ปีการศึกษา 2540

# การออกแบบตัวกรองสัญญาณไฟฟ้าฮาร์โมนิคส์ของระบบควบคุมมอเตอร์กระแสสลับแบบควบคุมเวคเตอร์

# HARMONICS FILTER DESIGN FOR AC MOTOR CONTROLLED BY VECTOR CONTROL


โดย

นายวันชัย จำน้ำที่ยง

นายนพดล โคตรพันธ์

นายธีระพล บุญช่วย



วัน เดือน ปี 11 ก.ค. 2541

เลขทะเบียน 038866

เลขเรียกหนังสือ T 40110 ส112ก


อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.จงรักษ์ บุญเสิ่ง


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

038866

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2540

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบสร้างตัวกรองสัญญาณไฟฟ้าฮาร์โมนิคส์ของระบบควบคุมมอเตอร์กระแสสลับแบบควบคุมเวคเตอร์

ผู้จัดทำ

1.นายวันชัย จ่าน้ำเที่ยง
2.นายนพดล โคตรพันธ์
3.นายธีระพล บุญช่วย

อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.จงรักษ์ บุญเสิ่ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบสร้างตัวกรองสัญญาณไฟฟ้าฮาร์โมนิคส์ของระบบควบคุมมอเตอร์กระแสสลับ แบบควบคุมเวคเตอร์

นายวันชัย จ่าน้ำเที่ยง
นายนพดล โคตรพันธ์
นายธีระพล บุญช่วย
ผศ.จงรักษ์ บุญเสิ่ง อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2540

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันนี้มีการใช้โหลดที่ไม่ต่อเนื่องมากขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดฮาร์โมนิคส์ขึ้นในระบบไฟฟ้าทำให้เกิดผลเสีย ดังนั้นโครงงานนี้จึงทำการศึกษาถึงพฤติกรรมของฮาร์โมนิคส์ในระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสสลับแบบควบคุมเวคเตอร์ เพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์การกรองฮาร์โมนิคส์มิให้เข้าสู่ระบบไฟฟ้า

ในโครงงานนี้ได้ทำการศึกษาและทดลองวงจรกรองฮาร์โมนิคส์แบบจูน โดยใช้รีแอคเตอร์ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ เพื่อให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมกับฮาร์โมนิคส์ที่ต้องการและยังสามารถช่วยปรับปรุงตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้าได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# HARMONICS FILTER DESIGN FOR AC MOTOR CONTROLLED BY VECTOR CONTROL

Wanchai Chanamthiang
Nopphadon Kortpun
Teeraponn Boonchuay
Assc.Prof.Chongrag Boonseng
Advisor 1997

## ABSTRACT

Todays, the used of non-linear load is increasing which is generated harmonics that effect to the power system. Therefore, this project have researched the behavior of harmonics in the ac motor controlled by vector drive control that lead to the harmonics filter analysing.

In this project, studied and test tuned filter by reactor series capacitor that make the series resonance at the desired harmonics and tuned filter can improve power factor in power system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ


| | หน้า |
|---|---|
| รูปที่ 2.1 รูปคลื่นแรงดันและกระแสแบบรูปไซน์ | 2 |
| รูปที่ 2.2 รูปคลื่นของแรงดันสี่เหลี่ยม | 3 |
| รูปที่ 2.3 รูปคลื่นยอดแบน | 4 |
| รูปที่ 2.4 รูปคลื่นแบบยอดแหลม | 4 |
| รูปที่ 2.5 รูปแบบของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่มูลฐาน | 6 |
| รูปที่ 2.6 รูปแบบของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่ฮาร์โมนิคส์ | 7 |
| รูปที่ 2.7 การต่อตัวเก็บประจุเข้าไปในระบบ | 8 |
| รูปที่ 2.8 การควบคุมกระแสที่ไหลผ่านโหลดแบบ Integral Cycle Control | 11 |
| รูปที่ 2.9(a) วงจรตัวเรียงกระแสแบบบริดจ์สามเฟส | 12 |
| รูปที่ 2.9(b) รูปคลื่นของแรงดันขาออก(ในอุดมคติ) | 13 |
| รูปที่ 2.9(c) รูปคลื่นของกระแสทางด้าน AC (ในอุดมคติ) | 13 |
| รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างของฮาร์โมนิคส์แบบไม่เชิงเส้นชนิดหนึ่ง | 17 |
| รูปที่ 2.11 คอนเวอร์เตอร์แบบพัลส์ | 19 |
| รูปที่ 2.12 สัญญาณไฟกระแสสลับแบบ 6 พัลส์ | 20 |
| รูปที่ 2.13 คอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์ | 20 |
| รูปที่ 2.14 รูปคลื่นกระแสไฟสลับคอนเวอร์เตอร์แบบ 24 พัลส์ | 21 |
| รูปที่ 2.15 ศักดาไฟฟ้าอาร์คและวงจรสมมูลย์ของเตาหลอมแบบอาร์ค | 22 |
| รูปที่ 2.16 แสดงรูปคลื่น | 27 |
| รูปที่ 2.17 วงจรสามเฟสของหลอดฟลูออเรสเซนต์ | 28 |
| รูปที่ 2.18 คุณลักษณะของหลอดฟลูออเรสเซนต์ | 28 |
| รูปที่ 2.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเพี้ยนกับเปอร์เซ็นต์โหลด CFL | 29 |
| รูปที่ 2.20 Transformer Magnetization (Without Hysteresis) | 32 |
| รูปที่ 2.21 Transformer Magnetization (Including Hysteresis) | 32 |
| รูปที่ 2.22 Flux Density in a Transformer at Energization With Both Resonant Flux and Zero Resonant Flux | 33 |
| รูปที่ 2.23 กระแสอินรัชของหม้อแปลงขนาด 5 KVA | 33 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 2.24 การเปลี่ยนแปลงความเข้มของฮาร์โมนิคส์ต่าง ๆ 34
รูปที่ 2.25 M.M.F and flux distribution of full-pitch winding with 1 slot/pole 34
รูปที่ 2.26 Determination of distribution factor 36
รูปที่ 2.27 Slot Harmonics ที่ความถี่อื่น 38
รูปที่ 2.28 Current Wave of Switch mode Power Supply 44
รูปที่ 2.29 แสดงวงจรของ 3-phase rectifier front-end 45
รูปที่ 2.30 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันของ 3-phase rectifier front-end converter 46
รูปที่ 2.31 DELTA-WAN Curve 46
รูปที่ 2.32 วงจรกระแสเต็มคลื่นเฟสเดี่ยวแบบสองพัลส์พุช-พูล และแบบสะพานสองพัลส์ 47
รูปที่ 2.33 เรโซแนนซ์ขนาน 50
รูปที่ 2.34 เรโซแนนซ์อนุกรม 51
รูปที่ 2.35 วงจรเรโซแนนซ์ขนานและอนุกรม 53
รูปที่ 2.36 ด้านท้ายเครื่องกำเนิดแบบโรเตอร์กรงกระรอก 60
รูปที่ 2.37 การสุ่มจากรูปคลื่นที่ไม่เป็นรูปไซน์ 61
รูปที่ 2.38 แสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเนื่องจากฮาร์โมนิคส์ที่ 3 63
รูปที่ 2.39 แสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเนื่องจากฮาร์โมนิคส์ที่ 5 63
รูปที่ 3.1ชุดปรับปรุงตัวประกอบกำลังและเครือข่ายของระบบ 68
รูปที่ 3.2 การใช้พิลเตอร์แบบต่าง ๆ 71
รูปที่ 3.3 ผลตอบสนองความถี่ของฟิลเตอร์ความถี่เดี่ยว 72
รูปที่ 3.4ผลของตัวประกอบคุณภาพต่อผลตอบสนองความถี่ของฟิลเตอร์ 74
รูปที่ 3.5 แสดงผลของเรโซแนนท์ที่เกิดขึ้นใหม่ที่เปลี่ยนไปขณะที่ความถี่ที่จูนคงที่ 74
รูปที่ 3.6 แสดง Transformation Form 75
รูปที่ 3.7 Frequency Response ของ High –Pass ที่ค่า Q เปลี่ยนไปแล้ว 76
รูปที่ 3.8 High Pass Filter 77
รูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่างการออกแบบฟิลเตอร์ 78
รูปที่ 3.10 ผลของตำแหน่งติดตั้งฟิลเตอร์ต่อค่า HDF 81
รูปที่ 5.1แสดงรูปการต่อวงจรในการทดลองวงจรฟิลเตอร์ 93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 5.2 รูปคลื่นกระแสเฟส A ขณะที่ยังไม่มีวงจรฟิลเตอร์และมอเตอร์รับภาระเต็มที่ 106
รูปที่ 5.3 รูปคลื่นกระแสเฟส B ขณะที่ยังไม่มีวงจรฟิลเตอร์และมอเตอร์รับภาระเต็มที่ 106
รูปที่ 5.4 รูปคลื่นกระแสเฟส C ขณะที่ยังไม่มีวงจรฟิลเตอร์และมอเตอร์รับภาระเต็มที่ 107
รูปที่ 5.5 รูปคลื่นกระแสเฟส A ขณะที่มีวงจรฟิลเตอร์และมอเตอร์รับภาระเต็มที่ 107
รูปที่ 5.6 รูปคลื่นกระแสเฟส B ขณะที่มีวงจรฟิลเตอร์และมอเตอร์รับภาระเต็มที่ 108
รูปที่ 5.7 รูปคลื่นกระแสเฟส C ขณะที่มีวงจรฟิลเตอร์และมอเตอร์รับภาระเต็มที่ 108
รูปที่ 5.8 รูปคลื่นกระแสเฟส A ไหลเข้าวงจรฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่5ขณะมอเตอร์รับภาระเต็มที่ 109
รูปที่ 5.9 รูปคลื่นกระแสเฟส B ไหลเข้าวงจรฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่5ขณะมอเตอร์รับภาระเต็มที่ 109
รูปที่ 5.10 รูปคลื่นกระแสเฟส C ไหลเข้าวงจรฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่5ขณะมอเตอร์รับภาระเต็มที่ 110
รูปที่ 5.11 รูปคลื่นกระแสเฟส A ไหลเข้าวงจรฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่7ขณะมอเตอร์รับภาระเต็มที่ 110
รูปที่ 5.12 รูปคลื่นกระแสเฟส B ไหลเข้าวงจรฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่7ขณะมอเตอร์รับภาระเต็มที่ 111
รูปที่ 5.13 รูปคลื่นกระแสเฟส C ไหลเข้าวงจรฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่7ขณะมอเตอร์รับภาระเต็มที่ 111
รูปที่ 5.14 รูปคลื่นกระแสเฟส A ไหลเข้าวงจรฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่ 5 ขณะมีวงจรฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่ 5 อย่างเดียวและมอเตอร์รับภาระเต็มที่ 112
รูปที่ 5.15 รูปคลื่นกระแสเฟส B ไหลเข้าวงจรฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่ 5 ขณะมีวงจรฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่ 5 อย่างเดียวและมอเตอร์รับภาระเต็มที่ 112
รูปที่ 5.16 รูปคลื่นกระแสเฟส C ไหลเข้าวงจรฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่ 5 ขณะมีวงจรฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่ 5 อย่างเดียวและมอเตอร์รับภาระเต็มที่ 113
รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบก่อนและหลังมีฟิลเตอร์ขณะ Full Load 114
รูปที่ 5.18 เปรียบเทียบก่อนและหลังมีฟิลเตอร์ขณะ No Load 115
รูปที่ 5.19 เปรียบเทียบก่อนและหลังมีฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่ 5 อย่างเดียว 116
รูปที่ 5.20 เปรียบเทียบก่อนและหลังมีฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่ 5 ขณะ No Load 117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง


| | หน้า |
|---|---|
| ตารางที่ 2.1 กระแสฮาร์โมนิคส์ที่เตาหลอมดึงจากระบบ | 21 |
| ตารางที่ 2.2 M3(In Percent),Theoretical and Experimental | 26 |
| ตารางที่ 2.3 แสดงลักษณะของหลอดอินแคนเดสเซนต์ขนาด 100 วัตต์แบบไม่ต่ออุปกรณ์ร่วม | 30 |
| ตารางที่ 2.4 แสดงลักษณะของหลอด CFL ที่ก่อให้เกิดฮาร์โมนิคส์ที่ความถี่ต่าง ๆ | 30 |
| ตารางที่ 2.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ของโหลด หลอด CFL ต่อโหลดทั้งหมดของระบบ | 31 |
| ตารางที่ 2.6 Typical Harmonics Current Produce by a Wound Rotor Induction Motor | 40 |
| ตารางที่ 2.7 List of Harmonics Set | 42 |
| ตารางที่ 2.8 Spectrum of Typical Switch Mode Power Supply | 44 |
| ตารางที่ 2.9 แสดงค่ากระแสฮาร์โมนิคส์โดยประมาณ | 47 |
| ตารางที่ 2.10 Simple Approximation | 48 |
| ตารางที่ 2.11 ผลของฮาร์โมนิคส์จากคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ บนเครื่องจักรกลหมุน | 59 |
| ตารางที่ 2.12 Test Case Harmonics Contents | 62 |
| ตารางที่ 2.13 ค่าพิกัดที่วัดได้จากเทคนิคไมโครโปรเซสเซอร์ | 62 |
| ตารางที่ 2.14 1960 Single Frequency TIF Value | 65 |
| ตารางที่ 3.1 แสดงกระแสฮาร์โมนิคส์สำหรับเครื่องเรียงกระแสแบบ 6,12,18 และ 24 พัลส์ | 70 |
| ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบขนาดลวด | 88 |
| ตารางที่ 5.1 แสดง %THDi ของระบบขณะรับภาระเต็มที่ไม่มีฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์ | 94 |
| ตารางที่ 5.2 แสดง %THDi ของระบบขณะรับภาระเต็มที่มีฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์ | 95 |
| ตารางที่ 5.3 แสดง %THDi ของระบบขณะไม่มีภาระและไม่มีฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์ | 96 |
| ตารางที่ 5.4 แสดง %THDi ของระบบขณะไม่มีภาระแต่มีฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์ | 97 |
| ตารางที่ 5.5 แสดง %THDi ของระบบขณะไม่มีภาระแต่มีฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์ลำดับที่ 5 | 98 |
| ตารางที่ 5.6 แสดง %THDi ของระบบขณะรับภาระเต็มที่แต่มีฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์ลำดับที่ 5 | 99 |
| ตารางที่ 5.7 แสดง %THDv ของระบบขณะรับภาระเต็มที่ไม่มีฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์ | 100 |
| ตารางที่ 5.8 แสดง %THDv ของระบบขณะไม่มีภาระไม่มีฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์ | 101 |
| ตารางที่ 5.9 แสดง %THDv ของระบบขณะรับภาระเต็มที่และมีฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์ | 102 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

ตารางที่ 5.10 แสดง %THDv ของระบบขณะไม่มีภาระแต่มีฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์ 103
ตารางที่ 5.11 แสดง %THDv ของระบบขณะรับภาระเต็มที่และมีฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์ลำดับที่ 5 104
ตารางที่ 5.12 แสดง %THDv ของระบบขณะไม่มีภาระแต่มีฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์ลำดับที่ 5 105



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ


| | หน้า |
|---|---|
| บทคัดย่อ | I |
| ABSTRACT | II |
| สารบัญรูป | III |
| สารบัญตาราง | IV |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ | 2 |
| 2.1 นิยามและปริมาณต่าง ๆ เกี่ยวกับฮาร์โมนิคส์ | 2 |
| 2.1.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับฮาร์โมนิคส์ | 2 |
| 2.1.2 ศัพท์และปริมาณต่าง ๆ | 6 |
| 2.1.3 ประเภทของฮาร์โมนิคส์ | 10 |
| 2.2 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิคส์ | 15 |
| 2.3 ผลกระทบเนื่องจากฮาร์โมนิคส์ | 50 |
| บทที่ 3 การแก้ปัญหาฮาร์โมนิคส์ | 68 |
| 3.1 เปลี่ยนตำแหน่งที่ตั้งตัวเก็บประจุหรือเปลี่ยนขนาดตัวเก็บประจุ | 69 |
| 3.2 เฟสมัลติพลิเคชั่น | 69 |
| 3.3 การใช้ฟิลเตอร์แบบขนาน | 70 |
| บทที่ 4 ชนิดของฟิลเตอร์ที่ใช้ในโครงงาน | 84 |
| 4.1 จูนฟิลเตอร์ | 84 |
| 4.2 ข้อมูลที่ต้องทราบในการออกแบบฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์ | 84 |
| 4.3 ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองฮาร์โมนิคส์ | 84 |
| 4.4 ข้อควรคำนึงถึงเกี่ยวกับการแก้ปัญหาฮาร์โมนิคส์ | 85 |
| บทที่ 5 ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง | 91 |
| 5.1 การทดลองและวิธีการทดลอง | 92 |
| 5.2 ผลการทดลอง | 92 |
| 5.3วิเคราะห์ วิจารณ์ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ | 118 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง 122

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ส่วนประกอบของตัวเหนี่ยวนำ

ภาคผนวก ข. ค่าจำกัดแรงดันฮาร์โมนิคส์ตามมาตรฐานของประเทศต่าง ๆ

ภาคผนวก ค. อุปกรณ์คายประจุ

ภาคผนวก ง. โปรแกรมสำหรับคำนวณวงจรฟิลเตอร์

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 บทนำ

ในรอบหลายปีที่ผ่านมาอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆที่จัดเป็นโหลดไม่เชิงเส้น (non-linear load) ได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางและเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆในระบบอุตสาหกรรมแทบทุกแขนง ระบบไฟฟ้ากำลังและตึกอาคารสำนักงานต่าง ๆ ซึ่งระบบการผลิตและระบบอำนวยความสะดวกจากสิ่งก่อสร้างเหล่านี้ก่อให้เกิดมลภาวะของระบบไฟฟ้าขึ้นนั่นก็คือความผิดเพี้ยนไปของศักดาไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า อันเป็นผลทำให้การทำงานของระบบและอุปกรณ์ดังกล่าวเกิดความผิดพลาดและความเสียหายได้สาเหตุที่ทำให้เกิดฮาร์โมนิคส์

1. จากอุปกรณ์และเครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์พวกโหลดไม่เชิงเส้น ต่างๆ
2. จากการทำงานของระบบไฟฟ้า เช่น แหล่งจ่ายไม่สมดุล
3. แหล่งกำเนิดภายนอก เช่น สวิตช์กระชาก(switch surge),ฟ้าผ่า(lightning)

ในระบบที่มีการรบกวนของ ฮาร์โมนิคส์สูงทำให้เกิดความร้อนในหม้อแปลงสูงและสายนิวทรอลในระบบสามเฟสสี่สายได้ซึ่งกรณีที่มีการกระชากของกระแสสูง ๆ อาจทำให้เซอร์กิตเบรคเกอร์ตัดวงจรได้ การเกิดฮาร์โมนิคส์ไหลเข้าระบบเป็นสาเหตุทำให้สายไฟมีพื้นที่ การทำงานน้อยลงเนื่องจากฮาร์โมนิคส์ที่ขี่อยู่กระแสเต็มไว (fast full current) ทำให้สายไฟและหม้อแปลงไหม้ได้ทั้งที่กระแสหลัก (fundamental) ไม่มากนักวิธีการแก้ปัญหาฮาร์โมนิคส์โดยใช้วงจรกรองฮาร์โมนิคส์แบบจูนฟิลเตอร์โดยต่อรีแอคเตอร์ (reactor) อนุกรมกับตัวเก็บประจุ (capacitor) ทำให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมที่ตรงกับฮาร์โมนิคส์ที่มีในระบบ

## 1.2วัตุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 ออกแบบและสร้างตัวกรองสัญญาณไฟฟ้าฮาร์โมนิคส์ เพื่อกำจัดฮาร์โมนิคส์ที่มีในระบบไฟฟ้า

1.2.2 เขียนโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อช่วยในการออกแบบวงจรกรองฮาร์โมนิคส์

## 1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.3.1.ศึกษาเรื่องราวเกี่ยวกับฮาร์โมนิคส์อย่างละเอียด

1.3.2.เขียนโปรแกรมการออกแบบตัวกรองสัญญาณไฟฟ้าฮาร์โมนิคส์

1.3.3.ออกแบบตัวกรองสัญญาณไฟฟ้าฮาร์โมนิคส์

1.3.4.ทดลองวงจรที่ได้ทำการออกแบบกับระบบไฟฟ้าจริง

1.3.5.วิเคราะห์และสรุปผลที่ได้จากการทดลอง

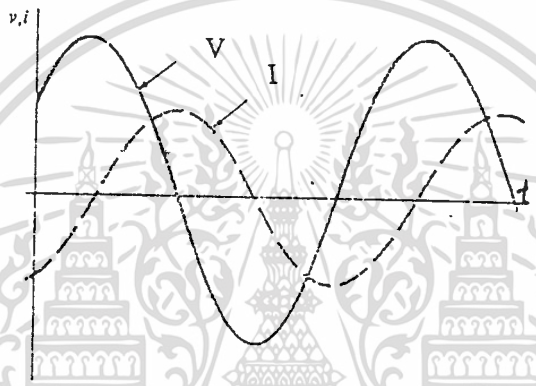
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 2
# ทฤษฎีและหลักการ

## 2.1 นิยามและปริมาณต่าง ๆ เกี่ยวกับฮาร์โมนิคส์

### 2.1.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับฮาร์โมนิคส์

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

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

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

หรือ

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

เมื่อ

$v(t)$ = ขนาดของแรงดันในเวลา t ใด ๆ

$V_m$ = ขนาดสูงสุดหรือค่ายอดของแรงดัน

$i(t)$ = ขนาดของกระแส ณ เวลา t ใด ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

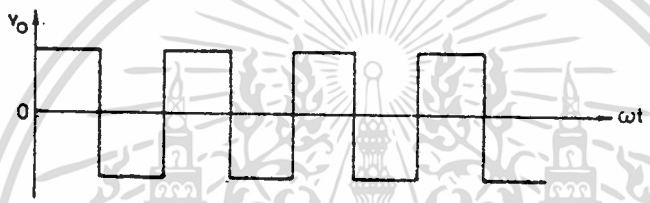
$I_m$ = ขนาดสูงสุด หรือ ค่ายอดของกระแส

f = ความถี่ของแรงดันและกระแส

θ = ขนาดของมุมที่กระแสตามหลังแรงดัน

t = เวลา

สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ รูปคลื่นของแรงดันและกระแสไม่จำเป็นต้องเป็นรูปไซน์ อาจเป็นรูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (Square wave) ดังรูปที่ 2.2




รูปที่ 2.2 รูปคลื่นของแรงดันสี่เหลี่ยม

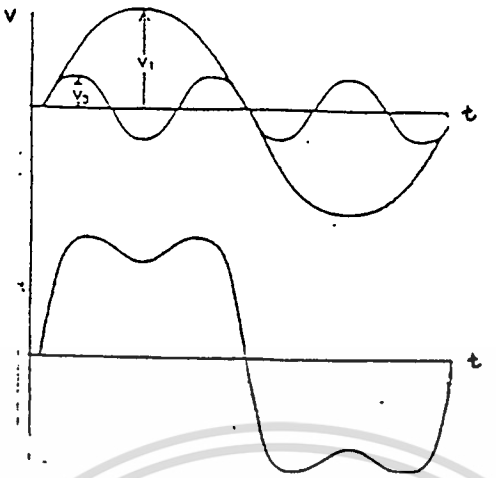
สามารถเขียนสมการที่แปรเปลี่ยนตามเวลาได้ดังนี้

$$v(t) = \frac{4}{\pi}[\sin(\omega t) + \frac{1}{3}\sin(3\omega t) + \frac{1}{5}\sin(5\omega t) + \frac{1}{7}\sin(7\omega t) + .....] \qquad .....(2.3)$$

จากรูปที่ 2.2 พบว่าแรงดันที่รูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยมจะประกอบด้วยรูปคลื่นแบบไซน์ที่มีขนาดและความถี่ต่างๆ จำนวนมากมาย

รูปที่ 2.3 เป็นรูปคลื่นแบบยอดแบนเกิดจากรูปคลื่นแบบไซน์จำนวนสองชุดที่มีความถี่ต่างกันสามเท่ารวมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

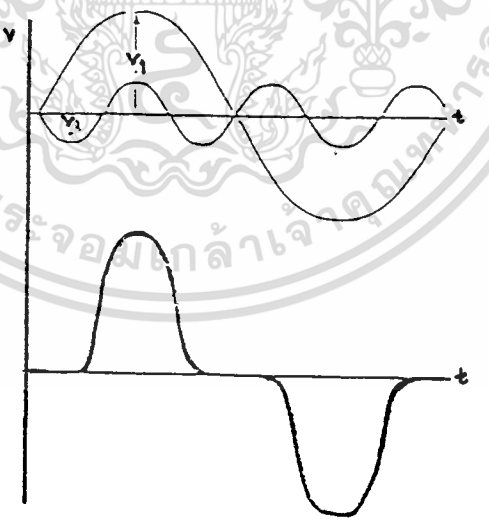



รูปที่ 2.3 รูปคลื่นยอดแบน

จะได้สมการว่า

$$v(t) = V_1\sin(\omega t) + V_3\sin(3\omega t)$$

รูปที่ 2.4 รูปคลื่นแบบยอดแหลมเกิดจากรูปคลื่นแบบไซน์จำนวนสองชุดที่มีความถี่ต่างกันสามเท่ามารวมกันแต่มุมเฟสต่างกันดังรูป




รูปที่ 2.4 รูปคลื่นแบบยอดแหลม

จะได้สมการ

$$v(t) = V_1\sin(\omega t) - V_3\sin(3\omega t) \quad \text{.....(2.5)}$$

รูปคลื่น $V_1\sin(\omega t)$ ในสมการที่ 2.1 หรือ $V_1\sin(\omega t)$ ในสมการที่ 2.3 หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_1\sin(\omega t)$ ในสมการที่ 2.4 และ 2.5 เราเรียกเป็น รูปคลื่นความถี่หลักมูล (Fundamental wave) รูปคลื่นอื่นๆ ที่มีความถี่ต่างไปจากรูปคลื่นความถี่หลักมูลเป็นจำนวน n เท่าโดยที่ n = 2, 3, 4,..... เช่น $4/\pi\ V_m(1/3)\sin(3\omega t)$ ในสมการที่ 2.3 หรือ $V_3\sin(3\omega t)$ ในสมการ 2.4 และ 2.5 ที่มีความถี่เป็นสามเท่าของความถี่หลักมูล เราเรียกเป็นรูปคลื่นฮาร์โมนิคส์โดยมีลำดับฮาร์โมนิคส์เป็น สาม

ดังนั้นฮาร์โมนิคส์คือ ขนาดของแรงดันหรือกระแสที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล (Fundamental wave)

ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นและเป็นปัญหาในทางวิศวกรรมที่พบเห็นส่วนใหญ่ มักเป็นฟังก์ชันคาบ (Periodic function) ซึ่งฟังก์ชันเหล่านี้สามารถแทนให้อยู่ในเทอมของฟังก์ชันคาบของสัญญาณไซน์และโคไซน์ ซึ่งสัญญาณทั้งสองนี้ ในทางปฏิบัติจะมีความสำคัญมาก และในแต่ละเทอมของอนุกรม (Series) ของฟังก์ชันโคไซน์และไซน์ เกิดขึ้นเนื่องจากความคิดของนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสชื่อ Joseph Fourier ดังนั้นเราจึงเรียกฟังก์ชันดังกล่าวว่า อนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series)

ดังนั้นรูปคลื่นของแรงดันหรือกระแสที่เป็นคาบที่มีความเพี้ยนสามารถแสดงโดยการใช้ทฤษฎีฟูเรียร์ (Fourier theorem) ได้ โดยอาศัยอนุกรมฟูเรียร์ตรีโกณมิติ (Trigonometric Fourier Series) ดังสมการ

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

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

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

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

เมื่อ

$f(t)$ = อนุกรมฟูเรียร์ของฟังก์ชัน f(t)

$a_o$ = ค่าเฉลี่ยของ f(t)

$a_n, b_n$ = ค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูเรียร์

$T$ = คาบเวลาของรูปคลื่น f(t)

$n$ = เลขจำนวนเต็มบวกใด ๆ (ลำดับของฮาร์โมนิคส์)

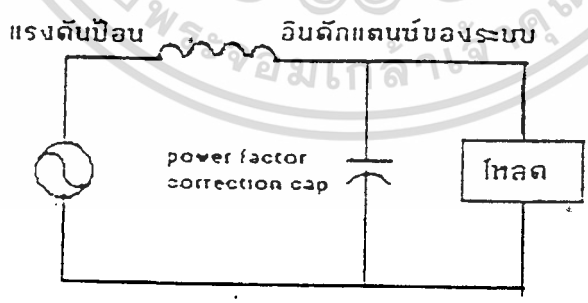
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.1.2 ศัพท์และปริมาณต่างๆ**

**1. ฮาร์โมนิคส์(Harmonics)**

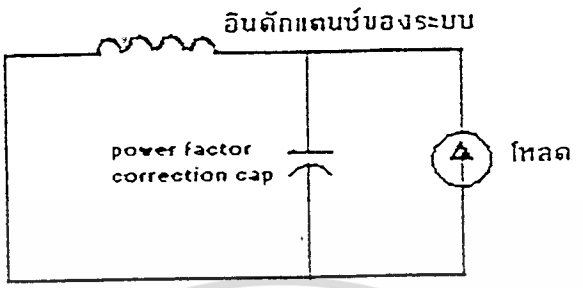
วิชาทางไฟฟ้า ฮาร์โมนิคส์ คือ สัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล เช่น ความถี่มูลฐาน คือ 50 เฮิรตซ์ ฮาร์โมนิคส์ คือ 100 , 200 เฮิรตซ์ เป็นต้น ความถี่มูลฐานเรียกว่า ฮาร์โมนิคส์ที่ 1 ส่วนฮาร์โมนิคส์ลำดับอื่น ๆ ก็หาได้จากการเอาเลขจำนวนเต็มบวกคูณกับความถี่มูลฐาน การวัดความเพี้ยนฮาร์โมนิคส์สามารถทำได้หลายวิธีที่แตกต่างกันออกไป แต่โดยส่วนมากจะใช้วัดความเพี้ยนฮาร์โมนิคส์รวม (Total harmonic distortion) ที่ความถี่ฮาร์โมนิคส์ต่าง ๆ กัน ปริมาณของขนาดจะแสดงด้วยจำนวนเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่หลักมูลและเครื่องมือวัดฮาร์โมนิคส์ทั้งหลาย จะแสดงผลของความเพี้ยนฮาร์โมนิคส์รวมและความเพี้ยนของฮาร์โมนิคส์แต่ละส่วนด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่หลักมูลเช่นกัน

เมื่อโหลดไม่จำเป็นเชิงเส้น ถูกป้อนด้วยแรงดันหลักมูลบริสุทธิ์โดยแหล่งจ่ายซึ่งไม่มีค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ จะมีผลทำให้รูปร่างของกระแสมีความแตกต่างไปจากแรงดันที่ป้อนให้ ความเพี้ยนของกระแสนี้จะมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบจ่าย เมื่ออิมพีแดนซ์ของระบบถูกเพิ่มเข้ามา ความเพี้ยนของกระแสจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ตัวอิมพีแดนซ์นี้จะมีผลทำให้เกิดความเพี้ยนของแรงดันดังแสดงในรูปที่ 2.5 ด้วยเหตุนี้ โหลดไม่เป็นเชิงเส้นหรือตัวผลิตฮาร์โมนิคส์จะถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสฮาร์โมนิคส์ ด้วยอิมพีแดนซ์ของระบบที่เหมาะสมดังในรูปที่ 2.6




**รูปที่ 2.5 รูปแบบของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่มูลฐาน**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 2.6 รูปแบบของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่ฮาร์โมนิคส์

**2. กระแสฮาร์โมนิคส์ (Harmonic Current)**

ฮาร์โมนิคส์ที่อยู่ในรูปของกระแสในไลน์ในระบบไฟฟ้าเกิดขึ้นจากอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Devices) ซึ่งอาจเป็นโหลดหรือแหล่งกำเนิดก็ได้ ในอดีตที่ไม่มีการศึกษาฮาร์โมนิคส์อย่างจริงจัง เนื่องจากอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นมีจำนวนน้อย ทำให้ผลของฮาร์โมนิคส์ต่อระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อย แต่ในช่วงสิบปีที่ผ่านมาอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับเครื่องแปลงผัน (Converter) ได้ขยายตัวอย่างมากเป็นผลให้เกิดกระแสฮาร์โมนิคส์ขึ้นอย่างมากมาย

**3. แรงดันฮาร์โมนิคส์ (Harmonic Voltage)**

เกิดจากการที่กระแสฮาร์โมนิคส์ไหลผ่านค่ารีแอคแตนซ์ (Reactance) ของระบบ (รีแอคแตนซ์ของแหล่งจ่ายของสายส่ง หรือรีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานเข้าไปในระบบเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง (Power factor) และแรงดันให้ดีขึ้น) ทำให้เกิดความผิดเพี้ยน ของรูปแรงดัน อันเนื่องมาจากรีแอคแตนซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ส่วนค่าความต้านทานไม่เปลี่ยนแปลง

กระแสฮาร์โมนิคส์ที่ไหลในระบบนั้นจะเป็นตัวสร้างทำให้เกิดความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิคส์ (Harmonic Voltage Distortion) ซึ่งเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$V_n = Z_n I_n \qquad \text{.....(2.10)}$$

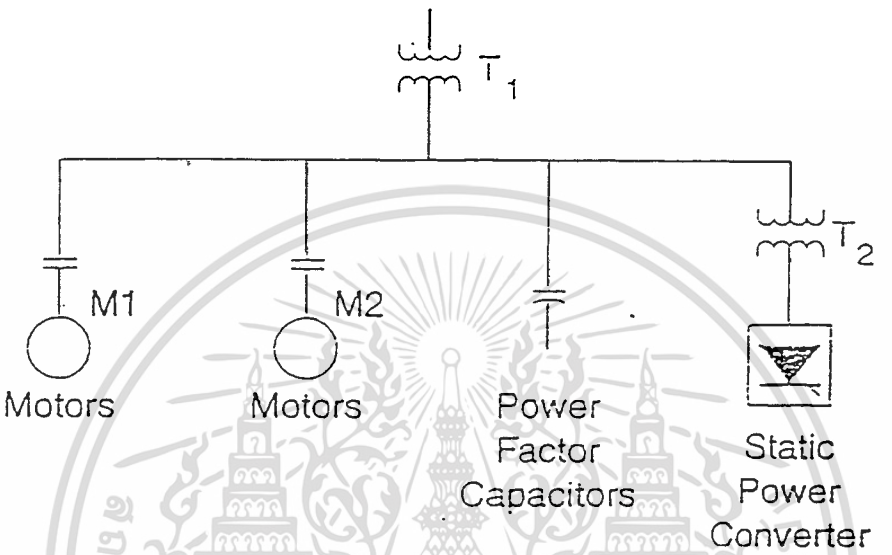
$V_n$ = แรงดันฮาร์โมนิคส์

$I_n$ = กระแสฮาร์โมนิคส์ในระบบ

$Z_n$ = ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าในระบบไฟฟ้าใช้ตัวเก็บประจุต่อขนานเข้าไปในระบบ เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง จะทำให้มีอิทธิพลต่อระดับฮาร์โมนิคส์ในระบบจำหน่าย ตัวเก็บประจุมิได้เป็นตัวกำเนิดฮาร์โมนิคส์ แต่จากการต่อวงจรในระบบมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดเงื่อนไขรีโซแนนซ์แบบขนาน (Paralle resonance) ระหว่างตัวเก็บประจุและรีแอคแตนซ์ของระบบดังรูปที่ 2.7




รูปที่ 2.7 การต่อตัวเก็บประจุขนานเข้าไปในระบบ

เมื่อพิจารณาให้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นแหล่งจ่ายกระแสฮาร์โมนิคส์ ถ้ารีโซแนนซ์แบบขนานเกิดที่ความถี่เดียวกันหรือใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์โมนิคส์ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นจำทำให้เกิดกระแสจำนวนมากไหลผ่านระหว่างรีแอคแตนซ์ของระบบและรีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุ กระแสนี้จะรวมกับกระแสฮาร์โมนิคส์ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ทำให้เกิดแรงกันดกคร่อมรีแอคแตนซ์ของระบบ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดันมีค่ามาก (Distortion Factor)

**4. ตัวประกอบความเพี้ยน (Distortion Factor) DF**

**ตัวประกอบฮาร์โมนิคส์** (Harmonic Factor) HF

**ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิคส์ทั้งหมด** (Total Harmonic Distortion)THD

ความหมายทั้งสามตัวนั้นมาตรฐานของ IEEE ได้ให้ความหมายไว้เหมือนกันกล่าวคือ ค่าที่บอกถึงปริมาณของฮาร์โมนิคส์ที่มีอยู่ทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับค่า rms ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล

IEEE 519-1992

Harmonic voltage และ Harmonic current

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

IEC 555-1 : 1992

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

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

สำหรับมาตรฐาน IEC ได้ให้ความหมายทั้งสามตัวว่า มันคือความเพี้ยนของฮาร์โมนิคส์ (Harmonic Distortion) HD กล่าวคือ บอกถึงปริมาณของฮาร์โมนิคส์ที่มีอยู่ทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับค่าอาร์เอ็มเอส (rms) ของปริมาณทั้งหมด

**5. ลำดับฮาร์โมนิคส์ (Harmonic Order)**

ลำดับฮาร์โมนิคส์ คือ อัตราส่วนของความถี่ฮาร์โมนิคส์และความถี่หลักมูล เช่น เมื่อเอ่ยถึงฮาร์โมนิคส์ลำดับที่ 3 หากความถี่หลักมูลเป็น 50 เฮิรตซ์ จะได้ความถี่ของฮาร์โมนิคส์ที่ 3 เป็น 150 เฮิรตซ์

**6. ตัวประกอบกำลัง (Power Factor)**

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

PF คือ อัตราส่วนกำลังงานจริงต่อกำลังงานปรากฏ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\text{DPF} = \frac{\text{ActivePower}}{\text{ApparentPower(Fund)}}$$

$$\text{Total PF} = \frac{\text{ActivePower}}{\text{ApparentPower(Total)}}$$

เมื่อ

พิกัดกำลังงานจริง (Active Power) = ผลคูณของแรงดันอาร์เอ็มเอสกับกระแสอาร์เอ็มเอสที่เป็นค่าจริง (watt)

พิกัดกำลังงานที่ปรากฏ (Apparent Power) = ผลคูณของแรงดันอาร์เอ็มเอสกับกระแสอาร์เอ็มเอส (volt-amp)

พิกัดกำลังที่ปรากฏ (Fund) = ผลคูณของแรงดันอาร์เอ็มเอสกับกระแสอาร์เอ็มเอสที่ความถี่มูลฐาน

พิกัดกำลังที่ปรากฏ (Total) ได้จากการรวมเอาฮาร์โมนิคส์มาด้วย เช่น

$$V_1 X \sqrt{i\frac{2}{1} + i\frac{2}{2} + i\frac{2}{3} + \ldots}$$

**2.1.3 ประเภทของฮาร์โมนิคส์**

ฮาร์โมนิคส์ที่เกิดขึ้นปะปนอยู่ในกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าอาจแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ดังต่อไปนี้

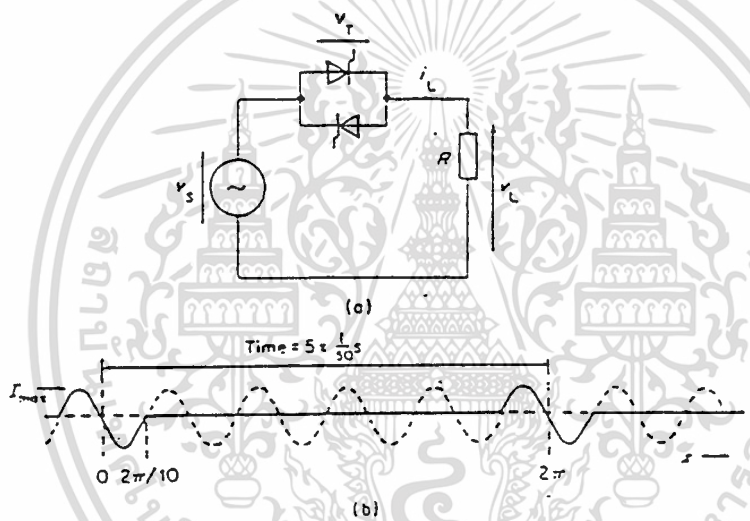
**1. ฮาร์โมนิคส์ (Harmonics)**

หมายถึง ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใดๆ ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของความถี่หลักมูล เช่น รูปคลื่นสี่เหลี่ยมในรูปที่ 2.2 จะมีฮาร์โมนิคส์ปนอยู่มากตั้งแต่ฮาร์โมนิคส์ลำดับที่ 2,3,4 หรือรูปคลื่นในรูปที่ 2,3 และ 2,4 จะมีเฉพาะฮาร์โมนิคส์ลำดับที่ 3 ปนอยู่เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2. อินเตอร์ฮาร์โมนิคส์ (Interharmonics)**

หมายถึง ส่วนประกอบอยู่คลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใด ๆ ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของความถี่หลักมูล อินเตอร์ฮาร์โมนิคส์นี้ส่วนมากจะพบในกระแสเตาหลอมแบบอาร์ก (Arc furnace) เนื่องจากในระหว่างหลอมเหล็ก โดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้นการหลอมกระแสอาร์กจะยังไม่เสถียร ทำให้คาบของกระแสไม่แน่นอน กล่าวคือ ความถี่ 50 เฮิรตซ์ คาบจะกินเวลา 20 มิลลิวินาที แต่กระแสอาร์กจะมีคาบเวลาไม่เป็น 20 มิลลิวินาทีทุกคาบ ทำให้เกิดอินเตอร์ฮาร์โม่นิคส์ขึ้น นอกจากนี้ก็จะพบอินเตอร์ฮาร์โมนิคส์ในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการควบคุมการทำงานแบบ 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 ของรูปคลื่นกำลังมาซ้ำเดิม จะคำนวณหากระแสฮาร์โมนิคส์ลำดับต่างๆ ได้ดังนี้

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

จากกระแสฮาร์โมนิคส์ที่วิเคราะห์ออกมานี้ จะพบว่ากระแสฮาร์โมนิคส์ที่ลำดับเป็นเลขลงตัวของความถี่หลักมูล 50 เฮิรตซ์ จะเป็นศูนย์ แต่กระแสฮาร์โมนิคส์ที่มีความถี่หรือลำดับไม่เป็นเลขลงตัวความถี่หลักมูลจะมีค่าดังเช่น ฮาร์โมนิคส์ความถี่ 10 เฮิรตซ์ จะมีลำดับเป็น 1/5 ของ ความถี่หลักมูล เราจึงเรียกฮาร์โมนิคส์เหล่านี้ว่า อินเตอร์ฮาร์โมนิคส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3. ฮาร์โมนิคส์คุณลักษณะ (Characteristic Harmonic)**

หมายถึง ฮาร์โมนิคส์ที่สร้างโดยเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้า (แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสหรือกลับกัน โดยใช้สารกึ่งตัวนำ เช่น ไดโอด, SCR เป็นสวิตช์ ตัดต่อกระแส) ในสภาวะการทำงานปกติลำดับของฮาร์โมนิคส์คุณลักษณะสามารถหาได้จากสมการ

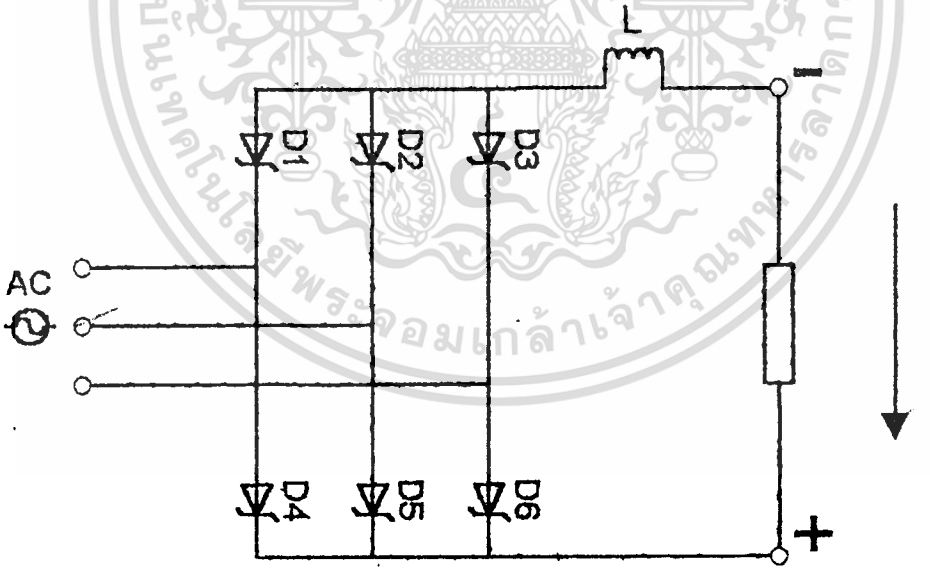
$$n = kp \pm 1 \qquad .....(2.12)$$

เมื่อ

n = ลำดับของฮาร์โมนิคส์

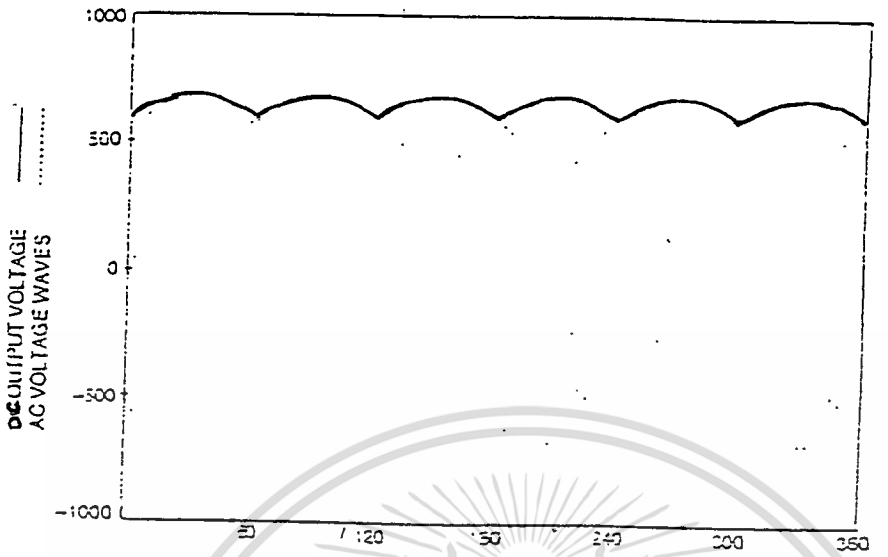
k = เลขจำนวนเต็มบวกใด ๆ ( 1,2,3,.....)

p = จำนวนพัลส์ (pulse number) ของเครื่องแปลงผันไฟฟ้า

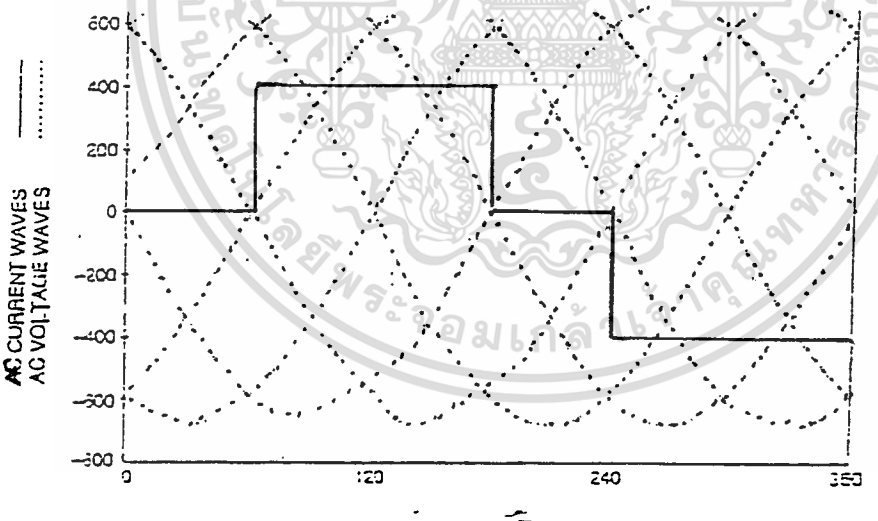



**รูปที่ 2.9 (a) วงจรตัวเรียงกระแสแบบบริดส์ 3 เฟส**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 2.9 (b) รูปคลื่นของแรงดันขาออก (ในอุดมคติ)




รูปที่ 2.9 (c) รูปคลื่นของกระแสทางด้าน AC (เป็นรูปคลื่นในอุดมคติ)

รูปที่ 2.9 (ก) แสดงวงจรตัวเรียงกระแสแบบบริดส์ 3 เฟส ใช้ SCR จำนวน 6 ตัวทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อกระแส ดังนั้นใน 1 รอบ(cycle) ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จะเกิดกระแสไหลผ่าน SCR ในลักษณะกระแสพัลส์ จำนวน 6 ครั้ง จึงมีค่า PL เป็น 6 ในรูปที่ 2.9 (ข) แสดงรูปคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแรงดันขาออกจะเป็นแรงดันตรงที่มีความพริ้ว (Ripple) ซ้อนอยู่ ความพริ้วนี้มีการเปลี่ยนแปลง 6 รอบ ใน 1 รอบ ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความพริ้ว 6 รอบ จะส่งผลถึงฮาร์โมนิคส์ของกระแสทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับด้วย รูปที่ 2.9 (ค) แสดงรูปคลื่นของกระแสทางด้านกระแสสลับจากรูปคลื่นนี้เมื่อแตกออกเป็นอนุกรมฟูเรียร์ได้ดังนี้

$$i(t) = i[\sin(\omega t) - \frac{1}{5}\sin(5\omega t) - \frac{1}{7}\sin(7\omega t) + \frac{1}{11}\sin(11\omega t) + \frac{1}{13}\sin(13\omega t) + .....] .....(2.13)$$

จะพบว่ากระแสฮาร์โมนิคส์จะมีเฉพาะลำดับที่ $6k \pm 1$ หรือ 5,7,11,13,17,19,...เท่านั้นเราเรียกกระแสฮาร์โมนิคส์ที่มีลำดับเหล่านี้ว่า ฮาร์โมนิคส์คุณลักษณะ

**4. ฮาร์โมนิคส์ที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ (Noncharacteristic Harmonics)**

หมายถึง ฮาร์โมนิคส์ที่ถูกสร้างโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้าที่ไม่เป็นไปตามสมการ $n = kp \pm 1$ เช่น เครื่องแปลงผันไฟฟ้าชนิด 12 พัลส์ ควรมีเฉพาะฮาร์โมนิคส์คุณลักษณะที่มีลำดับ 11,13,23,25,35,37, ดังนั้นถ้ามีฮาร์โมนิคส์ที่มีลำดับเป็น 5,7,17,19, ปนมาด้วย ฮาร์โมนิคส์ เหล่านี้ถือว่าเป็นฮาร์โมนิคส์ที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ

**5. ฮาร์โมนิคส์ลำดับที่สามหารลงตัว (Tripple Harmonics)**

หมายถึง ฮาร์โมนิคส์ลำดับที่สามหารลงตัว ได้แก่ ฮาร์โมนิคส์ลำดับที่ 3,6,9 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มที่มีลำดับ (Sequence) เป็นศูนย์ ในกรณีที่เป็นระบบ 3 เฟส 4 สาย ฮาร์โมนิคส์กลุ่มนี้จะรวมกันไหลอยู่ในสายนิวทรอล ทำให้เกิดปัญหากับระบบไฟฟ้าได้เช่น สายนิวทรอลร้อนฉนวนเสียหาย เกิดลัดวงจร เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิคส์

ฮาร์โมนิคส์เกิดขึ้นโดยสาเหตุ แต่ส่วนใหญ่จะเกิดเนื่องจากอุปกรณ์ และเครื่องใช้ไฟฟ้าเอง ถึงแม้ปัจจุบันอุปกรณ์และเครื่องไฟฟ้าจะถูกพัฒนาไปให้มีประสิทธิภาพสูงมากขึ้นก็ตาม แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิคส์ในระบบไฟฟ้ามีหลายอย่างด้วยกัน ตั้งแต่แหล่งจ่ายไฟอุปกรณ์ภายในระบบโหลด รวมทั้งการทำงานของระบบ ได้แก่ การสวิตชิ่ง(Switching) และแหล่งกำเนิดจากภายนอก เช่น ฟ้าผ่า เป็นต้น แหล่งกำเนิดที่สำคัญและทำให้เกิดฮาร์โมนิคส์ ได้แก่ โหลดและแหล่งจ่ายไฟที่ไม่สมดุลย์ (Unbalanced Source)

โดยปกติ ฮาร์โมนิคส์ที่เกิดจากอุปกรณ์ และเครื่องใช้ไฟฟ้าจะเกิดขึ้น โดยมีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่พื้นฐาน เช่น ระบบ 50 เฮิร์ตซ์ ความถี่ของฮาร์โมนิคส์ที่ 2, 3, 4, 5, ..... จะเป็น 100, 150, 250, 350,....เฮิร์ตซ์ เป็นต้น แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิคส์สามารถแยกออกได้เป็นหลายประเภท ดังนี้

ก. โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear load) เช่น
- เรคติไฟเออร์ (Rectifier)
- เรคติไฟเออร์แบบมีการควบคุม (Controlled Rectifier)
- คอนเวอร์เตอร์กำลังสถิตย์ (Static Power Converter)
- รีแอคเตอร์แบบอิ่มตัว (Saturable Reactor)
- เตาหลอมแบบอาร์ค (Arc Furnace)
- เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบอาร์ค (Arc welder)
- หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent)

ข. โหลดกำเนิดเฟสไม่สมดุลย์ (Phase Unbalance Sources) เช่น
- โหลดแบบเชิงเส้นเฟสเดี่ยว (Single Phase Linear Load)
- โหลดแบบไม่เชิงเส้นเฟสเดี่ยว (Single Phase Nonlinear Load)
- หม้อแปลงเดลต้าเปิด (Open-delta Transformer)
- ระบบสายแบบไม่มีการสลับสาย (Untransposed Conductor)

ค. กระแสกระตุ้น (Exciting Currents) ของหม้อแปลง เช่น
- กรณีปกติ (Normal Condition)
- กรณีกระตุ้นมากเกินไป (Overexcited Condition)
- เฟอร์โรเรโซแนนซ์ (Ferroresonance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง. เรโซแนนซ์ เช่น

- แบบขนาน (Parallel Resonance)
- แบบอนุกรม (Serie Resonance)

จ. แหล่งกำเนิดอื่น ๆ เช่น

- สวิตชิ่งเสิร์จ (Switching Surge)
- ฟ้าผ่า (Lightning)
- การลัดวงจร หรือฟอลต์ (Fault)
- กระแสตรงในวงจรกระแสสลับ

รายละเอียดเกี่ยวกับฮาร์โมนิคส์ที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า จะกล่าวถึงเฉพาะหัวข้อที่สำคัญ ๆ ไว้เท่านั้น ส่วนแหล่งกำเนิดอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึงก็เนื่องมาจากขนาดของฮาร์โมนิคส์ที่เกิดขึ้นมีไม่มาก หรือหลักการฮาร์โมนิคส์ของแหล่งกำเนิดอื่นๆ ใช้หลักการเหมือนหรือคล้ายกันกับสิ่งที่จะกล่าวถึง

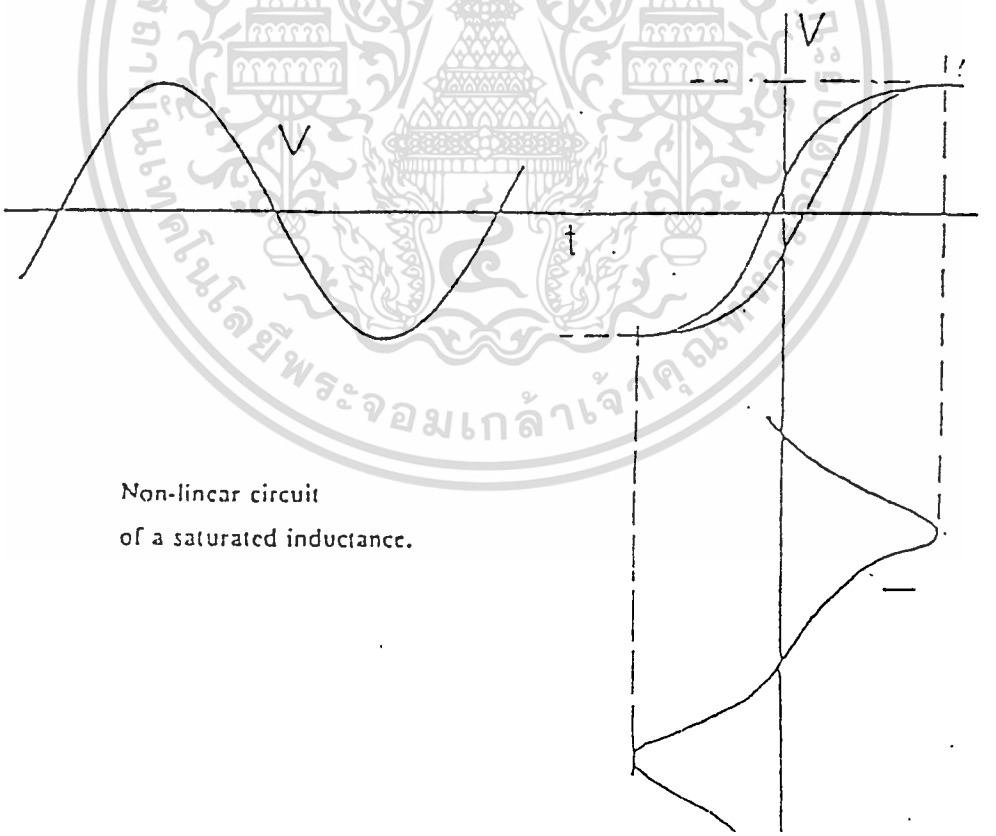
หรือจะแยกประเภทของแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิคส์จากการใช้งานเพื่อให้ชัดเจนยิ่งขึ้นได้ดังนี้

