก

- เครื่องรับโทรทัศน์
- คอมพิวเตอร์
- อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในบ้าน

เครื่องแปลงผันสามเฟสที่กันทั่วไปจะทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

กรณี AC/DC ใช้เป็นแหล่งจ่ายให้แก่ มอเตอร์กระแสตรง แบตเตอรี่ หรือ กระบวนการเคมี (Chemical Process)

กรณี AC/DC/AC ใช้กับมอเตอร์ซิงโครนัสหรือมอเตอร์เหนี่ยวนำ การที่ต้องเปลี่ยนจาก DC เป็น AC อีกครั้งเพื่อทำให้มอเตอร์สามารถจ่ายกำลังที่ความถี่มากกว่า 50 เฮิร์ตซ์



เครื่องแปลงผันสามารถแบ่งแยกได้ตามจำนวนพัลส์ เช่น 3,6,12,18,24 และมากกว่านี้ จำนวนพัลส์จะบอกถึงอุปกรณ์เปิด - ปิดดวงจร ที่ใช้โซลิดสเตต (Solid State Switching Devices)ซึ่งโดยปกติใช้ ไทริสเตอร์ควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากมุมจุดชนวนของมันควบคุมได้ง่าย งานทั่วไปนิยมใช้ 6 พัลส์ หรือ 12 พัลส์ สำหรับงานที่ต้องการกำลังต่ำจะใช้ 3 พัลส์ งานที่ต้องการกำลังสูงจะใช้ 18 พัลส์ หรือมากกว่านี้

สำหรับเครื่องแปลงผันสามารถหาอันดับและขนาดฮาร์มอนิกส์ได้ตามสมการ

$$n = kq \pm 1 \quad \dots(2.14)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} n &= \text{อันดับฮาร์มอนิกส์} \\ k &= \text{เลขจำนวนเต็มบวก มีค่าเท่ากับ 1,2,3} \\ q &= \text{จำนวนพัลส์ของเครื่องแปลงผัน} \end{aligned}$$

และ

$$I_n = I_1/n \quad \dots(2.15)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} I_n &= \text{กระแสฮาร์มอนิกส์อันดับ } n \\ I_1 &= \text{กระแสที่ความถี่หลักมูล} \\ n &= \text{อันดับฮาร์มอนิกส์} \end{aligned}$$

2.2.2 ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์

แรงดันและกระแสฮาร์มอนิกส์มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังดังนี้

- ทำให้เกิดการขยายระดับฮาร์มอนิกส์ เนื่องจากผลของรีโซแนนซ์อนุกรมและขนาน
- ทำให้การผลิตกำลังไฟฟ้า การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และการใช้กำลังไฟฟ้า มีประสิทธิภาพลดลง
- ทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์เสื่อมสภาพ เป็นผลให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง
- ทำให้โรงจักรทำงานผิดพลาด (Plant Maloperation)

ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่มีต่อระบบอื่นและอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังมีดังนี้

1. ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อการเกิดรีโซแนนซ์

คาปาซิเตอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ในระบบ อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการรีโซแนนซ์เฉพาะแห่ง ซึ่งจะเป็นเหตุให้คาปาซิเตอร์ได้รับกระแสที่มากเกินไป เป็นเหตุให้คาปาซิเตอร์เสียหายได้

1.1 รีโซแนนซ์ขนาน

ผลของรีโซแนนซ์ขนานคือการเกิดอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงขึ้นกับแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์ที่มีความถี่รีโซแนนซ์ โดยส่วนมากแล้วจะพิจารณาแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์เป็นแหล่งจ่ายกระแส ดังนั้นผลของรีโซแนนซ์ขนานคือจะเพิ่มฮาร์มอนิกส์โวลต์เตจและจะเกิดกระแสไหลในแต่ละสาขาของวงจรรีโซแนนซ์มีค่าสูง ดังในรูปที่ 2.12 แสดงการเกิดรีโซแนนซ์ขึ้นที่จุด PCC (Point of Common Coupling) ซึ่งรีโซแนนซ์เกิดขึ้นได้หลายแบบคือ

1.1.1 รีโซแนนซ์ขนานระหว่างแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์กับคาปาซิเตอร์ที่บัสบาร์เดียวกัน โดยสมมติให้อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายเป็นอินดักแตนซ์ล้วนๆจะได้

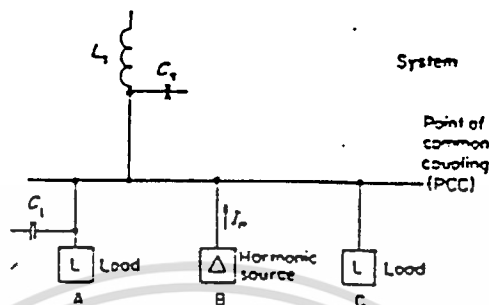
$$f_p = f \sqrt{\frac{S_s}{S_c}}$$

โดยที่

f	=	ความถี่หลักมูล
f_p	=	ความถี่รีโซแนนซ์ขนาน
S_s	=	พิกัดกำลังลัดวงจรของแหล่งจ่าย (Var)
S_c	=	พิกัดของคาปาซิเตอร์ (Var)

1.1.2 รีโซแนนซ์ขนานระหว่างอินดักแตนซ์ของระบบกับคาปาซิแดนซ์ของระบบ

1.1.3 รีโซแนนซ์ขนานระหว่างอินดักแตนซ์ของระบบกับโหลดที่เป็นคาปาซิเตอร์ในการที่จะตรวจสอบว่าเกิดรีโซแนนซ์ขนานขึ้นหรือไม่ สามารถทำได้โดยการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ในโหลดที่ต่ออยู่ในระบบแต่ละจุด และวัดโวลต์เตจฮาร์มอนิกส์ที่บัสบาร์แล้วทำการวิเคราะห์สภาวะที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.12 รีโซแนนซ์ขนานที่จุด PCC

1.2 รีโซแนนซ์อนุกรม

พิจารณารูปที่ 2.13 เมื่อความถี่มีค่าสูงมากๆ อาจทำให้โหลดถูกตัดออกจากระบบได้เช่นเดียวกับการเกิดรีโซแนนซ์แบบอนุกรมระหว่างหม้อแปลงกับคาปาซิเตอร์ซึ่งจะเกิดขึ้นที่ความถี่รีโซแนนซ์ หาได้จาก

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

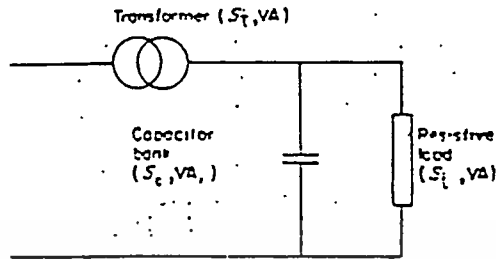
f_s = ความถี่รีโซแนนซ์แบบอนุกรม

S_t = พิกัดหม้อแปลงไฟฟ้า

Z_t = เพอร์ยูนิติอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

S_c = พิกัดของโหลด (ความต้านทาน)

ผลที่เกิดขึ้นจากรีโซแนนซ์อนุกรม คือ กระแสคาปาซิเตอร์จะมีค่าสูง
ฮาร์มอนิกส์โวลต์เดจจะมีค่าน้อย



รูปที่ 2.13 วงจรรีโซแนนซ์อนุกรม

2. ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อระบบสายส่ง

เมื่อมีกระแสฮาร์มอนิกส์ไหลในระบบสายส่งทำให้เกิดผลเสียหลัก 2 ประการ

1. ทำให้กำลังสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้น โดยเป็นผลมาจากค่าอาร์เอ็มเอสของ

รูปคลื่นกระแสตามสมการ

$$P_L = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n$$

โดยที่

$$P_L = \text{กำลังสูญเสียในระบบ}$$

$$I_n = \text{กระแสฮาร์มอนิกส์อันดับที่ } n \text{ (ค่าอาร์เอ็มเอส)}$$

$$R_n = \text{ความต้านทานระบบที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์}$$

2. ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์วงจร โดยเป็นผลของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ไหลในวงจร กรณีระบบไม่มั่นคง (Weak System) คือ ระบบมีอิมพีแดนซ์สูงและมีระดับฟอลต์ต่ำ (Low Fault Level) ทำให้เกิดแรงดันตกมากเป็นผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของแรงดัน ซึ่งผิดกับระบบมั่นคง (Stiff System) ที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำและมีระดับฟอลต์สูง

แรงดันตกคร่อมนี้มีผลต่อเคเบิลทำให้เกิดความเครียดไดอิเล็กตริก (Dielectric Stress) สูงกว่าปกติ เป็นผลให้อายุการใช้งานของเคเบิลสั้นลงและทำให้เกิดฟอลต์ได้ง่าย

3. ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อหม้อแปลง

ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อหม้อแปลง มี 3 ประการดังนี้

1. กระแสฮาร์มอนิกส์ทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและกำลังสูญเสียสเตรย์ฟลักซ์ (Stray Flux Loss) มีค่าเพิ่มขึ้น
2. แรงดันฮาร์มอนิกส์ทำให้กำลังสูญเสียกระแสไหลวน (Eddy Current Loss) และกำลังสูญเสียฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loss) เพิ่มขึ้น โดยถ้าแหล่งจ่าย จ่ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้หม้อแปลง กำลังสูญเสียแกนเหล็กของหม้อแปลงจะเป็นไปตามสมการ

$$P_{CORE} = (k_1 f + k_2 f^2) V^2 \quad \text{.....(2.17)}$$

โดยที่

$$\begin{aligned} P_{CORE} &= \text{กำลังสูญเสียแกนเหล็ก} \\ k_1 f &= \text{กำลังสูญเสียฮิสเทอรีซิส} \\ k_2 f^2 &= \text{กำลังสูญเสียกระแสไหลวนในแกนเหล็ก} \\ V &= \text{แรงดันรูปคลื่น ไซน์ของแหล่งจ่าย} \end{aligned}$$

3. ทำให้เกิดรีโซแนนซ์ (ที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์) ระหว่างขดลวดหม้อแปลงกับคาปาซิเตอร์ของสาย (Line Capacitor)

จะเห็นว่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงเกิดจากกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกส์ ซึ่งขึ้นกับความถี่ โดยที่กำลังสูญเสียจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่ม ดังนั้นที่ฮาร์มอนิกส์สูงจะทำให้เกิดความร้อนแก่หม้อแปลงมากกว่าฮาร์มอนิกส์ต่ำๆ อย่างไรก็ตามผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อหม้อแปลงยังไม่มีมาตรฐานกำหนด

4. ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อเครื่องจักรไฟฟ้า

ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อเครื่องจักรไฟฟ้า ทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและไม่มีโหลดเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เครื่องจักรร้อนกว่าปกติ นอกจากนี้ฮาร์มอนิกส์ยังมีผลต่อประสิทธิภาพและแรงบิดของเครื่องจักรด้วย

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีแหล่งจ่ายไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ (Nonsinusoidal Supply) จะสร้างคลื่นความหนาแน่นฟลักซ์ (Flux Density Wave) รบกวนอย่างมาก เมื่อเทียบกับกรณีมีแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal Supply) ฮาร์มอนิกส์จะทำให้เกิดฟลักซ์ผลลัพท์กระจายในช่องอากาศ (Air Gap) และทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า คอกกิง (Cogging) คือการที่ไม่สามารถเดินเครื่องได้ หรือเกิดครอลิง (Crawling) คือการที่ความเร็วมอเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส ซึ่งยังไม่มีมาตรฐานกำหนดแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกส์สำหรับมอเตอร์

5. ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อสวิตช์เกียร์

กระแสฮาร์มอนิกส์จะเพิ่มความร้อนและกำลังสูญเสียให้แก่สวิตช์เกียร์ ส่วนประกอบฮาร์มอนิกส์ในรูปคลื่นกระแส มีผลกระทบต่อความสามารถในการตัดกระแส (Current Interruption Capability) ของสวิตช์เกียร์ เป็นผลให้การทำการตัด (Making Interruption) ยากมาก เซอร์กิตเบรกเกอร์จะไม่สามารถตัดกระแสเมื่อมีฮาร์มอนิกส์ ทั้งนี้เนื่องจากขดลวดเป่าดับอาร์ก (Blowout Coils) ซึ่งทำหน้าที่ช่วยให้อาร์กเข้าไปในอาร์กชุต (Arc-Chute) เพื่อทำการตัด ทำงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพ เป็นผลให้อาร์กไม่ขาดทำให้เบรกเกอร์ไม่สามารถตัดกระแสได้ ปัญหานี้จะเกิดกับอุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ตัดกระแส เช่น โหลดเบรกสวิตช์ ตัวปิด-เปิดวงจร เป็นต้น แต่เบรกเกอร์สูญญากาศ จะมีความไวน้อยต่อกระแสฮาร์มอนิกส์

ปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานทางอุตสาหกรรมในการกำหนดระดับของฮาร์มอนิกส์ที่สวิตช์เกียร์สามารถตัดได้ เนื่องจากการทดสอบดังกล่าวจะทำให้ความถี่พิกัดของแหล่งจ่ายไฟ

6. ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อเบงก์คาปาซิเตอร์

ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ ทำให้เกิดความร้อนและความเครียดไดอิเล็กตริก (Dielectric Stress) กับคาปาซิเตอร์อย่างมาก การเพิ่มขึ้นของแรงดันทำให้เกิดกำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์เป็นไปตามสมการ

$$P_L = \sum_{n=1}^{\infty} C(\tan \delta) \omega_n v_n^2 \quad \dots(2.18)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
 P_L &= \text{กำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์} \\
 \tan \delta &= R/(1/\omega C) \text{ แฟกเตอร์การสูญเสีย (Loss Factor)} \\
 \omega_n &= 2\pi f_n \\
 V_n &= \text{แรงดันอาร์เอ็มเอสฮาร์มอนิกอันดับ } n
 \end{aligned}$$

ยิ่งกว่านั้นกำลังงานรีแอกทีฟ (Reactive Power) ก็ยังมีฮาร์มอนิกสรวมอยู่

ด้วย ดังเช่น

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \quad \text{.....(2.19)}$$

ผลของรีโซแนนซ์อนุกรมและขนานที่ตัวเก็บประจุเป็นสาเหตุของศักดาและกระแสที่มากเกินไป ช่วยให้มีความสูญเสียและความร้อนสูงขึ้น ทำให้เกิดความเสียหายแก่ตัวเก็บประจุได้

7. ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบป้องกันของระบบไฟฟ้ากำลัง

- ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อรีเลย์สามารถสรุปได้ดังนี้
- ฮาร์มอนิกทำให้รีเลย์มีแนวโน้มที่จะทำงานช้าลง หรือทำงานด้วยค่าเริ่ม (Pickup values) ที่สูงขึ้นแทนที่จะทำงานอย่างรวดเร็วหรือทำงานด้วยค่าเริ่มต่ำๆ
 - ฮาร์มอนิกทำให้รีเลย์สถิตแบบความถี่ต่ำ (Static under frequency relay) มีความไวกว่าปกติทำให้การทริปผิดพลาด
 - ฮาร์มอนิกทำให้รีเลย์กระแสและแรงดันเกิน (Overcurrent and overvoltage relay) เปลี่ยนลักษณะการทำงาน (Operating characteristics)
 - ฮาร์มอนิกทำให้แรงบิดทำงาน (Operating torque) ของรีเลย์กลับทิศทาง
 - ฮาร์มอนิกทำให้อิมพีแดนซ์รีเลย์ชนิดคานสมดุลย์ (Balanced beam impedance relay) วัตรระยะที่เกิดฟอลต์ผิดพลาดมากเกินไป (Over reach) หรือน้อยเกินไป (Under reach)
 - ฮาร์มอนิกทำให้ความเร็วในการทำงานของรีเลย์ชนิดผลต่างช้าลง (Differential relay)

โดยทั่วไประดับฮาร์มอนิกที่ทำให้รีเลย์ทำงานผิดพลาดจะสูงกว่าอุปกรณ์อื่นๆ ชีตจำกัดของฮาร์มอนิก ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ จึงจะเกิดปัญหากับรีเลย์

8. ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อมิเตอร์วัดไฟฟ้า

มิเตอร์และเครื่องวัดต่างๆก่อนการใช้งานต้องทำการปรับแต่ง (Calibration) ที่กระแสไฟสลับรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่หลักมูล ดังนั้นถ้านำมาใช้กับระบบที่มีฮาร์มอนิกส์ค่าที่วัดได้จะผิดพลาด หรือกรณีเกิดรีโซแนนซ์ในระบบ มีผลทำให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกส์ค่าสูงในวงจร ทำให้มิเตอร์ประเภทงานเหนี่ยวนำ (Induction Disk) เช่น มิเตอร์ วัดค-ชั่วโมง (Watt-hour Meter) ทำงานผิดพลาดเนื่องจากการเพี้ยนของฮาร์มอนิกส์โดยทั่วไปการเพี้ยนของฮาร์มอนิกส์มากกว่า 20% จะมีผลต่อมิเตอร์

9. ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่ออุปกรณ์ผู้ใช้ไฟฟ้า

- เครื่องรับโทรทัศน์ ฮาร์มอนิกส์จะมีผลต่อแรงดันยอด (Peak Voltage) ทำให้ขนาดและความสว่างของภาพเปลี่ยนไป

- หลอดฟลูออเรสเซนต์และหลอดเมอคิวรีอาร์ก การทำงานของหลอดชนิดนี้ต้องมีบัลลาสต์ บางครั้งมีคาปาซิเตอร์ด้วย จึงอาจเกิดรีโซแนนซ์กับอินดักแตนซ์ของบัลลาสต์และวงจร ทำให้หลอดเกิดความร้อนสูงจนเกิดความเสียหาย

- คอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์จะไวต่อความเพี้ยนของฮาร์มอนิกส์อย่างมากทุกบริษัทมีขีดจำกัดฮาร์มอนิกส์ค่าหนึ่งที่เครื่องสามารถทนได้ ซึ่งขึ้นกับการออกแบบของแต่ละบริษัท

ถ้าระบบไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกส์มากกว่าขีดจำกัดนี้ จะทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์เสียหายได้

10.ผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ต่อระบบสื่อสาร

ฮาร์มอนิกส์จะก่อให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) ในระบบสื่อสาร ทำให้คุณภาพของการส่งสัญญาณลดลง สัญญาณรบกวนระดับต่ำ (Low Level Noise) เช่น ในระบบโทรศัพท์อาจก่อให้เกิดความรำคาญ ฮาร์มอนิกส์จะเหนี่ยวนำให้เกิดสัญญาณรบกวนทำให้ได้ยินเสียงเบากว่าปกติ หรือมีเสียงรบกวน แต่ที่ระดับสูง (High Level Noise) ฮาร์มอนิกส์ทำให้คุณภาพการส่งลดลงและอาจเกิดการสูญเสียของข่าวสาร หรือระบบสื่อสารถึงกับใช้การไม่ได้

2.3 หลักการกำจัดและการลดปริมาณฮาร์มอนิกส์

จุดประสงค์ เพื่อลดขนาดของโวลต์เตจหรือขนาดของกระแสที่ความถี่หนึ่ง หรือที่หลายๆความถี่ที่เราไม่ต้องการ

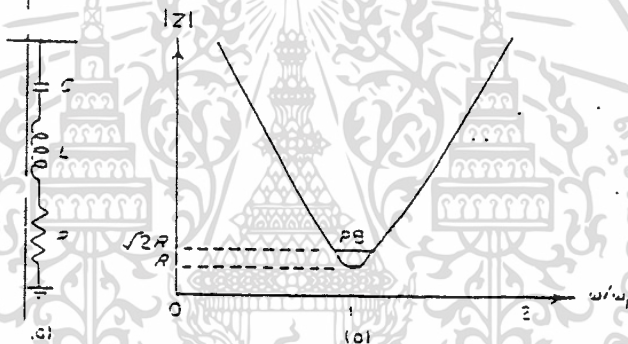
2.3.1 คำจำกัดความเบื้องต้นของวงจรกรอง (Filter)

ฟิลเตอร์เป็นวงจรกรองที่ทำงานโดยที่อาศัยการปรับความถี่เพื่อให้ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ

คุณภาพของตัวกรอง (Q) เป็นตัวที่ใช้บอกค่าความคม ความเที่ยงตรง ในการปรับตัวกรอง โดยที่เราจะสามารถอาศัยคุณภาพของตัวกรองเป็นเกณฑ์แบ่งชนิดของตัวกรองได้เป็น 2 แบบดังนี้

1. ชนิดที่มีค่าคุณภาพของตัวกรอง (Q) สูง

โดยปกติจะมีค่าคุณภาพอยู่ในช่วง 30-60 และใช้ในกรณีที่ปรับเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่หนึ่งซึ่งมีความถี่ต่ำ วงจรกรองผ่านแถบความถี่ (Band Pass Filter)



รูปที่ 2.14 (a) วงจรฟิลเตอร์ ซิงเกิลจูน (b) วงจรฟิลเตอร์ ซิงเกิลจูน กับค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่

$$Q = X_0/R = \omega_n/PB \quad \dots(2.20)$$

โดยที่

X_0 เป็นค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำหรือค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ

R แทนค่ารีซิสแตนซ์

ω_n แทนค่าความถี่ที่เราปรับในหน่วยเรเดียนต่อวินาที

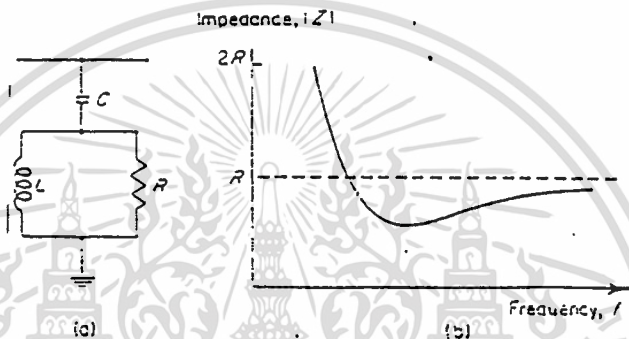
PB เป็นช่วงความถี่ที่ผ่าน (Pass Band)

2. ชนิดที่มีค่าคุณภาพของตัวกรอง (Q) ต่ำ

โดยปกติจะมีค่าคุณภาพอยู่ในช่วง 0.5-5.0 และใช้ในกรณีที่กำลังจัดฮาร์โมนิกที่มีความถี่สูงๆ เช่น ฮาร์โมนิกที่ 17 ขึ้นไป

วงจรกรองผ่านความถี่สูง (High Pass Filter)

$$Q = X_L/R \quad \dots(2.21)$$



รูปที่ 2.15 (a) รูปวงจรผ่านความถี่สูง (b) กราฟระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่

2.3.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อในการปรับตัวกรอง

1. การเปลี่ยนแปลงของความถี่หลักมูล
2. การเปลี่ยนแปลงค่าการเก็บประจุ และ ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรองตาม

อายุการใช้งานและอุณหภูมิ

3. ความคลาดเคลื่อนจากการผลิตและขนาดที่จำกัดของลำดับชั้นการจูนความถี่การจูนของดีจูน แสดงตามสมการ

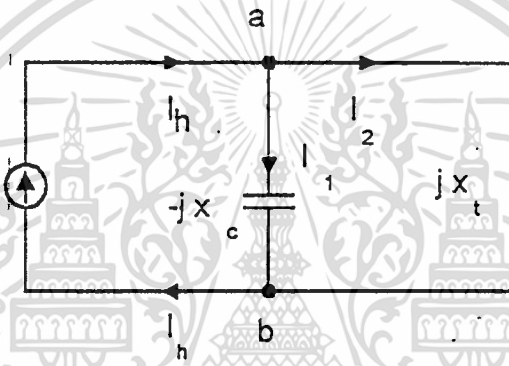
$$\delta = (\omega - \omega_n)/\omega \quad \dots(2.22)$$

นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของ L และ C ไป 2 % เหมือนการเปลี่ยนความถี่ของระบบไป 1 % แสดงตามสมการเป็น

