



ปีการศึกษา 2538

การวิเคราะห์และการแก้ปัญหาระมอนิก
(Harmonic Distortion Analysis and Correction)



โดย
นายธีรภัทร พัฒนานิธิ
นายบรรดิษฐ์ อินทรใหญ่
นายฤทธิชัย ภูภิรมย์

วัน เดือน ปี..... ๑๑ ก.ค ๒๕๔๐
เลขทะเบียน..... ๐๑๖๐๑๙
เลขเรียกหนังสือ..... ๖๑๖๑๘ ผ ๒๓๖๑

อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2538

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การวิเคราะห์และการแก้ปัญหาฮาร์มอนิก

ผู้จัดทำ

- 
1. นายธีรภัทร พัฒนานิติ
 2. นายบรรดิษฐ์ อินทร์ใหญ่
 3. นายฤทธิชัย ภูภิรมย์



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล)

การวิเคราะห์และการแก้ปัญหาฮาร์ดมือนิก

นายธีรภัทร พัฒนานิธิ

นายบรรดิษฐ์ อินทร์ใหญ่

นายฤทธิชัย ภูมิภมย์

ผศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2538

บทคัดย่อ

โครงการนี้จะทำการศึกษาและวิเคราะห์ ถึงแหล่งกำเนิดของฮาร์ดมือนิกว่า กำเนิดฮาร์ดมือนิกลำดับใดบ้าง ผลเสียของฮาร์ดมือนิกต่ออุปกรณ์และระบบไฟฟ้า สามารถจำแนกชนิดและลำดับของฮาร์ดมือนิกจากโหลดต่างๆ โดยจากการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ฟูเรียร์เชิงตัวเลข และจากการวัดด้วยเครื่องมือวัด และได้ทำการเก็บข้อมูลปริมาณฮาร์ดมือนิก จากโรงงานทั้งระบบและเฉพาะอุปกรณ์ เพื่อนำมาเป็นข้อมูลประกอบการจำลองระบบแล้วทำการสร้างวงจรกรองเพื่อลดปัญหาฮาร์ดมือนิก ในระบบจำลองที่ศึกษานี้ ได้นำตัวคาปาซิเตอร์ที่มีค่าเหมาะสม มาใช้แก้ปัญหาค่าตัวประกอบกำลัง เป็นผลให้ต้องมีการป้องกันผลของฮาร์ดมือนิกที่จะก่อความเสียหายให้แก่ทั้งตัวคาปาซิเตอร์และระบบ โดยได้เขียนโปรแกรมเพื่อหาค่าของตัวคาปาซิเตอร์และตัวรีแอคเตอร์ ที่เหมาะสมในการสร้างเป็นวงจรกรอง ตลอดจนนำมาสร้างเป็นวงจรที่ใช้งานได้จริง.

Harmonic Distortion Analysis and Correction

Teerapat Patananiti
 Bundit Inyai
 Rittichai Poopirom
 Assist. Prof. Siriwat Potivejakul Advisor
 1995

Abstract

The purpose of this project are about research and analyzing harmonic source. Effect of Harmonic for device and system , kind of harmonic and harmonic order by Numerical Fourier analysis and harmonic instrument. Collect plant harmonic data and design simulate system for improve power factor with optimized capacitance so capacitor and system prevention is necessary. Design filter by program to find capacitor and reactor for actual filter.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I.
ABSTRACT	II.
สารบัญรูป	III.
สารบัญตาราง	IV.
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 นิยามและปริมาณต่างๆ ที่เกี่ยวกับฮาร์มอนิก	4
2.2 แหล่งกำเนิดและผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า	20
2.3 หลักการการกำจัดและลดปริมาณฮาร์มอนิก	29
บทที่ 3 การคำนวณและการออกแบบ	42
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	56
4.1 การวัดฮาร์มอนิกจากอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น	56
4.2 ผลของข้อมูลปริมาณฮาร์มอนิกจากโรงงาน	62
4.3 ผลการทดลองสร้างวงจรกรองฮาร์มอนิก	81
4.4 ผลการทดลองใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์วิเคราะห์ฟูเรียร์	101
4.5 ผลการทดลองใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ คำนวณหาค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรกรอง	111
4.6 รูปแสดงการทดลองต่ออุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ	116
บทที่ 5 สรุป วิจัยรณและปัญหาที่พบ	118

ภาคผนวก

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสแบบรูปไซน์	4
รูปที่ 2.2 รูปคลื่นแรงดันสี่เหลี่ยม	5
รูปที่ 2.3 รูปคลื่นยอดแบน	6
รูปที่ 2.4 รูปคลื่นยอดแหลม	6
รูปที่ 2.5 รูปแบบของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่หลักมูล	9
รูปที่ 2.6 รูปแบบของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่ฮาร์มอนิก	9
รูปที่ 2.7 การต่อคาปาซิเตอร์ขนานเข้าไปในระบบ	10
รูปที่ 2.8 การควบคุมกระแสที่ไหลผ่านโหลดแบบ Integral Cycle Control	14
รูปที่ 2.9 (ก) วงจรตัวเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟส	15
รูปที่ 2.9 (ข) รูปคลื่นของแรงดันขาออก	15
รูปที่ 2.9 (ค) รูปคลื่นของกระแสทางด้านกระแสกลับ	16
รูปที่ 2.10 แสดงรูปวงจรเฟสคอนโทรลเรกติไฟเออร์และซิงเกิลไลน์ไดอะแกรม	17
รูปที่ 2.11 แสดงรูปคลื่นของกระแสของวงจรเฟสคอนโทรลเรกติไฟเออร์	18
รูปที่ 2.12 รีไซเคิลขนานที่จุด PCC	23
รูปที่ 2.13 วงจรรีไซเคิลขนาน	24
รูปที่ 2.14 วงจรกรองซิงเกิลจูน	29
รูปที่ 2.15 วงจรกรองผ่านความถี่สูง	30
รูปที่ 2.16 วงจรรีไซเคิลแบบขนาน	31
รูปที่ 2.17 วงจรกรองฮาร์มอนิก	33
รูปที่ 2.18 วงจรสำหรับคำนวณค่าความเพี้ยนของฮาร์มอนิก	35
รูปที่ 2.19 วงจรกรองฮาร์มอนิกแบบป้องกันระบบ	35
รูปที่ 2.20 วงจรกรองฮาร์มอนิกแบบป้องกันคาปาซิเตอร์	39

รูปที่ 3.1 แสดงการจำลองระบบไฟฟ้า 3 เฟส ที่ใช้คาปาซิเตอร์แก้ตัวประกอบกำลัง และมีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก	43
รูปที่ 4.1 แสดงวงจรที่ใช้ในการวัดปริมาณฮาร์มอนิก	56
รูปที่ 4.2 แสดงเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง	57
รูปที่ 4.3 แสดงรูปคลื่นของกระแสฮาร์มอนิกของเรกติไฟเออร์	62
รูปที่ 4.4 แสดงรูปคลื่นของกระแสฮาร์มอนิกของฟีดแบล็กเอ็ม	63
รูปที่ 4.5 แสดงรูปคลื่นของกระแสฮาร์มอนิกของฟีดแบล็กเอ็ม	64
รูปที่ 4.6 แสดงรูปคลื่นของกระแสฮาร์มอนิกของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิง	65
รูปที่ 4.7 แสดงรูปคลื่นของกระแสฮาร์มอนิกของที่ไหลในสายนิวทรอล	66
รูปที่ 4.8 แสดงปริมาณความเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกในไลน์ที่ 1 ของโรงงานประเภทโหลดมอเตอร์	69
รูปที่ 4.9 แสดงปริมาณความเพี้ยนของกระแส ฮาร์มอนิกในไลน์ที่ 1 ของโรงงานประเภทโหลดมอเตอร์	70
รูปที่ 4.10 แสดงปริมาณความเพี้ยนของแรงดัน ฮาร์มอนิกในไลน์ที่ 2 ของโรงงานประเภทโหลดมอเตอร์	71
รูปที่ 4.11 แสดงปริมาณความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกในไลน์ที่ 2 ของโรงงานประเภทโหลดมอเตอร์	72
รูปที่ 4.12 แสดงปริมาณความเพี้ยนของแรงดัน ฮาร์มอนิกในไลน์ที่ 3 ของโรงงานประเภทโหลดมอเตอร์	73
รูปที่ 4.13 แสดงปริมาณความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกในไลน์ที่ 3 ของโรงงานประเภทโหลดมอเตอร์	75

รูปที่ 4.14 แสดงปริมาณความเพี้ยนของแรงดัน ฮาร์มอนิกในไลน์ที่ 1 ของโรงงานประเภทเตาหลอม	75
รูปที่ 4.15 แสดงปริมาณความเพี้ยนของกระแส ฮาร์มอนิกในไลน์ที่ 1 ของโรงงานประเภทเตาหลอม	76
รูปที่ 4.16 แสดงปริมาณความเพี้ยนของแรงดัน ฮาร์มอนิกในไลน์ที่ 2 ของโรงงานประเภทเตาหลอม	77
รูปที่ 4.17 แสดงปริมาณความเพี้ยนของกระแส ฮาร์มอนิกในไลน์ที่ 2 ของโรงงานประเภทเตาหลอม	78
รูปที่ 4.18 แสดงปริมาณความเพี้ยนของแรงดัน ฮาร์มอนิกในไลน์ที่ 3 ของโรงงานประเภทเตาหลอม	79
รูปที่ 4.19 แสดงปริมาณความเพี้ยนของกระแส ฮาร์มอนิกในไลน์ที่ 3 ของโรงงานประเภทเตาหลอม	80
รูปที่ 4.20 แสดงระบบจำลองกรณีที่ 1	81
รูปที่ 4.21 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่ระบบ	82
รูปที่ 4.22 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ที่ระบบ	82
รูปที่ 4.23 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่คาปาซิเตอร์	84
รูปที่ 4.24 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ที่คาปาซิเตอร์	84
รูปที่ 4.25 แสดงระบบจำลองกรณีที่ 2	86
รูปที่ 4.26 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่ระบบ	87
รูปที่ 4.27 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ที่ระบบ	87
รูปที่ 4.28 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่คาปาซิเตอร์	89
รูปที่ 4.29 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ที่คาปาซิเตอร์	89
รูปที่ 4.30 แสดงระบบจำลองกรณีที่ 3	91
รูปที่ 4.31 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่ระบบ	92
รูปที่ 4.32 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ที่ระบบ	92
รูปที่ 4.33 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่คาปาซิเตอร์	94
รูปที่ 4.34 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ที่คาปาซิเตอร์	94

รูปที่ 4.35 แสดงระบบจำลองกรณีที่ 4	96
รูปที่ 4.36 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่ระบบ	96
รูปที่ 4.37 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ที่ระบบ	97
รูปที่ 4.38 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่คาปาซิเตอร์	99
รูปที่ 4.39 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ที่คาปาซิเตอร์	99
รูปที่ 4.40 ผลการรันโปรแกรมหาค่าตัวคาปาซิเตอร์ที่ใช้ชดเชยค่าตัวประกอบกำลัง	111
รูปที่ 4.41 ผลการรันโปรแกรมหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5	112
รูปที่ 4.42 ผลการรันโปรแกรมหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 7	113
รูปที่ 4.43 ผลการรันโปรแกรมหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5	114
รูปที่ 4.44 ผลการรันโปรแกรมหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 7	115
รูปที่ 4.45 แสดงการต่อสายระหว่างอุปกรณ์ที่นำมาทดลอง	116
รูปที่ 4.46 แสดงวงจรกรองที่ได้ทำการสร้างขึ้น	117

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 คัดดาไฟฟ้า กระแสและเควีเอทีค่าปาสเตอร์	45
ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกของโหลดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 40 วัตต์	58
ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกของสวิตช์เพาเวอร์ซัพพลาย	58
ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกของคอมพิวเตอร์	59
ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกของมอเตอร์กระแสตรง ขณะไร้อโหลด	59
ตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกของมอเตอร์กระแสตรง ขณะจ่ายโหลด	60
ตารางที่ 4.6 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกของอินเวอร์เตอร์	60
ตารางที่ 4.7 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกของเครื่องกำเนิดสัญญาณ	61
ตารางที่ 4.8 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกของเฟสคอนโทรลเรกติไฟเออร์	62
ตารางที่ 4.9 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกของพีดับบลิวเอ็มแบบสตีฟฮอรัส	63
ตารางที่ 4.10 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกของพีดับบลิวเอ็มแบบซอฟท์ฮอรัส	64
ตารางที่ 4.11 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกของแหล่งจ่ายไฟสวิตช์	65
ตารางที่ 4.12 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกของกระแสฉนวน	66
ตารางที่ 4.13 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกของตัวขดเชยสแตติกวาร์	67
ตารางที่ 4.14 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกของเตาหลอมขณะเริ่มต้น	67
ตารางที่ 4.15 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกของเตาหลอมขณะคงที่	68
ตารางที่ 4.16 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกของโหลดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 15 วัตต์ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์	68

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีในด้านต่างๆ ได้เจริญก้าวหน้าไปอย่างมาก การนำเทคโนโลยีทางอิเล็กทรอนิกส์ มาใช้ในด้านอุตสาหกรรมและเครื่องใช้ในสำนักงาน การนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ กำลังไปใช้ในการควบคุมเครื่องจักรกลในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากประสิทธิภาพที่ได้ค่อนข้างดี แต่มีได้หมายความว่า จะมีแต่ประโยชน์เท่านั้น เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้ไม่มีความเป็นเชิงเส้นของกระแสและแรงดัน เพราะความสัมพันธ์ระหว่างค่าชั่วขณะของกระแสและแรงดันไม่คงที่ โหลดที่ไม่มีความเป็นเชิงเส้นและมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสสูง การเปลี่ยนแปลงของกระแสอย่างฉับพลันเป็นผลทำให้เกิดฮาร์มอนิกหรือสัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐานในระบบไฟฟ้า และความไม่เป็นเชิงเส้นจะทำให้กระแสไฟฟ้าเกิดการบิดเบี้ยวไป ดังนั้นโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นจึงเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก (Harmonic Source) ให้แก่ระบบ

อุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นสามารถแบ่งได้สามประเภทดังนี้

1. อุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power electronic Device) เช่น เครื่องแปรผัน (Converter) สามารถใช้งานได้มากมาย เช่น ตัวเรียงกระแส (Rectifier) คอนเวอร์เตอร์กำลังผลิต (Static Power Converter) เครื่องควบคุมกำลังกระแสสลับใช้ไทรสเตอร์ (Thyristor A.C. power controlled) และ อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

2. อุปกรณ์ประเภทแม่เหล็ก (Magnetizing device) อุปกรณ์จำพวกนี้ ได้แก่ หม้อแปลงมอเตอร์ เมื่อหม้อแปลงได้รับแรงดันมากเกินไปก็ทำให้เกิดกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetizing current) เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็ก

3. อุปกรณ์ประเภทอาร์ค (Arc Device) เช่น พวกเตาหลอม (Arc furnaces) จะกำเนิดฮาร์มอนิกจำนวนมากเพราะสาเหตุจากไม่เป็นเชิงเส้น

ในระบบที่มีการรบกวนของฮาร์มอนิกสูงจะทำให้เกิดความร้อนสูงในตัวหม้อแปลงและสายนิวทรัลในระบบสามเฟสสี่สายได้ ซึ่งกรณีที่มีการกระชากของกระแสสูง ๆ อาจทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ดับวงจรได้

แนวทางการพิจารณาว่าเมื่อใดควรศึกษาถึงปัญหาฮาร์มอนิก

1. เมื่อระบบไฟฟ้าใช้คอนเวอร์เตอร์หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าที่ผลิตฮาร์มอนิกออกมาตั้งแต่ 20% ขึ้นไปของขนาดหม้อแปลง

2. เมื่ออุปกรณ์ป้องกันคาปาซิเตอร์ และ ตัวคาปาซิเตอร์ เสียหายบ่อย
3. ในการออกแบบระบบไฟฟ้าของโรงงานซึ่งมีโหลดประเภทกำเนิดฮาร์มอนิกและเมื่อมีการใช้คาปาซิเตอร์เพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง
4. ถ้าทางการไฟฟ้ามีกฎข้อบังคับจำกัดให้ระบบไฟฟ้าของโรงงานส่งฮาร์มอนิกเข้าระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าได้ไม่เกินค่าหนึ่ง
5. การขยายระบบไฟฟ้าของโรงงานซึ่งจะเพิ่มโหลดประเภทที่สามารถผลิตฮาร์มอนิกได้ เมื่อรู้แน่ว่าปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าเป็นผลมาจากฮาร์มอนิก เราสามารถหาระดับความถี่รีโซแนนซ์ได้