- อิเลคทรอนิคส์ สวิตชิ่ง พาวเวอร์ คอนเวอร์เตอร์ ; (Electronic Switching Power Converters)
  - คอมพิวเตอร์ (Computers)
  - U.P.S. (Uninterruptible Power Supplies)
  - โซลิด เสตท เรคติไฟเออร์ (Solid State Rectifiers)
  - อุปกรณ์ P.L.C. ต่าง ๆ
  - บัลลาสท์ของอุปกรณ์แสงสว่าง
- อุปกรณ์ Arcing ; (Arcing Devices)
  - เตาหลอมแบบอาร์ค (Arc Furnaces)
  - อุปกรณ์เชื่อมไฟฟ้า
  - อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า
- อุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้า (Ferromagnetic Devices)
  - หม้อแปลงที่ทำงานใกล้จุดอิ่มตัว
  - บัลลาสท์แม่เหล็ก (แกนเหล็กใกล้จุดอิ่มตัว)
  - อุปกรณ์จากขดลวดเหนี่ยวนำเพื่อกำเนิดความร้อน (เช่น เตารีด)
  - มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เครื่องใช้ไฟฟ้า
  - โทรทัศน์
  - เครื่องปรับอากาศ
  - เครื่องซักผ้า
  - เตาอบไมโครเวฟ
  - เครื่องดูดฝุ่น
  - เครื่อง FAX
  - พรินเตอร์

โดยโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิคส์ที่สำคัญที่สุดสำหรับโหลดไม่สมดุลย์ต่าง ๆ แม้จะไม่ให้สัญญาณเบี่ยงเบนจากไซน์ แต่ก็มีผลต่อระบบเช่นเดียวกับการเบี่ยงเบนจากคลื่นไซน์ ซึ่งโหลดแบบไม่สมดุลย์นี้ เมื่อใช้หลักการองค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) เข้าวิเคราะห์ จะได้ลำดับของแรงดันและกระแสทั้งบวก ลบ และศูนย์




**รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างของฮาร์โมนิคส์ที่เกิดจากโหลดแบบไม่เชิงเส้นชนิดหนึ่ง (Transformer Magnetizing Current)**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.2.1 คอนเวอร์เตอร์กำลังสถิตย์ (Static Power Converter)**

คอนเวอร์เตอร์กำลังสถิตย์ ใช้กันอย่างกว้างขวางตั้งแต่ในบ้านจนถึงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ การที่เครื่องอุปกรณ์นี้ได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากมันมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง

คอนเวอร์เตอร์กำลังขนาดเล็กใหญ่จะเป็นหนึ่งเฟส โดยใช้กับอุปกรณ์จำพวก

- เครื่องรับโทรทัศน์
- คอมพิวเตอร์
- อุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์ที่ใช้ในบ้าน

คอนเวอร์เตอร์กำลังสามเฟสที่ใช้กันทั่วไป จะทำหน้าที่เปลี่ยนกำลังไฟฟ้า (Power Conversion) สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

- กระแสสลับเป็นกระแสตรง (AC/DC)
- กระแสสลับเป็นกระแสตรงและเป็นกระแสสลับ (AC/DC/AC)
- กระแสสลับเป็นกระแสสลับ (AC/AC)

กรณี (AC/DC) ใช้เป็นแหล่งจ่ายให้แก่มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) หรือ กระบวนการเคมี (Chemical Process)

กรณี (AC/DC/AC) ใช้กับมอเตอร์ซิงโครนัส หรือมอเตอร์เหนี่ยวนำ การที่ต้องเปลี่ยนจาก DC เป็น AC อีกครั้ง เพื่อทำให้มอเตอร์สามารถจ่ายกำลังที่ความถี่ต่างจาก 50 เฮิร์ตซ์

คอนเวอร์เตอร์ สามารถแบ่งแยกได้ตามจำนวนพัลส์ 3,6,12,18,24 พัลส์และมากกว่านี้ จำนวนพัลส์จะบอกถึงอุปกรณ์ปิดเปิดวงจรที่ใช้โซลิดสเตท ซึ่งโดยปกติใช้ไทริสเตอร์ควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากมุมจุดชนวน (Firing Angle) ของมัน ควบคุมได้ง่าย งานทั่วไปนิยมใช้ 6 หรือ 12 พัลส์

คอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.10 ซึ่งมี 2 แบบ คือ Y-$\Delta$- และ Y-Y กระแสในขดลวดกระแสสลับ มีรูปร่างต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 อนุกรมฟูเรียร์(Fourier Series) ในการแยกสัญญาณ จะได้ขนาดฮาร์โมนิคส์ที่ 5, 7, 11, 13, 17, 19,.....เหมือนกัน แต่มีเครื่องหมายตรงข้ามกัน เฉพาะฮาร์โมนิคส์ที่ 5, 7, 19, ...หากนำคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 2 แบบนี้มาต่อขนานกัน ก็จะได้คอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์ ที่ไม่มีกระแสฮาร์โมนิคส์ที่ 5, 7, 17,... ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และรูปที่ 2.12 แสดงรูปคลื่นกระแสที่ไหลเข้าวงจรคอนเวอร์เตอร์ 24 พัลส์ เมื่อเปรียบเทียบกับวงจร 6 พัลส์ ในรูปที่ 2.11 จะเห็นว่า รูปที่ 2.12 มีลักษณะค่อนข้างคล้ายรูปคลื่นความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ มากกว่ารูปที่ 2.11

สำหรับคอนเวอร์เตอร์กำลัง สามารถหาอันดับและฮาร์โมนิคส์ได้ตามสมการ

$$n = Kq \pm 1$$

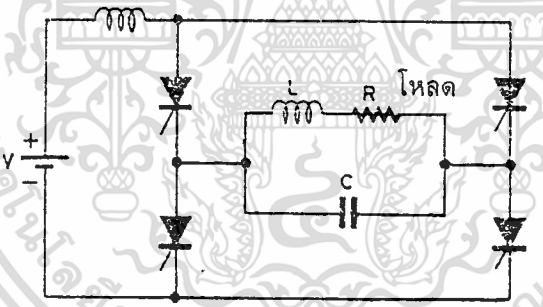
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

| | | | |
|---|---|---|---|
| | n | = | อันดับฮาร์โมนิคส์ |
| | K | = | เลขจำนวนเต็มบวก มีค่าเท่ากับ 1, 2, 3,... |
| | q | = | จำนวนพัลส์ของคอนเวอร์เตอร์ |
| และ | $I_n$ | = | $I_1/n$ |

โดยที่

| | | |
|---|---|---|
| $I_n$ | = | กระแสฮาร์โมนิคส์ลำดับที่ n |
| $I_1$ | = | กระแสที่ความถี่หลักมูล |
| n | = | อันดับฮาร์โมนิคส์ |

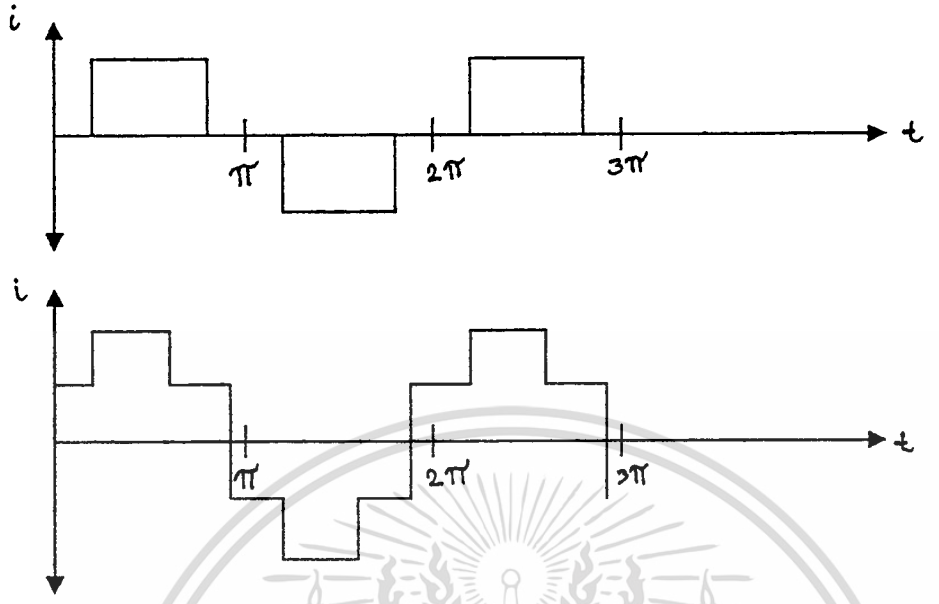



รูปที่ 2.11 คอนเวอร์เตอร์แบบพัลส์

$$i = \sqrt{2}I(\sin wt - \frac{\sin 5wt}{5} + \frac{\sin 7wt}{7} + \frac{\sin 11wt}{11} + \frac{\sin 13wt}{13} + \ldots)$$

$$i = \sqrt{2}I(\sin wt - \frac{\sin 5wt}{5} + \frac{\sin 7wt}{7} + \frac{\sin 11wt}{11} + \frac{\sin 13wt}{13} + \ldots)$$

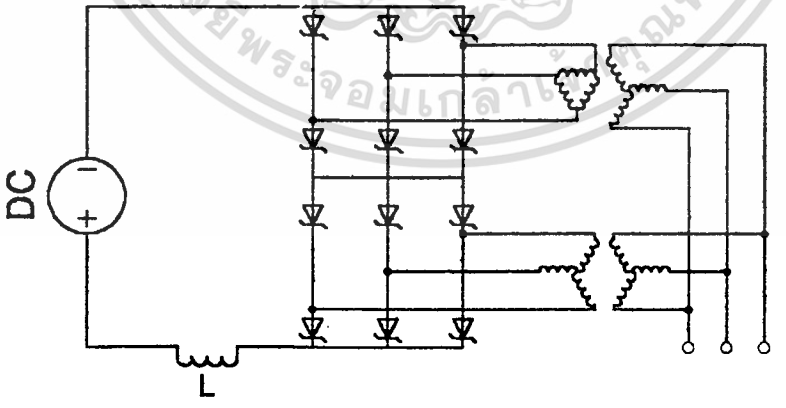
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
038866




รูปที่ 2.12 สัญญาณไฟกระแสสลับของคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์

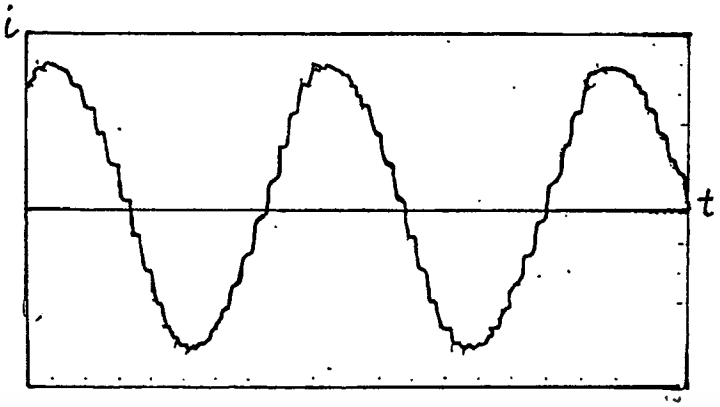
(a) วงจรต่อแบบ Y-Y

(b) วงจรต่อแบบ $\Delta$-Y




รูปที่ 2.13 คอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 2.14 รูปคลื่นกระแสไฟสลับคอนเวอร์เตอร์แบบ 24 พัลส์

**2.2.2 เตาหลอมแบบอาร์ค (Arc Furnace)**

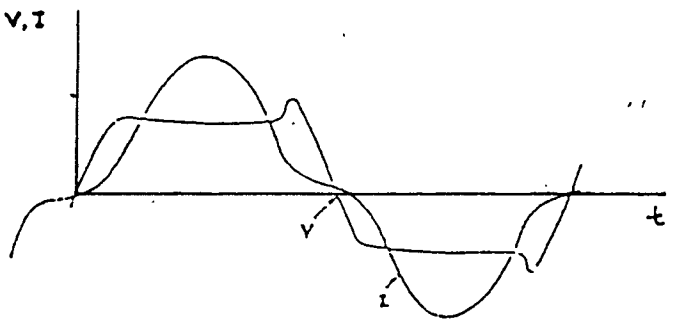
เป็นแหล่งกำเนิดคอนเวอร์เตอร์ที่มีศักดาไฟฟ้าอาร์คไม่เป็นสัญญาณไซนูซอยด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.14(a) ไดอะแกรมเส้นเดี่ยวและวงจรสมมูลย์ของเตาหลอมแบบอาร์ค ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.14(b) และ (c) เนื่องจากอาร์คไม่เสถียรภาพ เตาหลอมจึงมีลักษณะเหมือนความเหนี่ยวนำที่เปลี่ยนแปรค่าได้ เพราะหลักการทำงานใช้เปลี่ยนแท็ป ศักดาไฟฟ้าอาร์คเปลี่ยนแปลงไปตามระบบการทำงานเป็นขั้นตอน ตั้งแต่สภาพลัดวงจรไปถึงเปิดวงจรออกและเนื่องจากศักดาอาร์คที่ไม่ใช่สัญญาณไซนูซอยด์เปลี่ยนแปลงไป ตั้งแต่เริ่มการทำงานจนถึงขั้นตอนสุดท้ายของการหลอม ซึ่งทำให้คลื่นของศักดาไฟฟ้าเพี้ยนไปจากสัญญาณไซนูซอยด์และกำเนิดฮาร์โมนิคส์ขึ้นในระบบไฟฟ้า

ปริมาณกระแสฮาร์โมนิคส์ของเตาหลอมแบบอาร์คจะมีค่าสูงมาก ในช่วงขณะที่เตาหลอมกำลังหลอมละลาย (Melting phase) ตารางที่ 2.1 แสดงค่าวัดที่ได้จากการทดสอบหลายองค์กรในต่างประเทศ เป็นค่าสูงสุดที่เตาหลอมใช้ในการหลอมเศษโลหะจากในช่วงเวลาหลาย ๆ วินาที

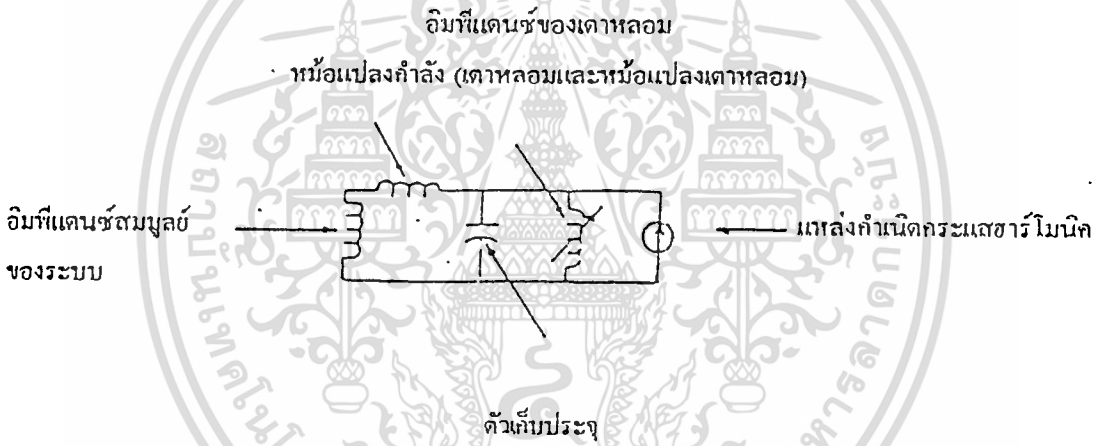
**ตารางที่ 2.1 กระแสฮาร์โมนิคส์ที่เตาหลอมดึงจากระบบ**

| Harmonic Order | % Rated Furnace Current |
|---|---|
| 2 | 10 |
| 3 | 11 |
| 4 | 3 |
| 5 | 9 |
| 6 | 1 |
| 7 | 4 |
| 8 | 1 |
| 9 | 1 |
| 10 และมากกว่า | < 1 |

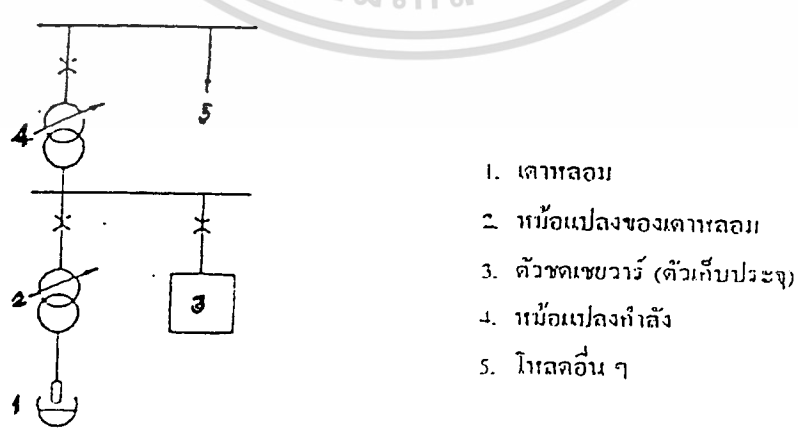
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่2.15(a) รูปคลื่นแรงดันอัดและกระแสที่เกิดจากเตาหลอมแบบอาร์ค




รูปที่ 2.15 b) ระบบเตาหลอมแบบอาร์ค (อิมพีแดนซ์เตาหลอม)




รูปที่ 2.15(c) วงจรสมมูลย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.2.3 หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent Lamp)**

หลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิคส์ชนิดหนึ่ง อันเนื่องมาจากบัลลาสท์และคุณสมบัติของหลอดเองจึงได้มีการคิดพัฒนาเกี่ยวกับหลอดฟลูออเรสเซนต์ เพื่อใช้ในการคำนวณหากระแสฮาร์โมนิคส์ที่ 3 ในทางปฏิบัติมีผลกระทบต่อระบบน้อยมาก ถ้าหากกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่หลอดฟลูออเรสเซนต์มีค่าการใช้กำลังไฟฟ้าน้อยต่อโหลดทั้งหมดก็ไม่จำเป็นที่จะนำมาพิจารณา การคำนวณแสดงดังต่อไปนี้

<u>กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของหลอดฟลูออเรสเซนต์</u>

$$P = \frac{2}{\pi} VAY_1(\sqrt{1 - x^2a^2} - bx \quad (1.3.1)$$

โดย

A คือแรงดันที่ขั้วหลอด

x $= A / V$

$$a = \frac{4}{\pi} \sum_{1,3,..} \frac{Y_n}{Y_1} \frac{\sin\delta_n}{n}$$

$$b = \frac{4}{\pi} \sum_{1,3,..} \frac{Y_n}{Y_1} \frac{\cos\delta_n}{n}$$

เมื่อ

$Y_n$ คือค่าสมบูรณ์ของแอดมิตแตนซ์ของ Linear Ballast ที่ nw

$\delta_n$ คือค่ามุมเลื่อนเฟส (Phase shift) ระหว่างมุมของกระแสและแรงดันฮาร์โมนิคส์

จะได้สมการของกระแสดังนี้

$$i(t) = Y_1 V \sin(wt + \psi + \delta_1) - \frac{4A}{\pi} \sum_{1,3,..} \frac{Y_n}{n} \sin(nwt + \delta_n) \qquad (1.3.2)$$

เมื่อ

$\psi$ คือค่ามุมเลื่อนเฟส (phase shift) มุมเนื่องจากการตัดจุดศูนย์ครั้งแรกของกระแสฮาร์โมนิคส์มีเงื่อนไข i(O)=0 ดังนั้นจึงได้ว่า

$$\sin(\psi + \delta_1) = ax \qquad (1.3.3)$$

กระแสฮาร์โมนิคส์แรกโดยใช้เทอมแรกของอนุกรมจะให้ค่าสัมพันธ์ของกระแสฮาร์โมนิคส์ที่สูงขึ้น และเราจะนิยามไว้ดังนี้

$$M_n = I_n / \sum I_n^2 \ , n = 1,3,... \qquad (1.3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$N_n = M_n/\lambda \qquad (1.3.5)$$

โดย

$\lambda$ คือตัวประกอบกำลังของระบบ

$$\lambda = 2P/\sqrt{\sum I_n^2 \sum V_m^2}$$

มีสูตร 2 คูณอยู่ด้วยเนื่องจากใช้ขนาดไม่ได้ใช้ค่าอาร์เอ็มเอสในการคำนวณต่อไปจะสมมติว่าว่าบัลลาสท์ไม่มีความสูญเสีย เมื่อ P คือกำลังไฟฟ้าเข้าวงจร และ In จาก (1.3.2) เมื่อแรงดันเข้าวงจรเป็นคลื่นไซน์จริง ๆ จะได้

$$\lambda = 2P/(V\sqrt{\sum I_n^2} \qquad (1.3.6)$$

จาก (1.3.4) - (1.3.6) ได้

$$Nn = In\ V/2P \qquad (1.3.7)$$

เนื่องจากสมมุติว่าไม่มีความสูญเสีย แอดมิดแตนซ์เป็นค่าจินตภาพอย่างเดียว มุมเลื่อนเฟสจึงมีค่า $-\pi/2$ , $\pi/2$ แล้วแต่ชนิดของบัลลาสท์ (capacitive เป็นบวก , inductive เป็นลบ ) ที่ความถี่ nw ให้ $B_n$ Susceptance (capacitive เป็นบวก , inductive เป็นลบ ) จาก 1.3.2 เขียนใหม่เป็น

$$I = B1\ V\cos(wt+\psi) - \frac{4A}{\pi}\sum_{1,3_}\frac{B_n}{n}\cos nwt \qquad (1.3.8)$$

และผลรวมของ a และ b ขณะนี้ คือ

$$a = \frac{4}{\pi}\sum_{1,3_}\frac{B_n}{nB_1}$$

ใช้ (1.3.4) (1.3.8) และ (1.3.3) จะได้

$$M_n = \frac{rS_n}{n}\left[1+r^2\left(1-\frac{\pi a}{2}+\sum_{3,5,7_}\frac{S_k^2}{k^2}\right)\right]^{-1/2}, n = 3,5,7 \qquad (1.3.9)$$

$$r = \frac{4}{\pi} \times = \frac{4}{\pi}\frac{A}{V}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Sn = |B_n / B_1|$$

เมื่อ r $\longrightarrow$ O ค่า V $\longrightarrow \infty$,Mn อาจจะลดลงเมื่อเพิ่ม V

ดังนั้น Nn บัลลาสท์ไม่มีความสูญเสีย คือ

$$Nn = \frac{S_n}{n}(1 - x^2a^2)^{-1/2}, n = 3,5,... \qquad (1.3.10)$$

ถ้า $a \neq O, N_n$ จะลดลงเมื่อเพิ่ม V ซึ่งขึ้นอยู่กับ x แต่ก็ไม่แน่นอนเท่ากับ $M_n$ เมื่อ a=O , การเปลี่ยนแปลงค่า V ไม่มีประโยชน์ในขณะเดียวกันเมื่อ $a=O, N_n$ ไม่ขึ้นอยู่กับ A

สำหรับ L-Ballast

$$S_n = 1/n$$

สำหรับ LC-Ballast

$$S_n = \frac{n|\alpha^2 - 1|}{|\alpha^2 - n^2|}$$

กับ

$$\alpha = \frac{w_n}{w} = \frac{1}{w\sqrt{LC}}$$

**การคำนวณและวัดค่า $M_3$**

ใช้สมการที่ 1.3.9 ในกรณี L-Choke

$$M_3 = [81(r^{-2}\text{-}1.46)+(3/5)4+(3/7)^4 ...]^{-1/2}$$

$$\approx 1/9(r^{-2}\text{-}1.46)^{-1/2}$$

ในกรณีที่หลอดใส่ตัวเก็บประจุเข้าไปต่อร่วม

$$M_1 = \left[1 + (s-1)^2(r^{-2}-1) + 2(s-1) + \left(\frac{s-1}{3s-1}\right)^2\right]^{-1/2}$$

$$s = \frac{4\pi PwL}{AV}$$

ในทางปฏิบัติ S>1 เมื่อ S>>1

$$M3 \approx (-1)^{-1}(r^{-2}\text{-}1)^{-1/2}$$

ในกรณีของ LC-Ballast เมื่อ $w_0$=w แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_3 = \left[ 4.23 + \left( 1.40 \frac{V}{A} \right)^2 \right]^{-1/2}$$

การหาค่า $M_3$ในทางปฏิบัติ A คือ 110 V ใช้ในการคำนวณในตารางที่ 2.2 โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

ค่า $M_n$ ถ้าจะคำนวณให้ถูกต้องมากขึ้น ต้องใช้พารามิเตอร์สองตัว คือ A และ D ซึ่งเป็นคุณสมบัติของหลอด หาโดยกราฟ Volt-Ampere ให้

$$Asgn\,(i(t) = A_1 sgn(i(t)) - D\cos wt$$

ตารางที่ 2.2 M3(IN PERCENT), THEORETICAL AND EXPERIMENTAL*

| Circuit | Experimental $M_3$ (Percent) | Calculated (Percent) |
|---|---|---|
| Regular choke with one 40-W lamp | 7.9 | 6.2 |
| Circuit with the "added" capacitor | 12.4 | 11 |
| LC ballast with w0 = 2w, one 40-w lamp | 17.9 | 22.9 |
| w0 = 2w ballast with two lamps in series | 32 | 35.5 |

*ค่าแรงดันไลน์เป็น 220 โวลท์อาร์เอ็มเอส และหลอดไฟมีขนาด 40 วัตต์(แบบ T-12) ทั้งหมด ในส่วนที่มีการเพิ่มตัวเก็บประจุเข้าไปในวงจรตัวเก็บประจุมีค่า 2.9 uF

โดยทั่วไป A, และ D คือ 120 V, 50 V ตามลำดับ สำหรับหลอด 40 W, และ A, และ D คือ 130 V, 80 V, ตามลำดับสำหรับหลอด 100 W

ดังนั้น สมการกระแสเปลี่ยนเป็น

$$i(t) = Y_1 Y \sin(wt + \Psi + \delta_1) - \frac{4A}{\pi} \sum \frac{Y_n}{n} \sin(nwt + \delta_n) - DY_1 \cos(wt + \delta_1)$$

สำหรับบัลลาสท์ไม่มีความสูญเสีย

$$i(t) = B_1 V \cos(wt + \Psi) - \frac{4A_1}{\pi} \sum \frac{B_n}{n} \cos(nwt) + DB_1 \sin(wt)$$

$$\cos\psi = x_1 a$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$x_1=A_1/V$

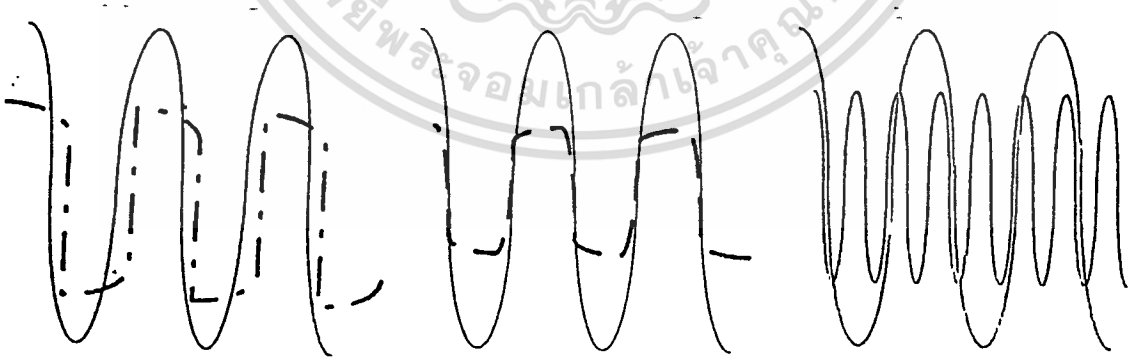
$$M_n=\frac{r_1 S_n}{n}\left[1+r_1^2\left(1-\frac{\pi a}{2}+\sum_{3,5,2,..}\frac{S_k^2}{k^2}\right)\pm\frac{2D}{V}\sqrt{1-(ax_1)^2}+\left(\frac{D}{V}\right)^2\right]^{-1/2}$$

$$M_n\approx 1\pm\frac{D}{V}\frac{(1-(ax_1)^2)^{1/2}}{1+r_1^2(1-\pi a/2)}$$

โดยเครื่องหมายแล้วแต่ชนิดของบัลลาสท์ (capacitive เป็นบวก, inductive เป็นลบ) จากตารางที่ 2.2 บรรทัดบนสุด $M_3$= 7.9 คำนวณได้ 7.35 ซึ่งค่าใกล้เคียงกัน และในกรณีที่ a = 0 จะได้

$$M_n = 1-\frac{D}{V-4A_1/\pi}$$

ในทางปฏิบัติ การติดตั้งหลอดฟลูออเรสเซนต์จะคำนึงถึงฮาร์โมนิคส์ที่ 3 ดังแสดงให้เห็นเมื่อใช้รีแอคเตอร์,รีแอคเตอร์ต่อกับตัวเก็บประจุและบัลลาสท์ จากการคำนวณและการวัดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะในระบบ 3 เฟส 4 สาย ฮาร์โมนิคส์ที่มีค่าเป็น 3 เท่าของความถี่มูลฐานจะไหลเข้าไปในสายนิวทรอลโดยมีค่าเป็นสามเท่าของแต่ละความถี่ฮาร์โมนิคส์ ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.16 เป็นรูปของสัญญาณกระแสที่สายนิวทรอล รูปที่ 2.17 แสดงการต่อหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบ 3 เฟส รูปที่ 2.18 แสดงคุณลักษณะของหลอดฟลูออเรสเซนต์



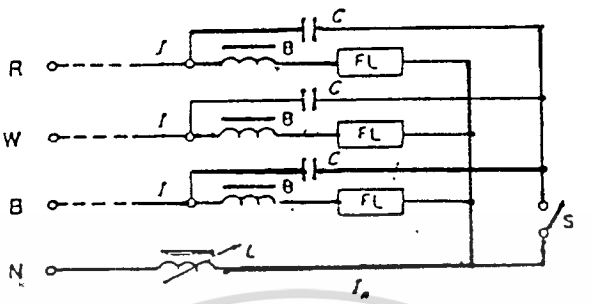
**รูปที่ 2.16 แสดงรูปคลื่นกระแสฮาร์โมนิคส์ที่เกิดจากการทดลอง**

**(a) ทดลองโดยใช้รีแอคเตอร์**

**(b) ทดลองโดยใช้รีแอคเตอร์ต่อกับตัวเก็บประจุ**

**(c) ทดลองโดยใช้บัลลาสท์**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

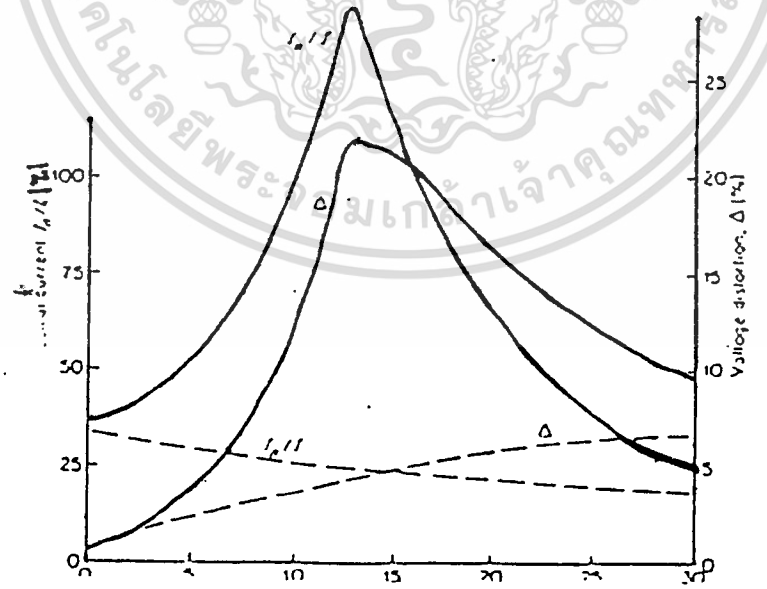



**รูปที่ 2.17 วงจรสามเฟสของหลอดฟลูออเรสเซนต์**

**(a) แรงดันคร่อมหลอด**

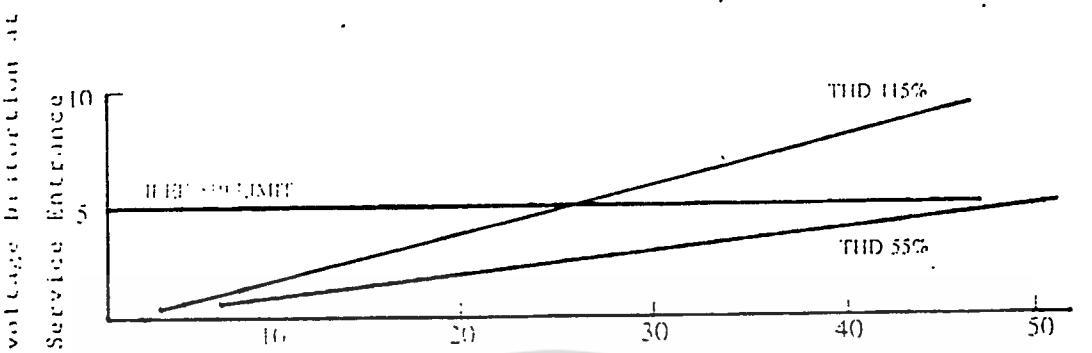
**(b) กระแสเฟสที่มีตัวเก็บประจุ 1 หลอด**

**(c) กระแสนิวทรอลสามเฟส**




**รูปที่ 2.18 คุณลักษณะของฟลูออเรสเซนต์**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.19** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเพี้ยน กับเปอร์เซ็นต์โหลด CFL

ปัจจุบันได้มีการใช้หลอด Compact fluorescent (CFL) มากขึ้นเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานและหลอดประเภท Incandescent ที่ใช้งานร่วมกับตัวหรี่ไฟ (Dimmer) ซึ่งทั้งสองอย่างมีค่าตัวประกอบกำลังต่ำและก่อให้เกิดฮาร์โมนิคส์ในระบบไฟฟ้า โดยปริมาณการรบกวนขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ CFL และหลอด Incandescent ที่ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 แสดงลักษณะของหลอด Incandescent ขนาด 100 W แบบไม่ได้ต่ออุปกรณ์ร่วม และต่อหรี่ไฟแบบใช้ไดโอด และใช้ไตรแอคที่ผลิตฮาร์โมนิคส์อันดับต่าง ๆ ให้แก่ระบบ ส่วนตารางที่ 2.4 แสดงลักษณะของหลอด CFL ที่ก่อให้เกิดฮาร์โมนิคส์ที่ความถี่ต่าง ๆ เมื่อใช้ที่ความถี่ 60 Hz และความถี่สูงตามลำดับ ตารางที่ 2.5 แสดงเปอร์เซ็นต์ของโหลดหลอด CFL ต่อโหลดทั้งหมดของระบบว่าจะเกิดฮาร์โมนิคส์รวมเท่าใด และค่าตัวประกอบกำลังรวมเท่าใดแรงดันมีความเพี้ยนกี่เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2.3 แสดงลักษณะหลอดอินแคนเดสเซนต์ขนาด 100 วัตต์**

| | 100 W | 100 W DIODE | (2)100W* (2)DIODE | 100 W TRIAC |
|---|---|---|---|---|
| POWER (W) | 101.3 | 85.5 | 175 | 88.5 |
| CURRENT (A) | 0.85 | 1.03 | 1.46 | 0.81 |
| POWER FACTOR | 1.00 | 0.70 | 1.00 | 0.92 |
| UGTH OUT (lm) | 1740 | 780 | 1584 | 1290 |
| EFFICACY (lm/W) | 17.2 | 9.2 | 9.7 | 14.5 |
| HARMONICS (%) | | | | |
| $2^{nd}$ | 0.1 | 39.5 | 0.1 | 2.10 |
| $3^{rd}$ | 2.9 | 3.9 | 2.5 | 22.2 |
| $4^{th}$ | 0.1 | 10.5 | 0.1 | 2.10 |
| $5^{th}$ | 2.0 | 1.5 | 2.10 | 14.2 |
| $7^{th}$ | 1.1 | 1.2 | 1.4 | 9.1 |
| $9^{th}$ | 0.4 | 0.5 | 0.0 | 5.6 |
| THD | 3.7 | 41.0 | 3.4 | 29.0 |

**ตารางที่ 2.4 COMPACT FLUORESCENT LAMPS**

| | 60 Hz | | | HIGH FREQUENCY | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 7W | 15W | 20W | 11W | 15W | 30W |
| POWER (W) | 9.5 | 19.7 | 20.3 | 10.7 | 14.3 | 23.3 |
| CURRENT (A) | 0.17 | 0.40 | 0.34 | 0.13 | 0.18 | 0.32 |
| P.F. | 0.47 | 0.41 | 0.50 | 0.67 | 0.63 | 0.61 |
| LIGHT (lm) | 380 | 560 | 1030 | 610 | 930 | 1370 |
| HARMONICS (%) | | | | | | |
| 3rd | 8.1 | 17.8 | 15.3 | 69.4 | 81.3 | 79.1 |
| 5th | 2.3 | 2.11 | 2.6 | 48.5 | 50.8 | 48.9 |
| 7th | 1.1 | 1.3 | 2.2 | 18.4 | 20.6 | 30.5 |
| THD | 8.1 | 18.0 | 15.7 | 100 | 106 | 114 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2.5 100-KVA BUILDING SIMULATION LOAD**

| | PERCENT RETROFIT WITH COMPACT FLUORESCENT | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 10 | 25 | 50 | 100 |
| TOTAL HARMONICS (%) | 2.10 | 4.5 | 9.8 | 23.5 |
| TOTAL POWER FACTOR | 0.84 | 0.82 | 0.78 | 0.65 |
| % CLF LOAD | 1.5 | 4.1 | 9.4 | 26.3 |
| VOLTAGE DISTORTION (%) | 0.3 | 0.7 | 1.5 | 4.4 |

**2.2.4 หม้อแปลงไฟฟ้า**

ขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าไม่ได้จ่ายโหลดแรงดันทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงจะสมดุลย์เองจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (back e.m.f.) เพราะผลจากความต้านทานและรีแอคแตนซ์ ถือว่าน้อยเนื่องจากมีกระแสไหลน้อย ดังนั้นแรงดัน สำหรับจ่ายไฟสัญญาณไซน์ คือ

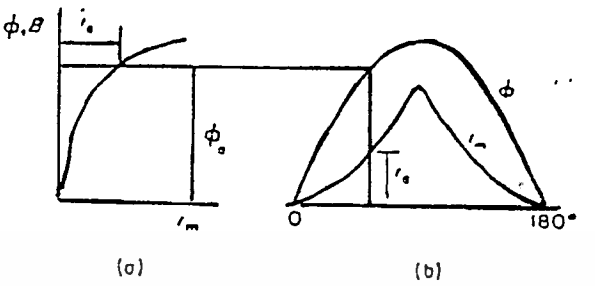
$$v_1 = -e_1 = -E_m \sin \omega t = N_1 \frac{d\varnothing}{dt} \qquad (1.3.11)$$

จากสมการ 2.10 จะเขียนสมการของฟลักซ์หลัก (main flux) ได้ดังนี้

$$\varnothing = -\int \frac{e_1}{N_1} dt = \frac{E_m}{N_1 \omega} \cos\omega t = \varnothing_m \cos\omega t \qquad (1.3.12)$$

แต่ว่าการที่แรงดันสัญญาณไซน์ก็ไม่ได้หมายความว่า กระแสต้องเป็นสัญญาณไซน์ด้วย เพราะว่าฟลักซ์แม่เหล็กไม่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก โดยถ้าเป็นแกนเหล็กทางอุดมคติไม่มี จะได้ฟลักซ์ , $\varnothing$ และกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก $i_m$ ที่ต้องการโดยใช้ความสัมพันธ์ของ magnetizing curve ของแกนเหล็กที่ทำเป็นแผ่นบาง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.20(a) และในรูปที่ 2.20 (b) เมื่อ $\varnothing$ คือ ฟลักซ์แม่เหล็กไม่เป็นสัญญาณไซน์ที่ไม่สมดุลย์ด้วยเหมือนกับรูปที่ 2.10 (b) การผิดเพี้ยนดังกล่าวก็เป็นสาเหตุให้เกิดฮาร์โมนิคส์คู่สาม โดยเฉพาะฮาร์โมนิคส์ที่สามมีมากที่สุด แต่ก็สามารถกำจัดได้โดยต่อขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นแบบเดลต้า

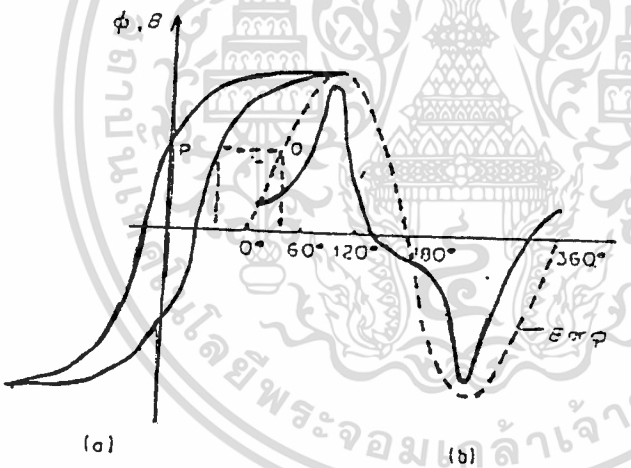
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.20** Transformer magnetization (without hysteresis)

a) magnetization curve

b) flux and magnetization current waveforms




**รูปที่ 2.21** Transformer magnetization (including hysteresis)

a) magnetization curve

b) flux and magnetization current waveforms

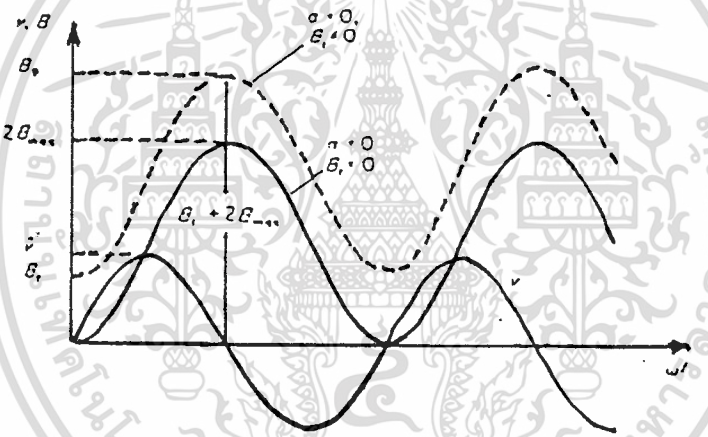
**<u>กระแสอินรัชฮาร์โมนิกส์ ( Inrush current harmonic )</u>**

ถ้าหม้อแปลงถูกตัดออกจากระบบจะมีความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเหลือตกค้างอยู่ในแกนเหล็กมีขนาด $+B_r$ หรือ $-B_r$ (หรือมีค่าใกล้เคียงศูนย์) เมื่อหม้อแปลงถูกจ่ายไฟอีกครั้งความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 2.22 ซึ่งอาจมีขนาดสูงถึง $2B_{max}$ หรือ $B_r+2B_{max}$ (เกือบสามเท่าของความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กขณะทำงาน ) ในการออกแบบหม้อแปลงสามารถสร้างให้มีความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสูงได้ถึง 3.4 หรือ 4.7 T ซึ่งเมื่อเราเปรียบเทียบกับความหนาแน่น

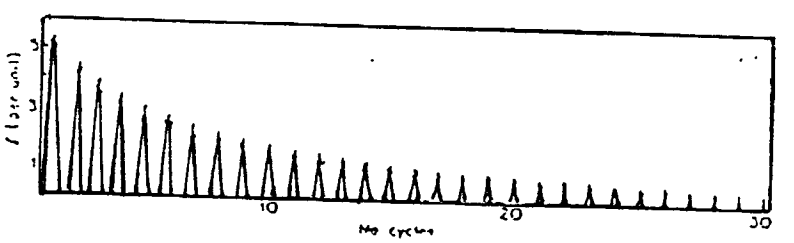
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามแม่เหล็กที่ 2.05 T ก็สามารถทำให้แกนเหล็กอิ่มตัว ดังนั้นกระแสอินรัชจึงทำให้แกนเหล็กเกิดการอิ่มตัวอย่างมาก แอมแปร์-เทิร์น สูงมากในแกนเหล็ก กระแสสร้างสนามแม่เหล็กจะสูง 5-10 pu. ของกระแสสร้างสนามแม่เหล็กปกติกระแสอินรัชแสดงดังรูปที่ 2.23 โดยกระแสอินรัชจะมีขนาดลดลงเมื่อเวลาผ่านไป อันเนื่องมาจากความต้านทานของขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง สำหรับหม้อแปลงขนาดใหญ่ต้องใช้เวลาหลายวินาที เพราะว่าค่าความต้านทานที่ต่อ

อนุกรมฟูเรียร์ของรูปคลื่นกระแสอินรัชในรูป 2.23 แสดงเป็นแต่ละฮาร์โมนิคส์ดังรูปที่ 2.24 และหากเกิดภาวะไม่สมดุลย์ กระแสกระตุ้นของหม้อแปลงจะทำให้เกิดองค์ประกอบของฮาร์โมนิคส์คู่และฮาร์โมนิคส์คี่ด้วย โดยเฉพาะฮาร์โมนิคส์ที่สองจะทำให้เกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็กได้ง่ายขึ้น เนื่องจากส่วนประกอบไฟตรงของกระแสฮาร์โมนิคส์ที่สอง

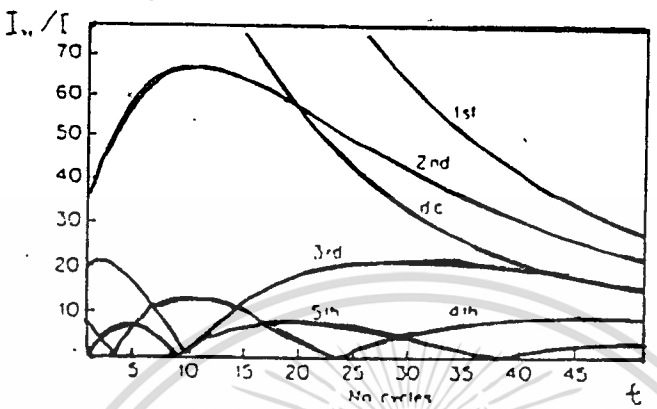


**รูปที่ 2.22** Flux density in a transformer at energization with both remnant flux B , and zero resonant flux



**รูปที่ 2.23** Inrush current of a 5 MVA transformer : $B_r$ = 1.3 T , = 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

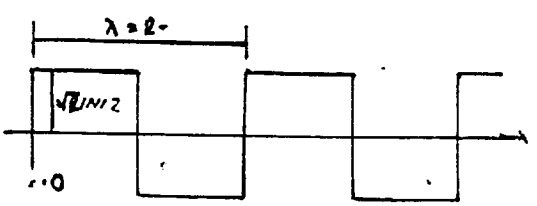



**รูปที่ 2.24** The variation of harmonic content (as a percentage of the rated current ) with time

**2.2.5 แรงเครื่องจักรกลหมุน (ROTATING MACHINE HARMONICS)**

**M.M.F. distribution ของขดลวด A.C.**

**รูปที่** 2.25 **แสดงการกระจายของ** m.m.f. **ของฟลักซ์ในหนึ่งเฟสของขดลวดสามเฟสพันแบบ** full-pitched **หนึ่งช่องต่อขั้วต่อเฟส โดยสมมุติว่าช่องอากาศ** (air-gap) **มีขนาดคงที่และไม่พิจารณาการอิ่มตัวของแกนเหล็ก**




**รูปที่ 2.25** M.M.F. and flux distribution of full-pitch winding with one slot/pole

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางอุดมคติ m.m.f. ของช่องอากาศจะมีค่าสม่ำเสมอและขนาดสูงสุดเท่ากับ $\sqrt{2}\,IN/2$ เมื่อ I คือ กระแสต่อหนึ่งตัวนำและ N คือจำนวนของตัวนำต่อหนึ่งช่อง

จากการวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูเรียร์ของสัญญาณสี่เหลี่ยมของ m.m.f. แสดงได้ดังนี้

$$F(x) = \frac{2\sqrt{2}IN}{\pi}\left\{\sin\frac{2\pi x}{\lambda} + \frac{1}{3}\sin 3\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) + \frac{1}{5}\sin 5\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) + \ldots\right\} \qquad (1.3.13)$$

ขนาดของฮาร์โมนิคส์ที่ n th คือ I/n เท่าของ m.m.f. มูลฐานในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (t) $= 2\pi f$

$$F(x) = \frac{2\sqrt{2}IN}{\pi}\sin(\omega t)\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{2}\sin n\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \text{for} \quad n = \text{odd} \ldots\ldots\ldots(1.2.17)$$

เมื่อ $\lambda$ คือความยาวคลื่น

อย่างไรก็แล้วแต่ในทางปฏิบัติขดลวดจะกระจายอยู่ที่ผิวด้วย g ช่องต่อขั้วเฟสและ m.m.f. ของขดลวด g จะวางซ้อนกันอยู่กับขดอื่น ยิ่งกว่านั้นมุม displacement ไม่เท่ากัน สำหรับฮาร์โมนิคส์ต่าง ๆ กันเมื่อ pole pitch ต่างกัน

สำหรับเครื่องจักรกล m-phase จำนวนของร่อง (slot) คือขั้วต่อ

$$Q = mg$$

และมุมทางไฟฟ้าระหว่างขั้วร่อง

$$\alpha = \pi/Q$$

และจะได้ distribution factor คือ

$$k_d = \frac{\text{resultant m.m.f.}}{\text{sum of m.m.fs of indididual coils}}$$

จากรูป 2.26 จะได้

$$k_d = \frac{\sin(g\alpha/2)}{g\sin(\alpha/2)} \qquad (1.3.15)$$

สำหรับความถี่มูลฐาน และ

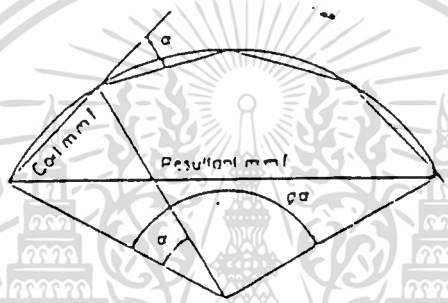
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k_{dn} = \frac{\sin(ng\alpha/2)}{g\sin(n\alpha/2)} \qquad (1.3.16)$$

สำหรับความถี่ฮาร์โมนิคส์

ดังนั้น m.m.f. หนึ่งเฟสของขดลวดหลายเฟส คือ

$$F(x) = \frac{2\sqrt{2}IN}{\pi}\sin(\omega t)\sum_{n=1}^{\infty}\frac{k_{dn}}{n}\sin n\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \text{for} \quad n=\text{odd}.....(1.3.17)$$




**รูปที่ 2.26** Determination of distribution factor

**ขดลวดสามเฟส**

สำหรับขดลวดสามเฟสของเครื่องกลสามเฟสวางห่างกัน $2\pi/3$ องศาไฟฟ้า ดังนั้น m.m.f. จะเปลี่ยนเป็น

$$F_1(x) = \frac{2\sqrt{2}IN}{\pi}\sin(\omega t)\left[\sum_{n=1}^{\infty}\sin n\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)\right] \qquad (1.3.18)$$

$$F2(x) = \frac{2\sqrt{2}IN}{\pi}g\sin\left(\omega t-\frac{2\pi}{3}\right)\sum_{n=1}^{\infty}\frac{k_{dn}}{n}\sin\left(n\left(\frac{2\pi x}{\lambda}-\frac{2\pi}{3}\right)\right) \qquad (1.3.19)$$

$$F_1(x) = \frac{2\sqrt{2}IN}{\pi}g\sin\left(\omega t-\frac{4\pi}{3}\right)\sum_{n=1}^{\infty}\frac{k_{dn}}{n}\sin\left(n\left(\frac{2\pi x}{\lambda}-\frac{4\pi}{3}\right)\right) \qquad (1.3.20)$$

m.m.f. $F(x) = F_1(x) + F_2(x) + F_3(x)$ สำหรับ $n_{th}$ ฮาร์โมนิคส์ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F(x) = \frac{2\sqrt{2}IN}{\pi} g \frac{k_{dn}}{n}\left\{\sin n\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)\sin\omega t + \sin\left[n\left(\frac{2\pi x}{\lambda}-\frac{2\pi}{3}\right)\right]\sin\left(\omega t-\frac{2\pi}{3}\right)\right\}$$

$$+\sin\left[n\left(\frac{2\pi x}{\lambda}-\frac{4\pi}{3}\right)\right]\sin\left(\omega t-\frac{4\pi}{3}\right)\Bigg\}$$

$$=\frac{2\sqrt{2}IN}{\pi} g \frac{k_{dn}}{n}\left\{\cos\left[\frac{2\pi nx}{\lambda}-\omega t\right]-\cos\left[\frac{2\pi nx}{\lambda}+\omega t\right]+\right.$$

$$\cos\left[\frac{2\pi nx}{\lambda}-\omega t-(n-1)\frac{2\pi}{3}\right]+\cos\left[\frac{2\pi nx}{\lambda}-\omega t-(n-1)\frac{2\pi}{3}\right]$$

$$+\cos\left[\frac{2\pi nx}{\lambda}+\omega t-(n+1)\frac{2\pi}{3}\right]+\cos\left[\frac{2\pi nx}{\lambda}-\omega t-(n-1)\frac{4\pi}{3}\right]-$$

$$\left.+\cos\left[\frac{2\pi nx}{\lambda}+\omega t-(n-1)\frac{4\pi}{3}\right]\right\} \qquad (1.3.21)$$

แทน n = 1,3,5,...

$$F(x) = \frac{3\sqrt{2}IN}{\pi}\left\{(k_{d1}\cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}-\omega t\right)+\left(\frac{k_5}{d}\right)\cos\left(5\times\frac{2\pi x}{\lambda}+\omega t\right)+\left(\frac{k_{d7}}{7}\right)\right.$$

$$\left.\cos\left(7\times\frac{2\pi x}{\lambda}-\omega t\right)+...\right\} \qquad (1.3.22)$$

จะเห็นได้ว่าที่ความถี่มูลฐาน m.m.f. มีทิศทางบวกฮาร์โมนิคส์คู่สามถูกกำจัดหายไป ฮาร์โมนิคส์ที่ห้ามีทิศทางลบ ส่วนฮาร์โมนิคส์ที่เจ็ดมีทิศทางบวก

## SLOT HARMONICS

ถ้าเครื่องจักรมีร่องจำนวน mg ร่องต่อขั้ว (ดังรูป 2.27) ค่าการเปลี่ยนแปลงของซึมผ่านสนามแม่เหล็ก (variation of permeance) ในช่องอากาศประมาณได้ดังนี้

$$A_1 + A_2 \sin\left(2mg\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \qquad (1.3.23)$$

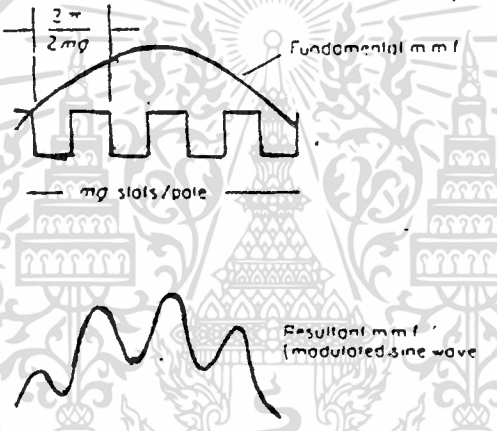
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก m.m.f. มูลฐานเปลี่ยนแปลงไปกับ B sin $(2\pi x/\lambda)$ การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นฟลักซ์รวม คือ

$$\left\{B\sin\frac{2\pi x}{\lambda}\right\}\left\{A_1 + A_2\sin\left(2mg\frac{2\pi x}{\lambda}\right)\right\} \qquad (1.3.24)$$

ที่องค์ประกอบความถี่มูลฐาน คือ

$$A_1 B\sin\frac{2\pi x}{\lambda} \qquad (1.3.25)$$




รูปที่ 2.27 Slot harmonics ที่ความถี่อื่น

$$A_1 B\sin\frac{2\pi x}{\lambda}\sin\left(2mg\frac{2\pi x}{\lambda}\right) = \frac{A_2 B}{2}\left\{\cos\frac{2\pi x}{\lambda}(2mg-1) - \cos\frac{2\pi x}{\lambda}(2mg+1)\right\} \qquad (1.3.26)$$

จะเห็นได้ว่าที่ร่อง (Slotting) ให้ฮาร์โมนิคส์อันดับ $2mg \pm 1$

<u>แรงดันฮาร์โมนิคส์ที่เกิดจากเครื่องจักรกลซิงโครนัส</u>

ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่กระจายอยู่ในช่องอากาศเป็นสัญญาณไซน์ที่สมบูรณ์มาก ดังนั้น e.m.f ที่เกิดขึ้นในขดลวดอาร์เมเจอร์แบบ full-pitched คือ $2\pi f \varnothing \sin\omega t$ โวลท์ต่อรอบ ในที่นี้ $\varnothing$ คือฟลักซ์ทั้งหมดต่อขั้วและความถี่ f มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อความเร็ว N (เป็นรอบต่อวินาที) และคู่ขั้ว p โดย f=Np. แต่อย่างไรก็ตาม การกระจายของฟลักซ์ก็ยังไม่ถูกต้องทีเดียวนัก โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉพาะเครื่องจักรแบบขั้วยื่น (Salient pole) โดยการกระจายสนามแม่เหล็กที่ไม่เป็นสัญญาณไซน์แสดงได้ดังนี้

$$F(x) = F_1 \sin\frac{2\pi x}{\lambda} + F_3 \sin\frac{3\times 2\pi x}{\lambda} + F_5 \sin\frac{5\times 2\pi x}{\lambda} + \ldots \qquad (1.3.27)$$

e.m.f ของขดลวด แสดงได้ด้วยอนุกรมของฮาร์โมนิคส์ ดังนี้

$$E(1) = E_1 \sin(\omega t) + E_3 \sin(3\omega t) + E_5 \sin(5\omega t) + \ldots \qquad (1.3.28)$$

distribution factor ที่ฮาร์โมนิคส์อันดับที่ n คือ

$$K_{dn} = \frac{\sin(ng\alpha/2)}{g\sin(n\alpha/2)} \qquad (1.3.29)$$

และ coil-span factor คือ

$$K_{dn} = \cos(n\theta/2) \qquad (1.3.30)$$

การเลือก $h_d$ และ $k_s$ ก็เพื่อแก้ปัญหาฮาร์โมนิคส์ e.m.f. ที่เป็นคู่ฮาร์โมนิคส์ โดยทำให้เหลือน้อยที่สุดหรือกำจัดให้หมดไป ส่วนฮาร์โมนิคส์ที่สามในเครื่องจักรกลสามเฟสนั้น สามารถกำจัดได้ด้วยการต่อขดลวดเป็นแบบเดลต้า coil-span ที่เหมาะสม สามารถลดฮาร์โมนิคส์ที่ห้าและฮาร์โมนิคส์ที่เจ็ดได้