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right) \quad \dots(2.23)$$

2.3.3 การเกิดรีโซแนนซ์ขนานระหว่างคาปาซิเตอร์กับหม้อแปลง

ในทุกะบบไฟฟ้าจะต้องมีฮาร์มอนิกอยู่ด้วยเสมอ เพียงแต่ระบบส่วนใหญ่ จะมีขนาดเล็กมากจนถือได้ว่าในระบบนั้นไม่มีฮาร์มอนิก และถึงแม้ในบางระบบจะพบว่ามีฮาร์มอนิกค่อนข้างใหญ่อยู่ก็ตาม ฮาร์มอนิกที่พบมักจะมีขนาดใหญ่ไม่พอที่จะส่งผลกระทบไปยังอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีใช้อยู่ในระบบนั้นๆ หากแต่ว่าผลกระทบของฮาร์มอนิกมีโอกาสเพิ่มขึ้นได้ ภายหลังจากที่มีการติดตั้งคาปาซิเตอร์เข้าไปและเกิดรีโซแนนซ์ขนานขึ้นระหว่างคาปาซิเตอร์ กับหม้อแปลงซึ่งนับว่าเป็นโพลคะนิตขลวขนาดใหญ่มากที่สุดที่มีอยู่ในแต่ละระบบ

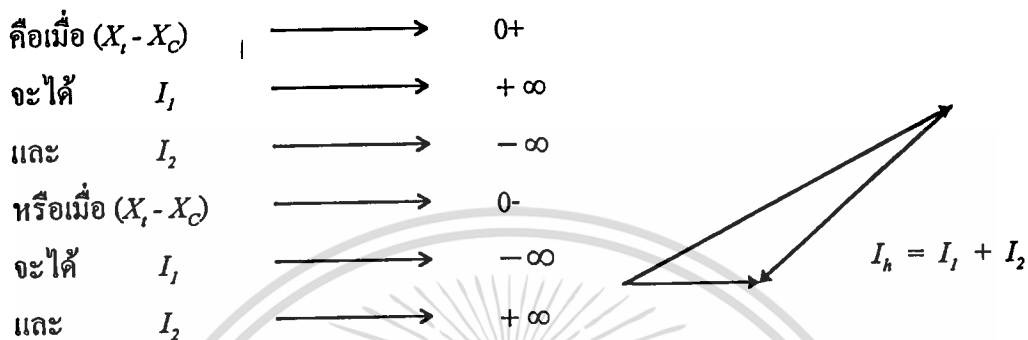


รูปที่ 2.16 วงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน

ในการพิจารณาปัญหาฮาร์มอนิก จะถือว่าอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวมาแล้วเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่ผลิตกระแสฮาร์มอนิกค่า I_h ออกมาเมื่อนำคาปาซิเตอร์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ $-jX_c$ และหม้อแปลงที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ jX_t มาต่อขนานเข้ากับแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกดังกล่าว จะเกิดกระแสฮาร์มอนิก I_1 และ I_2 แยกไหลโดย

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \frac{jX_t}{jX_t - jX_c} \times I_h \\
 &= \frac{X_t}{X_t - X_c} \times I_h \\
 I_2 &= \frac{-jX_c}{jX_t - jX_c} \times I_h \\
 &= \frac{X_c}{X_t - X_c} \times I_h \\
 V_{ab} &= I_1 X_c = I_2 X_t
 \end{aligned}$$

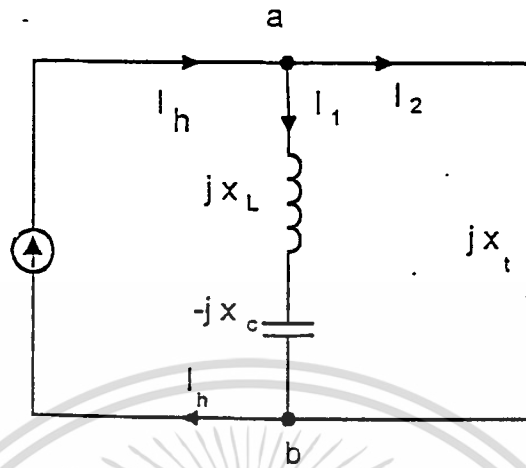
ในกรณีที่เกิดรีโซแนนซ์ขนานระหว่างคาปาซิเตอร์กับหม้อแปลง คือ $X_C = X_L$ จะพบว่า I_1 และ I_2 มีขนาดใหญ่กว่ามาก (เมื่อเทียบกับขนาดของ I_h) ทั้งๆที่ I_h มีขนาดไม่ใหญ่นัก และแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกส์คร่อมคาปาซิเตอร์ ($X_C - X_L$) และหม้อแปลงก็จะมีขนาดใหญ่กว่าด้วย



ขนาดที่ใหญ่มากของกระแสฮาร์มอนิกส์และแรงดันฮาร์มอนิกส์ในวงจรไฟฟ้าที่เกิดรีโซแนนซ์ขนานเช่นนี้ จะส่งผลกระทบต่อไปยังอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆที่มีใช้งานอยู่ในระบบทำให้เกิดการทำงานผิดปกติ หรือเกิดการเสียหายอย่างรุนแรง หรือมีอายุการใช้งานสั้นลง ดังนั้นจึงต้องระวังมิให้เกิดรีโซแนนซ์ขนานขึ้นที่ฮาร์มอนิกส์ที่ตรงพอดี หรือใกล้เคียงอย่างมากกับฮาร์มอนิกส์ที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้านั้น เนื่องจาก X_C มีขนาดเกือบคงที่ (สาเหตุที่ไม่คงที่ ก็เพราะมีค่าอิมพีแดนซ์ของขั้วไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย) ดังนั้นจึงมีหนทางหลีกเลี่ยงมิให้เกิดรีโซแนนซ์ขึ้นที่ฮาร์มอนิกส์ที่มีอยู่ในระบบได้ โดยเลือกใช้ค่าคาปาซิเตอร์ที่มีขนาด X_C ไม่เท่าและไม่ใกล้เคียงกับ X_L ที่ความถี่ของฮาร์มอนิกส์นั้น แต่ในทางปฏิบัติแล้ววิธีการนี้ใช้ไม่ค่อยได้ผล เพราะฮาร์มอนิกส์มีได้มีอยู่เพียงตัวเดียว อีกทั้งค่าของ X_C ก็ไม่คงที่

2.3.4 ชนิดของฟิลเตอร์

วงจรกรองฮาร์มอนิกส์แบบป้องกันระบบหรือจูนฟิลเตอร์ (Tune Filter) และ วงจรกรองฮาร์มอนิกส์แบบป้องกันคาปาซิเตอร์หรือดีจูนฟิลเตอร์ (Detune Filter) ทั้งวงจรของแบบจูนและดีจูนจะเป็นวงจรเดียวกัน แต่อาศัยหลักการในการปรับค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและของตัวเก็บประจุที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.17

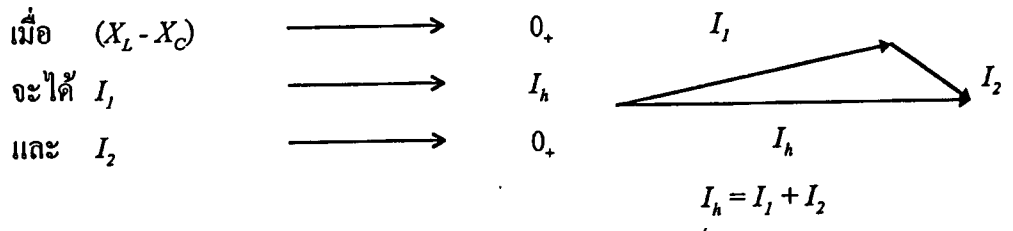


รูปที่ 2.17 วงจรกรองฮาร์มอนิกส์

จากวงจรจะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \frac{jX_t}{jX_t + jX_L - jX_C} \times I_h \\
 &= \frac{X_t}{X_t - (X_L - X_C)} \times I_h \\
 I_1 &= \frac{jX_L - jX_C}{jX_t + jX_L - jX_C} \times I_h \\
 &= \frac{X_L - X_C}{X_t + (X_L - X_C)} \times I_h
 \end{aligned}$$

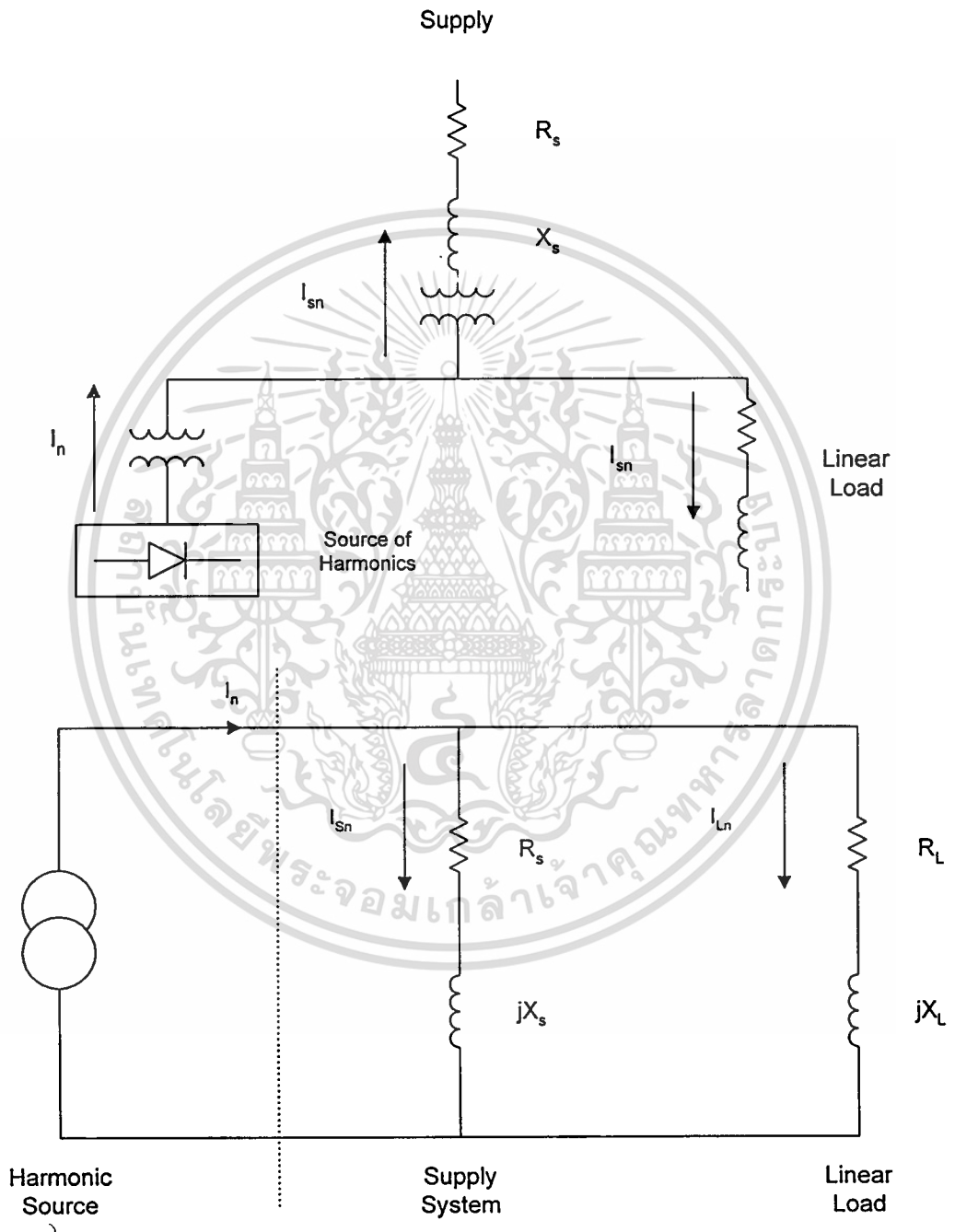
วงจรจูน ประกอบด้วยรีแอกเตอร์ต่ออนุกรมเข้ากับคาปาซิเตอร์ เช่นเดียวกับ วงจรคิจูน แต่การเลือกขนาดรีแอกเตอร์มีหลักการต่างกันคือ ในวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ จะเลือกใช้รีแอกเตอร์ขนาดที่ทำให้เกิดรีโซแนนซ์อนุกรมกับคาปาซิเตอร์ที่ฮาร์มอนิกส์อันดับต่ำกว่า ฮาร์มอนิกส์ที่ต้องการกำจัดเล็กน้อย จะพบว่ากระแสฮาร์มอนิกส์เกือบทั้งหมดจะไหลผ่านชุดรีแอกเตอร์-คาปาซิเตอร์ และจะมีเพียงส่วนน้อยที่ไหลเข้าสู่หม้อแปลง กระแสฮาร์มอนิกส์จำนวนน้อยนี้ จะเป็นตัวจำกัดผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆให้อยู่ในขอบเขตที่ไม่ให้เกิดปัญหา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาการไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ดังนี้

1. ระบบปกติ(Normal System)



รูปที่ 2.18 วงจรแสดงการไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากหลักการแยกไหลของกระแส

$$I_a = I_{sn} + I_{ln}$$

$$I_{sn} = \frac{(R_L + jX_L)}{(R_L + jX_L) + (R_S + jX_S)} \cdot I_a$$

$$I_{ln} = \frac{(R_S + jX_S)}{(R_L + jX_L) + (R_S + jX_S)} \cdot I_a$$

$$(R_L + jX_L) > (R_S + jX_S)$$

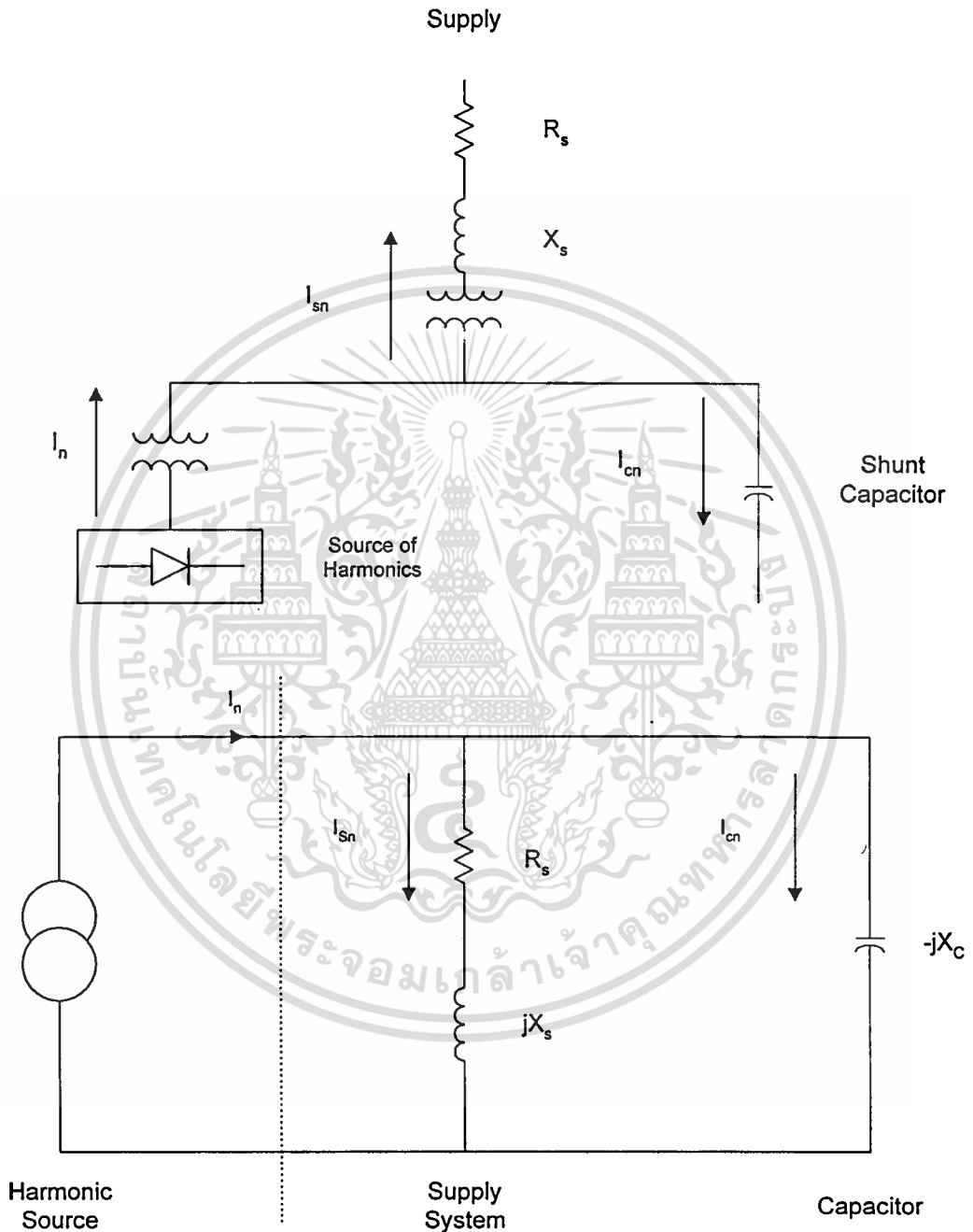
$$\frac{(R_L + jX_L)}{(R_L + jX_L) + (R_S + jX_S)} > \frac{(R_S + jX_S)}{(R_L + jX_L) + (R_S + jX_S)}$$

I_{sn}

I_{ln}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ระบบที่มีการต่อคาปาซิเตอร์เพื่อแก้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (With PF Correction Capacitor)



รูปที่ 2.19 วงจรแสดงการไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบที่มีการต่อคาปาซิเตอร์เพื่อแก้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_i = \frac{(R_s + jX_s)(-jX_c)}{R_s + jX_s - jX_c}$$

เมื่อ

$$|X_s| = |X_c| \longrightarrow \text{เกิดการรีโซแนนซ์ขนาน}$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

จากหลักการแยกโพลของกระแส

$$I_n = I_{sn} + I_{cn}$$

$$I_{cn} = \frac{(R_s + jX_s)}{R_s + jX_s - jX_c} \cdot I_n$$

$$I_{sn} = \frac{jX_c}{R_s + jX_s - jX_c} \cdot I_n$$

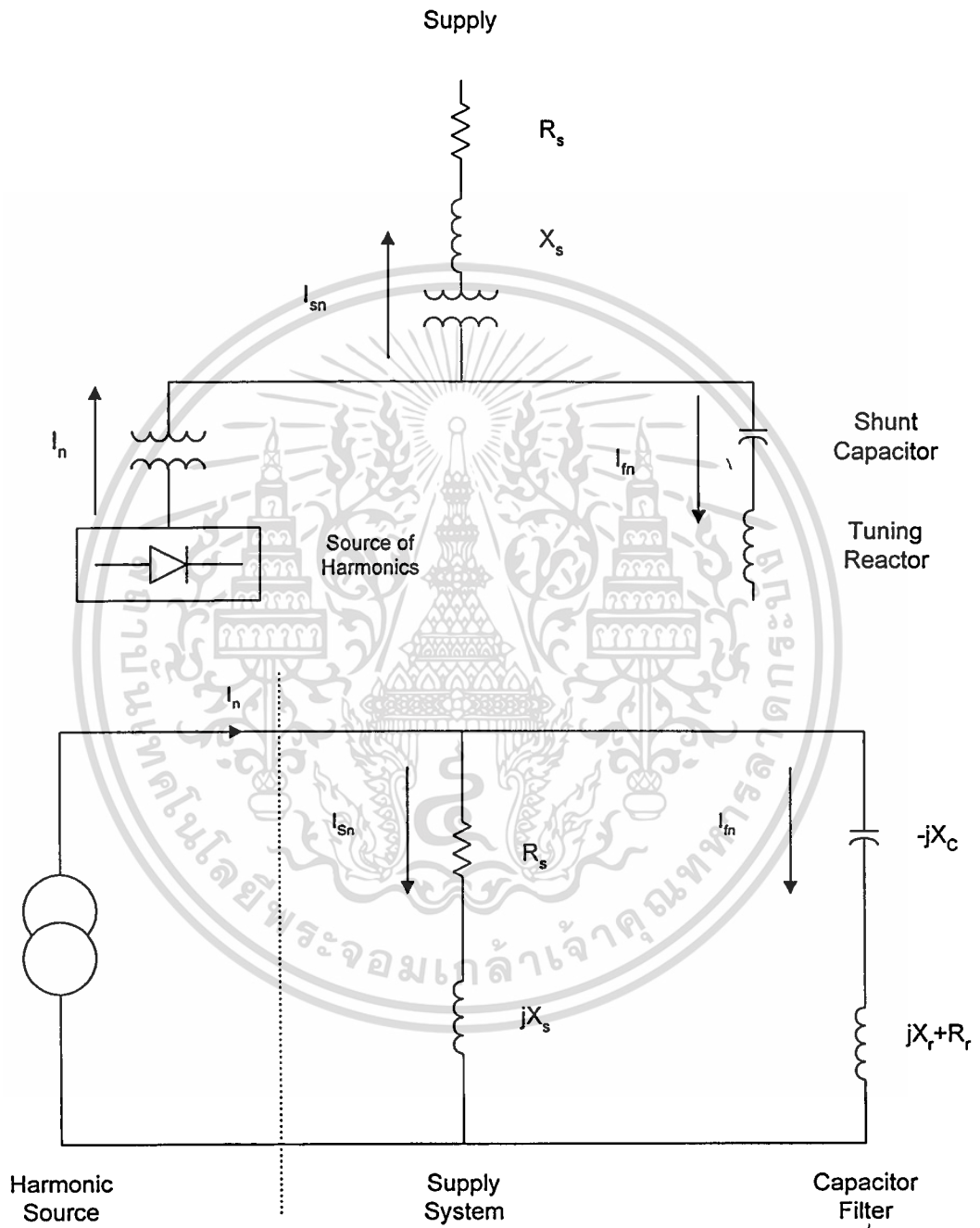
ที่จตุรีโซแนนซ์

$$I_{cn} = \frac{(R_s + jX_s)}{R_s} \cdot I_n \gg I_n$$

$$I_{sn} = \frac{-jX_c}{R_s} \cdot I_n = \frac{-jX_s}{R_s} \gg I_n$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าค่ากระแสที่ไหลในคาปาซิเตอร์และระบบมีค่ามากกว่ากระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นมาก ๆ ซึ่งอาจจะทำให้ระบบและคาปาซิเตอร์เสียหายได้จึงเปรียบเหมือนกับการขยายกระแสฮาร์โมนิกส์ (Harmonic current Amplification)

3. ระบบที่มีการต่อวงจรกรองฮาร์มอนิกส์(With Harmonic Filter)



รูปที่ 2.20 วงจรแสดงการไหลของกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบที่มีการต่อวงจรกรองฮาร์มอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_n = I_{sn} + I_{fn}$$

$$I_{fn} = \frac{(R_s + jX_s)}{R_s + jX_s + R_r + jX_r - jX_c} \cdot I_n$$

$$I_{sn} = \frac{R_r + jX_r - jX_c}{R_s + jX_s + R_r + jX_r - jX_c} \cdot I_n$$

วงจรรองฮาร์โมนิกส์แบบจูน (Tuned filter) ที่

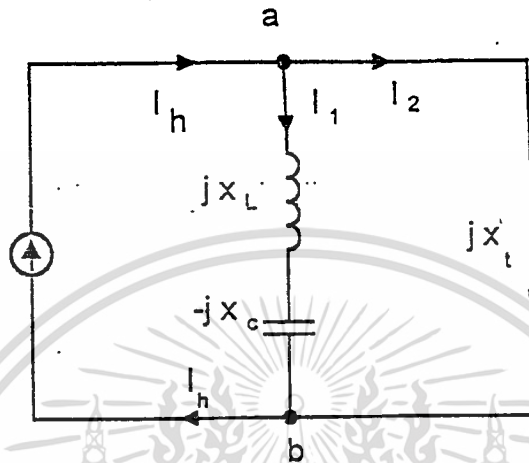
$$\begin{aligned} |X_r| &= |X_c| \\ I_{fn} &= \frac{Z_s}{Z_s + R_r} \cdot I_n \cong I_n \\ I_{sn} &= \frac{R_r}{Z_s + R_r} \cdot I_n \cong 0 \end{aligned}$$

จากสมการจะเห็นว่าเมื่อมีการต่อวงจรรองฮาร์โมนิกส์เรียบร้อยแล้ว ค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไหลลงฟิลเตอร์ จะมีค่าใกล้เคียงกับกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้น ดังนั้น กระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไหลในระบบจึงมีค่าใกล้เคียงศูนย์