การป้องกันฮาร์มอนิกที่ศึกษามีสองแบบด้วยกันคือ

1. ป้องกันฮาร์มอนิกที่มีผลต่อคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในการแก้ตัวประกอบกำลัง ซึ่งอาจทำให้คาปาซิเตอร์เสียหายจากการระเบิดได้
2. ป้องกันระบบไฟฟ้าไม่ให้ฮาร์มอนิกไหลเข้าระบบ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สายไฟมีพื้นที่การใช้งานน้อยลง เนื่องจากฮาร์มอนิกที่อยู่ กระแสเต็มไวยทำให้สายไฟและหม้อแปลงไหม้ได้ ทั้งๆ ที่กระแสหลักมูลไม่มากนัก

วิธีการแก้ปัญหาฮาร์มอนิก

กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านในระบบไฟฟ้าสามารถควบคุมได้หลายวิธีมีดังต่อไปนี้

1. เปลี่ยนตำแหน่งที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์และ/ หรือเปลี่ยนขนาดคาปาซิเตอร์ การที่ระบบไฟฟ้ามีปัญหาฮาร์มอนิกนั้น ส่วนใหญ่เนื่องมาจากระดับฮาร์มอนิกรีโซแนนซ์ใกล้กับระดับฮาร์มอนิกที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกผลิตออกมา เช่น 5,7,11,13 เป็นต้น ถ้าเราเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งคาปาซิเตอร์ให้ไกลจากข้อหม้อแปลงทางด้านแรงต่ำจะสามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าลัดวงจรลงทำให้ค่าระดับฮาร์มอนิกรีโซแนนซ์ลดลง

การลดหรือเพิ่มขนาดของคาปาซิเตอร์ทำให้ค่าระดับฮาร์มอนิกรีโซแนนซ์เพิ่มหรือลดตาม แต่ต้องคำนึงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ที่เราปรับปรุงด้วย การแก้ฮาร์มอนิกด้วยวิธีนี้ใช้กับระบบที่มีอุปกรณ์ผลิตปริมาณฮาร์มอนิกออกมามาก

2. การทำเฟสมัลติพลิเคชัน (Phase Multiplication) ถ้าคอนเวอร์เตอร์มีจำนวนเฟสหรือจำนวนพัลส์มาก ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะเป็นอันดับสูงและ มีปริมาณน้อย ดังนั้นจึงควรใช้ คอนเวอร์เตอร์จำนวนพัลส์มาก ๆ หรือนำคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์จำนวนหลายๆชุดมาต่อกันโดยผ่านหม้อแปลงที่มีมุมต่างกัน 15 องศา คือเดลต้า-เดลต้า หรือเดลต้า-สตาร์

3. วงจรกรองฮาร์มอนิกหรือฟิลเตอร์ (Filter) เมื่อเกิดปัญหาฮาร์มอนิกมากจนกระทั่งสองวิธีดังกล่าวข้างต้นใช้ไม่ได้ผลแสดงว่าเกิดรีโซแนนซ์ระหว่างระบบกับคาปาซิเตอร์ที่ระดับฮาร์มอนิกใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิกที่แหล่งกำเนิดผลิตออกมา ทำให้เกิดภาวะโหลดเกิน (Over load) ทั้งกระแส และแรงดัน ที่ตัวคาปาซิเตอร์ วิธีแก้ปัญหาก็ได้ผลคือ การโดยการใส่ฟิลเตอร์โดยการนำตัวเหนี่ยวนำ หรือ รีแอคเตอร์ (Reactor) มาต่ออนุกรมกับคาปาซิเตอร์เพื่อปรับความถี่รีโซแนนซ์โดยฟิลเตอร์จะแบ่งเป็นสองชนิดคือ

3.1 วงจรกรองฮาร์มอนิกแบบป้องกันระบบ หรือ จูนฟิลเตอร์ (Tuned filter) เพื่อไม่ให้กระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าไปรบกวนระบบโดยปรับค่ารีแอคเตอร์ให้เกิดรีโซแนนซ์อนุกรมกับคาปาซิเตอร์ที่ตรงกับระดับฮาร์มอนิกที่มีในระบบ

3.2 วงจรกรองฮาร์มอนิกแบบป้องกันคาปาซิเตอร์ หรือดีจูนฟิลเตอร์ (Detuned filter) จะปรับรีแอคเตอร์ให้เกิดรีโซแนนซ์แบบอนุกรมกับคาปาซิเตอร์ที่ความถี่ที่ต่ำกว่าระดับฮาร์มอนิกต่ำสุดที่มีในระบบปกติเช่นฮาร์มอนิกที่ 5 โดยทั่วไปจะใช้ฟิลเตอร์ที่มีค่า อินดักแตนซ์ 4.5 - 7 เปอร์เซนต์ของค่ารีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์

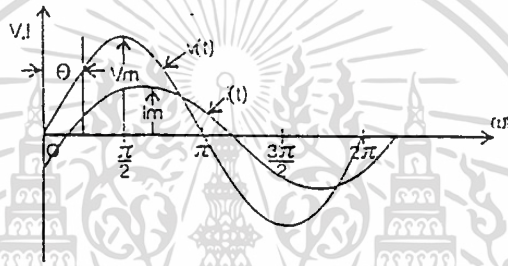
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 นิยามและปริมาณต่างๆ เกี่ยวกับฮาร์มอนิก

2.1.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับฮาร์มอนิก

ไฟฟ้ากระแสสลับที่เราใช้งานกันอยู่ทุกวันนี้ โดยทั่วไปจะมีรูปคลื่นแรงดันและกระแสเป็นรูปไซน์ (sinusoidal wave) ดังแสดงรูปที่ 2.1 .



รูปที่ 2.1 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสแบบรูปไซน์

รูปคลื่นของแรงดันและกระแส ในรูปที่ 2.1 นี้สามารถเขียนเป็นสมการแสดงขนาดที่แปรเปลี่ยนตามเวลาได้ดังนี้

$$v(t) = V_m \sin(\omega t) \quad \dots\dots 2.1$$

หรือ

$$\begin{aligned} v(t) &= V_m \sin(2\pi f t) \\ i(t) &= I_m \sin(\omega t - \theta) \quad \dots\dots 2.2 \end{aligned}$$

หรือ

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

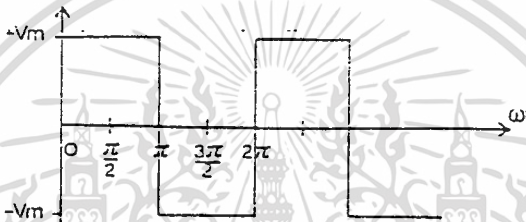
เมื่อ

$$\begin{aligned} v(t) &= \text{ขนาดของแรงดันในเวลา } t \text{ ใดๆ} \\ V_m &= \text{ขนาดสูงสุดหรือค่ายอดของแรงดัน} \\ i(t) &= \text{ขนาดของกระแส ณ เวลา } t \text{ ใดๆ} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_m	=	ขนาดสูงสุด หรือค่ายอดของกระแส
f	=	ความถี่ของแรงดันและกระแส
θ	=	ขนาดของมุมที่กระแสตามหลังแรงดัน
t	=	เวลา

สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ รูปคลื่นของแรงดันและกระแสไม่จำเป็นต้องเป็นรูปไซน์ อาจเป็นรูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยม (Square wave) ดังรูปที่ 2.2



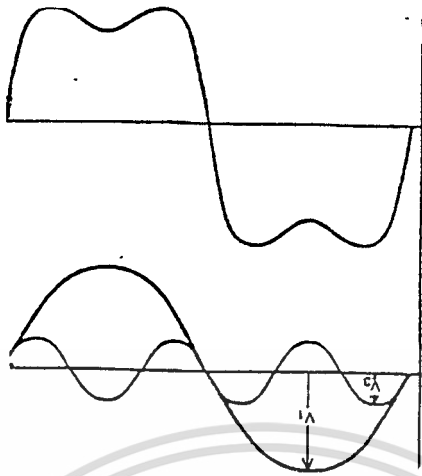
รูปที่ 2.2 รูปคลื่นของแรงดันสี่เหลี่ยม

สามารถเขียนสมการที่แปรเปลี่ยนตามเวลาได้ดังนี้

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

จากรูปที่ 2.2 พบว่าแรงดันที่รูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยมจะประกอบด้วยรูปคลื่นแบบไซน์ ที่มีขนาดและความถี่ต่างๆ จำนวนมากมาย

รูปที่ 2.3 เป็นรูปคลื่นแบบยอดแบนเกิดจากรูปคลื่นแบบไซน์จำนวนสองชุดที่มีความถี่ต่างกันสามเท่ารวมกัน

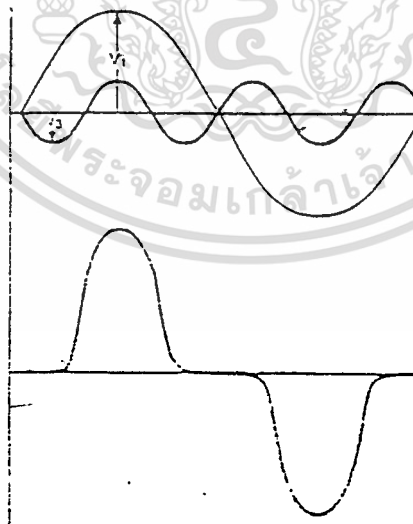


รูปที่ 2.3 รูปคลื่นแบบยอดแบน

จะได้สมการว่า

$$v(t) = V_1 \sin(\omega t) + V_3 \sin(3\omega t) \quad \dots 2.4$$

รูปที่ 2.4 รูปคลื่นแบบยอดแหลมเกิดจากรูปคลื่นแบบไซน์จำนวนสองชุดที่มีความถี่ต่างกันสามเท่ามารวมกันแต่มีเฟสต่างกันดังรูป



รูปที่ 2.4 รูปคลื่นแบบยอดแหลม

จะได้สมการ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปคลื่นต่างๆ สรุปได้ว่าคลื่นแบบไซน์ แบบสามเหลี่ยม แบบยอดแบน แบบยอดแหลมต่างเกิดจากรูปคลื่นแบบไซน์ที่มีขนาดและความถี่ต่างๆ จำนวนมากมารวมกัน

รูปคลื่น $V_m \sin(\omega t)$ ในสมการที่ 2.1 หรือ $V_m \sin(\omega t)$ ในสมการที่ 2.3 หรือ $V_1 \sin(\omega t)$ ในสมการที่ 2.4 และ 2.5 เราเรียกเป็น รูปคลื่นความถี่หลักมูล (Fundamental wave) รูปคลื่นอื่นๆ ที่มีความถี่ต่างไปจากรูปคลื่นความถี่หลักมูลเป็นจำนวน n เท่า โดยที่ $n = 2, 3, 4, \dots$ เช่น $4/\pi V_m (1/3) \sin(3\omega t)$ ในสมการที่ 2.3 หรือ $V_3 \sin(3\omega t)$ ในสมการที่ 2.4 และ 2.5 ที่มีความถี่เป็นสามเท่าของความถี่หลักมูล เราเรียกเป็นรูปคลื่นฮาร์มอนิกโดยมีลำดับฮาร์มอนิกเป็น สาม

ดังนั้น ฮาร์มอนิก คือ ขนาดของแรงดันหรือกระแสที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล (Fundamental frequency)

ฟังก์ชันต่างๆ ที่เกิดขึ้นและเป็นปัญหาในทางวิศวกรรมที่พบเห็น ส่วนใหญ่ มักเป็น ฟังก์ชันคาบ (Periodic function) ซึ่งฟังก์ชันเหล่านี้สามารถแทนให้อยู่ในเทอมของฟังก์ชันคาบของสัญญาณไซน์และโคไซน์ ซึ่งสัญญาณทั้งสองนี้ในทางปฏิบัติจะมีความสำคัญมาก และในแต่ละเทอมของอนุกรม (Series) ของฟังก์ชันโคไซน์และไซน์ เกิดขึ้นเนื่องจากความคิดของนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสชื่อ Joseph Fourier ดังนั้นเราจึงเรียกฟังก์ชันดังกล่าวว่า อนุกรมฟูเรียร์ (Fourier series)

ดังนั้นรูปคลื่นของแรงดันหรือกระแสที่เป็นคาบที่มีความผันสามารถแสดงโดยการใช้ ทฤษฎีฟูเรียร์ (Fourier theorem) ได้ โดยอาศัยอนุกรมฟูเรียร์ตรีโกณมิติ (Trigonometric Fourier Series) ดังสมการ

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

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

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

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

เมื่อ

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

a_0 = ค่าเฉลี่ยของ $f(t)$

a_n, b_n = ค่าสัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูเรียร์

T = คาบเวลาของรูปคลื่น $f(t)$

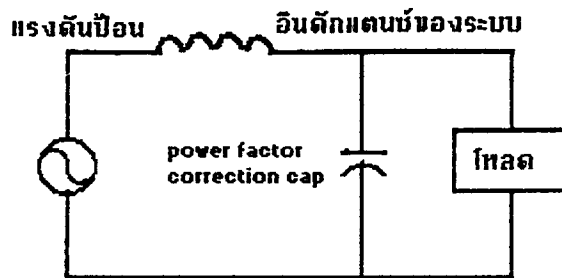
n = เลขจำนวนเต็มบวกใดๆ (ลำดับของฮาร์โมนิก)

2.1.2 ศัพท์และปริมาณต่างๆ

1) ฮาร์โมนิก (Harmonic)

วิชาทางไฟฟ้า ฮาร์โมนิก คือ สัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล เช่น ความถี่มูลฐาน คือ 50 เฮิร์ตซ์ ฮาร์โมนิกคือ 100 , 200 เฮิร์ตซ์ เป็นต้น ความถี่มูลฐานเรียกว่า ฮาร์โมนิกที่ 1 ส่วน ฮาร์โมนิกลำดับอื่นๆ ก็หาได้จากการเอาเลขจำนวนเต็มบวกคูณกับความถี่มูลฐาน การวัดความเพี้ยนฮาร์โมนิกสามารถทำได้หลายวิธีที่แตกต่างกันออกไป แต่โดยส่วนมากจะใช้วัดความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม (Total harmonic distortion) ที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่างๆ กันปริมาณของขนาดจะแสดงด้วยจำนวนเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่หลักมูลและเครื่องมือวัดฮาร์โมนิกทั้งหลาย จะแสดงผลของความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวมและความเพี้ยนของฮาร์โมนิกแต่ละส่วนด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่หลักมูลเช่นกัน

เมื่อโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ถูกป้อนด้วยแรงดันหลักมูลบริสุทธิ์โดยแหล่งจ่าย ซึ่งไม่มีค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ จะมีผลทำให้รูปร่างของกระแสมีความแตกต่างไปจากแรงดันที่ป้อนให้ ความเพี้ยนของกระแสจะมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบจ่าย เมื่ออิมพีแดนซ์ของระบบถูกเพิ่มเข้ามา ความเพี้ยนของกระแสจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ตัวอิมพีแดนซ์นี้จะมีผลทำให้เกิดความเพี้ยนของแรงดันดังแสดงในรูปที่ 2.5 ด้วยเหตุนี้ โหลดไม่เป็นเชิงเส้นหรือตัวผลิตฮาร์โมนิกจะถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสฮาร์โมนิก ด้วยอิมพีแดนซ์ของระบบที่เหมาะสมดังในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 รูปแบบของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่หลักมูล



รูปที่ 2.6 รูปแบบของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่ฮาร์มอนิก

ดังนั้นสามารถให้คำนิยามศัพท์ต่างๆได้ดังนี้

2) กระแสฮาร์มอนิก (Harmonic Current)