ส่วนเครื่องกำเนิดสำรองจะต้องพิจารณาเรื่องสายนิวทรอลเป็นพิเศษอันเนื่องมาจากฮาร์โมนิคส์ที่สามของ zero sequence

สล็อตบนสเตเตอร์ทำให้ค่าการซึมผ่านสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงแสดงได้ด้วย $A_2\sin[2mg(2\pi x/\lambda)]$ และ m.m.f มูลฐานที่โรเตอร์สามารถแสดงด้วยคลื่นวิ่ง (travelling wave) $F_1\cos[(2\pi x/\lambda)-\omega t]$ องค์ประกอบ slot ripple ของความหนาแน่นฟลักซ์อยู่ในรูป

$$F_1A_2 \sin\left(2mg\frac{2\pi x}{\lambda}\right)\cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \omega t\right) \qquad (1.3.31)$$

ซึ่งสามารถแยกออกได้เป็นองค์ประกอบสองส่วนที่มีทิศทางการหมุนสวนทางกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{F_1 A_2}{2}\left\{\sin\left[(2mg+1)\frac{2\pi x}{\lambda}-\omega t\right]+\left[(2mg-1)\frac{2\pi x}{\lambda}+\omega t\right]\right\} \qquad (1.3.32)$$

สล็อตฮาร์โมนิคส์จะเหนี่ยวนำให้เกิด e.m.f. ที่ความถี่มูลฐานในโรเตอร์ แต่ก็สามารถทำให้น้อยลงได้โดยการ skewing แกนของสเตเตอร์ (stator core) โดยวางในแนวเส้นผ่าศูนย์กลาง damper bar ต่อจาก pole faces

<u>แรงดันฮาร์โมนิคส์จากมอเตอร์เหนี่ยวนำ</u>

ความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็กหมุนที่สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ คือความถี่มูลฐานด้วยความยาวคลื่น ความเร็วของโรเตอร์ คือ $f_1 \times (1-s)$ และความถี่ของกระแสที่โรเตอร์คือ $s f_1$

ฮาร์โมนิคส์ที่เหนี่ยวนำ e.m.f. ในสเตเตอร์ที่ความถี่

$$f_h = \frac{f\lambda(1-s)\pm(sf)(\lambda/n)}{\lambda/n} = f\{n-s(n\pm 1)\} \qquad (1.3.33)$$

เครื่องหมายบวกเมื่อฮาร์โมนิคส์ m.m.f. ที่โรเตอร์เคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามกับความถี่มูลฐานโดยที่ฮาร์โมนิคส์สามารถเกิดจากการไม่สมดุลย์ทางไฟฟ้า คือ เมื่อขดลวดโรเตอร์ไม่สมดุลย์จะมีกระแสซีเควนซ์บวกและลบไหลทำให้สนามแม่เหล็กหมุนตามและหมุนทวนด้วยความเร็ว $\pm sf\lambda$ เทียบกับโรเตอร์และเท่ากับ $f\lambda(1-s)\pm sf\lambda$ เทียบกับสเตเตอร์ ความถี่ของสเตเตอร์ c.m.f. จะถูกเหนี่ยวนำด้วยความถี่สนาม f และ (1-2s)f โดยความถี่อันหลังนี้จะใช้ในการพิจารณาความถี่ฮาร์โมนิคส์ ผลของการกระทำระหว่างกระแสหลักมูลกับฮาร์โมนิคส์จะได้ความถี่ต่ำคือ 2sf ซึ่งมีกระทบต่อเครื่องวัดที่ต่อร่วมอยู่ด้วย อย่างกระแสฮาร์โมนิคส์จากมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบ wound-rotor และสาเหตุการเกิดดังแสดงในตารางที่ 2.6 ( มอเตอร์แบบหกขั้วหมุนด้วยความเร็ว 0.9pu. )

ตารางที่ 2.6 Typical harmonics current produced by a wound-rotor induction motor

| Frequency (Hz) | Current of fundamental | Cause |
|---|---|---|
| 20 | 3.0 | Pole unbalance |
| 40 | 4.0 | Rotor-phase unbalance |
| 50 | 100.0 | Fundamental mutual |
| 80 | 2.3 | Pole unbalance |
| 220 | 2.9 | Fifty and seventh harmonics |
| 320 | 3.0 | Mutuals |
| 490 | 0.3 | Fifty and 13th harmonics |
| 590 | 0.4 | Mutuals |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**กระแสฮาร์โมนิคส์ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ**

กระแสฮาร์โมนิคส์นี้ขึ้นกับเวลา และในมอเตอร์ที่ขับด้วยอินเวอร์เตอร์กำเนิดแรงดัน ขนาดของกระแสฮาร์โมนิคส์เป็นอัตราส่วนของขนาดแรงดันฮาร์โมนิคส์ต่อค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ที่ฮาร์โมนิคส์นั้น ๆ เนื่องจากรูปร่างสัญญาณจากอินเวอร์เตอร์นี้เป็นลักษณะ HALF WAVE SYMMETRY เราจึงสนใจเฉพาะฮาร์โมนิคส์คี่ ค่าอิมพีแดนซ์ขึ้นกับตัวแปรหลายตัวรวมทั้งความถี่ที่เกิดฮาร์โมนิคส์ การจัดวางขดลวดสเตเตอร์ ขดลวดถูกจัดวางใน PHASE BELT มีค่า COIL PITCH และจำนวนเฟสแน่นอนให้ q เป็นจำนวนของ PHASE BELT ต่อขั้ว ดังนั้นแต่ละ PHASE BELT ครอบคลุมมุมทางไฟฟ้า $\beta$, เรียก $\beta$ นี้ว่า PHASE BELT ANGLE $\beta = 180/q$ ให้จำนวนเฟสเป็น n สามารถทำให้ผลจากฮาร์โมนิคส์ของมอเตอร์ดีขึ้น ถ้าเลือกค่า q ให้ q=n

**เซตของฮาร์โมนิคส์**

ฮาร์โมนิคส์ทั้งหมดหมดสามารถแบ่งออกเป็นเซต โดยฮาร์โมนิคส์ที่อยู่ในเซตเดียวกันจะมีค่า LEAKAGE INDUCTANCE สำหรับมอเตอร์ 1 ค่า ที่ใช้สำหรับแต่ละเซต

$$h = qv(q-k) \quad \text{.....(1.3.34)}$$

เมื่อ h = ค่าลำดับของฮาร์โมนิคส์

q = จำนวน PHASE BELT

v = 1,3,5,7,.....

k = 1,3,5,.....(q-1) เมื่อ q เป็นจำนวนคู่

1,3,5,.....q เมื่อ q เป็นจำนวนคี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2.7** LIST OF HARMONIC SETS

| Number of phases | | phases belt | Seq. for | Harmonic in set k | Ind. for |
|---|---|---|---|---|---|
| n-q | n-2q | angle 8 | set k | | set k |
| 2 | 4 | 90* | 1 | 1,3,5,7,.....,2v ± 1 , ... | L(1) |
| 3 | 6 | 60* | 1 | 1,5,7,11.....,3v ± 2 , ... | L(1) |
| | | | 3* | 3,9.....,3v,..... | L(3) |
| 5 | 10 | 36* | 1 | 1,9,11,19,.....,3v ± 2 , ... | L(1) |
| | | | 3 | 3,7,13,17,.....,3v ± 2 , ... | L(3) |
| | | | 5* | 5,15,.....,5v , ... | L(5) |
| 6 | 12 | 30* | 1 | 1,11,17,35,.....,6v ± 5 , ... | L(1) |
| | | | 3* | 3,9,15,21,.....,6v ± 3 , ... | L(3) |
| | | | 5 | 5,7,17/19,.....,6v ± 1 , ... | L(5) |
| 9 | 18 | 20* | 1 | 1,17,19,35,.....,9v ± 8 , ... | L(1) |
| | | | 3* | 3,15,21,33,.....,9v ± 6 , ... | L(3) |
| | | | 5 | 5,13,23,31,.....,9v ± 4 , ... | L(5) |
| | | | 7 | 7,11,23,29,.....,9v ± 2 , ... | L(7) |
| | | | 9* | 9,27.....,9v, ... | L(9) |
| 12 | 24 | 15* | 1 | 1,23,25,.....,12v ± 11 , ... | L(1) |
| | | | 3* | 3,21,27,.....,12v ± 9 , ... | L(3) |
| | | | 5 | 5,19,29,.....,12v ± 5 , ... | L(5) |
| | | | 7 | 7,17,31,.....,12v ± 3 , ... | L(7) |
| | | | 9* | 9,15,33,.....,12v ± 3 , ... | L(6) |
| | | | 11 | 11,1335,.....,12v ± 1 , ... | L(11) |

* Currents of these sets can be eliminated by the connections alone.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 แสดงเซตของฮาร์โมนิคส์ พร้อมค่า LEAKAGE INDUCTANCE ของแต่ละเซต สำหรับจำนวนเฟสของมอเตอร์หลาย ๆ ค่า ค่า k เป็นฮาร์โมนิคส์เซต ฮาร์โมนิคส์เซต k สามารถหาได้โดยใช้สมการ (1.3.34) ค่าสเตเตอร์อินดัคแตนซ์สำหรับทุกฮาร์โมนิคส์ในเซต k แทนด้วย L(k) ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว $L(k)1 \neq L(j)$ ถ้า $k \neq j$

<u>ลักษณะของฮาร์โมนิคส์เซต</u>

ฮาร์โมนิคส์ที่ทั้งหมดสามารถแบ่งเป็นเซตที่แตกต่างกัน ซึ่งแต่ละเซตมีค่า LEAKAGE INDUCTANCE สำหรับขดลวดของมอเตอร์ของมันเอง เซต 1=(k-1) เป็นเซตที่กระแสเซตนี้สร้าง AIR GAP FLUX เพื่อให้กระแสโรเตอร์และแรงบิด เนื่องจากกระแสมูลฐานก็อยู่ในเซต 1 นี้ แรงบิดที่กระแสนี้จะสร้างเป็นแรงบิดใช้งานของมอเตอร์ ดังนั้นจึงไม่ควรเพิ่มค่า L(1) เพราะจะเป็นการลดกระแสมูลฐานและแรงบิดใช้งาน

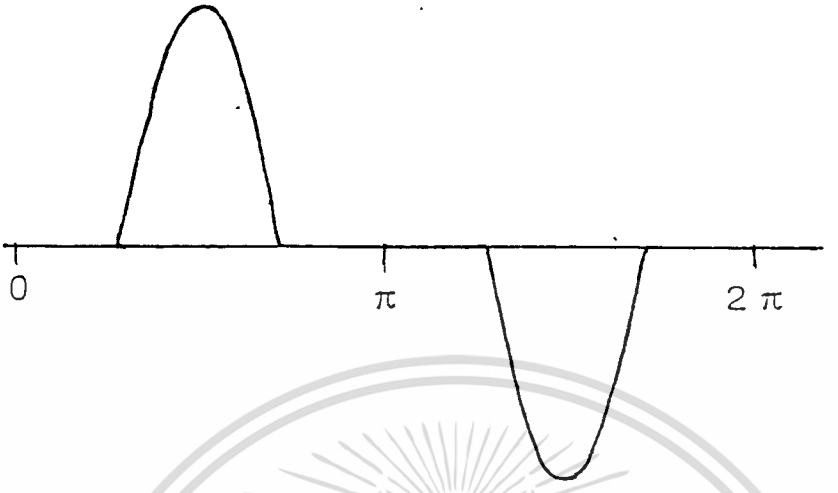
สำหรับเซต k>1 กระแสเซตนี้ไม่ได้สร้าง AIR GAP FLUX จึงไม่มีกระแสโรเตอร์สำหรับฮาร์โมนิคส์ ในเซตนี้ ค่าอิมพีแดนซ์สำหรับเซตนี้สามารถเพิ่มได้โดยติดขดลวดอนุกรมกับขดลวดสเตเตอร์ เพื่อเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์ให้กับขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งเป็นหลักการของวงจรกรองฮาร์โมนิคส์ ฮาร์โมนิคส์เซต k แทนค่าอินดัคแตนซ์ในแต่ละเฟสด้วย $L_s(k)$ วงจรกรองนี้จะถูกออกแบบให้มีค่า $L_s(1)$ น้อยมาก ๆ เพื่อให้การทำงานของมอเตอร์ที่เกิดกระแสมูลฐาน ไม่ลดลงโดยวงจรกรอง

สำหรับฮาร์โมนิคส์เซตที่มีเครื่องหมาย $\pm$ ในตารางที่ 9 สามารถกำจัดได้โดยการต่อขดลวดสเตเตอร์แบบเดลต้าหรือวายไม่ลงดินเช่น มอเตอร์ 3 เฟส ที่ต่อขดลวดสเตเตอร์แบบเดลต้าหรือแบบวายไม่ลงดิน จะมีกระแสฮาร์โมนิคส์เซต 3

<u>Switch Mode Power Supplies</u>

ในปัจจุบันอิเลคทรอนิคส์ส่วนมากมักจะใช้แหล่งจ่ายไฟแบบสวิทช์โหมด เพื่อจ่ายแรงดันให้อุปกรณ์ ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัด โดยไม่มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันทางทุติยภูมิของหม้อแปลงระบบไฟฟ้ามากนัก โดยต่อตัวเก็บประจุทางแรงดันที่จ่ายให้แก่วงจรอิเลคทรอนิคส์ ดังนั้นโหลดของตัวเก็บประจุที่มองทางด้านระบบของการไฟฟ้า กระแสที่จ่ายให้แหล่งจ่ายไฟจะไม่ต่อเนื่อง คือ กระแสจะไหลเพียงครึ่งวัฏจักร ( half cycle ) ดังรูป 2.28 และกระแสฮาร์โมนิคส์ที่คำนวณไว้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.28** Current Wave of Switch Mode Power Supply

**ตารางที่ 2.8 Spectrum of Typical Switch Mode Power Supplies**

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

**Three Phase Rectifier Front-End Converter**

**รูปที่** 2.29 **วงจรของคอนเวอร์เตอร์** **รูปที่** 2.30 **แสดงสัญญาณของกระแสอินพุทของ** Three Phase Rectifier Front-End Converter **สามารถหากระแสฮาร์โมนิคส์ได้ดังนี้**

$$V_{dc} = 1.35V_{ac.L.L}$$

$$I_{dc} = \frac{P}{V_{DC} \times \eta_{inverter} \times \eta_{load}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\% \overline{X_L} = \frac{X_L \times I_{DC}}{V_{PH}} \times 100\%$$

เมื่อ

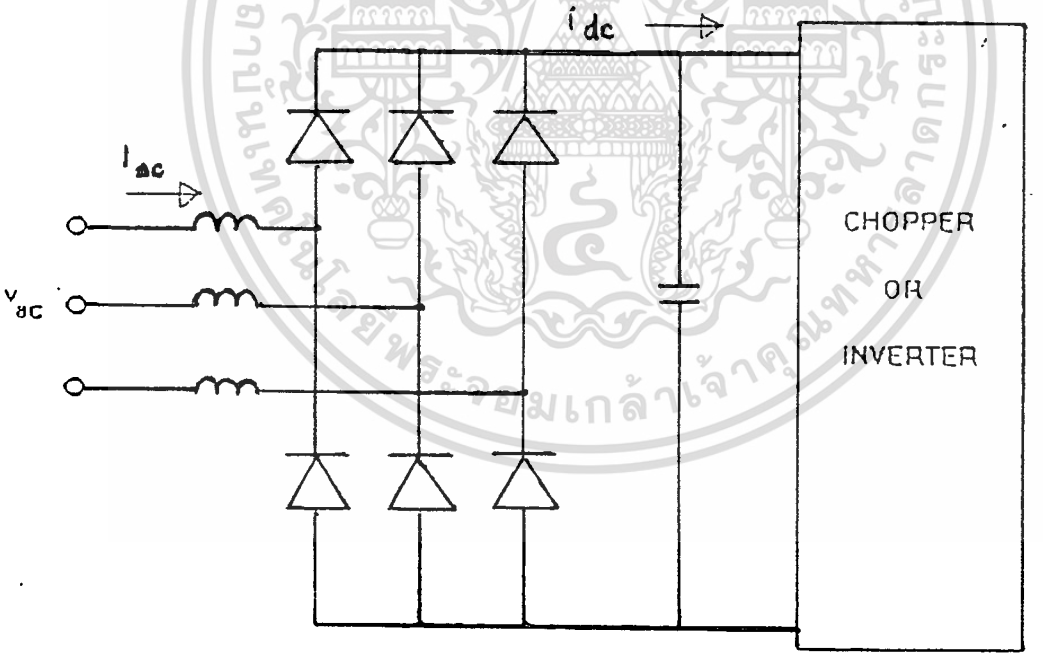
$V_{DC}$ คือแรงดันไฟตรงด้านเอาท์พุทของเรคติไฟเออร์ก่อนเข้าอินเวอร์เตอร์

$I_{DC}$ คือกระแสไฟตรงก่อนเข้าอินพุทของอินเวอร์เตอร์

$X_L$ คือค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟ ( รวมทั้งค่าอิมพีแดนซ์ของสายและหม้อแปลงด้วย )

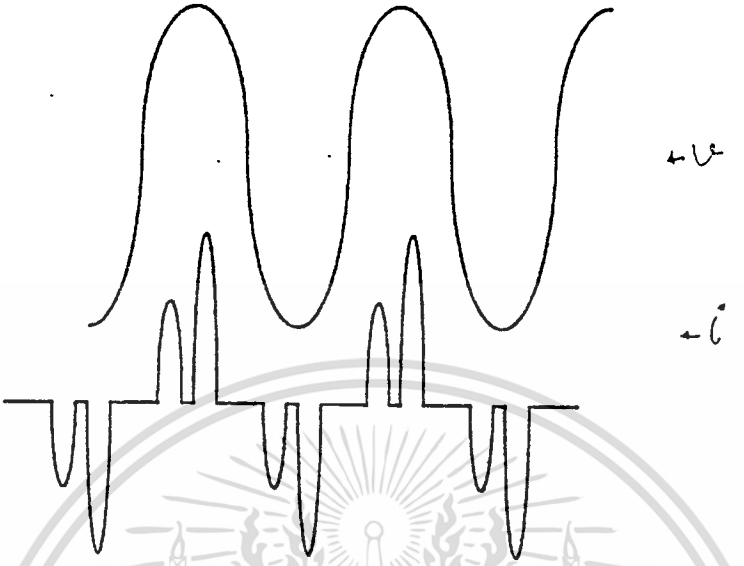
$V_{PH}$ คือแรงดันเฟสของแหล่งจ่ายไฟ

เมื่อหาค่า % $\overline{X_L}$ แล้วอ่านค่ากระแสฮาร์โมนิคส์จาก DATA WAN CURVE ก็จะได้กระแสฮาร์โมนิคส์อันดับต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.31 ตารางที่ 2.9 แสดงค่ากระแสฮาร์โมนิคส์โดยประมาณ

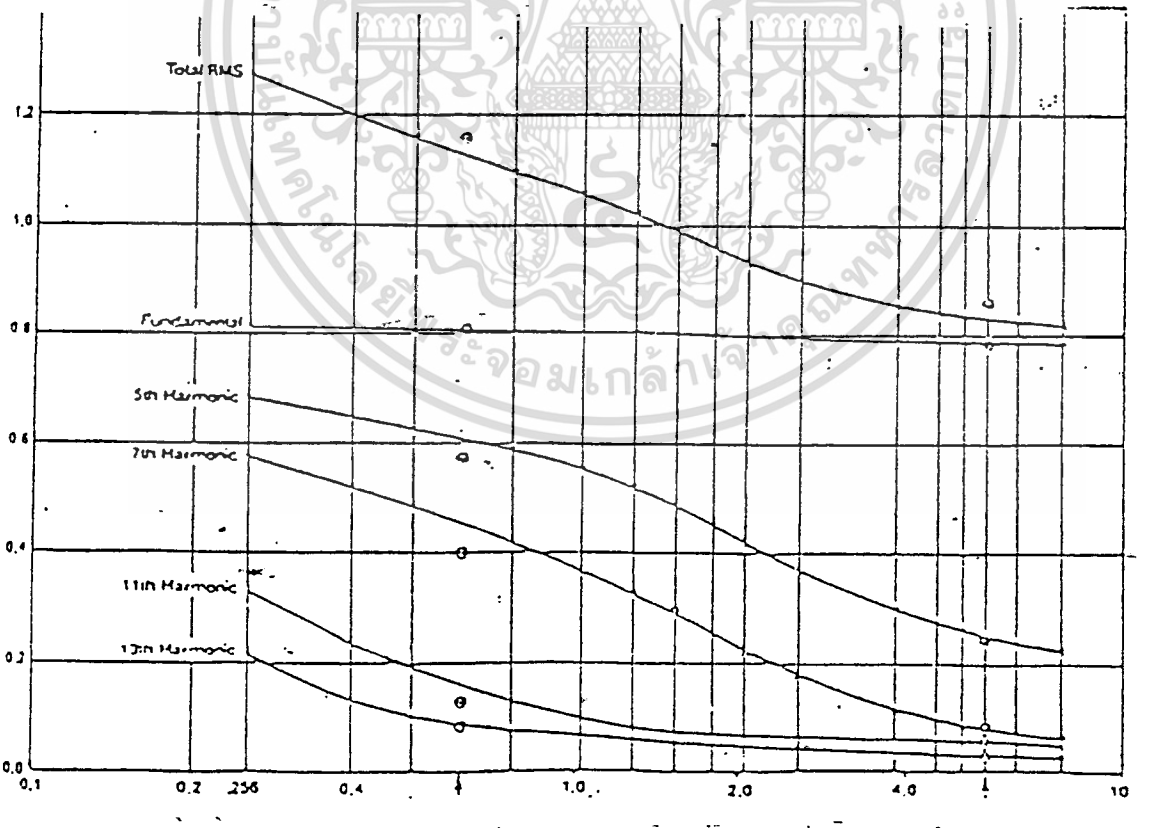



**รูปที่ 2.29 แสดงวงจรของ** Three Phase Rectifier Front-End

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 2.30 แสดงสัญญาณกระแสและแรงดันของ Three Phase Rectifier Front-End Converter

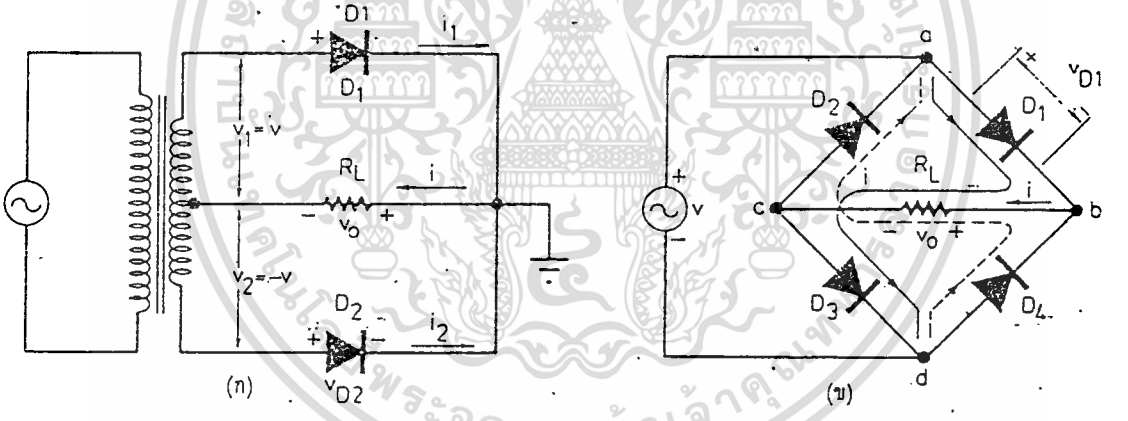



รูปที่ 2.31 DELTA-WAN CURVE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2.9 แสดงค่ากระแสฮาร์โมนิคส์โดยประมาณ**

| | AC POWER SOURCE | | |
|---|---|---|---|
| | SOFT | AVERAGE | STIFF |
| FUNDAMENTAL | 100 % | 100 % | 100 % |
| 5-TH HARMONIC | 29 | 76 | 85 |
| 7-TH | 8 | 56 | 71 |
| 11-TH | 6 | 20 | 40 |
| 13-TH | 3 | 10 | 26 |
| TOTAL อาร์เอ็มเอส | 105 % | 140 % | 157 % |




**รูปที่ 2.32 (ก) วงจรกระแสเต็มคลื่นเฟสเดี่ยวแบบสองพัลส์ พุช-พูล**

**(ข) วงจรกระแสเต็มคลื่นเฟสเดี่ยวแบบสะพาน สองพัลส์**

SOFT : $\%\overline{X}_L \geq 6\%$

AVERAGE : $0.6 < \%\overline{X}_L < 6\%$

STIFF :

$$\%\overline{X}_L = \frac{X_L \times I_{DC}}{V_{Ph}} \times 100\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X_L = \frac{\%Z \times V_{L-L}^2}{MVA \times 100} \ \Omega/\text{PHASE}$$

**Single - Phase Rectifier**

โหลดประเภทนี้คือ

- SMALL SINGLE - PHASE CHOPPERS
- PHASE - CONTROLLED RECTIFIERS

ถ้าใช้ไฟมากกว่า 20 % ( โหลดจำพวก COMPUTER , PRINTER , FAX MACHINES , PABX SYSTEM , ELECTRONIC BALLAST , อื่น ๆ ) ของโหลดทั้งหมด จะนำมาพิจารณาในการวางแผนออกแบบระบบไฟฟ้า เพราะว่ามันไม่ใช่แค่ก่อให้เกิดปัญหาฮาร์โมนิคส์เท่านั้น แต่ยังทำให้มีกระแสฮาร์โมนิคส์ไหลในสายนิวทรอลในระบบไฟฟ้า THREE PHASE FOUR WIRES อีกด้วยนอกจาก Single - Phase Rectifier ดังรูปที่ 2.32 และกระแสฮาร์โมนิคส์จาก Single - Phase Rectifier ดังแสดงในตารางที่ 2.10

**ตารางที่ 2.10 SIMPLE APPROXIMATION**

| | Phase-Current | Balance Three Phase Neutral Current |
|---|---|---|
| FUNDAMENTAL | 100 % | 0 % |
| 3-RD HARMONIC | 88 % | 263 % |
| 5-TH | 66 % | 0 % |
| 7-TH | 42 % | 0 % |
| 9-TH | 22 % | 65 % |
| 11-TH | 10 % | 0 % |
| 13-TH | 8 % | 0 % |
| 15-TH | 7 % | 22 % |
| TOTAL RMS | 157 % | 272 % |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ความไม่สมดุลย์ของเฟส ( Phase Unbalanced Source )**

ความไม่สมดุลย์ของเฟสที่เกิดขึ้นในระบบก็มีผลต่อระบบเช่นเดียวกับการเบี่ยงเบนจากไซน์และความไม่สมดุลย์ของเฟสอาจเกิดขึ้นเนื่องจากโหลดไม่สมดุลย์หรืออิมพีแดนซ์ของเฟสไม่สมดุลย์ หรือเนื่องจากมีโหลดแบบเฟสเดียวที่ไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อใช้วิธีการขององค์ประกอบสมมาตร ( Symmetrical Component ) เข้าวิเคราะห์ระบบที่มีความไม่สมดุลย์ของเฟส จะได้ลำดับของศักดาไฟฟ้าและหรือกระแสทั้งบวกและลบศูนย์

**กระแสกระตุ้น ( Exciting Current )**

กระแสกระตุ้นโดยปกติไม่ได้ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของคลื่น ( Wave Distortion ) ในระบบไฟฟ้า ทั้งนี้เพราะขนาดกระแสไม่สูงมาก เมื่อเทียบกับกระแสของระบบ แต่ปัญหาเกิดเนื่องจากศักดาไฟฟ้าของระบบสูงมากเกินไป ทำให้กระแสกระตุ้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ตามมาตรฐานหม้อแปลงที่ป้อนด้วยศักดาไฟฟ้า 110 % ของศักดาไฟฟ้าพิกัด ( Rated Voltage ) กระแสกระตุ้นไม่ทำให้เกิดความร้อนมากเกินไป ( Overheat ) เมื่อไม่มีโหลด และที่ศักดาไฟฟ้า 110 % ของศักดาไฟฟ้าความสูญเสีย เนื่องจากกระแสกระตุ้นมีค่าเท่ากับความสูญเสียในหม้อแปลงเมื่อจ่ายโหลดเต็มที่ที่ 130 % ของศักดาไฟฟ้าพิกัดกระแสกระตุ้นอาจมีขนาดใกล้เคียงกระแสโหลดเต็มที่ ซึ่งกระแสดังกล่าวประกอบด้วยฮาร์โมนิคส์ที่ 3 หรืออื่น ๆ ที่มากกว่า 50 % ของกระแสพิกัด ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของคลื่นได้.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.3 ผลกระทบเนื่องจากฮาร์โมนิคส์**

แรงดันและกระแสฮาร์โมนิคส์มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าดังนี้

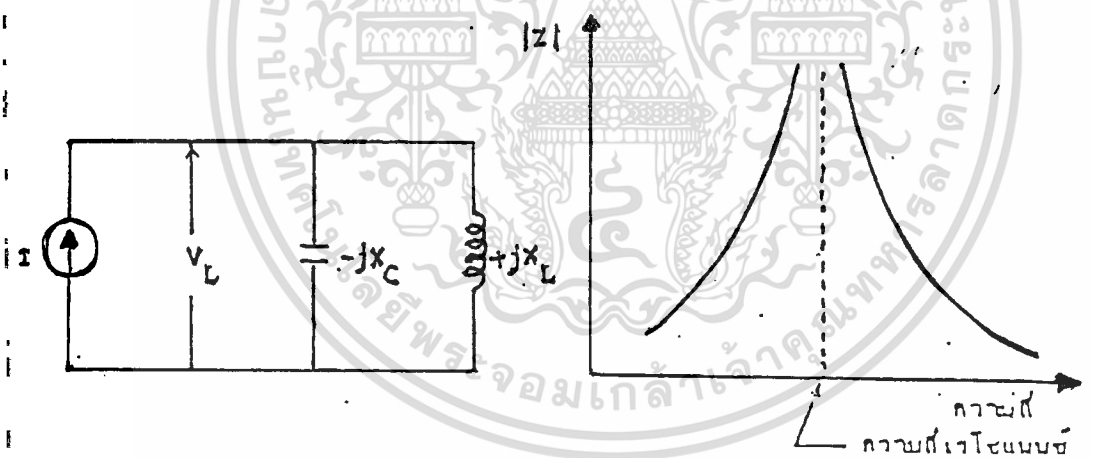
-ทำให้ค่ากระแสในสายนิวทรอลมีค่าสูงมาก ซึ่งอาจทำให้สายไม่สามารถทนกระแสหรือความร้อนได้และเป็นสาเหตุซึ่งนำมาของเพลิงไหม้

-ทำให้เกิดการขยายระดับฮาร์โมนิคส์ เนื่องจากผลของเรโซแนนซ์อนุกรมและขนาน

-ทำให้เกิดการผลิต (Generation) การส่ง (Transmission) และใช้ (Utilization) กำลังไฟฟ้ามีประสิทธิภาพลดลง

- ทำให้โรงจักรทำงานผิดพลาด (Plant Maloperation) ผลกระทบของฮาร์โมนิคส์ที่มีต่อระบบอื่น และอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังมีดังนี้

- หม้อแปลง
- เครื่องจักรไฟฟ้า
- ระบบสื่อสาร




รูปที่ 2.33 เรโซแนนซ์ขนาน

เรคติไฟเออร์ของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 2.35 เปรียบเสมือนเครื่องกำเนิดกระแสฮาร์โมนิคส์ไหลเข้าไปในระบบที่มีความเหนี่ยวนำไฟฟ้าในรูปที่ 2.35 (a) แสดงความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของหม้อแปลงและอุปกรณ์ต้นทางต่อขนาดกับตัวเก็บประจุ และอาจเกิดฮาร์โมนิคส์เรโซแนนซ์ที่ความถี่ฮาร์โมนิคส์หนึ่งส่วนในรูปที่ 2.35 (b) เรคติไฟเออร์จ่ายกระแสฮาร์โมนิคส์ไหลผ่านเข้าไปในวงจร ที่มีความนำไฟฟ้าของหม้อแปลงแรงดันต่ำ อนุกรมกับตัวเก็บประจุที่คร่อมมอเตอร์ และอาจเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ฮาร์โมนิคส์ใดฮาร์โมนิคส์หนึ่งได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในระบบ อาจหาได้จากสมการ

$$Fr = (1/2\pi)*(1/LC)^{1/2} \quad (2.1)$$

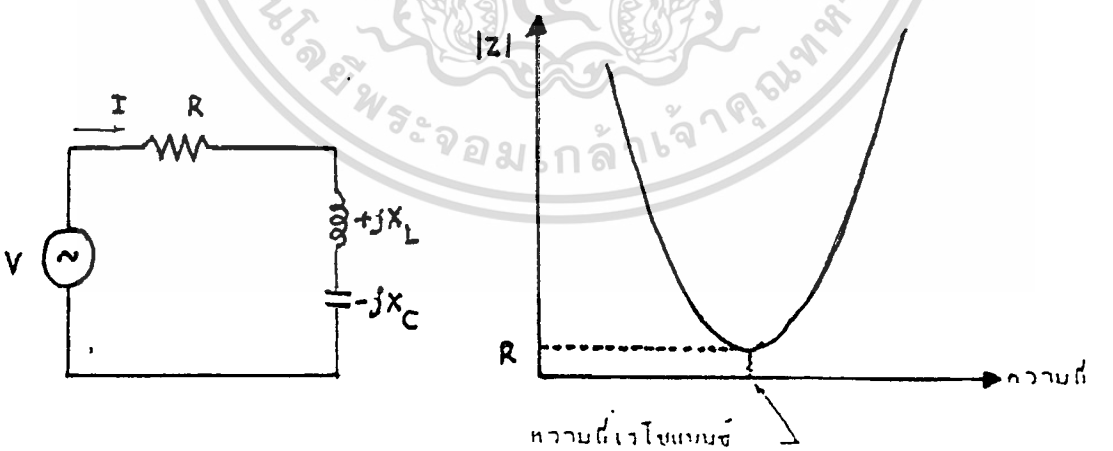
$$= f*(1/2\pi fL)^{1/2}*(1/2\pi fC)^{1/2} \quad (2.2)$$

$$= f*(X_C/X_L)^{1/2} \quad (2.3)$$

ถ้า $V_L$ มีค่าสูงมาก เกิดกระแสไฟในความเหนี่ยวนำและความจุสูง ถึงแม้ว่ากระแสของวงจร 1 จะมีค่าไม่มาก

การทำงานโดยปกติของเรคติไฟเออร์โดยทั่วไปนั้น พารามิเตอร์จำพวกความต้านทาน ความจุไฟฟ้า ความเหนี่ยวนำ ไม่สามารถนำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ใดๆ ได้ เนื่องจากความจุไฟฟ้าของหม้อแปลงเคเบิลและสายมีขนาดต่ำมาก ซึ่งทำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่สูง มากในย่านกิโลเฮิร์ตซ์ kHz) ซึ่งความถี่ในย่านนี้ขนาดของกระแสหรือศักดาไฟฟ้าฮาร์โมนิคส์ มีขนาดต่ำจนไม่เป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ ปัญหาของฮาร์โมนิคส์เรโซแนนซ์ที่มีผลต่อระบบไฟฟ้าจริงจังก็คือ ที่ความถี่เรโซแนนซ์ต่ำใกล้ความถี่ทำงาน (50-60 Hz) คืออยู่ในช่วงเป็นสิบหรือเป็นร้อยเฮิร์ตซ์

ประเภทที่กำเนิดฮาร์โมนิคส์ดังกล่าวข้างต้น เพื่อแก้ตัวประกอบกำลัง เมื่อเกิดฮาร์โมนิคส์เรโซแนนซ์ขึ้นในกรณีนี้ทำให้ฟิวส์ของตัวเก็บประจุขาดบ่อย หรือตัวเก็บประจุเองอาจเสียหาย และใช้งานไม่ได้อีก เนื่องจากมีกระแสฮาร์โมนิคส์สูงมากที่ความถี่เรโซแนนซ์ไหลผ่านระบบมีการแกว่ง (Oscillate) ของศักดาไฟฟ้า




รูปที่ 2.34 เรโซแนนซ์อนุกรม

**ผลกระทบจากฮาร์โมนิคส์เรโซแนนซ์**

ผลเสียที่เกิดขึ้น เนื่องจากฮาร์โมนิคส์ แยกพิจารณาออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก. ฮาร์โมนิคส์ที่เกิดขึ้นในระบบ ทำให้เกิดผลเสียหายกับอุปกรณ์และประสิทธิภาพของระบบต่ำลง ซึ่งผลเสียหายดังกล่าวมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดและความถี่ฮาร์โมนิคส์ที่เกิดขึ้น แต่ความเสียหายดังกล่าวอาจไม่รุนแรงเสมือนในประเภทสอง

ข. ฮาร์โมนิคส์ที่เกิดขึ้นในระบบมีความถี่เรโซแนนซ์ของระบบ ในกรณีนี้จะเกิดศักดาไฟฟ้า หรือกระแสสูงมากเกินกว่าที่อุปกรณ์ในระบบจะทนได้ ทำให้เกิดผลเสียหายกับอุปกรณ์ภายในระบบ หรือทำให้ระบบป้องกันเปิดวงจรออก และระบบอุตสาหกรรมต้องหยุดชะงักการผลิต เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในระบบมักเกิดขึ้นกับระบบที่มีการใช้ตัวเก็บประจุ ในการแก้ไขตัวประกอบกำลัง เพราะพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ โดยทั่วไปมักเป็นความเหนี่ยวนำเสียส่วนใหญ่ ดังนั้นเรโซแนนซ์จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีความจุไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้อง

ในระบบไฟฟ้าทั่วไปประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ คือ ความต้านทานความเหนี่ยวนำ และความจุ ถ้าหากความเหนี่ยวนำและความจุไม่ว่าจะต่อขนานกันหรืออนุกรม มีค่ารีแอคแตนซ์เท่ากัน ที่ความถี่ใด ก็คือเกิดเรโซแนนซ์นั่นเอง เรโซแนนซ์ในระบบมี 2 แบบคือ

1. เรโซแนนซ์อนุกรม
2. เรโซแนนซ์ขนาน

วงจรเรโซแนนซ์อนุกรมและขนานได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.34 และ 2.33 พิจารณารูปที่ 2.34 ซึ่งเป็นวงจรที่ประกอบด้วยความเหนี่ยวนำและความจุไฟฟ้าอนุกรมกับความต้านทานของวงจรเปลี่ยนแปลงตามความถี่ และมีค่าต่ำสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ ศักดาไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย ทำให้กระแสในวงจรมีค่าสูงมาก เนื่องจากอิมพีแดนซ์ R มีค่าน้อย

เรโซแนนซ์ขนาน มีลักษณะคล้ายคลึงกับเรโซแนนซ์อนุกรม นั่นคือ เกิดเรโซแนนซ์เมื่อรีแอคเตอร์ของความเหนี่ยวนำกับความจุไฟฟ้ามีขนาดเท่ากัน พิจารณารูปที่ 2.33 ซึ่งเป็นเรโซแนนซ์ขนาน ( $|X_L| = |X_c|$ ) อิมพีแดนซ์รวมมีค่าสูงมาก กระแสเพียงเล็กน้อยทำให้เกิดศักดาไฟฟ้า

$$= \quad f_1 \quad . \quad \sqrt{\frac{MVA_{sc}}{MVA_c}} \qquad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$f_r$ = ความถี่เรโซแนนซ์ (เฮิร์ตซ์ )

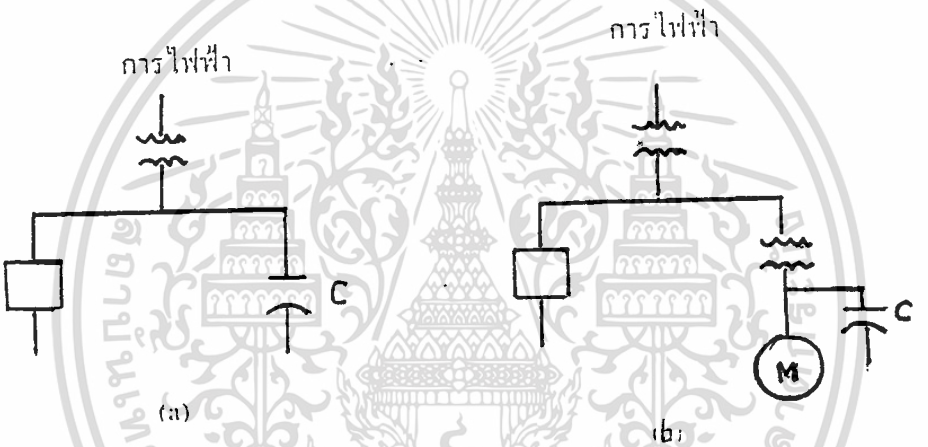
L = ความเหนี่ยวนำของวงจร (เฮนรี่)

C = ความจุไฟฟ้าของวงจร (ฟารัด)

$f_1$ = ความถี่ทำงาน (50 หรือ 60 เฮิร์ตซ์ )

$MVA_{sc}$ = ขนาด MVA ลัดวงจร

$MVA_C$ = ขนาด MVA ของตัวเก็บประจุ




รูปที่ 2.35 (a) เรโซแนนซ์ขนาน

(b) เรโซแนนซ์อนุกรม

**ผลกระทบของฮาร์โมนิคส์ต่อระบบสายส่ง**

เมื่อมีกระแสฮาร์โมนิคส์ไหลในระบบสายส่งทำให้เกิดผลเสียหลัก 2 ประการคือ

1. ทำให้กำลังสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้น โดยเป็นผลมาจากค่า อาร์เอ็มเอส ของรูปคลื่นกระแสตามสมการ

$$PL = \sum I_N^2 R_N \qquad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย PL = กำลังสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้น

$I_n$ = กระแสฮาร์โมนิคส์ ลำดับที่ n (ค่าอาร์เอ็มเอส)

$R_n$ = ความต้านทานระบบที่ความถี่ฮาร์โมนิคส์

2. ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์วงจร (Circuit Impedance) โดยเป็นผลของกระแสฮาร์โมนิคส์ที่ไหลในวงจร กรณีระบบไม่มั่นคง (Weak System) คือ ระบบมีอิมพีแดนซ์สูง และมีระดับฟอลต์ต่ำ (Low Fault Level) ทำให้เกิดแรงดันตกมาก เป็นผลให้เกิดการเพี้ยนของแรงดันซึ่งผิดกับระบบมั่นคง (Stiff System) ที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำและมีระดับฟอลต์สูง แรงดันตกคร่อมนี้มีผลต่อเคเบิลทำให้เกิดความเครียดไดอิเลคตริก (Dielectric Stress) สูงกว่าปกติ เป็นผลให้อายุการใช้งานเคเบิลสั้นลง และทำให้เกิดฟอลต์ง่ายขึ้น

**<u>ผลกระทบของฮาร์โมนิคส์ต่อหม้อแปลง มี 3 ประการ ดังนี้</u>**

1.กระแสฮาร์โมนิคส์ ทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและกำลังสูญเสียสเตรย์ฟลักซ์ (Stray Flux Loss) มีค่าเพิ่มขึ้น

2.แรงดันฮาร์โมนิคส์ ทำให้กำลังสูญเสียกระแสวน (Eddy Curent Loss) และกำลังสูญเสียฮิสเตอริซิส (Hysterisis Loss) เพิ่มขึ้น โดยถ้าแหล่งจ่าย จ่ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้หม้อแปลงกำลังสูญเสียแกนเหล็กของหม้อแปลงจะเป็นไปตามสมการ

$$P_{CORE} = (K_1 f + K_E f^2)V^2 \qquad (2.6)$$

โดยที่ $P_{CORE}$ = กำลังสูญเสียแกนเหล็ก

$K_1 f$ = กำลังสูญเสียฮิสเตอริซิส

$K_E f^2$ = กำลังสูญเสียกระแสวนในแกนเหล็ก

$V^2$ = แรงดันรูปคลื่นไซน์ของแหล่งจ่าย

3. ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ (ที่ความถี่ฮาร์โมนิคส์) ระหว่างขดลวดหม้อแปลงกับตัวเก็บประจุของสาย (Line Capacitor) จะเห็นว่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงเกิดจากกระแสและแรงดันฮาร์โมนิคส์ ซึ่งขึ้นกับความถี่ โดยกำลังสูญเสียจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่ม ดังนั้น ที่ฮาร์โมนิคส์สูง ๆ จะทำให้เกิดความร้อนแก่หม้อแปลง มากกว่าที่ฮาร์โมนิคส์ต่ำ ๆ อย่างไรก็ตาม ผลกระทบของฮาร์โมนิคส์ต่อหม้อแปลงยังไม่มีมาตรฐานกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ผลกระทบของฮาร์โมนิคส์ต่อเครื่องจักรไฟฟ้า**

ผลกระทบของฮาร์โมนิคส์ต่อเครื่องจักรไฟฟ้า ทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและไม่มีโหลดเพิ่มขึ้น เป็นผลให้เครื่องจักรร้อนกว่าปกติ นอกจากนี้ฮาร์โมนิคส์ยังมีผลต่อประสิทธิภาพและแรงบิดของเครื่องจักรด้วย

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีแหล่งจ่ายไม่เป็นรูปคลื่นไซนูซอยด์ (Nonsinusoidal Supply) จะสร้างคลื่นความหนาแน่นฟลักซ์ (Flux Density Wave) ออกมาทำให้เกิดสัญญาณรบกวนอย่างมาก (Higher Noise Emission) เมื่อเทียบกับกรณีมีแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซนูซอยด์ (Sinusoidal Supply) ฮาร์โมนิคส์จะทำให้เกิดฟลักซ์ผลลัพธ์ (Resultant Flux) กระจายในช่องอากาศ (Air Gap) ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า คอกกิง (Cogging) คือ การไม่สามารถเดินเครื่องมอเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส

**ผลกระทบของฮาร์โมนิคส์ต่อสวิทช์เกียร์**

กระแสฮาร์โมนิคส์จะเพิ่มความร้อนและกำลังสูญเสียให้แก่สวิทช์เกียร์ ส่วนประกอบฮาร์โมนิคส์ (Harmonics Components) ในรูปคลื่นกระแสมีผลกระทบต่อความสามารถในการตัดกระแส (Current Interruption Capability) ของสวิทช์เกียร์เป็นผลให้การทำการตัด (making Interruption) ยากขึ้น

สวิทช์ตัดตอนจะไม่สามารถตัดกระแสเมื่อมีฮาร์โมนิคส์ ทั้งนี้เนื่องจากขดลวดเป่าดับอาร์ค (Blowout Coils) ทำงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพเป็นผลให้อาร์คไม่ขาดทำให้สวิทช์ตัดตอนไม่สามารถตัดกระแสได้ ปัญหานี้จะเกิดกับอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ตัดกระแส เช่น โหลดเบรคสวิทช์ (Load Break Switch),ตัวปิด-เปิดวงจร (Circuit Switcher) เป็นต้น แต่สวิทช์ตัดตอนสูญญากาศ (vacuum Circuit Breaker) จะมีความไวน้อยต่อกระแสฮาร์โมนิคส์

ปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานทางอุตสาหกรรมในการกำหนดระดับฮาร์โมนิคส์ที่สวิทช์เกียร์สามารถตัดได้ เนื่องจากการทดสอบการตัดวงจรจะทำที่ความถี่พิกัดของแหล่งจ่ายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ผลกระทบของฮาร์โมนิคส์ต่อคาปาซิเตอร์แบงค์**

ผลกระทบของฮาร์โมนิคส์ทำให้เกิดความร้อน และความเครียดไดอิเลคตริก (Dielectric Stress) กับตัวเก็บประจุอย่างมาก การเพิ่มขนของแรงดันทำให้เกิดกำลังสูญเสียในตัวเก็บประจุเป็นไปตามสมการ

$$PL = \sum_{n=1}^{\infty} C(\tan)W_n V_n \qquad (2.7)$$

โดยที่ PL = กำลังสูญเสียในตัวเก็บประจุ

$\tan = \frac{R}{(1/WC)}$

= ตัวประกอบการสูญเสีย (Loss Factor)

$W_n = 2\pi f_n$

$V_n$ = แรงดันอาร์เอ็มเอสฮาร์โมนิคส์ ลำดับ n

กรณีที่มีฮาร์โมนิคส์ การหากำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟรวมของตัวเก็บประจุ ต้องคิดที่ความถี่มูลฐานและที่ความถี่ฮาร์โมนิคส์ ดังสมการ

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \qquad (2.8)$$

ค่ากำลังไฟฟ้ารวมนี้ ต้องไม่เกินค่ากำลังไฟฟ้าพิกัดของตัวเก็บประจุ มิฉะนั้น จะทำให้ตัวเก็บประจุเสียหาย ตามมาตรฐานนานาชาติ IEC 70 - 1967 Power Capacitor และ 70 A - 1968 Self - Heating Metallised - Paper Power Capacitor กำหนดไว้ว่าตัวเก็บประจุต้องสามารถทำงานในสภาวะโหลดเกิน (Overload) ได้ดังนี้

- กระแส (A)ได้ถึง 130 %
- กรแส (V) ได้ถึง 110 %
- กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ (KVAR)ได้ถึง 135 %

**ผลกระทบของฮาร์โมนิคส์ต่อฟิวส์**

การฟิวส์ขาด อาจเป็นสาเหตุหนึ่งของการมีฮาร์โมนิคส์ในระบบ ทั้งนี้เนื่องจากกระแสฮาร์โมนิคส์ ทำให้เกิดความร้อนอย่างมากในตัวฟิวส์ ทำให้ลักษณะเวลา - กระแส (Time-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Current Characteristic) ของฟิวส์เปลี่ยนไปอย่างจากกรณีที่มีฟอลต์ระดับต่ำ (Low Magnitude Fault) เกิดขึ้น และฮาร์โมนิคส์ทำให้เวลาในการหลอมละลายของฟิวส์ลดลง

**ผลกระทบของฮาร์โมนิคส์ต่อรีเลย์**

ฮาร์โมนิคส์จะทำให้การทำงานของรีเลย์ผิดพลาด การทำงานของรีเลย์ขึ้นอยู่กับแรงดันยอดคลื่น (Crest Voltage) หรือกระแสหรือแรงดันที่จุดศูนย์กลาง การที่มีกระแสฮาร์โมนิคส์อันดับสามมากเกินไปทำให้กราวด์รีเลย์ (Ground Relay) ทริปผิดพลาด (False Trip)

**ผลกระทบของฮาร์โมนิคส์ต่อรีเลย์ สามารถสรุปได้ดังนี้**

-ฮาร์โมนิคส์ทำให้รีเลย์ มีแนวโน้มที่จะทำงานช้าลง หรือทำงานด้วยค่าเริ่ม (Pickup Values) ที่สูง แทนที่จะทำงานอย่างรวดเร็ว หรือทำงานด้วยค่าเริ่มต่ำ ๆ

-ฮาร์โมนิคส์ทำให้รีเลย์สถิตย์แบบความถี่ต่ำ (Static Underfrequency Relay) มีความไว (Sensitivity) กว่าปกติ ทำให้เกิดการทริปผิดพลาด

- ฮาร์โมนิคส์ทำให้รีเลย์ กระแสและแรงดันเกิน (Overrcurrent and OverVoltage Relay) เปลี่ยนลักษณะการทำงาน (Operrating characteristic)

- ฮาร์โมนิคส์ทำให้อิมพีแดนซ์รีเลย์ชนิดคานสมดุล (Balance Beam Impedance Relay) วัดระยะที่เกิดฟอลต์ผิดพลาดมาก (Overreach) หรือน้อยเกินไป (Underreach)

**ผลกระทบของฮาร์โมนิคส์ต่ออุปกรณ์อิเลคทรอนิคส์**

ในโรงงานอุตสาหกรรมใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมกระบวนการผลิตและเครื่องมือวัด โดยใช้อุปกรณ์พวกดิจิตอลอิเลคทรอนิคส์ จึงได้ให้ความสนใจในเรื่องคุณภาพของการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์เหล่านี้ ไฟฟ้าที่จ่ายให้โดยทั่วไปมี 115 หรือ 230 V ซึ่งปัจจุบันแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิคส์ทำให้แรงดันไฟฟ้าถูกรบกวน จึงต้องมีการควบคุมดังนี้

ที่ฮาร์โมนิคส์ความถี่ต่ำ ไม่เกิน 10 % ของผลรวมตั้งแต่ฮาร์โมนิคส์ที่ 2 - ที่ 5

ที่ฮาร์โมนิคส์ความถี่สูง ไม่เกิน 2 % ของ ผลรวมตั้งแต่ฮาร์โมนิคส์ที่ 6 - ที่ 30

สำหรับงานที่ต้องการพิถีพิถันจะพิจารณาฮาร์โมนิคส์ที่อันดับสูงกว่าที่ 5 ขึ้นไป

อุปกรณ์ทางด้านแรงต่ำ ซึ่งมีความต้องการกำลังไฟฟ้าต่ำ การแก้ปัญหาให้มีประสิทธิภาพและประหยัดในการส่งกำลังให้อุปกรณ์ แบ่งชนิดอุปกรณ์ในการปรับปรุงกำลังส่งให้แก่อุปกรณ์ออกเป็น 3 ชนิดคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หม้อแปลงที่แยกการรบกวนออกไป (noise isolation transformer)

- ตัวรักษาระดับแรงดัน (Voltage stabilizer)

- ไลน์คอนดิชันเนอร์ (line conditioner)

หม้อแปลงที่แยกการรบกวนออกจากระบบจะใช้ตั้งแต่ 9 - 500 KVA ในระบบ 3 เฟส และ 1/2 - 25 KVA ในระบบ 1 เฟส ขนาดแรงดันจาก 480 V ลงมา แต่การกำจัดฮาร์โมนิคส์ไม่มีประสิทธิภาพ ตัวรักษาระดับแรงดันจะใช้กับระบบ 1 เฟส 120/240 V จาก 1/4 - 15 KVA เอาท์พุท จะอยู่ระหว่าง ±1% ของแรงดันเอาท์พุทสำหรับแรงดันอินพุทที่อยู่ระหว่าง ± 15% มันเป็นตัวกำจัดฮาร์โมนิคส์ที่ดีโดยมี VDF = 3% ขณะใช้โหลดเต็มพิกัด และ 5 % ขณะไร้โหลด แต่ไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสัญญาณรบกวนความถี่สูง

ไลน์คอนดิชันเนอร์พิกัด $\leq$ 15 KVA ระบบ 1 เฟส แรงดันเอาท์พุท 120/240 V สามารถกำจัดได้ทั้งฮาร์โมนิคส์และสัญญาณรบกวนความถี่สูง

<u>ผลกระทบของฮาร์โมนิคส์ต่อเครื่องจักรกลชนิดหมุน</u>

ผลกระทบของฮาร์โมนิคส์ต่อเครื่องจักรกลหมุนมีการคำนวณที่ซับซ้อนมากกว่าอุปกรณ์ที่ไม่มีส่วนเคลื่อนที่ เพราะว่าฮาร์โมนิคส์จะมีอยู่ทั้งในตัวหมุน (Rotor) และตัวอยู่กับที่ (stator) ซึ่งมีความแตกต่างกันในการออกแบบโครงสร้างและผลตอบสนองของอุณหภูมิต่อความร้อนจากฮาร์โมนิคส์ของตัวหมุนและตัวอยู่กับที่ทำให้ไม่สามารถกำหนดผลของฮาร์โมนิคส์ได้แน่นอน อย่างไรก็ตามเมื่อมีกระแสฮาร์โมนิคส์ไหลเข้าสู่เครื่องจักรกลหมุนจะทำให้กระแสบนโรเตอร์และสเตเตอร์เป็นดังตารางที่ 2.11 กระแสฮาร์โมนิคส์ที่ไหลในสเตเตอร์สามารถแทนด้วยลำดับบวกและลบ เช่นกระแสฮาร์โมนิคส์ลำดับที่ 5 สามารถแทนด้วยลำดับลบทำให้เกิดการหมุนของโรเตอร์ในทิศทางด้านกับทิศทางที่โรเตอร์หมุนอยู่เดิม ดังนั้นกระแสฮาร์โมนิคส์ที่เหนี่ยวนำบนโรเตอร์ที่ความถี่ซึ่งเท่ากับความถี่สัมพันธ์ระหว่างโรเตอร์จะมีสเตเตอร์จะมีค่าเท่ากับ 5 + 1 เท่ากับลำดับที่ 6 ในขณะเดียวกันกระแสฮาร์โมนิคส์ลำดับที่ 7 จะทนด้วยลำดับบวก ซึ่งโดยหลักการเดียวกันจะเหนี่ยวนำกระแสฮาร์โมนิคส์บนโรเตอร์มีความถี่ลำดับที่ 6 เช่นกัน ดังนั้นกระแสฮาร์โมนิคส์จะเกิดเป็นคู่ ๆ ซึ่งจะเพิ่มความร้อนแก่โรเตอร์มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.11 ผลของฮาร์โมนิคส์จากคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ บนเครื่องจักรกลหมุน

| Harmonic Order (h) | Frequency (Hz) | Sequence Network | Stator Harmonic | Harmonic Rotation | Rotor Harmonic |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 60 | + | 1 | forward | |
| 5 | 300 | - | 5 | backward | 6 |
| 7 | 420 | + | 7 | forward | 6 |
| 11 | 660 | - | 11 | backward | 12 |
| 13 | 780 | + | 15 | forward | 12 |
| 17 | 1020 | - | 17 | backward | 18 |
| 19 | 1140 | + | 19 | forward | 18 |
| 23 | 1380 | - | 23 | backward | 24 |
| 25 | 1500 | + | 25 | forward | 24 |