1. วงจรรองฮาร์โมนิกส์แบบป้องกันระบบ

ส่วนประกอบของวงจร ดังแสดงในรูปที่ 2.19 สามารถปรับความถี่ถึงความถี่ของฮาร์โมนิกส์ที่ 1 ได้ (ต่ำกว่าฮาร์โมนิกส์ลักษณะเฉพาะ characteristic harmonic) เพื่อต้องการให้กระแสฮาร์โมนิกส์ไหลเข้าฟิลเตอร์ทั้งหมดโดยปรับค่าตัวเหนี่ยวนำให้เกิดรีโซแนนซ์ขนานกับคาปาซิเตอร์ที่ตรงกับระดับฮาร์โมนิกส์ที่มีในระบบไฟฟ้า ค่าอิมพีแดนซ์ของฟิลเตอร์หาได้จากสมการ

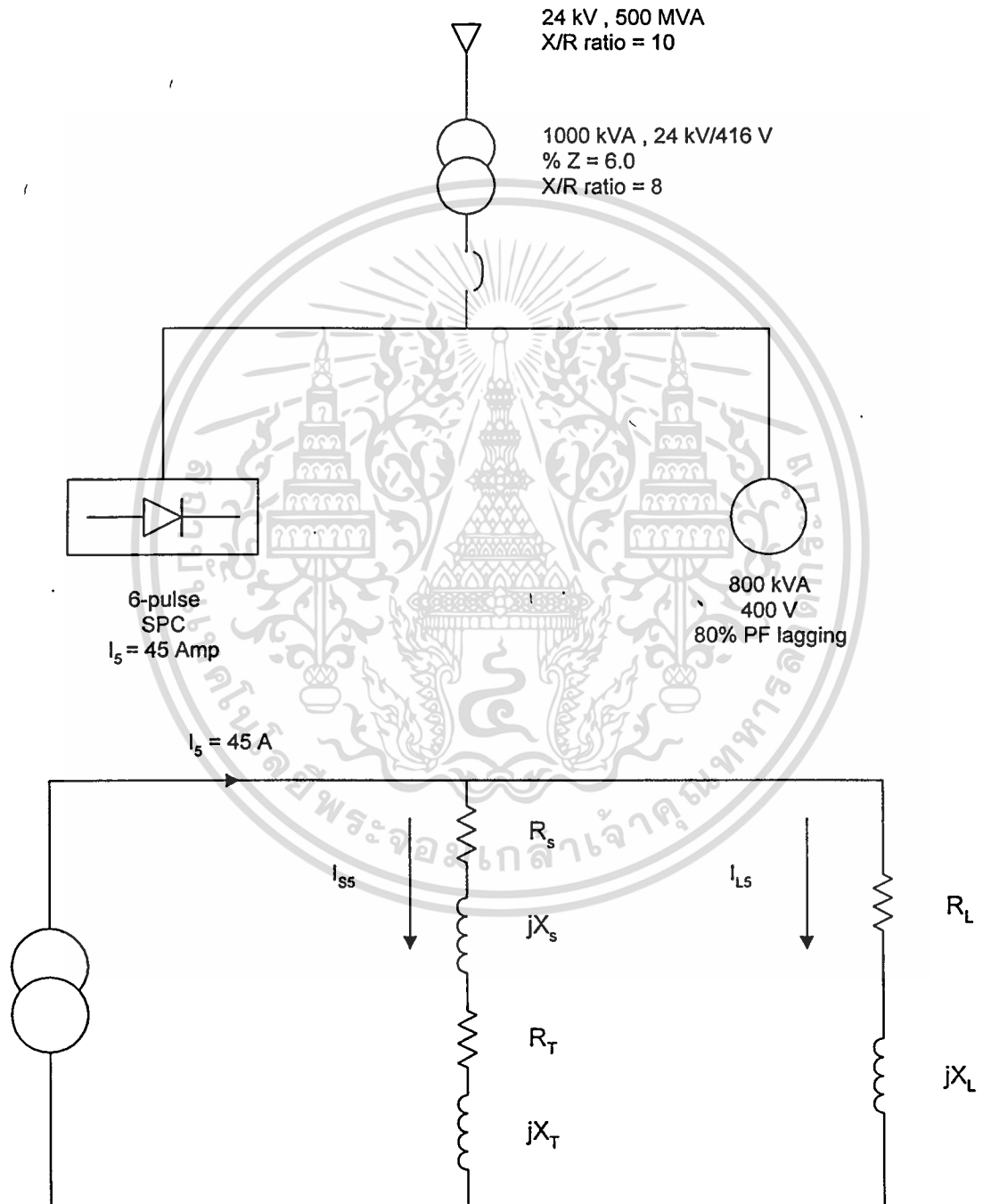
$$Z_f = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad \dots(2.24)$$



รูปที่ 2.21 วงจรกรองฮาร์มอนิกส์แบบป้องกันระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างวงจรที่มีฮาร์โมนิกส์ในระบบปกติ



รูปที่ 2.22 วงจรแสดงกระแสฮาร์โมนิกส์ในระบบปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_L = \frac{800 \times 1000}{\sqrt{3} \times 400} = 1,154.7 \text{ A}$$

$$Z_L(\text{perphase}) = \frac{400\sqrt{3}}{1,154.7} = 0.2 \text{ } \Omega$$

$$R_L + jX_L(\text{perphase}) = 0.16 + j0.12 \text{ } \Omega \text{ (50 Herz)}$$

$$R_L + jX_L(\text{perphase}) = 0.16 + j0.6 \text{ } \Omega \text{ (5}^{\text{th}} \text{ Har.)}$$

$$I_{s/c}(\text{refer to 400 V}) = \frac{500 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 400} = 721,687.8 \text{ A}$$

$$Z_s(\text{perphase}) = \frac{400 / \sqrt{3}}{721,687.8} = 3.2 \times 10^{-4} \text{ } \Omega$$

$$R_s + jX_s = (0.318 + j3.184) \times 10^{-4} \text{ } \Omega \text{ (at 50 Herz)}$$

$$R_s + jX_s = (0.318 + j15.92) \times 10^{-4} \text{ } \Omega \text{ (5}^{\text{th}} \text{ Har.)}$$

$$I_t \text{ rated (416 V)} = \frac{1,000 \times 1,000}{\sqrt{3} \times 416} = 1,387.9 \text{ A}$$

$$Z_T(\text{perphase}) = \frac{6.0}{100} \times \frac{416\sqrt{3}}{1,387.9} = 0.0104 \text{ } \Omega$$

$$R_T + jX_T = (1.288 + j10.3) \times 10^{-3} \text{ } \Omega \text{ (at 50 Herz)}$$

$$R_T + jX_T = (1.288 + j51.5) \times 10^{-3} \text{ } \Omega \text{ (at 5}^{\text{th}} \text{ Har.)}$$

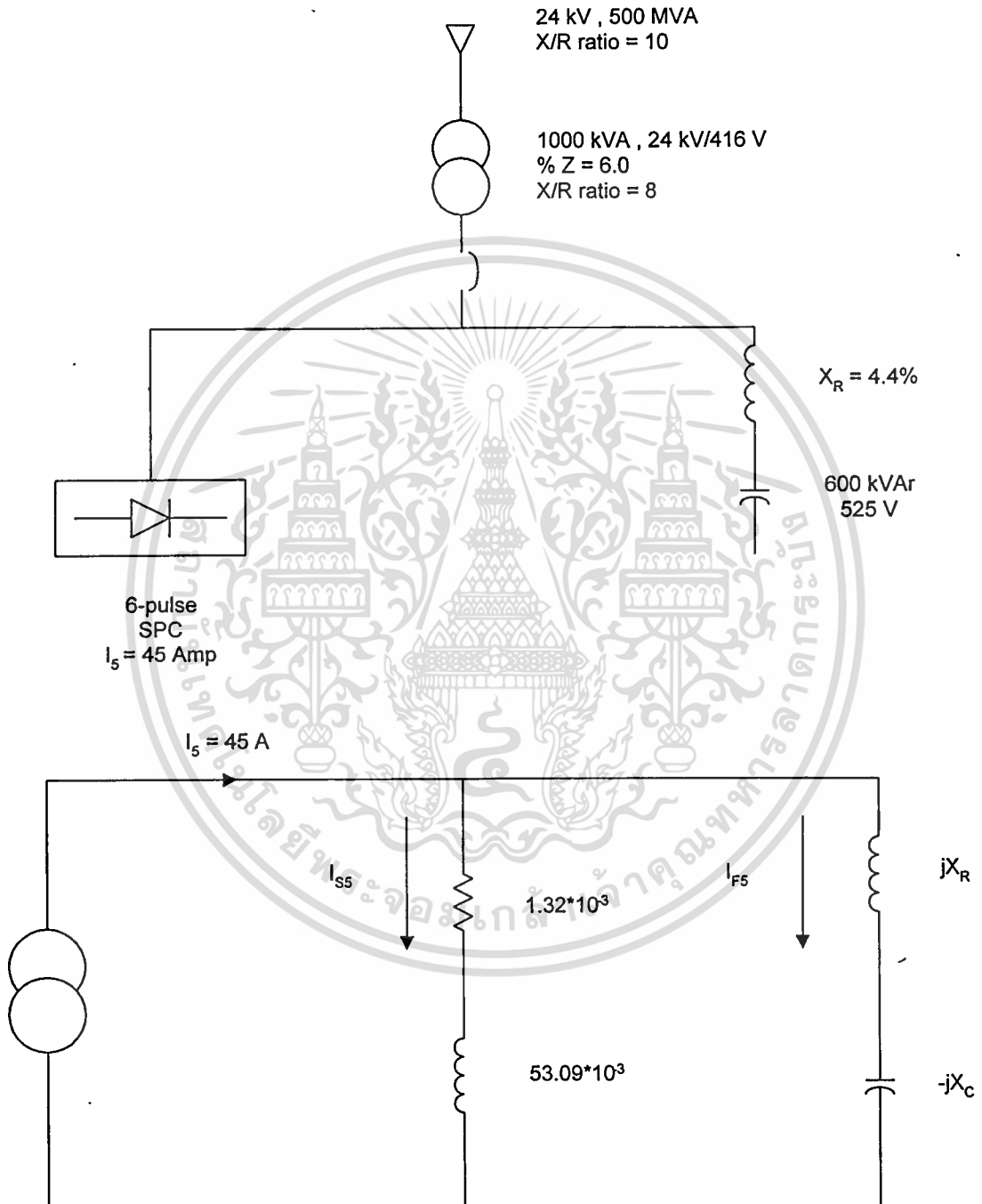
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 I_s &= \frac{(0.16 + j0.6) \times 45}{0.16 + j0.6 + (0.318 + j15.92) \times 10^{-4} + (1288 + j51.5) \times 10^{-3}} \\
 &= \frac{0.16 + j0.6}{0.1613 + j0.6531} \times 45 = 41.5 \text{ A} \\
 I_L &= \frac{0.0013 + j0.0531}{0.1613 + j0.6531} \times 45 = 3.55 \text{ A}
 \end{aligned}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างวงจรกรองฮาร์มอนิกส์แบบจูนเพื่อป้องกันระบบ



รูปที่ 2.23 วงจรกรองฮาร์มอนิกส์แบบจูนเพื่อป้องกันระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_C \text{ rated} = \frac{600 \times 1000}{\sqrt{3} \times 525} = 659.8 \text{ A}$$

$$X_C \text{ (perphase)} = \frac{525/\sqrt{3}}{659.8} = 0.4594 \Omega$$

$$X_R \text{ (perphase)} = 0.044 \times 0.4594 = 0.0202 \Omega \text{ (50 Hertz)}$$

$$X_C \text{ (perphase)} = 0.0919 \Omega \text{ (5}^{\text{th}} \text{ Har)}$$

$$X_R \text{ (perphase)} = 0.1010 \Omega \text{ (5}^{\text{th}} \text{ Har)}$$

$$I_{FS} = \frac{1.32 \times 10^{-3} + j0.05309}{1.32 \times 10^{-3} + j0.05309 + j0.1010 - j0.0919} \times 45 = 38.4 \text{ A}$$

$$I_{SS} = \frac{j0.101 - j0.0919}{1.32 \times 10^{-3} + j0.05309 + j0.1010 - j0.0919} \times 45 = 6.6 \text{ A}$$

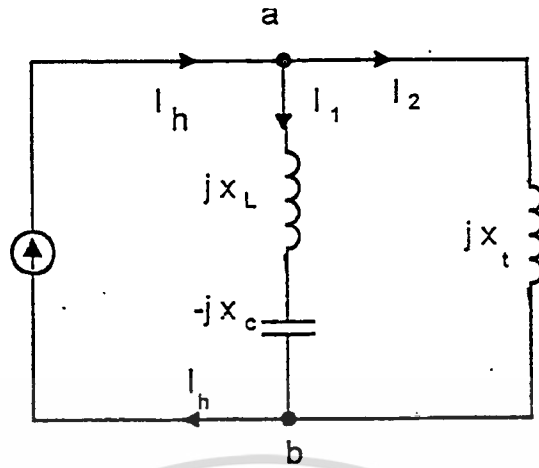
เป็นวงจรกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านฟิลเตอร์เพิ่มขึ้น และกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบลดลง

2. วงจรกรองฮาร์มอนิกแบบป้องกันคาปาซิเตอร์

สมมติว่า n_a, n_b, n_c, \dots เป็นอันดับของฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้าหนึ่ง

โดย $n_a < n_b < n_c \dots$ เช่น $n_a = 5, n_b = 7, n_c = 11$

วิธีหนึ่งที่ใช้ได้ผลแน่นอนในการป้องกันมิให้เกิดรีโซแนนซ์ขนานระหว่าง X_C ของคาปาซิเตอร์และ X_L ของหม้อแปลงขึ้นที่ฮาร์มอนิก n_a, n_b, n_c, \dots ก็คือการใช้รีแอกเตอร์ขนาดที่เหมาะสม ต่ออนุกรมเข้ากับคาปาซิเตอร์แต่ละตัว



รูปที่ 2.24 วงจรกรองฮาร์มอนิกแบบป้องกันคาปาซิเตอร์

จากสูตร

$$X_{L-h} = 2\pi f_h L = 2\pi h f_1 L$$

$$= h * 2\pi f_1 L = h * X_L$$

และจากสูตร

$$X_{C-h} = 1/2\pi f_h C = 1/2\pi h f_1 C$$

$$= 1/h * 2\pi f_1 C = (1/h) * X_C$$

เมื่อพิจารณาการเกิดรีโซแนนซ์อนุกรมระหว่างรีแอคเตอร์กับคาปาซิเตอร์

$$X_{L-h} = X_{C-h}$$

$$n_a X_L = (1/n_a) * X_C$$

$$n_a = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad \dots(2.35)$$

พิจารณาเมื่อเกิดรีโซแนนซ์ขนานระหว่างหม้อแปลงกับคาปาซิเตอร์ - รีแอคเตอร์

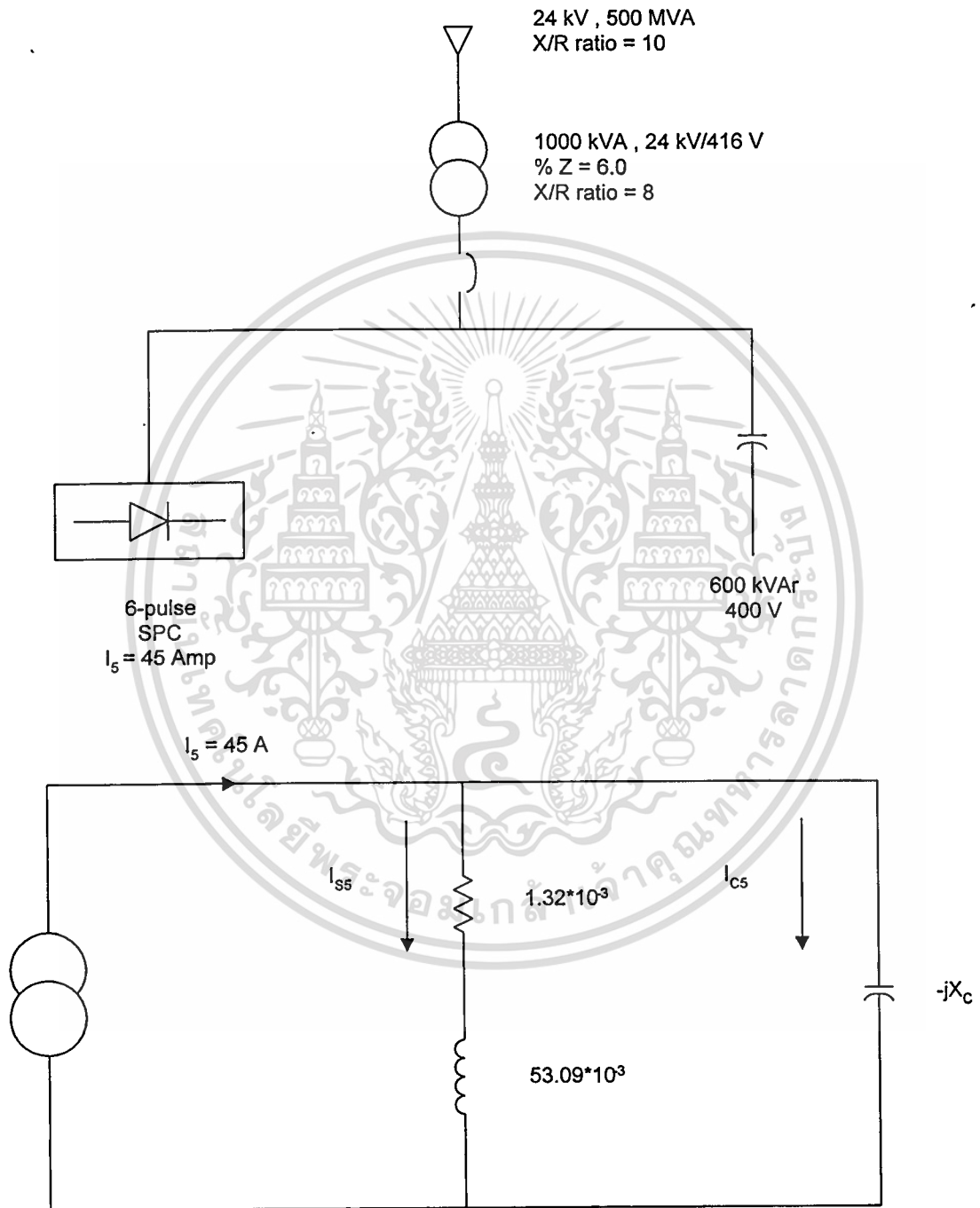
$$X_{L-hp} = X_{C-hp} - X_{R-hp}$$

$$X_{R-hp} + X_{T-hp} = X_{C-hp}$$

$$h_p * (X_R + X_T) = \frac{1}{h_p} * X_C$$

$$h_p = \sqrt{\frac{X_C}{X_R + X_T}}$$

ตัวอย่างวงจรที่มีการต่อคาปาซิเตอร์เพื่อแก้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์



รูปที่ 2.25 วงจรที่มีการต่อคาปาซิเตอร์เพื่อแก้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_C \text{ rated} = \frac{600 \times 1000}{\sqrt{3} \times 400} = 866.0 \text{ A}$$

$$X_C \text{ (perphase)} = \frac{400/\sqrt{3}}{866} = 0.267 \Omega \text{ (50 Hertz)}$$

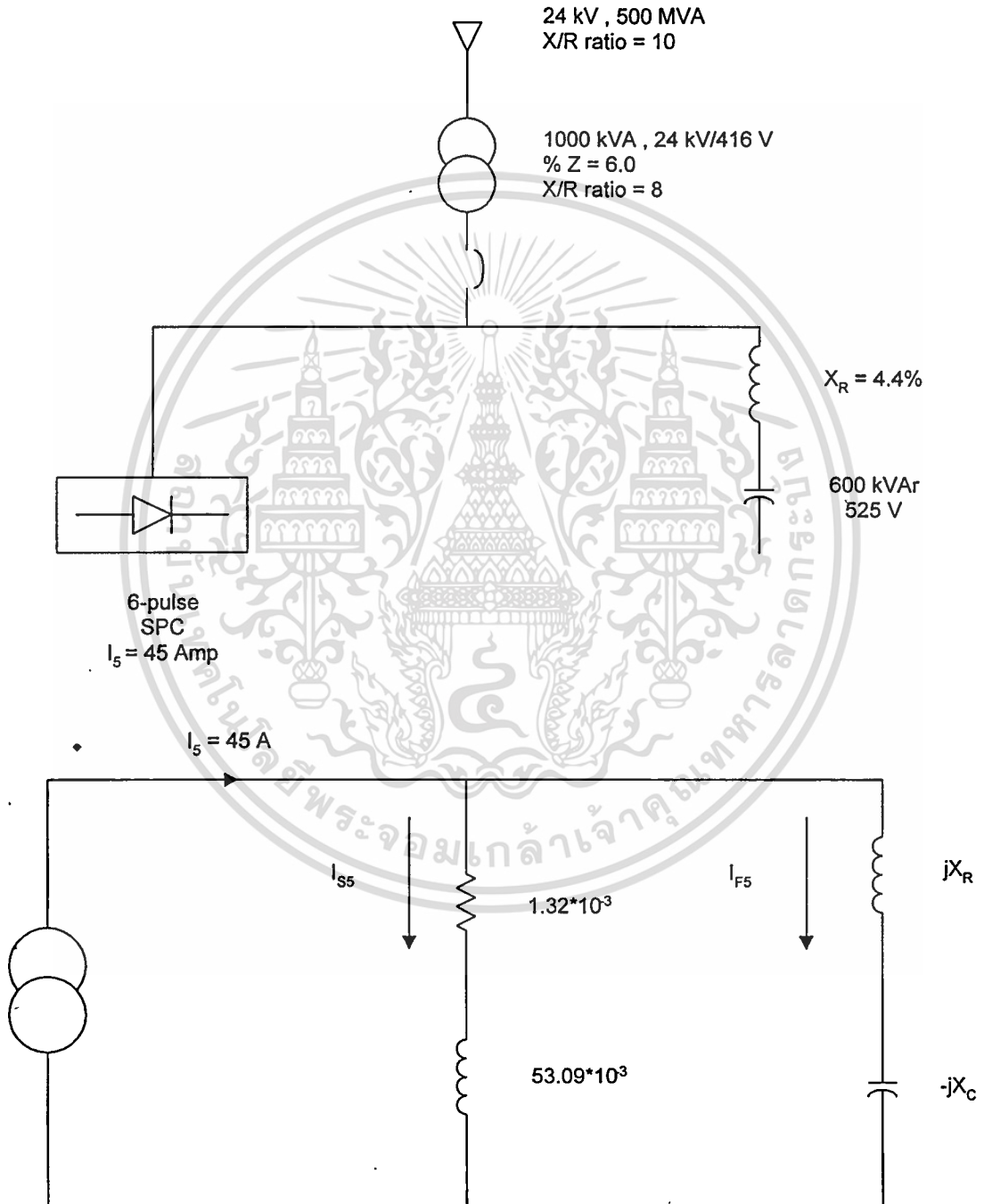
$$X_C \text{ (perphase)} = 0.0533 \Omega \text{ (5th Har)}$$

$$I_{ss} = \frac{-j0.0533}{132 \times 10^{-3} + j0.05309 - j0.0533} \times 45 = 1795 \text{ A}$$

$$I_{cs} = \frac{132 \times 10^{-3} + j0.05309}{132 \times 10^{-3} + j0.05309 - j0.0533} \times 45 = 1788 \text{ A}$$