ฮาร์มอนิกที่อยู่ในรูปของกระแสในไลน์ในระบบไฟฟ้าเกิดขึ้นจากอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Devices) ซึ่งอาจเป็นโหลดหรือแหล่งกำเนิดก็ได้ ในอดีตที่ไม่มีการศึกษาฮาร์มอนิกอย่างจริงจัง เนื่องจากอุปกรณ์ไม่เชิงเส้นมีจำนวนน้อย ทำให้ผลของฮาร์มอนิกต่อระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อย แต่ในช่วงสิบปีที่ผ่านมาอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับเครื่องแปลงผัน (Converter) ได้ขยายตัวอย่างมากเป็นผลให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกขึ้นอย่างมากมาย

3) แรงดันฮาร์มอนิก (Harmonic voltage)

เกิดจากการที่กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านค่า รีแอกแตนซ์ (Reactance) ของระบบ (รีแอกแตนซ์ของแหล่งจ่ายของสายส่ง หรือรีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่ต่อขนานเข้าไปในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

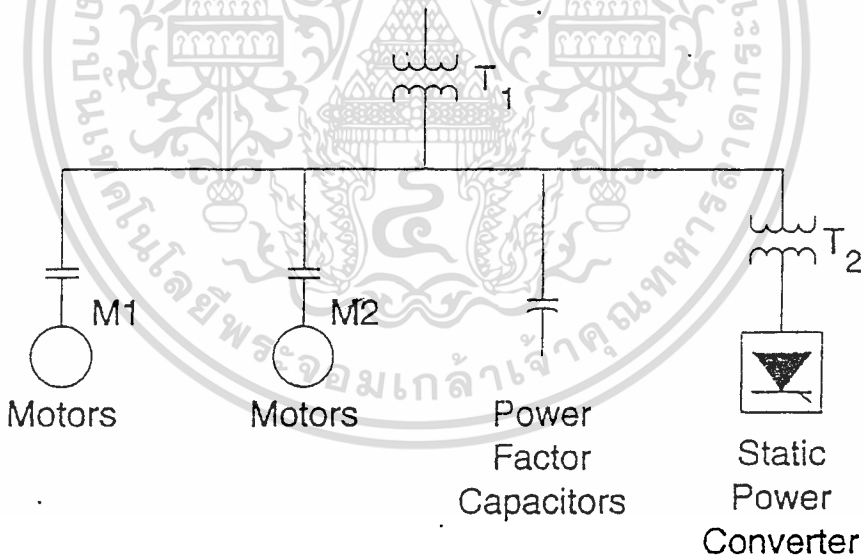
เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง (Power factor) และแรงดันให้ดีขึ้น) ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปแรงดัน อันเนื่องมาจากรีแอคแตนซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ส่วนค่าความต้านทานไม่เปลี่ยนแปลง

กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบนั้นจะเป็นตัวสร้างทำให้เกิดความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก (Harmonic Voltage Distortion) ซึ่งเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$V_n = Z_n I_n \quad \text{.....2.10}$$

เมื่อ V_n = แรงดันฮาร์มอนิก
 I_n = กระแสฮาร์มอนิกในระบบ
 Z_n = ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ

ถ้าในระบบไฟฟ้าใช้คาปาซิเตอร์ชดเชยเข้าในระบบ เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลัง จะทำให้มีอิทธิพลต่อระดับฮาร์มอนิกในระบบจำหน่าย คาปาซิเตอร์มีได้เป็นตัวกำเนิดฮาร์มอนิก แต่จากการต่อวงจรในระบบมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดเงื่อนไขเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel resonance) ระหว่างคาปาซิเตอร์และรีแอคแตนซ์ของระบบดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การต่อคาปาซิเตอร์ขนานเข้าไปในระบบ

เมื่อพิจารณาให้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก ถ้ารีโซแนนซ์แบบขนานเกิดขึ้นที่ความถี่เดียวกันหรือใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิกของโหลดไม่เป็นเชิงเส้น จะทำให้เกิดกระแสจำนวนมากไหลผ่านระหว่างรีแอคแตนซ์ของระบบและรีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ กระแสนี้จะรวมกับกระแสฮาร์มอนิกของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมรีแอค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แดนซ์ของระบบ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดัน มีค่ามาก (Distortion Factor)

4) ตัวประกอบความเพี้ยน (Distortion Factor) DF

ตัวประกอบฮาร์โมนิก (Harmonic Factor) HF

ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกทั้งหมด (Total Harmonic Distortion) THD

ความหมายทั้งสามตัวนั้นมาตรฐานของ IEEE ได้ให้ความหมายไว้เหมือนกัน กล่าวคือ ค่าที่บอกถึงปริมาณของฮาร์โมนิกที่มีอยู่ทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับค่า rms ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล

IEEE 519-1992

Harmonic voltage และ Harmonic current

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

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

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

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

IEC 555-1 :1992

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

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

สำหรับมาตรฐาน IEC ได้ให้ความหมายทั้งสามตัว ว่ามันคือความเพี้ยนของฮาร์โมนิก (Harmonic Distortion) ,HD กล่าวคือ บอกถึงปริมาณของฮาร์โมนิกที่มีอยู่ทั้งหมดโดยเปรียบเทียบกับค่า rms ของปริมาณทั้งหมด

5) ลำดับฮาร์โมนิก (Harmonic Order)

ลำดับฮาร์โมนิก คือ อัตราส่วนของความถี่ฮาร์โมนิก และความถี่หลักมูล เช่น เมื่อเอ่ยถึงฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 หากความถี่หลักมูลเป็น 50 Hz จะได้ความถี่ของฮาร์โมนิกที่ 3 เป็น 150 Hz

6) ตัวประกอบกำลัง (Power Factor)

หมายถึง อัตราส่วนของกำลังงานจริง (W หรือ kW) ต่อกำลังงานปรากฏ (VA หรือ K VA) อย่างไรก็ตามหากรูปคลื่นของแรงดันและกระแสมีลักษณะรูปคลื่น ไชน์เราอาจพูดถึงตัวประกอบกำลังในเทอมค่าโคไซน์ (cosine) ของมุมเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสก็ได้

PF คือ อัตราส่วนกำลังงานจริงต่อกำลังงานปรากฏ

Displacement Power Factor (DPF) คือ อัตราส่วนของกำลังงานจริงของรูปคลื่นความถี่หลักมูลต่อกำลังปรากฏของรูปคลื่นความถี่หลักมูล หรืออาจกล่าวได้ว่า DPF คือค่าโคไซน์ของมุมเฟสของแรงดันความถี่หลักมูลกับกระแสความถี่หลักมูล

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

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

เมื่อ

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

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

พิกัดกำลังที่ปรากฏ (Fund) ได้จาก rms ของแรงดันคูณกับ rms ของกระแสของ Fundamental

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

2.1.3 ประเภทของฮาร์โมนิก

ฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นปะปนอยู่ในกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าอาจแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆดังต่อไปนี้

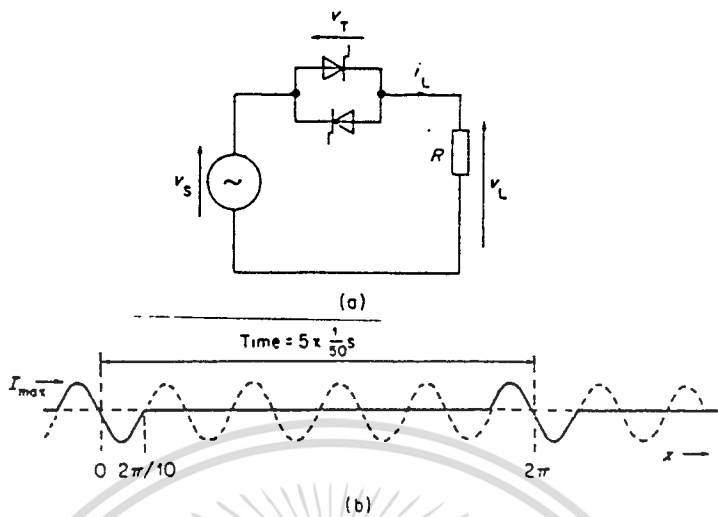
1) ฮาร์โมนิก (Harmonic)

หมายถึง ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใดๆ ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของตัวของความถี่หลักมูล เช่น รูปคลื่นสี่เหลี่ยมในรูปที่ 2.2 จะมีฮาร์โมนิกปนอยู่มาก ตั้งแต่ฮาร์โมนิกลำดับที่ 2,3,4 หรือรูปคลื่นในรูปที่ 2.3 และ 2.4 จะมีเฉพาะฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 ปนอยู่เท่านั้น

2) อินเตอร์ฮาร์โมนิก (Interharmonic)

หมายถึง ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใดๆ ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าของตัวของความถี่หลักมูล อินเตอร์ฮาร์โมนิกนี้ส่วนมากจะพบในกระแสเตาหลอมแบบอาร์ค (Arc furnace) เนื่องจากในระหว่างหลอมเหล็ก โดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้นการหลอมการหลอมกระแสอาร์คจะยังไม่เสถียร ทำให้คาบของกระแสไม่แน่นอน กล่าวคือ ความถี่ 50 Hz คาบจะกินเวลา 20 มิลลิวินาที แต่กระแสอาร์คจะมีคาบเวลาไม่เป็น 20 มิลลิวินาทีทุกคาบ ทำให้เกิด Interharmonic ขึ้นนอกจากนี้ก็จะพบ Interharmonic ในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการควบคุมการทำงานแบบ Integral Cycle Control หรือ Burst firing ดังรูป 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 การควบคุมกระแสที่ไหลผ่านโหลดแบบ Integral Cycle Control

ถ้าให้ N คือจำนวน cycle ที่ ON และ M คือจำนวน cycle ที่ pattern ของรูปคลื่นกลับมาซ้ำเดิม จะคำนวณหากระแสฮาร์มอนิก ลำดับต่างๆ ได้ดังนี้

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

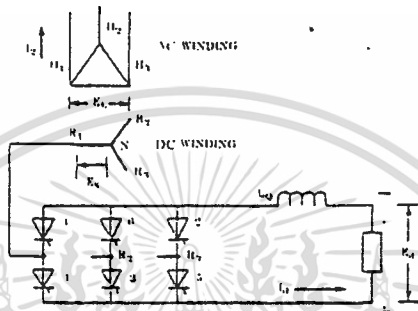
จากกระแสฮาร์มอนิกที่วิเคราะห์ออกมาจะพบว่ากระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับเป็นเลขลงตัวของความถี่หลักมูล 50 Hz จะเป็นศูนย์ แต่กระแสฮาร์มอนิกที่มีความถี่หรือมีลำดับไม่เป็นเลขลงตัวของความถี่หลักมูลจะมีค่า ดังเช่น ฮาร์มอนิกความถี่ 10 Hz จะมีลำดับเป็น 1/5 ของความถี่หลักมูล เราจึงเรียกฮาร์มอนิกเหล่านี้ว่า อินเตอร์ฮาร์มอนิก

3) ฮาร์มอนิกคุณลักษณะ (Characteristic Harmonic)

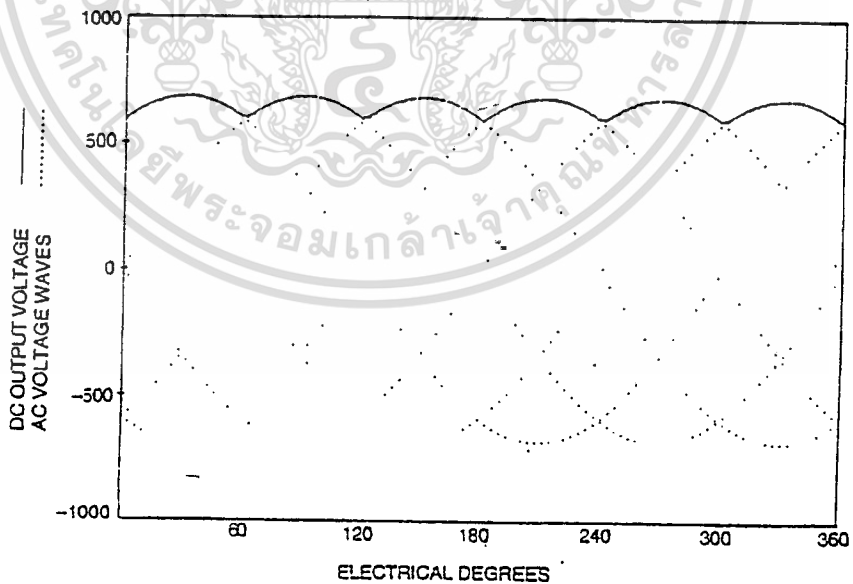
หมายถึง ฮาร์มอนิกที่สร้างโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้า (แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงหรือกลับกัน โดยใช้สารกึ่งตัวนำ เช่น ไดโอด, SCR เป็นสวิตช์ตัดต่อกระแส) ในสภาวะการทำงานปกติลำดับของ ฮาร์มอนิกคุณลักษณะสามารถหาได้จาก

$$n = kp \pm 1 \quad \dots 2.12$$

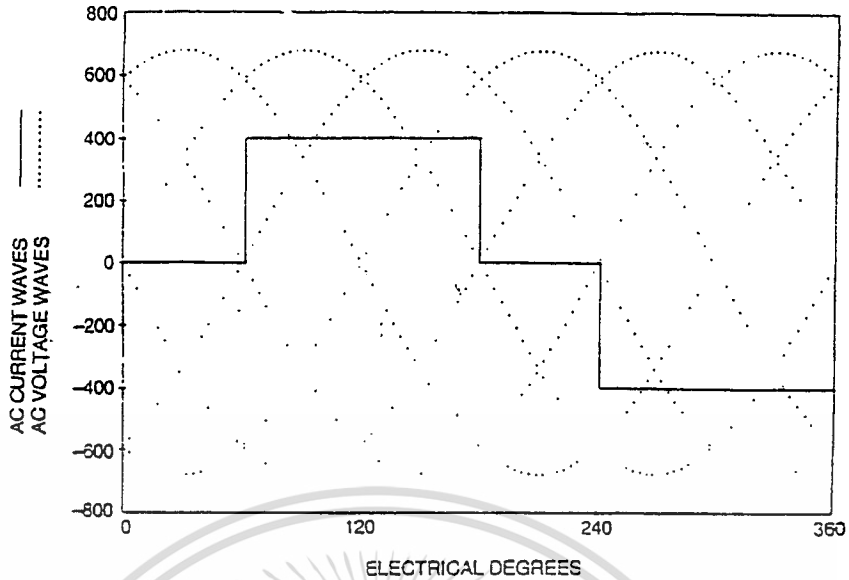
เมื่อ

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

รูปที่ 2.9 (ก) วงจรตัวแรงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟส



รูปที่ 2.9 (ข) รูปคลื่นของแรงดันขาออก (ในอุดมคติ)



รูปที่ 2.9 (ค) รูปคลื่นของกระแสทางด้าน AC (เป็นรูปคลื่นในอุดมคติ)

รูปที่ 2.9 (ก) แสดงวงจรตัวเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟส ใช้ SCR จำนวน 6 ตัว ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อกระแส ดังนั้นใน 1 cycle ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จะเกิดกระแสไหลผ่าน SCR ในลักษณะกระแสพัลส์ จำนวน 6 ครั้ง จึงมีค่า P1 เป็น 6 ในรูปที่ 2.9 (ข) แสดงรูปคลื่นของแรงดันขาออกจะเป็นแรงดันตรงที่มีความพริ้ว (Ripple) ชื่อ ความพริ้ว นี้มีการเปลี่ยนแปลง 6 cycle ใน 1 cycle ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ความพริ้ว 6 cycle จะส่งผลถึงฮาร์มอนิกของกระแสทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับด้วย รูปที่ 2.9 (ค) แสดงรูปคลื่นของกระแสทางด้านกระแสสลับจากรูปคลื่นนี้เมื่อแตกออกเป็นอนุกรมฟูเรียร์ได้ดังนี้

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

จะพบว่ากระแสฮาร์มอนิกจะมีเฉพาะลำดับที่ $6k+1$ หรือ 5,7,11,13,17,19,... เท่านั้น เราเรียกกระแสฮาร์มอนิกที่มีลำดับเหล่านี้ว่า ฮาร์มอนิกคุณลักษณะ

6) ฮาร์มอนิกที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ (Noncharacteristic Harmonic)