โดยทั่วไปผลของฮาร์โมนิคส์ที่สำคัญที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ คือ

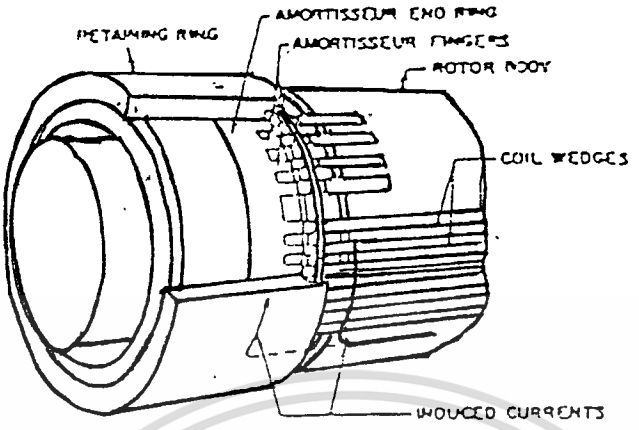
1. ความร้อนที่เกิดขึ้น

2.แรงบิดไม่เรียบ (Pulsating Torque) โดยเฉพาะในกรณีที่ขณะนั้นแรงบิดที่เกิดขึ้นเป็นแรงบิดวิกฤต (Critical Torque) ผลของฮาร์โมนิคส์จะมีอย่างมาก ผลของฮาร์โมนิคส์บนสเตเตอร์ที่สำคัญคือ ความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งจากกระแสมูลฐานและกระแสฮาร์โมนิคส์ และผลของ Skin Effect

<u>เครื่องกำเนิดแบบโรเตอร์กรงกระรอก</u>

สำหรับผลของฮาร์โมนิคส์ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีอย่างมาก ในกรณีเครื่องกำเนิดแบบโรเตอร์กรงกระรอก (Cylindrical Rotor Generator) โดยเฉพาะขนาดที่ใช้ในระบบอุตสาหกรรม ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเครื่องกำเนิดของการไฟฟ้า ทั้งนี้เพราะเครื่องกำเนิดขนาดนี้ไม่มีขดลวดอาร์มาเจอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวนำซึ่งมีอิมพีแดนซ์ต่ำสำหรับให้กระแสฮาร์โมนิคส์ไหลแทนที่จะไหลไปหาขดลวด กระแสฮาร์โมนิคส์จะไหลในลิ่มที่ใส่ในสล็อต (Slot Widge) โดยทั่วไปทำจากอลูมินั่ม และ/หรือเหล็กแสตนเลส กระแสฮาร์โมนิคส์จะไหลเหมือนกับการทำงานของมอเตอร์อินดักชั่นแบบกรงกระรอก ดังรูปที่ 2.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 2.36 ด้านท้าย (end section) เครื่องกำเนิดแบบโรเตอร์กรงกระรอก

ถ้าเครื่องกำเนิดไม่มีผลของฮาร์โมนิคส์เข้ามาเกี่ยวข้อง การออกแบบโรเตอร์จะพิจารณาเฉพาะกระแสในลำดับลบเท่านั้น ในกรณีของโหลดไม่สมดุลหรือฟอลต์ไม่สมดุล ดังนั้นลิ่มจึงต้องมีความต้านทานต่ำ เพื่อให้เป็นทางผ่านของกระแสฮาร์โมนิคส์ ผลจากฮาร์โมนิคส์โดยตรงต่อเครื่องกำเนิด คือ ความร้อนที่โรเตอร์และมันอาจมีผลต่อแรงบิดที่ไม่ราบเรียบจากฮาร์โมนิคส์ที่ 6 ที่ 12 ในโรเตอร์ก็กลายเป็นการเพิ่มปัญหามากขึ้นอีก

**ผลกระทบของฮาร์โมนิคส์ต่อเครื่องวัดทางไฟฟ้า**

พิจารณากรณีที่แรงดันและกระแสมีฮาร์โมนิคส์ทั้งคู่ และสมการของรูปคลื่นแรงดันและกระแสแสดงได้ดังนี้

$$v = \sum V_n \sin(nwt + \theta_n) \qquad (2.9)$$

$$I = \sum I_n \sin(nwt + \theta_n) \qquad (2.10)$$

โดย

$V_n$ ขนาดของแรงดันฮาร์โมนิคส์

$I_n$ ขนาดของกระแสฮาร์โมนิคส์

n อันดับที่ของฮาร์โมนิคส์

$\theta_n$ มุมเฟสของฮาร์โมนิคส์

กำลังไฟฟ้าจริงคือ

$$\frac{1}{T}\int_0^T vidt = \frac{w^{2\pi}}{2\pi}\int_0 e(wt)i(wt)dt \qquad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก

$$\int_0^{2\pi} \sin(mt)\sin(nt)dt = 0; m \neq n$$

$$\int_0^{2\pi} \sin(mt)\cos(nt)dt = 0 \text{ สำหรับทุกค่าของ m และ n}$$

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจริงเมื่อรวมผลของฮาร์โมนิคส์คือ

$$p = (\frac{w}{2\pi})\int_0^{2\pi} (E_1 \sin wt)\sum I_n \sin(nwt + \theta_n)dt \qquad (2.12)$$

ทุกเทอมที่มีฮาร์โมนิคส์มีค่าเท่ากับศูนย์

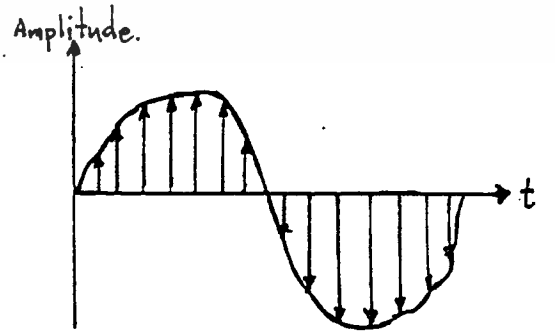
$$P = (\frac{w}{2\pi})\int_0^{2\pi} (E_1 \sin wt)I_1(\sin wt\cos\theta_1 + \cos wt\sin\theta_1)dt$$

แต่

$$\int_0^{2\pi} I_1(\sin wt\cos wt\sin\theta_1)dt = 0$$

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านไมโครโปรเซสเซอร์ และการเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลทำได้เร็ว จึงมีการวัดแรงดันและกระแสหลายครั้งในแต่ละรอบโดยการสุ่มจากรูปคลื่นที่ไม่เป็นสัญญาณไซน์ ดังรูปที่ 2.37 แต่ความถี่ของการสุ่มต้องมีค่ามากกว่า 2 เท่าของความถี่สัญญาณอินพุท

เทคนิคในการหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงนั้นหาจากคูณแรงดัน (rms) และกระแสกับค่าโดโซน์ของมุมที่ตัดศูนย์ระหว่างแรงดัน และกระแสซึ่งอาจผิดพลาดได้ มักจะมีค่าถูกต้องไม่มีฮาร์โมนิคส์อยู่ในระบบ




รูปที่ 2.37 การสุ่มจากรูปคลื่นที่ไม่เป็นสัญญาณไซน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการวัดโดยเทคโนโลยีดิจิตอลไมโครโปรเซสเซอร์ มีวิธีดังรูปที่ 2.38 ซึ่งทำการวัดเปรียบเทียบกับเครื่องวัดแบบเหนี่ยวนำ ซึ่งเราถือว่าการวัดโดยใช้เทคนิคไมโครโปรเซสเซอร์จะมีค่าความถูกต้องสูงมาก

ผลการทดลองดังตารางที่ 2.12 และตารางที่ 2.13 ซึ่งได้บอกค่าพิกัดได้จากการวัดโดยเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ และเปรียบเทียบกับที่วัดได้จากเทคนิคไมโครโปรเซสเซอร์ แล้วพล็อตกราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนที่ฮาร์โมนิคส์ต่าง ๆ ดังรูป 2.38 - รูป 2.39

ตารางที่ 2.12 Test Case Harmonic Contents

| Case | 5 | 7 | 11 | Error |
|---|---|---|---|---|
| I | 0.175 | 0.026 | 0.026 | 11.98% at 30 |
| II | 0.110 | 0.016 | 0.016 | 5.97% at 30 |
| III | 0.045 | 0.045 | 0.007 | 2.357% at 30 |
| IV | 0.007 | 0.029 | 0.004 | 4.83% at 30 |

ตารางที่ 2.13 ค่าพิกัดที่วัดได้จากเทคนิคไมโครโปรเซสเซอร์

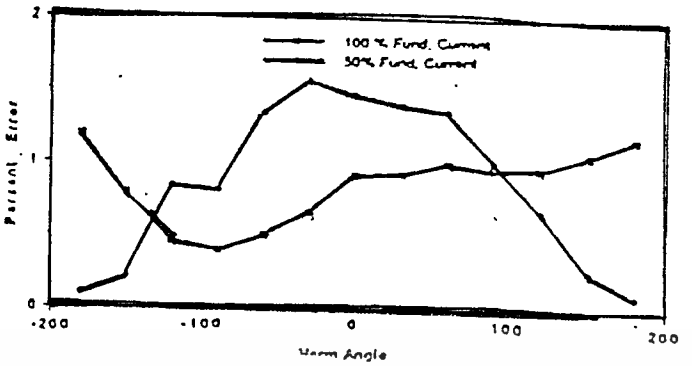
| | Case I | |
|---|---|---|
| Voltage | | |
| fundamental : | 1 | Phase angle : 0 |
| Current | | |
| fundamental : | 1.000 | Phase angle : 30 |
| fifth : | 0.110 | Phase angle : 15 |
| seventh : | 0.016 | Phase angle : 30 |
| eleventh : | 0.016 | Phase angle : 15 |

true real power = 0.866025

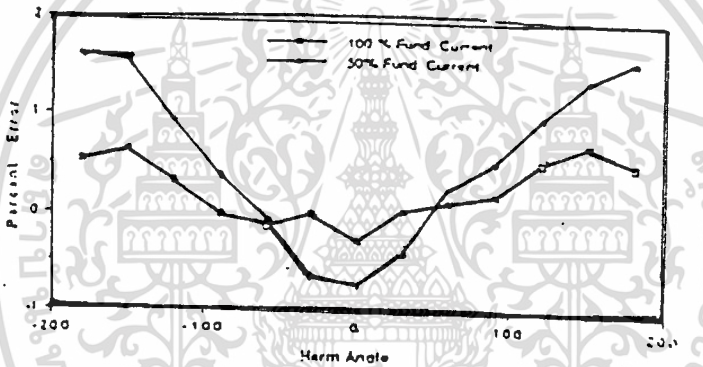
$V_{rms} * I_{rms} * \cos(\text{theta}) = 0.917738$

percent error = 5.97 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 2.38 แสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเนื่องจากฮาร์โมนิคส์ที่ 3




รูปที่ 2.39 แสดงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเนื่องจากฮาร์โมนิคส์ที่ 5

**ผลกระทบของฮาร์โมนิคส์ต่อระบบโทรศัพท์**

กระแสหรือแรงดันฮาร์โมนิคส์ในระบบที่ต่ออยู่กับอุปกรณ์เปลี่ยนรูปพลังงาน เช่น คอนเวอร์เตอร์ เป็นต้น สามารถผลิตสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ซึ่งจะเข้าไปรบกวนในระบบโทรคมนาคมได้ ความรุนแรงขึ้นอยู่กับขนาดและความถี่ของอุปกรณ์เปลี่ยนรูปพลังงานเหล่านั้น

1. TIF Weighting Factor เป็นค่าที่บอกปริมาณการรบกวนระบบโทรคมนาคมที่ช่วงความถี่เสียงหาได้จากค่า TIF ซึ่งค่า TIF เป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย

$$TIF = \frac{\sqrt{\Sigma(I_r \cdot W_r)^2}}{x_1} \qquad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$TIF = \sqrt{\sum\left[\frac{x_r - W_r}{x_1}\right]^2} \qquad (2.15)$$

เมื่อ

$X_t$ ค่ากระแสหรือแรงดันทั้งหมด rms

$X_f$ ค่ากระแสหรือแรงดันที่ความถี่ f

$W_f$ TIF Weighting ที่ความถี่ f

$W_f = 5P_f f$

เมื่อ

$P_f$ = message weighting ที่ความถี่ f

f =ความถี่ที่เรากำลังพิจารณา

ตารางแสดงค่า TIF แสดงในตารางที่ 2.14 และรูปที่ 2.40 ค่า TIF โดยทั่วไปในทางปฏิบัติจะใช้การหาค่า $V_{TIF}$ และ I.T Product ในการพิจารณาผลการรบกวนระบบโทรคมนาคม

2. Voltage Telephone Influence Factor

$$V_{TIF} = \sqrt{\frac{\sum_{h=1}^{11}(T_h Z_h I_h)^2}{V_t}} \qquad (2.16)$$

เมื่อ

Th = ตัวประกอบการรบกวนโทรศัพท์ (TIF)

H = ข้อบเขตบนโดยให้ใช้ความถี่ฮาร์โมนิคส์ถึง 5000 Hz

3. I.T Product

$$I.T = \sqrt{\sum_{h=1}^{tt}(I_{tt})_9 (T_h)^2} \qquad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.14 1960 Single Frequency TIF Values

| FREQ | TIF | FREQ | TIF | FREQ | TIF | FREQ | TIF |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 60 | 0.5 | 1020 | 5100 | 1860 | 7820 | 3000 | 9670 |
| 180 | 30 | 1080 | 5400 | 1980 | 8330 | 3180 | 8740 |
| 300 | 225 | 1140 | 5630 | 2100 | 8830 | 330 | 8090 |
| 360 | 400 | 1260 | 6050 | 2160 | 9080 | 3540 | 6730 |
| 420 | 650 | 1380 | 6370 | 2220 | 9330 | 3660 | 6130 |
| 540 | 1320 | 1440 | 6560 | 2340 | 9840 | 3900 | 440 |
| 660 | 2260 | 1500 | 6680 | 2460 | 10340 | 4020 | 3700 |
| 720 | 2760 | 1620 | 6970 | 2580 | 10600 | 4260 | 2750 |
| 780 | 3360 | 1740 | 7320 | 2820 | 10210 | 4380 | 2190 |
| 900 | 4350 | 1800 | 7570 | 2940 | 9820 | 5000 | 840 |
| 1000 | 5000 | | | | | | |

ปัญหาที่เกิดจาก Line Notch

ปัญหา Line Notch เป็นปัญหาที่สำคัญในระบบแรงต่ำ (Low voltage) ซึ่งเมื่อเกิด Line Notch เฟสทั้งสองจะเชื่อมถึงกัน (ลัดวงจร) ผ่านอิมพีแดนซ์ ซึ่งปกติมีค่าต่ำมากทำให้ศักดาไฟฟ้าที่ต่ำมาก ผลของการเกิด Line Notch แยกพิจารณาเป็น 3 กรณี

1) ผลต่ออุปกรณ์ทางดิจิตอล Line Notch สามารถรบกวนที่ความถี่สูงได้ โดยเฉพาะอุปกรณ์อิเลคทรอนิคส์ที่ไว (Sensitive) ซึ่งได้แก่ ระบบสื่อสาร เครื่องวัดระบบดิจิตอล มอนิเตอร์ และคอมพิวเตอร์ ในคอมพิวเตอร์อาจทำให้ข้อมูลต่างๆ ที่เก็บอยู่หายได้ ถ้าความลึกและความกว้างของ Line Notch มีค่าสูง

2) Line Notch กระตุ้นความถี่เรโซแนนซ์ของระบบที่ความถี่สูงย่าน Audio (15,000 ถึง 20,000 Hz) แต่โชคดีที่ความถี่สูงขนาดนั้นพลังงานที่เกี่ยวข้องมีค่าน้อยและถ้าปัญหานี้เกิดขึ้นก็สามารถใช้ฟิลเตอร์ความถี่สูง ซึ่งประกอบด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุแก้ไขได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ผลต่อเสถียรภาพของคอนเวอร์เตอร์ ปกติคอนเวอร์เตอร์ถูกออกแบบมาสำหรับใช้พัลส์เดี่ยว (Single Pulse to Gate) ในการควบคุมไทริสเตอร์ ถ้าความกว้างของ Line Notch ($t_N$) กว้างกว่าความกว้างของพัลส์ที่ควบคุมแล้ว จะมีผลทำให้ไทริสเตอร์ไม่นำกระแสอีก และเสถียรภาพการทำงานของไทรีสเตอร์ก็ถูกกระทบกระเทือน

ปัญหาการเกิด Flicker

ปัญหา Flicker เป็นปัญหาสำคัญเพราะสำหรับโหลดขนาดใหญ่ที่มีภาวะทำงานไม่คงที่ ลักษณะที่ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางปัญหาจึงเป็นลักษณะเฉพาะทั่วๆ ไปของปัญหานี้

ลักษณะของ Flicker

เกิดจากภาวะการทำงานไม่คงที่ความเตาหลอม เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบอาร์ค (Arc Welder) คอนเวอร์เตอร์ และมอเตอร์ ฯลฯ ซึ่งมีการทำงานและหยุดสลับกัน ซึ่งจะทำให้สัญญาณทางไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งศักดาไฟฟ้าที่บัสต่ออยู่ (tic bus) ไม่คงที่เกิดการแกว่ง และจะเกิดการผสมสัญญาณ (Modulation) ระหว่างสัญญาณปกติ (50 หรือ 60 Hz) กับสัญญาณที่เกิดจากการทำงานที่ไม่คงที่ (มักมีความถี่ต่ำ โดยเฉพาะช่วง 0.1 - 25 Hz ซึ่งเป็นช่วงที่ตามมนุษย์รู้สึกได้)

ระบบเตาหลอมแบบอาร์ค ที่เกิดปัญหา Flicker ทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าตก (Voltage Drop) ก็มีผลต่อระดับแสดงของหลอดอินแคนเดสเซนต์ และหลอดฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งเป็นที่มาของชื่อปรากฏการณ์นี้ นอกจากนี้ระบบสื่อสารและคอมพิวเตอร์ก็อาจได้รับผลกระทบด้วย โดยขนาดของ Flicker ที่เกิดขึ้นในระบบตาหลอมแบบอาร์ค ยังขึ้นกับโลหะที่นำมาหลอมด้วย เนื่องจากในระบบของการไฟฟ้าพารามิเตอร์ส่วนใหญ่คือ ค่ารีแอคเตนซ์ ดังนั้นรีแอคทีฟโหลด จึงเป็นสิ่งที่สำคัญที่ทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าตก (Voltage Drop) และเตาหลอมแบบอาร์คเป็นรีแอคทีฟโหลดขนาดใหญ่ จึงทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงได้มาก ระหว่างสภาวะเป็นวงจรและลัดวงจร ตัวประกอบอันหนึ่งที่นำมาเป็นข้อจำกัดของศักดาไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปคือ SCVD โดยที่

SCVD (Short-Circuit Voltage Depression)

$$\Delta V/V_{.....}$$

$\Delta V$ ศักดาไฟฟ้าบัสที่เปลี่ยนไปทันที เมื่อลัดวงจรที่อีเลคโทรดทั้งสามของเตาหลอม

V ศักดาไฟฟ้าบัสขณะเปิดวงจรเตาหลอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในประเทศไทยที่ใช้ระบบไฟของหลอดไฟ 220/240 V กำหนดให้ค่านี้ไม่เกิน 2% แต่สำหรับประเทศที่ใช้ระบบไฟของหลอดไฟ 100/110 V ค่านี้ไม่เกิน 2.37 % โดยค่าที่กำหนดวัดในขณะที่ไม่มีอุปกรณ์ชดเชยการเกิดฮาร์โมนิคส์ใด ๆ และมีเตาหลอมแบบอาร์คเตาหลอมเดียวสำหรับกรณีเตาหลอมที่มีหลายขนาดเท่ากันนั้น จะมีตัวประกอบสำหรับคูณค่า SCVD ที่วัดได้ และค่า SVCD ที่ได้ใหม่ ต้องไม่เกินค่าที่ได้กำหนดไว้ข้างต้น

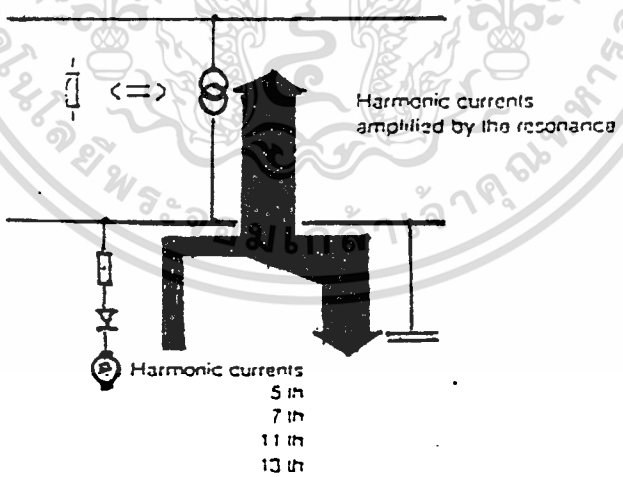
สำหรับตัวประกอบที่ใช้คูณในกรณีหลายเตาหลอมที่มีขนาดเท่ากัน เป็นดังนี้ เมื่อ N = จำนวนเตาหลอม

| | |
|---|---|
| สหรัฐอเมริกา | Kn = (N) 1/4 หรือ (N) 1/2 |
| ฝรั่งเศส | Kn = (N) 1/2 |
| ออสเตเลีย | Kn = (N) 1/2 |
| แคนาดา | KN = (N) 1/2 |
| อังกฤษ | Kn = (N) 0.27 |
| โปแลนด์ | Kn = (N) 0.45 |
| สหภาพโซเวียต | Kn = (N) 1/2 |
| เยอรมัน | Kn = (N) 0.4 หรือ (N) 0.3 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3
# การแก้ปัญหาฮาร์โมนิคส์

ปัจจุบันปัญหาเรื่องฮาร์โมนิคส์ที่มาก่อกวนระบบไฟฟ้าในประเทศไทย นับวันจะทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น ไม่เฉพาะในประเทศอุตสาหกรรมทั่วโลก แม้แต่ในประเทศไทยของเรา ก็กำลังเผชิญหน้าอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ทั้งนี้เพราะความเจริญก้าวหน้าทางด้านอุปกรณ์อิเลคทรอนิคส์กำลังได้แก่ ทรานซิสเตอร์กำลัง(Power Transistor) , SCR และไตรแอค เป็นต้น ได้ถูกพัฒนามาใช้กันอย่างกว้างขวางในระบบควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ และเป็นต้นกำเนิดหนึ่งของปัญหาฮาร์โมนิคส์ โดยเฉพาะฮาร์โมนิคส์ที่ 3,5,7,11 และ 13 ซึ่งล้วนแล้วแต่ก่อให้เกิดความเสียหายในรูปของความสูญเสียมากมายผิดปกติในหม้อแปลง สายไฟ ชุดระบบควบคุม ระบบป้องกัน ระบบมิเตอร์ รวมไปถึงระบบสื่อสารทางโทรคมนาคม และเครือข่ายข้อมูลต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบไฟฟ้าที่มีชุดปรับปรุงตัวกำลังประกอบ ( Capacitor Banks) ทั้งนี้เพราะโดยทั่ว ๆ ไปแล้ว ทุกระบบไฟฟ้าที่มีหม้อแปลงและตัวเก็บประจุติดตั้งอยู่จะเกิดเรโซแนนท์ขนาดที่ความถี่ฮาร์โมนิคส์ค่าหนึ่ง ๆ เสมอ ดังนั้นหากมีกระแสฮาร์โมนิคส์ที่ความถี่ฮาร์โมนิคส์นั้น ในระบบแม้เพียงน้อยนิดก็ตาม ก็จะถูกขยายขนาดขึ้นมากมายจนก่อให้เกิดความเสียหายต่อตัวเก็บประจุ และหม้อแปลงไฟฟ้าได้ ดังรูปที่ 3.1




**รูปที่ 3.1** ชุดปรับปรุงตัวกำลังประกอบและเครือข่ายของระบบอาจจะรวมตัวเป็นเรโซแนนท์ทำให้กระแสฮาร์โมนิคส์ขยายขนาดขึ้นอีกมากมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**วิธีการการแก้ปัญหาฮาร์โมนิคส์**

กระแสฮาร์โมนิคส์ที่ไหลในระบบไฟฟ้าสามารถควบคุมได้หลายวิธี คือ

-เปลี่ยนตำแหน่งที่ตั้งตัวเก็บประจุและ/หรือเปลี่ยนขนาดตัวเก็บประจุ

-ทำเฟสมัลติพลิเคชั่น ( phase multiplication )

-ใช้ชันต์ฟิลเตอร์ ( shunt filter )

**1.เปลี่ยนตำแหน่งที่ตั้งตัวเก็บประจุและ/หรือเปลี่ยนขนาดตัวเก็บประจุ**

การที่ระบบไฟฟ้ามีปัญหาฮาร์โมนิคส์ นั้น ส่วนใหญ่เนื่องจากระดับฮาร์โมนิคส์เรโซแนนซ์ของระบบใกล้กับระดับฮาร์โมนิคส์ที่แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิคส์ผลิตออกมา เช่น 5,7,11,13,... สำหรับคอนเวอร์เตอร์ แบบ 6 พัลส์ เป็นต้น

พิจารณาระดับฮาร์โมนิคส์เรโซแนนซ์

$$n = \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q_c}}$$

ถ้าตอนแรกมีปัญหาฮาร์โมนิคส์มาก การเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุให้ไกลจากขั้วทางด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลงจะสามารถลดค่า $S_{sc}$ ลงได้ ทำให้ค่า n ลดลง

การเปลี่ยนแปลงขนาดของ n ด้วย กล่าวคือ ถ้า $Q_c$ เพิ่มขึ้น ค่า n ก็จะลดลง และถ้า $Q_c$ลดลงค่า n ก็จะเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงขนาดของ $Q_c$ นี้ต้องคำนึงว่าเมื่อได้กระทำไปแล้วตัวประกอบกำลัง จะต้องเป็นแบบนำ ( leading ) นั่นคือ $Q_c$ มีค่ามากเกินไป แต่ถ้าตัวประกอบกำลังต่ำกว่า 85% คือ $Q_c$ มีค่าน้อยเกินไป

วิธีการแก้ปัญหาฮาร์โมนิคส์แบบนี้ใช้ได้กับระบบไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์ผลิตฮาร์โมนิคส์ (harmonic generating equipment) ไม่มากนัก

**2.เฟสมัลติพลิเคชั่น ( phase multiplication )**

ถ้าคอนเวอร์เตอร์มีจำนวนเฟสพัลส์สูงฮาร์โมนิคส์ที่เกิดขึ้นจะเป็นระดับสูงและมีปริมาณน้อยดังแสดงในตารางที่ 3.1 ดังนั้นการเลือกคอนเวอร์เตอร์ควรเลือกชนิดที่มีเฟสหรือพัลส์สูง ๆ ก็จะช่วยลดปัญหาฮาร์โมนิคส์ได้มาก

ดังได้กล่าวมาแล้ว คอนเวอร์เตอร์แบบมีจำนวนพัลส์ 12,18,24 หรือสูงกว่านี้ อาจทำได้โดยใช้คอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ หลายชุดต่อมากันผ่านหม้อแปลงซึ่งมีมุมต่างกัน (phase shift) $15^\circ$ คือ $\Delta\Delta$และ $\Delta Y$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่3 1 แสดงกระแสฮาร์โมนิคส์สำหรับเครื่องเรียงกระแสแบบ 6,12,18 และ 24 พัลส์

| | | | | | 6 Pulse Rectifier Harmonic Current | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Harmonic | Rectifier System | | | | In Percent of Fundamental | | |
| Order | Pulse Number,q | | | | | Xc = 0.15 | Xc = 0.15 |
| n | 6 | 12 | 18 | 24 | Theoretical | $\alpha = 0$ | $\alpha = 32^{\circ}$ |
| 5 | × | | | | 20 | 16.2 | 18.9 |
| 7 | × | | | | 14.2 | 9.3 | 12.7 |
| 11 | × | × | | | 9.09 | 3.04 | 6.70 |
| 13 | × | × | | | 7.69 | 1.86 | 4.69 |
| 17 | × | | × | | 5.88 | 1.261 | 2.60 |
| 19 | × | | × | | 5.26 | 1.08 | 1.78 |
| 23 | × | × | | × | 4.35 | 0.66 | 0.63 |
| 25 | × | × | | × | 4.00 | 0.53 | 0.28 |
| 29 | × | | | | 3.45 | 0.43 | 0.36 |
| 31 | × | | | | 3.23 | 0.39 | 0.48 |
| 35 | × | × | × | | 2.86 | 0.28 | 0.59 |
| 37 | × | × | × | | 2.70 | 0.24 | 0.59 |

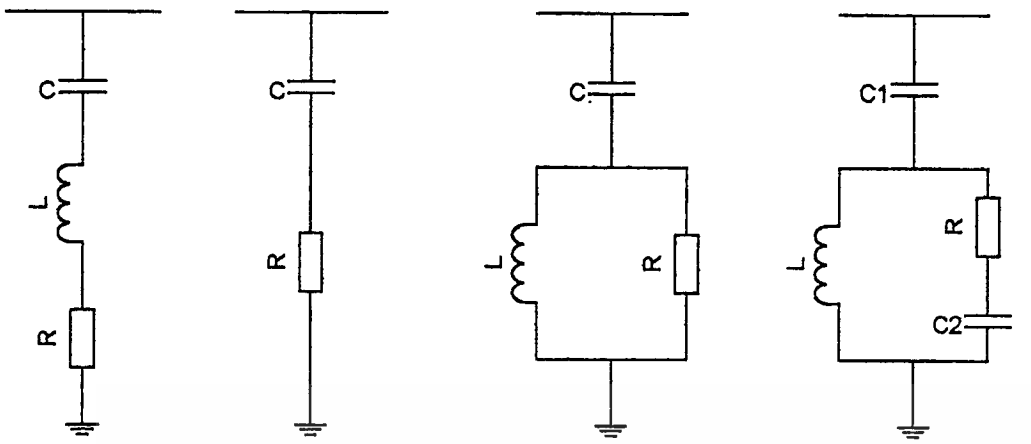
$\times_c$ is per-unit commutating reactance

Phase retard $\alpha = 32^{\circ}$ produces 15% reduction in dc voltage

**3. การใช้ฟิลเตอร์ในการลดขนาดฮาร์โมนิคส์แบบขนาน**

การใช้ฟิลเตอร์แบบขนานมีหลายแบบ แต่นิยมใช้ในการกำจัดฮาร์โมนิคส์ คือ ฟิลเตอร์แบบจูนความถี่และฟิลเตอร์ High - pass ดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 3.2 การใช้ฟิลเตอร์แบบต่าง ๆ

3.1.1 ฟิลเตอร์ความถี่เดี่ยว (Single tune filter)

เป็นฟิลเตอร์ที่ใช้กันมากที่สุด โดยมีผลตอบสนองความถี่ (Frequency Response ) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 มีลักษณะที่น่าสนใจดังนี้

-ตัวฟิลเตอร์มีอิมพีแดนซ์ต่ำมากที่สุดความถี่ที่จูน ทำให้กระแสฮาร์โมนิคส์ที่เกิดความถี่นี้ไหลผ่านฟิลเตอร์เกือบทั้งหมด

-เมื่อคิดผลอิมพีแดนซ์ของระบบแล้ว จะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ขึ้นใหม่ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ที่จูน (fr)

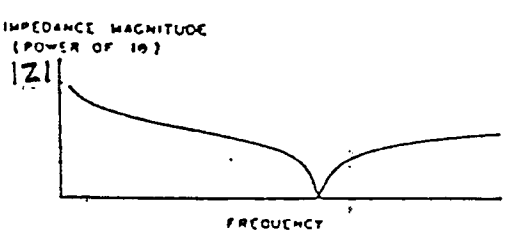
อิมพีแดนซ์ของฟิลเตอร์ความถี่เดี่ยวเป็นไปดังสมการ (3.1) และความถี่ที่จูน (ที่เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมขึ้นในตัวฟิลเตอร์) เป็นไปตามสมการ (3.2)

$$Z = R+j(\omega L-\omega 1/C) \qquad (3.1)$$

ภาวะเรโซแนนซ์ $\omega_r \times L = 1/(\omega_r \times C)$

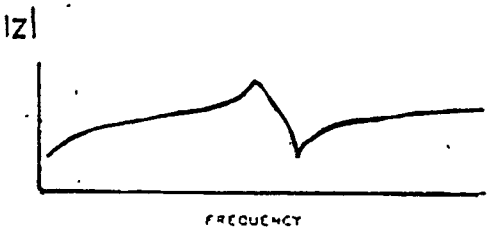
เมื่อ

$$f_r = 1/(2\pi\sqrt{LC}) \qquad (3.2)$$




(a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




(b)

รูปที่ 3.3 ผลตอบสนองความถี่ของฟิลเตอร์ความถี่เดี่ยว

a) เมื่อคิดของฟิลเตอร์อย่างเดียว

b) เมื่อคำนึงถึงผลของท้ายระบบด้วย

เมื่อความถี่ $\omega_1$ คือ ความถี่เชิงมุมที่เกิดเรโซแนนซ์

$$= 2\pi f_1 \times h$$

$$= \omega_1 \times h$$

ดังนั้นเมื่อเกิดเรโซแนนซ์ (ภายใต้ฟิลเตอร์หรือความถี่ที่จูนฟิลเตอร์) Z=R ซึ่งโดยทั่วไปค่ารีซิสแตนซ์ในฟิลเตอร์มีค่าน้อยมาก โดยอยู่ในตัวรีแอคเตอร์เอง

ตัวประกอบคุณภาพ(Quality Factor [Q]) คือค่าที่บอกรูปร่างความชันของผลตอบสนองต่อความถี่ที่จูนซึ่ง Q โดยนิยาม

$$Q - \frac{\omega_r}{\omega_1\omega_2} = \frac{L/C}{R} = \frac{X_{LR}}{R} = \frac{X_{CR}}{R} \qquad (3.3)$$

$\omega_1$ ความถี่ที่จูน

$\omega_1\omega_2$ ความถี่ที่ขนาดอิมพีแดนซ์ลดลงเป็น -3 dB

$X_{LR}, X_{CR}$ คือค่า $X_L$ และ $X_C$ ที่ความถี่ที่จูน

ปกติฟิลเตอร์ความถี่เดียวมีค่า Q ที่สูงมาก [ R มีค่าน้อยมาก ] ทำให้ฟิลเตอร์มีลักษณะชันสูง จึงทำให้ฟิลเตอร์มีประสิทธิภาพสูงมาก รูปที่ 3.4 แสดงผลของค่า Q ที่มีรูปร่างผลตอบสนองความถี่ของฟิลเตอร์

ดังได้กล่าวมาแล้วว่า เมื่อใส่ฟิลเตอร์ลงในระบบ จะทำให้ได้ระบบใหม่(คือระบบที่รวมฟิลเตอร์เข้าไปด้วย) เกิดเรโซแนนซ์ขึ้นที่ความถี่ต่ำกว่าระบบความถี่ที่จูน ดังรูปที่ 3.3 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\int_r = 1/(2\pi\sqrt{L_s + L) \times C} = \int_1 \times \sqrt{X_C / (X_L + X_s)} \qquad (3.4)$$

$L_S$ เป็นค่าอินดักแตนซ์ของการไฟฟ้ารวมกับหม้อแปลงหลัก (คิดจาก $MVA_{SC}$)

กรณีฟิลเตอร์ความถี่เดียวหลาย ๆ ชุด ต่อขนานกัน แต่ละชุดของฟิลเตอร์จะเกิดเรโซแนนซ์กับระบบที่ความถี่ต่าง ๆ กัน โดยอาจจะเกิดที่ความถี่สูงหรือต่ำกว่าเดิมก็ได้ เมื่อคำนึงถึงผลรวมรีแอคแตนซ์ของระบบไฟฟ้า ค่า Q ของฟิลเตอร์เปลี่ยนไปตามสมการ

$$Q_S = \frac{1}{(R + R_s)} \sqrt{\frac{L_s + L}{C}} \qquad (3.5)$$

เมื่ออักษรห้อย S หมายถึงระบบการไฟฟ้ารวมกับหม้อแปลงหลัก (คิดจาก $MVA_{SC}$)

จากสมการ (3.2) และ (3.5) พบว่า ความถี่ที่จูนและความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นใหม่จากผลของค่ารีแอคแตนซ์ของระบบการไฟฟ้ารวมกับหม้อแปลงหลัก เป็นอิสระต่อกันดังแสดงในรูปที่ 3.5

การจูนฟิลเตอร์มักไม่จูนให้ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นทีเดียว เพราะโอกาสที่ความถี่ที่จูนเลื่อนขึ้น [Upward] เนื่องจากสาเหตุที่จะได้กล่าวต่อไป ดังนั้นจึงนิยมจูนให้ต่ำกว่าความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์ 3-10 %

สาเหตุที่ทำให้ความถี่ที่จูนมีค่าสูงขึ้น

- ฟิวส์บางส่วนของตัวเก็บประจุขาด ซึ่งทำให้ตัวเก็บประจุลดลง ทำให้ความถี่จูนสูงขึ้น
- ค่าความผิดพลาดจากโรงงานที่ผลิตตัวเก็บประจุ และรีแอคเตอร์
- อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น
- การเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบการไฟฟ้า

โดยค่าความถี่ที่เปลี่ยนไปจากความถี่ที่จูนคือ ตัวประกอบ $\delta$ นิยามดังนี้

$$\delta = (\omega - \omega_r)/\omega_r \qquad (3.6)$$

เนื่องจาก $\delta$ ขึ้นอยู่กับค่าที่เปลี่ยนไปของ L,C และความถี่ของระบบแสดงได้ดังนี้

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_r} + \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta L}{L_r} + \frac{\Delta C}{C_r}\right) \qquad (3.7)$$

ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของฟิลเตอร์จึงเปลี่ยนเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_r = R\left(1 + jQ\delta\left(\frac{2+\delta}{1+\delta}\right)\right) \qquad (3.8)$$

แต่ $\delta << 1$

$$Z_r \approx R(1 + j2\delta Q) \qquad (3.9)$$

หาค่า Q ที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดแรงดันฮาร์โมนิคส์, $V_n$ น้อยที่สุดเมื่อใช้ฟิลเตอร์แล้วคือ

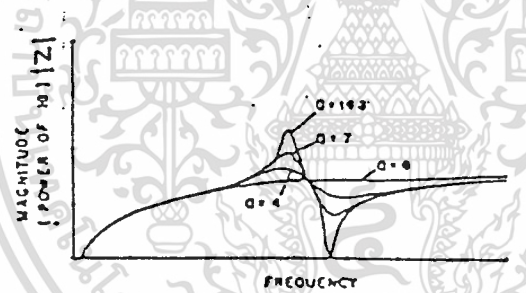
$$Q = \frac{1+\cos\phi}{2\delta\sin\phi} \qquad (3.11)$$

โดย

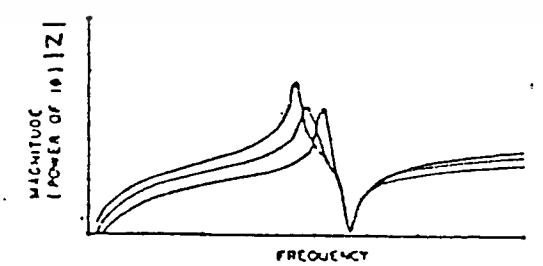
In กระแสฮาร์โมนิคส์จากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

$\phi$ = มุมของอิมพีแดนซ์ของระบบ

ฟิลเตอร์ความถี่เดียวจะไม่ได้ออกแบบให้มีแรงดันฮาร์โมนิคส์น้อยที่สุดแต่จะออกแบบให้ได้ Q มากที่สุด เพื่อให้เกิดความสูญเสียต่ำ

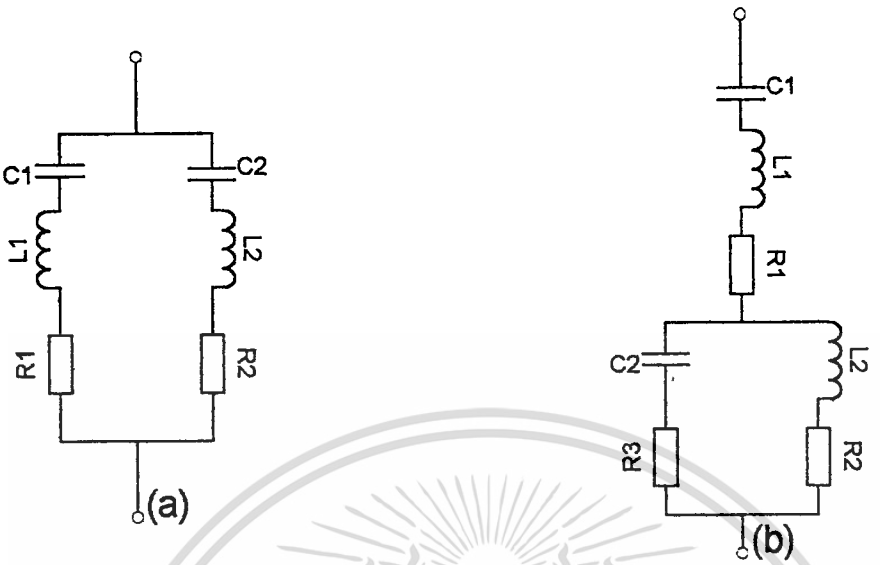



**รูปที่ 3.4 ผลของตัวประกอบคุณภาพต่อผลตอบสนองความถี่ของฟิลเตอร์**




**รูปที่ 3.5 แสดงผลของเรโซแนนท์ที่เกิดขึ้นใหม่ที่เปลี่ยนไป ขณะที่ความถี่ที่จูนคงที่**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 3.6** แสดง Transformation form

a) two single-tuned filters

b) double-tuned filters

**3.1.2 ฟิลเตอร์ความถี่คู่**

วงจรสมมูลย์ของอิมพีแดนซ์ของฟิลเตอร์ความถี่เดียวสองชุดดังแสดงในรูปที่ 3.6 (a) ที่จูนความถี่เรโซแนนซ์สองความถี่ ในทางปฏิบัติจะใช้งานเหมือนกับฟิลเตอร์ความถี่คู่ (รูปที่ 3.6 (b)) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$C_1 = C_a + C_b \qquad (3.12)$$

$$C_2 = \frac{C_a C_b (C_b + C_b)(L_a + L_b)^2}{(L_a C_a - L_b C_b)^2} \qquad (3.13)$$

$$L_1 = \frac{L_a L_b}{L_a + L_b} \qquad (3.14)$$

$$L_2 = \frac{(L_a C_a - L_b C_b)^2}{(C_a + C_b)^2 (L_a + L_b)} \qquad (3.15)$$

$$R_2 = R\left[\frac{a^2(1-x^2)}{(1+ax^2)^2(1+x^2)}\right] + R_b\left[\frac{(1-x^2)}{(1+ax^2)^2(1+x^2)}\right] + R_1\left[\frac{(1-x^2)(1-ax^2)}{(1+ax^2)(1+x^2)}\right] \qquad (316)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย $a = \frac{C_a}{C_b}$ , $x = \sqrt{\frac{L_b C_b}{L_a C_a}}$

ในทางปฏิบัติมักจะไม่คิดค่า R1 โดยใช้ L1 ที่มีความต้านทานต่ำเพื่อลดกำลังสูญเสียที่ความถี่มูลฐาน ข้อดีของฟิลเตอร์แบบนี้คือ จะใช้ระบบแรงดันสูง ตัวอย่างของอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ใด ๆ ของฟิลเตอร์ความถี่คู่ดังแสดงในรูป (c)

### 3.1.3 ฟิลเตอร์ High-pass

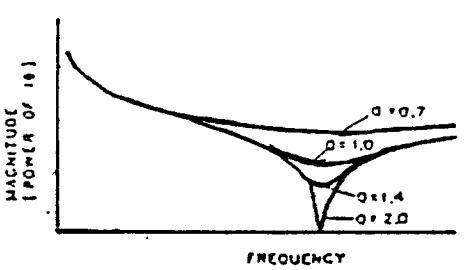
เป็นฟิลเตอร์ที่มีอิมพีแดนซ์สูงที่ความถี่ต่ำ และมีอิมพีแดนซ์ต่ำที่ความถี่สูง ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยฟิลเตอร์นี้จูนที่ความถี่ต่ำ เพื่อลดจำนวนฟิลเตอร์ความถี่เดียวที่ต้องใช้ และเนื่องจากมีอิมพีแดนซ์ต่ำที่ความถี่สูง จึงต้องรับกระแสฮาร์โมนิคส์ที่เกิดขึ้นเกือบทั้งหมด ทำให้ฟิลเตอร์มีขนาดใหญ่มาก

**ข้อดีของฟิลเตอร์แบบ High-pass**

- การทำงานเชื่อถือได้ ไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ , ความถี่ , ความผิดพลาดในการผลิต
- มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำที่ความถี่สูงเป็นช่วงกว้าง
- การใช้ฟิลเตอร์ชนิดที่จูนความถี่อาจทำให้เกิดเรโซแนนซ์ขนานระหว่างฟิลเตอร์และค่าแอดมินแตนซ์ของระบบที่ความถี่ต่ำกว่าหรือเท่ากับความถี่ที่จูนไว้ แต่ในกรณีฟิลเตอร์แบบ High-pass จะไม่เกิดขึ้น

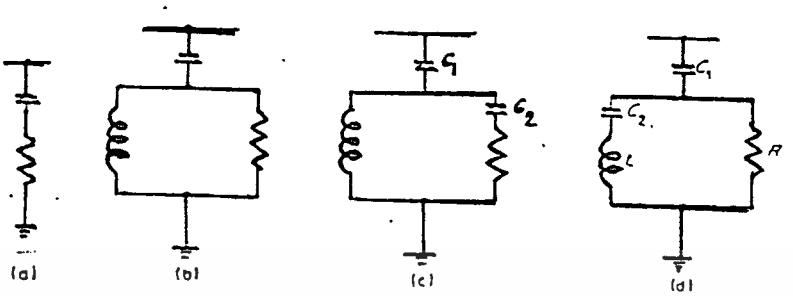
**ข้อเสียของฟิลเตอร์แบบ High-pass**

- ฟิลเตอร์มีขนาดใหญ่ ขนาด VA สูง แต่การทำงานที่ดีต้องอยู่ภายใต้ขอบเขตของตัวประกอบกำลังที่ต้องการด้วย
- มีความสูญเสียในความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำสูง




**รูปที่ 3.7** Frequency Response ของ High-pass ที่ค่า Q ที่เปลี่ยนไปแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




รูปที่ 3.8 ฟิลเตอร์ชนิด High-pass a) first order b) second order c) third order d) C-type

ชนิดของฟิลเตอร์ชนิด High-pass ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ข้อดีและข้อเสียของแต่ละแบบดังต่อไปนี้

1) first order จะไม่นิยมใช้เป็นตัวเก็บประจุขนาดใหญ่และความสูญเสียที่ความถี่มูลฐานสูง

2) second order ให้คุณลักษณะของฟิลเตอร์ที่ดี แต่มีความสูญเสียกว่าแบบ third order

3) C-type ลักษณะการทำงานอยู่ในระหว่าง second order และ third order แต่ลดขนาดความสูญเสียที่ความถี่มูลฐานมากกว่า แต่ไวต่อการเปลี่ยนความถี่และการเปลี่ยนค่าของอุปกรณ์มากกว่าแบบอื่น ๆ

อิมพีแดนซ์ของฟิลเตอร์แบบ High-pass อันดับที่ 52 คือ

$$Z = \frac{1}{j\omega C} + \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L}\right)^{-1} \quad (3.17)$$

สำหรับการออกแบบฟิลเตอร์จะเลือก Q ให้เหมาะสมเพื่อให้มีลักษณะการทำงานที่ดีที่แถบความถี่ที่ต้องการ เป็นสิ่งสำคัญ ไม่เหมือนกับฟิลเตอร์ชนิดอื่น

ลักษณะการทำงานของฟิลเตอร์จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์สองอย่าง คือ

$$\int_0 = \frac{1}{2\pi CR} \quad (3.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m = \frac{L}{R^2 C} \qquad (3.19)$$

ค่าของ m อยู่ระหว่าง 0.5-2 ใช้สำหรับหาค่า R และ L เมื่อกำหนดขนาดตัวเก็บประจุและเลือกความถี่ที่ต้องการแล้ว

***ตัวอย่าง***

คอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ขนาด 1000 MW 100kV dc ทำงานที่มุม $\alpha$ = 15 องศา ต่ออยู่กับระบบ 275 kV 50 Hz โดยต่อผ่านหม้อแปลงคอนเวอร์เตอร์ 275 A /83 kV 15 % Z กระแสทางด้านขดลวดปฐมภูมิ 236A กระแสทางด้านทุติยภูมิ 780 A ฟิลเตอร์ต่ออยู่ทางด้านปฐมภูมิประกอบด้วยวงจรกรองฮาร์โมนิคส์ที่ 5th,7th,11th,13th และฟิลเตอร์ high-pass แบบ second order

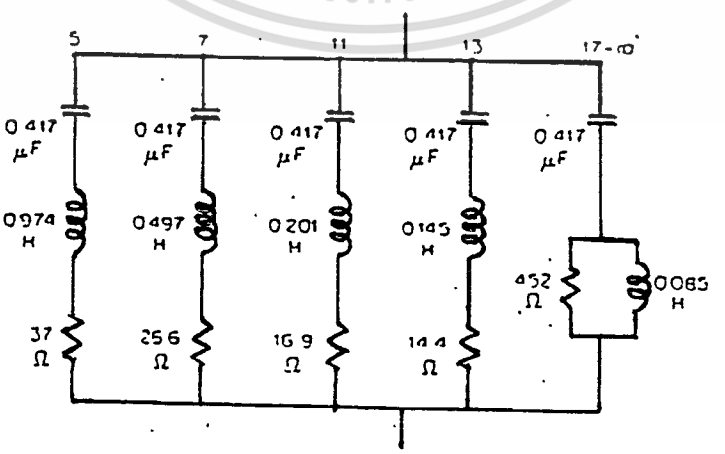
ขนาดของฟิลเตอร์รวม 50 MVAR สมมติว่าใช้ตัวเก็บประจุขนาดเดียวกันทั้งหมด คือ 0.417 ไมโครฟารัด capacitor temperature coefficient 0.05% / $C^\circ$ และ inductor temperature coefficient 0.05% / $C^\circ$ อุณหภูมิแวดล้อมภายนอก $\pm$20 $C^\circ$ และความถี่เปลี่ยนแปลง $\pm$1% จะได้

$$\delta = \frac{1}{100}\left[1 + \frac{1}{2}(0.05 \times 20 + 0.01 \times 20)\right] = 0.016$$

ให้ระบบไฟฟ้ากระแสสลับขนาดของมุมอิมพีแดนซ์เปลี่ยนได้ แต่มุมต้องไม่เกิน 75 องศา ($\phi_z < 75^\circ$) ที่ทุกความถี่ ค่าของ Q ที่เหมาะสม คือ

$$Q = \frac{1 + \cos 75^\circ}{2(0.016)\sin 75^\circ} = 4$$

เมื่อรู้ค่า Q และ C ก็สามารถหาค่า L และ R ได้ เลือกใช้ m=1 และ $t_0$=17×50 = 850 Hz จึงได้ L=0.085 H และ R = 452$\Omega$ รูปของวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.9




**รูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่างการออกแบบฟิลเตอร์**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**อุปกรณ์ที่ใช้ในฟิลเตอร์**

**ตัวเก็บประจุ**

**คุณสมบัติหลักของตัวเก็บประจุที่ต้องคำนึงถึง**

- capacitance temperature coefficient
- reactive power
- power loss
- reliability
- cost

ควรใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่า temperature coefficient ต่ำ สำหรับฟิลเตอร์ชนิดจูนความถี่เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเปลี่ยนแปลงความถี่ (de-tuning) จากการเปลี่ยนค่าของตัวเก็บประจุ ตัวเก็บประจุควรมีกำลังรีแอคทีฟสูง เพื่อให้มีความสูญเสียต่ำขณะที่ทำงานที่ระบบแรงดันสูง จะได้ยืดอายุการใช้งานเมื่อเกิดแรงดันเกินพิกัด และเป็นการป้องกันความเสื่อมของฉนวนเนื่องจากความร้อนด้วย

**ตัวเหนี่ยวนำ**

ต้องพิจารณาเรื่องความสูญเสียโดยคิดผลของ skin effect , hysteresis loss และความไม่เป็นเชิงเส้นของสนามแม่เหล็กด้วย จึงจำเป็นต้องให้มีความเข้มของสนามแม่เหล็กต่ำ เพื่อลดปัญหาการอิ่มตัวของแกนเหล็กเมื่อใช้แบบแกนเหล็ก

ค่า Q ที่จะใช้อยู่ระหว่าง 50-150 เพื่อให้ฟิลเตอร์มีราคาไม่สูงเกินไป แต่ค่า Q ต่ำ ๆ ก็ใช้เหมือนกันเมื่อมีความต้านทานต่ออนุกรมขนาดของตัวเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับกระแส(ค่า rms) สูงสุดและชั้นของฉนวนที่ต้องการเพื่อทนต่อ Switching Surges และมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ ขนาดไม่ใหญ่จนเกินไป โดยเฉพาะการมีภาระซ่อมบำรุงต่ำ และกำลังสูญเสียต่ำ

ถ้ารีแอคเตอร์ที่นำมาใช้เป็นแบบแกนอากาศ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้น [ Linearity ต่อความถี่ และกระแสโดยมีค่าผิดพลาดจากโรงงาน $\pm 5\%$ และอัตราส่วน X/R ที่ความถี่ 60 Hz มีค่าสูงมาก ซึ่งอยู่ระหว่าง 50-150]

เมื่อมีการติดตั้งฟิลเตอร์ในระบบ ดังรูปที่ 3.10 ฟิลเตอร์จะสามารถควบคุมกระแสฮาร์โมนิคส์ที่ความถี่นั้นให้ไหลผ่านที่ฟิลเตอร์ได้เกือบทั้งหมด ทำให้ศักดาไฟฟ้าฮาร์โมนิคส์ที่ความถี่นั้นมีค่าต่ำมาก ดังนั้นการเลือกขนาดฟิลเตอร์ จึงต้องคำนึงถึงผลของกระแสฮาร์โมนิคส์ที่ความถี่นั้นด้วย ไม่ใช่คิดเฉพาะที่ความถี่มูลฐานเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_F = \sqrt{I_I^2 + I_H^2} \quad (3.20)$$

$$I_I = \frac{V_S}{X_{CI} - X_{LI}} \quad (3.21)$$

$$V_C = \sqrt{3} \times (I_I X_{CI} + I_H X_{CH}) \quad (3.22)$$

$$V_L = \sqrt{3} \times (I_I X_{LI} + I_H X_{LH}) \quad (3.23)$$

$$KVA_C = ((V_C)^2 / X_{CI}) / 1000 \approx (3 \times I_F V_C) / 1000 \quad (3.24)$$

$$KVA_L = ((V_L)^2 / X_{LI}) / 1000 \approx (3 \times I_F V_L) / 1000 \quad (3.25)$$

โดย $I_F$ กระแสทั้งหมดที่ผ่านฟิลเตอร์

$I_I$ กระแสที่ผ่านฟิลเตอร์ที่ความถี่มูลฐาน

$I_H$ กระแสฮาร์โมนิคส์ที่ออกจากแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิคส์ที่ความถี่ที่มูลฐาน

H ความถี่ที่จูน หน่วยเป็นลำดับที่ เช่น 5,7

$X_{CI}, X_{C2}$ ค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่ความถี่มูลฐานและความถี่ที่จูน

$X_{LI}, X_{L2}$ ค่ารีแอคแตนซ์ของรีแอคเตอร์ที่ความถี่มูลฐานและความถี่ที่จูน

$V_S$ ศักดาไฟฟ้าที่บัส [ norminal or operation voltage , L-G ]

$V_C$ พิกัดศักดาไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่นำมาเป็นฟิลเตอร์ [ L-L ]

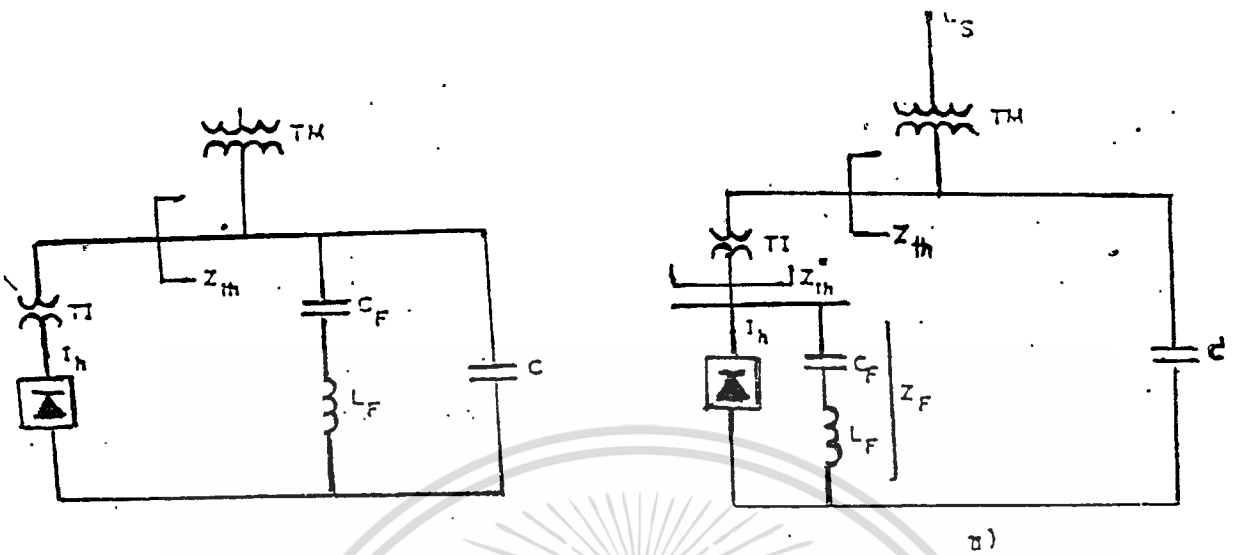
$V_L$ พิกัดศักดาไฟฟ้าของรีแอคเตอร์ที่นำมาเป็นฟิลเตอร์ [ L-L ]