เกิดการรีโซแนนซ์ขนานทำให้คาปาซิเตอร์ระเบิดได้

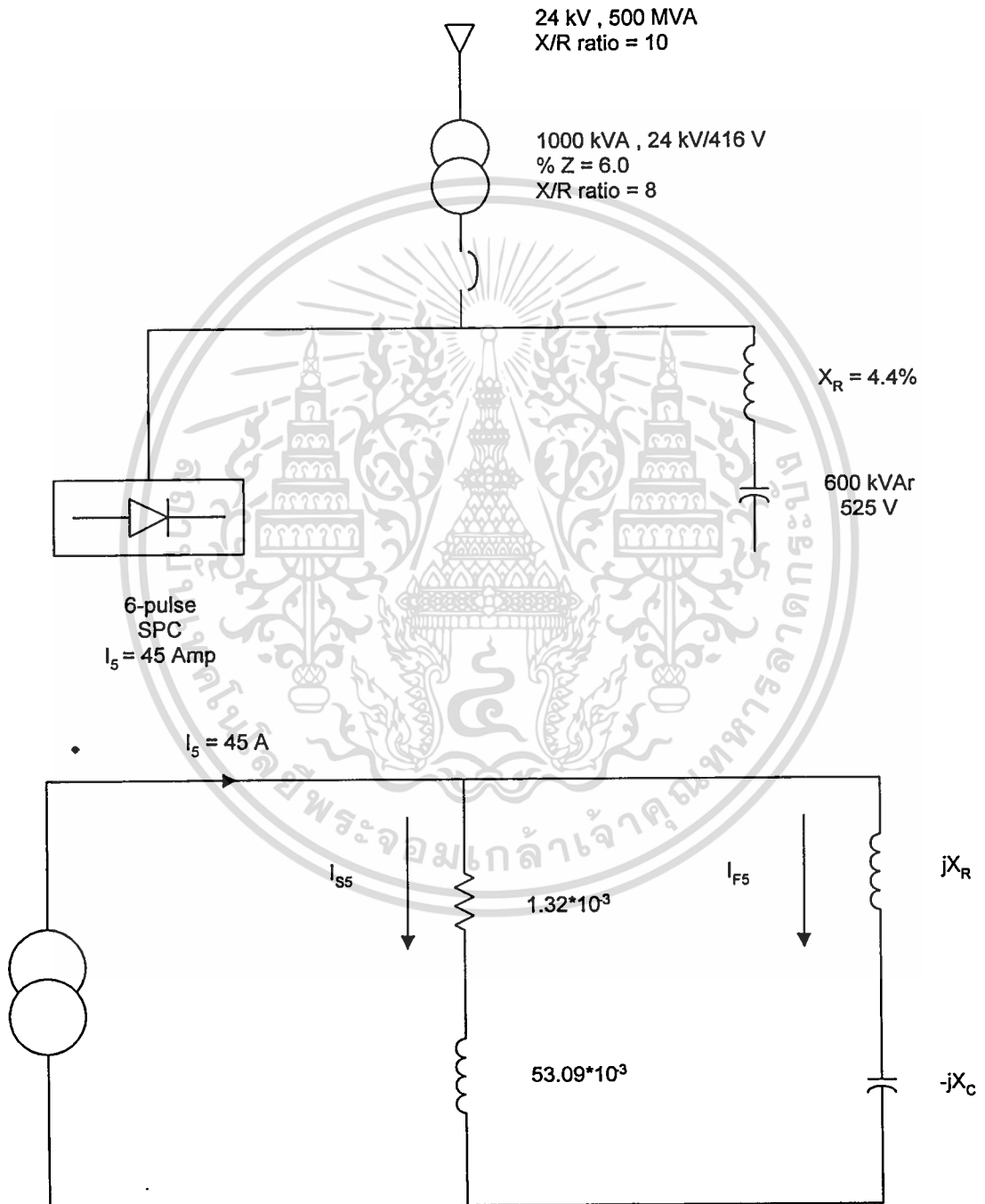
ตัวอย่างวงจรกรองฮาร์มอนิกส์แบบดีจูนเพื่อใช้ในการป้องกันคาปาซิเตอร์



รูปที่ 2.26 วงจรกรองฮาร์มอนิกส์แบบดีจูนเพื่อป้องกันคาปาซิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างวงจรกรองฮาร์มอนิกส์แบบคิจนเพื่อใช้ในการป้องกันคาปาซิเตอร์



รูปที่ 2.26 วงจรกรองฮาร์มอนิกส์แบบคิจนเพื่อป้องกันคาปาซิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญได้เห็นว่าประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_C \text{ rated} = \frac{600 \times 1000}{\sqrt{3} \times 415} = 834.7 \text{ A}$$

$$X_C \text{ (perphase)} = \frac{415/\sqrt{3}}{834.7} = 0.287 \Omega \text{ (50 Hertz)}$$

$$X_R \text{ (perphase)} = 0.07 \times 0.287 = 0.02 \Omega \text{ (50 Hertz)}$$

$$X_C \text{ (perphase)} = 0.0574 \Omega \text{ (5}^{\text{th}} \text{ Har)}$$

$$X_R \text{ (perphase)} = 0.100 \Omega \text{ (5}^{\text{th}} \text{ Har)}$$

$$I_{F5} = \frac{1.32 \times 10^{-3} + j0.05309}{1.32 \times 10^{-3} + j0.05309 + j0.100 - j0.0574} \times 45 = 25 \text{ A}$$

$$I_{S5} = \frac{j0.100 - j0.0574}{1.32 \times 10^{-3} + j0.05309 + j0.100 - j0.0574} \times 45 = 20 \text{ A}$$

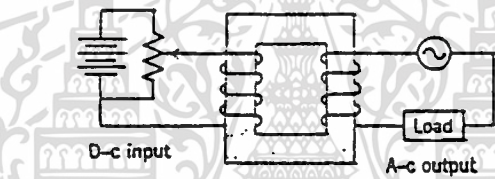
เมื่อใช้วงจรกรองฮาร์มอนิกส์แบบคัตออฟในการป้องกันคาปาซิเตอร์ จะเห็นว่า I_{F5} และ I_{S5} ลดลง เป็นการป้องกันคาปาซิเตอร์ระเบิดได้

บทที่ 3

รีแอกเตอร์ที่มีการอิมตัวในแกนเหล็ก

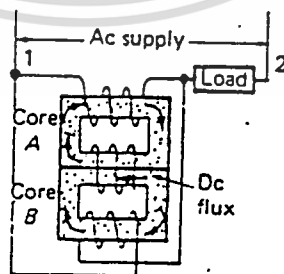
3.1 รีแอกเตอร์ที่มีการอิมตัวในแกนเหล็ก

รีแอกเตอร์ที่มีการอิมตัวในแกนเหล็ก เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำที่ปรับค่าได้ เพื่อนำไปใช้ในวงจรกรองฮาร์มอนิกส์ ลักษณะโครงสร้างของรีแอกเตอร์ที่มีการอิมตัวในแกนเหล็กจะคล้ายกับหม้อแปลง โดยจะมีขดลวด 2 ชุด หรือมากกว่า 2 ชุด ก็ได้ โดยมีขดลวดชุดหนึ่งสำหรับป้อนไฟกระแสตรง และขดลวดที่เหลือสำหรับป้อนไฟกระแสสลับ ขดลวดที่ใช้ไฟกระแสตรงจะทำหน้าที่เป็นสัญญาณเข้า โดยจะปรับค่าความเหนี่ยวนำเพื่อกรองฮาร์มอนิกส์ที่ต้องการ และค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการสามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยการควบคุมสัญญาณเข้า



รูปที่ 3.1 รีแอกเตอร์แบบแกนเดี่ยว

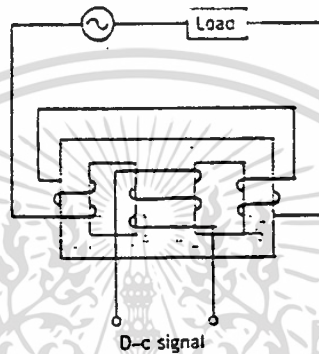
จากรูปที่ 3.1 รีแอกเตอร์จะมีเพียงหนึ่งแกน โดยมีขดลวดกระแสสลับและขดลวดกระแสตรงอย่างละ 1 ชุด ซึ่งรีแอกเตอร์ชนิดนี้ ในปัจจุบันไม่เป็นที่นิยมด้วยเหตุว่า กระแสที่ไหลลงจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ ส่งผลให้เกิดแรงดันบนขดลวดควบคุม ทำให้ฉนวนอาจได้รับความเสียหาย ทั้งยังทำให้เกิดสัญญาณแทรกในขดลวดควบคุม ทำให้การควบคุมผิดพลาดได้



รูปที่ 3.2 รีแอกเตอร์แบบ 2 แกนที่มีขดลวดต่อแบบขนาน

จากรูปที่ 3.2 จะเป็นรีแอกเตอร์ที่นิยมใช้มากกว่า โดยจะใช้รีแอกเตอร์แบบแกนเดี่ยว 2 ชุดมาต่อกัน ซึ่งแต่ละแกนจะมีขดลวดกระแสสลับ 1 ชุด โดยขดลวดกระแสตรงจะพันอยู่ตรงกลาง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างทั้ง 2 แกนเพียงชุดเดียว ขดลวดกระแสลับ 2 ขด จะนำมาต่อขนานกันโดยขดล่างจะต่อกลับกัน เนื่องจากเมื่อขั้วที่ 1 เป็นบวก (+) เส้นแรงแม่เหล็กในทั้ง 2 แกนจะไหลในแกนเหล็กในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กในแต่ละแกนจะมีค่าเท่ากัน และจะหักล้างกันบนขดลวดกระแสตรง ทำให้ไม่มีผลการรบกวนของไฟกระแสลับในขดกระแสตรง แต่แรงดันที่ตกคร่อมในอุปกรณ์รีแอคเตอร์จะมีค่าไม่สูงมากนัก

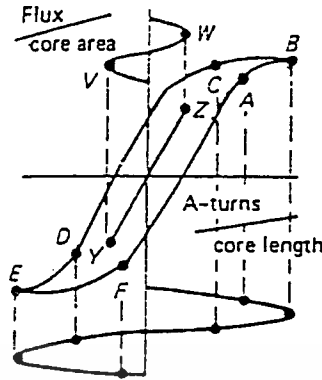


รูปที่ 3.3 รีแอคเตอร์แบบ 2 แกนที่มีขดลวดต่ออนุกรม

จากรูปที่ 3.3 เป็นรีแอคเตอร์ที่ขดลวดกระแสลับต่ออนุกรมกัน โดยขดลวดทั้ง 2 ขด จะทำการต่อในลักษณะที่ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นหักล้างกันที่ขดลวดกระแสตรง หลักการจะเหมือนเช่นเดียวกับรีแอคเตอร์แบบ 2 แกนที่มีขดลวดต่อแบบขนาน แต่รีแอคเตอร์แบบ 2 แกนที่มีขดลวดต่อแบบอนุกรมแรงดันตกคร่อมที่รีแอคเตอร์จะสูงกว่าแบบขนาน

3.2 ค่าความเหนี่ยวนำของแกนเหล็ก

วัสดุที่ใช้เป็นสารแม่เหล็กจะสามารถทำให้มีคุณสมบัติแม่เหล็กได้ง่าย โดยการนำขดลวดมาพันบนแกนวัสดุที่เป็นสารแม่เหล็ก และทำการป้อนกระแสผ่านขดลวดทำให้เกิดค่าแอมแปร์-เทอร์น (AT) และจะมีเส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านในสารแม่เหล็กนั้น เช่น ขดลวด 400 รอบ มีกระแสไหลผ่าน 5 แอมแปร์ จะสามารถสร้างเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ ขดลวดที่มีจำนวน 1000 รอบ กระแส 2 แอมแปร์ ที่สภาวะเดียวกัน ซึ่งค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะเท่ากับ 2000 แอมแปร์-เทอร์น เท่ากันในทั้ง 2 กรณี



รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กกับความเข้มสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ 3.4 จะพบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงกระแส จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะพบว่าหากมีการป้อนกระแสไฟฟ้าสลับที่มีค่าขดต่ำ (Small Alternating) โดยในรูป คือ รูปคลื่น VW ผลการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กจะปรากฏดังเส้นตรง YZ แต่ถ้ากระแสมีค่าขดสูง (Large Changing Current) ดังรูป คือ คลื่นรูปใหญ่ จะพบว่าเส้นแรงแม่เหล็กจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นรูป ABCDEF ระหว่าง A และ B กราฟจะมีค่าความชันน้อย แสดงว่าแกนเหล็กกำลังอิ่มตัวเพราะเมื่อเพิ่มกระแสขึ้นแล้ว เส้นแรงแม่เหล็กก็จะไม่เพิ่มขึ้นมากนัก หรือแทบจะไม่เพิ่มขึ้นเลย

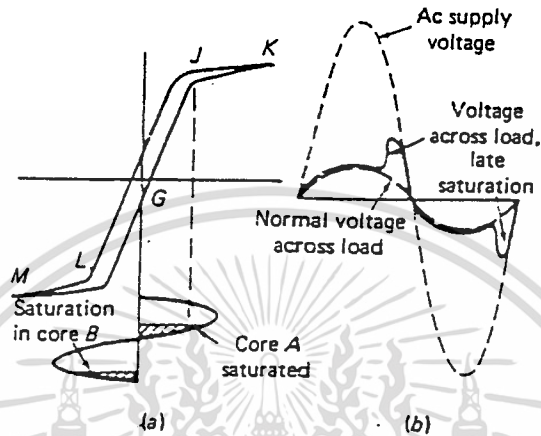
ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดกระแสสลับจะมีค่าเปลี่ยนแปลง ขึ้นอยู่กับค่าความซึมซาบของแม่เหล็ก (μ) ดังสมการ

$$\begin{aligned} L &= N d\Phi / di \\ &= N^2 / R \\ &= N^2 \mu A / l \end{aligned}$$

และค่ารีแอกแตนซ์ของรีแอกเตอร์ที่มีการอิ่มตัวในแกนเหล็ก

$$X_L = 2\pi fL$$

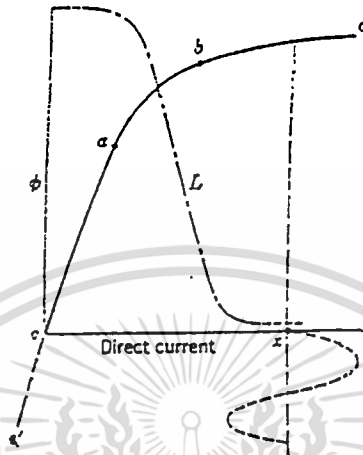
โดยค่าความต้านทานกระแส (Impedance) ของขดลวดกระแสสลับจะขึ้นอยู่กับความชันของกราฟความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กและความเข้มของสนามแม่เหล็ก เมื่อทำงานในช่วง A และ B ขดลวดจะมีค่าความเหนี่ยวนำต่ำกว่าช่วง YZ



รูปที่ 3.5 a) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กและความเข้มของสนามแม่เหล็ก

b) คลื่นแรงดันกระแสสลับแสดงถึงสถานะเมื่อเกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็ก

รูปที่ 3.5 แกนเหล็กที่ใช้ทำรีแอกเตอร์ที่มีการอิ่มตัวในแกนเหล็ก จะใช้แกนเหล็กพิเศษที่มีลักษณะรูปแคบ ความชันในช่วง LJ จะมีค่าสูง ทำให้รีแอกเตอร์มีค่าความเหนี่ยวนำสูง ซึ่งขณะยังไม่มีภาระกระแสควบคุม แรงดันที่ตกคร่อมโวลต์จะมีค่าต่ำ เพราะแรงดันจะตกคร่อมที่รีแอกเตอร์ ในรูป 3.5 b) จะเห็นได้ว่าแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ (เส้นประ) มีค่ามากซึ่งจะทำให้เกิดการสร้างสนามแม่เหล็กบนแกนเหล็กเพียงพอที่จะทำให้แต่ละแกนเกิดการอิ่มตัวได้ ในขณะที่ยังไม่มีภาระกระแสในขดควบคุมรีแอกเตอร์ จะมีทั้งสภาพอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมโวลต์เป็นดังรูป 3.5 b) เส้นทึบ



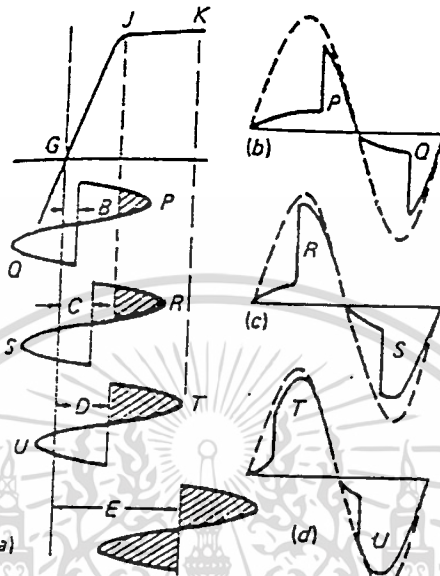
รูปที่ 3.6 แสดงค่าความเหนี่ยวนำของเส้นโค้งกำเนิดแม่เหล็ก (Magnetizing Curve)

จากสมการ ค่าความเหนี่ยวนำจะขึ้นกับค่าความซึมซาบของสารแม่เหล็ก ซึ่งก็คือ ค่าความชันของโค้งกำเนิดแม่เหล็ก สำหรับรูปที่ 3.6 เป็นรูปแสดงเส้นแรงแม่เหล็กกับกระแสโดยเปรียบเทียบกับค่าความเหนี่ยวนำ ซึ่งในช่วง oa จะมีค่าความเหนี่ยวนำสูงและในช่วง bc ค่าความเหนี่ยวนำจะลดลงต่ำเนื่องจากรีแอกเตอร์เกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็ก

3.8 การใช้ขดลวดกระแสตรงช่วยควบคุมการอิ่มตัวของรีแอกเตอร์

อธิบายการทำงานในรูปที่ 3.7

1. เมื่อป้อนไฟกระแสตรงที่แอมแปร์-เทอร์นเท่ากับค่า B จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งเราสามารถพิจารณารูปที่ 3.2 ประกอบจะเห็นว่า เครื่องจักรแรก ขั้วที่ 1 เป็นขั้ว เส้นแรงแม่เหล็กในขดลวดกระแสสลับจะมีทิศทางตามเข็มนาฬิกา จะทำให้แกนเหล็กเริ่มอิ่มตัวที่ตำแหน่ง J ซึ่งขณะที่รีแอกเตอร์ยังไม่อิ่มตัวค่าความเหนี่ยวนำจะมีค่าสูง แรงดันที่โหลดจะมีค่าต่ำ เมื่อรีแอกเตอร์อิ่มตัวค่าความเหนี่ยวนำจะมีค่าต่ำ และแรงดันที่โหลดจะมีค่าสูง ดังรูปที่ 3.7 b) ก็คือช่วง P นั้นเอง



รูปที่ 3.7 แสดงการเพิ่มไฟกระแสตรงช่วยในการอึดตัวของแกนเหล็ก

เมื่อขั้วที่ 2 เป็นขั้วหรือครึ่งวัฏจักรที่ 2 เส้นแรงแม่เหล็กของขดกระแสตรงจะเสริมกับเส้นแรงแม่เหล็กขดกระแสสลับในขดลวดข้างล่าง ซึ่งมีลักษณะเดียวกับครึ่งวัฏจักรแรก โดยรีแอคเตอร์จะอึดตัวที่บริเวณ Q ซึ่งแรงดันที่โหลดจะแสดงในรูป 3.7 b) และค่ากระแสจะแสดงในรูป 3.8 จุด B (ที่จุด B เป็นกระแสของแต่ละครึ่งวัฏจักร)

2. เมื่อเพิ่มกระแสตรงอีกเล็กน้อยที่ค่า C ในขณะที่ขั้วที่ 1 เป็นขั้ว รีแอคเตอร์จะอึดตัวเร็วกว่าแบบที่ 1 โดยจะอึดตัวที่บริเวณ R และเมื่อขั้วที่ 2 เป็นขั้วก็จะอึดตัวที่บริเวณ S แรงดันที่ตกคร่อมโหลดแสดงในรูป 3.7 c) ซึ่งกระแสที่โหลดก็คือตำแหน่ง C ในรูปที่ 3.8

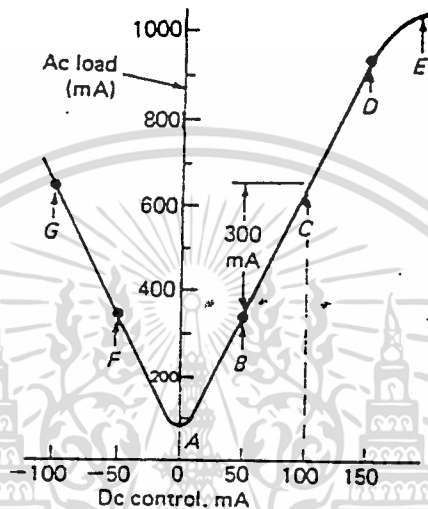
3. เมื่อเพิ่มกระแสตรงให้มีค่ามากขึ้นอีก แรงดันที่โหลดดังรูป 3.7 d) และกระแสที่โหลดจะได้ดังรูปที่ 3.8 ตามตำแหน่ง D

จะสังเกตว่าทั้ง 3 แบบนั้น แกนเหล็กจะสลับกันอึดตัวในทุกๆครึ่งวัฏจักร โดย

ขั้วที่ 1 เป็นขั้ว แกนเหล็กข้างบนจะอึดตัว

ขั้วที่ 2 เป็นขั้ว แกนเหล็กข้างล่างจะอึดตัว

4. เมื่อป้อนกระแสตรงที่ E ในรูป 3.7 a) แกนเหล็กจะอึดตัวตลอดเวลา ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากเส้นแรงแม่เหล็กกระแสตรง โดยแกนเหล็กทั้งบนและล่างจะอึดตัวตลอดทุกครึ่งวัฏจักร กระแสไหลจะมีค่ามากที่สุดที่จุด E ในรูป 3.8



รูปที่ 3.8 ค่าสัญญาณออกของรีแอกเตอร์กับค่าสัญญาณควบคุม

ค่ากระแสที่แสดงในรูปที่ 3.8 เป็นค่ากระแสของรีแอกเตอร์ที่มีขนาดเล็กจะสังเกตได้ว่า มีอัตราขยายกระแสประมาณ 6 เท่า โดยพิจารณาความชันระหว่าง B และ C กระแสไหลจะเพิ่มขึ้น 300 มิลลิแอมแปร์ และกระแสตรงจะเพิ่มขึ้น 50 มิลลิแอมแปร์ (อัตราส่วน 6 : 1 คืออัตราส่วนของ $N_C : N_L$ โดย N_C คือ จำนวนรอบของขดลวดควบคุม หรือขดลวดกระแสตรง N_L คือ จำนวนรอบของขดลวดกระแสสลับ) ในรูปที่ 3.8 กราฟจะสมมาตร ถ้าเรากลับทิศของกระแสตรง กระแสไหลจะเปลี่ยนจากจุด B และ C เป็นจุด F และ G แทน จากตัวอย่างที่แสดงมา จะเห็นได้ว่ากระแสไหลที่น้อยที่สุด คือ จุด A คือ ช่วงที่ไม่มีกระแสตรงที่ป้อนเข้าขดลวดควบคุมและต่อเบตเตอร์กลับด้านก็จะมีผลต่อกระแสออก เส้นแรงแม่เหล็กในแต่ละแกนที่เกิดจากขดลวดกระแสสลับจะมีการกลับทิศทางตลอดทุกครึ่งวัฏจักร เนื่องจากกระแสไหลมีการกลับทิศ จะทำให้ค่าเฉลี่ยของเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 0 เพราะฉะนั้นค่าเฉลี่ยของเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมด รวมถึงการอึดตัวของแกนเหล็กจะขึ้นกับขดลวดกระแสตรงในรูปที่ 3.8 กระแสตรง 100 มิลลิแอมแปร์ จึงสามารถควบคุมให้กระแสไหลมีค่า 600 มิลลิแอมแปร์

3.4 การออกแบบรีแอกเตอร์ที่มีการอิ่มตัวในแกนเหล็ก

วิธีการออกแบบเพื่อหาขนาดรีแอกเตอร์ตามที่ต้องการ ทำการออกแบบมีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้า 1 เฟส จะต่างกันที่หม้อแปลงไฟฟ้าจะมีขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิพันอยู่บนแกนเหล็กแกนกลางเพียงขาคเดียว ส่วนรีแอกเตอร์จะพันขดลวดกระแสสลับบนแกนเหล็กขาข้างทั้ง 2 ข้าง และส่วนแกนเหล็กขากลางจะใช้พันขดลวดควบคุมซึ่งเป็นไฟกระแสตรง เพราะฉะนั้นสมการในการคำนวณ จึงมีลักษณะเดียวกับการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งมีสมการในการคำนวณดังนี้

$$E = 4.44 fNBA *sf.$$

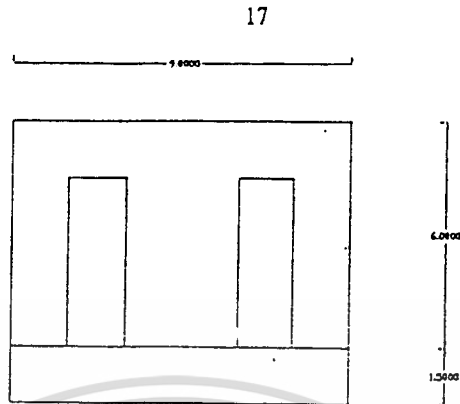
เมื่อ

E	:	แรงดันไฟฟ้า (โวลท์)
f	:	ความถี่จากแหล่งจ่ายไฟ (เฮิรตซ์)
B	:	ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (เทสลา)
A	:	พื้นที่หน้าตัด (ตารางเมตร)
sf.	:	ค่าสแต็กกิ้ง แฟคเตอร์ (staggering factor)