หมายถึง ฮาร์มอนิกที่ถูกสร้างโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้าที่ไม่เป็นไปตามสมการ $n=kp+1$ เช่น เครื่องแปลงผันไฟฟ้าชนิด 12 พัลส์ ควรมีเฉพาะฮาร์มอนิกคุณลักษณะ ที่มีลำดับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

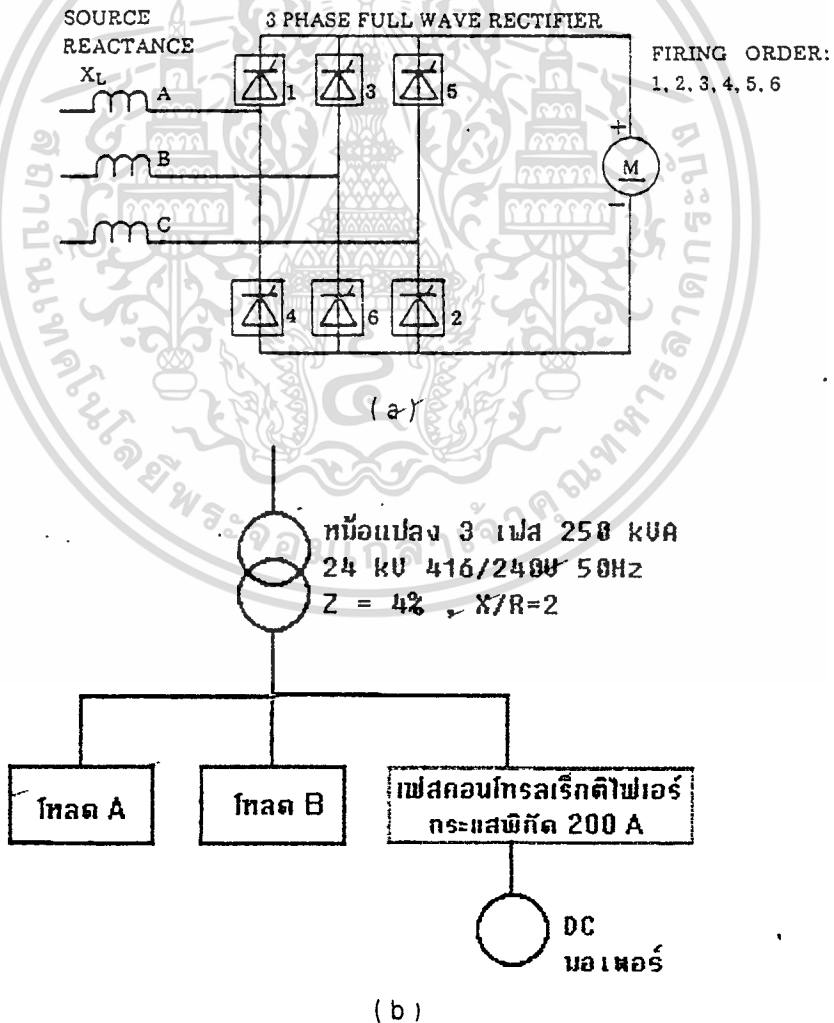
11,13,23,25,35,37 ดังนั้นถ้ามีฮาร์โมนิกที่มีลำดับเป็น 5,7,17,19 ปนมาด้วย ฮาร์โมนิกเหล่านี้ถือว่าเป็นฮาร์โมนิกที่ไม่เกิดจากคุณลักษณะ

7) ฮาร์โมนิกลำดับที่สามหารลงตัว (Triplen Harmonic)

หมายถึง ฮาร์โมนิกที่มีลำดับถูกหารด้วย 3 ลงตัว ได้แก่ฮาร์โมนิกลำดับที่ 3,6,9 ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มที่มีลำดับ (sequence) เป็นศูนย์ ในกรณีที่เป็นระบบ 3 เฟส 4 สาย ฮาร์โมนิกกลุ่มนี้จะรวมกันไหลอยู่ในสายนิวทรัล ทำให้เกิดปัญหากับระบบไฟฟ้าได้เช่นสายนิวทรัลร้อนจนฉนวนเสียหายเกิดลัดวงจร เป็นต้น

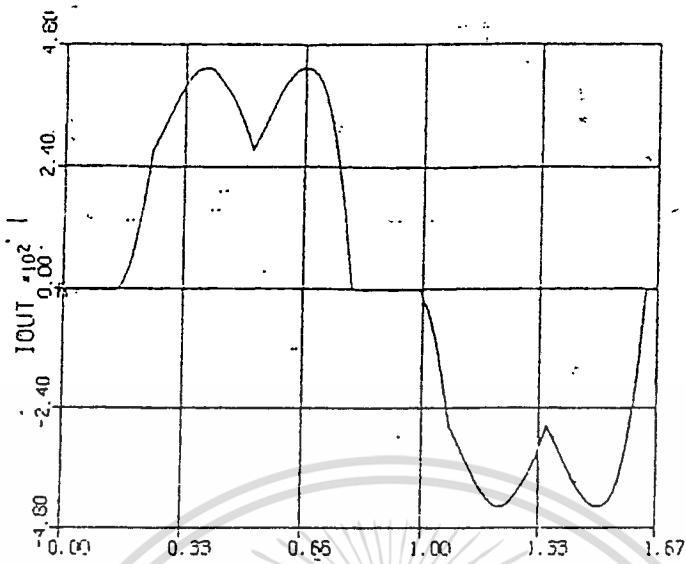
ในการคำนวณหาค่าปริมาณต่างๆ ของวงจร เฟสคอนโทรลเรกติไฟเออร์

(Phase-Controlled Rectifiers) ดังรูป



รูปที่ 2.10 (a) แสดงรูปวงจรเฟสคอนโทรลเรกติไฟเออร์และ (b) ซึ่งเกิดไลน์ไดอะแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงรูป คลื่นของกระแสของวงจรวงจรเฟสคอนโทรลเรกติไฟเออร์

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

กระแสฮาร์โมนิกจะมาจากเฟสคอนโทรลเรกติไฟร์ ปริมาณกระแสที่ฮาร์โมนิกลำดับต่างๆ เป็นดังนี้

Fundamental	100%
5-TH Harmonic	20%
7-TH Harmonic	14.2%
11-TH Harmonic	9.1%
13-TH Harmonic	7.7%

เพราะฉะนั้น

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

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

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

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

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



ดังนั้น

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

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

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

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

ความผิดเพี้ยนของแรงดันที่ Pcc หาได้จากการหาแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นที่หม้อแปลง และเนื่องจากรีแอคแตนซ์ของหม้อแปลงจะมีค่าเปลี่ยนแปลงความถี่ส่วนความต้านทานไม่เปลี่ยน เราคำนวณรีแอคแตนซ์เท่านั้น ที่ฮาร์มอนิกต่างๆมีรีแอคแตนซ์และแรงดันดังนี้คือ

$$n = 5 = I_5 \times 2\pi (5f) L = 40 \times 5 \times 0.025 = 5 v$$

$$n = 7 = I_7 \times 2\pi (7f) L = 28.4 \times 5 \times 0.025 = 4.97 v$$

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

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

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

เพราะฉะนั้นจะเห็นได้ว่ากระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดความเพี้ยนของแรงดันได้

2.2 แหล่งกำเนิดและผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า

2.2.1. แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิก

แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ากำลังมีอยู่มากมาย อุปกรณ์ที่ถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกมีดังต่อไปนี้

1) หม้อแปลง (Transformer)

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

2) เครื่องจักรไฟฟ้า (Electric Machinery)

เครื่องจักรไฟฟ้ามีลักษณะคล้ายหม้อแปลง นั่นคือในสถานะอยู่ตัวมันไม่ทำให้เกิดการเพี้ยนแก่วงจร แต่ในสถานะชั่วคราวหรือขณะเครื่องจักรทำงานเกินขอบเขตจะทำให้เกิดฮาร์โมนิกขึ้น เครื่องจักรไฟฟ้าจะผลิตกระแสฮาร์โมนิกในฟังก์ชันของความเร็วกับจำนวนรอบของอาร์เมเจอร์ การออกแบบเครื่องจักรไฟฟ้าที่ดีต้องทำให้ระดับกระแสฮาร์โมนิกมีค่าน้อยที่สุดในทางปฏิบัติกระแสฮาร์โมนิกอันดับสามจะได้รับการสกัดกัน (Block) โดยการต่อกับหม้อแปลงแบบเดลตา

3) อุปกรณ์อาร์ก (Arc Equipment)

อุปกรณ์อาร์กมีมากมายหลายชนิดซึ่งรวมถึงเตาอาร์กขนาดใหญ่และเครื่องเชื่อม อุปกรณ์ทั้งสองทำให้เกิดปัญหาฮาร์โมนิกและไฟกระพริบ นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์อาร์กอื่น ๆ ซึ่งทำให้เกิดปัญหาฮาร์โมนิกได้แก่ แสงสว่างอาร์ก ที่ใช้กับถนนและลานจอดรถ การเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกเนื่องจากอุปกรณ์อาร์กมีขนาดเท่ากับ 10 % ของกระแสฟลักซ์ ในอุปกรณ์บางชนิด อาจมีค่าถึง 30% ถ้าวัดแรงดันขาออก (Output Voltage) ของเตาอาร์กจะพบว่าแรงดันฮาร์โมนิกเปลี่ยนแปลงอย่างมากและมีค่าไม่แน่นอน ตัวอย่างเช่น

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

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

- ขณะถลุงแร่ (Refining) แรงดันฮาร์โมนิกอันดับ 5 มีขนาด 2.5%

4) หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent)

หลอดฟลูออเรสเซนต์นิยมใช้มากในบ้านเรือนและในอุตสาหกรรมบางชนิด จึงถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกที่สำคัญ การปล่อยประจุ (Discharge) ในหลอดฟลูออเรสเซนต์ถือว่าเป็นแบบไม่เชิงเส้นอย่างมาก (Highly Non-Linear) ซึ่งทำให้เกิด กระแสฮาร์โมนิกอันดับคี่ (Odd-Ordered Harmonic Current)

5) เครื่องแปลงผัน (Convertor)

เครื่องแปลงผันใช้กันอย่างกว้างขวาง ตั้งแต่ในบ้านจนถึงในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ การที่เครื่องอุปกรณ์นี้ได้รับความนิยมอย่างมากเนื่องจากมันมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง เครื่องแปลงผันขนาดเล็กจะเป็นหนึ่งเฟส โดยใช้กับอุปกรณ์จำพวก

- เครื่องรับโทรทัศน์
- คอมพิวเตอร์
- อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในบ้าน

เครื่องแปลงผันสามเฟสที่ใช้กันทั่วไปจะทำหน้าที่เปลี่ยน กำลังไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

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

กรณี AC / DC / AC ใช้กับมอเตอร์ซิงโครนัสหรือมอเตอร์เหนี่ยวนำ การที่ต้องเปลี่ยนจาก DC เป็น AC อีกครั้งเพื่อให้มอเตอร์สามารถจ่ายกำลังที่มีความถี่มากกว่า 50 Hz เครื่องแปลงผันสามารถแบ่งแยกได้ตามจำนวนพัลส์ เช่น 3, 6, 12, 18, 24 และมากกว่านี้ จำนวนพัลส์จะบอกถึงจำนวนอุปกรณ์เปิด - ปิดวงจร ที่ใช้โซลิดสเตต (Solid State Switching Devices) ซึ่งโดยปกติใช้ไทรสเตอร์ควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากมุมจุดชนวนของมันควบคุมได้ง่ายงานทั่วไปนิยมใช้ 6 พัลส์ หรือ 12 พัลส์ สำหรับงานที่ต้องการกำลังต่ำจะใช้ 3 พัลส์ งานที่ต้องการกำลังสูงจะใช้ 18 พัลส์หรือมากกว่านี้

สำหรับเครื่องแปลงผันสามารถหาอันดับและขนาดฮาร์มอนิกได้ตามสมการ

$$n = kq \pm 1 \quad \text{.....2.14}$$

โดยที่

n = อันดับฮาร์มอนิก

k = เลขจำนวนเต็มบวก มีค่าเท่ากับ 1 , 2 , 3

q = จำนวนพัลส์ของเครื่องแปลงผัน

และ

$$I_n = I_1 / n \quad \text{.....2.15}$$

โดยที่

I_n = กระแสฮาร์มอนิกอันดับ n

I_1 = กระแสที่ความถี่หลักมูล

n = อันดับฮาร์มอนิก

2.2.2 ผลกระทบของฮาร์มอนิก

แรงดันและกระแสฮาร์มอนิกมีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังดังนี้

- ทำให้เกิดการขยายระดับฮาร์มอนิก เนื่องจากผลของรีโซแนนซ์ฮาร์มอนิกและขนาน
- ทำให้การผลิตกำลังไฟฟ้า การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และการใช้กำลังไฟฟ้า มีประสิทธิภาพ

ลดลง

- ทำให้ฉนวนของอุปกรณ์เสื่อมสภาพ เป็นผลให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง
- ทำให้โรงจักรทำงานผิดปกติ (Plant Maloperation)

ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่อระบบอื่นและอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังมีดังนี้

1) ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อการเกิดรีโซแนนซ์

คาปาซิเตอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ในระบบ อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการรีโซแนนซ์เฉพาะแห่ง ซึ่งจะเป็เหตุให้คาปาซิเตอร์ได้รับกระแสที่มากเกินไป ซึ่งจะเป็เหตุให้คาปาซิเตอร์เสียหายได้

1.1 รีโซแนนซ์ขนาน

ผลของรีโซแนนซ์ขนานคือการเกิดอิมพีแดนซ์ที่มีค่าสูงขึ้นกับแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกที่ความถี่รีโซแนนซ์ โดยส่วนมากแล้วจะพิจารณาแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกเป็นแหล่งจ่ายกระแส ดังนั้นผลของรีโซแนนซ์ขนานคือจะเพิ่มฮาร์มอนิกโวลต์เตจและจะเกิดกระแสไหลในแต่ละสาขาของวงจรรีโซแนนซ์มีค่าสูง ดังในรูปที่ 2.12 แสดงการเกิดรีโซแนนซ์ขึ้นที่จุด PCC (Point of Common Coupling) ซึ่งรีโซแนนซ์เกิดขึ้นได้หลาย แบบคือ

1.1.1 รีโซแนนซ์ขนานระหว่างแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกกับคาปาซิเตอร์ที่บัสบาร์เดียวกัน โดยสมมติให้อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายเป็นอินดักแตนซ์ล้วนๆ จะได้

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

f : ความถี่หลักมูล

f_p : ความถี่รีโซแนนซ์ขนาน

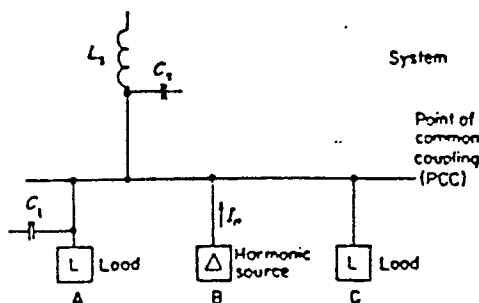
S_s : พิกัดกำลังลัดวงจรของแหล่งจ่าย (Var)

S_c : พิกัดของคาปาซิเตอร์ (Var)

1.1.2 รีโซแนนซ์ขนานระหว่างอินดักแตนซ์ของระบบกับคาปาซิเตอร์ของระบบ

1.1.3 รีโซแนนซ์ขนานระหว่างอินดักแตนซ์ของระบบกับโหลดที่เป็นคาปาซิเตอร์

ในการที่จะตรวจสอบว่าเกิดรีโซแนนซ์ขนานขึ้นหรือไม่ สามารถทำได้โดยการวัดกระแสฮาร์มอนิกในโหลดที่ต่ออยู่ในระบบแต่ละจุด และวัดโวลต์เตจฮาร์มอนิกที่บัสบาร์แล้วทำการวิเคราะห์สภาวะที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.12 รีโซแนนซ์ขนานที่จุด PCC

1.2 รีโซแนนซ์อนุกรม

พิจารณารูปที่ 2.13 เมื่อความถี่มีค่าสูงมากๆ อาจทำให้โหลดถูกตัดออกจากระบบได้เช่นเดียวกับการเกิดรีโซแนนซ์แบบอนุกรม ระหว่างหม้อแปลงกับคาปาซิเตอร์ซึ่งจะเกิดขึ้นที่ความถี่รีโซแนนซ์ หาได้จาก