$KVA_C$ พิกัด KVA ตัวเก็บประจุที่นำมาทำฟิลเตอร์ ( $3\phi$ )

$KVA_L$ พิกัด KVA รีแอคเตอร์ที่นำมาทำฟิลเตอร์ ( $3\phi$ )

สมการที่ 3.20 - 3.25 ใช้สำหรับฟิลเตอร์ความถี่เดี่ยว กรณีที่จะนำไปใช้สำหรับฟิลเตอร์แบบ High-pass ต้องดัดแปลงเล็กน้อย โดยสมการที่ 3.20 - 3.23 ต้องคำนึงถึงผลของฮาร์โมนิคส์ทุกลำดับที่มีอยู่ เพราะถือว่ากระแสฮาร์โมนิคส์ไหลลงฟิลเตอร์ High-pass ส่วนสมการที่ 3.24-3.25 นำมาใช้โดยไม่ต้องแก้ไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 3.10** ผลของตำแหน่งติดตั้งฟิลเตอร์ต่อค่า HDF

ก) กรณีฟิลเตอร์ต่อที่บัสหลัก

ข) กรณีฟิลเตอร์ต่อที่บัสของคอนเวอร์เตอร์

**ข้อเสนอแนะในทางปฏิบัติ**

ในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงข้อเสนอแนะในการเลือกขนาดของฟิลเตอร์ และข้อปฏิบัติเกี่ยวกับฟิลเตอร์หลาย ๆ ชุด ช่วยกันแก้ปัญหาฮาร์โมนิคส์ที่เกิดขึ้นว่ามีอะไรเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง ดังรายละเอียดที่จะพิจารณาต่อไปนี้

1) ก่อนที่จะทำการเลือกขนาดฟิลเตอร์ ต้องทำการวิเคราะห์ตัวประกอบกำลังของระบบก่อน โดยหาขนาดกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟความถี่มูลฐาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟิลเตอร์ที่จูนที่ความถี่ต่ำ (มักมีขนาดใหญ่) หรือฟิลเตอร์แบบ High-pass หลังจากนั้นก็หาขนาดฟิลเตอร์ โดยคิดขนาดรวมที่คงความถี่มูลฐานและผลเนื่องจากฮาร์โมนิคส์ด้วย ตามสมการ 3.20-3.25 ฮาร์โมนิคส์อาจเป็นฮาร์โมนิคส์ที่กำเนิดจากอุตสาหกรรมนั้น หรือจากอุตสาหกรรมข้างเคียง เมื่อเลือกขนาดฟิลเตอร์อันใดอันหนึ่งแล้วก็ต้องมาพิจารณาถึงค่าตัวประกอบกำลังทุกครั้ง และทำเช่นนี้จนกว่าค่ากำหนดต่าง ๆ เช่น HDF แรงดันไฟฟ้า และ KVA รวมที่ตัวเก็บประจุ และตัวประกอบกำลังรวมของระบบอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

2) บางครั้งอาจมีการใช้ฟิลเตอร์มากกว่า 1 ชุด จูนที่ความถี่ต่าง ๆ กัน เพื่อควบคุมฮาร์โมนิคส์ที่เกิดขึ้น ในกรณีนี้ต้องพิจารณาผลของฟิลเตอร์บางฟิลเตอร์ที่ถูกปลดออกเนื่องจากต้องควบคุมตัวประกอบกำลังระบบอยู่ในเกณฑ์ให้ยอมรับได้ (กรณีที่ไม่ใช้ Startic Var control ตัวประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลัง) โดยเมื่อปลดบางฟิลเตอร์ออกแล้วขนาด HDF แรงดันไฟฟ้า และ KVA รวมบนคาร์ปาซิเตอร์และเรโซแนนซ์ของระบบที่เกิดขึ้นมาใหม่จะมีค่าเป็นอย่างไร ยอมรับได้หรือไม่ โดยปกติการปลดฟิลเตอร์อีกอันหนึ่งที่จูนที่ความถี่ต่ำกว่าฟิลเตอร์อันแรก เช่น ฟิลเตอร์จูนที่ความถี่อันดับที่ 13 จะเกิดเรโซแนนซ์ขนานกับระบบ ที่ความถี่ต่ำกว่าลำดับที่ 13 แต่จะสูงกว่าลำดับที่ 11 ที่ฟิลเตอร์อีกอันหนึ่งจูนอยู่ซึ่งในระบบปลดฟิลเตอร์ที่จูนที่ลำดับที่ 11 ก่อนแล้วค่อยมาปลดที่ฟิลเตอร์ที่จูนที่ลำดับที่ 13 กระแสฮาร์โมนิคส์ลำดับที่ 11 จะกระตุ้นระบบทำให้เกิดเรโซแนนซ์ ปัญหาฮาร์โมนิคส์ลำดับที่ 11 ก็จะถูกกำจัดไปโดยฟิลเตอร์ที่จูนที่ความถี่ต่ำกว่าคอยควบคุมปัญหาฮาร์โมนิคส์เรโซแนนซ์เกิดขึ้นและในทางกลับกัน ถ้าระบบต้องการการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเพิ่มขึ้น การสวิทช์ฟิลเตอร์เข้าสู่ระบบจะต้องสวิทช์ฟิลเตอร์ที่จูนที่ความถี่ต่ำที่สุดก่อนเสมอ จากผลของความคิดนี้ การเลือกใช้ฟิลเตอร์จะต้องเลือกที่ลำดับที่จูนฟิลเตอร์ต่ำก่อนแล้วค่อยเลือกที่ความถี่ที่จูนสูงขึ้นไป

3) การเลือกใช้ฟิลเตอร์ นอกจากคำนึงถึงฮาร์โมนิคส์ที่มีอยู่ในระบบแล้ว ต้องยังคำนึงถึงเรโซแนนซ์ที่มีอยู่ในระบบที่เกิดขึ้นด้วยเรโซแนนซ์ของระบบอาจเปลี่ยนแปลงไปจากภาวะของระบบไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้ค่า KVA ลัดวงจรเปลี่ยนแปลง และกรณีจากระบบไฟฟ้าของอุตสาหกรรมนั้นเปลี่ยนแปลงไป

4) การติดตั้งฟิลเตอร์หลังหม้อแปลงชนิด Isolated ของคอนเวอร์เตอร์สามารถทำให้ HDF ลดลงอย่างมาก โดยพิจารณาจากรูปที่ 3.10 (ก) ซึ่งติดฟิลเตอร์ที่บัสหลักของกระแสฮาร์โมนิคส์จากทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง $T_1$ จะมีขนาดเล็กกว่าที่ออกจากคอนเวอร์เตอร์ด้วยอัตราส่วน Voltage Ratio (a) และจะทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าฮาร์โมนิคส์ที่บัสหลัก ($V_h$) เท่ากับ $(I_h/a)*Z_{th}$ ซึ่งมีความถี่ที่จูนทำให้ $V_h$ มีค่าต่ำมากแต่ที่ความถี่อื่น $V_h$ มีค่าไม่ต่ำนัก กรณีรูป 3.10 (ข) $Z_{th}$ ซึ่งเกิดจากอิมพีแดนซ์ของ $T_1$ (ปกติมีค่ามาก) อนุกรมกับ $Z_{th}$ ที่ย้ายมาจากด้านปฐมภูมิ (หารด้วย $a^2$) จะแบ่งกระแสกับฟิลเตอร์เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของ $T_1$ มีค่ามาก ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านฟิลเตอร์มากกว่าในกรณีรูป 3.10(ก) ถึงแม้อิมพีแดนซ์ของฟิลเตอร์มีค่ามากกว่าในกรณีรูปที่ 3.10(ก) เนื่องจากย้ายมาที่บัสที่มีค่าศักดาไฟฟ้าต่ำกว่าพิกัด ( พิกัด KVAR เท่าเดิม ) แต่กระแสไหลผ่านฟิลเตอร์ในกรณีรูป 3.10 (ข) มีค่ามากกว่าในกรณีรูป 3.10(ก) โดยคิดเป็นค่า pu. ดังนั้น $V_h$ ที่บัสซึ่งมีค่า $\{I_h \times Z_f/(Z_f+Z_{th})\}* \{Z_{th}/a^2\}/a$ จะต่ำกว่าในกรณีรูป 3.10(ก) กล่าวโดยสรุป การเลือกขนาดของฟิลเตอร์ต้องคำนึงถึงสิ่งต่าง ๆ ดังนี้

- การชดเชยรีแอคทีฟเพาเวอร์ที่มาจากตัวฟิลเตอร์
- เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นใหม่ในระหว่างฟิลเตอร์กับระบบไฟฟ้าเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- พิกัด และข้อจำกัด (Limitation) ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในตัวฟิลเตอร์
- ผลของการปลดฟิลเตอร์บางตัวออก
- กำลังสูญเสียในฟิลเตอร์
- สำหรับฟิลเตอร์แบบ High-pass พิกัดของฟิลเตอร์ต้องคิดที่ทุก ๆ ความถี่ฮาร์โมนิคส์ที่มีอยู่ในระบบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4
# ชนิดของฟิลเตอร์ที่ใช้ในโครงงาน

## 4.1 ฐูนฟิลเตอร์

ประกอบด้วยรีแอคเตอร์ต่ออนุกรมเข้ากับตัวเก็บประจุมีหลักการเลือกขนาดรีแอคเตอร์ที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ อนุกรมระหว่างรีแอคเตอร์และตัวเก็บประจุตรงกับระดับฮาร์โมนิคส์ที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้า เช่น ระดับฮาร์โมนิคส์ที่ 5,7,11,13 เป็นต้น

## 4.2 ข้อมูลที่ต้องทราบในการออกแบบฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์

1. พิกัดแรงดัน(voltage) แรงดันขณะใช้งานและการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในระบบ

2.ความต้องการกำลัง รีแอกตีฟ(KVAR)ที่ความถี่มูลฐาน (50 Hz ในประเทศไทย)

3.กระแสฮาร์โมนิคส์ที่อยู่ในระบบปกติหรือรุนแรงหรือข้อมูลเกี่ยวกับโหลดที่สามารถกำเนิดฮาร์โมนิคส์ได้เช่นเรคติไฟเออร์ , อุปกรณ์ควบคุมโดยใช้พวกไทริสเตอร์ เป็นต้น

4.ค่าระดับลัดวงจรที่มีอยู่ในระบบเครือข่ายกับจุดติดตั้งและช่วงการเปลี่ยนแปลงที่เป็นไปได้ (ใช้สำหรับคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่างๆ)

5. ค่าระดับฉนวนความต้านทานของฟิลเตอร์ที่ต้องการ (Insulation level)

6. ค่าระดับที่ต้องการควบคุมของกระแสและแรงดันฮาร์โมนิคส์ (ขึ้นอยู่กับแต่ละประเทศที่กำหนด ซึ่งประเทศไทยยังไม่มีประกาศใช้บังคับ)

7. สภาพแวดล้อมทั่วไป เช่น ติดตั้งในหรือนอกอาคาร, อุณหภูมิโดยรอบ ขนาดพื้นที่ที่เหลือไว้ให้ในการติดตั้งเป็นต้น

## 4.3 ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองฮาร์โมนิคส์

การหาขนาดและพิกัดของรีแอคเตอร์และตัวเก็บประจุโดยปกติจะทำการกำหนดค่า VAR เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังซึ่งในโครงงานนี้จากโหลดประมาณ 5.5 kw

จาก $S^2 = \sqrt{P^L + Q^2}$

$KVAR = (KW)(\tan \varnothing)$

จาก $\cos \varnothing = 0.79$

ได้ $\tan \varnothing = 0.78$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KVAR = (5.5)(0.78)

= 4.3 KVAR

จาก $C = Q(2\pi f)(V^2)$

$= 4300 / (2\pi\ 50)\ (380)^2$

$= 94.8\ \mu F$

จึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่หาได้ง่ายในท้องตลาด คือ 100 $\mu$F นำค่าตัวเก็บประจุนี้มาย้อนกลับไปคำนวณค่า KVAR จะได้

$Q = C(2\pi f)(V^2)$

$= 100 \times 10^{-6} (2\pi\ 50)(380)^2$

$= 4.5$ KVAR

เนื่องจากในระบบในโครงงานมีฮาร์โมนิคส์ ลำดับที่ 5 และ 7 เด่น จึงออกแบบจูนฟิลเตอร์ เมื่อกรองฮาร์โมนิคส์ทั้งลำดับ 5 และ 7 นำค่าตัวเก็บประจุ ที่คำนวณได้ ไปคำนวณหาค่ารีแอคเตอร์ ที่ความถี่เรโซแน่นซ์กัน

จาก $Y_c = Y_L$

$nwc = 1/nwL$

$$L = \frac{1}{n^2 w^2 c}$$

หาค่ารีแอคเตอร์ของฮาร์โมนิคส์ลำดับที่ 5

$$L = \frac{1}{5^2 (2.\pi.50)^2 100 \times 10^{-6}}$$

$$= \frac{1}{25 \times \pi^2}$$

$= 4.053$ mH

หาค่ารีแอคเตอร์ของฮาร์โมนิคส์ลำดับที่ 7

$$L = \frac{1}{7^2 (2.\pi.50)^2 100 \times 10^{-6}}$$

$$= \frac{1}{49 \times \pi^2}$$

$= 2.068$ mH

**4.4 ข้อควรคำนึงถึงเกี่ยวกับการแก้ปัญหาฮาร์โมนิคส์**

**ข้อควรคำนึงถึงเกี่ยวกับฟิลเตอร์**

1. ฟิลเตอร์ที่ออกแบบสำหรับงานหนึ่ง ๆ ไม่ใช้แบบที่สามารถใช้กับงานทุกงานได้ ถ้าจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ฟิลเตอร์ทำงานได้ จะต้องวิเคราะห์ฮาร์โมนิคส์ของระบบทุกครั้งที่จะออกแบบ ค่ากระแสฮาร์โมนิคส์และข้อมูลต่างๆ ต้องใช้ค่าจริงที่วัดได้เสมอ

2. ข้อมูลที่สำคัญที่ต้องทราบมีดังต่อไปนี้

- กระแสฮาร์โมนิคส์ต่างๆ จากแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิคส์
- แรงดันอิมพีแดนซ์ (impedance voltage) ของหม้อแปลง
-วัดค่ากระแสฮาร์โมนิคส์ที่ระดับต่างๆ โดยใช้ harmonic analyser
-ค่าของกระแสฮาร์โมนิคส์เนื่องจากโหลดที่อาจจะเพิ่มเข้าไปในระบบในอนาคตตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรฟิลเตอร์

1. ต้องมีการลดพิกัด (derate) สำหรับ ตัวเก็บประจุที่ใช้เนื่องจากฮาร์โมนิคส์

2. ในการออกแบบวงจรฟิลเตอร์ ต้องคำนวณค่ารีแอกแตนซ์ขนาดใหม่ และต้องให้แน่ใจว่าไม่ไปตรงที่ระดับฮาร์โมนิคส์ที่มีในระบบ

3. แรงดันที่ตัวเก็บประจุจะสูงกว่าปกติเนื่องจากมีรีแอคเตอร์ต่ออยู่ เช่น ถ้าปรับตั้งที่ระดับฮาร์โมนิคส์ 4.5 (225 Hz) แรงดันจะเพิ่มขึ้นประมาณ 5 % ดังนั้นสำหรับระบบไฟฟ้า 415 V ตัวเก็บประจุควรออกแบบสำหรับทำงานได้ที่ $\frac{415}{0.95} = 440\,\text{V}$

ข้อควรคำนึงเกี่ยวกับรีแอคเตอร์

1. สำหรับดีจูนฟิลเตอร์ต้องปรับตั้งรีแอคเตอร์ให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ต่ำกว่าระดับฮาร์โมนิคส์ต่ำสุดที่มีในระบบ เช่น ถ้าระบบมีระดับฮาร์โมนิคส์ที่ 5 อยู่ ต้องปรับตั้งให้ต่ำกว่า 5 เป็นต้น

2. ถ้าปรับตั้งไปที่ระดับความถี่ 4.5 (225 Hz) ฟิลเตอร์จะมีค่ารีแอกแตนซ์เป็นอินดักทีฟ (ดูคล้ายมี อินดักแตนซ์ต่ออยู่อย่างเดียว) ที่ระดับฮาร์โมนิคส์ที่ 5 และสูงกว่า ดังนั้นจึงเกิดเรโซแนนซ์ขนานที่ระดับฮาร์โมนิคส์ 5 และสูงกว่าไม่ได้ นั่นคือ กระแสฮาร์โมนิคส์ที่ 5 และสูงกว่าจะไหลเข้าวงจรฟิลเตอร์น้อย

3. ระบบรีแอคเตอร์แรงดันต่ำ ( LV reactor) จะใช้แบบแกนเหล็กระบายความร้อนด้วยอากาศ (iron-cored, air cooled) รีแอคเตอร์แรงดันสูง (HV reactor ) จะใช้แบบแกนเหล็กระบายความร้อนด้วยน้ำมัน (iron-cored, oil cooled)

4. ระบบแรงดันต่ำและแรงดันสูงที่ใช้แบบหลายขั้นและควบคุมแบบอัตโนมัติแต่ละขั้น จะต้องมีรีแอคเตอร์เองในทุกขั้น เพื่อให้ใช้ได้ว่าการปิดเปิดวงจร (switching)จะเป็นอย่างไร

5. การออกแบบรีแอคเตอร์สำหรับตัวเก็บประจุขนาด 50 kVAR ต้องระวังให้มาก ถ้าระบบมีกระแสฮาร์โมนิคส์สูงและถ้าออกแบบปรับตั้งเข้าใกล้ระดับฮาร์โมนิคส์ที่ 5 มากเกินไป ความคลาดเคลื่อนของค่าตัวเก็บประจุและค่าอินดักแตนซ์ในการผลิตอาจทำให้ไปเกิดเรโซแนนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใกล้ระดับฮาร์โมนิคส์ที่ 5 มาก ซึ่งมีผลทำให้เกิดภาวะโหลดเกินมากในตัวเก็บประจุและรีแอคเตอร์

ข้อมูลต่อไปนี้ จำเป็นต้องใช้สำหรับการวิเคราะห์ด้านฮาร์โมนิคส์

1. การแปรของระดับแรงดัน (system voltage variation)
2. ระดับของฟอลต์ของระบบ (minimum and maximum fault level)
3. ระบบไฟฟ้าของโรงงานที่แสดง
   - ตำแหน่งที่ตั้ง , ขนาด ของโหลดที่ให้กำเนิดฮาร์โมนิคส์
   - ตำแหน่งที่ตั้ง , ขนาด ของโหลดขนาดใหญ่
   - ตำแหน่งที่ตั้ง , ขนาด ของตัวเก็บประจุที่มีอยู่เดิม
   - ตำแหน่งที่ตั้ง , ขนาด ที่วางแผนที่ติดตั้งตัวเก็บประจุ
   - ตำแหน่งที่ตั้ง , ขนาด ของหม้อแปลง
   - ขนาดของโหลดที่จะต่อเข้าในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบขนาดลวด

| เบอร์ | ความโต | | พื้นที่หน้าตัด | | ทนกระแสได้ (แอมแปร์) | | เป็นฟิวส์ | น้ำหนัก/ | ความต้าน | เบอร์ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| S.W.G | นิ้ว | มม. | เซอคูลา มิล | ตาราง มม. | หุ้มยาง | ลวดเปล่า | ทนได้ (Amp.) | 100 ม. (กก.) | ทาน /100 ม. | A.W.G. |
| 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 | 2 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 | 2.643 | 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 | 3.269 | 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 17 |
| - | - | - | 2,583 | - | 6 | 10 | - | 1.173 | 1.35 | 17 18 |
| 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 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.1 (ต่อ)

| เบอร์ | ความโต | | พื้นที่หน้าตัด | | ทนกระแสได้ (แอมแปร์) | | เป็นฟิวส์ | น้ำหนัก/ | ความต้าน | เบอร์ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| S.W.G | นิ้ว | มม. | เซอคูลามิล | ตาราง มม. | หุ้มยาง | ลวดเปล่า | ทนได้ (Amp.) | 100 ม. (กก.) | ทาน /100 ม. | A.W.G. |
| 21 | 0.032 | 0.812 | 1,022 | 0.527 | - | - | - | 0.464 | 3.412 | 20 |
| 22 | 0.028 | 0.711 | 810.1 | 0.404 | - | - | 480 | 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 | 0.354 | 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 | 100.2 | 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 | | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.1(ต่อ)

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 | 0.001 | Std. | Std. | Std. | Std. | Std. | Std. | Std. | Std. | |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5

## ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

### 5.1 การทดลองและวิธีการทดลอง

#### 5.1.1 การทดลองวัด %THD โดยใช้ Harmonics Analyser และผลการทดลอง

**อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง**

-มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3.5 kW 380/220V 7.9/13.5A Y/$\Delta$ 4-Pole

-โหลดมอเตอร์โดยใช้ Eddy Current Break

-อินเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ แบบ Full-Bridge

-แอมป์มิเตอร์,โวลท์มิเตอร์

-Variac 1 เฟส

-วงจรเรียงกระแส

-Harmonics Analyser

**วิธีการทดลอง**

ต่อวงจรดังรูปที่ 5.1 ทำการเดินเครื่องมอเตอร์(ต่อวงจรแบบ Y) ซึ่งควบคุมความถี่ด้วยอินเวอร์เตอร์โดยควบคุมความถี่ไว้ที่ 50 Hz จากนั้นทำการวัด %THDi และ %THDv ที่เอาท์พุทของแหล่งจ่าย และบันทึกผลการทดลองในสภาวะต่าง ๆ ดังนี้

1.เดินเครื่องมอเตอร์แบบไม่มีภาระ ไม่มีวงจรฟิลเตอร์

2.เดินเครื่องมอเตอร์แบบเต็มภาระ ไม่มีวงจรฟิลเตอร์

3.เดินเครื่องมอเตอร์แบบไม่มีภาระ มีวงจรฟิลเตอร์ลำดับที่ 5 และ 7

4.เดินเครื่องมอเตอร์แบบเต็มภาระ มีวงจรฟิลเตอร์ลำดับที่ 5 และ 7

5.เดินเครื่องมอเตอร์แบบไม่มีภาระ มีวงจรฟิลเตอร์ลำดับที่ 5

6.เดินเครื่องมอเตอร์แบบเต็มภาระ มีวงจรฟิลเตอร์ลำดับที่ 5

<u>หมายเหตุ</u> นำผลการทดลองที่ได้มาเขียนเป็นกราฟแท่ง เพื่อเปรียบเทียบก่อนและหลังจากต่อวงจรฟิลเตอร์เข้าไปในระบบ

#### 5.1.2 การทดลองเพื่อสังเกตรูปคลื่นสัญญาณของกระแส

**อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง**

-ใช้อุปกรณ์และวงจรการทดลองของหัวข้อ 5.1.1

-CT 50/5A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ตัวต้านทานขนาด 0.1 โอห์ม 10 วัตต์

-ออสซิลโลสโคป

-กล้องถ่ายรูป

**วิธีการทดลอง**

ใช้วงจรการทดลองเดียวกันกับหัวข้อ 5.1.1 ทำการเดินเครื่องมอเตอร์โดยผ่านอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมความถี่ที่ 50 Hz เดินเครื่องมอเตอร์ที่พิกัด(ต่อวงจรแบบ Y) มอเตอร์มีความเร็วรอบ 1,330 รอบ/นาที รับภาระ 7.8 กิโลกรัม ทำการต่อ CT เข้าไปในวงจรที่ตำแหน่งต่าง ๆ เพื่อที่จะนำสัญญาณกระแสจาก CT มาผ่านตัวต้านทานขนาด 0.1 โอห์มแล้วจึงใช้ออสซิลโลสโคปจับสัญญาณแรงดันคร่อมตัวต้านทานจะทำให้ได้รูปคลื่นสัญญาณของกระแสเดียวกันกับกระแสที่ไหลในวงจร ณ ตำแหน่งนั้น จากนั้นทำการบันทึกรูปคลื่นสัญญาณของกระแสที่ตำแหน่งและสภาวะต่างๆ ดังนี้

1.CT ต่อที่เอาท์พุทของแหล่งจ่ายเปลี่ยนสภาวะดังนี้

1.1 ไม่มีวงจรฟิลเตอร์

1.2 มีวงจรฟิลเตอร์

2.CT ต่อที่อินพุทของวงจรฟิลเตอร์ลำดับที่ 5

2.1 มีวงจรฟิลเตอร์ลำดับที่ 5 และ 7

2.2 มีวงจรฟิลเตอร์ลำดับที่ 5

3.CT ต่อที่อินพุทของวงจรฟิลเตอร์ลำดับที่ 7

<u>หมายเหตุ</u> รูปคลื่นสัญญาณกระแสที่บันทึกได้จากออสซิลโลสโคป ช่องที่ 1 ที่มีพารามิเตอร์ ดังนี้

-Volt/div = 1 V

-Time/Div = 5 ms

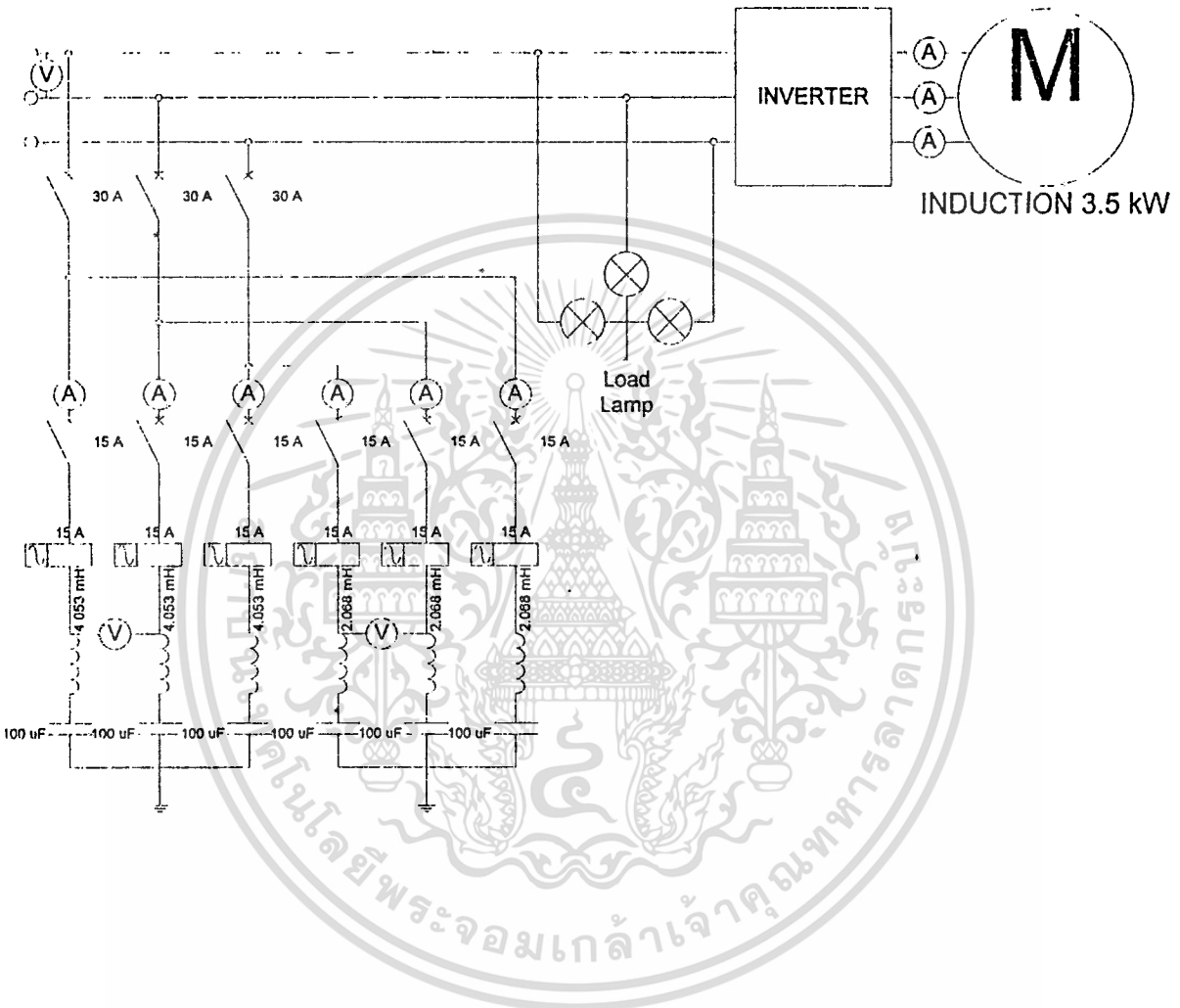
-สาย Probe ของออสซิลโลสโคปเป็น 1 เท่า

**บันทึกรูปคลื่นสัญญาณกระแสที่สังเกตได้จากออสซิลโลสโคปด้วยกล้องถ่ายรูป**

**5.2 ผลการทดลอง**

**เมื่อทำการทดลองตามหัวข้อ 5.1อย่างละเอียด ได้ผลการทดลองดังนี้**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 5.1 แสดงรูปการต่อวงจรในการทดลองวงจรฟิลเตอร์**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 แสดง %THDi ของระบบขณะรับภาระเต็มที่ไม่มี Harmonics Filter

| Phase | A | | B | | C | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Parameter | %THDi | Current | %THDi | Current | %THDi | Current |
| Total | 132.4 | 8.87 | 137.2 | 8.81 | 135.8 | 9 |
| HDC | 14.1 | 0.74 | 13.6 | 0.65 | 13.7 | 0.73 |
| 1 | 100 | 5.32 | 100 | 4.8 | 100 | 5.51 |
| 2 | 1.3 | 0.06 | 1.6 | 0.07 | 1.3 | 0.07 |
| 3 | 13.8 | 0.73 | 9.6 | 0.46 | 10.1 | 0.53 |
| 4 | 1.1 | 0.05 | 1.6 | 0.07 | 1.6 | 0.08 |
| 5 | 83.9 | 4.47 | 90.8 | 4.35 | 86.8 | 4.64 |
| 6 | 0.7 | 0.03 | 1 | 0.04 | 1.1 | 0.05 |
| 7 | 78 | 4.15 | 74.1 | 3.55 | 79.5 | 4.25 |
| 8 | 1 | 0.05 | 1.3 | 0.05 | 1 | 0.05 |
| 9 | 9.8 | 0.51 | 9.3 | 0.44 | 5.7 | 0.3 |
| 10 | 0.6 | 0.02 | 1.2 | 0.05 | 1.2 | 0.06 |
| 11 | 47.6 | 2.53 | 56.3 | 2.7 | 51.1 | 2.73 |
| 12 | 0.3 | 0.01 | 0.5 | 0.02 | 0.8 | 0.04 |
| 13 | 39.1 | 2.08 | 35.7 | 1.71 | 41.2 | 2.2 |
| 14 | 0.4 | 0.02 | 0.9 | 0.04 | 0.5 | 0.02 |
| 15 | 3.7 | 0.19 | 5.6 | 0.26 | 3.3 | 0.17 |
| 16 | 0.2 | 0.01 | 0.8 | 0.03 | 0.6 | 0.02 |
| 17 | 13.6 | 0.72 | 18.5 | 0.88 | 15.2 | 0.81 |
| 18 | 0.2 | 0.01 | 0.4 | 0.01 | 0.5 | 0.02 |
| 19 | 6.5 | 0.34 | 6.7 | 0.31 | 8.7 | 0.46 |
| 20 | 0.3 | 0.01 | 0.3 | 0.01 | 0.3 | 0.01 |
| 21 | 2.3 | 0.11 | 1.1 | 0.04 | 2 | 0.1 |
| 22 | 0.2 | 0.01 | 0.6 | 0.02 | 0.5 | 0.02 |
| 23 | 4.6 | 0.24 | 3 | 0.14 | 3.5 | 0.18 |
| 24 | 0.3 | 0.01 | 0.4 | 0.01 | 0.5 | 0.02 |
| 25 | 6.7 | 0.35 | 4.2 | 0.02 | 6 | 0.31 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 แสดง %THDi ของระบบขณะรับภาระเต็มที่เมื่อมี Harmonics Filter

| Phase | A | | B | | C | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Parameter | %THDi | Current | %THDi | Current | %THDi | Current |
| Total | 52 | 16.81 | 71.8 | 10.79 | 62.1 | 15.5 |
| HDC | 5.3 | 0.78 | 8.5 | 0.75 | 5.9 | 0.77 |
| 1 | 100 | 14.69 | 100 | 8.7 | 100 | 13.14 |
| 2 | 0.6 | 0.08 | 0.9 | 0.07 | 0.5 | 0.06 |
| 3 | 8.3 | 1.22 | 9.7 | 0.84 | 4.2 | 0.55 |
| 4 | 0.5 | 0.07 | 1 | 0.08 | 0.9 | 0.11 |
| 5 | 34.6 | 5.16 | 48.2 | 4.22 | 39.3 | 5.17 |
| 6 | 0.5 | 0.07 | 1.1 | 0.09 | 1 | 0.14 |
| 7 | 29 | 4.31 | 36.1 | 3.1 | 39.9 | 5.23 |
| 8 | 0.5 | 0.07 | 0.8 | 0.07 | 0.3 | 0.03 |
| 9 | 4.5 | 0.66 | 7.2 | 0.62 | 1.7 | 0.22 |
| 10 | 0.2 | 0.03 | 0.7 | 0.06 | 0.4 | 0.05 |
| 11 | 16.6 | 2.47 | 30.2 | 2.63 | 20.5 | 2.69 |
| 12 | 0.2 | 0.03 | 0.3 | 0.02 | 0.3 | 0.04 |
| 13 | 15.5 | 2.3 | 20.2 | 1.74 | 16.3 | 2.12 |
| 14 | 0.2 | 0.04 | 0.5 | 0.04 | 0.2 | 0.02 |
| 15 | 2.2 | 0.33 | 4.2 | 0.35 | 1.4 | 0.18 |
| 16 | 0.1 | 0.02 | 0.4 | 0.03 | 0.3 | 0.03 |
| 17 | 6.4 | 0.94 | 11.6 | 1 | 7 | 0.93 |
| 18 | 0.1 | 0.01 | 0.1 | 0.01 | 0.2 | 0.02 |
| 19 | 4.6 | 0.69 | 5.3 | 0.45 | 3.7 | 0.47 |
| 20 | 0.1 | 0.01 | 0.3 | 0.02 | 0 | 0.01 |
| 21 | 0.6 | 0.1 | 1.1 | 0.1 | 0.2 | 0.03 |
| 22 | 0.1 | 0.02 | 0.2 | 0.02 | 0.1 | 0.01 |
| 23 | 0.9 | 0.03 | 1 | 0.08 | 0.9 | 0.13 |
| 24 | 0.1 | 0.01 | 0.1 | 0.01 | 0.1 | 0.01 |
| 25 | 1.2 | 0.17 | 2.1 | 0.17 | 1 | 0.14 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 แสดง %THDi ของระบบขณะไม่มีภาระและไม่มี Harmonics Filter

| Phase | A | | B | | C | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Parameter | %THDi | Current | %THDi | Current | %THDi | Current |
| Total | 143.9 | 3.75 | 164.9 | 3.23 | 155.1 | 4.17 |
| HDC | 40 | 0.83 | 50.1 | 0.81 | 36.4 | 0.8 |
| 1 | 100 | 2.08 | 100 | 1.62 | 100 | 2.2 |
| 2 | 2.3 | 0.04 | 2.7 | 0.04 | 1.6 | 0.03 |
| 3 | 29.7 | 0.61 | 34.3 | 0.55 | 9.5 | 0.2 |
| 4 | 2.2 | 0.04 | 2.3 | 0.03 | 1.3 | 0.02 |
| 5 | 83 | 1.72 | 93.1 | 1.51 | 91.2 | 2.01 |
| 6 | 1.4 | 0.02 | 1.3 | 0.01 | 0.2 | 0 |
| 7 | 78.8 | 1.63 | 80.4 | 1.3 | 83.3 | 1.83 |
| 8 | 1.3 | 0.02 | 2.3 | 0.03 | 1 | 0.02 |
| 9 | 20.9 | 0.43 | 27 | 0.43 | 6.3 | 0.13 |
| 10 | 1.7 | 0.03 | 1.6 | 0.02 | 0.8 | 0.01 |
| 11 | 53.7 | 1.11 | 70.1 | 1.13 | 65.1 | 1.43 |
| 12 | 1.1 | 0.02 | 1.1 | 0.01 | 0.4 | 0 |
| 13 | 47.8 | 0.99 | 50.9 | 0.82 | 52.8 | 1.16 |
| 14 | 0.7 | 0.01 | 1.9 | 0.02 | 0.4 | 0 |
| 15 | 9.2 | 0.18 | 15.4 | 0.24 | 2 | 0.04 |
| 16 | 1 | 0.01 | 0.8 | 0.01 | 0.2 | 0 |
| 17 | 24 | 0.49 | 39.5 | 0.63 | 32.5 | 0.71 |
| 18 | 0.9 | 0.01 | 0.8 | 0.01 | 0.2 | 0 |
| 19 | 18.9 | 0.38 | 22.9 | 0.37 | 21.4 | 0.47 |
| 20 | 0.3 | 0 | 0.9 | 0.01 | 0.1 | 0 |
| 21 | 2.2 | 0.04 | 4.9 | 0.07 | 1.9 | 0.04 |
| 22 | 0.8 | 0.01 | 0.3 | 0 | 0.4 | 0 |
| 23 | 5.1 | 0.1 | 13.3 | 0.21 | 6.5 | 0.14 |
| 24 | 0.8 | 0.01 | 0.6 | 0 | 0.5 | 0.01 |
| 25 | 1.8 | 0.03 | 6.1 | 0.09 | 2.1 | 0.04 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 แสดง %THDi ของระบบขณะไม่มีภาระและมี Harmonics Filter

| Phase | A | | B | | C | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Parameter | %THDi | Current | %THDi | Current | %THDi | Current |
| Total | 21.4 | 13.08 | 31.1 | 7.87 | 28.5 | 13.14 |
| HDC | 6.3 | 0.78 | 10.2 | 0.76 | 6.1 | 0.77 |
| 1 | 100 | 12.59 | 100 | 7.48 | 100 | 12.61 |
| 2 | 0.4 | 0.04 | 0.6 | 0.04 | 0.2 | 0.02 |
| 3 | 10.4 | 1.3 | 10.8 | 0.8 | 2.6 | 0.32 |
| 4 | 0.4 | 0.05 | 0.5 | 0.03 | 0.3 | 0.02 |
| 5 | 14.8 | 1.86 | 11.7 | 0.87 | 16.3 | 2.05 |
| 6 | 0.5 | 0.06 | 1.8 | 0.12 | 0.4 | 0.04 |
| 7 | 14.9 | 1.88 | 15 | 1.12 | 16.9 | 2.13 |
| 8 | 0.3 | 0.03 | 0.5 | 0.04 | 0.2 | 0.02 |
| 9 | 6.6 | 0.82 | 7.6 | 0.56 | 1.4 | 0.17 |
| 10 | 0.2 | 0.02 | 0.3 | 0.02 | 0.1 | 0.01 |
| 11 | 7.2 | 0.9 | 13.5 | 1 | 10.4 | 0.13 |
| 12 | 0.1 | 0.01 | 0.2 | 0.01 | 0.1 | 0.01 |
| 13 | 7.7 | 0.96 | 10.8 | 0.8 | 9.1 | 1.14 |
| 14 | 0.1 | 0.01 | 0.4 | 0.02 | 0.1 | 0.01 |
| 15 | 3.8 | 0.47 | 4.4 | 0.33 | 0.8 | 0.09 |
| 16 | 0.1 | 0.01 | 0.2 | 0.01 | 0.1 | 0.01 |
| 17 | 3.6 | 0.44 | 8 | 0.59 | 5.9 | 0.74 |
| 18 | 0.1 | 0.01 | 0.3 | 0.01 | 0 | 0 |
| 19 | 3.6 | 0.45 | 5 | 0.57 | 4.4 | 0.54 |
| 20 | 0 | 0 | 0.2 | 0.01 | 0 | 0 |
| 21 | 1 | 0.12 | 1.2 | 0.08 | 0.2 | 0.01 |
| 22 | 0 | 0 | 0.2 | 0.01 | 0.1 | 0 |
| 23 | 1 | 0.12 | 2.9 | 0.21 | 1.8 | 0.23 |
| 24 | 0 | 0 | 0.2 | 0.01 | 0.1 | 0.01 |
| 25 | 0.7 | 0.08 | 1.3 | 0.1 | 1.2 | 0.14 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 แสดง %THDi ของระบบขณะไม่มีภาระและมี Harmonics Filter ลำดับที่ 5

| Phase | A | | B | | C | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Parameter | %THDi | Current | %THDi | Current | %THDi | Current |
| Total | 45.7 | 7.58 | 36 | 7.9 | 46.2 | 8.42 |
| HDC | 10.2 | 0.7 | 9.6 | 0.71 | 9.2 | 0.69 |
| 1 | 100 | 6.9 | 100 | 7.31 | 100 | 7.62 |
| 2 | 1.1 | 0.07 | 0.8 | 0.05 | 0.9 | 0.07 |
| 3 | 13.3 | 0.9 | 7.3 | 0.53 | 4.2 | 0.32 |
| 4 | 1 | 0.07 | 0.7 | 0.05 | 0.8 | 0.06 |
| 5 | 27 | 1.85 | 18.6 | 1.38 | 25.9 | 1.95 |
| 6 | 1 | 0.07 | 0.5 | 0.04 | 0.6 | 0.04 |
| 7 | 20.4 | 1.4 | 17 | 1.26 | 24 | 1.8 |
| 8 | 0.8 | 0.05 | 0.7 | 0.05 | 0.7 | 0.05 |
| 9 | 9.1 | 0.61 | 5.4 | 0.39 | 3.2 | 0.54 |
| 10 | 0.6 | 0.04 | 0.4 | 0.03 | 0.6 | 0.04 |
| 11 | 16.7 | 1.16 | 16.6 | 1.23 | 18.8 | 0.42 |
| 12 | 0.4 | 0.02 | 0.3 | 0.01 | 0.3 | 0.02 |
| 13 | 15.9 | 1.09 | 12 | 0.89 | 17.8 | 1.35 |
| 14 | 0.5 | 0.03 | 0.5 | 0.03 | 0.3 | 0.02 |
| 15 | 5.1 | 0.35 | 3.8 | 0.28 | 3.2 | 0.23 |
| 16 | 0.3 | 0.02 | 0.3 | 0.01 | 0.4 | 0.02 |
| 17 | 9.5 | 0.65 | 10 | 0.73 | 9.9 | 0.74 |
| 18 | 0.3 | 0.02 | 0.3 | 0.02 | 0.2 | 0.01 |
| 19 | 7.9 | 0.54 | 5.7 | 0.42 | 8.6 | 0.64 |
| 20 | 0.4 | 0.02 | 0.2 | 0.01 | 0.3 | 0.02 |
| 21 | 1.1 | 0.07 | 1.9 | 0.14 | 2 | 0.14 |
| 22 | 0.3 | 0.01 | 0.2 | 0.01 | 0.3 | 0.02 |
| 23 | 3.8 | 0.25 | 3.6 | 0.27 | 2.7 | 0.2 |
| 24 | 0.2 | 0.01 | 0.2 | 0.01 | 0.2 | 0.01 |
| 25 | 2.2 | 0.15 | 1.7 | 0.12 | 2.1 | 0.16 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 แสดง %THDi ของระบบขณะรับภาระเต็มที่และมี Harmonics Filter ลำดับที่ 5

| Phase | A | | B | | C | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Parameter | %THDi | Current | %THDi | Current | %THDi | Current |
| Total | 80.5 | 10.99 | 74 | 10.79 | 76.9 | 11.46 |
| HDC | 8.6 | 0.74 | 8.4 | 0.73 | 7.7 | 0.7 |
| 1 | 100 | 8.49 | 100 | 8.68 | 100 | 9.06 |
| 2 | 0.8 | 0.07 | 0.9 | 0.07 | 0.8 | 0.07 |
| 3 | 8.9 | 0.76 | 5.9 | 0.5 | 5.7 | 0.51 |
| 4 | 0.9 | 0.07 | 1 | 0.08 | 0.9 | 0.08 |
| 5 | 54.9 | 4.72 | 50.2 | 4.38 | 51.4 | 4.71 |
| 6 | 0.6 | 0.05 | 1.3 | 0.11 | 1.1 | 0.1 |
| 7 | 41.7 | 0.55 | 37 | 3.2 | 41.6 | 3.75 |
| 8 | 0.6 | 0.05 | 0.6 | 0.05 | 0.6 | 0.05 |
| 9 | 5.5 | 0.46 | 6.5 | 0.56 | 3.8 | 0.34 |
| 10 | 0.6 | 0.05 | 0.5 | 0.04 | 0.6 | 0.05 |
| 11 | 29.9 | 2.57 | 31.1 | 2.72 | 29.1 | 2.65 |
| 12 | 0.4 | 0.03 | 0.2 | 0.01 | 0.4 | 0.03 |
| 13 | 25.1 | 2.5 | 20.3 | 1.75 | 24.8 | 2.24 |
| 14 | 0.4 | 0.03 | 0.2 | 0.02 | 0.3 | 0.02 |
| 15 | 2.3 | 0.2 | 4.6 | 0.4 | 2.6 | 0.24 |
| 16 | 0.4 | 0.03 | 0.2 | 0.01 | 0.3 | 0.02 |
| 17 | 10.2 | 0.87 | 11.4 | 0.99 | 9.5 | 0.87 |
| 18 | 0.3 | 0.02 | 0.1 | 0.01 | 0.2 | 0.01 |
| 19 | 5.7 | 0.48 | 4.7 | 0.4 | 5.9 | 0.53 |
| 20 | 0.2 | 0.02 | 0.1 | 0.01 | 0.2 | 0.01 |
| 21 | 0.8 | 0.07 | 0.8 | 0.07 | 1 | 0.08 |
| 22 | 0.2 | 0.02 | 0.2 | 0.02 | 0.1 | 0.01 |
| 23 | 2.2 | 0.18 | 1.4 | 0.12 | 2.1 | 0.19 |
| 24 | 0.2 | 0.01 | 0.1 | 0.01 | 0.2 | 0.01 |
| 25 | 3.8 | 0.31 | 2.2 | 0.19 | 3.6 | 0.32 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 แสดง %THDv ของระบบขณะรับภาระเต็มที่ไม่มี Harmonics Filter

| Phase | AB | | BC | | CA | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Parameter | %THDv | Voltage | %THDv | Voltage | %THDv | Voltage |
| Total | 0.9 | 386.2 | 0.8 | 389.3 | 0.9 | 387.4 |
| HDC | 0 | 0.07 | 0 | 0.07 | 0 | 0.21 |
| 1 | 100 | 386.5 | 100 | 389.3 | 100 | 387.4 |
| 2 | 0 | 0.05 | 0 | 0.02 | 0 | 0.1 |
| 3 | 0.2 | 0.9 | 0 | 0.15 | 0 | 0.54 |
| 4 | 0 | 0.03 | 0 | 0.02 | 0 | 0.02 |
| 5 | 0.3 | 1.22 | 0.1 | 0.57 | 0.1 | 0.64 |
| 6 | 0 | 0.02 | 0 | 0 | 0 | 0.02 |
| 7 | 0.5 | 1.94 | 0.4 | 1.72 | 0.6 | 2.26 |
| 8 | 0 | 0.02 | 0 | 0.01 | 0 | 0.02 |
| 9 | 0 | 0.52 | 0 | 0.15 | 0 | 0.18 |
| 10 | 0 | 0.03 | 0 | 0.01 | 0 | 0.04 |
| 11 | 0.5 | 2.21 | 0.5 | 2.01 | 0.5 | 1.96 |
| 12 | 0 | 0.01 | 0 | 0.01 | 0 | 0.01 |
| 13 | 0.3 | 1.39 | 0.3 | 1.51 | 0.4 | 1.53 |
| 14 | 0 | 0.02 | 0 | 0.02 | 0 | 0.01 |
| 15 | 0 | 0.22 | 0 | 0.15 | 0 | 0.09 |
| 16 | 0 | 0.02 | 0 | 0.04 | 0 | 0.04 |
| 17 | 0.02 | 0.9 | 0.2 | 0.75 | 0.2 | 0.78 |
| 18 | 0 | 0.01 | 0 | 0.01 | 0 | 0.02 |
| 19 | 0 | 0.36 | 0 | 0.29 | 0 | 0.38 |
| 20 | 0 | 0.01 | 0 | 0.01 | 0 | 0.04 |
| 21 | 0 | 0.09 | 0 | 0.02 | 0 | 0.04 |
| 22 | 0 | 0.02 | 0 | 0.01 | 0 | 0 |
| 23 | 0 | 0.24 | 0 | 0.29 | 0 | 0.29 |
| 24 | 0 | 0.03 | 0 | 0.01 | 0 | 0.01 |
| 25 | 0 | 0.28 | 0 | 0.29 | 0 | 0.17 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 แสดง%THDv ของระบบขณะไม่มีภาระและไม่มี Harmonics Filter

| Phase | AB | | BC | | CA | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Parameter | %THDv | Voltage | %THDv | Voltage | %THDv | Voltage |
| Total | 0.7 | 386.8 | 0.6 | 391.4 | 0.6 | 389.9 |
| HDC | 0 | 0.07 | 0 | 0.05 | 0 | 0.26 |
| 1 | 100 | 387.6 | 100 | 391.7 | 100 | 389.7 |
| 2 | 0 | 0.09 | 0 | 0.05 | 0 | 0.07 |
| 3 | 0.2 | 0.84 | 0 | 0.12 | 0 | 0.55 |
| 4 | 0 | 0.04 | 0 | 0.02 | 0 | 0.02 |
| 5 | 0.5 | 2.05 | 0.3 | 1.19 | 0.2 | 1.03 |
| 6 | 0 | 0.04 | 0 | 0 | 0 | 0.02 |
| 7 | 0.2 | 0.84 | 0.1 | 0.69 | 0.2 | 0.87 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0.02 | 0 | 0.01 |
| 9 | 0 | 0.47 | 0 | 0.09 | 0 | 0.1 |
| 10 | 0 | 0.02 | 0 | 0.02 | 0 | 0.02 |
| 11 | 0.3 | 1.34 | 0.3 | 1.3 | 0.3 | 1.2 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0.02 | 0 | 0.01 |
| 13 | 0.2 | 0.82 | 0.2 | 0.87 | 0.2 | 0.81 |
| 14 | 0 | 0.02 | 0 | 0 | 0 | 0.01 |
| 15 | 0 | 0.11 | 0 | 0.04 | 0 | 0.1 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0.01 | 0 | 0.04 |
| 17 | 0.1 | 0.7 | 0.1 | 0.62 | 0.1 | 0.62 |
| 18 | 0 | 0.02 | 0 | 0.01 | 0 | 0 |
| 19 | 0 | 0.47 | 0.1 | 0.59 | 0.1 | 0.53 |
| 20 | 0 | 0.02 | 0 | 0.01 | 0 | 0.01 |
| 21 | 0 | 0.09 | 0 | 0.05 | 0 | 0.05 |
| 22 | 0 | 0.04 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 23 | 0 | 0.09 | 0 | 0.15 | 0 | 0.09 |
| 24 | 0 | 0 | 0 | 0.02 | 0 | 0.02 |
| 25 | 0 | 0.11 | 0 | 0.04 | 0 | 0.15 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.9 แสดง %THDv ของระบบขณะรับภาระเต็มที่และ มี Harmonics Filter

| Phase | AB | | BC | | CA | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Parameter | %THDv | Voltage | %THDv | Voltage | %THDv | Voltage |
| Total | 0.9 | 385.6 | 0.8 | 390 | 0.7 | 388.6 |
| HDC | 0 | 0.3 | 0 | 0.09 | 0 | 0.17 |
| 1 | 100 | 385.6 | 100 | 390 | 100 | 388 |
| 2 | 0 | 0.07 | 0 | 0.09 | 0 | 0.12 |
| 3 | 13 | 1.11 | 0 | 0.27 | 0.1 | 0.61 |
| 4 | 0 | 0.05 | 0 | 0.02 | 0 | 0 |
| 5 | 0.3 | 1.29 | 0.1 | 0.71 | 0 | 0.37 |
| 6 | 0 | 0.03 | 0 | 0.02 | 0 | 0.01 |
| 7 | 0.3 | 1.2 | 0.4 | 1.58 | 0.4 | 1.72 |
| 8 | 0 | 0.03 | 0 | 0.02 | 0 | 0.02 |
| 9 | 0 | 0.56 | 0 | 0.09 | 0 | 0.12 |
| 10 | 0 | 0.04 | 0 | 0.01 | 0 | 0.01 |
| 11 | 0.5 | 1.95 | 0.5 | 2.13 | 0.4 | 1.61 |
| 12 | 0 | 0.04 | 0 | 0.02 | 0 | 0.04 |
| 13 | 0.3 | 1.33 | 0.3 | 1.25 | 0.3 | 1.16 |
| 14 | 0 | 0.03 | 0 | 0.02 | 0 | 0.04 |
| 15 | 0 | 0.22 | 0 | 0.14 | 0 | 0.23 |
| 16 | 0 | 0.02 | 0 | 0 | 0 | 0.04 |
| 17 | 0.2 | 0.83 | 0.2 | 0.9 | 0.1 | 0.7 |
| 18 | 0 | 0.01 | 0 | 0.02 | 0 | 0.02 |
| 19 | 0 | 0.53 | 0 | 0.33 | 0 | 0.35 |
| 20 | 0 | 0.02 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 21 | 0 | 0.1 | 0 | 0.04 | 0 | 0.09 |
| 22 | 0 | 0.04 | 0 | 0 | 0 | 0.01 |
| 23 | 0 | 0.24 | 0 | 0.12 | 0 | 0.21 |
| 24 | 0 | 0.05 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 25 | 0 | 0.29 | 0 | 0.28 | 0 | 0.09 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.10 แสดง %THDv ของระบบขณะไม่มีภาระและมี Harmonics Filter

| Phase | AB | | BC | | CA | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Parameter | %THDv | Voltage | %THDv | Voltage | %THDv | Voltage |
| Total | 0.7 | 386.2 | 0.6 | 391.1 | 0.6 | 388.1 |
| HDC | 0 | 0.24 | 0 | 0.26 | 0 | 0.44 |
| 1 | 100 | 386.2 | 100 | 391.1 | 100 | 388.3 |
| 2 | 0 | 0.02 | 0 | 0.05 | 0 | 0.1 |
| 3 | 0.2 | 1.08 | 0 | 0.26 | 0.1 | 0.61 |
| 4 | 0 | 0.04 | 0 | 0.01 | 0 | 0.02 |
| 5 | 0.4 | 1.84 | 0.2 | 0.9 | 0.1 | 0.66 |
| 6 | 0 | 0.02 | 0 | 0 | 0 | 0.03 |
| 7 | 0.1 | 0.57 | 0.2 | 0.83 | 0.2 | 1.01 |
| 8 | 0 | 0.03 | 0 | 0.01 | 0 | 0.01 |
| 9 | 0 | 0.42 | 0 | 0.01 | 0 | 0.09 |
| 10 | 0 | 0.01 | 0 | 0.04 | 0 | 0.01 |
| 11 | 0.3 | 1.23 | 0.3 | 1.38 | 0.2 | 1.13 |
| 12 | 0 | 0.01 | 0 | 0 | 0 | 0.01 |
| 13 | 0.2 | 0.83 | 0.2 | 0.81 | 0.2 | 0.93 |
| 14 | 0 | 0.04 | 0 | 0.02 | 0 | 0.02 |
| 15 | 0 | 0.2 | 0 | 0.07 | 0 | 0.17 |
| 16 | 0 | 0.04 | 0 | 0.04 | 0 | 0.07 |
| 17 | 0.1 | 0.58 | 0.2 | 0.75 | 0.1 | 0.71 |
| 18 | 0 | 0.01 | 0 | 0.01 | 0 | 0.01 |
| 19 | 0 | 0.44 | 0.1 | 0.54 | 0.1 | 0.55 |
| 20 | 0 | 0.03 | 0 | 0.01 | 0 | 0.02 |
| 21 | 0 | 0.07 | 0 | 0.09 | 0 | 0.05 |
| 22 | 0 | 0.02 | 0 | 0.01 | 0 | 0.01 |
| 23 | 0 | 0.14 | 0 | 0.2 | 0 | 0.08 |
| 24 | 0 | 0.02 | 0 | 0.02 | 0 | 0.02 |
| 25 | 0 | 0.16 | 0 | 0.1 | 0 | 0.09 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.11 แสดง %THDv ของระบบที่มี Harmonics Filter ลำดับที่ 5 เต็มภาระ