ซึ่งพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (A) สามารถหาได้จากสมการ

$$A = \frac{\sqrt{VA}}{5.58} \quad \text{ตารางนิ้ว}$$

VA : ค่าพิกัดโวลท์แอมแปร์ของรีแอกเตอร์



รูปที่ 3.9 แสดงรูปแกนเหล็ก E-I

3.5 ขนาดของรีแอกเตอร์ที่มีการอิมตัวในแกนเหล็ก

การสร้างรีแอกเตอร์ที่มีการอิมตัวในแกนเหล็กจะพิจารณาให้มีขนาดพิกัดของแรงดันตกคร่อมรีแอกเตอร์เท่ากับ 160 โวลต์ ทนกระแสได้ 2.7 แอมแปร์ ซึ่งได้ออกแบบดังนี้

- การเลือกขนาดของแกนแม่เหล็ก

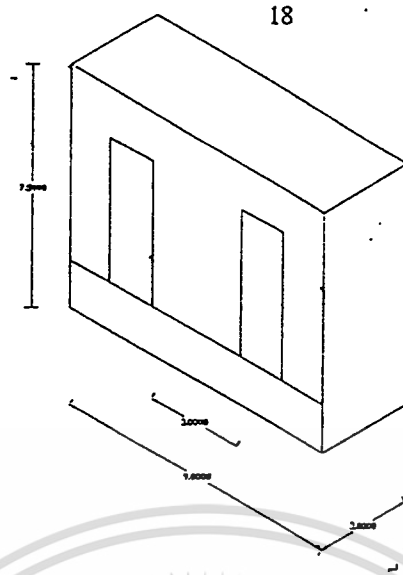
ขนาดของแกนเหล็กสามารถหาจากสมการ

$$A = \frac{\sqrt{VA}}{5.58} \quad \text{ตารางนิ้ว}$$

$$A = \frac{\sqrt{160 \cdot 2.7}}{5.58} \quad \text{ตารางนิ้ว}$$

$$A = 3.72 \quad \text{ตารางนิ้ว}$$

เพราะฉะนั้นขนาดของแกนเหล็กจะเป็น $1.93 \cdot 1.93$ ตารางนิ้ว ซึ่งจะได้ทำการเลือกขนาดแกนเหล็ก $2 \cdot 2$ ตารางนิ้ว เป็นการเผื่อเนื้อที่ในการพันขดลวด เพราะวารีแอกเตอร์ที่จะทำการประกอบนั้น จะมีการพันขดลวดทั้ง 3 ขา สำหรับไฟกระแสตรงและกระแสสลับ



รูปที่ 3.10 แสดงขนาดของแกนเหล็กที่ต้องการ

- การออกแบบขนาดและจำนวนรอบของขดลวดกระแสสลับ

แกนเหล็ก E-I ที่จะนำมาประกอบเป็นรีแอกเตอร์จะมีค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กประมาณเท่ากับ 1 ค่าสแต็กกิ้ง แฟคเตอร์ เท่ากับ 0.95 ขนาดพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กสำหรับพันขดลวดกระแสสลับจะอยู่ที่ขาด้านข้างทั้ง 2 ข้าง ซึ่งเท่ากับ 1*2 ตารางนิ้ว นำค่าแทนลงในสมการ

$$E = 4.44 fNBA * sf.$$

ซึ่งจะได้ขดลวดกระแสสลับประมาณ 200 รอบ

เมื่อได้ขนาดจำนวนรอบแล้ว จะทำการหาขนาดของขดลวดที่จะใช้พัน โดยใช้ตารางขดลวด ซึ่งจะได้ขนาดของขดลวด 3.296 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งสามารถทนกระแส 25 แอมแปร์ได้ เนื่องจากพิจารณาค่า Q ต้องการค่า Q สูงจึงใช้ค่า R ต่ำ

- การหาจำนวนรอบและขนาดของขดลวดกระแสตรง

การใช้งานรีแอกเตอร์แกนเหล็กอิมตัวนั้นจะต้องมีการใช้ขดลวดกระแสตรงเป็นขดควบคุม โดยในโครงการนี้ ใช้กระแสตรงสูงสุดเท่ากับ 1 แอมแปร์

ค่าแอมแปร์-เทอรัน ขดกระแสตรง = ค่าแอมแปร์-เทอรัน ขดลวดกระแสสลับ

$$NI_{dc} = NI_{ac}$$

จะได้จำนวนรอบของขดลวดกระแสตรงเท่ากับ 540 รอบ

แต่ชิ้นงานรีแอกเตอร์ในโครงการนี้ได้ทำการเชื่อมขดลวดกระแสตรงเป็น 900 รอบ และเลือกใช้ขนาดของขดลวดจากตารางขดลวด ได้ลวด SWG เบอร์ 24 ซึ่งทนกระแส 1 แอมแปร์ได้

หลังจากที่ได้คำนวณขนาดของแกนเหล็ก จำนวนและขนาดของขดลวดกระแสตรง และกระแสสลับ จะได้ขนาดต่างๆ ดังนี้

1. ขนาดแกนเหล็กใช้พื้นที่หน้าตัด 2*2 ตารางนิ้ว
2. พันขดลวดกระแสสลับบนแกนเหล็กข้างๆ โดยใช้ลวดขนาด 3.296 ตารางมิลลิเมตรจำนวน 50 รอบ
3. พันขดลวดกระแสตรงเป็นขดควบคุมที่ขากลางใช้ลวด SWG เบอร์ 24 จำนวน 900 รอบ

เนื่องจากวิธีการออกแบบข้างต้นเหมาะสำหรับรีแอกเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านไปยังโหลด แต่รีแอกเตอร์ที่ใช้ทำฟิลเตอร์ จะต้องคำนึงถึงค่า %THD , ค่า Q และเพื่อความสะดวกในการคำนวณค่าอินดักแตนซ์ จึงเปลี่ยนให้ขดลวดกระแสสลับอยู่แกนกลาง และขดลวดกระแสตรงไว้ข้างๆ ซึ่งผลที่ได้ไม่แตกต่างกัน ดังแสดงวิธีการออกแบบไว้ในบทที่ 4



บทที่ 4

การคำนวณและการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกส์

ในบทนี้จะประกอบไปด้วยการหาขนาดและพิกัดของรีแอกเตอร์และคาปาซิเตอร์ ในส่วนของรีแอกเตอร์ จะทำการออกแบบให้ได้ค่าที่ต้องการและให้ได้ค่าตัวประกอบคุณภาพ(Quality factor(Q)) ที่สามารถยอมรับได้

ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกส์

4.1 การหาขนาดและพิกัดของรีแอกเตอร์และคาปาซิเตอร์

การหาขนาดของรีแอกเตอร์และคาปาซิเตอร์

โดยปกติจะทำการกำหนดค่า VAR เพื่อปรับปรุงค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ ซึ่งในโครงการนี้ จากโหลดประมาณ 1100 VA ทำการกำหนด VAR ที่ได้จากรองกรองมีค่า 300 VAR



รูปที่ 4.1 รูปวงจรกรองฮาร์มอนิกส์

จากรูปที่ 4.1

$$I_f = \frac{V_n}{X_C - X_L}$$

$$Q_s = V_n * I_f = \frac{V_n^2}{X_C - X_L}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_c = V_c * I_f = I_f^2 X_c$$

$$Q_c = \left(\frac{V_n}{X_c - X_L} \right)^2 X_c$$

ดังนั้น

$$\frac{Q_s}{Q_c} = \frac{X_c - X_L}{X_c} = 1 - \frac{X_L}{X_c}$$

$$\frac{Q_s}{Q_c} = 1 - \frac{1}{n_f^2}$$

$$Q_c = \frac{Q_s}{1 - \frac{1}{n_f^2}} \quad \text{.....(4.1)}$$

และ

$$V_c = \frac{V_n X_c}{X_c - X_L} = \frac{V_n}{1 - \frac{X_L}{X_c}}$$

$$V_c = \frac{V_n}{1 - \frac{1}{n_f^2}} \quad \text{.....(4.2)}$$

โดยที่

Q_s	คือ	กำลังงานเสมือนที่ได้จากวงจรกรอง (VAR)
Q_c	คือ	กำลังงานเสมือนที่ได้จากคาปาซิเตอร์ (VAR)
n_f^2	คือ	ลำดับฮาร์มอนิกที่ต้องการกรอง

ดังนั้นขณะที่กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 3

จะได้

$$Q_c = \frac{300}{1 - \frac{1}{3^2}} = 338 \text{ VAR}$$

$$V_c = \frac{220}{1 - \frac{1}{3^2}} \equiv 250 \text{ โวลท์}$$

จาก

$$Q = V^2 * 2\pi f C$$

ดังนั้น

$$C = \frac{Q_c}{V^2 (2\pi f)} = \frac{338}{(250)^2 (2\pi(50))}$$

$$C = 17.214 \mu\text{F}$$

ซึ่งจะใช้ค่าคาปาซิเตอร์ขนาด 17 μF เพราะสามารถหาซื้อได้
ดังนั้น ค่าอินดักแตนซ์ที่ทำให้เกิดรีโซแนนซ์ที่ฮาร์มอนิกส์ที่ 3 คือ

จาก

$$L = \frac{1}{\omega^2 C}$$

จะได้ค่าอินดักแตนซ์ $L = \frac{1}{(2\pi(150))^2 (17 \times 10^{-6})} = 66.223 \text{ mH}$

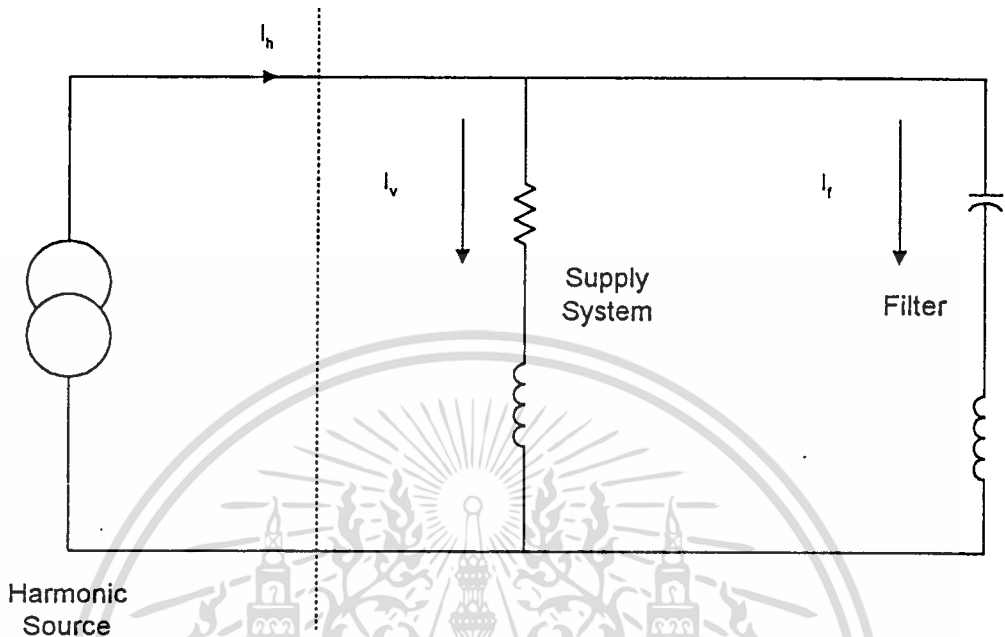
จากค่า VAR ที่กำหนดให้วงจรกรองจ่ายออกมา ทำให้ได้คาปาซิเตอร์ขนาด 17 ไมโครฟารัด และ ค่าความเหนี่ยวนำประมาณ 66.25 มิลลิเฮนรี่ ซึ่งทำให้รีโซแนนซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ 150 เฮิร์ตซ์ เป็นขนาดของค่าคาปาซิเตอร์และค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการ

การหาพิคัดของรีแอคเตอร์และคาปาซิเตอร์

ขณะที่โหลดไม่ต่อเนื่องซึ่งตัวหนึ่งเป็นอุปกรณ์ควบคุมกระแส อีกตัวหนึ่งเป็นอุปกรณ์ควบคุมกระแสเรกติไฟ ทั้งสองตัวทำงานโดยควบคุมมุมทริกของ SCR ทำงานพร้อม จะได้กระแสฮาร์มอนิกส์ที่ 3 มากที่สุด ที่การปรับมุมทริก 135 องศาและ 135 องศา ตามลำดับ

ทำการหากระแสที่ไหลผ่านวงจรกรองที่มากที่สุด ซึ่งได้จากขณะกรองฮาร์มอนิกส์ที่ 3 จาก

วงจร



รูปที่ 4.2 วงจรกรองฮาร์มอนิกส์

จากรูปที่ 4.2 เป็นวงจรของระบบที่ได้นำมาคำนวณโดยประมาณ โดยมีค่าความต้านทานกระแสของระบบ (Variac) เป็น $0.48 + j1.942$ โอห์ม ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์

จากข้อมูลที่ 135,135 องศา สามารถหาปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ (I_h) แต่ละอันดับได้ จากนั้นนำมาคำนวณกระแสที่ไหลผ่านวงจรกรองด้วยวิธีการแยกไหลของกระแส (Current Divider) ดังสมการต่อไปนี้

$$I_f = I_h \left[\frac{|Z_{\text{variac}}|}{|Z_{\text{filter}} + Z_{\text{variac}}|} \right]$$

$$I_f = I_h \left[\frac{|0.48 + j(2\pi f L_v)|}{\left| \left(j(2\pi f L_v) + \frac{1}{j(2\pi f L_v)} \right) + (0.48 + j(2\pi f L_v)) \right|} \right]$$

$$I_f = I_h \left[\frac{|0.48 + j(2\pi f L_v)|}{0.48 + j\left(2\pi f(L + L_v) - \frac{1}{2\pi f C}\right)} \right]$$

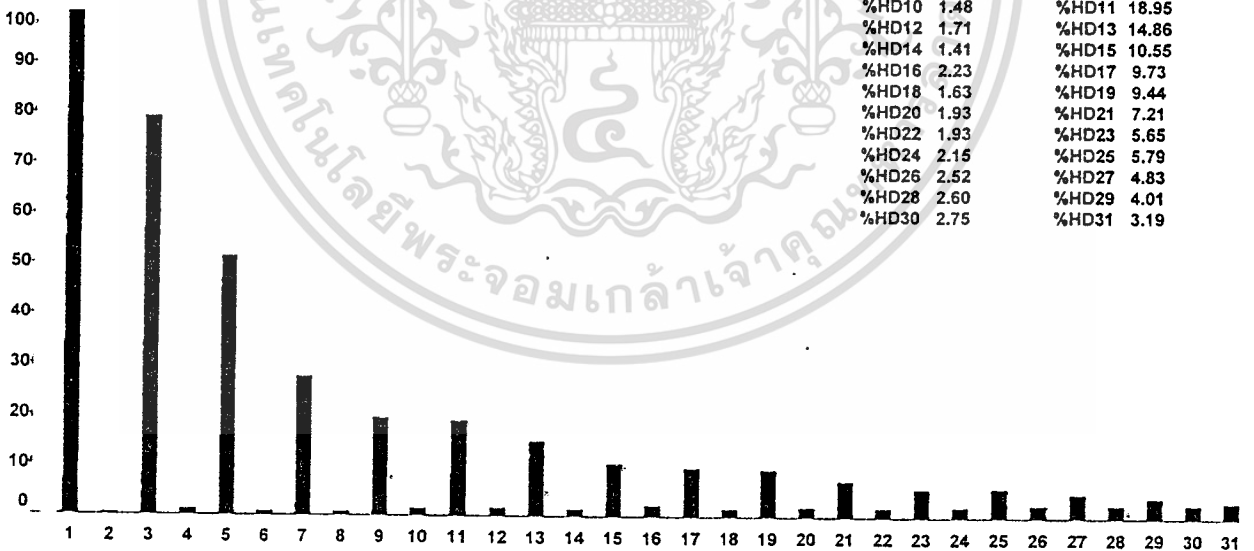
$$I_f = I_h \left[\frac{\sqrt{(0.48)^2 + (2\pi f L_v)^2}}{\sqrt{(0.48)^2 + \left(2\pi f(L + L_v) - \frac{1}{2\pi f C}\right)^2}} \right] \dots(4.3)$$

19/03/1997

Current L1
Corresponding RMS value 30 A
Fundamental Frequency 50.02 Hz
THD 99.80 %

Ac to Ac 135° Ac to Dc 135°

%HD2	0.37	%HD3	79.25
%HD4	1.11	%HD5	51.44
%HD6	0.81	%HD7	27.58
%HD8	0.74	%HD9	19.47
%HD10	1.48	%HD11	18.95
%HD12	1.71	%HD13	14.86
%HD14	1.41	%HD15	10.55
%HD16	2.23	%HD17	9.73
%HD18	1.63	%HD19	9.44
%HD20	1.93	%HD21	7.21
%HD22	1.93	%HD23	5.65
%HD24	2.15	%HD25	5.79
%HD26	2.52	%HD27	4.83
%HD28	2.60	%HD29	4.01
%HD30	2.75	%HD31	3.19



รูปที่ 4.3 ปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่มากที่สุดเมื่อทำการต่อโหลด 2 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเปอร์เซ็นต์กระแสฮาร์โมนิกอันดับต่าง ๆ ที่ได้นั้นเทียบกับกระแสความถี่หลักมูล ดังนั้นจึงต้องนำค่าที่ได้มาหากระแสหลักมูลก่อนโดยใช้

$$\text{จาก } I_{\text{true_rms}}^2 = I_{\text{ms1}}^2 + I_{\text{ms3}}^2 + I_{\text{ms5}}^2 + \dots + I_{\text{ms31}}^2$$

$$I_{\text{true_rms}}^2 = I_{\text{ms1}}^2 (1 + (\%HD3)^2 + (\%HD5)^2 + (\%HD7)^2 + \dots + (\%HD31)^2)$$

$$I_{\text{ms1}} = \frac{I_{\text{true_rms}}}{\sqrt{1 + (\%HD3)^2 + (\%HD5)^2 + \dots + (\%HD31)^2}} \quad \dots\dots(4.4)$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 4.4 จะได้กระแสความถี่หลักมูล จากนั้นนำ %HD ที่ได้อันดับต่าง ๆ มาเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์เพื่อหาค่ากระแสฮาร์โมนิกในแต่ละอันดับ (I_h) จากนั้นนำไปแทนค่าในสมการที่ 4.3 จะได้กระแสฮาร์โมนิกส่วนที่ไหลลงวงจรกรองและค่าที่ได้ต่างๆ ดังแสดงในตาราง 4.1

ลำดับที่	กระแสฮาร์โมนิกในระบบ (I_h) (A)	กระแสฮาร์โมนิกที่ลงฟิลเตอร์ (I_f) (A)	โวลต์เตจที่คาปาซิเตอร์ได้รับ (V) $V_C = IX_C$	โวลต์เตจที่รีแอคเตอร์ได้รับ (V) $V_L = IX_L$
1	-	1.321	247.35	27.49
3	1.636	1.636	102.13	102.132
5	1.062	0.135	5.07	14.08
7	0.569	0.058	1.56	8.51
9	0.402	0.038	0.79	7.15
11	0.391	0.035	0.61	8.20
13	0.36	0.027	.039	7.45
15	0.218	0.019	0.24	6.02
17	0.200	0.017	0.19	6.24
19	0.195	0.017	0.17	6.73
21	0.149	0.013	0.12	5.66

ลำดับ ที่	กระแสฮาร์โมนิก ในระบบ (I_h) (A)	กระแสฮาร์โมนิก ที่ลงฟิลเตอร์ (I_r) (A)	โวลต์เตจที่คาปาซิ เตอร์ได้รับ (V) $V_c = IX_c$	โวลต์เตจที่รี แอกเตอร์ได้รับ (V) $V_L = IX_L$
23	0.117	0.010	0.082	4.84
25	0.119	0.010	0.70	5.38
27	0.099	0.009	0.06	4.84
29	0.082	0.007	0.05	4.30
31	0.065	0.005	0.03	3.66
รวม		$\sqrt{\sum I^2} = 2.11 \text{ A}$	$\sqrt{\sum V_c^2} = 270 \text{ V}$	$\sqrt{\sum V_L^2} = 110 \text{ V}$

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงขนาดพิกัดของคาปาซิเตอร์และรีแอกเตอร์

ดังนั้นจะได้ค่ากระแสที่มากที่สุดประมาณ 2.1 แอมป์แปร์และโวลต์เตจที่คาปาซิเตอร์ได้รับ
ประมาณ 270 โวลต์

4.2 การออกแบบรีแอกเตอร์
จากสมการ

$$E = 4.44fNB\Phi_m$$

$$V = IZ$$

ประมาณค่าความต้านทานมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่ารีแอกแตนซ์ จะได้

$$V = IX_L$$

ดังนั้นจะได้

$$IX_L = 4.44fNB\Phi_m \quad \dots(4.5)$$

ทำการเลือกค่า B ให้อยู่ที่ 0.6 เทสลา ก่อนการกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรง แล้วทำการเลือกขนาดแกนเหล็ก ขนาด 2 นิ้ว (เพื่อพันได้ลงพอดีในภายหลัง) แทนค่าตัวแปรที่ได้และกระแสฟลักซ์ที่ได้จากหัวข้อ 4.1 ลงในสมการที่ 4.5

$$I(2\pi f \times 66.25 \times 10^{-3}) = 4.44fNB$$

$$N = \frac{(2.1)(2\pi \times 66.25 \times 10^{-3})}{4.44(0.6)(25 \times 10^{-4})}$$

$$N = 132 \text{ รอบ}$$

ดังนั้นควรใช้จำนวนรอบให้มากกว่า 132 รอบเพื่อให้ได้ค่าอินดักแตนซ์มากกว่าที่ต้องการเล็กน้อย แล้วจึงปรับค่าลดลงถึงค่าที่ต้องการ

จาก

$$L = \frac{N^2}{R} = \frac{N^2 \mu_0 A}{l_g}$$

โดยสมมติให้แกนมีความซึมซับประมาณเท่ากับอากาศ

$$I_g = \frac{N^2 \mu_0 A}{L}$$

$$I_g = \frac{(132)^2 (4\pi \times 10^{-7})(25 \times 10^{-4})}{66.25 \times 10^{-3}}$$

$$I_g = 0.826 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้นแกนจึงมีความหนา

$$g = \frac{l_g}{2} = 0.413 \text{ มิลลิเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับทางด้านขดลวดไฟฟ้ากระแสตรงแต่ละข้างจะได้

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad NI &= \phi R = \frac{BAI_g}{\mu_0 A} \\ NI &= \frac{Bg}{\mu_0} \end{aligned} \quad \text{.....(4.6)}$$

ดังนั้นถ้าต้องการยกระดับความเข้มสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นอีก 1.4 เทสลา(จากเดิม 0.6 เทสลา จะทำให้แกนเหล็กอิ่มตัวได้)

แทนค่าลงใน(4.6)จะได้

$$\begin{aligned} NI &= \frac{(1.4)(0.413 \times 10^{-3})}{4\pi \times 10^{-7}} \\ NI &= 460 \text{ แอมป์เทอรัน} \end{aligned}$$

ดังนั้นแรงเคลื่อนแม่เหล็กแต่ละข้างควรมากกว่า 460 แอมป์แแปร์เทอรันประมาณ 2 เท่า เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นโค้ง BH

เนื่องจากคุณภาพของกรรกรองทราบได้จากค่าตัวประกอบคุณภาพ(Quality factot(Q))

$$Q = \frac{X_{L \text{ at resonant}}}{R} \quad \text{.....(4.7)}$$

เลือกขนาดของขดลวดกลาง(AC) SWG 14 (เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร)

เลือกขนาดของขดลวดด้านข้าง(DC) SWG 24 (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.55 มิลลิเมตร)

จากขนาดแกนเหล็กที่ได้เลือก จะมีขนาดพื้นที่หน้าต่าง(Window Area) 25×75 มิลลิเมตร ดังนั้นขดลวดสามารถมีจำนวนรอบได้มากที่สุด $75/2 = 37.5$ รอบ