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

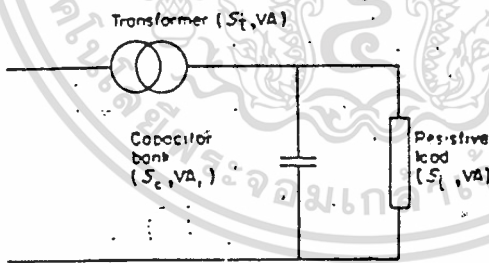
f_s : ความถี่รีโซแนนซ์แบบอนุกรม

S_t : พิกัดหม้อแปลงไฟฟ้า

Z_t : เปอร์ยูนิตอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

S_1 : พิกัดของโหลด (ความต้านทาน)

ผลที่จะเกิดขึ้นจากรีโซแนนซ์อนุกรม คือ กระแสคาปาซิเตอร์จะมีค่าสูง, ฮาร์โมนิกโวลต์เตจจะมีค่าน้อย



รูปที่ 2.13 วงจรรีโซแนนซ์อนุกรม

2) ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อระบบสายส่ง

เมื่อมีกระแสฮาร์โมนิกไหลในระบบสายส่ง ทำให้เกิดผลเสียหลัก 2 ประการ

1. ทำให้กำลังสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้น โดยเป็นผลมาจากค่าอาร์เอ็มเอสของรูปคลื่นกระแส ตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_L = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n \quad \dots 2.16$$

โดยที่

P_L = กำลังสูญเสียในระบบ

I_n = กระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ n (ค่าอาร์เอ็มเอส)

R_n = ความต้านทานระบบที่ความถี่ฮาร์โมนิก

2. ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์วงจร โดยเป็นผลของกระแสฮาร์โมนิกที่ไหลในวงจร กรณีระบบไม่มั่นคง (Weak System) คือ ระบบมีอิมพีแดนซ์สูงและมีระดับฟอลต์ต่ำ (Low Fault Level) ทำให้เกิดแรงดันตกมากเป็นผลให้เกิดการเพี้ยนของแรงดันซึ่งผิดกับระบบมั่นคง (Stiff System) ที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำและมีระดับฟอลต์สูง

แรงดันตกคร่อมนี้มีผลต่อเคเบิลทำให้เกิดความเครียดไดอิเล็กตริก (Dielectric Strees) สูงกว่าปกติ เป็นผลให้อายุการใช้งานของเคเบิลสั้นลงและทำให้เกิดฟอลต์ได้ง่าย

3) ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อหม้อแปลง

ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อหม้อแปลง มี 3 ประการดังนี้

1. กระแสฮาร์โมนิก ทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและกำลังสูญเสียสเตรย์ฟลักซ์ (Stray flux Loss) มีค่าเพิ่มขึ้น
2. แรงดันฮาร์โมนิกทำให้กำลังสูญเสียกระแสวน (Eddy Current Loss) และกำลังสูญเสียฮิสเตอรีซิส (Syteresis Loss) เพิ่มขึ้น โดยถ้าแหล่งจ่าย จ่ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้หม้อแปลง กำลังสูญเสียแกนเหล็กของหม้อแปลงจะเป็นไปตามสมการ

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

โดยที่

P_{CORE} = กำลังสูญเสียแกนเหล็ก

$k_1 f$ = กำลังสูญเสียฮิสเตอรีซิส

$k_2 f^2$ = กำลังสูญเสียกระแสวนในแกนเหล็ก

V = แรงดันรูปคลื่นไซน์ของแหล่งจ่าย

3. ทำให้เกิดรีโซแนนซ์ (ที่ความถี่ฮาร์มอนิก) ระหว่างขอลวดหม้อแปลงกับคาปาซิเตอร์ของสาย (Line Capacitor)

จะเห็นว่าการกำลังสูญเสียในหม้อแปลงเกิดจากกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกซึ่งขึ้นกับความถี่ โดยกำลังสูญเสียจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่ม ดังนั้นที่ฮาร์มอนิกสูงจะทำให้เกิดความร้อนแก่หม้อแปลงมากกว่าฮาร์มอนิกต่ำ ๆ อย่างไรก็ตามผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อหม้อแปลงยังไม่มีมาตรฐานกำหนด

4) ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อเครื่องจักรไฟฟ้า

ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อเครื่องจักรไฟฟ้า ทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและไม่มีโหลดเพื่อขึ้นเป็นผลให้เครื่องจักรร้อนกว่าปกติ นอกจากนี้ฮาร์มอนิกยังมีผลต่อประสิทธิภาพและแรงบิดของเครื่องจักรด้วย

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีแหล่งจ่ายไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ (Nonsinusoidal Supply) จะสร้างคลื่นความหนาแน่นฟลักซ์ (Flux Density Wave) รบกวนอย่างมาก เมื่อเทียบกับกรณีที่มีแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal Supply) ฮาร์มอนิกจะทำให้เกิดฟลักซ์ผลลัพธ์กระจายในช่องอากาศ (Air Gap) และทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า คอกกิง (Cogging) คือการที่ไม่สามารถเดินเครื่องได้ หรือเกิดครอลิง (Crawling) คือการที่ความเร็วมอเตอร์ต่ำกว่าซึ่งโครนัลซึ่งยังไม่มีมาตรฐานกำหนดแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกสำหรับมอเตอร์

5) ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อสวิตช์เกียร์

กระแสฮาร์มอนิกจะเพิ่มความร้อนและกำลังสูญเสียให้แก่สวิตช์เกียร์ ส่วนประกอบฮาร์มอนิกในรูปคลื่นกระแส มีผลกระทบต่อความสามารถในการตัดกระแส (Current Interruption Capability) ของสวิตช์เกียร์ เป็นผลให้การทำการตัด (Making Interruption) ยากมาก เซอร์กิตเบรกเกอร์จะไม่สามารถตัดกระแสเมื่อมีฮาร์มอนิก ทั้งนี้เนื่องจากขดลวดเป่าดับอาร์ก (Blowout Coils) ซึ่งทำหน้าที่ช่วยให้อาร์กเข้าไปในอาร์ชชุต (Arc-Chute) เพื่อทำการตัดทำงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพ เป็นผลให้อาร์กไม่ขาดทำให้เบรกเกอร์ไม่สามารถตัดกระแสได้ ปัญหานี้จะเกิดด้วยอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ตัดกระแส เช่น ไสลดเบรกสวิตช์ ตัวปิด - เปิดวงจร เป็นต้น แต่เบรกเกอร์สูญญากาศ จะมีความไวน้อยต่อกระแสฮาร์มอนิก

ปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานทางอุตสาหกรรมในการกำหนดระดับของฮาร์มอนิกที่สวิตช์เกียร์สามารถตัดได้ เนื่องจากการทดสอบตัดวงจรจะทำให้ความถี่พิกัดของแหล่งจ่ายไฟ

6) ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อแบงก์คาปาซิเตอร์

ผลกระทบของฮาร์มอนิก ทำให้เกิดความร้อน และ ความเครียดไดอิเล็กตริก (Dielectric Stress) กับคาปาซิเตอร์อย่างมาก การเพี้ยนของแรงดันทำให้เกิดกำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์เป็นไปตามสมการ

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

โดยที่

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

มากกว่านั้นในกำลังงานรีแอคทีฟ (Reactive power) ก็ยังมีฮาร์มอนิกรวมอยู่ด้วย ดังเช่น

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \quad \dots\dots 2.19$$

ผลของรีโซแนนซ์ฮาร์มอนิกและขนาดที่ตัวเก็บประจุ เป็นสาเหตุ ของคักคาและกระแสที่มากเกินไป ช่วยให้มีควมสูญเสียและความร้อนสูงขึ้น ทำให้เกิดความเสียหายแก่ตัวเก็บประจุได้

7) ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบป้องกันของระบบไฟฟ้ากำลัง

ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อรีเลย์สามารถสรุปได้ดังนี้

- ฮาร์มอนิกทำให้รีเลย์มีแนวโน้มที่จะทำงานช้าลง หรือทำงานด้วยค่าเริ่ม (Pickup values) ที่สูงขึ้นแทนที่จะทำงานอย่างรวดเร็วหรือทำงานด้วยค่าเริ่มต่ำๆ
- ฮาร์มอนิกทำให้รีเลย์สถิติแบบความถี่ต่ำ (Static under frequency relay) มีความไวกว่าปกติทำให้การทริป ผิดพลาด
- ฮาร์มอนิกทำให้รีเลย์กระแสและแรงดันเกิน (Overcurrent and overvoltage relay) เปลี่ยนลักษณะการทำงาน (Operating characteristics)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฮาร์มอนิกทำให้แรงบิดทำงาน (Operating torque) ของรีเลย์กลับทิศทาง
- ฮาร์มอนิกทำให้อิมพีแดนซ์รีเลย์ชนิดคานสมดุล (Balanced beam impedance relay) วัดระยะที่เกิดฟอลต์ผิดพลาดมากเกินไป (Over reach) หรือน้อยเกินไป (Under reach)
- ฮาร์มอนิกทำให้ความเร็วในการทำงานของรีเลย์ชนิดผลต่างข้าง (Differential relay)

โดยทั่วไประดับฮาร์มอนิกที่ทำให้รีเลย์ทำงานผิดพลาดจะสูงกว่าอุปกรณ์อื่นๆ ชีตจำกัดของ ฮาร์มอนิก ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ จึงจะเกิดปัญหากับรีเลย์

8) ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อมิเตอร์วัดไฟฟ้า

มิเตอร์และเครื่องวัดต่างๆ ก่อนการใช้ต้องทำการปรับแต่ง (Calibration) ที่กระแสไฟลัปรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่หลักมูล ดังนั้นถ้านำมิเตอร์มาใช้กับระบบที่มีฮาร์มอนิกค่าที่วัดได้จะผิดพลาด หรือกรณีเกิดรีโซแนนซ์ในระบบ มีผลทำให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกค่าสูงในวงจร ทำให้มิเตอร์ประเภทจานเหนี่ยวนำ (Induction Disk) เช่น มิเตอร์ วัดต-ชั่วโมง (Watthour Meter) ทำงานผิดพลาดเนื่องจากการเพี้ยนของฮาร์มอนิกโดยทั่วไปการเพี้ยนของฮาร์มอนิกมากกว่า 20% จะมีผลต่อมิเตอร์

9) ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่ออุปกรณ์ผู้ใช้ไฟฟ้า

- เครื่องรับโทรทัศน์ ฮาร์มอนิกจะมีผลต่อแรงดันยอด (Peak Voltage) ทำให้ขนาดและความสว่างของภาพเปลี่ยนไป
- หลอดฟลูออเรสเซนต์และหลอดเมอคิวรีอาร์ก การทำงานของหลอดชนิดนี้ต้องมีบัลลาสต์ บางครั้งมีคาปาซิเตอร์ด้วย จึงอาจเกิดรีโซแนนซ์กับอินดักแตนซ์ของบัลลา สต์และวงจร ทำให้หลอดเกิดความร้อนสูงจนเกิดความเสียหาย
- คอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์จะไวต่อความเพี้ยนของฮาร์มอนิกอย่างมาก ทุกบริษัทมีขีดจำกัดฮาร์มอนิกค่าหนึ่งที่เครื่องสามารถทนได้ ซึ่งขึ้นกับการออกแบบของแต่ละบริษัท ถ้าระบบไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกมากกว่าขีดจำกัดนี้ จะทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์เสียหายได้

10) ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบสื่อสาร

ฮาร์มอนิกจะก่อให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) ในระบบสื่อสาร ทำให้คุณภาพของการส่งสัญญาณลดลง สัญญาณรบกวนระดับต่ำ (Low Level Noise) เช่น ในระบบโทรศัพท์อาจก่อให้เกิดความรำคาญ ฮาร์มอนิกจะเหนี่ยวนำให้เกิดสัญญาณรบกวนทำให้ได้ยินเสียงเบากว่าปกติหรือมีเสียงรบกวน แต่ที่ระดับสูง (High Level) ฮาร์มอนิกทำให้คุณภาพการส่งลดลงและอาจเกิดการสูญเสียของข่าวสาร หรือ ระบบสื่อสารถึงกับใช้การไม่ได้

2.3 หลักการการกำจัดและการลดปริมาณ ฮาร์มอนิก

จุดประสงค์ เพื่อลดขนาดของโวลต์เตจหรือขนาดของกระแสที่ความถี่หนึ่ง หรือที่หลาย ๆ ความถี่ที่เราไม่ต้องการ

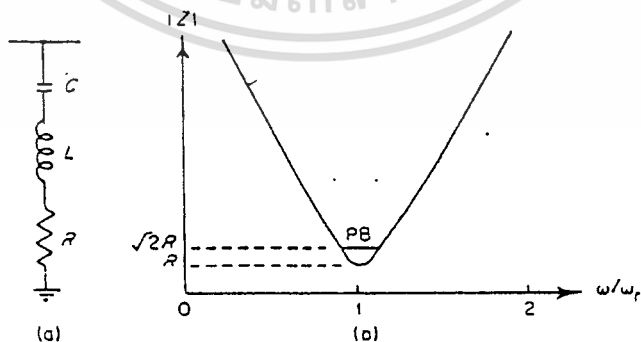
2.3.1 คำจำกัดเบื้องต้นความของวงจรกรอง (Filter)

ฟิลเตอร์เป็นวงจรกรองที่ทำงานโดยที่อาศัยการปรับความถี่เพื่อให้ค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุ

คุณภาพของตัวกรอง (Q) เป็นตัวที่ใช้บอกค่าความคม ความเที่ยงตรง ในการปรับตัวกรอง โดยที่เราจะสามารถอาศัยคุณภาพของตัวกรองเป็นแบ่งชนิดของตัวกรองได้ เป็น 2 แบบดังนี้

1) ชนิดที่มีค่าคุณภาพของตัวกรอง (Q) สูง

โดยปกติจะมีค่าคุณภาพอยู่ในช่วง 30 - 60 และใช้ในกรณีที่ปรับเพื่อกำจัดฮาร์มอนิกที่ความถี่หนึ่งซึ่งมีความถี่ต่ำ วงจรกรองผ่านแถบความถี่ (Band Pass Filter)



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

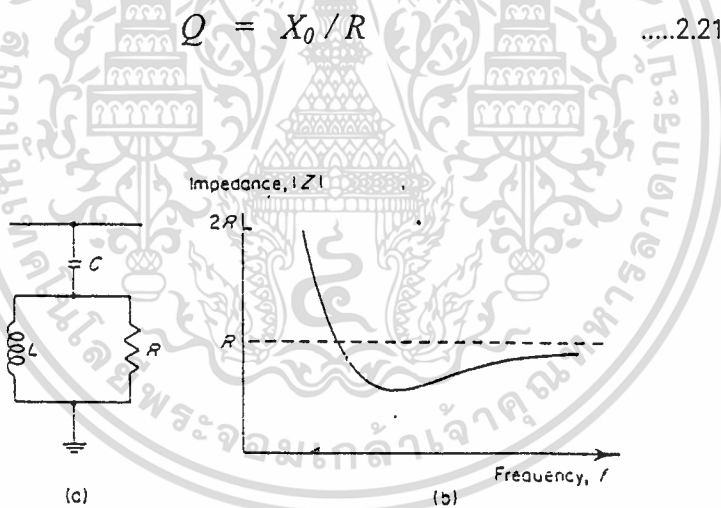
$$Q = X_0 / R = \omega_n / PB \quad \dots\dots 2.20$$

โดยที่ X_0 เป็นค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำหรือค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุ
 R แทนค่ารีซิสแตนซ์
 ω_n แทนค่าความถี่ที่เราปรับในหน่วยเรเดียนต่อวินาที

2) ชนิดที่มีค่าคุณภาพของตัวกรอง (Q) ต่ำ

โดยปกติจะมีค่าคุณภาพอยู่ในช่วง 0.5 - 5.0 และใช้ในกรณีที่กำจัดฮาร์มอนิกที่ความถี่สูง ๆ เช่น ฮาร์มอนิกที่ 17 ขึ้นไป

วงจรกรองผ่านความถี่สูง (High Pass Filter)



รูปที่ 2.15 (a) รูปวงจรผ่านความถี่สูง (b) กราฟระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่