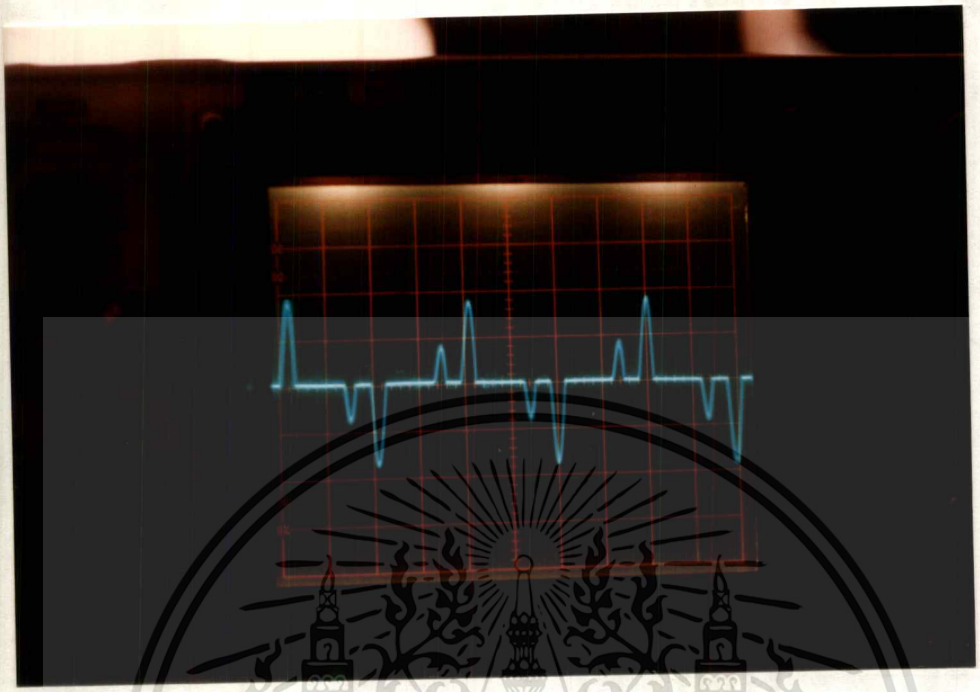
| Phase | AB | | BC | | CA | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Parameter | %THDv | Voltage | %THDv | Voltage | %THDv | Voltage |
| Total | 0.9 | 384.5 | 0.8 | 387.9 | 0.8 | 386.5 |
| HDC | 0 | 0.07 | 0 | 0.12 | 0.1 | 0.57 |
| 1 | 100 | 384.5 | 100 | 388.1 | 100 | 386.5 |
| 2 | 0 | 0.04 | 0 | 0.02 | 0 | 0.07 |
| 3 | 0.2 | 0.09 | 0 | 0.2 | 0.1 | 0.6 |
| 4 | 0 | 0.03 | 0 | 0.05 | 0 | 0.01 |
| 5 | 0 | 0.57 | 0.1 | 0.57 | 0 | 0.52 |
| 6 | 0 | 0.04 | 0 | 0.02 | 0 | 0.01 |
| 7 | 0.4 | 1.78 | 0.4 | 0.61 | 0.4 | 1.84 |
| 8 | 0 | 0.02 | 0 | 0.01 | 0 | 0.01 |
| 9 | 0 | 0.48 | 0 | 0.07 | 0 | 0.09 |
| 10 | 0 | 0.04 | 0 | 0.01 | 0 | 0.02 |
| 11 | 0.6 | 2.23 | 0.5 | 2.22 | 0.5 | 1.96 |
| 12 | 0 | 0.03 | 0 | 0.01 | 0 | 0.01 |
| 13 | 0.3 | 1.35 | 0.3 | 1.46 | 0.3 | 1.38 |
| 14 | 0 | 0.03 | 0 | 0.02 | 0 | 0.02 |
| 15 | 0 | 0.16 | 0 | 0.02 | 0 | 0.05 |
| 16 | 0 | 0.07 | 0 | 0.04 | 0 | 0.04 |
| 17 | 0.2 | 0.87 | 0.2 | 0.78 | 0.1 | 0.66 |
| 18 | 0 | 0.04 | 0 | 0.01 | 0 | 0 |
| 19 | 0 | 0.29 | 0 | 0.18 | 0 | 0.35 |
| 20 | 0 | 0.04 | 0 | 0.01 | 0 | 0 |
| 21 | 0 | 1.5 | 0 | 0.09 | 0 | 0.05 |
| 22 | 0 | 0.02 | 0 | 0.02 | 0 | 0 |
| 23 | 0 | 0.36 | 0 | 0.23 | 0 | 0.23 |
| 24 | 0 | 0.02 | 0 | 0.01 | 0 | 0.01 |
| 25 | 0 | 0.4 | 0 | 0.43 | 0 | 0.24 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

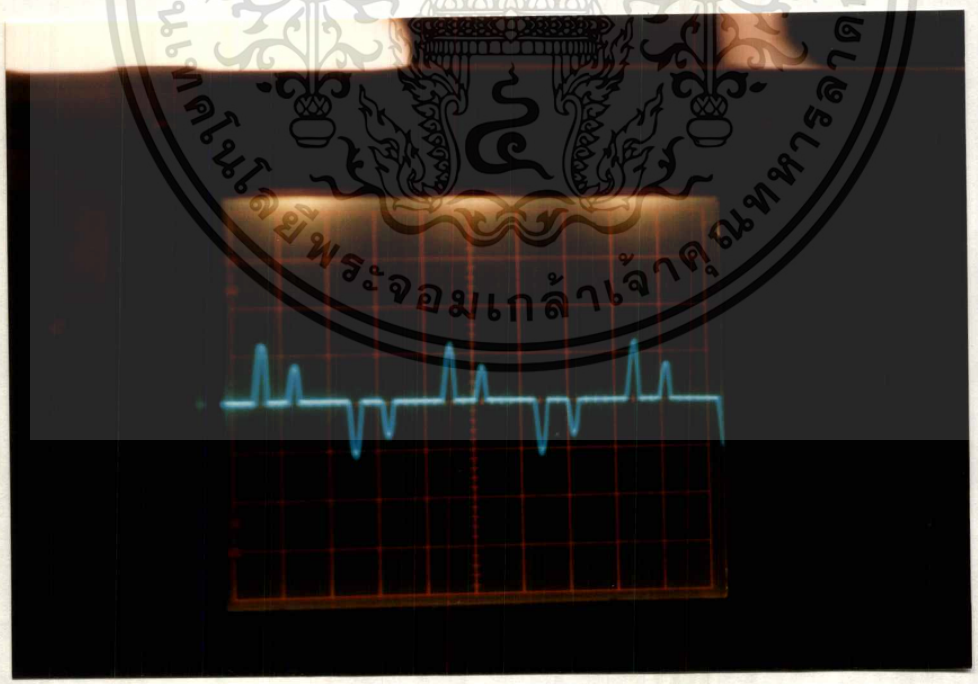
ตารางที่ 5.12 แสดง %THDv ของระบบที่มี Harmonics Filter ลำดับที่ 5 ไม่มีภาระ

| Phase | AB | | BC | | CA | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Parameter | %THDv | Voltage | %THDv | Voltage | %THDv | Voltage |
| Total | 0.7 | 384.5 | 0.6 | 387.6 | 0.6 | 386.2 |
| HDC | 0 | 0.21 | 0 | 0.07 | 0 | 0.24 |
| 1 | 100 | 385.1 | 100 | 387.6 | 100 | 386.5 |
| 2 | 0 | 0.08 | 0 | 0.02 | 0 | 0.07 |
| 3 | 0.2 | 0.88 | 0 | 0.07 | 0 | 0.43 |
| 4 | 0 | 0.05 | 0 | 0.04 | 0 | 0.02 |
| 5 | 0.4 | 1.65 | 0.3 | 1.23 | 0.2 | 0.81 |
| 6 | 0 | 0.04 | 0 | 0.02 | 0 | 0.02 |
| 7 | 0.2 | 0.08 | 0.2 | 0.8 | 0.2 | 0.83 |
| 8 | 0 | 0.03 | 0 | 0.01 | 0 | 0.01 |
| 9 | 0 | 0.34 | 0 | 0.04 | 0 | 0.1 |
| 10 | 0 | 0.01 | 0 | 0 | 0 | 0.02 |
| 11 | 0.3 | 0.27 | 0.3 | 1.29 | 0.3 | 1.25 |
| 12 | 0 | 0.04 | 0 | 0.02 | 0 | 0.02 |
| 13 | 0.2 | 0.83 | 0.2 | 0.95 | 0.2 | 0.97 |
| 14 | 0 | 0.04 | 0 | 0.03 | 0 | 0.02 |
| 15 | 0 | 0.08 | 0 | 0.07 | 0 | 0.08 |
| 16 | 0 | 0.03 | 0 | 0.03 | 0 | 0.02 |
| 17 | 0.1 | 0.74 | 0.1 | 0.67 | 0.2 | 0.76 |
| 18 | 0 | 0.02 | 0 | 0.03 | 0 | 0 |
| 19 | 0 | 0.47 | 0.1 | 0.54 | 0.1 | 0.58 |
| 20 | 0 | 0.03 | 0 | 0.01 | 0 | 0 |
| 21 | 0 | 0.09 | 0 | 0.05 | 0 | 0.03 |
| 22 | 0 | 0.04 | 0 | 0.02 | 0 | 0.02 |
| 23 | 0 | 0.17 | 0 | 0.1 | 0 | 0.04 |
| 24 | 0 | 0.01 | 0 | 0.03 | 0 | 0.02 |
| 25 | 0 | 0.02 | 0 | 0.05 | 0 | 0.05 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

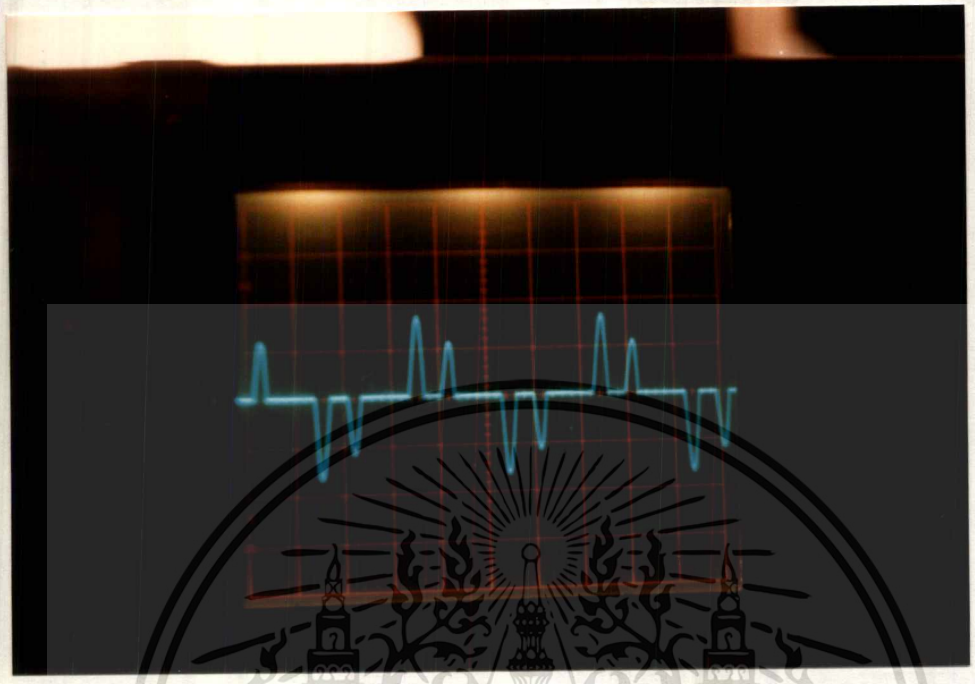


รูปที่ 5.2 รูปคลื่นกระแสเฟส A ขณะที่ยังไม่มีวงจรฟิลเตอร์และมอเตอร์รับภาระเต็มที่



รูปที่ 5.3 รูปคลื่นกระแสเฟส B ขณะที่ยังไม่มีวงจรฟิลเตอร์และมอเตอร์รับภาระเต็มที่

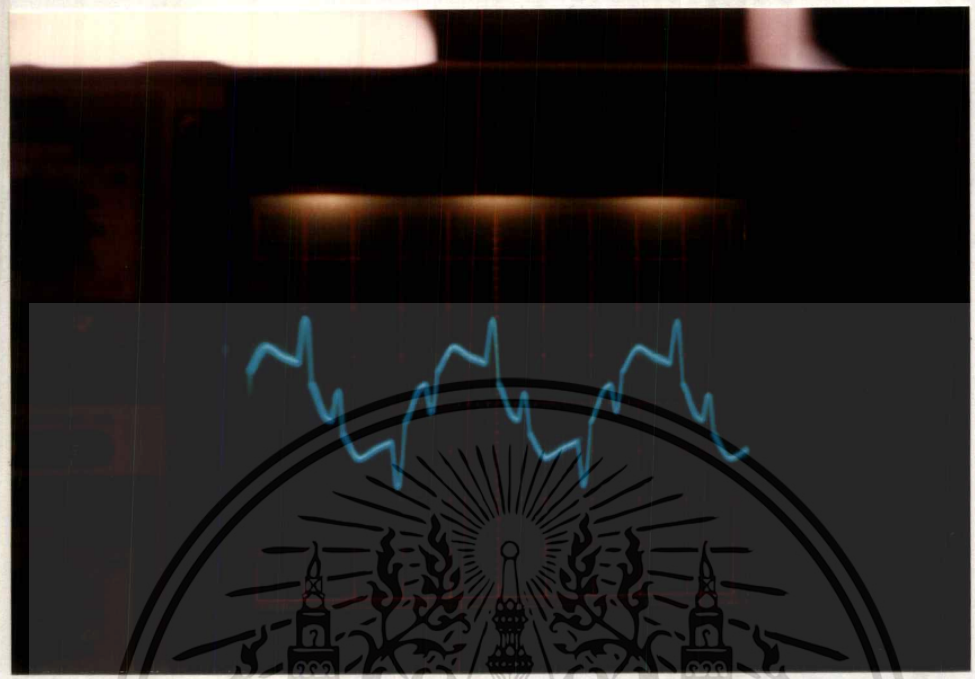
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



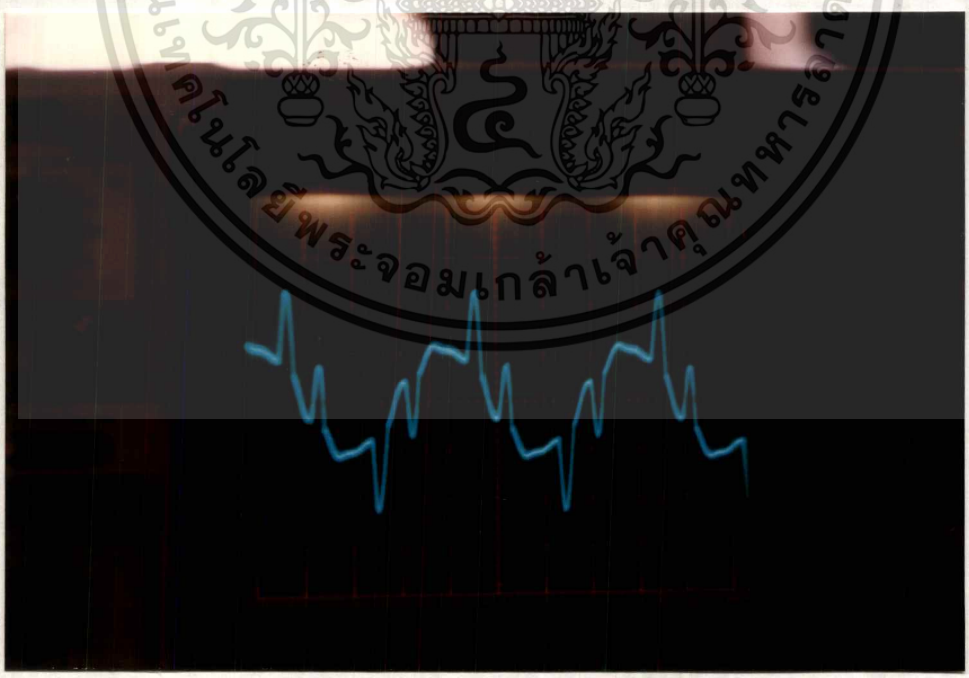
รูปที่ 5.4 รูปคลื่นกระแสเฟส C ขณะที่ยังไม่มีวงจรฟิลเตอร์และมอเตอร์รับภาระเต็มที่

รูปที่ 5.5 รูปคลื่นกระแสเฟส A ขณะที่ยังมีวงจรฟิลเตอร์และมอเตอร์รับภาระเต็มที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

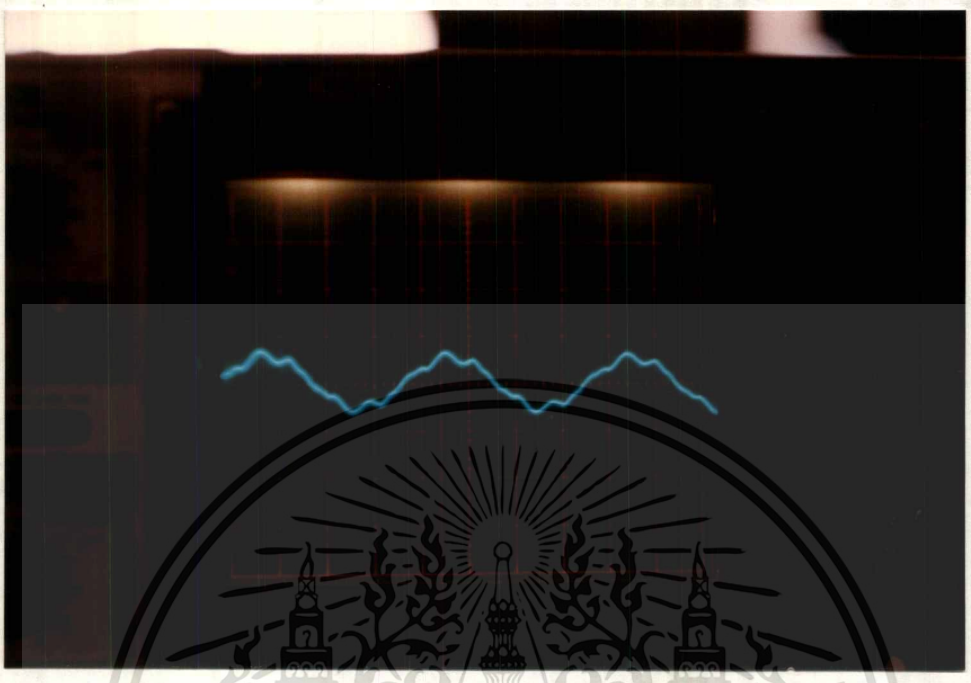


รูปที่ 5.6 รูปคลื่นกระแสเฟส B ขณะที่ยังมีวงจรฟิลเตอร์และมอเตอร์รับภาระเต็มที่

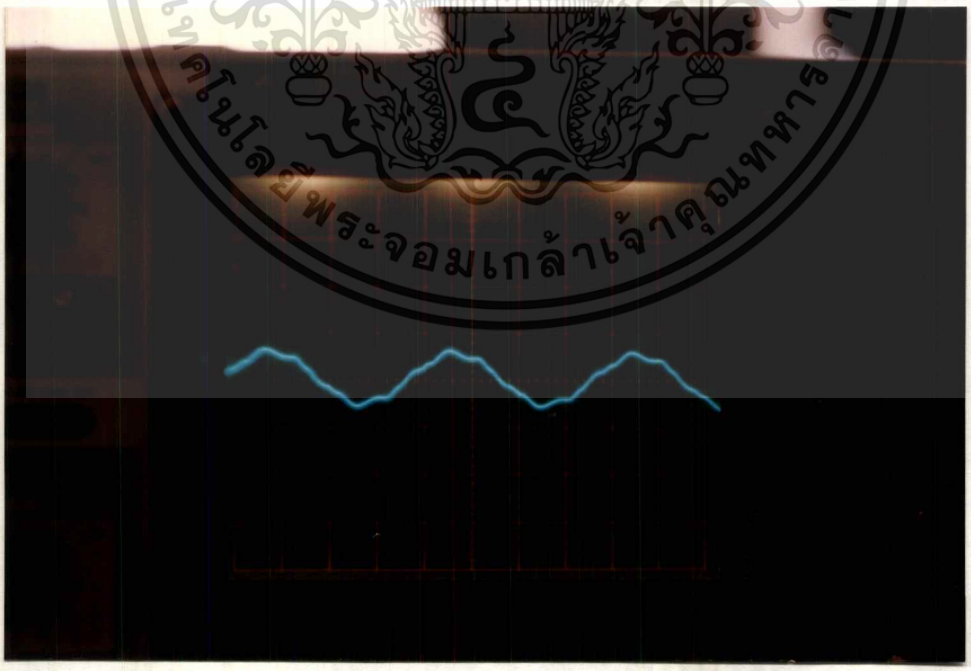


รูปที่ 5.7 รูปคลื่นกระแสเฟส C ขณะที่ยังมีวงจรฟิลเตอร์และมอเตอร์รับภาระเต็มที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

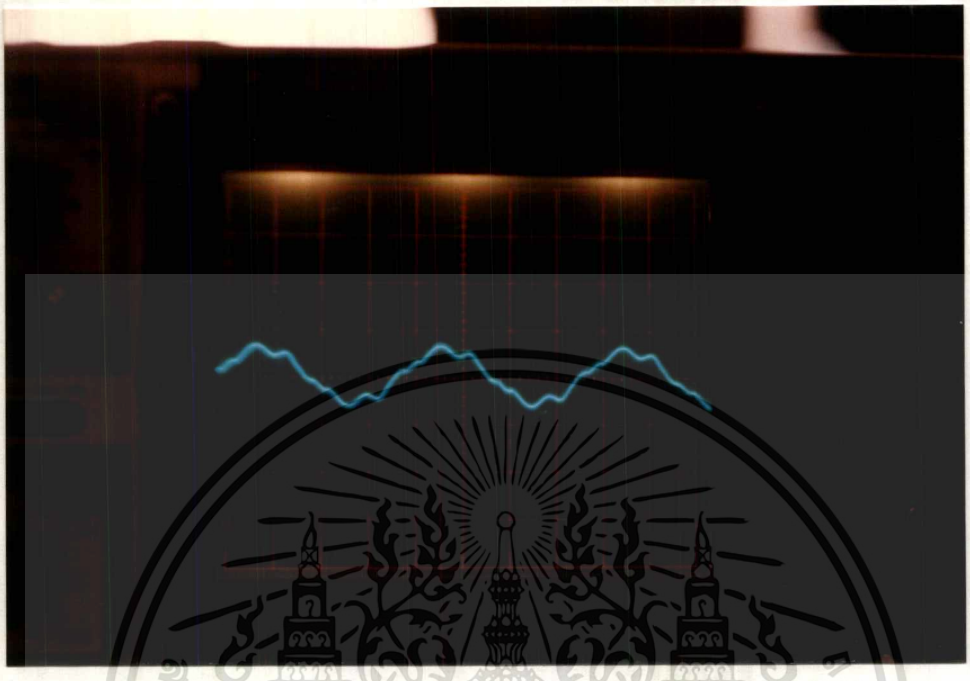


**รูปที่ 5.8 รูปคลื่นกระแสเฟส A ไหลเข้าวงจรฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่ 5 ขณะมอเตอร์รับภาระเต็มที่**

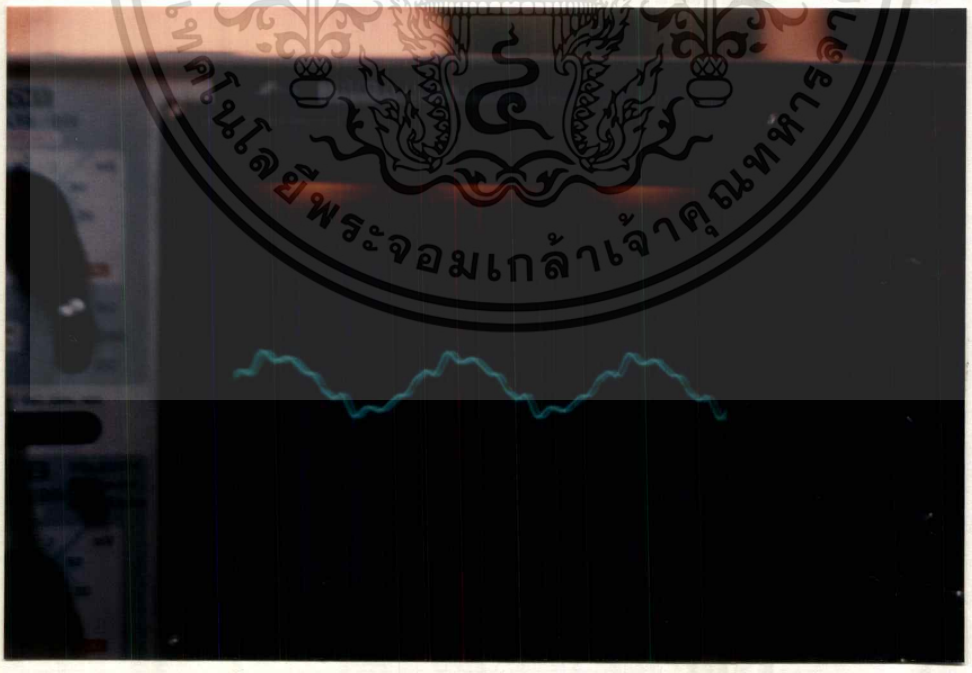


**รูปที่ 5.9 รูปคลื่นกระแสเฟส B ไหลเข้าวงจรฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่ 5 ขณะมอเตอร์รับภาระเต็มที่**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

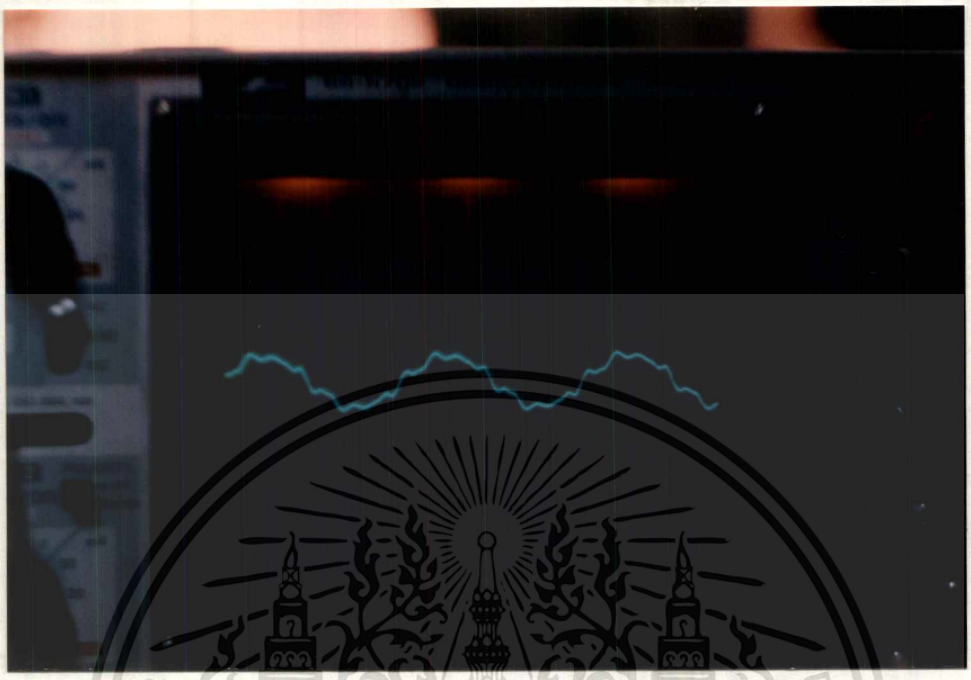


**รูปที่ 5.10 รูปคลื่นกระแสเฟส C ไหลเข้าวงจรฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่ 5 ขณะมอเตอร์รับภาระเต็มที่**

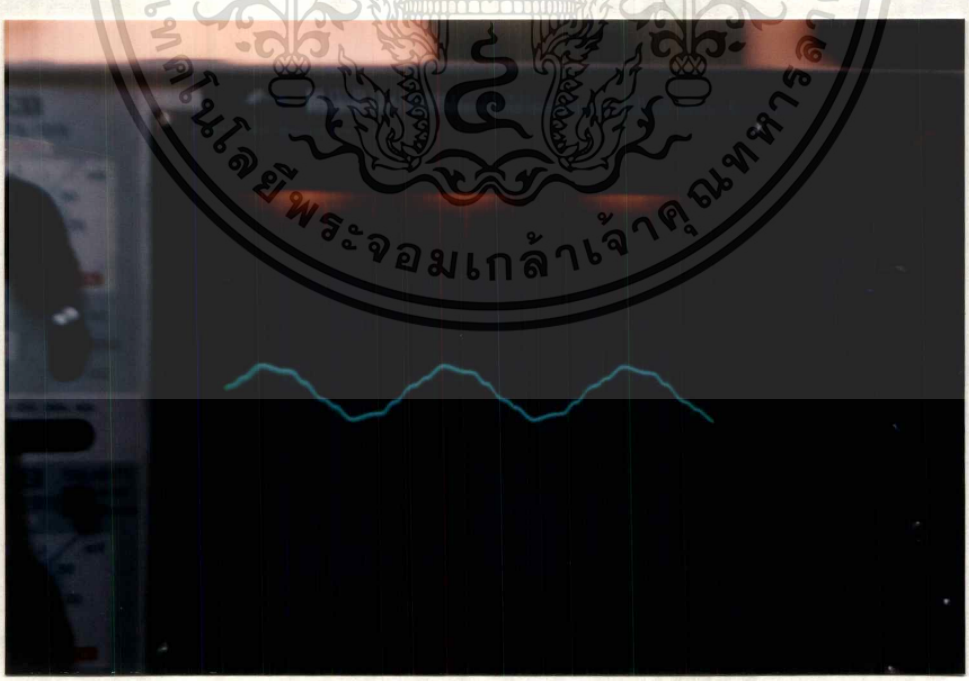


**รูปที่ 5.11 รูปคลื่นกระแสเฟส Aไหลเข้าวงจรฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่ 7 ขณะมอเตอร์รับภาระเต็มที่**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

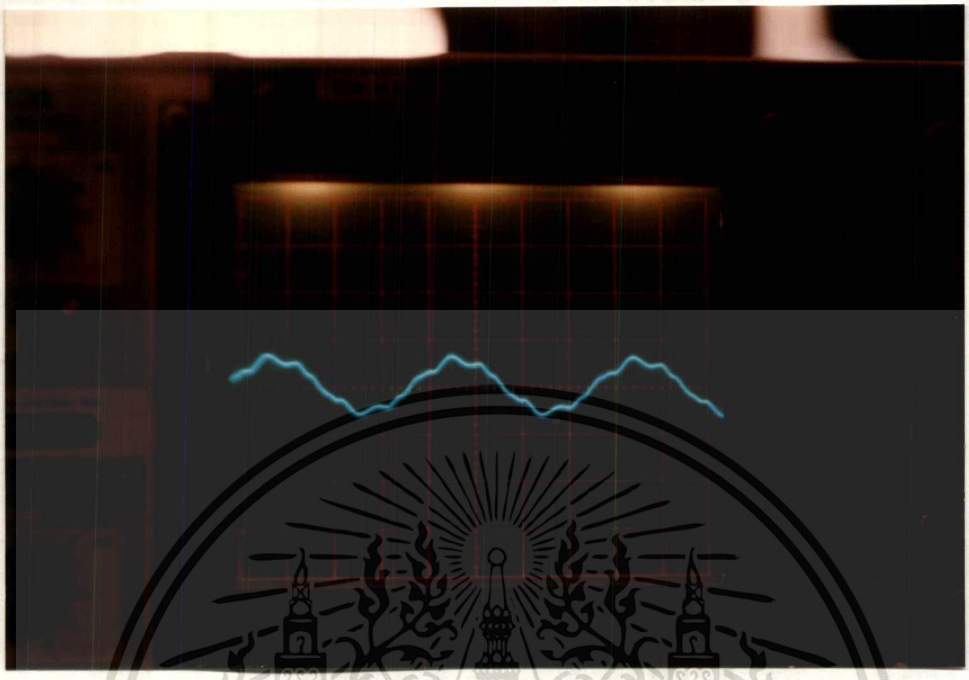


**รูปที่ 5.12 รูปคลื่นกระแสเฟส Bไหลเข้าวงจรฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่ 7 ขณะมอเตอร์รับภาระเต็มที่**

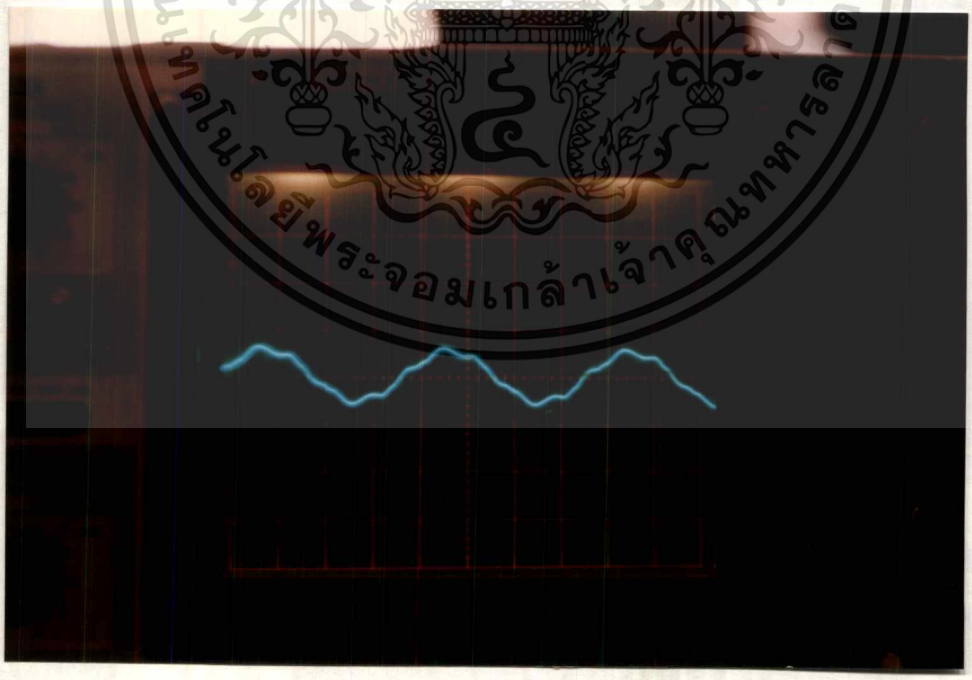


**รูปที่ 5.13 รูปคลื่นกระแสเฟส Cไหลเข้าวงจรฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่ 7 ขณะมอเตอร์รับภาระเต็มที่**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

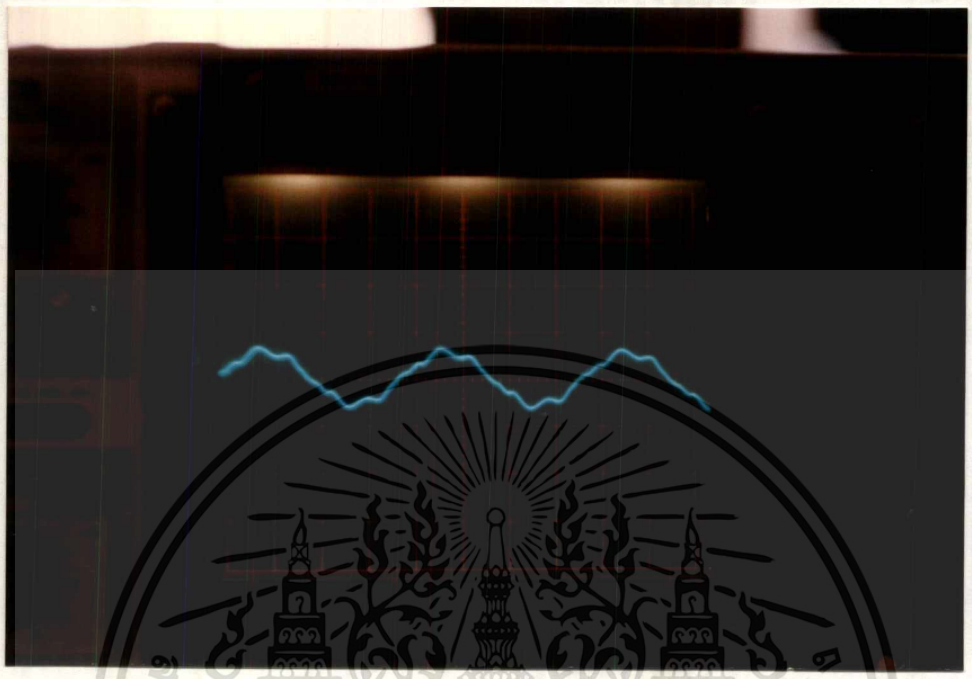


รูปที่ 5.14 รูปคลื่นกระแสเฟส A ไหลเข้าวงจรฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่ 5 ขณะมีวงจรฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่ 5 อย่างเดียวขณะมอเตอร์รับภาระเต็มที่



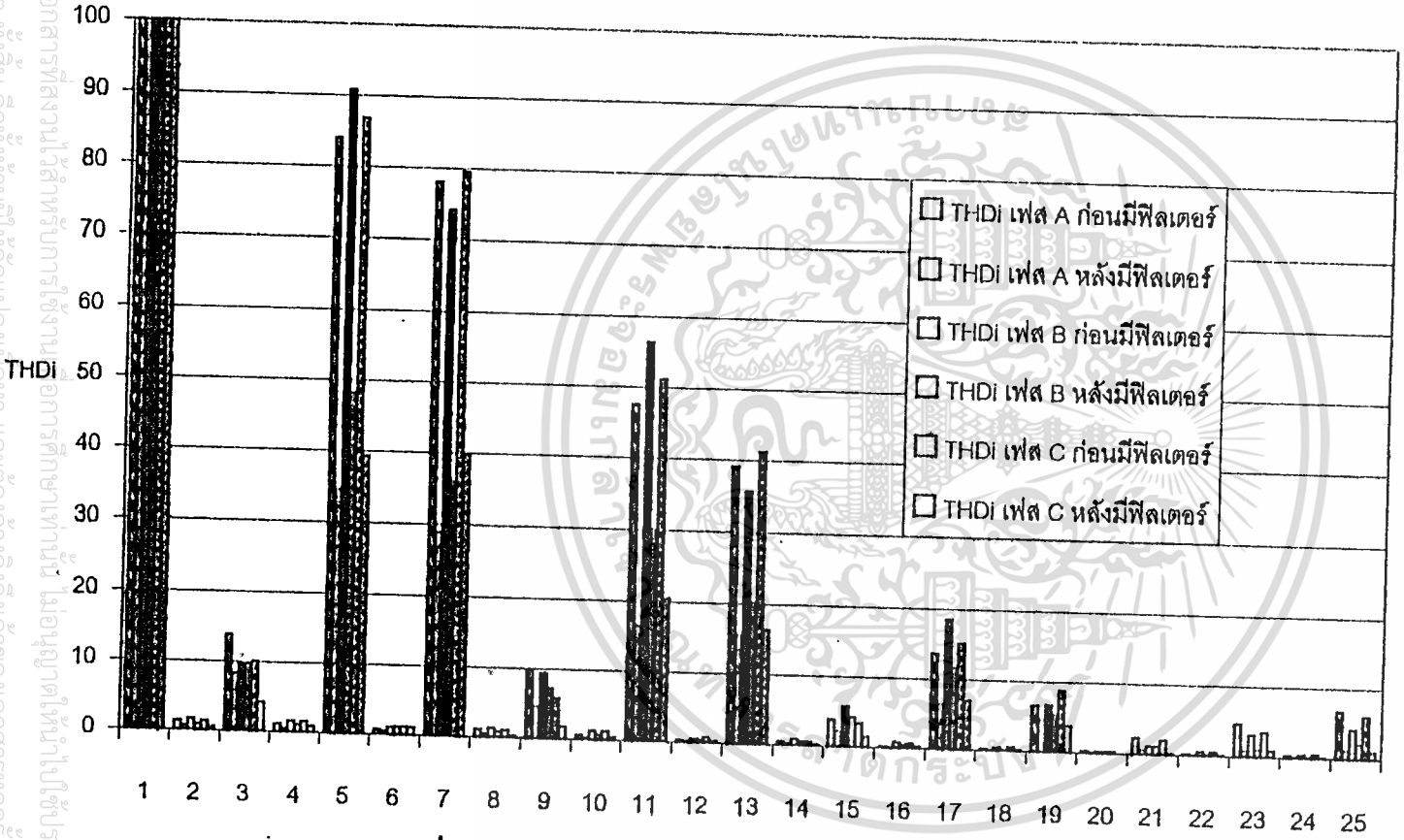
รูปที่ 5.15 รูปคลื่นกระแสเฟส B ไหลเข้าวงจรฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่ 5 ขณะมีวงจรฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่ 5 อย่างเดียวขณะมอเตอร์รับภาระเต็มที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

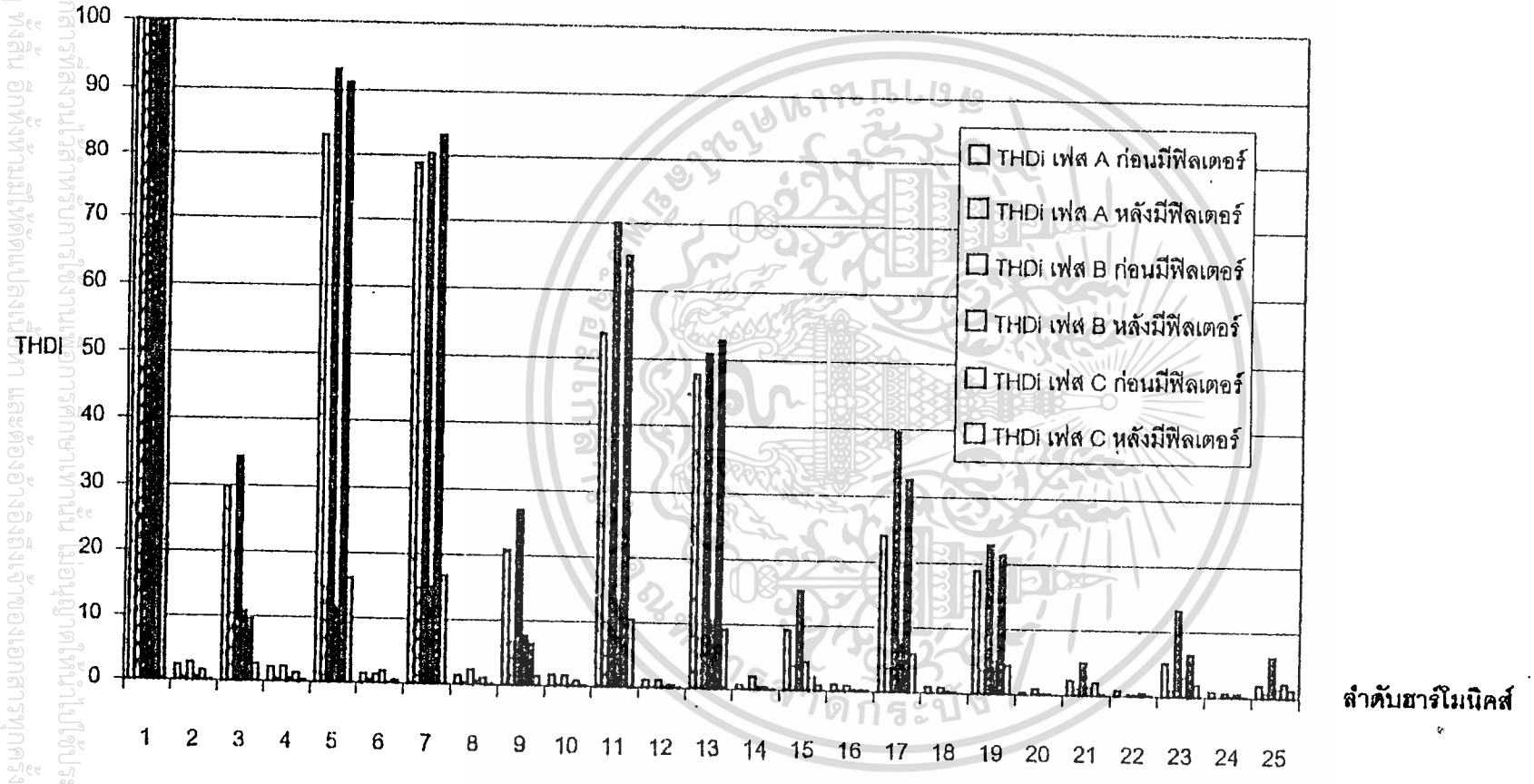


**รูปที่ 5.16 รูปคลื่นกระแสเฟส C ไหลเข้าวงจรฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่ 5 ขณะมีวงจรฟิลเตอร์ฮาร์โมนิคส์ที่ 5 อย่างเดียวขณะมอเตอร์รับภาระเต็มที่**

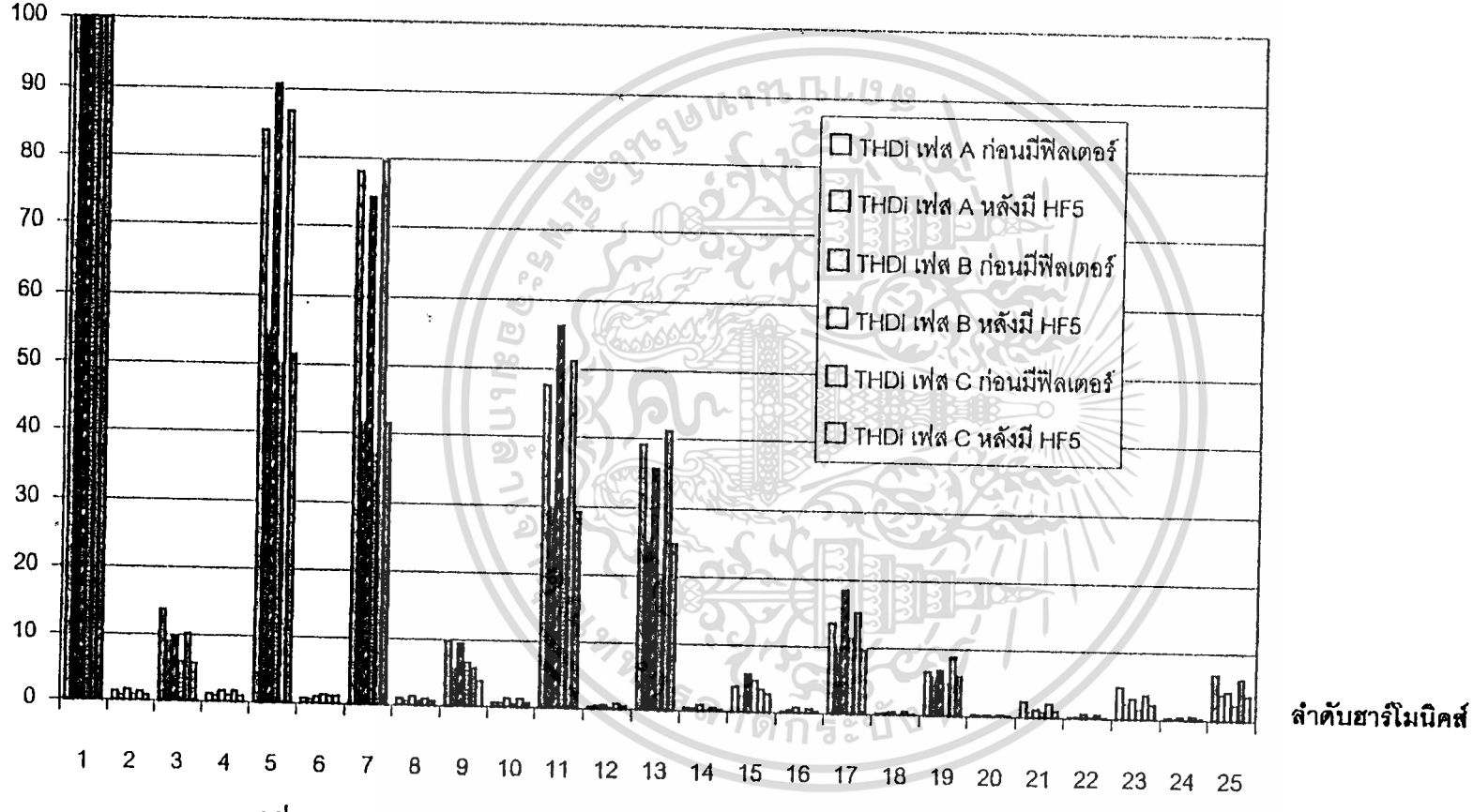
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



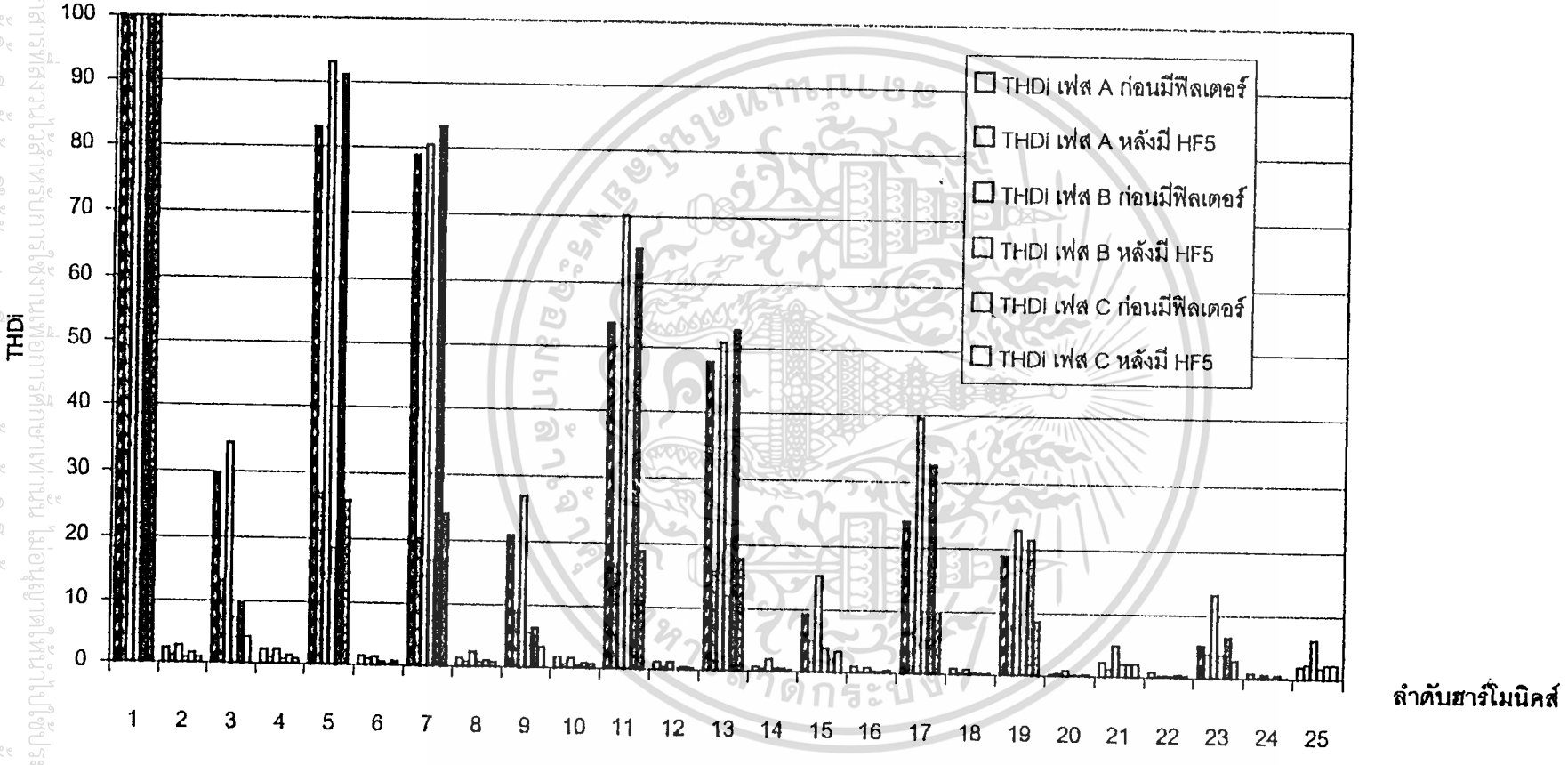

รูปที่5.17 เปรียบเทียบก่อนและหลังมีฟิลเตอร์ขณะ Full Load




**รูปที่ 5.18 เปรียบเทียบก่อนและหลังมีฟิลเตอร์** ขณะ No Load




**รูปที่5.19 เปรียบเทียบก่อนและหลังมี HF5 อย่างเดียว Full Load**




รูปที่5.20 เปรียบเทียบก่อนและหลังมี HF5 ขณะ No Load

**5.3 วิเคราะห์ วิจารณ์ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ**

**5.3.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง**

จากการทดลองพบว่าเกิดความไม่สมดุลย์ 3 เฟสของมอเตอร์ทำให้เกิดมี %THDi ของฮาร์โมนิคส์ที่ 3,9,15,... เกิดขึ้นมาในระบบ สังเกตได้จากรูปคลื่นสัญญาณกระแสขณะเดินเครื่องมอเตอร์แต่ยังไม่ได้ต่อวงจรฟิลเตอร์เข้าไปในระบบ สาเหตุเนื่องมาจากว่ามอเตอร์ค่อนข้างจะมีอายุการใช้งานนาน ทำให้ขดลวดในมอเตอร์มีค่าอิมพีแดนซ์ของแต่ละเฟสไม่เท่ากันจึงทำให้เกิดความไม่สมดุลย์ 3 เฟสดังกล่าว และจากการวัดค่า %THD พบว่าเมื่อต่อวงจรฟิลเตอร์ขนานเข้าไปในระบบตามสภาวะต่าง ๆ มีผลทำให้ค่า %THDi ของระบบมีค่าลดลง ส่วนค่า %THDv มีค่าน้อยมากต่ำกว่า 1% (ค่ามาตรฐานมีค่าไม่เกิน 5%) ซึ่งถือว่ามีผลน้อยมากในระบบ จึงจะพิจารณาเฉพาะค่า %THDi ของระบบเท่านั้น โดยแยกเป็นสภาวะต่าง ๆ ได้ดังนี้

**เดินมอเตอร์แบบไม่มีภาระ ใช้วงจรฟิลเตอร์ลำดับที่ 5 และ 7 พบว่า**

ก่อนที่จะมีวงจรฟิลเตอร์ ระบบมีค่า %THDi ประมาณ 154%(ประมาณเป็นค่าต่อเฟส) เมื่อมีวงจรฟิลเตอร์ขนานกับระบบมีผลให้ค่า %THDi ลดลงเหลือ 27% แสดงให้เห็นถึงความเพี้ยนของกระแสที่เอาท์พุทของแหล่งจ่ายมีค่าลดลงอย่างมาก

เมื่อพิจารณาที่ฮาร์โมนิคส์ที่ 5 และ 7 จะมีค่าลดลงเป็นอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ ฮาร์โมนิคส์ที่ 5 จาก 89% เหลือเพียง 15% และฮาร์โมนิคส์ที่ 7 จาก 81% เหลือเพียง 15% จะเห็นได้ว่าค่า %THDi มีค่าลดลงคิดเป็นอัตราส่วนประมาณ 80% ทั้งนี้ ฮาร์โมนิคส์อื่น ๆ ก็มีค่าลดลงเป็นอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกับฮาร์โมนิคส์ที่ 5 และ 7 เช่นกัน

**เดินมอเตอร์แบบเต็มภาระ ใช้วงจรฟิลเตอร์ลำดับที่ 5 และ 7 พบว่า**

ก่อนที่จะมีวงจรฟิลเตอร์ ระบบมีค่า %THDi ประมาณ 135% เมื่อต่อวงจรฟิลเตอร์แล้ว %THDi ลดลงเหลือ 62% จะเห็นได้ว่าความเพี้ยนของกระแสที่เอาท์พุทของแหล่งจ่ายมีค่าลดลงน้อยกว่าขณะเดินมอเตอร์แบบไม่มีภาระ

เมื่อพิจารณาที่ฮาร์โมนิคส์ที่ 5 และ 7 จะมีค่าลดลง กล่าวคือ ฮาร์โมนิคส์ที่ 5 จาก 88% ลดเหลือ 41% และฮาร์โมนิคส์ที่ 7 จาก 77% ลดเหลือ 35% คิดเป็นอัตราส่วนประมาณ 50% ทั้งนี้ ฮาร์โมนิคส์อื่น ๆ ก็ลดลงประมาณ 50% เช่นกัน

**เดินมอเตอร์แบบไม่มีภาระ ใช้วงจรฟิลเตอร์ลำดับที่ 5 พบว่า**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนที่จะมีวงจรฟิลเตอร์ ระบบมีค่า %THDi ประมาณ 154% เมื่อต่อวงจรฟิลเตอร์แล้ว %THDi ลดเหลือ 43% จะเห็นได้ว่าความเพี้ยนของกระแสที่เอาท์พุทของแหล่งจ่ายมีค่าลดลงน้อยกว่า การต่อวงจรฟิลเตอร์ลำดับที่ 5 และ 7 เข้าไปในวงจรพร้อมกัน (มอเตอร์ไม่มีภาระ)

เมื่อพิจารณาฮาร์โมนิคส์ที่ 5และ 7 มีค่าลดลง กล่าวคือ ฮาร์โมนิคส์ที่ 5 จาก 89% ลดเหลือ 24% ฮาร์โมนิคส์ที่ 7 จาก 81% ลดเหลือ 21% คิดเป็นอัตราส่วนลดประมาณ 70% ทั้งนี้ ฮาร์โมนิคส์อื่น ๆ ก็มีค่าลดลงประมาณ 70 % เช่นกัน

เดินมอเตอร์เต็มภาระ ใช้วงจรฟิลเตอร์ลำดับที่ 5

ก่อนที่จะมีวงจรฟิลเตอร์ ระบบมีค่า %THDi ประมาณ 135% เมื่อต่อวงจรฟิลเตอร์แล้ว %THDi ลดเหลือ 77% จะเห็นได้ว่าความเพี้ยนของกระแสที่เอาท์พุทของแหล่งจ่ายมีค่าลดลงน้อยกว่า การต่อวงจรฟิลเตอร์ลำดับที่ 5 และ 7 เข้าไปในวงจรพร้อมกัน (มอเตอร์รับภาระเต็มที่)