เนื่องจากผลของความหนาของวานิชที่เคลือบลวดและความคลาดเคลื่อนในการพัน จึงสามารถประมาณได้โดยการลบออกประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์จากที่คำนวณได้มากที่สุด ซึ่งจะพันได้ชั้นละ 34 รอบ ดังนั้นจึงต้องพันให้มากกว่า 4 ชั้น (ในที่นี้พัน 6 ชั้น) จึงจะได้จำนวนรอบที่ต้องการ

ซึ่งแต่ละชั้นจะมีกระดาษหนาประมาณ 1 มิลลิเมตรรอง ดังนั้นขดกลางนี้จะใช้เนื้อที่ความกว้างใน พื้นที่หน้าตัด $(2 \times 6) + 6 = 18$ มิลลิเมตร ซึ่งจะเหลือเนื้อที่ความกว้าง $25 - 18 = 7$ มิลลิเมตร

ทางด้านขดด้านข้างคำนวณได้ $75/0.55 = 136$ รอบ ประมาณ โดยการลบบอก 12 เปอร์เซ็นต์ ได้ประมาณ 116 รอบ และจากเนื้อที่ที่ยังเหลือสามารถพันได้ 8 ชั้น (รวมเป็น 930 รอบ) โดยแต่ละชั้นมีกระดาษหนาประมาณ 0.25 มิลลิเมตร ดังนั้นจะใช้เนื้อที่ใน $8(0.55 + 0.25) = 6.4$ มิลลิเมตร ซึ่งเป็นการพอเพียงแสดงว่าเป็นการพอเพียง แสดงว่าสามารถพันลงบนแกนนี้ได้

หาค่าความต้านทานของขดลวดได้จากตารางขดลวด และลวดที่ใช้พันมีความยาวรอบละ ประมาณ 28 เซนติเมตร จำนวน 204 รอบ ดังนั้นจะมีความยาว 57 เมตร จากตารางจะได้ลวดขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร มีความต้านทาน 0.534 โอห์มต่อร้อยเมตร

ดังนั้นลวดจะมีความต้านทาน 0.3 โอห์ม

จากสมการที่ 4.7

$$Q \text{ ขดกรองอันดับ 3} = \frac{2\pi(150)(66.25 \times 10^{-3})}{0.3}$$

$$Q \cong 200$$

ในส่วน Q ขดกรองอันดับที่ 5 คือ

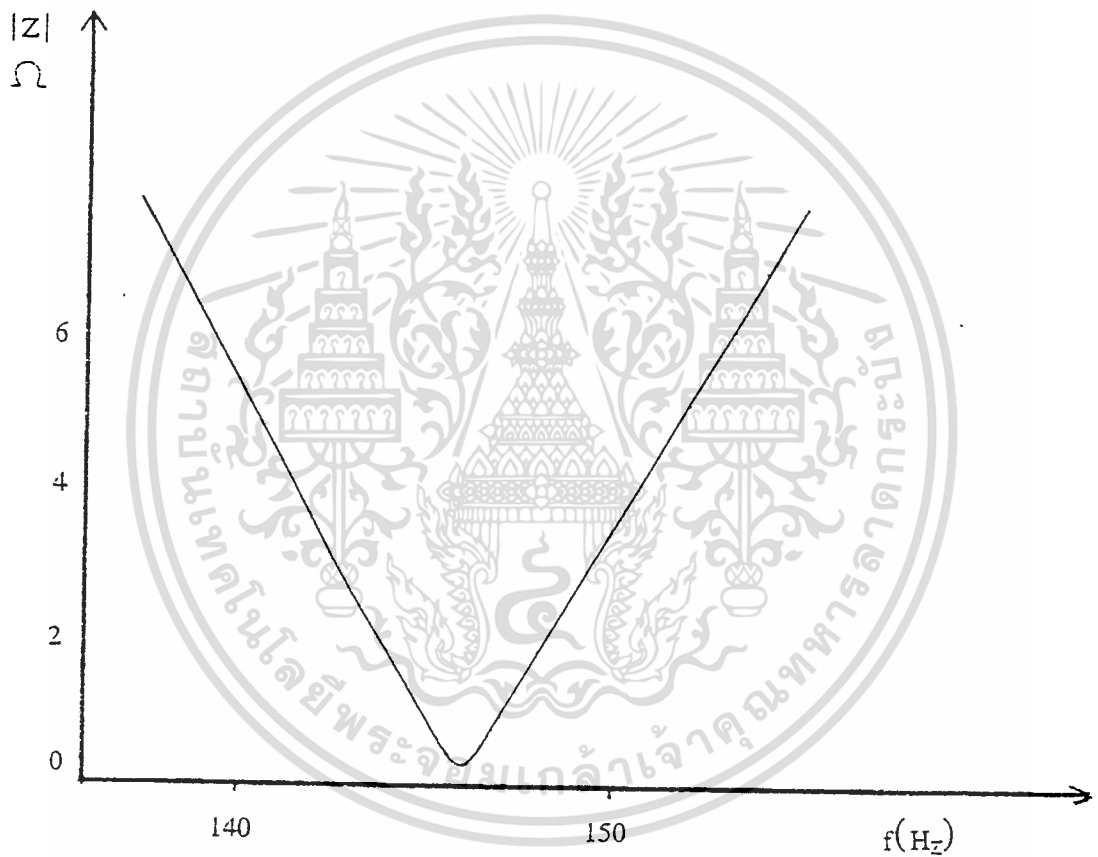
$$Q = \frac{2\pi(250)(23.84 \times 10^{-3})}{0.3}$$

$$= 125$$

$$Q \text{ ขดกรองอันดับที่ 7} = \frac{2\pi(350)(12.16 \times 10^{-3})}{0.3}$$

$$= 90$$

ซึ่งค่า Q ที่ได้กล่าวมาเป็นค่าที่ยอมรับได้



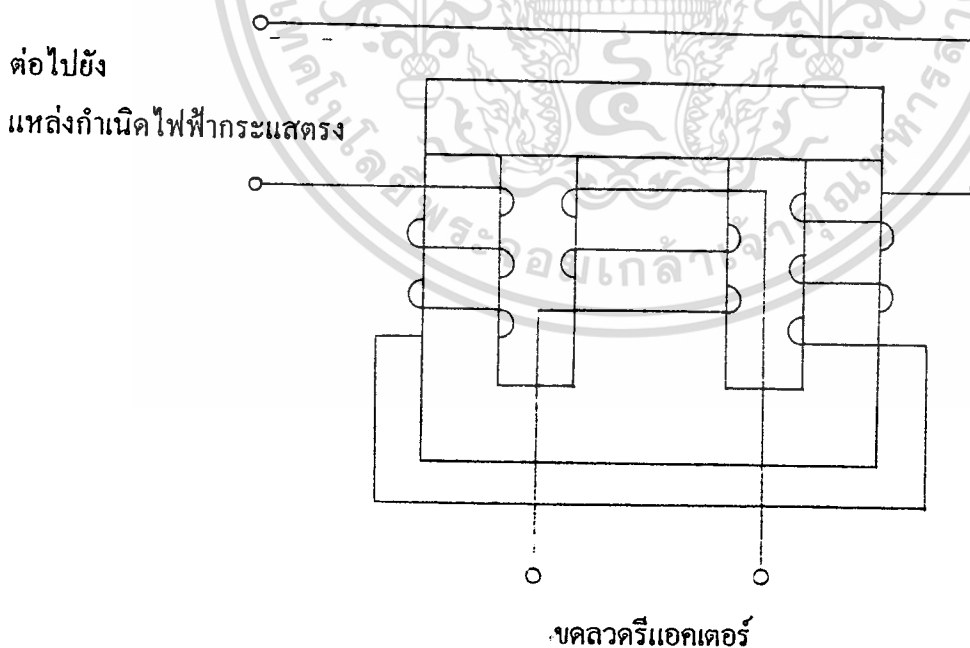
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงคุณภาพของตัวกรอง (Q)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คั้งที่ได้ทำการออกแบบนั้นเป็นการใช้ทฤษฎีพื้นฐานในการคำนวณ และประสบการณ์จากการพันขดลวดจริง ในการประมาณให้ได้รีแอคเตอร์ที่ต้องการ คั้งสรุปได้คั้งนี้

รีแอคเตอร์ใช้แกนเหล็กรูป EI ขนาด 2 นิ้ว มีขดลวด 3 ขด ขดกลางจะออกแบบให้ได้ค่าอินดักแตนซ์และค่า Q ที่ต้องการ มีทั้งหมด 204 รอบ และมีแทปที่ 136 และ 100 รอบ

ขดด้านข้าง ใช้ในการกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรงจำนวนข้างละ 930 รอบ เพื่อยกระดับความเข้มสนามแม่เหล็ก ทำให้ค่าอินดักแตนซ์ลดลง ซึ่งขดด้านข้างนี้จะต่อในลักษณะที่ไม่ทำให้เกิดโวลต์เดงเหนี่ยวนำ จึงทำให้กระแสตรงคงที่และไม่เป็นอันตรายต่อแหล่งกำเนิดกระแสตรงแสดงคั้งรูป



รูปที่ 4.5 รูปรีแอคเตอร์ที่ได้ทำการออกแบบ

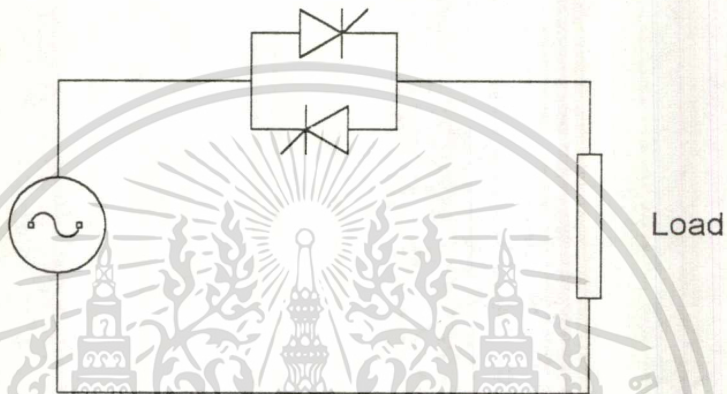
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

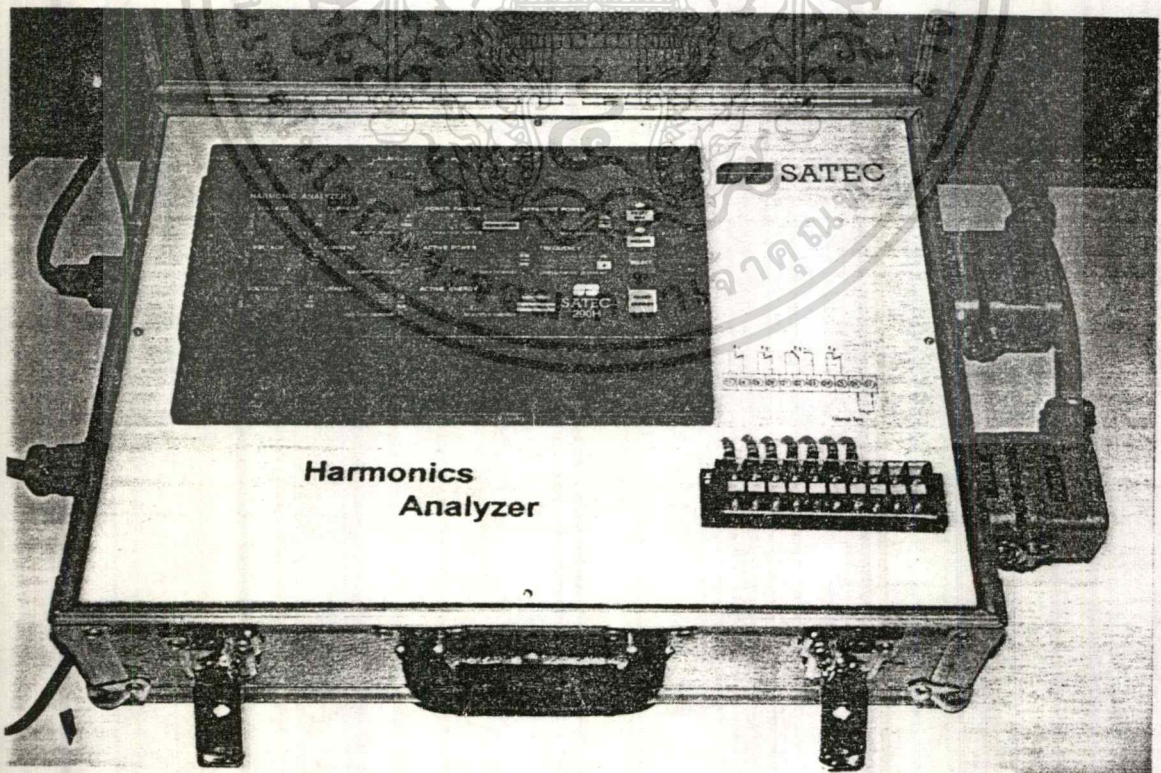
การทดลองและผลการทดลอง

5.1 การวัดฮาร์มอนิกส์จากอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งใช้เป็นตัวสร้างฮาร์มอนิกส์ในโครงงานนี้

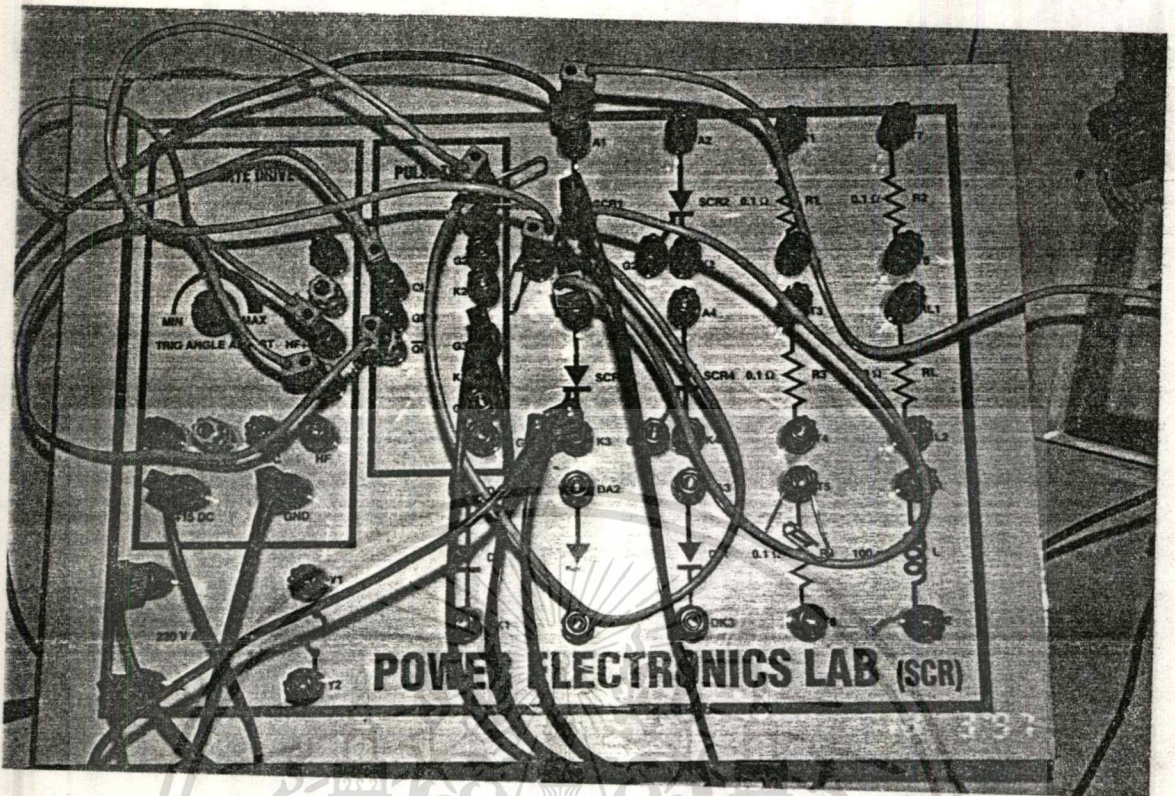
5.1.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์ (Converter)



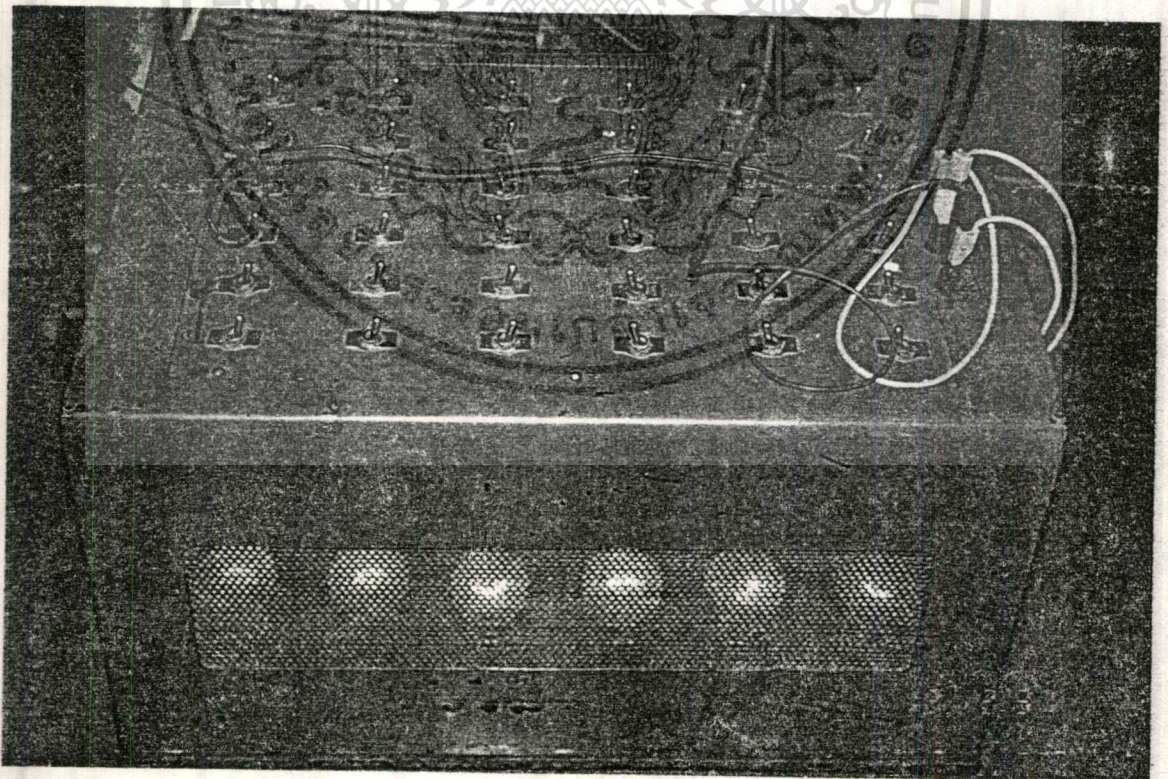
รูปที่ 5.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์ (Converter)



รูปที่ 5.2 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง คือ เครื่องวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 แผงวงจรที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 5.4 โหลดที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

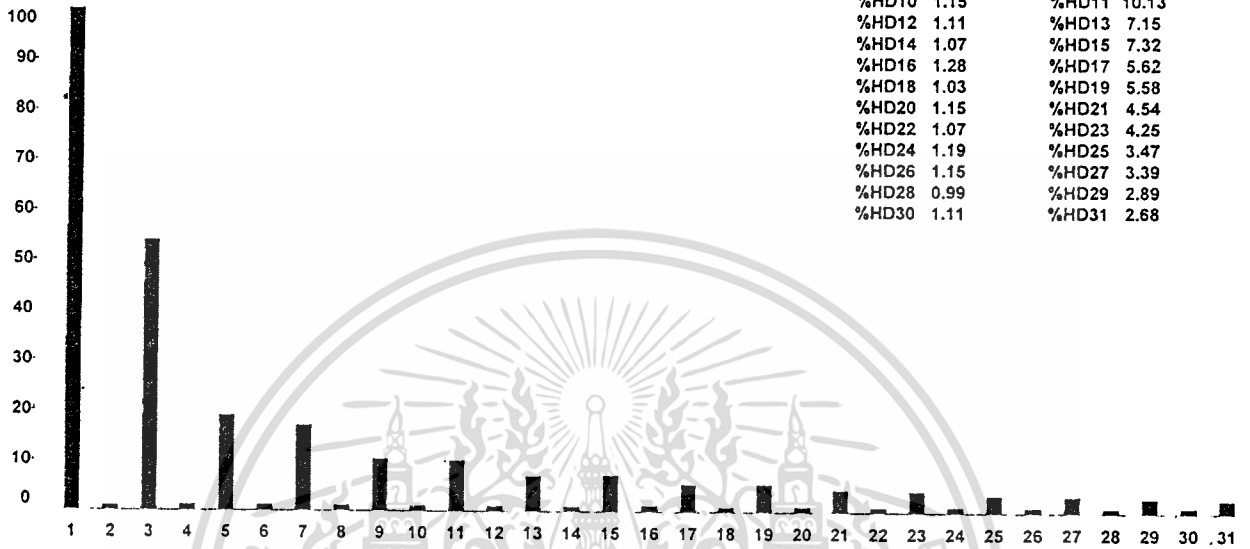
5.1.2 ผลการทดลองการวัดฮาร์มอนิกส์ที่มุมเฟส 90°

26/03/1997

Current L1
Corresponding RMS value 55 A
Fundamental Frequency 50.01 Hz
THD 63.20 %

Ac to Ac at 90°

%HD2	0.99	%HD3	53.92
%HD4	1.24	%HD5	19.02
%HD6	1.24	%HD7	17.08
%HD8	1.19	%HD9	10.38
%HD10	1.15	%HD11	10.13
%HD12	1.11	%HD13	7.15
%HD14	1.07	%HD15	7.32
%HD16	1.28	%HD17	5.62
%HD18	1.03	%HD19	5.58
%HD20	1.15	%HD21	4.54
%HD22	1.07	%HD23	4.25
%HD24	1.19	%HD25	3.47
%HD26	1.15	%HD27	3.39
%HD28	0.99	%HD29	2.89
%HD30	1.11	%HD31	2.68



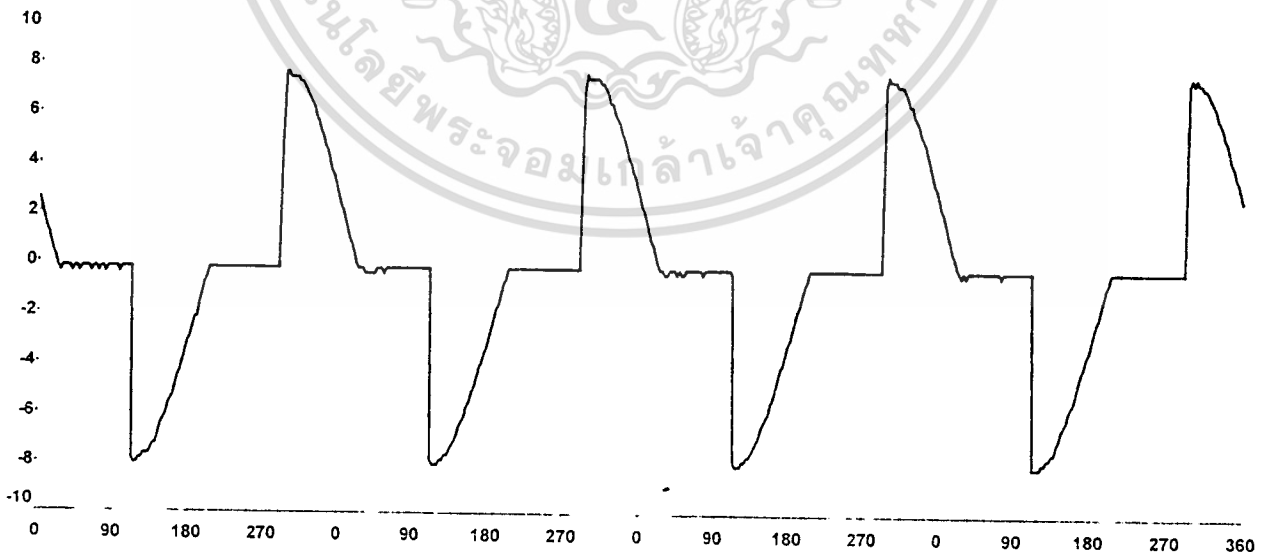
รูปที่ 5.5 ปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่มุมเฟส 90°

26/03/1997

Current L1
Corresponding RMS value 55 A
Fundamental Frequency 49.95 Hz
THD 63.20 %