2.3.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบในการปรับตัวกรอง

- 1) การเปลี่ยนแปลงของความถี่หลักมูล
- 2) การเปลี่ยนแปลงค่าการเก็บประจุและ ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรกรองตาม

อายุการใช้งานและอุณหภูมิ

- 3) ความคลาดเคลื่อนจากการผลิตและขนาดที่จำกัดของลำดับชั้นการจูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่การจูนของดีจูน แสดงตามสมการ

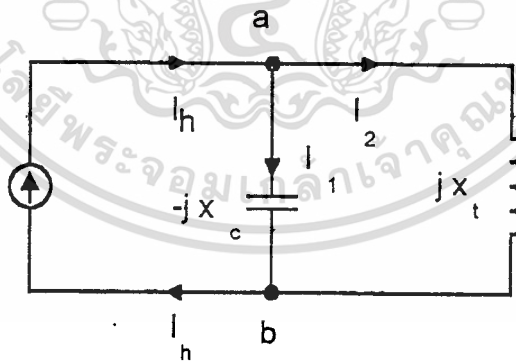
$$\delta = (\omega - \omega_n) / \omega_n \quad \text{.....2.22}$$

นอกจากนี้การเปลี่ยนของ L และ C ไป 2% เหมือนการเปลี่ยนความถี่ของระบบไป 1% แสดงตามสมการเป็น

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

2.3.3 การเกิดรีโซแนนซ์ขนานระหว่างคาปาซิเตอร์กับหม้อแปลง

ในทุกะบบไฟฟ้าจะต้องมีฮาร์มอนิกอยู่ด้วยเสมอ เพียงแต่ระบบส่วนใหญ่ จะมีขนาดเล็กมากจนถือได้ว่าในระบบนั้นไม่มีฮาร์มอนิก และถึงแม้ในบางระบบจะพบว่าจะมีฮาร์มอนิกค่อนข้างใหญ่อยู่ก็ตาม ฮาร์มอนิกที่พบมักจะมีขนาดใหญ่ไม่พอที่จะส่งผลกระทบไปยังอุปกรณ์ไฟฟ้า ที่มีใช้อยู่ในระบบนั้นๆ หากแต่ว่าผลกระทบของฮาร์มอนิกมีโอกาสเพิ่มขึ้นได้ ภายหลังจากที่มีการติดตั้งคาปาซิเตอร์เข้าไป และเกิดรีโซแนนซ์ขนานขึ้นระหว่างคาปาซิเตอร์ กับหม้อแปลงซึ่งนับว่าเป็นโหนดชนิดของลวดขนาดใหญ่ที่สุดที่มีอยู่ในแต่ละระบบ



รูปที่ 2.16 วงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน

ในการพิจารณาปัญหาฮาร์มอนิก จะถือว่าจะถือว่าอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวมาแล้วเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่ผลิตกระแสฮาร์มอนิกค่า I_h ออกมาเมื่อนำคาปาซิเตอร์ที่มี ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ $-jX_c$ และหม้อแปลงที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ jX_t มาต่อขนานเข้ากับแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกดังกล่าว จะเกิดกระแสฮาร์มอนิก I_1 และ I_2 แยกไหลโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_1 = \frac{jX_c}{jX_c - jX_c} * I_h$$

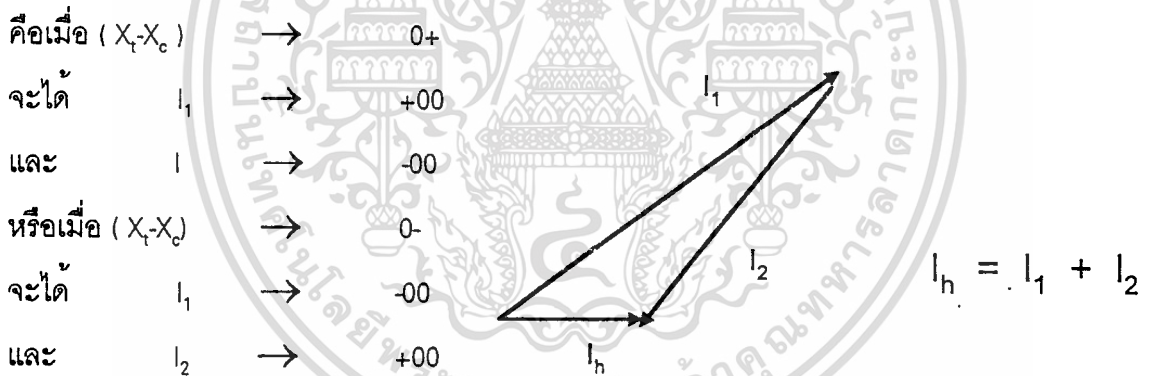
$$= \frac{X_c}{X_c - X_c} * I_h$$

$$I_2 = \frac{-jX_c}{jX_c - jX_c} * I_h$$

$$= -\frac{X_c}{X_c - X_c} * I_h$$

$$V_{ab} = I_1 X_c = I_2 X_c$$

ในกรณีที่เกิตรีโซแนนซ์ขนานระหว่างคาปาซิเตอร์กับหม้อแปลง คือ $X_c = X_l$ จะพบว่า I_1 และ I_2 มีขนาดใหญ่กว่ามาก (เมื่อเทียบกับขนาดของ I_h) ทั้งๆที่ I_h มีขนาดไม่ใหญ่นัก และแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกคร่อมคาปาซิเตอร์ ($X_c - X_l$) และหม้อแปลงก็จะมีขนาดใหญ่มาด้วย

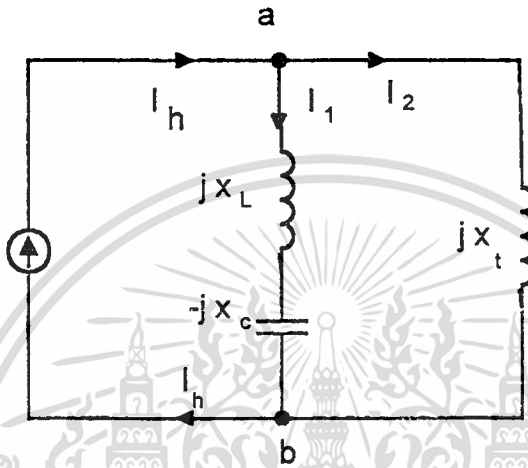


ขนาดที่ใหญ่มาของกระแสฮาร์มอนิก และแรงดันฮาร์มอนิกในวงจรไฟฟ้าที่เกิตรีโซแนนซ์ขนานเช่นนี้ จะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่มีใช้งานอยู่ในระบบทำให้เกิดการทำงานผิดปกติ หรือเกิดการเสียหายอย่างรุนแรง หรือมีอายุการใช้งานสั้นลงดังนั้นจึงต้องระวังมิให้เกิดรีโซแนนซ์ขนานขึ้นที่ฮาร์มอนิกที่ตรงพอดีหรือใกล้เคียงอย่างมากกับฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้านั้น เนื่องจาก X_c มีขนาดเกือบคงที่ (สาเหตุที่ไม่คงที่ ก็เพราะมีค่าอิมพีแดนซ์ของขั้วไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย) ดังนั้นจึงมีหนทางที่จะเลี่ยงมิให้เกิดรีโซแนนซ์ขึ้นที่ฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบได้โดยเลือกใช้ค่าคาปาซิเตอร์ที่มีขนาด X_c ไม่เท่าและไม่ใกล้เคียงกับ X_l ที่ความถี่ของฮาร์มอนิกนั้น แต่ในทางปฏิบัติแล้ววิธีการนี้ใช้ไม่ได้ค่อยได้ผล เพราะฮาร์มอนิกมิได้มีอยู่เพียงตัวเดียวทั้งค่าของ X_c ก็ไม่คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 ชนิดของฟิลเตอร์ที่ใช้โครงงาน

วงจรกรองฮาร์มอนิกแบบป้องกันระบบหรือจูนฟิลเตอร์ (Tune Filter) และวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบป้องกันคาปาซิเตอร์หรือดีจูนฟิลเตอร์ (Detune Filter) ทั้งวงจรของแบบจูนและดีจูนจะเป็นวงจรเดียวกัน แต่อาศัยหลักการในการปรับค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและของตัวเก็บประจุที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 วงจรกรองฮาร์มอนิก

จากวงจรจะได้ว่า

$$I_1 = \frac{jX_T}{jX_T + jX_L - jX_C} * I_h$$

$$= \frac{X_T}{X_T + (X_L - X_C)} * I_h$$

$$I_2 = \frac{jX_L - jX_C}{jX_T + jX_L - jX_C} * I_h$$

$$= \frac{X_L - X_C}{X_T + (X_L - X_C)} * I_h$$

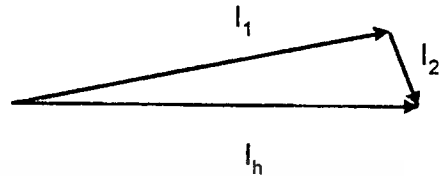
วงจรจูน ประกอบด้วยรีแอคเตอร์ต่ออนุกรมเข้ากับคาปาซิเตอร์ เช่นเดียวกับวงจรดีจูน แต่การเลือกขนาดรีแอคเตอร์มีหลักการต่างกันคือในวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิก จะเลือกใช้รีแอคเตอร์ขนาดที่ทำให้เกิดรีโซแนนซ์อนุกรมกับคาปาซิเตอร์ที่ฮาร์มอนิกอันดับต่ำกว่าฮาร์มอนิกที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการกำจัดเล็กน้อย จะพบว่ากระแสฮาร์โมนิกเกือบทั้งหมดจะไหลผ่านชุดรีแอคเตอร์ คาปาซิเตอร์และจะมีเพียงส่วนน้อยที่ไหลเข้าสู่หม้อแปลง กระแสฮาร์โมนิกจำนวนน้อยนี้จะเป็นตัวจำกัดผลกระทบต่อการอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างให้อยู่ในขอบเขตที่ไม่ให้เกิดปัญหา

เมื่อ $(X_L - X_C) \implies 0_+$

จะได้ $I_1 \implies I_h$

และ $I_2 \implies 0_+$



$$I_h = I_1 + I_2$$

หลักเกณฑ์การออกแบบ

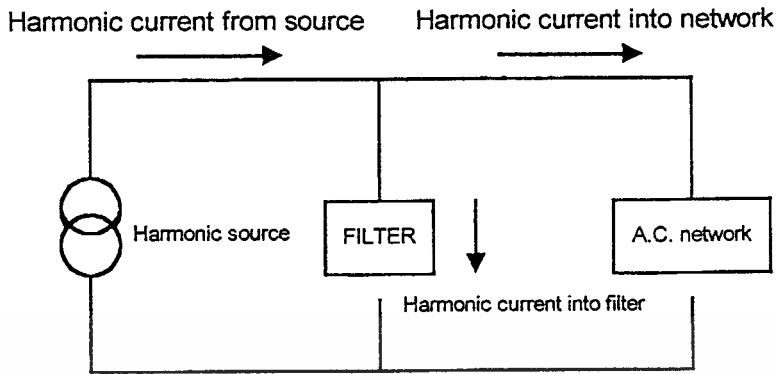
ถ้าต้องการกำจัดฮาร์โมนิกโดยการออกแบบฟิลเตอร์ (filter) ต้องทำตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. สเปกตรัมกระแสฮาร์โมนิกที่ถูกสร้างโดยโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่ถูกจ่ายเข้าไปในวงจรขนานของฟิลเตอร์ของระบบไฟ เอชอี ดังรูปที่ 2.18 โดยสัมพันธ์กับความถี่และแรงดันฮาร์โมนิกที่ได้จากการคำนวณ

2. ผลของจากข้อ 1. จะถูกใช้หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความผิดเพี้ยนแรงดัน (voltage distortion) D, TIF และ IT factors

3. หาส่วนประกอบหลักๆ ในฟิลเตอร์ เช่น คาปาซิเตอร์ ตัวเหนี่ยวนำ และตัวต้านทานจากการคำนวณ และพิกัดรวมถึงค่าการสูญเสีย (losses)

จากที่กล่าวมาทั้งหมดซึ่งจะต้องมีข้อมูลในการพิจารณาเพื่อการออกแบบฟิลเตอร์เช่น แหล่งจ่ายกระแส ความนำเชิงซ้อนของฟิลเตอร์ (admittance filter) และความนำเชิงซ้อนของระบบ (admittance system)

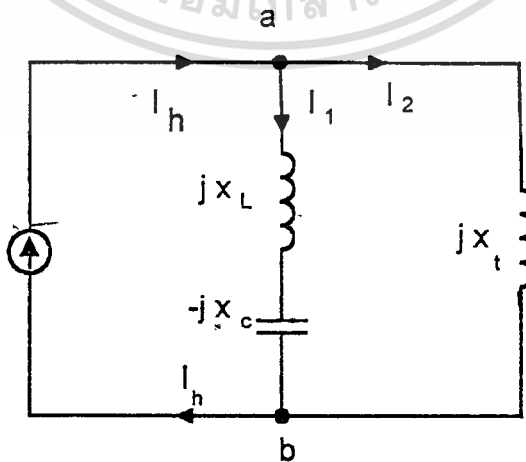


รูปที่ 2.18 วงจรสำหรับการคำนวณค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก

1) วงจรกรองฮาร์มอนิกแบบป้องกันระบบ

ส่วนประกอบของวงจร ดังแสดงในรูปที่ 2.19 สามารถปรับความถี่ถึง ความถี่ของฮาร์มอนิกที่ 1 ได้ (ต่ำกว่าฮาร์มอนิกลักษณะเฉพาะ characteristic harmonic) เพื่อ ต้องการให้กระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าฟิลเตอร์ทั้งหมดโดยปรับค่าตัวเหนี่ยวนำให้เกิดรีโซแนนซ์ ขนานกับคาปาซิเตอร์ที่ตรงกับระดับฮาร์มอนิกที่มีในระบบไฟฟ้า ค่าอิมพีแดนซ์ของฟิลเตอร์หาได้ จากสมการ

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



รูปที่ 2.19 วงจรกรองฮาร์มอนิกแบบป้องกันระบบ

ให้ f_n เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ ในการเลือกใช้ R, L, C สำหรับการออกแบบต้องคำนึงถึงข้อหลักๆ คือ ตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor) Q และความเบี่ยงเบนความถี่สัมพัทธ์ δ โดยจะต้องแสดงค่าอิมพีแดนซ์ในเทอมของ Q และ δ ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\omega = \omega_n(1+\delta) \quad \text{.....2.25}$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{.....2.26}$$

(ω_n คือความถี่เชิงมุมในการปรับ เรเดียนต่อนาที)

$$X_0 = \omega_n L = \frac{1}{\omega_n C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{.....2.27}$$

(ความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำหรือตัวเก็บประจุ (โอห์ม) ที่ความถี่ในการปรับค่า)

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

$$C = \frac{1}{\omega_n X_0} = \frac{1}{\omega_n R Q}$$

$$L = \frac{X_0}{\omega_n} = \frac{R Q}{\omega_n}$$

จากสมการบนจะได้ว่า

$$Z_f = R(1 + jQ\delta(\frac{2+\delta}{1+\delta})) \quad \text{.....2.28}$$

พิจารณาค่า δ มีค่าน้อยมากๆ เมื่อเปรียบเทียบกับทั้งหมด

$$Z_f \cong R(1 + j2Q\delta) = X_0(Q^{-1} + j2\delta)$$

$$|Z_f| \cong R(1 + 4\delta^2 Q^2)^{\frac{1}{2}}$$

ดังนั้นค่าความนำเชิงซ้อนในการออกแบบฟิลเตอร์คือ

$$Y_f \cong \frac{1}{R(1+j2\delta Q)} = G_f + jB_f \quad \dots 2.29$$

เมื่อ

$$G_f = \frac{Q}{X_0(1+4\delta^2 Q^2)}$$

$$B_f = \frac{2\delta Q^2}{X_0(1+4\delta^2 Q^2)}$$

แรงดันฮาร์โมนิกที่สะพานจ่ายไฟฟิลเตอร์จะได้ว่า

$$V_n = \frac{I_n}{Y_{nf} + Y_{sn}} = \frac{I_n}{Y_n} \quad \dots 2.30$$

เมื่อ I_n คือ กระแสฮาร์โมนิก

Y_{nf} คือ ความนำเชิงซ้อนของฟิลเตอร์

Y_{sn} คือ ความนำเชิงซ้อนของโครงข่ายไฟฟ้า (Network admittance)