เมื่อพิจารณาฮาร์โมนิคส์ที่ 5 และ 7 มีค่าลดลง กล่าวคือ ฮาร์โมนิคส์ที่ 5 จาก 87% ลดเหลือ 52% ฮาร์โมนิคส์ที่ 7 จาก 77% ลดเหลือ 40% คิดเป็นอัตราส่วนลดประมาณ 40% ทั้งนี้ ฮาร์โมนิคส์อื่น ๆ ก็มีค่าลดลงประมาณ 40% เช่นกัน

จากการทดลอง จะเห็นได้ว่า %THDi หลังจากที่มีการต่อวงจรฟิลเตอร์เข้าไปในระบบแล้ว จะมีค่าลดลง แต่ก็ยังเป็นค่าที่มากกว่าค่าที่มาตรฐาน IEEE 519-1992 กำหนด(ประมาณ 5% อ่านเพิ่มเติมได้จากภาคผนวก ข.) ที่เป็นเช่นนี้เกิดจากสาเหตุที่สำคัญ 3 ประการด้วยกัน คือ

-ฮาร์โมนิคส์ที่ 11,13,17,... ซึ่งไม่มีวงจรฟิลเตอร์มีค่ามากกว่าที่คาดการณ์ไว้ เป็นเพราะอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบ Full Bridge Rectifier ซึ่งมีผลทำให้ %THDi เกิดขึ้นในระบบอย่างมากมาย จึงทำให้ %THDi ยังเหลืออยู่มากเกินค่าที่มาตรฐานกำหนด

-วงจรฟิลเตอร์ที่ทำการทดลองนี้ ได้คำนวณขึ้นจากระบบซึ่งมีมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 5.5 kW แต่ในการทดลองระบบเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3.5 kW จึงทำให้ประสิทธิภาพของวงจรฟิลเตอร์ลดลงเป็นอย่างมาก เนื่องจากวงจรฟิลเตอร์จะทำการคำนวณไว้โดยเฉพาะกับระบบใดระบบหนึ่ง ซึ่งใช้ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จริงจากระบบนั้นหลายตัวมาใช้ เมื่อนำไปใช้ในระบบอื่นจึงทำให้ประสิทธิภาพของวงจรฟิลเตอร์มีค่าลดลง

-ค่าความเหนี่ยวนำที่ได้ทำการคำนวณ กับค่าที่เกิดขึ้นในระบบ มีค่าไม่ตรงกัน ทำให้วงจรฟิลเตอร์กรองสัญญาณไฟฟ้าฮาร์โมนิคส์ได้ไม่หมด เนื่องจากกระแสที่ไหลในวงจรฟิลเตอร์มีค่าน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว่าที่ทำการคำนวณไว้ เมื่อกระแสมีค่าเปลี่ยนไปจึงทำให้ค่าความเหนี่ยวนำในระบบเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

ในส่วนการทดลองเพื่อสังเกตรูปคลื่นสัญญาณของกระแส จะพบว่าที่ตำแหน่งเอาท์พุทของแหล่งจ่ายหลังต่อวงจรฟิลเตอร์ขนานเข้าไปในระบบจะทำให้รูปคลื่นสัญญาณของกระแสมีลักษณะเป็นรูปไซน์มากยิ่งขึ้น เนื่องจากมีกระแสฮาร์โมนิคส์ไหลเข้าวงจรฟิลเตอร์ ซึ่งจะช่วยปรับปรุงรูปคลื่นสัญญาณของกระแสที่ตำแหน่งเอาท์พุทของแหล่งจ่ายให้มีลักษณะเป็นรูปสัญญาณไซน์มากขึ้น

สังเกตรูปคลื่นสัญญาณของกระแสที่ไหลในวงจรฟิลเตอร์ทั้งลำดับที่ 5 และ 7 จะมีลักษณะเป็นรูปคลื่นสัญญาณของกระแสฮาร์โมนิคส์ซ้อนอยู่บนกระแสมูลฐาน จากการสังเกตพบว่ากระแสฮาร์โมนิคส์ไม่ใช่กระแสฮาร์โมนิคส์ที่ความถี่ใดความถี่หนึ่ง เป็นส่วนผสมของหลาย ๆ ฮาร์โมนิคส์ แสดงว่าช่วงความถี่จูนของวงจรฟิลเตอร์ค่อนข้างกว้าง จึงมีกระแสของฮาร์โมนิคส์อื่นไหลเข้ามาในวงจรด้วย สาเหตุเป็นเพราะค่าความเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นมีค่าไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับค่ากระแส ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่าไม่ตรงตามที่ได้ทำการคำนวณไว้นั่นเอง

**5.3.2 วิจารณ์การทดลอง**

การทดลองนี้มีข้อดี ข้อเสีย และปัญหา ดังต่อไปนี้

**ข้อดี**

-สามารถลดค่า %THDi ได้ค่อนข้างมาก แม้จะใช้ในระบบอื่นไม่ใช่ระบบที่ทำการคำนวณตอนเริ่มต้น

-ทำให้รูปคลื่นของเอาท์พุทแหล่งจ่ายมีลักษณะใกล้เคียงกับรูปไซน์มากยิ่งขึ้น

**ข้อเสีย**

-ลดค่า %THDi ได้ไม่ถึงมาตรฐานที่กำหนด

-วงจรฟิลเตอร์ดึงกระแสค่อนข้างมาก(ประมาณ 7A) เมื่อเทียบกับโหลด(ประมาณ 7.9A) ซึ่งจะมีผลทำให้แหล่งจ่ายต้องจ่ายกระแสที่มากขึ้นเกือบ 2 เท่า

-ทำการทดลองวัดค่า %THDi เพียงตำแหน่งเดียว ทำให้ไม่ทราบค่า %THDi ที่ตำแหน่งอื่น ๆ ของระบบ

-ตัวประกอบกำลังมีค่าลดลงเมื่อต่อวงจรฟิลเตอร์เข้าไปในระบบ

-ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุในวงจรฟิลเตอร์ได้โดยง่าย เนื่องจากอุปกรณ์มีราคาค่อนข้างสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัญหา

-อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองไม่เพียงพอ จึงทำการทดลองได้ค่อนข้างลำบาก

-อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรฟิลเตอร์มีราคาค่อนข้างสูง และหาได้ยากลำบากในท้องตลาด

-การประสานงานในการทำงานของกลุ่มไม่ดี ทำให้การทำงานล่าช้า

-ตัวเก็บประจุขาดบ่อย เมื่อต้องเปลี่ยนบ่อย ๆ จึงทำให้การทดลองล่าช้า และเสียค่าใช้จ่ายมากขึ้นโดยไม่จำเป็น

-ขาดความรู้ ความชำนาญในการใช้อุปกรณ์ ทั้งอุปกรณ์ในวงจรและอุปกรณ์ในการทดลอง การทดลองจึงไม่ค่อยราบรื่นเท่าที่ควร

-โปรแกรมที่ทำการเขียนขึ้น ใช้ภาษาวิชวลเบสิก ซึ่งนักศึกษาต้องใช้เวลาค่อนข้างมากในการศึกษาและทำการเขียนโปรแกรม

5.3.3 ข้อเสนอแนะ

-ควรเลือกระบบใดระบบหนึ่งที่แน่นอนเพื่อที่จะออกแบบวงจรฟิลเตอร์ เพราะวงจรฟิลเตอร์จะได้ทำงานโดยมีประสิทธิภาพสูงสุด

-การคำนวณค่ากระแสที่ไหลในวงจรฟิลเตอร์ควรจะทำให้มีค่าถูกต้องมากที่สุดและต้องป้องกันไม่ให้กระแสไหลมากเกินไปจนทำให้แกนเหล็กของตัวเหนี่ยวนำอิ่มตัว

-การตัดต่อวงจรฟิลเตอร์เข้าไปในระบบต้องเริ่มต่อวงจรจากลำดับฮาร์โมนิคส์ที่ต่ำกว่าก่อนและเริ่มตัดวงจรจากลำดับฮาร์โมนิคส์ที่สูงกว่าก่อนตามลำดับ

-โปรแกรมในโครงงานนี้ยังไม่สมบูรณ์เท่าที่ควร อาจจะมีการพัฒนาโปรแกรมให้มีความถูกต้องยิ่ง ๆ ขึ้นไป

-ในการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ควรจะทำการวัดทุกเฟส เพราะบางระบบอาจจะไม่มีความสมดุลย์ 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 6
# สรุปผลการทดลอง

ความผิดเพี้ยนของกระแสหรือแรงดันฮาร์โมนิคส์(%THD) ซึ่งเป็นมลภาวะทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ามีผลกระทบมากมายต่อระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ ทำให้การทำงานของอุปกรณ์ผิดพลาดหรืออาจจะทำให้อุปกรณ์เสียหาย และเป็นการสูญเสียกำลังไฟฟ้าไปโดยเปล่าประโยชน์

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องฮาร์โมนิคส์ในระบบไฟฟ้ามากขึ้น เพื่อค้นหาแนวทางแก้ปัญหาฮาร์โมนิคส์ที่เกิดขึ้น และปัจจุบันนี้มีอยู่หลายวิธีที่แก้ปัญหาฮาร์โมนิคส์ได้ โดยในแต่ละวิธีก็จะมีข้อดี ข้อเสีย แตกต่างกันออกไป ซึ่งผู้ใช้จะต้องตัดสินใจในการเลือกวิธีการแก้ปัญหาฮาร์โมนิคส์ให้เหมาะสมกับแต่ละระบบ

ในระบบไฟฟ้าจะคำนึงถึงค่าของ %THDi และ %THDv ในระบบว่ามีค่าเกินกว่ามาตรฐานกำหนดหรือไม่ (ในประเทศไทยยังไม่มีมาตรฐานในเรื่องนี้) ถ้าปรากฏว่า %THDi หรือ %THDv ค่าใดค่าหนึ่งหรือทั้งคู่ มีค่าเกินกว่ามาตรฐานกำหนดก็ควรที่จะหาแนวทางในการกำจัด เพื่อให้ค่าที่เหลืออยู่ในระดับมาตรฐานกำหนด

โครงงานพิเศษเรื่องนี้ จึงได้เสนอแนะแนวทางแก้ปัญหาฮาร์โมนิคส์วิธีการหนึ่งคือใช้วงจรฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์ เพื่อกรองสัญญาณไฟฟ้าฮาร์โมนิคส์ออกจากระบบ โดยโครงงานพิเศษนี้ได้ทำการทดสอบแล้ว พบว่าวงจรฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์สามารถลดค่า %THD ได้จริง และยังมีผลทำให้รูปคลื่นกระแสของแหล่งจ่ายมีลักษณะที่ดีขึ้น ย่อมเป็นผลดีต่อระบบไฟฟ้าเพราะจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น วงจรฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์จะมีประโยชน์เป็นอย่างมากในระบบไฟฟ้าที่มีความสูญเสียเนื่องจากฮาร์โมนิคส์สูง ๆ เพราะวงจรโดยส่วนของฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์สามารถกรองสัญญาณฮาร์โมนิคส์ได้ค่อนข้างมาก (มีขีดจำกัดอยู่ที่กระแสไหลผ่านแกนเหล็กของตัวเหนี่ยวนำ) แต่เนื่องจากวงจรฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์มีราคาค่าใช้จ่ายในการผลิตค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงควรคำนึงถึงผลได้ผลเสียจากการใช้วงจรฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์อย่างละเอียด ก่อนที่จะเลือกใช้วงจรนี้

การออกแบบวงจรฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์ จะต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จริงในระบบ เพราะว่าวงจรฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์จะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ระบบที่ใช้ในการคำนวณ เมื่อนำวงจรนี้ไปใช้ในระบบอื่นจะทำให้ประสิทธิภาพของวงจรฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์ลดลง ซึ่งในการคำนวณเพื่อออกแบบวงจรฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์ค่อนข้างจะละเอียดอ่อนและสลับซับซ้อน เนื่องจากวงจรมีพารามิเตอร์หลายตัวที่นำมาใช้ในการคำนวณ ดังนั้นกลุ่มโครงงานพิเศษนี้จึงได้จัดทำโปรแกรมขึ้นมาเพื่อช่วยเหลือผู้ใช้ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบวงจรฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์ โดยผู้ใช้จะทำเพียงการป้อนค่าพารามิเตอร์ที่สามารถวัดได้ในระบบเข้าไปในวงจร จากนั้นโปรแกรมก็จะทำการคำนวณและออกแบบวงจรฮาร์โมนิคส์ฟิลเตอร์ที่เหมาะสมกับระบบมากที่สุด พร้อมทั้งแสดงผลการคำนวณออกแบบมาให้ผู้ใช้ การมีโปรแกรมนี้ทำให้เกิดความสะดวกในการออกแบบวงจรเป็นอย่างมาก แม้ในขณะนี้โปรแกรมยังไม่ถึงระดับที่สมบูรณ์แบบมากนัก แต่ถ้าโปรแกรมนี้ได้รับการพัฒนาก็จะมีผลทำให้ความสมบูรณ์ของโปรแกรมมีมากยิ่งขึ้น (โปรแกรมนี้อยู่ในภาคผนวก ง.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก
## ส่วนประกอบของตัวเหนี่ยวนำ

1. ชนิดแกน (Type of core)

คุณสมบัติของ Magnetic core ที่ดีขึ้นอยู่กับคุณสมบัติวัตถุดิบที่ใช้และรูปร่างของแกน ซึ่งเป็นไปได้ตามเงื่อนไข คือ รูปร่างและวัตถุดิบที่นำมาใช้ทำแกน สามารถนำฟลักซ์สนามแม่เหล็กได้ดี การเลือกชนิดของแกนที่จะนำมาใช้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของค่าใช้จ่าย , การพันขดลวด , วิธีทำแกน , grain Orientation , ความหนาของ lamination , ขนาดและน้ำหนัก รวมทั้งช่องอากาศที่ใช้ด้วย

1.1 Lamination

แกนเหล็กแบบ Lamination จะช่วยลดกระแสไหลวน พื้นผิวของแผ่น Lamination จะเคลือบด้วยฉนวนไว้ การทำแกนเหล็ก Lamination จะทำโดยแผ่นเหล็กมาเรียงเป็นรูป 3 มิติตามที่ต้องการ สำหรับเทคโนโลยีในการผลิตแผ่นเหล็ก Lamination จะถูกพัฒนา โดยจะใช้ Magnetic Alloy ( ที่เป็นแผ่น ) ผ่านเข้าเครื่องเจาะและเครื่องกดด้วยความเร็วสูง โดยการกดเพื่อให้รูปร่างของแผ่นเหล็กที่ต้องการ ซึ่งเป็นกระบวนการโดยอัตโนมัติ โดยจะมีรูปร่างหรือขนาดที่แตกต่างกัน

โดยทั่วไปแผ่น Lamination ที่จะใช้ทำหม้อแปลงขนาดเล็ก ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 แผ่น Lamination ที่มีรูปร่างหรือชิ้นส่วนแบบ EI ซึ่งการผลิตชิ้นส่วน EI แสดงในรูปที่ ก.1 เป็นการเรียงแผ่น Lamination เป็นแกนเพื่อลดปรากฏการณ์จากช่องอากาศ โดยขดลวดถูกพันที่ขากลางของแกน โดยฟลักซ์ทั้งหมดจะผ่านแกนกลางแล้วจึงแบ่งครึ่งไปขาที่แกนข้าง ๆ

การทำแกนจาก Lamination จะพบว่าในการใช้งานแต่ละชนิดจะใช้แผ่น Lamination ที่มีความหนาของแผ่นแตกต่างกัน เช่น แผ่น Lamination ที่มีความหนาตั้งแต่ 0.5 จนถึง 5 mm จะใช้ในอุปกรณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในงานทางด้านไฟฟ้ากำลัง ส่วนในงานทางด้านอิเลคทรอนิคส์จะใช้แผ่น Lamination ที่มีความหนาประมาณ 0.01 จนถึง 0.5 mm

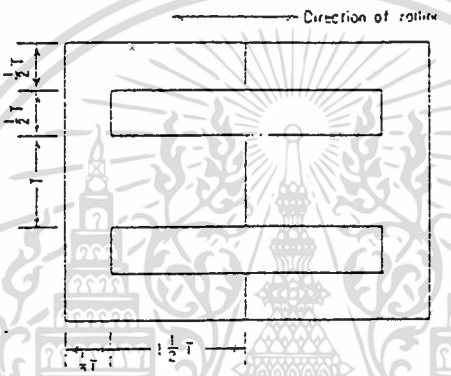
อัตราส่วนของปริมาณจริงของอุปกรณ์แม่เหล็กกับปริมาณทั้งหมดเรียกว่า stacking factor (*Fs* ) โดยตัวประกอบดังกล่าวมีความสำคัญมาก ในการคำนวณหาความหนาแน่นฟลักซ์ในเส้นทางแม่เหล็ก ตารางที่ ก.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า stacking factor กับความหนาแน่นของแผ่น Lamination

ค่า stacking factor สามารถที่จะสมมุติให้มีค่าเป็น 10. ถ้ามีความหนาแน่นมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 Stacking factor for lamination core

| Lamination Thickness (mm) | Stacking factor |
|---|---|
| 0.0127 | 0.50 |
| 0.0254 | 0.75 |
| 0.0508 | 0.85 |
| 0.1 - 0.25 | 0.90 |
| 0.27 - 0.36 | 0.95 |




รูปที่ ก.1 แสดงการเรียงแผ่น Lamination เพื่อลดปรากฏการณ์จากช่องอากาศ

1.2 Wound Core

แกนแบบ Wound จะมีความหนาขึ้นอยู่กับการใช้งาน แผ่นที่มีขนาดบางจะมีกระแสไหลวนน้อยทำให้ได้ดีในงานที่มีความถี่สูง ๆ และประหยัดค่าใช้จ่าย

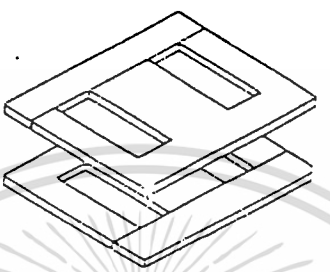
แกนแบบ Wound มี 2 แบบ คือ Cut และ Uncut แกนแบบ Cut จะใช้ในงานทั่ว ๆ ไป แกนแบบ Uncut จะต้องมีการพันขดลวดแบบพิเศษ

แกนแบบ Cut Wound จะเรียกว่า "C" core เพราะแกนแบบนี้จะประกอบด้วยชิ้นส่วนของแกนที่มีรูปร่างเป็นตัว C ซึ่งมีช่องอากาศตรงกลางเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า 2 ตัวเก็บประจุเข้าด้วยกัน แกนแบบนี้ได้รับการพัฒนา โดยบริษัท Westinghouse Electric Corporation ซึ่งมีชื่อเรียกว่า HIPERSIT ซึ่งย่อมาจาก HIgh PERmeability SITcon ซึ่งมีการสูญเสียเนื่องจากแกนเหล็กต่ำ

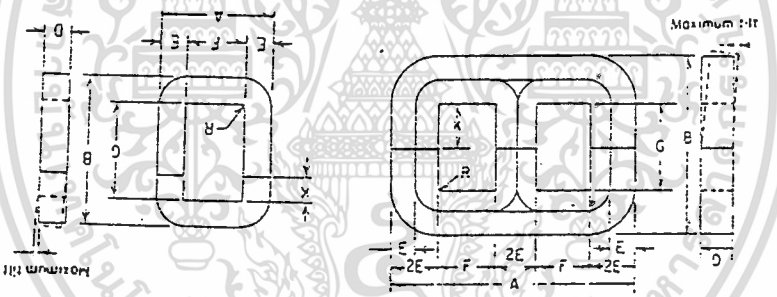
แกนแบบ Cut ที่ใช้ใน 3 เฟสจะมีรูปร่างหรือโครงสร้างแบบ E core (C core อธิบายในรูปที่ ก.2 และ E core ในรูปที่ ก.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกนแบบ Cut มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กที่ดี ทำให้ความหนาแน่นฟลักซ์สูงกว่าแกนแบบ Lamination ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ สำหรับ C core ที่ผลิตจาก high-nickle-alloy จะมีความทนทานมากกว่าแบบที่ผลิตจาก Silicon steel alloy และยังมีความสูญเสียที่ใช้ในความถี่สูงน้อยกว่า แต่มีค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่อิ่มตัวต่ำ



รูปที่ ก.2 แสดงลักษณะแกนเหล็กแบบ C core



รูปที่ ก.3 แสดงลักษณะแกนเหล็กแบบ E core

2. ชนิดของการพันขดลวด

ความเข้มของสนามแม่เหล็กต้องการวางจำนวนรอบของลวดจำนวนหลายรอบในปริมาตรเล็ก ๆ ทฤษฎีการพันต่าง ๆ กันจะถูกพัฒนาเพื่อความต้องการที่กล่าวมา แต่ละวิธีจะมีประโยชน์และข้อจำกัด แต่ละการประยุกต์ใช้งานคือการเลือกพันที่เหมาะสมที่สุด จะเกี่ยวข้องกับการประหยัดและคุณลักษณะที่ดีได้

ในการพันทฤษฎีการพันส่วนมากจะเกี่ยวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่หมุนได้ซึ่งนำมาใช้ช่วยในการพัน ขณะที่เครื่องจักรหมุนจำนวนรอบจะเพิ่มขึ้น เครื่องนับจะจับจำนวนรอบในการพัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลวดที่ใช้ในกรพันจะอยู่บนแกนลวด ขนาดของแกนลวดที่ใช้เก็บลวดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเพิ่มขึ้น การใช้แกนนี้เป็นมาตรฐานเพื่อที่จะทำให้สะดวกในการจะใช้อุปกรณ์ในการดึงลวด เพื่อควบคุมในการพันลวด ซึ่งอุปกรณ์ที่ดึงนี้จะเป็นตัวเครื่องจักรกลเซอร์โวที่รักษาแรงดึงลวดให้คงที่โดยที่ความเร็วจะเป็นเชิงซ้อน

<u>การพันขดลวดเป็นชั้น</u>

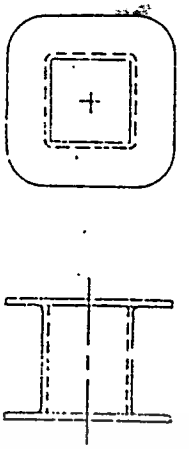
ลวดจะถูกพันเป็นเกลียวกับแผ่นฉนวนที่ระหว่างแต่ละชั้น ชั้นของฉนวนจะกว้างกว่าความยาวในการพัน อนุญาติให้ขอบอยู่ที่ปลายแต่ละด้าน ของแต่ละชั้นของฉนวนมีผลต่อการออกแบบ ที่ว่างของลวดจะต้องเผื่อไว้มากกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดเพื่อให้แน่ใจว่าไม่สามารถพันลงได้ ที่ปลายของลวดแต่ละชั้นฉนวนจะถูกสอดเอาไว้

การพันลวดแต่ละชั้นนิยมพันเป็นรูปสี่เหลี่ยม ที่มีความหนามากเพียงพอเพื่อป้องกันการยุบลงจากแรงดึงของขดลวด รูปร่างของสี่เหลี่ยมจะมีผลต่อการยุบตัว ความแข็งแรงจะลดลงตามความยาวของด้านสี่เหลี่ยมที่ยาวเพิ่มขึ้น

<u>การพันขดลวดโดยใช้บอบบิ้น (Bobbin)</u>

บอบบิ้นจะใช้เป็นตัวรองรับขดลวดที่พัน ซึ่งแกนเหล็กจะสอดเข้าไปในบอบบิ้นหลังจากได้รอบของขดลวดตามที่ต้องการ ตัวอย่างของบอบบิ้นแสดงตามรูปที่ 5 ขนาดของบอบบิ้นจะใช้โดยกำหนดขนาดของแกนเหล็กและค่า Stack ของแกนเหล็กที่วางแบบ laminate บอบบิ้นจะทำมาโดยการใช้แม่พิมพ์ของหล่อแบบฉีด การพันโดยใช้บอบบิ้นจะคล้ายกับการพันทีละชั้น ๆ แต่ว่าระยะของรอบแต่ละรอบจะประมาณไม่เท่ากันทุกรอบ เมื่อลวดถูกพันลงในบอบบิ้นและจะได้จำนวนรอบต่อชั้น การพันของขดลวดจะดูเหมือนเบียดกันหลังจากพันไป 2-3 ชั้น บอบบิ้นจะมีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อใช้พื้นที่หน้าต่างสำหรับให้แกนเหล็กสอดซึ่งดีกว่าการพันแบบเป็นชั้น ๆ เนื่องจากมีความหนาของผนังแทนการพันแบบเป็นชั้น ๆ และไม่มีฉนวนระหว่างชั้นต่าง ๆ ขั้วของสายไฟออกของปัญหาในการนำขั้วไฟออก ซึ่งเป็นการนำเอาออกมาจะมาตามผนังของบอบบิ้นซึ่งจะพันด้วยเทปซึ่งเป็นฉนวน วิธีที่พันนี้จะจำกัดแรงดันเหนี่ยวนำที่สามารถทนได้เพราะลวดที่พันเริ่มต้นจะอยู่ใกล้ชิดกับรอบของลวดที่พันเสร็จแล้ว ถ้าลวดถูกพันอยู่ในผนังของบอบบิ้นปัญหานี้จะไม่เกิดขึ้น แต่จะเกิดการพังทลายในแกนเหล็กเพิ่มขึ้น ระยะทางที่ไม่แน่นอนในแต่ละรอบ และการไม่มีฉนวนกั้นในแต่ละชั้น จะเพิ่มความผิดพลาดภายในลวดภายในค่าแรงดันเหนี่ยวนำและฉนวนระหว่างลวดที่พัน และกราวด์ที่ถูกแบ่งโดยบอบบิ้นการใช้บอบบิ้นในการพันจะเป็นการประหยัดด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.4 แสดงลักษณะบอบบิ้น

การพันขดลวดแบบ Universal

การพันแบบนี้ จะใช้ที่ความถี่ย่าน 20 kHz ถึง 5 kHz ซึ่งค่าคาปาซิแตนซ์และค่าปรากฏการณ์ผิวที่กระจายอยู่ ซึ่งดูเหมือนเป็นปัญหาสำคัญ การจัดรอบของขดลวดจะช่วยลดการสูญเสียเนื่องจากไดอิเลคทริคและความเข้มความหนาแน่นกระแส ซึ่งจะช่วยในการปรับปรุงค่า Q การจัดรอบของขดลวดจะลดค่าคาปาซิแตนซ์ และแรงดันระหว่างรอบที่อยู่ใกล้ชิดกัน ซึ่งจะลดค่าคาปาซิแตนซ์ที่ขั้วต่อ

รอบการพันแบบ Universal เมื่อเปรียบเทียบกับการพันเกลียวแบบทั่ว ๆ ไป คือ จะไม่วางชิดติดกันในแต่ละรอบ ไม่มีฉนวนกั้นระหว่างรอบนอกจากฉนวนที่อยู่บนลวด ลักษณะของลวดจะอยู่ที่การจัดวางของแต่ละรอบ ซึ่งสามารถคงตัวได้ด้วยตนเองได้ ไม่ยุบตัว ลวดมี่นำมาพันซึ่งนิยมกันมากคือ Textitle Fiber ซึ่งช่วยเพิ่มทั้งแรงเสียดทานและฉนวน

ทางเดินของลวดที่พันจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง เรียกว่า "crossover" ระยะทางของความกว้างของขดลวดและขนาดของ cam กำหนดเป็น $C$ จำนวนของ crossover ต่อรอบ กำหนดเป็น n มุมระหว่างลวดกับแนวแกนของขดลวดจะพยายามรักษาเพื่อให้ลวดอยู่คงตัวได้ จากจุดเริ่มต้นที่พันไปจนครบรอบเรียกว่า "winding cycle" ของจำนวน crossover ที่ต้องการเป็นจำนวนเต็มคู่ q ที่ต้องการต่อ 1 winding cycle ให้เป็น q ซึ่ง q จะเป็นเลขจำนวนเต็มคู่ ถ้า n เป็นจำนวนเต็มคู่ q จะมีค่าเท่ากับ n ถ้า n เป็นเลขจำนวนเต็มคี่ q จะมีค่าเท่ากับ 2n

ลำดับทั้งหมดของการพันลวดมีความสัมพันธ์กับเส้นผ่าศูนย์กลางรวมทั้งหมดของลวด ซึ่งจะกำหนดเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น เส้นผ่าศูนย์กลางของลวดนี้ยังช่วยในการกำหนดมุมระหว่างลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

## ค่าจำกัดแรงดันฮาร์โมนิคส์ตามมาตรฐานของประเทศต่าง ๆ

**1. Limitation of Harmonic Cause Household and Similar Electric Appilances**

**คือข้อกำหนดค่าแรงดันและกระแสฮาร์โมนิคส์ที่เกิดจากอุปกรณ์เครื่องไฟฟ้าในบ้านเรือน**

ค่าจำกัดแรงดันฮาร์โมนิคส์ ตามมาตรฐาน IEEE 519-1992

เป็นค่าที่ออกแบบกรณี Worst case สำหรับ normal operation

ตารางที่ ข 1 Voltage Distortion Limits

| Bus Voltage at PCC | Individual Voltage Distortion (%) | Total Voltage Distortion THD (%) |
|---|---|---|
| 69 KV and below | 3.08 | 5.0 |

ค่าจำกัดแรงดันฮาร์โมนิคส์ ตามมาตรฐาน Australion Standard (1991)

Australion Standard ⟹ -พิกัดกำลังไม่เกิน 4.8 KVA , 50 Hz.

-แรงดัน 240/415 V ,3 เฟส,3 สายหรือ 4 สาย

-แรงดัน 240 V ,1 เฟส,2 สาย

ตารางที่ ข.2 Maximum Harmonic Voltage Limits for single-phase , rated voltage 240 V

| Harmonic order (n) | Maximum Harmonic Voltage ratio (%) |
|---|---|
| 3 | 0.85 |
| 5 | 0.65 |
| 7 | 0.60 |
| 9 | 0.40 |
| 11 | 0.40 |
| 13 | 0.30 |
| 15 to 36 | 0.25 |

**Even Harmonic**

| | |
|---|---|
| 2 | 0.30 |
| 4 to 40 | 0.20 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

● <u>ค่าจำกัดแรงดันฮาร์โมนิคส์ ตามมาตรฐาน IEEE 519-1992</u>

พิกัดแรงดันอยู่ระหว่าง 120 V ถึง 69 KV

ตารางที่ ข 3 Harmonic Current Distortion Limits

| Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of $I_L$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Individual Harmonic Order (Odd harmonic ) | | | | | | |
| $I_{SC}/I_L$ | <11 | 11≤h<17 | 17≤h<23 | 23≤h<35 | 35 ≤ h | TDD |
| < 20 | 4.0 | 2.0 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 5.0 |
| 20 < 50 | 7.0 | 3.5 | 2.5 | 1.0 | 0.5 | 8.0 |
| 50 < 100 | 10.0 | 4.5 | 4.0 | 1.5 | 0.7 | 12.0 |
| 100 < 1000 | 12.0 | 5.5 | 5.0 | 2.0 | 1.0 | 15.0 |
| > 1000 | 15.0 | 7.0 | 6.0 | 2.5 | 1.4 | 20.0 |

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

$I_{SC}$ = maximum short current by point of command coupling (PCC)

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

ค่าจำกัดกระแสฮาร์โมนิคส์ ตามมาตรฐาน Australion Standard 2279.1-1991 , 2279.2-1991

สำหรับ 1 เฟส,พิกัดแรงดัน 240 V

ตารางที่ ข.4 Maximum Harmonic Current Limits

| Harmonic order (n) | Maximum Harmonic Current (A) |
|---|---|
| 3 | 2.40 |
| 5 | 1.19 |
| 7 | 0.80 |
| 9 | 0.42 |
| 11 | 0.36 |
| 13 | 0.22 |
| 15 to 36 | 0.16 |
| 15 ≤ n ≤ 40 | 0.15 × 15/n |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Even Harmonics**

| | |
|---|---|
| 2 | 0.30 |
| 4 | 0.20 |
| 6 | 0.31 |
| $8 \leq n \leq 40$ | $0.23 \times 8/n$ |

ในกรณีของระบบ 1 เฟส 415 V และ 3 เฟส 415 V ค่าจำกัดของ 1 เฟส จะประยุกต์ใช้ในแต่ละค่าของกระแสไลน์

ค่าจำกัดฮาร์โมนิคส์ ตามมาตรฐาน ICE Standard (1982)

ICE Standard $\Rightarrow$ -พิกัดแรงดันของอุปกรณ์สำหรับ 1 เฟส, 230 V

-พิกัดแรงดันของอุปกรณ์สำหรับ 3 เฟส, 400 V

ตารางที่ ข.5 Limits of Harmonic Current for television receivers

| Harmonic order (n) | Maximum permissible Harmonic Current (A) |
|---|---|
| **Odd harmonics** | |
| 3 | 0.80 |
| 5 | 0.60 |
| 7 | 0.45 |
| 9 | 0.30 |
| 11 | 0.17 |
| 13 | 0.12 |
| $15 \leq n \leq 40$ | $0.15 \times 15/n$ |
| **Even Harmonics** | |
| 2 | 0.30 |
| 4 | 0.15 |
| D.C Current | 0.05 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข. 6 Limits of Harmonic Current ของ Balance three-phase equipment และ equipment ที่มี special wave shape และมี P > 600 W

| Harmonic order (n) | Maximum permissible Harmonic Current (A) |
|---|---|
| **Odd harmonics** | |
| 3 | 2.30 |
| 5 | 1.14 |
| 7 | 0.77 |
| 9 | 0.40 |
| 11 | 0.33 |
| 13 | 0.21 |
| $15 \leq n \leq 39$ | $0.15 \times 15/n$ |
| **Even Harmonics** | |
| 2 | 1.08 |
| 4 | 0.43 |
| 6 | 0.30 |
| $8 \leq n \leq 40$ | $0.23 \times 8/n$ |

ในกรณีของอุปกรณ์ที่เป็น Portable tool ค่าจำกัดจะคูณด้วย factor = 1.5

ตารางที่ ข.7 ค่า Harmonic Current Limit ของ Lighting equipment

| Harmonic order (n) | Maximum permissible Harmonic Current (A) |
|---|---|
| 2 | 2 |
| 3 | $30\lambda$ |
| 5 | 10 |
| 7 | 7 |
| 9 | 5 |
| $11 \leq n \leq 39$<br>Odd harmonics only | 3 |
| $\lambda$ is the circuit power factor | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ประเภท Dimming Devices

1. Independent Dimming Devices

ค่า harmonic current limits ใช้ตามตาราง phase control and firing angel ไม่เกิน 145 °

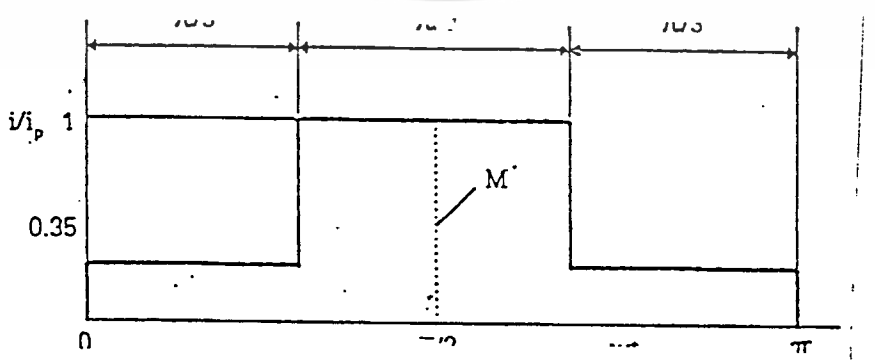
2. Built in Dimming Devices

สำหรับ Incandescent lamp luminaires ค่า harmonic current limits ของ Built in Dimming Devices จะใช้ค่าตามตาราง phase control and firing angel ไม่เกิน 145 °

ตารางที่ ข.8 harmonic current limits ของอุปกรณ์ที่มี special wave shape และมี Active Power < 600 W

| Harmonic order (n) | Maximum permissible Harmonic Current per watt mA/W | Maximum permissible Harmonic Current (A) |
|---|---|---|
| 3 | 3.4 | 2.30 |
| 5 | 1.9 | 1.14 |
| 7 | 1.0 | 0.77 |
| 9 | 0.5 | 0.40 |
| 11 | 0.35 | 0.33 |
| $11 \leq n \leq 39$ Odd harmonics only | 3.85 / n | ดูตาราง ข. 10 |

อุปกรณ์ที่มีการป้อนกระแสเป็นแบบ special wave shape ดังแสดงในรูปที่ ข.1




รูปที่ ข.1 แสดง Envelop of the input current to define the " special wave shape "

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2. Limitation of Harmonic Cause By Industrial Equipment**

เป็นมาตรฐานสำหรับฮาร์โมนิคส์ ที่เกิดจาก อุปกรณ์ในโรงงานอุตสาหกรรม รวมทั้งอาคารพาณิชย์ต่าง ๆ

● ค่าจำกัดแรงดันฮาร์โมนิคส์ ตามมาตรฐาน IEEE 519-1992

เป็นค่าที่ออกแบบกรณี Worst case สำหรับ normal operation

ตารางที่ ข.9 Voltage Distortion Limits

| Bus Voltage at PCC | Individual Voltage Distortion (%) | Total Voltage Distortion THD (%) |
|---|---|---|
| 69 KV and below | 3.0 | 5.0 |
| 69 KV throudh 161 KV | 1.5 | 2.5 |
| 161.001 KV and above | 1.0 | 1.5 |

● ค่าจำกัดแรงดันฮาร์โมนิคส์ ตามมาตรฐาน Austration Standard (1991)

Australion Standard ⟹ - ค่าแรงดันที่จุด PCC มีค่ามากกว่า 240/415V

- อุปกรณ์มีพิกัดมากกว่า 4.8 KVA

การพิจารณาแบ่งออกเป็นระดับแยกตามปัญหาของโหลดที่เป็นโหลดไม่เป็นเชิงเส้นโดยแยกตามขนาด และชนิดของอุปกรณ์แบ่งเป็น 3 Stage คือ

a) Stage 1 : เป็นพิกัดที่ใช้กับอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก ๆ ทั่ว ๆ ไป รวมถึงพวกคอนเวอร์เตอร์หรือ AC regulators

b) Stage 2 : เป็นพิกัดกับอุปกรณ์ที่ต่อกับด้านรับหรือจ่ายของระบบจำหน่าย

c) Stage 3: จะประกอบด้วยข้อแนะนำที่รวมค่าความเพี้ยนแรงดันซึ่งพิจารณาในจุดซึ่งรู้คุณลักษณะของโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.10 Harmonic Voltage Ratio Limits At Any Point On The System

| Supply System | Voltage at point Common coupling | Total harmonic Voltage Ratio | Individual harmonic Voltage ratio (%) | |
|---|---|---|---|---|
| | (KV) | (%) | Odd | Even |
| Primary and Secondary Distribution | ≤ 33 | 5 | 4 | 2 |
| Transmission and | 22, 33 and 66 | 3 | 2 | 1 |
| Sub-Transmission | ≥ 110 | 1.5 | 1 | 0.5 |

ค่าจำกัดกระแสฮาร์โมนิคส์ ตามมาตรฐาน IEEE 519 – 1992

ตารางที่ ข.11 Harmonic Current Limit สำหรับแรงดัน ระหว่าง 69.001 V ถึง 161 KV

| Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of $I_L$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Individual Harmonic Order (Odd harmonics) | | | | | | |
| $I_{sc}/I_L$ | < 11 | 11≤ h<17 | 17≤ h<23 | 23≤h< 35 | 35≤ h | TDD |
| < 20 | 2.0 | 1.0 | 0.75 | 0.3 | 0.15 | 2.5 |
| 20< 50 | 3.5 | 1.75 | 1.25 | 0.5 | 0.25 | 4.0 |
| 50< 100 | 5.0 | 2.25 | 2.0 | 0.75 | 0.35 | 6.0 |
| 100< 1000 | 6.0 | 2.75 | 2.5 | 1.0 | 0.5 | 7.5 |
| >1000 | 7.5 | 3.5 | 3.0 | 1.25 | 0.7 | 10.0 |
| Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above | | | | | | |

Isc = กระแสลัดวงจรสูงสุดที่ PCC

$I_L$ = กระโหลดสูงสุด(ที่ความถี่มูลฐาน)ที่ PCC

ตารางที่ ข.12 Harmonic Current Limits สำหรับแรงดัน > 161 KV

Current Distortion Limits for High Voltage (>161 KV) , Dispersed Generation and Co-generation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| Individual Harmonic Order (Odd harmonics) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $I_{sc}/I_L$ | $<11$ | $11\leq h<17$ | $17\leq h<23$ | $23\leq h<35$ | $35\leq h$ | TDD |
| $<50$ | 2.0 | 1.0 | 0.75 | 0.3 | 0.15 | 2.5 |
| $\geq 50$ | 3.0 | 1.5 | 1.15 | 0.45 | 0.22 | 3.75 |
| Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above | | | | | | |

Isc = กระแสลัดวงจรสูงสุดที่ PCC

$I_L$ = กระโหลดสูงสุด(ที่ความถี่มูลฐาน)ที่ PCC

<u>ค่าจำกัดแรงดันฮาร์โมนิคส์ ตามมาตรฐาน Austration Standard 2279.1-1991 , 2279.2-1991</u>

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสฮาร์โมนิคส์ที่ไหลเข้าโหลดกับความเพี้ยนแรงดัน

ตารางที่ ข.13 Harmonic Current Ratio For Semiconductor Free-Firing Converters

| Harmonic order | Maximum Harmonic Voltage ratio ,% Effective number of Phase | | |
|---|---|---|---|
| (n) | 6 | 12 | 24 |
| 5 | 17.5 | 2 | 2 |
| 7 | 11 | 1.5 | 1.5 |
| 11 | 4.5 | 4.4 | 1 |
| 13 | 3 | 3 | 0.75 |
| 17 | 1.5 | 0.2 | 0.2 |
| 19 | 0.125 | 0.15 | 0.15 |
| 23 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| 25 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |

<u>หมายเหตุ</u>

ค่าจำกัดกระแสฮาร์โมนิคส์ตามตารางที่ ข.3,ข.11,ข.12 ตามมาตรฐานของ IEEE ใช้กับกรณีของเรคติไฟเออร์ 6 พัลส์และความเพี้ยนอื่นที่เหมาะสม แต่ถ้าหากเฟสเลื่อนเนื่องจากหม้อแปลงหรือคอนเวอร์เตอร์มีจำนวนมาก พัลส์มากกว่า 6 พัลส์ ค่าจำกัดสำหรับฮาร์โมนิคส์คุณลักษณะในตารางที่ ข.3,ข.11,ข.12 จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยตัวคูณ เท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sqrt{\frac{q}{6}}$$

เมื่อ q = จำนวนพัลส์

มาตรฐานข้อกำหนดของฮาร์โมนิคส์ที่ยอมรับได้ในประเทศต่าง ๆ

โดยทั่วไปจะอนุญาตให้ค่า % $THD_v$ ได้ไม่เกิน 5 % โดยข้อกำหนดของประเทศต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

ประเทศฝรั่งเศส การไฟฟ้าของฝรั่งเศส ได้กำหนดระดับฮาร์โมนิคINที่เกิดจากลูกค้าผู้ขอใช้ไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิคส์ ไว้ดังนี้

$$THD = \frac{\left(\sum_{h=2}^{N} V_n^2\right)^{0.5}}{V_1} <= 16\%$$

ฮาร์โมนิคส์คู่ $V_h/V_t \leq 0.6\ \%$

ฮาร์โมนิคส์คี่ $V_h/V_t \leq 1\ \%$

ประเทศฟินแลนด์ มีการกำหนดมาตรฐาน ดังตารางที่ ข.14

ตารางที่ ข.14 แสดงค่ากระแสฮาร์โมนิคส์ของประเทศฟินแลนด์

| Voltage (KV) | $100I\ (I_{RMS}^{\ 2}-I_1^{\ 2.1/2}/I_{REF})$ | $100I_n/I_{REF}$ |
|---|---|---|
| 3 to 20 | 10 | 8 |
| 30 to 45 | 7 | 6 |
| 110 | 5 | 4 |

โดย $I_{REF}$ คือค่ากระแสที่คำนวณจากค่าเฉลี่ยของกำลังงานที่เกิดขึ้นจากโหลดใน 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเทศออสเตรเลีย ตามมาตรฐาน AS 2279-1979 ได้กำหนดของเขตจำกัดของแรงดันฮาร์โมนิคส์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าทั้งระบบจำหน่ายและระบบสายส่ง ดังแสดงไว้ในตารางที่ ข.15

ตารางที่ ข.15 ข้อกำหนดแรงดันฮาร์โมนิคส์ของประเทศออสเตรเลีย

| Type of supply system | supply system voltage at point of common coupling (KV) | Total harmonic voltage distortion $U_2$ (percent) | Individual harmonic voltage distortion (percent) | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Odd | Even |
| Primary and Secondary distortion | Up to including 33 | 5 | 4 | 2 |
| Transmission and Substransmission | 22 , 33 and 66 | 3 | 2 | 1 |
| | 110 and above | 1.5 | 1 | 0.5 |

ประเทษอังกฤษ ข้อกำหนดทางแรงดันฮาร์โมนิคส์ของประเทษอังกฤษ มีลักษณะคล้ายคลึงกับข้อกำหนดของประเทศออสเตรเลีย ยกเว้นบางระดับของแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงไว้ในตารางที่ ข.16

ตารางที่ ข.16 ข้อกำหนดแรงดันฮาร์โมนิคส์ของประเทษอังกฤษ

| supply system voltage (KV) at Point of Common Coupling | Total harmonic voltage distortion VT (%) | Individual harmonic voltage distortion (%) | |
|---|---|---|---|
| | | Odd | Even |
| 0.415 | 5 | 4 | 2 |
| 6.6 and 11 | 4 | 3 | 1.75 |
| 11 and 66 | 3 | 2 | 1 |
| 132 | 1.5 | 1 | 0.5 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเทศนิวซีแลนด์ ได้กำหนดระดับแรงดันฮาร์โมนิคส์ที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบสายส่ง ดังตารางที่ ข.17

ตารางที่ ข.17 ข้อกำหนดแรงดันฮาร์โมนิคส์ของประเทศนิวซีแลนด์

| Harmonic order n | Voltage limit (phase to earth harmonic voltage expressed as a . percentage of the nominal phase to earth system voltage) |
|---|---|
| 3 | 2.3 |
| 5 | 1.4 |
| 7 | 1.0 |
| 9 | 0.8 |
| 11 | 0.7 |
| 13 | 0.6 |
| 15 | 0.5 |
| 17 to 21 | .4 |
| 23 to 49 | 0.3 |
| 2 | 1.2 |
| 4 | 0.6 |
| 6 | 0.4 |
| 8 and 10 | 0.3 |
| 12 to 50 | 0.2 |

โดยค่า $V_h(p\text{-}g)$ คือแรงดันค่าฮาร์โมนิคส์ที่เทียบระหว่างเฟสกับกราวน์

ส่วนประเทศอื่น ๆ ได้จำกัดขอบเขตของฮาร์โมนิคส์ที่กำหนดไว้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.18 แสดงขอบเขตจำกัดของเขตของฮาร์โมนิคส์ของประเทศอื่น ๆ ที่ได้กำหนดไว้

| Country | Voltage Level (kV) | Maximum of Total Voltage Harmonic distortion (%) | Maximum of individual voltage harmonic (%) |
|---|---|---|---|
| Sweden | 0.43<br>3.3-24<br>36-72<br>> 84 | -<br>3.0<br>2.0<br>1.0 | -<br>-<br>-<br>- |
| Switzerland | - | - | n = 3 Vn < 0.85<br>5<br>7 Vn < 0.25<br>> 9<br>n-even Vn < 0.2 |
| USA | 2.4-69<br>> 115 | 5.0<br>1.5 | -<br>- |
| USSR | - | 5.0 | - |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

## อุปกรณ์คายประจุ

เมื่อตัวเก็บประจุต่ออยู่กับระบบไฟฟ้า จะมีประจุไฟฟ้าเก็บไว้ในตัวตัวเก็บประจุ และเมื่อตัดตัวเก็บประจุออกจากระบบ ไฟฟ้าเหล่านี้จะยังคงค้างอยู่ ซึ่งอาจเป็นอันตรายทำให้เกิดไฟฟ้าลัดวงจร เมื่อแตะต้องขั้วของตัวเก็บประจุ ด้วยเหตุนี้ IEC 70-1967 จึงมีข้อบังคับทางด้านความปลอดภัย (Safety requirement) ตัวเก็บประจุจะต้องมีความสามารถในการคายประจุไฟฟ้าอย่างเหมาะสม

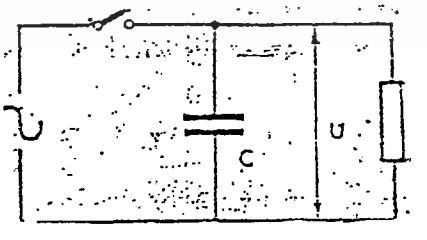
1. ความต้องการด้านความปลอดภัยของ IEC

ตาม IEC 70-1967 ได้กล่าวโดยสรุปว่า

- ตัวเก็บประจุจะต้องมีอุปกรณ์สำหรับคายประจุ เพื่อให้สามารถลดแรงดันลงเหลือไม่เกิน 50 V ในช่วงเวลาหลังจากการตัดตัวเก็บประจุออกจากระบบไฟฟ้าคือ
- ตัวเก็บประจุพิกัดแรงดันน้อยกว่าหรือเท่ากับ 660 V ภายใน 1 นาที
- ตัวเก็บประจุพิกัดแรงดันมากกว่า 660 V ภายใน 5 นาที
- เมื่อตัดตัวเก็บประจุออกจากระบบไฟฟ้า ก่อนที่จะต่อเข้าระบบไฟฟ้าเข้าอีกแรงดันค้างที่ขั้วจะต้องไม่มากกว่า 10 % ของแรงดันพิกัด

2. การคายประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ

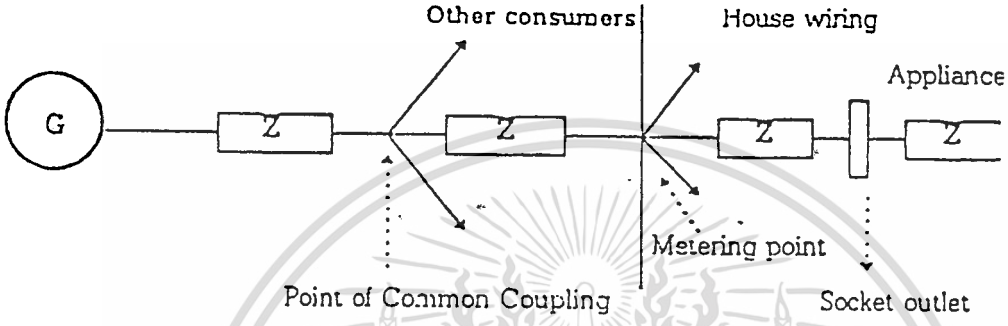
แรงดันที่ขั้วของตัวเก็บประจุทำให้ลดลงได้โดยการนำความต้านทานที่มีค่าเหมาะสมมาต่อเข้าดังแสดงในรูปที่ ค.1




รูปที่ ค.1 แสดงการต่อความต้านทานเพื่อลดแรงดันที่ขั้วตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการพิจารณาค่า จำกัดฮาร์โมนิคส์ของระบบ จุดที่ใช้พิจารณาจะเป็นจุดต่อร่วมของผู้ใช้ไฟฟ้าหลายราย ( Point of command coupling , PCC ) เพื่อให้ได้ค่าที่ครอบคลุมทั้งหมด




รูปที่ ค.4 แสดงจุดต่อร่วม (PCC) ในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง.