Ac to Ac at 90°

Capture Date 27/04/97
Capture Time 16:45:11



รูปที่ 5.6 รูปคลื่นกระแสฮาร์มอนิกส์ที่มุมเฟส 90°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ผลการทดลองค่าอินดักแตนซ์ของรีแอกเตอร์ที่ใช้ในวงจรกรอง

I(Amp)	V(Volt)	Z	R	X_L	$L = X_L/2\pi f$
0.5	11.74	23.48	0.2	23.48	74.74
1.0	25.33	25.33	0.2	25.33	80.63
1.5	39.1	26.07	0.2	26.07	82.98
2.0	52.9	26.45	0.2	26.45	84.19
2.5	65.6	26.24	0.2	26.24	83.52
3.0	76.4	25.47	0.2	25.47	81.07

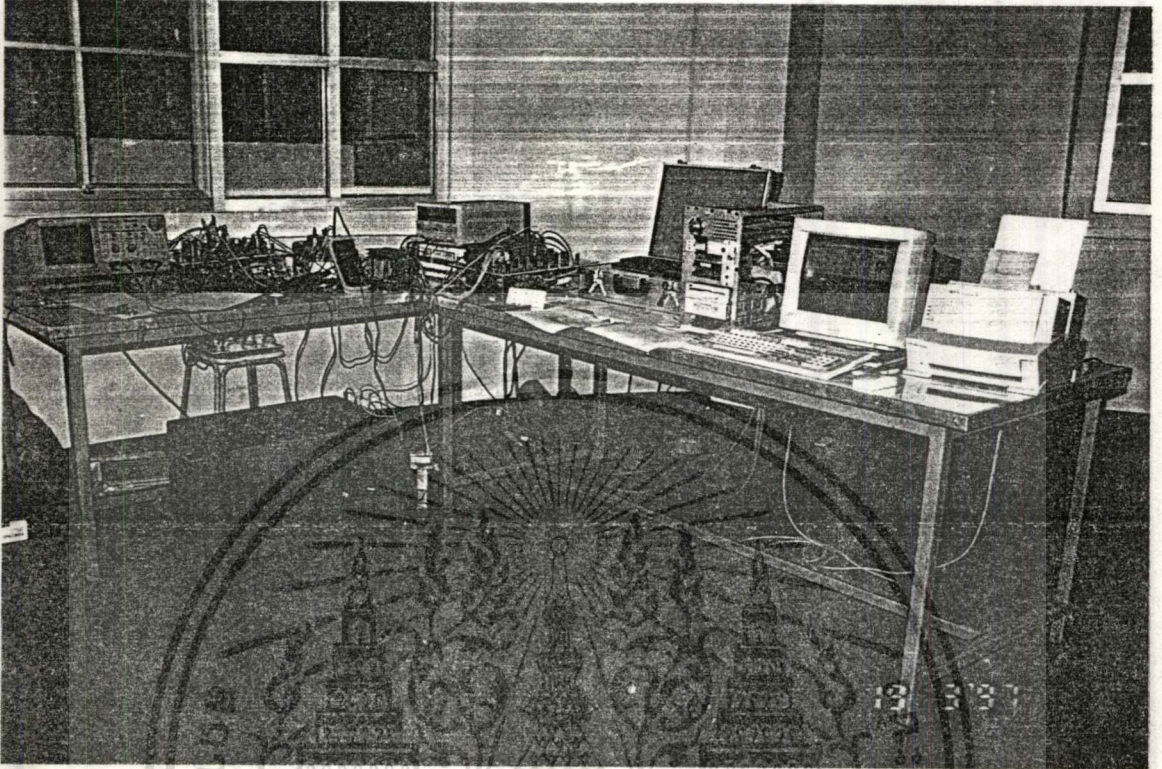
ตารางที่ 5.1 ค่าอินดักแตนซ์ของรีแอกเตอร์ที่ใช้ในวงจรกรอง

I_{AC} (Amp)	I_{DC} (Amp)	V(Volt)	Z	R	X_L	$L = X_L/2\pi f$
1.0	0	25.17	25.17	0.2	25.17	80.12
1.5	0.230	24.93	16.62	0.2	16.62	52.90
2.0	0.295	24.60	12.30	0.2	12.30	39.15
2.5	0.355	24.50	9.80	0.2	9.80	31.19
3.0	0.420	24.14	8.05	0.2	8.05	25.61
3.5	0.480	23.74	6.78	0.2	6.78	21.59
4.0	0.555	23.47	5.87	0.2	5.87	18.68

ตารางที่ 5.2 ค่าอินดักแตนซ์ของรีแอกเตอร์ที่ถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลการทดลองเมื่อใส่วงจรกรองในระบบ



รูปที่ 5.7 รูปแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.1 ผลการทดลองการกรองฮาร์มอนิกส์เมื่อมีวงจรคอนเวอร์เตอร์เป็นตัวสร้างฮาร์มอนิกส์

1. ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบเมื่อใส่วงจรกรอง

1.1 ผลการทดลองเมื่อกรองฮาร์มอนิกส์ที่ 3

20/03/1997

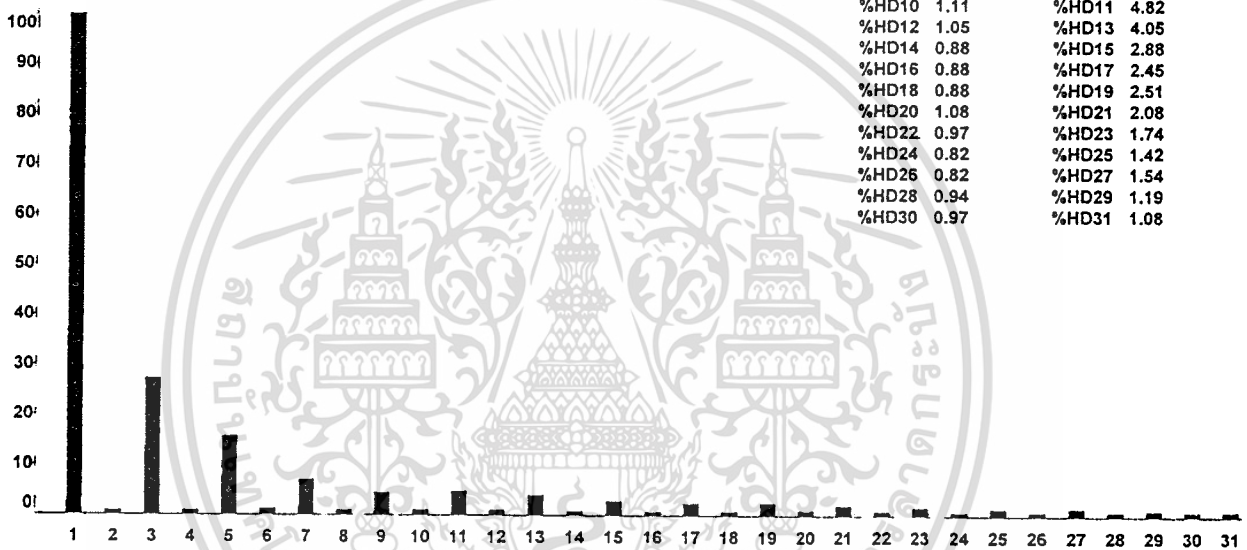
Current L1

Corresponding RMS value 59 A

Fundamental Frequency 49.92 Hz

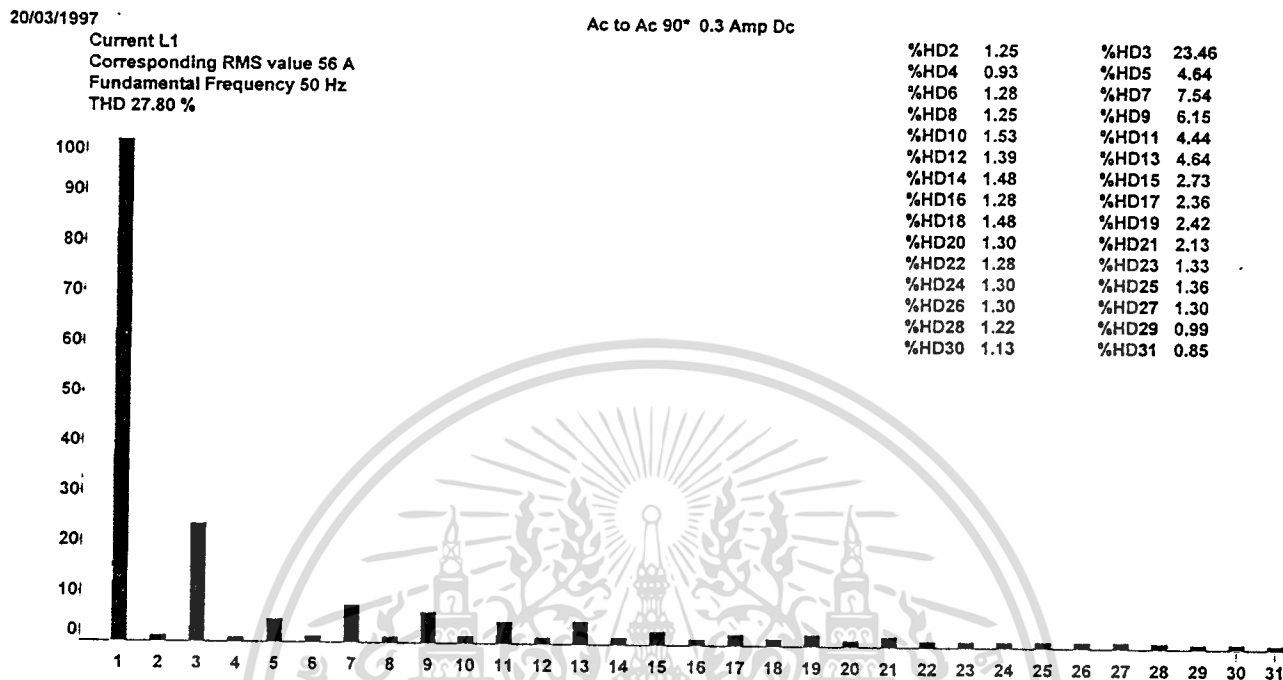
THD 34.50 %

Ac to Ac 90° 0.145 Amp Dc



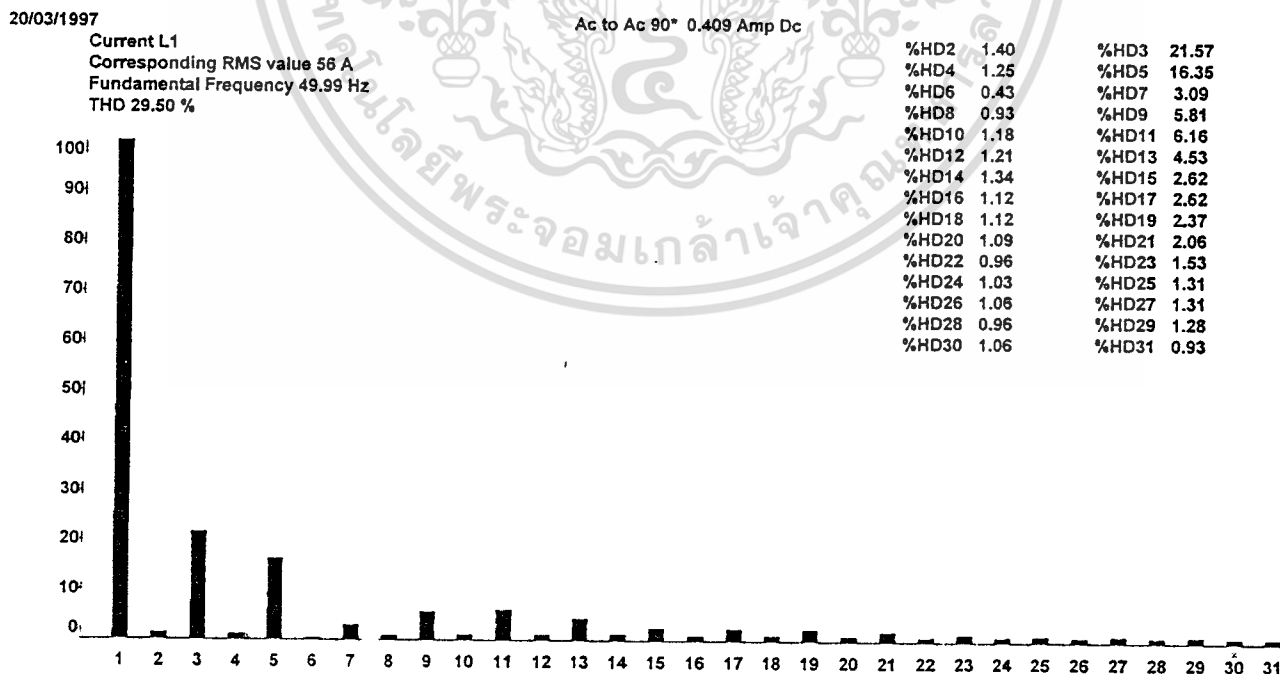
รูปที่ 5.8 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบเมื่อกรองฮาร์มอนิกส์ที่ 3

1.2 ผลการทดลองเมื่อกรองฮาร์มอนิกส์ที่ 5



รูปที่ 5.9 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบเมื่อกรองฮาร์มอนิกส์ที่ 5

1.3 ผลการทดลองเมื่อกรองฮาร์มอนิกส์ที่ 7



รูปที่ 5.10 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบเมื่อกรองฮาร์มอนิกส์ที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปริมาณกระแสและแรงดันที่ผ่านฟิลเตอร์

2.1 ผลการทดลองเมื่อกรองฮาร์มอนิกส์ที่ 3

20/03/1997

Ac to Ac 90° 0.145 AmpDc

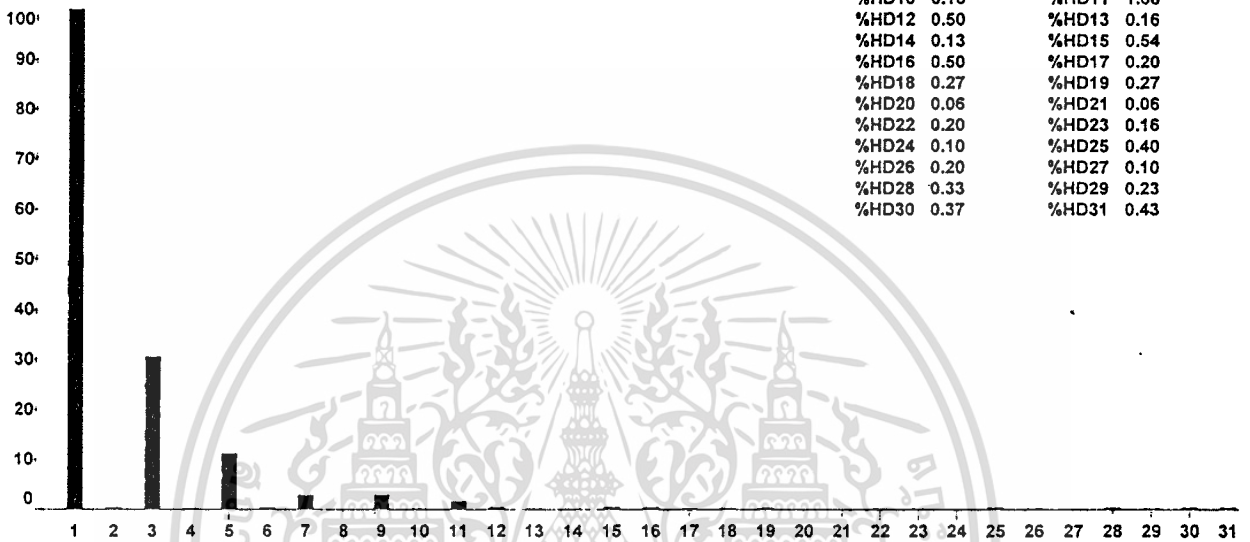
Current L1

Corresponding RMS value 31 A

Fundamental Frequency 49.90 Hz

THD 30.80 %

%HD2	0.37	%HD3	30.64
%HD4	0.13	%HD5	11.21
%HD6	0.43	%HD7	2.93
%HD8	0.06	%HD9	2.97
%HD10	0.16	%HD11	1.68
%HD12	0.50	%HD13	0.16
%HD14	0.13	%HD15	0.54
%HD16	0.50	%HD17	0.20
%HD18	0.27	%HD19	0.27
%HD20	0.06	%HD21	0.06
%HD22	0.20	%HD23	0.16
%HD24	0.10	%HD25	0.40
%HD26	0.20	%HD27	0.10
%HD28	0.33	%HD29	0.23
%HD30	0.37	%HD31	0.43



รูปที่ 5.11 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ไหลลงฟิลเตอร์ที่ฮาร์มอนิกส์ที่ 3

20/03/1997

Ac to Ac 90° 0.145 AmpDc

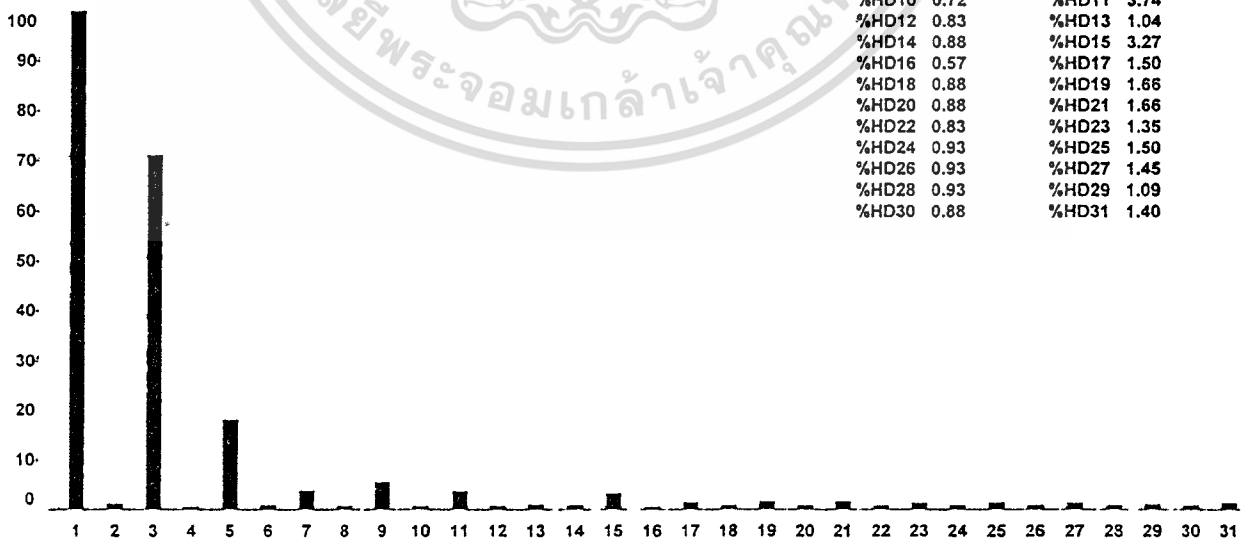
Voltage L1

Corresponding RMS value 45 V

Fundamental Frequency 49.96 Hz

THD 71.90 %

%HD2	1.09	%HD3	71.17
%HD4	0.52	%HD5	18.10
%HD6	0.88	%HD7	3.90
%HD8	0.78	%HD9	5.51
%HD10	0.72	%HD11	3.74
%HD12	0.83	%HD13	1.04
%HD14	0.88	%HD15	3.27
%HD16	0.57	%HD17	1.50
%HD18	0.88	%HD19	1.66
%HD20	0.88	%HD21	1.66
%HD22	0.83	%HD23	1.35
%HD24	0.93	%HD25	1.50
%HD26	0.93	%HD27	1.45
%HD28	0.93	%HD29	1.09
%HD30	0.88	%HD31	1.40



รูปที่ 5.12 ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกส์ตกคร่อมฟิลเตอร์ที่ฮาร์มอนิกส์ที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ผลการทดลองเมื่อกรองฮาร์มอนิกส์ที่ 5

20/03/1997

Current L1
Corresponding RMS value 29 A
Fundamental Frequency 59.31 Hz
THD 19.60 %

Ac to Ac 90° 0.3 AmpDc

%HD2	0.73	%HD3	2.35
%HD4	1.92	%HD5	18.11
%HD6	0.61	%HD7	6.56
%HD8	0.64	%HD9	2.65
%HD10	0.79	%HD11	1.00
%HD12	0.15	%HD13	0.21
%HD14	0.24	%HD15	0.36
%HD16	0.15	%HD17	0.33
%HD18	0.45	%HD19	0.42
%HD20	0.27	%HD21	0.18
%HD22	0.21	%HD23	0.45
%HD24	0.24	%HD25	0.48
%HD26	0.33	%HD27	0.39
%HD28	0.00	%HD29	0.30
%HD30	0.30	%HD31	0.21



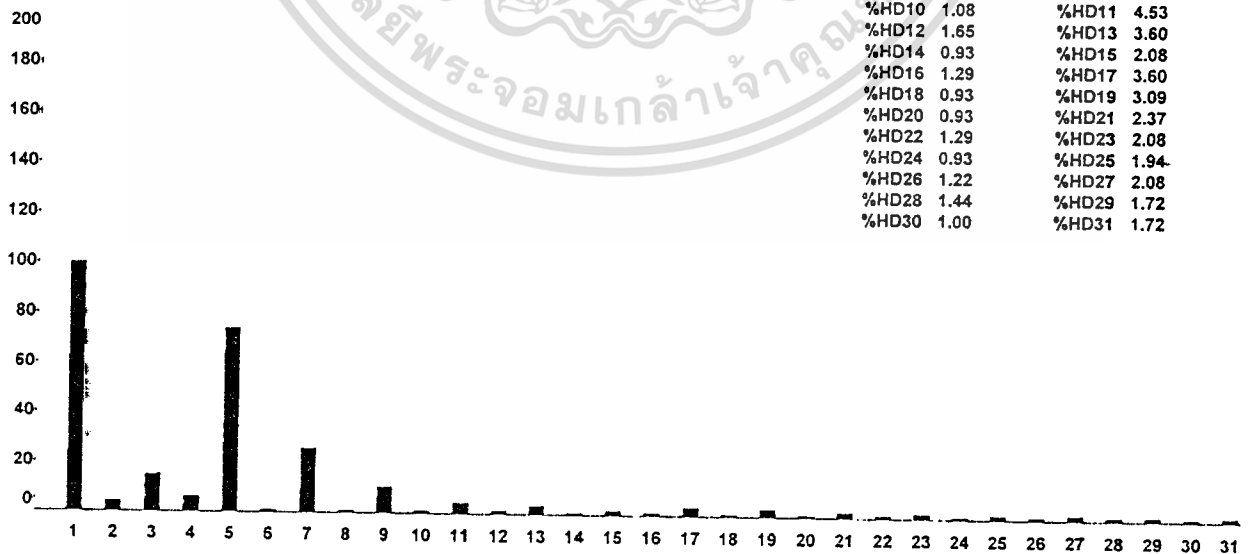
รูปที่ 5.13 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ไหลลงฟิวเตอร์ที่ฮาร์มอนิกส์ที่ 5

20/03/1997

Voltage L1
Corresponding RMS value 18 V
Fundamental Frequency 49.90 Hz
THD 75 %

Ac to Ac 90° 0.3 AmpDc

%HD2	4.10	%HD3	14.98
%HD4	6.26	%HD5	74.27
%HD6	1.00	%HD7	25.93
%HD8	1.08	%HD9	10.66
%HD10	1.08	%HD11	4.53
%HD12	1.65	%HD13	3.60
%HD14	0.93	%HD15	2.08
%HD16	1.29	%HD17	3.60
%HD18	0.93	%HD19	3.09
%HD20	0.93	%HD21	2.37
%HD22	1.29	%HD23	2.08
%HD24	0.93	%HD25	1.94
%HD26	1.22	%HD27	2.08
%HD28	1.44	%HD29	1.72
%HD30	1.00	%HD31	1.72



รูปที่ 5.14 ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกส์ตกคร่อมฟิวเตอร์ที่ฮาร์มอนิกส์ที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ผลการทดลองเมื่อกรองฮาร์มอนิกส์ที่ 7