ดังนั้นถ้าต้องการให้ความผิดเพี้ยนของแรงดันมีค่าน้อยจำเป็นต้องเพิ่มค่าความนำเชิงซ้อนในวงจรขนานของฟิลเตอร์ในระบบไฟกระแสสลับ ถ้าในการทำนายให้ค่า V_n มีค่ามากที่สุดซึ่งค่านี้เป็นค่าที่ไม่ถูกต้องแน่นอนนักเป็นการเลือกใช้ค่าที่แย่ที่สุด ซึ่งทั้งหมดนี้เกี่ยวข้องกับ ค่าความเบี่ยงเบนความถี่ δ และความนำเชิงซ้อนของโครงข่าย Y_{sn} แรงดันฮาร์โมนิกที่เพิ่มขึ้นเกิดขึ้นเนื่องจากการเบี่ยงเบนความถี่มาก δ_m ซึ่งในระบบที่มีค่าความนำเชิงซ้อนต่ำสุดระบบนั้นถือว่าเป็นระบบที่แย่มาก ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถตัดสินใจหาค่าของ Q และขนาดฟิลเตอร์ (VA ที่พิกัดความถี่หลักมูล) ในเทอมของ δ ซึ่งหาได้จากสมการคือ Q และ

$$|V_n| = I_n \left\{ \left[G_{sn} + \frac{1}{R(1+4Q^2\delta^2)} \right]^2 + \left[B_{sn} - \frac{2\delta Q}{R(1+4Q^2\delta^2)} \right]^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad \dots 2.31$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความนำเชิงซ้อนวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นส่วนของการเหนี่ยวนำจริงซึ่งใช้ในการออกแบบจริงและเป็นค่าที่แน่นอนแล้ว ค่าอิมพีแดนซ์โดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็นส่วนของ R กับ jX หาได้จากเส้นตรง 2 เส้นและวงกลมลากผ่านจุดกำเนิด ค่ามุมเฟสสูงสุดของอิมพีแดนซ์โครงข่าย (Network Impedance) สามารถกำหนดให้ต่ำกว่า 90 องศา และกำหนดให้ ϕ_{sn} มีค่าตรงข้ามกับ δ ค่าแรงดันฮาร์มอนิกสูงสุดหาได้จาก

$$|V_n| = I_n \left\{ \left(|Y_{sn}| \cos \phi_{sn} + G_f \right)^2 + \left(-|Y_{sn}| \sin \phi_{sn} + B_f \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad \dots 2.32$$

ให้ ϕ_{sn} เป็นบวก (positive) , δ เป็นลบ (negative)

$|Y_{sn}|$ เป็นค่าไม่จำกัดเพราะฉะนั้นค่าความนำเชิงซ้อนที่ทำให้ค่า $|V_n|$ สูงสุดคือ

$$|Y_{sn}| = \frac{\cos \phi_{sn} (2Q\delta \tan \phi_{sn} - 1)}{R(1 + 4Q^2\delta^2)} \quad \dots 2.33$$

และให้

$$|V_n| = I_n \omega_n L \left[\frac{(1 + 4Q^2\delta^2)}{Q(\sin \phi_{sn} + 2Q\delta \cos \phi_{sn})} \right] \quad \dots 2.34$$

Q ที่เหมาะสมที่ทำให้แรงดันฮาร์มอนิกต่ำสุดคือ

$$Q = \frac{1 + \cos \phi_{sn}}{2\delta \sin \phi_{sn}}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} |V_n| &= I_n \delta \omega_n L \left[\frac{4}{1 + \cos \phi_{sn}} \right] \\ &= \frac{2I_n R}{\sin \phi_{sn}} \end{aligned}$$

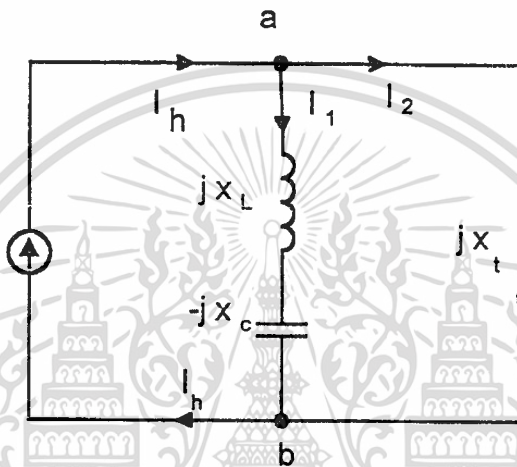
เงื่อนไขนี้สามารถนำมาพิจารณาในการออกแบบฟิลเตอร์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) วงจรกรองฮาร์มอนิกแบบป้องกันคาปาซิเตอร์

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

วิธีหนึ่งที่ใช้ได้ผลแน่นอนในการป้องกันมิให้เกิดรีโซแนนซ์ขนานระหว่าง X_C ของคาปาซิเตอร์และ X_T ของหม้อแปลงขึ้นที่ฮาร์มอนิก $n_a, n_b, n_c, \dots$ ก็คือการใช้รีแอคเตอร์ขนาดที่เหมาะสมต่ออนุกรมเข้ากับคาปาซิเตอร์แต่ละตัว



รูปที่ 2.20 วงจรกรองฮาร์มอนิกแบบป้องกันคาปาซิเตอร์

จากสูตร

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

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

และจากสูตร

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

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

เมื่อพิจารณาการเกิดรีโซแนนซ์อนุกรมระหว่างรีแอคเตอร์กับคาปาซิเตอร์

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

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

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

พิจารณาเมื่อเกิดรีโซแนนซ์ขนานระหว่างหม้อแปลงกับคาปาซิเตอร์ - รีแอคเตอร์

$$X_{T-h_p} = X_{C-h_p} - X_{R-h_p}$$

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

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

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

จะเห็นได้ว่าฮาร์มอนิกที่เกิดรีโซแนนซ์ขนานจะมีขนาดต่ำกว่าฮาร์มอนิกที่เกิดรีโซแนนซ์อนุกรม คือ $h_p < h_s$ ทุกค่าของ X_T, X_C, X_R

เนื่องจากมี X_R บางค่าที่จะทำให้ $\sqrt{\frac{X_C}{X_R}} < h_s$ หรืออีกนัยหนึ่งคือ ทำให้ $h_p < h_s < h_a < h_b < h_c \dots$

ดังนั้นจะสามารถเลือกขนาดของรีแอคเตอร์ที่เหมาะสม เพื่อนำมาประกอบเป็นวงจรป้องกันเกิดการเกิดรีโซแนนซ์ได้ ซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้รีแอคเตอร์ขนาด 6 เปอร์เซ็นต์ แต่ในบางกรณีจำเป็นต้องใช้ค่าอื่นโดยจะคำนวณได้เมื่อทราบรายละเอียดของระบบไฟฟ้านั้น ๆ

ฟิลเตอร์ที่ติดตั้งกันส่วนใหญ่จะเป็นแบบดีจูนฟิลเตอร์ เพราะออกแบบง่ายและใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าแบบจูนฟิลเตอร์ แต่ตัวดีจูนฟิลเตอร์เองก็มีข้อเสียที่สำคัญมาก คือ ไม่ช่วยกำจัดฮาร์มอนิกออกจากระบบ

สำหรับการออกแบบฟิลเตอร์แบบจูนฟิลเตอร์นั้นมีรายละเอียดที่สลับซับซ้อนมากเช่น

- 1) ขนาดของฟิลเตอร์
- 2) ค่าความคลาดเคลื่อนในการกำหนดขนาดของฟักัดคาปาซิเตอร์
- 3) ค่าความคลาดเคลื่อนในการกำหนดขนาดฟักัดรีแอคเตอร์
- 4) อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อขนาดฟักัดของคาปาซิเตอร์
- 5) ความเบี่ยงเบนจากความถี่ระบุของสายไฟฟ้า
- 6) ค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าซึ่งเป็นองค์ประกอบที่หาค่าที่ถูกต้องได้ยากที่สุด

รีแอคเตอร์ที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- 1) ไม่อึดตัวในช่วงเวลาที่เริ่มใช้งานแต่ละครั้ง
- 2) มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อย
- 3) มีค่าการสูญเสียต่ำ
- 4) ไม่มีการซ่อมบำรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอธิบายเท่าที่ผ่านมาทั้งหมดนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะให้ทราบแนวทางเกี่ยวกับการทำงานของฟิลเตอร์มีฟิลเตอร์อีกหลายแบบที่ไม่ได้พูดถึงโดยพยายามหลีกเลี่ยงการยกตัวอย่างที่เป็นกรณีเฉพาะซึ่งมีรายละเอียดมาก และต้องอาศัยการคำนวณที่ค่อนข้างยุ่งยาก ถ้าสนใจจะศึกษารายละเอียดเพิ่มเติม อาจค้นคว้าจากบทความหรือตำราเรื่องเกี่ยวกับฮาร์มอนิกที่พิมพ์ออกเผยแพร่ ดังแสดงในเอกสารอ้างอิง



บทที่ 3

การคำนวณและการออกแบบ

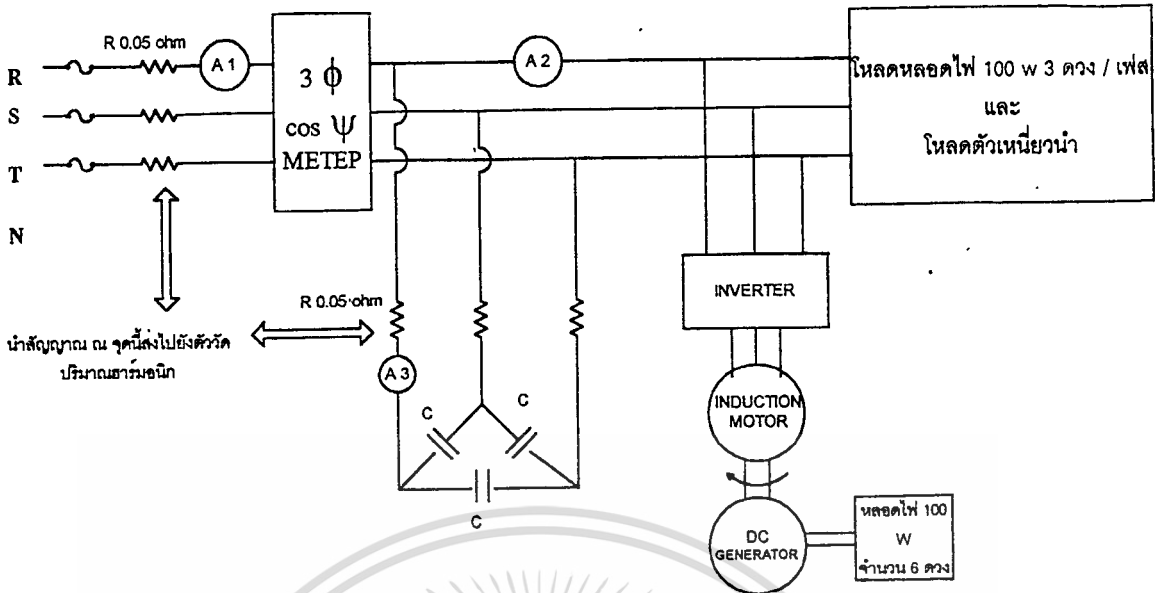
การป้องกันฮาร์มอนิกมีด้วยกัน 2 แบบคือ

1. ป้องกันฮาร์มอนิกที่มีผลต่อคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในการแก้ เพาเวอร์แฟกเตอร์ (Power Factor P.F.) ซึ่งทำให้คาปาซิเตอร์ระเบิดได้
2. ป้องกันระบบไฟฟ้าไม่ให้ฮาร์มอนิกไหลเข้าระบบ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สายไฟมีพื้นที่การใช้งานน้อยลง เนื่องจากมีฮาร์มอนิกขี้อยู่ กระแสเต็มไทำให้สายไฟและหม้อแปลงไหม้ได้ ทั้งๆ ที่กระแสไม่มากนัก

การหลีกเลี่ยงและการป้องกันผลเสียหายเนื่องจากฮาร์มอนิกรีโซแนนซ์

ฮาร์มอนิกรีโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นและทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบหรืออุปกรณ์ในระบบ เกิดเนื่องจากในระบบมีตัวกำเนิดฮาร์มอนิกที่ความถี่ต่างๆ การทำงานปกติของเรกติไฟเออร์โดยทั่วไปนั้น พารามิเตอร์จำพวกความต้านทาน ความจุไฟฟ้า ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า ไม่สามารถทำให้เกิดรีโซแนนซ์ที่ความถี่ใดๆได้ ความจุไฟฟ้าของหม้อแปลง เคเบิล และสายมีขนาดต่ำมาก ถ้าหากจะเกิดรีโซแนนซ์ขึ้นในระบบก็เป็นที่ความถี่สูงมากในย่าน กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) ซึ่งความถี่ในย่านนี้ขนาดของกระแสหรือศักดาไฟฟ้าฮาร์มอนิก มีขนาดต่ำจนไม่เป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ ปัญหาของฮาร์มอนิกรีโซแนนซ์ที่มีผลต่อระบบไฟฟ้าจริงจังก็คือ ที่ความถี่รีโซแนนซ์ต่ำใกล้กับความถี่ทำงาน (50-60 Hz) คืออยู่ในช่วงเป็นสิบหรือเป็นร้อยเฮิร์ตซ์ ซึ่งเกิดขึ้นได้เมื่อนำคาปาซิเตอร์มาต่อในระบบที่มีการใช้อุปกรณ์ประเภทที่กำเนิดฮาร์มอนิกดังกล่าวข้างต้นเพื่อแก้เพาเวอร์แฟกเตอร์ เมื่อเกิดฮาร์มอนิกรีโซแนนซ์ขึ้นในกรณีนี้ ทำให้พิลส์ของคาปาซิเตอร์ทำงานบ่อย หรือคาปาซิเตอร์เอง อาจเสียหายและใช้งานไม่ได้อีก เนื่องจากจะมีกระแสฮาร์มอนิกสูงมากที่ความถี่รีโซแนนซ์ไหลผ่าน ระบบมีการแกว่ง (oscillate) ของศักดาไฟฟ้า

วิธีการที่ไม่ให้เกิดความเสียหายเนื่องจากฮาร์มอนิกรีโซแนนซ์อาจทำได้โดยการหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดรีโซแนนซ์ที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิกที่ถูกกำเนิดขึ้นมา ซึ่งการป้องกันมีหลายแบบ แต่ในที่นี้จะกล่าวที่จะทำนั้น



รูปที่ 3.1 แสดงการจำลองระบบไฟฟ้า สามเฟส ที่ใช้คาปาซิเตอร์แก้ตัวประกอบกำลัง และมีแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิก

ในกรณีที่ไม่สามารถเปลี่ยนที่ตั้งหรือขนาดของคาปาซิเตอร์ เนื่องจากการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ไม่ดีเท่าที่ควร ก็ต้องหาหนทางป้องกันโดยหาทางเดินของวงจรที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้เป็นทางไหลของกระแสฮาร์โมนิกแทนที่จะให้ไหลเข้าไปในระบบ วงจรทางเดินของกระแสฮาร์โมนิกก็ประกอบด้วยคาปาซิเตอร์และรีแอคเตอร์จูนที่ความถี่ฮาร์โมนิกนั้นๆ คือทำหน้าที่เป็น ฟิลเตอร์ (filter) ติดตั้งไว้ใกล้กับแหล่งกำเนิดความถี่ฮาร์โมนิก

คาปาซิเตอร์ที่มีไว้ปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ ก็สามารถใช้เป็นส่วนหนึ่งของฟิลเตอร์ได้โดย ใส่รีแอคเตอร์อนุกรมกับคาปาซิเตอร์ แต่ขนาดคาปาซิเตอร์นี้ต้องใหญ่พอสามารถทนกระแสและ คัดคาฮาร์โมนิกสูงสุดที่อาจเกิดขึ้นได้ และในกรณีที่ระบบมีคาปาซิเตอร์แบบอัตโนมัติที่เปลี่ยน ค่าคาปาซิเตอร์ต่อเข้าไปในระบบเพื่อปรับปรุงเพาเวอร์แฟคเตอร์ที่โหลดขนาดต่างๆ กันอาจมี ฮาร์โมนิกรีโซแนนซ์เกิดขึ้นที่หลายความถี่ ก็ต้องใช้ฟิลเตอร์หลายความถี่เข้าไปป้องกัน