## โปรแกรมสำหรับคำนวณวงจรฟิลเตอร์

ในการเขียนโปรแกรมของโครงงานนี้มีทั้งโปรแกรมที่เป็นภาษาปาสคาลเพื่อง่ายแก่การพัฒนา และเป็นภาษาวิชวลเบสิกเพื่อง่ายแก่การใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
program harmonic;
uses crt;
var i,i1,i2,i3,v,v1,v2,v3,v4,va,va1,va2,a,b,c,sv,si,z,zz,zz1:real;
   d,j,k,h,x,y,n,n1,cc1:integer;
   tt:boolean;
   s,s1,t,t1,u,l,zl,vv,cc:array[1..15] of real;
   nn:array[1..15] of integer;
procedure ch_cap;
begin
   x:=0;n:=1;
   repeat
   x:=x+1;
   if x=16 then
   begin
      va:=va-cc[x-1];          {shoot var by IEC standard}
      n:=n+1;
      x:=1;
   end;
   a:=(cc[x]-va);
   until a>=0;
   va:=((n-1)*cc[15])+cc[x];
   c:=(1000000)*(1000*va)/(100*pi*v2*v2);
   if (frac(c/10)>0) and (frac(c/10)<0.5)
   then cc1:=10*(round(c/10)+1)       {shift C to ...0}
   else cc1:=10*round(c/10);
end;
begin
   clrscr;
   for j:=1 to 15 do
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
begin
    s[j]:=0;s1[j]:=0;t[j]:=0;t1[j]:=0;
    u[j]:=0;l[j]:=0;zl[j]:=0;vv[j]:=0;
    cc[j]:=0;nn[j]:=0;
end;
   writeln('Input your rate voltage(V)');readln(v);
   writeln('Input Kvar(Kvar)');readln(va);
cc[1]:=3;cc[2]:=5;cc[3]:=10;cc[4]:=15;cc[5]:=20;
cc[6]:=25;cc[7]:=30;cc[8]:=40;cc[9]:=50;cc[10]:=65;
cc[11]:=70;cc[12]:=75;cc[13]:=80;cc[14]:=90;cc[15]:=100;
{input var by IEC standard}
   v1:=v;v2:=v;va2:=va;d:=0;
   j:=3;k:=3;sv:=0;si:=0;
u[1]:=230;u[2]:=260;u[3]:=270;u[4]:=280;u[5]:=300;u[6]:=360;u[7]:=375;
u[8]:=400;u[9]:=415;u[10]:=450;u[11]:=470;u[12]:=525;u[13]:=600;
{input voltage of capacitor by standard}
   for x:=1 to 5 do
      begin
      j:=j+2;
      writeln('Input %THDv of harmonic number ',j);readln(s[x]);
      end;
  for x:=1 to 5 do
      begin
      k:=k+2;
      writeln('Input %THDi of harmonic number ',k);readln(t[x]);
      t1[x]:=t[x];
      end;
  ch_cap;  {calculate capacitor for calculate v+v(har)}
  h:=5;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
for x:=1 to 5 do
begin
   zl[x]:=1000000/(2*pi*50*h*c);
   h:=h+2;
end;
for j:=1 to 5 do
t[j+5]:=t[j];
x:=1;
for x:=1 to 5 do
  for k:=1 to 5 do s1[x]:=s1[x]+(t[k]*zl[x]);
for j:=1 to 5 do sv:=sv+s1[j];
v1:=(v+((v*sv)/100));
y:=1;
   repeat
   z:=(u[y] - v1);
   y:=y+1;
   until z>=0;
v1:=u[y-1];   {choose voltage in capacitor}
va:=va2*sqr(v1/v);  {calculate var in capacitor}
ch_cap;nn[1]:=n;
for x:=2 to 4 do
  begin
  n:=x;
  if ((2*x)+3) mod 3 = 0 then n:=n+1;
  nn[x]:=round(nn[1]*(t[n]/t[1]));
  if nn[x]<1 then nn[x]:=1;
  end;
i:=1000*(va2/v); {calculate amp}
v3:=0;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        for j:=1 to 5 do v3:=v3+s[j];
        k:=1;zz:=0;d:=1;tt:=false;
        repeat
            zz:=zz+s[k];
            v4:=(zz/v3);
            if v4 >= 0.8
            then tt:=true
            else begin
                k:=k+1;
                d:=d+1;
                end;
        until tt;     {choose harmonic filter number}
        if (nn[1]>1) then
              begin
              va:=va/nn[1];
              ch_cap;
              end;
k:=5;j:=0;x:=1;
clrscr;
repeat
    if (k mod 3)=0
    then begin
       k:=k+2;
       d:=d-1;
       end;
       if (((k*k/((k*k)-1))*v)>v1) then v1:=u[y];
writeln;
writeln('  HARMONIC FILTER(HF) ORDER ',k);
writeln('  Number of Filter is ',nn[x],' Unit');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
writeln('  Voltage in System is ',v:4:2,' Volt');
writeln('  Kvar in Capacitor is ',va:4:2,' Kvar');
writeln('  Capacitance in Each Filter is ',cc1,' uF');
writeln('  Voltage of Capacitor is ',v1:4:2,' Volt');
writeln('  Inductance in HF Order ',k,' is ',(100000/(pi*pi*k*k*cc1)):4:4,' mH');
writeln('  Ampare in Filter is ',i:4:2,' Ampare');
writeln;
writeln;
d:=d-1;       k:=k+2;       j:=j+1;
tt:=(d<1);x:=x+1;
if(j=2) and (not tt)
then begin
    writeln('Please Press ENTER to Continue');
    readln;j:=0;clrscr;
    end;
until tt;
readln;
end.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Form=pro.Frm
Module=Module1; pro.Bas
Module=Module2; add.Bas
Form=pro1.Frm
Object={F9043C88-F6F2-101A-A3C9-08002B2F49FB}#1.0#0; COMDLG32.OCX
Object={BDC217C8-ED16-11CD-956C-0000C04E4C0A}#1.0#0; TABCTL32.OCX
Object={3B7C8863-D78F-101B-B9B5-04021C009402}#1.0#0; RICHTX32.OCX
Object={6B7E6392-850A-101B-AFC0-4210102A8DA7}#1.0#0; COMCTL32.OCX
Object={FAEEE763-117E-101B-8933-08002B2F4F5A}#1.0#0; DBLIST32.OCX
Object={00028C01-0000-0000-0000-000000000046}#1.0#0; DBGRID32.OCX
Reference=*\G{BEF6E001-A874-101A-8BBA-00AA00300CAB}#2.0#0#C:\PROGRAM
FILES\SCREENPRINT GOLD\OLEPRO32.DLL#Standard OLE Types
Reference=*\G{00025E01-0000-0000-C000-000000000046}#3.0#0#C:\PROGRAM
FILES\COMMON FILES\MICROSOFT SHARED\DC:\PROGRAM FIL#Microsoft DAO 3.0
Object Library
ProjWinSize=82,483,157,136
ProjWinShow=2
IconForm="Form1"
ExeName32="pro.exe"
Name="Project1"
HelpContextID="0"
StartMode=0
VersionCompatible32="0"
MajorVer=1
MinorVer=0
RevisionVer=0
AutoIncrementVer=0
ServerSupportFiles=0
VersionCompanyName="CIVIL ENGINEERING"
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Attribute VB_Name = "Module1"
Dim vt, vt1, vt2, va, va1, va2, ti5, ti7, ti9, _
   ti11, ti13, tv5, tv7, tv9, tv11, tv13, a, _
   b, c, cp, d, e, f, i, l5, l7, l9, l11, l13, _
   zl5, zl7, zl9, zl11, zl13, x, x1, y
Dim v As Variant
Dim vr As Variant
Dim z(5)
Public Const pi = 3.14159265
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
VERSION 4.00
Begin VB.Form Form1
   BackColor      =  &H00FFFFFF&
   Caption        =  "INPUT VARIABLE"
   ClientHeight   =  5280
   ClientLeft     =  1485
   ClientTop      =  1440
   ClientWidth    =  6090
   BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name        =  "Arial"
      Size        =  8.25
      Charset     =  0
      Weight      =  400
      Underline   =  0   'False
      Italic      =  0   'False
      Strikethrough  =  0   'False
   EndProperty
   Height         =  5685
   Left           =  1425
   LinkTopic      =  "Form1"
   ScaleHeight    =  5280
   ScaleWidth     =  6090
   Top            =  1095
   Width          =  6210
   Begin VB.TextBox Text2
      Alignment      =  2  'Center
      Height         =  375
      Left           =  840
      TabIndex       =  1
      Top            =  2160
      Width          =  855
   End
   Begin VB.TextBox Text1
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Alignment      = 2 'Center
    Height         = 375
    Left           = 840
    TabIndex       = 0
    Top            = 840
    Width          = 855
  End
  Begin VB.CommandButton Command2
    Caption        = "Quit"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name         = "Arial"
      Size         = 15.75
      Charset      = 0
      Weight       = 700
      Underline    = 0   'False
      Italic       = 0   'False
      Strikethrough = 0  'False
    EndProperty
    Height         = 615
    Left           = 240
    TabIndex       = 25
    Top            = 3600
    Width          = 1695
  End
  Begin VB.CommandButton Command1
    BackColor      = &H00FFFFFF&
    Caption        = "Calculate"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name         = "Arial"
      Size         = 14.25
      Charset      = 0
      Weight       = 700
      Underline    = 0   'False
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Italic      = 0  'False
    Strikethrough  = 0  'False
  EndProperty
  Height      = 615
  Left        = 240
  TabIndex    = 24
  Top         = 2760
  Width       = 1695
End
Begin VB.TextBox Text12
  Alignment   = 2  'Center
  Height      = 375
  Left        = 4680
  TabIndex    = 11
  Top         = 3840
  Width       = 855
End
Begin VB.TextBox Text11
  Alignment   = 2  'Center
  Height      = 375
  Left        = 4680
  TabIndex    = 10
  Top         = 3000
  Width       = 855
End
Begin VB.TextBox Text10
  Alignment   = 2  'Center
  Height      = 375
  Left        = 4680
  TabIndex    = 9
  Top         = 2160
  Width       = 855
End
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Begin VB.TextBox Text9
   Alignment      =  2  'Center
   Height         =  375
   Left           =  4680
   TabIndex       =  8
   Top            =  1320
   Width          =  855
End
Begin VB.TextBox Text8
   Alignment      =  2  'Center
   Height         =  375
   Left           =  4680
   TabIndex       =  7
   Top            =  480
   Width          =  855
End
Begin VB.TextBox Text7
   Alignment      =  2  'Center
   Height         =  375
   Left           =  2880
   TabIndex       =  6
   Top            =  3840
   Width          =  855
End
Begin VB.TextBox Text6
   Alignment      =  2  'Center
   Height         =  375
   Left           =  2880
   TabIndex       =  5
   Top            =  3000
   Width          =  855
End
Begin VB.TextBox Text5
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Alignment      = 2 'Center
    Height         = 375
    Left           = 2880
    TabIndex       = 4
    Top            = 2160
    Width          = 855
  End
  Begin VB.TextBox Text4
    Alignment      = 2 'Center
    Height         = 375
    Left           = 2880
    TabIndex       = 3
    Top            = 1320
    Width          = 855
  End
  Begin VB.TextBox Text3
    Alignment      = 2 'Center
    Height         = 375
    Left           = 2880
    TabIndex       = 2
    Top            = 480
    Width          = 855
  End
  Begin VB.Label Label13
    Alignment      = 2 'Center
    BackColor      = &H00FFFFFF&
    Caption        = "Press TAB to Input Another Block"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name         = "Arial"
      Size         = 9.75
      Charset      = 0
      Weight       = 700
      Underline    = 0 'False
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
      Italic        = 0  'False
      Strikethrough = 0  'False
    EndProperty
    ForeColor     = &H00FF00FF&
    Height        = 375
    Left          = 240
    TabIndex      = 26
    Top           = 4920
    Width         = 3255
  End
  Begin VB.Label Label12
    Alignment     = 2  'Center
    BackColor     = &H00FFFFFF&
    Caption       = "Input Kvar"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name        = "Arial"
      Size        = 9.75
      Charset     = 0
      Weight      = 700
      Underline   = 0  'False
      Italic      = 0  'False
      Strikethrough = 0  'False
    EndProperty
    ForeColor     = &H00004080&
    Height        = 495
    Left          = 600
    TabIndex      = 23
    Top           = 1560
    Width         = 1335
  End
  Begin VB.Label Label11
    Alignment     = 2  'Center
    BackColor     = &H00FFFFFF&
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Caption         = "Input Voltage"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name          = "Arial"
      Size          = 9.75
      Charset       = 0
      Weight        = 700
      Underline     = 0   'False
      Italic        = 0   'False
      Strikethrough = 0   'False
    EndProperty
    ForeColor       = &H000000FF&
    Height          = 495
    Left            = 600
    TabIndex        = 22
    Top             = 240
    Width           = 1335
  End
  Begin VB.Label Label10
    Alignment       = 2  'Center
    BackColor       = &H00FFFFFF&
    Caption         = "%THDv Har. No. 13"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name          = "Arial"
      Size          = 8.25
      Charset       = 0
      Weight        = 700
      Underline     = 0   'False
      Italic        = 0   'False
      Strikethrough = 0   'False
    EndProperty
    ForeColor       = &H00800000&
    Height          = 375
    Left            = 4320
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    TabIndex      = 21
    Top           = 3480
    Width         = 1575
  End
  Begin VB.Label Label9
    Alignment     = 2 'Center
    BackColor     = &H00FFFFFF&
    Caption       = "%THDv Har. No. 11"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name        = "Arial"
      Size        = 8.25
      Charset     = 0
      Weight      = 700
      Underline   = 0 'False
      Italic      = 0 'False
      Strikethrough = 0 'False
    EndProperty
    ForeColor     = &H00800000&
    Height        = 375
    Left          = 4320
    TabIndex      = 20
    Top           = 2640
    Width         = 1575
  End
  Begin VB.Label Label8
    Alignment     = 2 'Center
    BackColor     = &H00FFFFFF&
    Caption       = "%THDv Har. No. 9"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name        = "Arial"
      Size        = 8.25
      Charset     = 0
      Weight      = 700
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Underline     = 0  'False
    Italic        = 0  'False
    Strikethrough = 0  'False
  EndProperty
  ForeColor     = &H00800000&
  Height        = 375
  Left          = 4320
  TabIndex      = 19
  Top           = 1800
  Width         = 1575
End
Begin VB.Label Label7
  Alignment     = 2  'Center
  BackColor     = &H00FFFFFF&
  Caption       = "%THDv Har. No. 7"
  BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
    Name        = "Arial"
    Size        = 8.25
    Charset     = 0
    Weight      = 700
    Underline   = 0  'False
    Italic      = 0  'False
    Strikethrough = 0  'False
  EndProperty
  ForeColor     = &H00800000&
  Height        = 375
  Left          = 4320
  TabIndex      = 18
  Top           = 960
  Width         = 1575
End
Begin VB.Label Label6
  Alignment     = 2  'Center
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    BackColor       = &H00FFFFFF&
    Caption         = "%THDv Har. No. 5"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name          = "Arial"
      Size          = 8.25
      Charset       = 0
      Weight        = 700
      Underline     = 0   'False
      Italic        = 0   'False
      Strikethrough = 0   'False
    EndProperty
    ForeColor       = &H00800000&
    Height          = 375
    Left            = 4320
    TabIndex        = 17
    Top             = 120
    Width           = 1575
  End
  Begin VB.Label Label5
    Alignment       = 2  'Center
    BackColor       = &H00FFFFFF&
    Caption         = "%THDi Har. No. 13"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name          = "Arial"
      Size          = 8.25
      Charset       = 0
      Weight        = 700
      Underline     = 0   'False
      Italic        = 0   'False
      Strikethrough = 0   'False
    EndProperty
    ForeColor       = &H00800080&
    Height          = 375
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Left            =  2520
    TabIndex        =  16
    Top             =  3480
    Width           =  1575
  End
  Begin VB.Label Label4
    Alignment       =  2  'Center
    BackColor       =  &H00FFFFFF&
    Caption         =  "%THDi Har. No. 11"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name          =  "Arial"
      Size          =  8.25
      Charset       =  0
      Weight        =  700
      Underline     =  0   'False
      Italic        =  0   'False
      Strikethrough =  0   'False
    EndProperty
    ForeColor       =  &H00800080&
    Height          =  375
    Left            =  2520
    TabIndex        =  15
    Top             =  2640
    Width           =  1575
  End
  Begin VB.Label Label3
    Alignment       =  2  'Center
    BackColor       =  &H00FFFFFF&
    Caption         =  "%THDi Har. No. 9"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name          =  "Arial"
      Size          =  8.25
      Charset       =  0
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
      Weight        = 700
      Underline     = 0  'False
      Italic        = 0  'False
      Strikethrough = 0  'False
    EndProperty
    ForeColor     = &H00800080&
    Height        = 375
    Left          = 2520
    TabIndex      = 14
    Top           = 1800
    Width         = 1575
  End
  Begin VB.Label Label2
    Alignment     = 2  'Center
    BackColor     = &H00FFFFFF&
    Caption       = "%THDi Har. No. 7"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name        = "Arial"
      Size        = 8.25
      Charset     = 0
      Weight      = 700
      Underline   = 0  'False
      Italic      = 0  'False
      Strikethrough = 0  'False
    EndProperty
    ForeColor     = &H00800080&
    Height        = 375
    Left          = 2520
    TabIndex      = 13
    Top           = 960
    Width         = 1575
  End
  Begin VB.Label Label1
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Alignment     = 2 'Center
    BackColor     = &H00FFFFFF&
    Caption       = "%THDi Har. No. 5"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name        = "Arial"
      Size        = 8.25
      Charset     = 0
      Weight      = 700
      Underline   = 0 'False
      Italic      = 0 'False
      Strikethrough = 0 'False
    EndProperty
    ForeColor     = &H00800080&
    Height        = 375
    Left          = 2520
    TabIndex      = 12
    Top           = 120
    Width         = 1575
  End
End
Attribute VB_Name = "Form1"
Attribute VB_Creatable = False
Attribute VB_Exposed = False

Private Sub Command1_Click()
  vt = Val(Text1.Text)
  va = Val(Text2.Text)
  ti5 = Val(Text3.Text)
  ti7 = Val(Text4.Text)
  ti9 = Val(Text5.Text)
  ti11 = Val(Text6.Text)
  ti13 = Val(Text7.Text)
  tv5 = Val(Text8.Text)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    tv7 = Val(Text9.Text)
    tv9 = Val(Text10.Text)
    tv11 = Val(Text11.Text)
    tv13 = Val(Text12.Text)
vr = Array(1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 65, _
        70, 75, 80, 90, 100)
v = Array(230, 230, 260, 270, 280, 300, 360, 375, _
        400, 415, 450, 470, 525, 600)
z = Array(1, 1, 1, 1, 1)
      b = 0: x = 0: va1 = va
    Do
      b = b + 1
      Do While b > 15
      va1 = va1 - vr(b - 1)
      x = x + 1
      y = b - 1
      b = 1
      Loop
      a = vr(b) - va1
    Loop Until a >= 0
    va1 = vr(b) + (x * vr(y))
    cp = (1000000000 * va1) / ((100 * pi) * (vt ^ 2))
    cp = 10 * (Int(cp / 10) + 1)
    zl5 = 1000000 / (2 * pi * 50 * 5 * cp)
    zl7 = 1000000 / (2 * pi * 50 * 7 * cp)
    zl9 = 1000000 / (2 * pi * 50 * 9 * cp)
    zl11 = 1000000 / (2 * pi * 50 * 11 * cp)
    zl13 = 1000000 / (2 * pi * 50 * 13 * cp)
    vt2 = ti5 + ti7 + ti9 + ti11 + ti13
    a = zl5 * vt2
    b = zl7 * vt2
    c = zl9 * vt2
    d = zl11 * vt2
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
e = zl13 * vt2
f = (a + b + c + d + e)
vt1 = vt + (f * vt / 100)
b = 0
Do
   b = b + 1
   a = v(b) - vt1
Loop Until a >= 0
vt1 = v(b)
va1 = va * ((vt1 / vt) ^ 2)
b = 0: x = 0
Do
   b = b + 1
   If b = 16 Then
   va1 = va1 - vr(b - 1)
   x = x + 1
   y = b - 1
   b = 1
   End If
   a = vr(b) - va1
Loop Until a >= 0
va1 = vr(b) + (x * vr(y))
cp = (1000000000 * va1) / (100 * pi * vt * vt)
cp = 10 * (Int(cp / 10) + 1)
x1 = x + 1
i = 1000 * va / vt
a = tv5 + tv7 + tv9 + tv11 + tv13
e = (a - tv13) / a
d = (e - tv11) / a
c = (d - tv9) / a
b = (c - tv7) / a
If b >= 0.8 Then
   f = 1
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    ElseIf d >= 0.8 Then
      f = 2
    ElseIf e >= 0.8 Then
      f = 3
    Else: f = 4
    End If
  Do While x > 0
    va1 = va1 / x1
     b = 0: x = 0
    Do
      b = b + 1
      a = vr(b) - va1
    Loop Until a >= 0
    va1 = vr(b) + (x * vr(y))
cp = (1000000) * (1000 * va1) / (100 * pi * vt * vt)
    cp = 10 * (Int(cp / 10) + 1)
  Loop
    z(1) = x1
    z(2) = Abs(Int(0 - ((ti7 / ti5) * x1)))
    z(3) = Abs(Int(0 - ((ti11 / ti5) * x1)))
    z(4) = Abs(Int(0 - ((ti13 / ti5) * x1)))
    For a = 1 To 4
      If z(a) = 0 Then z(a) = 1
    Next a
    b = 0
    For a = 1 To f
      If a = 1 Then c = 5
      If a = 2 Then c = 7
      If a = 3 Then c = 11
      If a = 4 Then c = 13
    Form2.Label2(b) = c
    Form2.Label2(1 + b) = z(a)
    Form2.Label2(2 + b) = vt
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        Form2.Label2(3 + b) = vt1
        Form2.Label2(4 + b) = va1
        Form2.Label2(5 + b) = cp
        d = 100000 / (pi * pi * c * c * cp)
        Form2.Label2(6 + b) = Int(d * 10000) / 10000
        Form2.Label2(7 + b) = Int(i * 100) / 100
        b = b + 8
        Next a
        Form2.WindowState = 2
        Form2.Show
    End Sub

    Private Sub Command2_Click()
        End
    End Sub


    Private Sub Form_Load()
        Form1.WindowState = 2
        Load Form2
    End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
VERSION 4.00
Begin VB.Form Form2
   BackColor       = &H00FFFFFF&
   Caption         = "OUTPUT"
   ClientHeight    = 6960
   ClientLeft      = 30
   ClientTop       = 2415
   ClientWidth     = 7245
   BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name         = "Arial"
      Size         = 8.25
      Charset      = 0
      Weight       = 400
      Underline    = 0   'False
      Italic       = 0   'False
      Strikethrough = 0   'False
   EndProperty
   ForeColor       = &H00FF00FF&
   Height          = 7365
   Left            = -30
   LinkTopic       = "Form2"
   ScaleHeight     = 6960
   ScaleWidth      = 7245
   Top             = 2070
   Width           = 7365
   Begin VB.CommandButton Command3
      Caption      = "QUIT"
      BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
         Name      = "Times New Roman"
         Size      = 14.25
         Charset   = 0
         Weight    = 700
         Underline = 0   'False
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Italic          = 0   'False
    Strikethrough   = 0   'False
  EndProperty
  Height        = 735
  Left          = 7800
  TabIndex      = 66
  Top           = 4920
  Width         = 1695
End
Begin VB.CommandButton Command2
  BackColor     = &H00FFFFFF&
  Caption       = "PRINT"
  BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
    Name          = "Times New Roman"
    Size          = 14.25
    Charset       = 0
    Weight        = 700
    Underline     = 0   'False
    Italic        = 0   'False
    Strikethrough = 0   'False
  EndProperty
  Height        = 735
  Left          = 7800
  TabIndex      = 22
  Top           = 1200
  Width         = 1575
End
Begin VB.CommandButton Command1
  BackColor     = &H00FFFFFF&
  Caption       = "RETURN..."
  BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
    Name          = "Times New Roman"
    Size          = 14.25
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
      Charset        = 0
      Weight         = 700
      Underline      = 0   'False
      Italic         = 0   'False
      Strikethrough  = 0   'False
    EndProperty
    Height         = 735
    Left           = 7800
    TabIndex       = 21
    Top            = 2880
    Width          = 1695
  End
  Begin VB.Label Label18
    BackColor      = &H00FFFFFF&
    Caption        = "Kvar of capacitor(Kvar)"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name         = "Arial"
      Size         = 9.75
      Charset      = 0
      Weight       = 400
      Underline    = 0   'False
      Italic       = 0   'False
      Strikethrough = 0  'False
    EndProperty
    ForeColor      = &H00800000&
    Height         = 255
    Left           = 4080
    TabIndex       = 65
    Top            = 4920
    Width          = 2055
  End
  Begin VB.Label Label16
    BackColor      = &H00FFFFFF&
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Caption         =  "Kvar of capacitor(Kvar)"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name          =  "Arial"
      Size          =  9.75
      Charset       =  0
      Weight        =  400
      Underline     =  0   'False
      Italic        =  0   'False
      Strikethrough =  0   'False
    EndProperty
    ForeColor       =  &H0000FF00&
    Height          =  255
    Left            =  4080
    TabIndex        =  64
    Top             =  1680
    Width           =  2055
  End
  Begin VB.Label Label14
    BackColor       =  &H00FFFFFF&
    Caption         =  "Kvar of capacitor(Kvar)"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name          =  "Arial"
      Size          =  9.75
      Charset       =  0
      Weight        =  400
      Underline     =  0   'False
      Italic        =  0   'False
      Strikethrough =  0   'False
    EndProperty
    ForeColor       =  &H00008080&
    Height          =  255
    Left            =  120
    TabIndex        =  63
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Top             =  4920
    Width           =  2055
  End
  Begin VB.Label Label12
    BackColor       =  &H00FFFFFF&
    Caption         =  "Kvar of capacitor(Kvar)"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name          =  "Arial"
      Size          =  9.75
      Charset       =  0
      Weight        =  400
      Underline     =  0   'False
      Italic        =  0   'False
      Strikethrough =  0   'False
    EndProperty
    ForeColor       =  &H000040C0&
    Height          =  255
    Left            =  120
    TabIndex        =  62
    Top             =  1680
    Width           =  2055
  End
  Begin VB.Label Label2
    Alignment       =  2   'Center
    BackColor       =  &H00FFFFFF&
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name          =  "Arial"
      Size          =  12
      Charset       =  0
      Weight        =  400
      Underline     =  0   'False
      Italic        =  0   'False
      Strikethrough =  0   'False
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    EndProperty
    ForeColor     = &H00800080&
    Height        = 255
    Index         = 31
    Left          = 6480
    TabIndex      = 61
    Top           = 6000
    Width         = 1215
  End
  Begin VB.Label Label2
    Alignment     = 2 'Center
    BackColor     = &H00FFFFFF&
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name        = "Arial"
      Size        = 12
      Charset     = 0
      Weight      = 400
      Underline   = 0 'False
      Italic      = 0 'False
      Strikethrough = 0 'False
    EndProperty
    ForeColor     = &H00800080&
    Height        = 255
    Index         = 30
    Left          = 6480
    TabIndex      = 60
    Top           = 5640
    Width         = 1215
  End
  Begin VB.Label Label2
    Alignment     = 2 'Center
    BackColor     = &H00FFFFFF&
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
      Name        = "Arial"
      Size        = 12
      Charset     = 0
      Weight      = 400
      Underline   = 0  'False
      Italic      = 0  'False
      Strikethrough = 0  'False
    EndProperty
    ForeColor     = &H00800080&
    Height        = 255
    Index         = 29
    Left          = 6480
    TabIndex      = 59
    Top           = 5280
    Width         = 1215
  End
  Begin VB.Label Label2
    Alignment     = 2  'Center
    BackColor     = &H00FFFFFF&
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name        = "Arial"
      Size        = 12
      Charset     = 0
      Weight      = 400
      Underline   = 0  'False
      Italic      = 0  'False
      Strikethrough = 0  'False
    EndProperty
    ForeColor     = &H00800080&
    Height        = 255
    Index         = 28
    Left          = 6480
    TabIndex      = 58
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Top             =  4920
    Width           =  1215
  End
  Begin VB.Label Label2
    Alignment       =  2  'Center
    BackColor       =  &H00FFFFFF&
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name          =  "Arial"
      Size          =  12
      Charset       =  0
      Weight        =  400
      Underline     =  0   'False
      Italic        =  0   'False
      Strikethrough =  0   'False
    EndProperty
    ForeColor       =  &H00800080&
    Height          =  255
    Index           =  27
    Left            =  6480
    TabIndex        =  57
    Top             =  4560
    Width           =  1215
  End
  Begin VB.Label Label2
    Alignment       =  2  'Center
    BackColor       =  &H00FFFFFF&
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name          =  "Arial"
      Size          =  12
      Charset       =  0
      Weight        =  400
      Underline     =  0   'False
      Italic        =  0   'False
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
      Strikethrough = 0 'False
    EndProperty
    ForeColor = &H00800080&
    Height = 255
    Index = 26
    Left = 6480
    TabIndex = 56
    Top = 4200
    Width = 1215
  End
  Begin VB.Label Label2
    Alignment = 2 'Center
    BackColor = &H00FFFFFF&
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name = "Arial"
      Size = 12
      Charset = 0
      Weight = 400
      Underline = 0 'False
      Italic = 0 'False
      Strikethrough = 0 'False
    EndProperty
    ForeColor = &H00800080&
    Height = 255
    Index = 25
    Left = 6480
    TabIndex = 55
    Top = 3840
    Width = 1215
  End
  Begin VB.Label Label2
    Alignment = 2 'Center
    BackColor = &H00FFFFFF&
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name            = "Arial"
      Size            = 12
      Charset         = 0
      Weight          = 400
      Underline       = 0   'False
      Italic          = 0   'False
      Strikethrough   = 0   'False
    EndProperty
    ForeColor       = &H00800080&
    Height          = 255
    Index           = 24
    Left            = 6480
    TabIndex        = 54
    Top             = 3480
    Width           = 1215
  End
  Begin VB.Label Label10
    Alignment       = 2  'Center
    BackColor       = &H00FFFFFF&
    Caption         = "Unit of Filter(Unit)"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name            = "Arial"
      Size            = 9.75
      Charset         = 0
      Weight          = 400
      Underline       = 0   'False
      Italic          = 0   'False
      Strikethrough   = 0   'False
    EndProperty
    ForeColor       = &H0000FF00&
    Height          = 255
    Left            = 4080
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    TabIndex      = 53
    Top           = 600
    Width         = 1575
  End
  Begin VB.Label Label8
    Alignment     = 2 'Center
    BackColor     = &H00FFFFFF&
    Caption       = "Unit of Filter(Unit)"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name        = "Arial"
      Size        = 9.75
      Charset     = 0
      Weight      = 400
      Underline   = 0 'False
      Italic      = 0 'False
      Strikethrough = 0 'False
    EndProperty
    ForeColor     = &H00800000&
    Height        = 255
    Left          = 4080
    TabIndex      = 52
    Top           = 3840
    Width         = 1575
  End
  Begin VB.Label Label6
    Alignment     = 2 'Center
    BackColor     = &H00FFFFFF&
    Caption       = "Unit of Filter(Unit)"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name        = "Arial"
      Size        = 9.75
      Charset     = 0
      Weight      = 400
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
      Underline     = 0  'False
      Italic        = 0  'False
      Strikethrough = 0  'False
    EndProperty
    ForeColor     = &H00008080&
    Height        = 255
    Left          = 120
    TabIndex      = 51
    Top           = 3840
    Width         = 1575
  End
  Begin VB.Label Label4
    Alignment     = 2  'Center
    BackColor     = &H00FFFFFF&
    Caption       = "Unit of Filter(Unit)"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name        = "Arial"
      Size        = 9.75
      Charset     = 0
      Weight      = 400
      Underline   = 0  'False
      Italic      = 0  'False
      Strikethrough = 0  'False
    EndProperty
    ForeColor     = &H000040C0&
    Height        = 255
    Index         = 0
    Left          = 120
    TabIndex      = 50
    Top           = 600
    Width         = 1575
  End
  Begin VB.Label Label2
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Alignment      =  2  'Center
    BackColor      =  &H00FFFFFF&
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name         =  "Arial"
      Size         =  12
      Charset      =  0
      Weight       =  400
      Underline    =  0  'False
      Italic       =  0  'False
      Strikethrough  =  0  'False
    EndProperty
    ForeColor      =  &H00800080&
    Height         =  255
    Index          =  18
    Left           =  2400
    TabIndex       =  49
    Top            =  4200
    Width          =  1215
  End
  Begin VB.Label Label2
    Alignment      =  2  'Center
    BackColor      =  &H00FFFFFF&
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name         =  "Arial"
      Size         =  12
      Charset      =  0
      Weight       =  400
    'Underline     =  0  'False
      Italic       =  0  'False
      Strikethrough  =  0  'False
    EndProperty
    ForeColor      =  &H00800080&
    Height         =  255
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Index           = 19
    Left            = 2400
    TabIndex        = 48
    Top             = 4560
    Width           = 1215
  End
  Begin VB.Label Label2
    Alignment       = 2 'Center
    BackColor       = &H00FFFFFF&
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name          = "Arial"
      Size          = 12
      Charset       = 0
      Weight        = 400
      Underline     = 0 'False
      Italic        = 0 'False
      Strikethrough = 0 'False
    EndProperty
    ForeColor       = &H00800080&
    Height          = 255
    Index           = 20
    Left            = 2400
    TabIndex        = 47
    Top             = 4920
    Width           = 1215
  End
  Begin VB.Label Label2
    Alignment       = 2 'Center
    BackColor       = &H00FFFFFF&
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name          = "Arial"
      Size          = 12
      Charset       = 0
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
      Weight        = 400
      Underline     = 0  'False
      Italic        = 0  'False
      Strikethrough = 0  'False
    EndProperty
    ForeColor     = &H00800080&
    Height        = 255
    Index         = 21
    Left          = 2400
    TabIndex      = 46
    Top           = 5280
    Width         = 1215
  End
  Begin VB.Label Label2
    Alignment     = 2  'Center
    BackColor     = &H00FFFFFF&
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name        = "Arial"
      Size        = 12
      Charset     = 0
      Weight      = 400
      Underline   = 0  'False
      Italic      = 0  'False
      Strikethrough = 0  'False
    EndProperty
    ForeColor     = &H00800080&
    Height        = 255
    Index         = 22
    Left          = 2400
    TabIndex      = 45
    Top           = 5640
    Width         = 1215
  End
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Begin VB.Label Label2
   Alignment      =  2  'Center
   BackColor      =  &H00FFFFFF&
   BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name         =  "Arial"
      Size         =  12
      Charset      =  0
      Weight       =  400
      Underline    =  0  'False
      Italic       =  0  'False
      Strikethrough  =  0  'False
   EndProperty
   ForeColor      =  &H00800080&
   Height         =  255
   Index          =  23
   Left           =  2400
   TabIndex       =  44
   Top            =  6000
   Width          =  1215
End
Begin VB.Label Label2
   Alignment      =  2  'Center
   BackColor      =  &H00FFFFFF&
   BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name         =  "Arial"
      Size         =  12
      Charset      =  0
      Weight       =  400
      Underline    =  0  'False
      Italic       =  0  'False
      Strikethrough  =  0  'False
   EndProperty
   ForeColor      =  &H00800080&
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Height        =  255
    Index         =  17
    Left          =  2400
    TabIndex      =  43
    Top           =  3840
    Width         =  1215
  End
  Begin VB.Label Label2
    Alignment     =  2  'Center
    BackColor     =  &H00FFFFFF&
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name        =  "Arial"
      Size        =  12
      Charset     =  0
      Weight      =  400
      Underline   =  0   'False
      Italic      =  0   'False
      Strikethrough =  0   'False
    EndProperty
    ForeColor     =  &H00800080&
    Height        =  255
    Index         =  16
    Left          =  2400
    TabIndex      =  42
    Top           =  3480
    Width         =  1215
  End
  Begin VB.Label Label2
    Alignment     =  2  'Center
    BackColor     =  &H00FFFFFF&
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name        =  "Arial"
      Size        =  12
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
      Charset        = 0
      Weight         = 400
      Underline      = 0   'False
      Italic         = 0   'False
      Strikethrough  = 0   'False
    EndProperty
    ForeColor      = &H00800080&
    Height         = 255
    Index          = 15
    Left           = 6480
    TabIndex       = 41
    Top            = 2760
    Width          = 1215
  End
  Begin VB.Label Label2
    Alignment      = 2  'Center
    BackColor      = &H00FFFFFF&
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name         = "Arial"
      Size         = 12
      Charset      = 0
      Weight       = 400
      Underline    = 0   'False
      Italic       = 0   'False
      Strikethrough = 0  'False
    EndProperty
    ForeColor      = &H00800080&
    Height         = 255
    Index          = 14
    Left           = 6480
    TabIndex       = 40
    Top            = 2400
    Width          = 1215
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
End
Begin VB.Label Label2
  Alignment      =  2  'Center
  BackColor      =  &H00FFFFFF&
  BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
    Name         =  "Arial"
    Size         =  12
    Charset      =  0
    Weight       =  400
    Underline    =  0  'False
    Italic       =  0  'False
    Strikethrough  =  0  'False
  EndProperty
  ForeColor      =  &H00800080&
  Height         =  255
  Index          =  13
  Left           =  6480
  TabIndex       =  39
  Top            =  2040
  Width          =  1215
End
Begin VB.Label Label2
  Alignment      =  2  'Center
  BackColor      =  &H00FFFFFF&
  BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
    Name         =  "Arial"
    Size         =  12
    Charset      =  0
    Weight       =  400
    Underline    =  0  'False
    Italic       =  0  'False
    Strikethrough  =  0  'False
  EndProperty
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    ForeColor     = &H00800080&
    Height        = 255
    Index         = 12
    Left          = 6480
    TabIndex      = 38
    Top           = 1680
    Width         = 1215
  End
  Begin VB.Label Label2
    Alignment     = 2 'Center
    BackColor     = &H00FFFFFF&
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name        = "Arial"
      Size        = 12
      Charset     = 0
      Weight      = 400
      Underline   = 0 'False
      Italic      = 0 'False
      Strikethrough = 0 'False
    EndProperty
    ForeColor     = &H00800080&
    Height        = 255
    Index         = 11
    Left          = 6480
    TabIndex      = 37
    Top           = 1320
    Width         = 1215
  End
  Begin VB.Label Label2
    Alignment     = 2 'Center
    BackColor     = &H00FFFFFF&
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name        = "Arial"
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Size        = 12
    Charset     = 0
    Weight      = 400
    Underline   = 0 'False
    Italic      = 0 'False
    Strikethrough = 0 'False
  EndProperty
  ForeColor     = &H00800080&
  Height        = 255
  Index         = 10
  Left          = 6480
  TabIndex      = 36
  Top           = 960
  Width         = 1215
End
Begin VB.Label Label2
  Alignment     = 2 'Center
  BackColor     = &H00FFFFFF&
  BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
    Name        = "Arial"
    Size        = 12
    Charset     = 0
    Weight      = 400
    Underline   = 0 'False
    Italic      = 0 'False
    Strikethrough = 0 'False
  EndProperty
  ForeColor     = &H00800080&
  Height        = 255
  Index         = 9
  Left          = 6480
  TabIndex      = 35
  Top           = 600
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Width          =  1215
  End
  Begin VB.Label Label2
    Alignment      =  2  'Center
    BackColor      =  &H00FFFFFF&
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name         =  "Arial"
      Size         =  12
      Charset      =  0
      Weight       =  400
      Underline    =  0  'False
      Italic       =  0  'False
      Strikethrough  =  0  'False
    EndProperty
    ForeColor      =  &H00800080&
    Height         =  255
    Index          =  8
    Left           =  6480
    TabIndex       =  34
    Top            =  240
    Width          =  1215
  End
  Begin VB.Label Label2
    Alignment      =  2  'Center
    BackColor      =  &H00FFFFFF&
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name         =  "Arial"
      Size         =  12
      Charset      =  0
      Weight       =  400
      Underline    =  0  'False
      Italic       =  0  'False
      Strikethrough  =  0  'False
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    EndProperty
    ForeColor     = &H00800080&
    Height        = 255
    Index         = 7
    Left          = 2400
    TabIndex      = 33
    Top           = 2760
    Width         = 1215
  End
  Begin VB.Label Label2
    Alignment     = 2 'Center
    BackColor     = &H00FFFFFF&
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name        = "Arial"
      Size        = 12
      Charset     = 0
      Weight      = 400
      Underline   = 0 'False
      Italic      = 0 'False
      Strikethrough = 0 'False
    EndProperty
    ForeColor     = &H00800080&
    Height        = 255
    Index         = 6
    Left          = 2400
    TabIndex      = 32
    Top           = 2400
    Width         = 1215
  End
  Begin VB.Label Label2
    Alignment     = 2 'Center
    BackColor     = &H00FFFFFF&
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Name        = "Arial"
    Size        = 12
    Charset     = 0
    Weight      = 400
    Underline   = 0  'False
    Italic      = 0  'False
    Strikethrough = 0  'False
  EndProperty
  ForeColor     = &H00800080&
  Height        = 255
  Index         = 5
  Left          = 2400
  TabIndex      = 31
  Top           = 2040
  Width         = 1215
End
Begin VB.Label Label2
  Alignment     = 2  'Center
  BackColor     = &H00FFFFFF&
  BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
    Name        = "Arial"
    Size        = 12
    Charset     = 0
    Weight      = 400
    Underline   = 0  'False
    Italic      = 0  'False
    Strikethrough = 0  'False
  EndProperty
  ForeColor     = &H00800080&
  Height        = 255
  Index         = 4
  Left          = 2400
  TabIndex      = 30
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  Top       = 1680
  Width     = 1215
End
Begin VB.Label Label2
  Alignment     = 2 'Center
  BackColor     = &H00FFFFFF&
  BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
    Name        = "Arial"
    Size        = 12
    Charset     = 0
    Weight      = 400
    Underline   = 0 'False
    Italic      = 0 'False
    Strikethrough = 0 'False
  EndProperty
  ForeColor     = &H00800080&
  Height        = 255
  Index         = 3
  Left          = 2400
  TabIndex      = 29
  Top           = 1320
  Width         = 1215
End
Begin VB.Label Label2
  Alignment     = 2 'Center
  BackColor     = &H00FFFFFF&
  BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
   'Name        = "Arial"
    Size        = 12
    Charset     = 0
    Weight      = 400
    Underline   = 0 'False
    Italic      = 0 'False
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
      Strikethrough   =  0  'False
    EndProperty
    ForeColor     =  &H00800080&
    Height        =  255
    Index         =  1
    Left          =  2400
    TabIndex      =  28
    Top           =  600
    Width         =  1215
  End
  Begin VB.Label Label2
    Alignment     =  2  'Center
    BackColor     =  &H00FFFFFF&
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name        =  "Arial"
      Size        =  12
      Charset     =  0
      Weight      =  400
      Underline   =  0  'False
      Italic      =  0  'False
      Strikethrough   =  0  'False
    EndProperty
    ForeColor     =  &H00800080&
    Height        =  255
    Index         =  2
    Left          =  2400
    TabIndex      =  27
    Top           =  960
    Width         =  1215
  End
  Begin VB.Label Label47
    Alignment     =  2  'Center
    BackColor     =  &H00FFFFFF&
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Caption         =  "Current in Filter(Amp)"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name          =  "Arial"
      Size          =  9.75
      Charset       =  0
      Weight        =  400
      Underline     =  0   'False
      Italic        =  0   'False
      Strikethrough =  0   'False
    EndProperty
    ForeColor       =  &H00800000&
    Height          =  255
    Left            =  4080
    TabIndex        =  26
    Top             =  6000
    Width           =  1935
  End
  Begin VB.Label Label45
    Alignment       =  2  'Center
    BackColor       =  &H00FFFFFF&
    Caption         =  "Current in Filter(Amp)"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name          =  "Arial"
      Size          =  9.75
      Charset       =  0
      Weight        =  400
      Underline     =  0   'False
      Italic        =  0   'False
      Strikethrough =  0   'False
    EndProperty
    ForeColor       =  &H00008080&
    Height          =  255
    Left            =  120
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  TabIndex      = 25
  Top           = 6000
  Width         = 1935
End
Begin VB.Label Label43
  BackColor     = &H00FFFFFF&
  Caption       = "Current in Filter(Amp)"
  BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
    Name        = "Arial"
    Size        = 9.75
    Charset     = 0
    Weight      = 400
    Underline   = 0   'False
    Italic      = 0   'False
    Strikethrough = 0   'False
  EndProperty
  ForeColor     = &H000040C0&
  Height        = 255
  Left          = 120
  TabIndex      = 24
  Top           = 2760
  Width         = 1935
End
Begin VB.Label Label41
  BackColor     = &H00FFFFFF&
  Caption       = "Current in Filter(Amp)"
  BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
   'Name        = "Arial"
    Size        = 9.75
    Charset     = 0
    Weight      = 400
    Underline   = 0   'False
    Italic      = 0   'False
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Strikethrough   =  0  'False
  EndProperty
  ForeColor     =  &H0000C000&
  Height        =  255
  Left          =  4080
  TabIndex      =  23
  Top           =  2760
  Width         =  1935
End
Begin VB.Label Label39
  BackColor     =  &H00FFFFFF&
  Caption       =  "Reactor(mH)"
  BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
    Name        =  "Arial"
    Size        =  9.75
    Charset     =  0
    Weight      =  400
    Underline   =  0  'False
    Italic      =  0  'False
    Strikethrough   =  0  'False
  EndProperty
  ForeColor     =  &H00800000&
  Height        =  255
  Left          =  4080
  TabIndex      =  20
  Top           =  5640
  Width         =  1095
End
Begin VB.Label Label37
  BackColor     =  &H00FFFFFF&
  Caption       =  "Capacitor(uF)"
  BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
    Name        =  "Arial"
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Size        = 9.75
    Charset     = 0
    Weight      = 400
    Underline   = 0  'False
    Italic      = 0  'False
    Strikethrough = 0  'False
  EndProperty
  ForeColor     = &H000040C0&
  Height        = 255
  Left          = 120
  TabIndex      = 19
  Top           = 2040
  Width         = 1215
End
Begin VB.Label Label35
  BackColor     = &H00FFFFFF&
  Caption       = "Voltage of Capacitor(Volt)"
  BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
    Name        = "Arial"
    Size        = 9.75
    Charset     = 0
    Weight      = 400
    Underline   = 0  'False
    Italic      = 0  'False
    Strikethrough = 0  'False
  EndProperty
  ForeColor     = &H00008080&
  Height        = 255
  Left          = 120
  TabIndex      = 18
  Top           = 4560
  Width         = 2295
End
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Begin VB.Label Label33
   BackColor       =  &H00FFFFFF&
   Caption         =  "Voltage in System(Volt)"
   BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name         =  "Arial"
      Size         =  9.75
      Charset      =  0
      Weight       =  400
      Underline    =  0   'False
      Italic       =  0   'False
      Strikethrough  =  0   'False
   EndProperty
   ForeColor       =  &H00008080&
   Height          =  255
   Left            =  120
   TabIndex        =  17
   Top             =  4200
   Width           =  2175
End
Begin VB.Label Label31
   BackColor       =  &H00FFFFFF&
   Caption         =  "Harmonic Filter Number"
   BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name         =  "Arial"
      Size         =  9.75
      Charset      =  0
      Weight       =  400
      Underline    =  0   'False
      Italic       =  0   'False
      Strikethrough  =  0   'False
   EndProperty
   ForeColor       =  &H00008080&
   Height          =  255
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Left            =   120
    TabIndex        =   16
    Top             =   3480
    Width           =   2175
  End
  Begin VB.Label Label29
    BackColor       =   &H00FFFFFF&
    Caption         =   "Reactor(mH)"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name          =   "Arial"
      Size          =   9.75
      Charset       =   0
      Weight        =   400
      Underline     =   0   'False
      Italic        =   0   'False
      Strikethrough =   0   'False
    EndProperty
    ForeColor       =   &H00008080&
    Height          =   255
    Left            =   120
    TabIndex        =   15
    Top             =   5640
    Width           =   1095
  End
  Begin VB.Label Label27
    BackColor       =   &H00FFFFFF&
    Caption         =   "Capacitor(uF)"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name          =   "Arial"
      Size          =   9.75
      Charset       =   0
      Weight        =   400
      Underline     =   0   'False
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Italic        = 0   'False
    Strikethrough = 0   'False
  EndProperty
  ForeColor     = &H0000C000&
  Height        = 255
  Left          = 4080
  TabIndex      = 14
  Top           = 2040
  Width         = 1215
End
Begin VB.Label Label25
  BackColor     = &H00FFFFFF&
  Caption       = "Voltage of Capacitor(Volt)"
  BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
    Name        = "Arial"
    Size        = 9.75
    Charset     = 0
    Weight      = 400
    Underline   = 0   'False
    Italic      = 0   'False
    Strikethrough = 0   'False
  EndProperty
  ForeColor     = &H0000C000&
  Height        = 255
  Left          = 4080
  TabIndex      = 13
  Top           = 1320
  Width         = 2295
End
Begin VB.Label Label23
  BackColor     = &H00FFFFFF&
  Caption       = "Voltage in System(Volt)"
  BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Name        = "Arial"
    Size        = 9.75
    Charset     = 0
    Weight      = 400
    Underline   = 0  'False
    Italic      = 0  'False
    Strikethrough = 0  'False
  EndProperty
  ForeColor     = &H00800000&
  Height        = 255
  Left          = 4080
  TabIndex      = 12
  Top           = 4200
  Width         = 2175
End
Begin VB.Label Label21
  BackColor     = &H00FFFFFF&
  Caption       = "Harmonic Filter Number"
  BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
    Name        = "Arial"
    Size        = 9.75
    Charset     = 0
    Weight      = 400
    Underline   = 0  'False
    Italic      = 0  'False
    Strikethrough = 0  'False
  EndProperty
  ForeColor     = &H0000C000&
  Height        = 255
  Left          = 4080
  TabIndex      = 11
  Top           = 240
  Width         = 2175
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
End
Begin VB.Label Label19
  BackColor       =  &H00FFFFFF&
  Caption         =  "Reactor(mH)"
  BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
    Name          =  "Arial"
    Size          =  9.75
    Charset       =  0
    Weight        =  400
    Underline     =  0   'False
    Italic        =  0   'False
    Strikethrough =  0   'False
  EndProperty
  ForeColor       =  &H0000C000&
  Height          =  255
  Left            =  4080
  TabIndex        =  10
  Top             =  2400
  Width           =  1095
End
Begin VB.Label Label17
  BackColor       =  &H00FFFFFF&
  Caption         =  "Capacitor(uF)"
  BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
    Name          =  "Arial"
    Size          =  9.75
    Charset       =  0
   'Weight        =  400
    Underline     =  0   'False
    Italic        =  0   'False
    Strikethrough =  0   'False
  EndProperty
  ForeColor       =  &H00800000&
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Height          =  255
    Left            =  4080
    TabIndex        =  9
    Top             =  5280
    Width           =  1215
  End
  Begin VB.Label Label15
    BackColor       =  &H00FFFFFF&
    Caption         =  "Voltage of Capacitor(Volt)"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name          =  "Arial"
      Size          =  9.75
      Charset       =  0
      Weight        =  400
      Underline     =  0   'False
      Italic        =  0   'False
      Strikethrough =  0   'False
    EndProperty
    ForeColor       =  &H00800000&
    Height          =  255
    Left            =  4080
    TabIndex        =  8
    Top             =  4560
    Width           =  2295
  End
  Begin VB.Label Label13
    BackColor       =  &H00FFFFFF&
    Caption         =  "Voltage in System(Volt)"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name          =  "Arial"
      Size          =  9.75
      Charset       =  0
      Weight        =  400
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
      Underline     = 0   'False
      Italic        = 0   'False
      Strikethrough = 0   'False
    EndProperty
    ForeColor     = &H0000C000&
    Height        = 255
    Left          = 4080
    TabIndex      = 7
    Top           = 960
    Width         = 2175
  End
  Begin VB.Label Label11
    BackColor     = &H00FFFFFF&
    Caption       = "Harmonic Filter Number"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name        = "Arial"
      Size        = 9.75
      Charset     = 0
      Weight      = 400
      Underline   = 0   'False
      Italic      = 0   'False
      Strikethrough = 0   'False
    EndProperty
    ForeColor     = &H00800000&
    Height        = 255
    Left          = 4080
    TabIndex      = 6
    Top           = 3480
    Width         = 2175
  End
  Begin VB.Label Label9
    BackColor     = &H00FFFFFF&
    Caption       = "Reactor(mH)"
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name        = "Arial"
      Size        = 9.75
      Charset     = 0
      Weight      = 400
      Underline   = 0   'False
      Italic      = 0   'False
      Strikethrough = 0   'False
    EndProperty
    ForeColor     = &H000040C0&
    Height        = 255
    Left          = 120
    TabIndex      = 5
    Top           = 2400
    Width         = 1215
  End
  Begin VB.Label Label7
    BackColor     = &H00FFFFFF&
    Caption       = "Capacitor(uF)"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name        = "Arial"
      Size        = 9.75
      Charset     = 0
      Weight      = 400
      Underline   = 0   'False
      Italic      = 0   'False
      Strikethrough = 0   'False
    EndProperty
    ForeColor     = &H00008080&
    Height        = 255
    Left          = 120
    TabIndex      = 4
    Top           = 5280
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    Width          =  1215
  End
  Begin VB.Label Label5
    BackColor      =  &H00FFFFFF&
    Caption        =  "Voltage of Capacitor(Volt)"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name         =  "Arial"
      Size         =  9.75
      Charset      =  0
      Weight       =  400
      Underline    =  0   'False
      Italic       =  0   'False
      Strikethrough =  0   'False
    EndProperty
    ForeColor      =  &H000040C0&
    Height         =  255
    Left           =  120
    TabIndex       =  3
    Top            =  1320
    Width          =  2295
  End
  Begin VB.Label Label3
    BackColor      =  &H00FFFFFF&
    Caption        =  "Voltage in System(Volt)"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name         =  "Arial"
      Size         =  9.75
      Charset      =  0
      Weight       =  400
      Underline    =  0   'False
      Italic       =  0   'False
      Strikethrough =  0   'False
    EndProperty
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    ForeColor     = &H000040C0&
    Height        = 255
    Left          = 120
    TabIndex      = 2
    Top           = 960
    Width         = 2175
  End
  Begin VB.Label Label2
    Alignment     = 2 'Center
    BackColor     = &H00FFFFFF&
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name        = "Arial"
      Size        = 12
      Charset     = 0
      Weight      = 400
      Underline   = 0 'False
      Italic      = 0 'False
      Strikethrough = 0 'False
    EndProperty
    ForeColor     = &H00800080&
    Height        = 255
    Index         = 0
    Left          = 2400
    TabIndex      = 1
    Top           = 240
    Width         = 1215
  End
  Begin VB.Label Label1
    BackColor     = &H00FFFFFF&
    Caption       = "Harmonic Filter Number"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
      Name        = "Arial"
      Size        = 9.75
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        Charset        = 0
        Weight         = 400
        Underline      = 0  'False
        Italic         = 0  'False
        Strikethrough  = 0  'False
      EndProperty
      ForeColor      = &H000040C0&
      Height         = 255
      Left           = 120
      TabIndex       = 0
      Top            = 240
      Width          = 2175
    End
End
Attribute VB_Name = "Form2"
Attribute VB_Creatable = False
Attribute VB_Exposed = False
Private Sub Command1_Click()
  Form2.Hide
End Sub

Private Sub Command2_Click()
  Command1.Visible = False
  Command2.Visible = False
  command3.Visible = False
  Form2.PrintForm
  Command1.Visible = True
  Command2.Visible = True
  command3.Visible = True
End Sub

Private Sub Label20_Click(Index As Integer)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
End Sub


Private Sub Label22_Click(Index As Integer)

End Sub


Private Sub Label34_Click(Index As Integer)

End Sub


Private Sub command3_Click()
   Form1.Hide
   End
End Sub
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษนี้จะสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีไม่ได้ หากไม่ได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลและหน่วยงานต่อไปนี้

พ่อ แม่ ผู้ให้ทุกสิ่งทุกอย่าง

ครู อาจารย์ทุกท่านที่สั่งสอนศิษย์เสมอมา

ผศ.จงรักษ์ บุญเส็ง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษสำหรับทุกสิ่งทุกอย่าง

คณะกรรมการสอบโครงงานพิเศษที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์

ดร. วิจิตร กิณเรศ สำหรับคำชี้แนะในการดำเนินโครงงานพิเศษ

คุณวิทยา นาคกระสันต์ สำหรับความอนุเคราะห์ด้วยดีเสมอมา

เจ้าหน้าที่สโตร์ภาควิชาไฟฟ้ากำลัง ที่อำนวยความสะดวกในการดำเนินโครงงานพิเศษ

พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจเป็นอย่างดี

คณะผู้ดำเนินโครงงานพิเศษขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง และขออภัยผู้มีพระคุณทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวไว้ ณ.ที่นี้ คณะผู้ดำเนินโครงงานพิเศษยังระลึกถึงเสมอ

นายวันชัย จ่าน้ำเที่ยง

นายนพดล โคตรพันธ์

นายธีระพล บุญช่วย

คณะผู้จัดทำโครงงานพิเศษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เอกสารอ้างอิง


1. 2533.ระเบียบว่าด้วยการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนานกับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค,กรุงเทพฯ
2. 2533.รายงานคณะทำงาน Fliduenhg และ Harmonic การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ
3. เกียรติยุทธ กวีญาณ.2534.แบบจำลองเตาหลอมในย่านฮาร์มอนิค,ในเอกสารการประชุมใหญ่วิชาการทางวิศวกรรม ประจำปี 2534.วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย,กรุงเทพฯ
4. "Harmonic and Fire Safety Cable Design" by Ir Kam Yang on "Engineering For Public Safety"August 15-18,1996
5. ชำนาญ ห่อเกียรติ.2532 ฮาร์มอนิคในระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรม.วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย,กรุงเทพฯ
6. วสันต์ ต้นสัจจา และประสิทธิ์ พิทยพัฒน์.2529.ฮาร์มอนิคในระบบไฟฟ้ากำลัง.วิศวกรรมสาร,กรุงเทพฯ
7. ระบบไฟฟ้าสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม,โดย ดร. พันธุ์เทพ เลาหชัย, อ.นนทวัฒน์ จันทร์เจริญ,อ.สุวิทย์ เจิมสวัสดิพงษ์,คุณวันชัย สินาโรจน์.
8. 51 เรื่องน่ารู้เทคนิคไฟฟ้า,บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด.
9. 70 เรื่องน่ารู้เทคนิคไฟฟ้า,บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด.
10. Gain Carlo Montanari and Mauro Loggini,"Voltage-Distortion Compensation in Electrical Plants Supplying Static Power Converters."IEEE Trans.Ind.App.vol IA-23,pp181-188,Jan./Feb.1987.
11. Muhummad H. Rashid and Ali I.Maswood,"Analysis of Three-Phase AC-DC Converters Under Unbalanced Supply Conditions,"IEEE Trans.Ind.App,vol 24,pp. 449-455,May./Jun.1989.
12. W.A.Elmore and Stanleuy E.Zocholl,"Effect of Wavefrom Distortion on Protective Relay ,"IEEE Trans.Ind.App.,vol 29,pp.404-411,Mar./Apr.1993.
13. Adly A. Girgis ,Joseph W.Nims,John Jacomino,"Effect of Voltage harmonics on the Operation of Solid-State Relays in Industrail Applications"IEEE Trans.Ind.App.,vol IA.28 pp.1166-1173,Sep./Oct.1992.
14. Muhummad H.Rashid and Ali I. Maswood,"A Novel Method of Harmonic Assessment Generated by Three-Phase AC-DC Converters Under Unbalanced Supply Conditions."IEEE Trans.Ind.App.,vol 24,pp.590-597,July/Aug.1988.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. Luit T. Moran ,Phoivos,and Geza Joos ,"Analysis and Design of a Three-Phase Synchronous Solid-State Var Compensator."IEEE Trans.Ind.App.,vol 25,pp.598-608,July/Aug.1989.

16. Luit T. Moran,Phoivos,and geza Joos,"Analysis and Design of the Three-Phase Current Source Solid-State Var Compensator."IEEE Trans.Ind.App.,vol 25,pp.356-365.Mar./Apr.1989.

17. Luit T. Moran,Phoivos,and Geza Joos."Analysis and Design of a Novel Three-Phase Solid-State power Factor compensators and Harmonic suppressor System."IEEE Trans.Ind.App.,vol 25 ,pp.609-619,Jul./Aug. 1989.

18. Eugene A. Klingshirn,"Harmonic Filter For Six-Phase and other Multiphase Motors on Voltage Source Inverters."IEEE Trnas.Ind.App.,vol 1A-21,pp.588-594.May./Jun. 1985.

19. Ronnie F. Chv and John J. burns,IEEE Trans.Ind.App.,vol 1A-25,pp.427-435,May./June.1989,"Impact of Cycloconverters."

20. Sjoerd W.H. De Haan,"Analysis of The Effect of Source Voltage Fluctuations on the power Factor inThree-Phase Controlled Rectifiers,"IEEE Trans.Ind.App.,vol 1A-22,pp.259-266.Mar./Apr. 1986.

21. Yahia Baghzouz,"An Accurate Solution to Line Harmonic Distortion Produce by AC/DC Converters with Overlap and DC Ripple."IEEE Trnas.Ind.App.,vol 29 .pp.536-540,May./Jun. 1993.

22. Michael Z. Lowenstien,"Improving power in The Presence of Harmonics Using Low Voltage Tuned Filters,"IEEE Trans.Ind.App.,vol 29,pp.528-535,May./Jun. 1993.

23. Emmanuel Gluskin,"High Harmonic Currents in Fluorescent Lamp Circiut."IEEE Trans.Ind.App.vol 26,pp.347-351,Mar./Apr.1990.

24. Pankaj K. Sen and Hoctor A. Landa,"Derating of Induction Motors Due To Wavefrom Distortion."IEEE Trans.Ind.App.,vol 26 ,pp.1102-1107,Nov./Dec. 1990.

25. Paul G.Cummings,"Estimating Effects of System Harmonics on Lo\sses ans Temperture Rise of Squirrel-Cage Motor."IEEE Trans.Ind.App.,vol 1A-22,pp.1121-1126,Nov./Dec. 1986.

26. David E. Rice,"Adjustable Speed Drive and Power Rectifire Harmonics-Their Effect on Power System Components."IEEE Trans.Ind.App.,vol 1A-22,pp.171-177,Jan./Feb. 1986.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

27. Wave Distortion on Consumer Interconnections Working Group.,"The Impact of Sine-Wave Distortions on Protective Relays."IEEE Trans.Ind.App.,vol 1A-20,pp.335-343,Mar./Apr. 1984.

28. Indrajit Purkayastha and Paul J. Savoie,"Effects of Harmonics on Power Measurement."IEEE Trans.Ind.App.,vol 26,pp.944-946,sep./Oct. 1990.

29. Adly A. Girgis,Thomas L.Baldwin,Elham B. Makram,and Hoke S. Forton,JR.,"Testing the Performance of Three-Phase Induction Watthour Meters in The Presence of Harmonic Distortion,"IEEE Trans.Ind.App.,vol 26,pp.689-695,Jul./Aug. 1990.

30. Christopher K.Duffey,and Ray P. Stratford,"Update The Harmonic Standard IEEE-519:IEEE Reocommended Practices and Regirements for Harmonic Control in Electric Power System,"IEEE Trans.Ind.App.,vol 25 ,pp.1025-1034,Nov./Dec. 1989.

31. Thomas M. Gruzs,"Uncertainties in Complince with Harmonic Current Distortion limits in Electric power systems,"IEEE Trans.Ind.App.,vol 27,pp.680-685,Jul./Aug. 1991.

32. บทความพิเศษ โดย พิพัฒน์ ศรีรัตน์โพธิ์ชัย จาก BANGKOK ELECTRICITY MAGAZINE 1992

33. Power System Harmonics,J.Arrilaga,D.A. Bradley and P.S. Bodger, A Wiley-Interscience Publication.

34. ปริญญานิพนธ์ เรื่อง การวิเคราะห์และการแก้ปัญหาฮาร์มอนิค ปีการศึกษา 2538

35. ศูนย์ที่ปรึกษาวิชาการพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย "Harmonics in Power System"เอกสารประกอบการอบรมทางวิชาการ ณ โรงแรมโซลทวิน ทาวเวอร์ วันที่ 27-28 สิงหาคม 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้