20/03/1997

Current L1

Corresponding RMS value 29 A

Fundamental Frequency 49.90 Hz

THD 26.50 %

Ac to Ac 90° 0.409 AmpDc

%HD2	0.09	%HD3	2.54
%HD4	0.63	%HD5	18.69
%HD6	1.20	%HD7	18.84
%HD8	0.60	%HD9	2.96
%HD10	0.39	%HD11	1.05
%HD12	0.15	%HD13	1.02
%HD14	0.66	%HD15	0.21
%HD16	0.30	%HD17	0.21
%HD18	0.42	%HD19	0.09
%HD20	0.48	%HD21	0.27
%HD22	0.63	%HD23	0.36
%HD24	0.15	%HD25	0.30
%HD26	0.33	%HD27	0.51
%HD28	0.24	%HD29	0.21
%HD30	0.00	%HD31	0.36



รูปที่ 5.15 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ไหลลงฟิลเตอร์ที่ฮาร์มอนิกส์ที่ 7

20/03/1997

Voltage L1

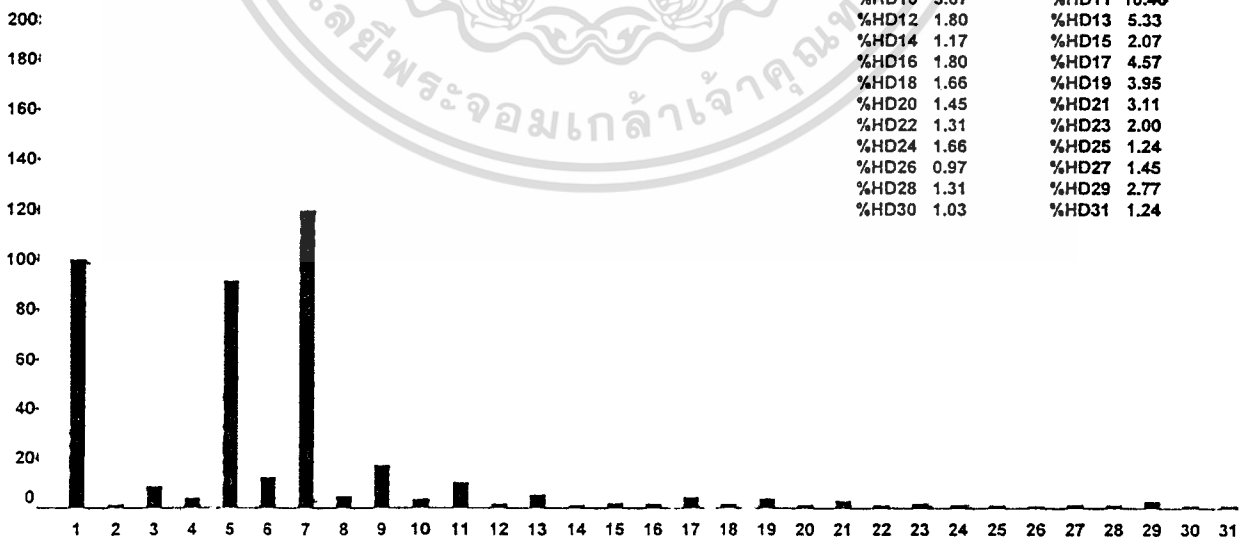
Corresponding RMS value 10 V

Fundamental Frequency 49.79 Hz

THD 99.80 %

Ac to Ac 90° 0.409 AmpDc

%HD2	1.45	%HD3	8.80
%HD4	4.15	%HD5	91.54
%HD6	12.33	%HD7	119.60
%HD8	4.78	%HD9	17.32
%HD10	3.67	%HD11	10.46
%HD12	1.80	%HD13	5.33
%HD14	1.17	%HD15	2.07
%HD16	1.80	%HD17	4.57
%HD18	1.66	%HD19	3.95
%HD20	1.45	%HD21	3.11
%HD22	1.31	%HD23	2.00
%HD24	1.66	%HD25	1.24
%HD26	0.97	%HD27	1.45
%HD28	1.31	%HD29	2.77
%HD30	1.03	%HD31	1.24



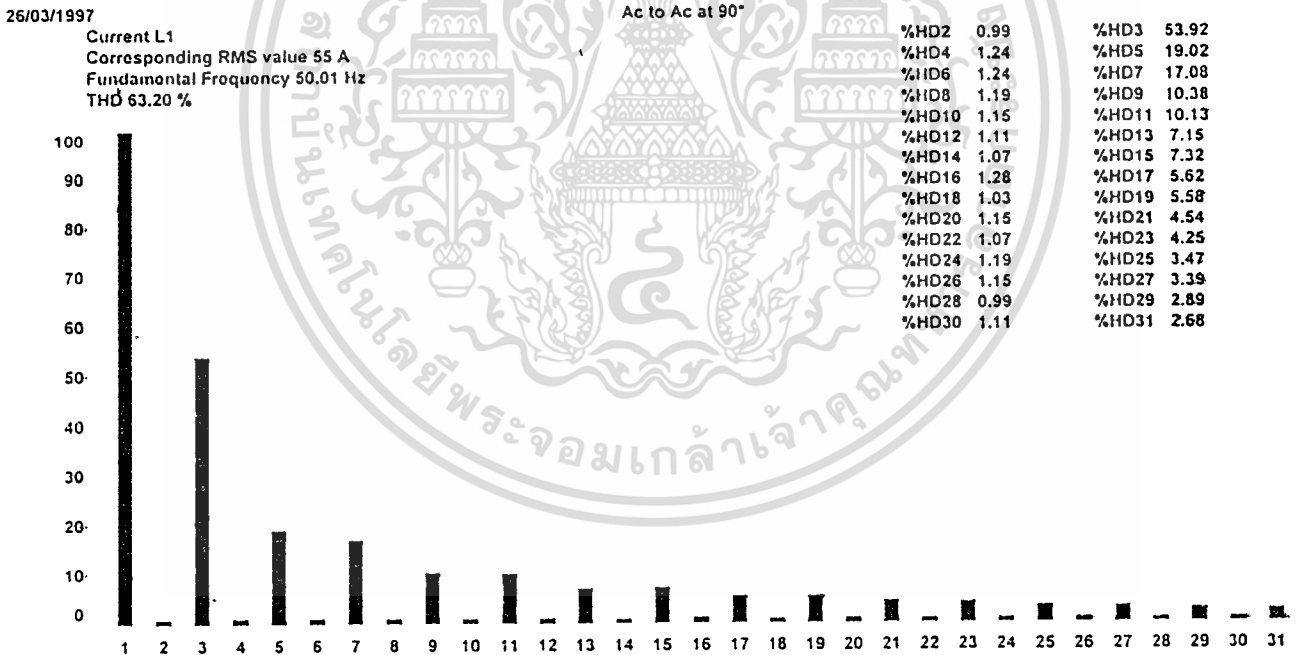
รูปที่ 5.16 ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกส์ตกคร่อมฟิลเตอร์ที่ฮาร์มอนิกส์ที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

บทวิจารณ์และสรุป

โครงการนี้เป็นการศึกษาการกรองฮาร์มอนิกส์ โดยใช้วงจรกรองฮาร์มอนิกส์แบบจูน เราใช้รีแอกเตอร์ที่สามารถปรับค่าได้มาช่วยในการกรองฮาร์มอนิกส์ลำดับต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าการกรองฮาร์มอนิกส์อันดับหนึ่งๆ ต้องการค่าอินดักแตนซ์และคาปาซิแตนซ์ที่คงที่แน่นอนแต่จากการทดลองรีแอกเตอร์อิมิตัวนี้พบว่าค่าอินดักแตนซ์ที่ได้เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงคาบของสัญญาณเมื่อมีการกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรงค่าหนึ่งๆ เนื่องจากค่าอินดักแตนซ์เปลี่ยนแปลงในช่วงกว้างทำให้การกรองไม่ดีเท่าที่ควร หรืออาจเกิดจากสาเหตุที่ว่ารีแอกเตอร์ที่นำมาใช้เป็นฟิลเตอร์ทำงานอยู่ในช่วงอิมิตัว ซึ่งตัวมันเองจะเป็นตัวจ่ายกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3 ออกมาด้วย จึงทำให้ดูเหมือนว่ากรองฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 3 ได้ไม่ดี ซึ่งสังเกตได้จากผลการทดลอง



รูปที่ 6.1 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ก่อนใส่วงจรกรอง

20/03/1997

Ac to Ac 90° 0.145 Amp Dc

Current L1
Corresponding RMS value 59 A
Fundamental Frequency 49.92 Hz
THD 34.50 %

%HD2	0.94	%HD3	27.33
%HD4	1.02	%HD5	15.68
%HD6	1.28	%HD7	7.11
%HD8	1.08	%HD9	4.51
%HD10	1.11	%HD11	4.82
%HD12	1.05	%HD13	4.05
%HD14	0.88	%HD15	2.88
%HD16	0.88	%HD17	2.45
%HD18	0.88	%HD19	2.51
%HD20	1.08	%HD21	2.08
%HD22	0.97	%HD23	1.74
%HD24	0.82	%HD25	1.42
%HD26	0.82	%HD27	1.54
%HD28	0.94	%HD29	1.19
%HD30	0.97	%HD31	1.08



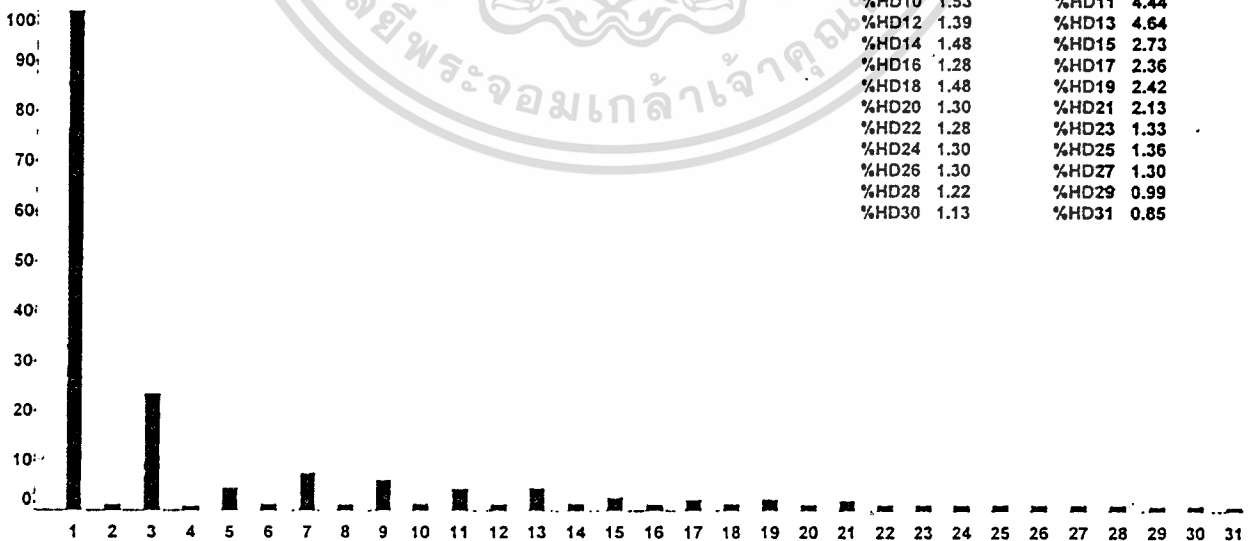
รูปที่ 6.2 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อกรองฮาร์มอนิกส์ที่ 3

20/03/1997

Ac to Ac 90° 0.3 Amp Dc

Current L1
Corresponding RMS value 56 A
Fundamental Frequency 50 Hz
THD 27.80 %

%HD2	1.25	%HD3	23.46
%HD4	0.93	%HD5	4.64
%HD6	1.28	%HD7	7.54
%HD8	1.25	%HD9	6.15
%HD10	1.53	%HD11	4.44
%HD12	1.39	%HD13	4.64
%HD14	1.48	%HD15	2.73
%HD16	1.28	%HD17	2.36
%HD18	1.48	%HD19	2.42
%HD20	1.30	%HD21	2.13
%HD22	1.28	%HD23	1.33
%HD24	1.30	%HD25	1.36
%HD26	1.30	%HD27	1.30
%HD28	1.22	%HD29	0.99
%HD30	1.13	%HD31	0.85



รูปที่ 6.3 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อกรองฮาร์มอนิกส์ที่ 5

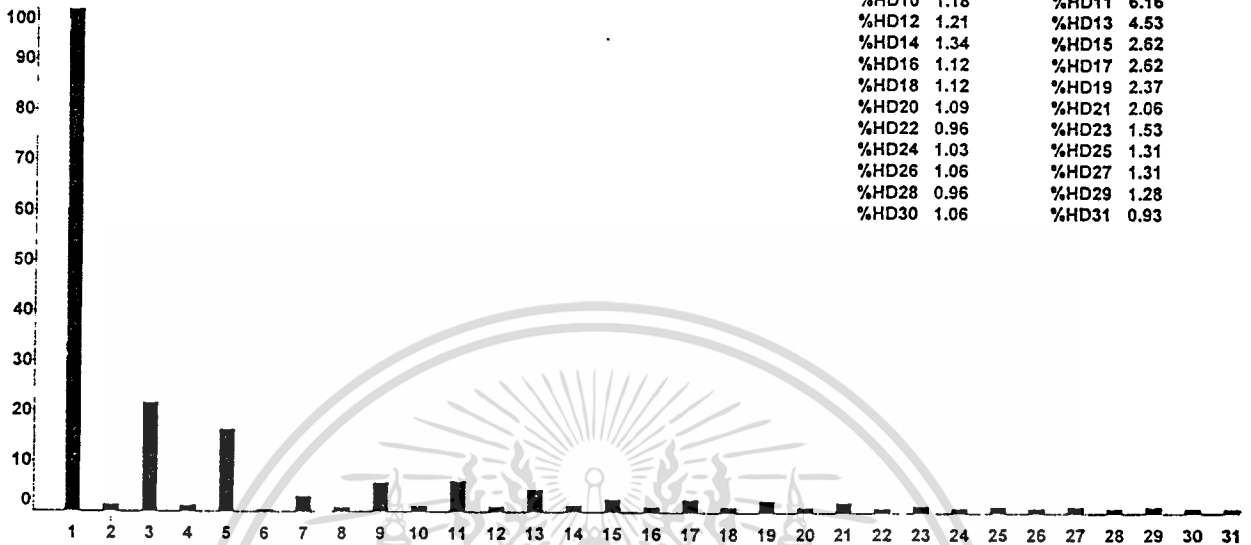
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20/03/1997

Ac to Ac 90° 0.409 Amp Dc

Current L1
Corresponding RMS value 56 A
Fundamental Frequency 49.99 Hz
THD 29.50 %

%HD2	1.40	%HD3	21.57
%HD4	1.25	%HD5	16.35
%HD6	0.43	%HD7	3.09
%HD8	0.93	%HD9	5.81
%HD10	1.18	%HD11	6.16
%HD12	1.21	%HD13	4.53
%HD14	1.34	%HD15	2.62
%HD16	1.12	%HD17	2.62
%HD18	1.12	%HD19	2.37
%HD20	1.09	%HD21	2.06
%HD22	0.96	%HD23	1.53
%HD24	1.03	%HD25	1.31
%HD26	1.06	%HD27	1.31
%HD28	0.96	%HD29	1.28
%HD30	1.06	%HD31	0.93



รูปที่ 6.4 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกเมื่อกรองฮาร์มอนิกที่ 7

การพัฒนาโครงการนี้ต่อไปอาจทำได้โดย ออกแบบส่วนวงจรควบคุมเพื่อรับค่าจากส่วนตรวจจับฮาร์มอนิกส์ในการกรองฮาร์มอนิกส์ลำดับต่างๆที่ต้องการ

ปัญหาที่พบ 1. เกิดความผิดพลาดขึ้นในโปรแกรมที่ใช้ในการแสดงค่าฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากเครื่องวัด ทำให้เสียเวลาในการแก้ไขความผิดพลาดในโปรแกรม

2. โปรแกรมที่ใช้ในการแสดงค่าฮาร์มอนิกส์ยังมีข้อบกพร่องในการแสดงผลการวัด เนื่องจากค่าที่วัดได้ไม่ใช่ค่าในขณะนั้นๆ แต่เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัด ทำให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อน

3. การหาตัวคาปาซิเตอร์ที่จะนำมาใช้ลำบาก เนื่องจากต้องใช้คาปาซิเตอร์ที่ทนแรงดันไฟฟ้าได้สูง จึงไม่ค่อยมีขายตามท้องตลาด

4. ค่ารีแอคเตอร์ที่พันได้มีค่าความคลาดเคลื่อนสูง ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากค่าตัวประกอบในการพัน (Winding Factor) โดยที่จำนวนรอบของขดลวดที่แยกพันทั้งสองข้างของแกนเหล็กอาจไม่เท่ากันและเนื่องมาจากระยะแคบ (Gap) ในแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งมีผลทำให้ค่าอินดักแตนซ์ที่ได้ไม่ตรงตามที่ต้องการ

5. เมื่อทำการกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้ได้ค่าอินดักแตนซ์ตามที่ต้องการแล้ว เมื่อนำมาทำการกรองกลับพบว่าไม่สามารถกรองฮาร์มอนิกส์ที่ต้องการได้ทั้งหมด ซึ่ง

อาจเป็นผลเนื่องมาจากค่าความต้านทานในขดลวดที่ใช้มีค่าสูง เราจึงทำการพันรีแอกเตอร์ใหม่ โดยกำหนดให้ค่าความต้านทานมีค่าน้อยลง เมื่อนำมาทำการกรองจะพบว่าให้ประสิทธิภาพในการกรองที่สูงกว่า แต่ช่วงการปรับค่อนข้างกว้าง จึงไม่สามารถกรองฮาร์โมนิกส์ได้สมบูรณ์

แนวทางแก้ไข การปรับค่าอินดักแตนซ์เพื่อกรองฮาร์โมนิกส์หลายๆอันดับไม่เหมาะสม เนื่องจากค่าอินดักแตนซ์เปลี่ยนแปลงทุกๆคาบของสัญญาณ ดังนั้นจึงควรปรับค่าอินดักแตนซ์ในช่วงแคบๆ เพื่อที่จะทำให้ได้ค่าอินดักแตนซ์ที่ตรงกับฮาร์โมนิกส์ที่ต้องการกรองเพียงค่าเดียว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางเทียบขนาดลวด

เบอร์ S.W.G.	ความโต		พื้นที่หน้าตัด		ทนกระแสได้(แอมแปร์)		เป็นฟิวท์ ทนได้ (Amp.)	น้ำหนัก/ 100 ม.(กก.)	ความต้าน ทาน/100 ม.	เบอร์ A.W.G.
	นิ้ว	มม.	เซกดูกลมิล	ตารางมม.	หุ้มยาง	ลวดเปล่า				
0000	0.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
000	0.372	-	-	-	-	-	-	-	-	-
00	0.348	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19/12 0	0.324	8.23	105,500	54.186	125	200	-	47.925	0.33	0
1	0.36	7.62	90,000	46.451	-	-	-	-	-	-
19/13 -	-	-	83,690	-	100	150	-	37.995	0.042	1
2	0.276	7.06	77,176	39.874	-	-	-	-	-	-
19/15 3	0.252	6.4	66,370	32.768	90	125	-	30.185	0.052	2
19/16 4	0.232	5.89	52,630	27.753	-	-	-	23.895	0.066	3
5	0.212	5.38	41,740	23.155	70	90	-	18.96	0.083	4
19/18 6	0.192	4.88	33,100	18.251	-	-	-	15.03	0.105	5 1/2
7	0.176	4.46	30,976	15.913	-	-	-	-	-	-
8	0.16	4.06	26,250	13.026	50	70	-	-	0.133	6
9	0.144	3.66	20,766	10.716	-	-	-	9.45	0.167	7
7/16 10	0.128	3.24	16,510	8.398	35	50	-	7.5	0.211	8
11	0.116	2.94	13,090	6.914	-	-	-	5.945	0.266	9
7/18 12	0.104	2.642	10,642	5.584	15	30	-	4.715	0.335	10
13	0.092	2.336	8,234	4.364	-	-	-	3.738	0.424	11
7/20 14	0.08	2.03	6,530	3.296	20	25	232	2.965	0.534	12
15	0.072	1.828	5,178	2.673	-	-	-	2.352	0.673	13
7/22 16	0.064	1.625	4,107	2.112	15	20	165	1.864	0.85	17
17	0.056	1.422	3,257	1.617	-	-	-	1.479	1.07	16 1/2
-	-	-	2,583	-	6	10	-	1.173	1.35	17 1/2
18	0.048	1.219	2,048	1.188	-	-	107	0.93	1.703	17
19	0.04	1.061	1,624	0.825	3	5	-	0.738	2.148	18
20	0.036	0.914	1,388	0.668	-	-	70	0.585	2.706	19
21	0.032	0.812	1,022	0.527	-	-	-	0.464	3.412	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบอร์ S.W.G.	ความโต		พื้นที่หน้าตัด		ทนกระแสได้(แอมแปร์)		เป็นฟิวส์ ทนได้ (Amp.)	น้ำหนัก/ 100 ม.(กก.)	ความต้าน ทาน/100 ม.	เบอร์ A.W.G.
	นิ้ว	มม.	เซกดูตามิล	ตารางมม.	หุ้มยาง	ลวดเปล่า				
22	0.028	0.711	810.1	0.404	-	-	48	0.368	4.303	21
23	0.024	0.61	624.4	0.297	-	-	-	0.292	5.425	22
24	0.022	0.558	509.5	0.249	800	-	33.4	0.231	6.847	23
25	0.02	0.508	404	0.206	-	-	-	0.183	8.63	24
26	0.018	0.457	320.4	0.167	-	-	24.7	0.145	10.89	25
28	0.0148	0.376	201.5	0.113	-	-	18.4	0.091	17.292	27
29	0.0136	0.345	184.9	0.095	-	-	-	-	-	-
30	0.0124	0.304	159.8	0.073	-	-	14.1	0.073	21.783	28
31	0.0116	0.29	126.7	0.067	-	-	-	0.057	27.522	29
32	0.0108	0.274	116.6	0.06	-	-	11.5	-	-	-
33	0.01	0.254	100.5	0.051	-	-	-	0.045	34.782	30
34	0.0092	0.228	81	0.041	-	-	9.0	-	-	-
35	0.0084	0.203	79.7	0.032	-	-	-	0.036	43.758	31
-	-	-	63.21	-	-	-	-	0.029	55.176	32
36	0.0076	0.193	50.13	0.029	-	-	6.8	0.023	59.564	33
37	0.0068	0.172	39.75	0.023	-	-	-	0.018	87.714	34
38	0.0064	0.155	31.52	0.018	-	-	4.7	0.014	110.715	35
39	0.0052	0.132	25	0.013	-	-	-	0.011	139.59	36
40	0.0048	0.121	-	0.011	-	-	3.4	-	-	-
41	0.0044	0.111	19.8	0.0098	-	-	-	0.009	175.89	37
42	0.004	0.1	15.72	0.008	-	-	2.6	0.007	222.09	38
43	0.0036	0.091	12.47	0.0066	-	-	-	0.005	279.51	39
44	0.0032	0.081	9.89	0.0052	-	-	1.85	0.004	352.44	40
45	0.0028									
46	0.0024									
47	0.002									
48	0.0016									
49	0.0012	S.W.G.	A.W.G.	S.W.G.	A.W.G.	A.W.G.	A.W.G.	A.W.G.	A.W.G.	
50	0.0001	Std.	Std.	Std.	Std.	Std.	Std.	Std.	Std.	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำปฏิญานិพนธ์ฉบับนี้ขอขอบคุณ อาจารย์ศิริวิวัฒน์ โปธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษาในการทำปฏิญานิพนธ์ครั้งนี้เป็นอย่างสูงที่คอยให้คำปรึกษา และ อาจารย์ วสันต์ อุ้ยยโสสม ที่ชี้แนะแนวทางต่างๆ จนทำให้ ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วงไปด้วยดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ปริญญาณิพนธ์ เรื่อง การวิเคราะห์และการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกส์ ปีการศึกษา 2538
- [2] ปริญญาณิพนธ์ เรื่อง การศึกษาวงจรขยายแม่เหล็ก ปีการศึกษา 2538
- [3] ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย “Harmonics in Power System” เอกสารประกอบการอบรมทางวิชาการ ณ โรงแรมโซลทวิน ทาวเวอร์ วันที่ 27-28 สิงหาคม 2539
- [4] IEC Publication prepared by Technical committee - No. 7 , “Part 2:Harmonics” , IEC std 555-2 1982
- [5] IEEE , “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control Power System” , IEEE std 519-1992 , New York , NY10017 USA
- [6] John Wiley & Sons “Power System Harmonic” , Chichester New York Brisbane Toronto , Singapore