การป้องกันคาปาซิเตอร์เสียหายเนื่องจากฮาร์มอนิก นั้นเราต้องป้องกันการเกิดรีโซแนนซ์ระหว่างคาปาซิเตอร์กับระบบโดยใส่รีแอคเตอร์เข้าไปโดยดูไปที่ความถี่อื่นที่ไม่ใช่ความถี่ฮาร์มอนิกที่เกิดปัญหา การพิจารณาว่าเมื่อเกิดฮาร์มอนิกรีโซแนนซ์แล้ว จะมีผลเสียต่อคาปาซิเตอร์หรือไม่ อาจทำได้โดยพิจารณาว่าคักดาไฟฟ้า กระแส และ เคว้เอ รวมทั้งขึ้นที่คาปาซิเตอร์เนื่องจากความถี่ทำงาน และความถี่ฮาร์มอนิกนั้นมีค่าสูงเกินกว่าคาปาซิเตอร์สามารถรับได้หรือไม่

เมื่อพิจารณาขนาด เควีเอ รวมอันเนื่องจากศักดาไฟฟ้าและกระแสทั้งความถี่ทำงานและความถี่ฮาร์มอนิก สามารถได้จากสมการ

$$KVA_c = \sum V_h I_h = \sum \left(\frac{V_h^2}{X_h} \right)$$

h = อันดับฮาร์มอนิก

V_h = ศักดาไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่ h

I_h = กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่ h

X_h = รีแอคแตนซ์ ฮาร์มอนิกที่ h

ศักดาไฟฟ้าสูงสุด (peak) รวมที่เกิดขึ้นที่คาปาซิเตอร์อันเนื่องมาจากศักดาไฟฟ้าสูงสุดที่ความถี่ทำงาน และความถี่ฮาร์มอนิกสามารถหาได้ เพื่อพิจารณาความทนได้ของฉนวนคาปาซิเตอร์ตามสมการ (ศักดาไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ อินเฟสกัน)

$$V_p = \sum_h V_h$$

กระแส อาร์เอ็มเอส รวมทั้งหมดอันเนื่องมาจากกระแสที่ความถี่ทำงานและฮาร์มอนิกที่ไหลในคาปาซิเตอร์เขียนได้ดังสมการ

$$I_{rms} = \left(\sum_h I_h^2 \right)^{1/2}$$

ศักดาไฟฟ้า อาร์เอ็มเอส รวมทั้งหมด อันเนื่องมาจากศักดาไฟฟ้าที่ความถี่ทำงานและฮาร์มอนิกเพื่อใช้ประกอบการพิจารณาถึงความร้อนที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ต่างๆในระบบ เช่น มอเตอร์ เป็นต้น

$$V_{rms} = \left(\sum_h V_h^2 \right)^{1/2}$$

สมมติศักดาไฟฟ้า กระแสและ เควีเอ ที่คาปาซิเตอร์ของความถี่ฮาร์มอนิกต่างๆ ของระบบที่ได้วิเคราะห์ออกมา แสดงให้เห็นดังตาราง รีโซแนนซ์ของระบบเกิดใกล้กับฮาร์มอนิกอันดับ 7 ซึ่งทำให้กระแสไหลในคาปาซิเตอร์สูงมากถึง 9.896 p.u.

อันดับฮาร์มอนิก	คิกดาไฟฟ้า $V_h(p.u.)$	กระแส $I_h(p.u.)$	KVAh(p.u.)
1	1.050	1.050	1.103
5	0.135	0.0673	0.091
7	1.414	9.896	13.993
11	0.009	0.101	0.001
13	0.004	0.055	0.000
17	0.002	0.035	0.000

ตารางที่ 1 คิกดาไฟฟ้า กระแส และ KVA ที่คาปาซิเตอร์ (ที่ p.u.เดียวกันกับความถี่ทำงาน)

ดังนั้น

$$V_p = \sum_h V_h = 1.050 + 0.135 + 1.414 + 0.009 + 0.004 + 0.002 = 2.614$$

$$V_{rms} = \left(\sum_h V_h^2 \right)^{1/2} = 1.766$$

$$I_{rms} = \left(\sum_h I_h^2 \right)^{1/2} = 9.975$$

$$KVA_c = \sum KVA_h = 15.188$$

ดังนั้นทั้งขนาดคิกดาไฟฟ้า กระแส และเควีเอ รวมที่คาปาซิเตอร์สูงมากจนทำให้คาปาซิเตอร์เสียหายได้ เพราะฉะนั้นเราต้องทำการป้องกันปัญหาฮาร์มอนิกรีโซแนนซ์โดยใช้รีแอคเตอร์กับระบบจากตารางที่ 3.1 เราจะใส่รีแอคเตอร์เข้าไปอนุกรมกับคาปาซิเตอร์สำหรับป้องกันผลเสียหาย เนื่องจากฮาร์มอนิกที่ 7 เมื่อใส่ฟิลเตอร์ (รีแอคเตอร์) แล้วโดยใช้คาปาซิเตอร์เป็นส่วนหนึ่งของฟิลเตอร์ระบบที่ป้องกันแล้ว โดยให้รีแอคเตอร์จูนไปที่ฮาร์มอนิกที่ 4.7 ก็สามารถที่กำจัดรีโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในระบบได้

การใช้รีแอคเตอร์จูนที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่ 4.7 แทนที่จะเป็นความถี่ฮาร์มอนิกที่ 7 ที่เกิดปัญหา เพราะการจูนความถี่ฮาร์มอนิกที่ 7 อาจจะทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกรีโซแนนซ์ที่ความถี่อื่นอีก ตามมา และทำให้ฮาร์มอนิกไหลผ่านคาปาซิเตอร์มากอาจทำให้คาปาซิเตอร์เสียหายได้ ในกรณีที่ระบบมีฮาร์มอนิกรีโซแนนซ์เกิดขึ้น อาจใช้ฟิลเตอร์ ความถี่ 4.7 เข้าไปแก้ปัญหาก็ได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอสมควร แต่ถ้าหากพิถีพิถันในเรื่องการกำหนดฮาร์มอนิกไม่ให้ไปรบกวนระบบควบคุมที่ใช้อิเล็กทรอนิกส์ในโรงงานก็ต้องใช้ฟิลเตอร์ความถี่ให้ถูกต้องมากกว่านี้

สำหรับการเลือกคาปาซิเตอร์เพื่อเพิ่มค่า เพาเวอร์แฟคเตอร์ ของกลุ่มอุปกรณ์ไฟฟ้าทั่วไป เช่น หลอดไฟแบบปล่อยประจุ ภาสมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction motor) ฯลฯ โดยต่อคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมคือ

$$KVAR_c = Kw (\tan\phi_1 - \tan\phi_2)$$

เมื่อ KVA_c = ขนาด KVAR ของคาปาซิเตอร์

Kw = ขนาดกิโลวัตต์รวมของโหลด

ϕ_1 = มุมของค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์เดิม

ϕ_2 = มุมของค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ใหม่

เนื่องจากมีอุปกรณ์ไฟฟ้าหลายตัว การทำงานอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา มีโหลดไม่คงที่ การใช้คาปาซิเตอร์เพื่อเพิ่ม เพาเวอร์แฟคเตอร์ให้กับกลุ่มอุปกรณ์ไฟฟ้างั้นจึงควรเลือกใช้วิธี การควบคุมค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์แบบอัตโนมัติ โดยแบ่งออกเป็นชุดย่อยๆ และสามารถหาค่ารีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ได้จาก

$$VAR_c = \frac{V_c^2}{X_c}$$

$$VAR_c = 2\pi f c V_c^2$$

ดังนั้น

$$c = \frac{VAR_c}{2\pi f V_c^2} \quad \mu F$$

ค่าอิมพีแดนซ์ของฟิลเตอร์เท่ากับ

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

เงื่อนไขรีโซแนนซ์แบบอนุกรม

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

เมื่อ ω_n คือความถี่เชิงมุมในการปรับ เรเดียน / วินาที

ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาค่าการเหนี่ยวนำได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L = \frac{1}{C(2\pi f_n)^2} \quad \text{mH}$$

และหาค่า R จากสมการ

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

เมื่อ X_0 เป็นค่ารีแอคแตนซ์ของ L หรือ C ที่ความถี่การจูน มีค่าเท่ากับ

$$X_0 = \omega_n L = \frac{1}{\omega_n C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \Omega/\text{phase}$$

เมื่อ Q = คุณภาพของตัวกรองช่วง 30-60

เมื่อทำการต่อโหลดหลอดไฟ 3 เฟส จำนวน 100 วัตต์ 9 หลอดต่อแบบ Δ และต่อ L เข้า
ไปเกิด loss 726 วัตต์ ดังนั้น โหลดมีวัตต์รวม = $300+242+200 = 742 \text{ watt/phase}$

เลือกขนาด $C = \text{watt} (\tan\phi_1 - \tan\phi_2)$

$$= 742 (\tan 60 - \tan 18)$$

$$= 742(1.407)$$

$$= 1043 \text{ VAR}$$

$$= 763 \text{ VAR}$$

$$\text{VAR}_c = \frac{V_c^2}{X_c}$$

$$X_c = \frac{V_c^2}{\text{VAR}_c} = \frac{380^2}{1043} = 138 \quad \Omega/\text{phase}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} = \frac{1}{2\pi(50)(138)} = 23 \quad \mu\text{F}$$

$$C = 23 \quad \mu\text{F}$$

ดังนั้นเราจะเลือกขนาดคาปาซิเตอร์ที่น้อยกว่า เพราะเราใช้ไมโซที่พิกัดเราเลือกคาปาซิเตอร์ขนาด 18.75 ไมโครฟารัด $X_c = 169.77$ โอห์ม ต่อ เฟส ถ้าเอา คาปาซิเตอร์เป็นส่วนหนึ่งของ ฟิลเตอร์ นั้นจากข้างบน เราจะจูนรีแอคเตอร์ไปที่ฮาร์มอนิกอื่น ที่ไม่ใช่ฮาร์มอนิกกรีซแนซ เพื่อไม่ให้คาปาซิเตอร์เสียหายเนื่องมาจากฮาร์มอนิก

-ถ้าจะแก้ฮาร์มอนิกที่ 7 เนื่องจากในระบบมีฮาร์มอนิกมากนั้น เราจะปรับรีแอคเตอร์ไปที่ความถี่ฮาร์มอนิก 4.7 จาก

$$n = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{100}{X_L}} = 4.7$$

$$X_L = 4.527\% X_C$$

เมื่อ $X_C = 169.77$ โอห์ม ต่อ เฟส

$$X_L = 7.685 \text{ โอห์มต่อเฟส}$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{7.685}{2\pi(50)} = 24.46 \text{ mH}$$

-ถ้าจะแก้ฮาร์มอนิกที่ 5 เนื่องจากในระบบมีฮาร์มอนิกมากนั้น เราจะปรับรีแอคเตอร์ไปที่ความถี่ฮาร์มอนิก 3.78 จาก

$$n = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{100}{X_L}} = 3.78$$

$$X_L = 7\% X_C$$

เมื่อ $X_C = 169.77$ โอห์ม ต่อ เฟส

$$X_L = 11.88 \text{ โอห์มต่อเฟส}$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{11.88}{2\pi(50)} = 37.82 \text{ mH}$$

สำหรับการออกแบบฟิลเตอร์เพื่อแก้ฮาร์มอนิกไหลเข้าระบบนั้น ลำดับที่ 7

$$X_L = 2\% X_C$$

$$X_L = 3.4$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{3.4}{2\pi(50)} = 10.81 \text{ mH}$$

สำหรับการออกแบบฟิลเตอร์เพื่อแก้ฮาร์มอนิกไหลเข้าระบบของ ลำดับที่ 5

$$X_L = 4\% X_C$$

$$X_L = 6.7908$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{6.7908}{2\pi(50)} = 21.62 \text{ mH}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการออกแบบค่าตัวเหนี่ยวนำจากสูตร

$$V = 2\pi fLI$$

และ $E = 4.44NfBA$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{N^2}{R} = \frac{N^2 \mu A}{2g}$$

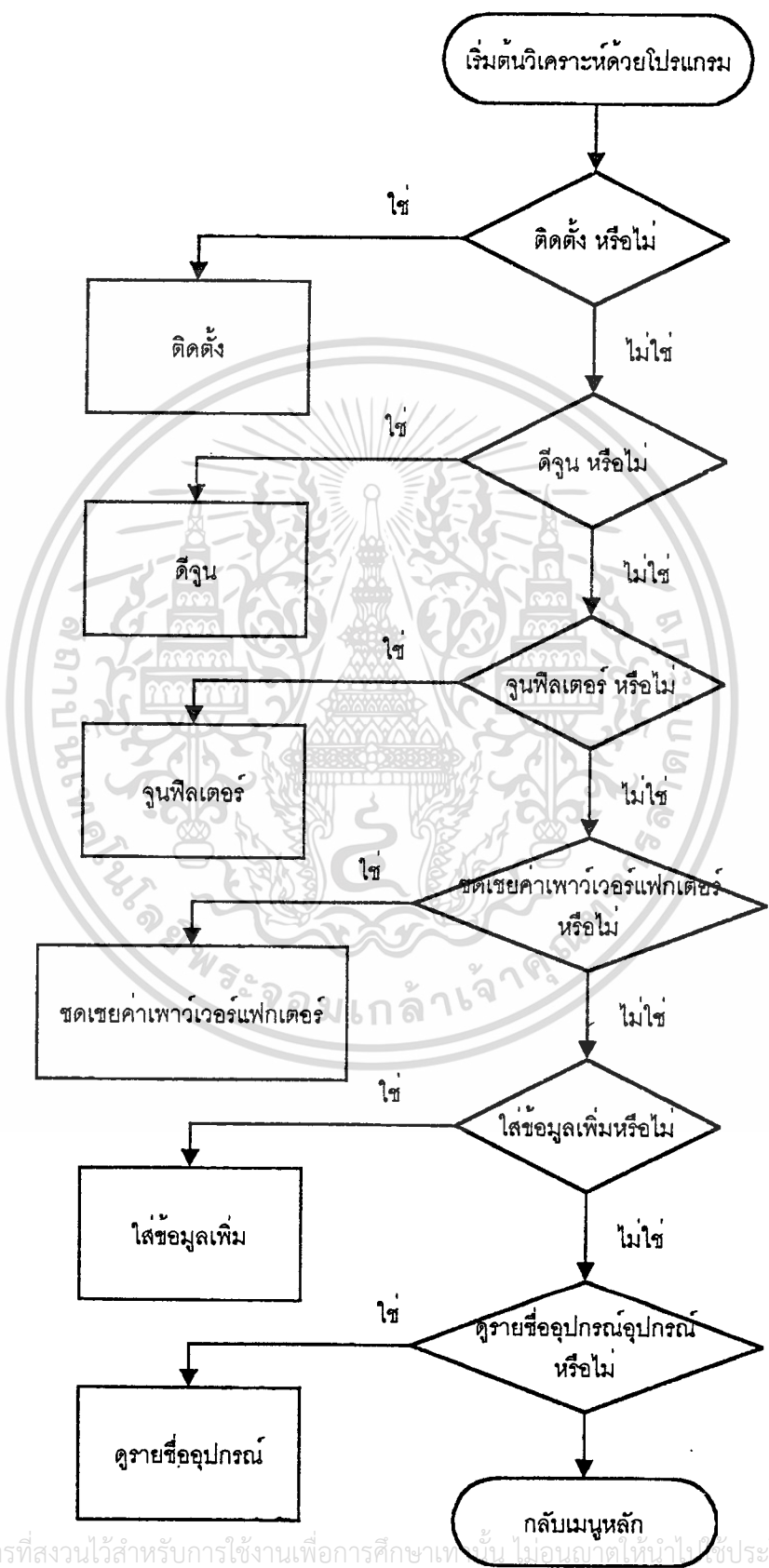
ซึ่งเป็นค่ารีแอคเตอร์ที่สามารถปรับแก้ได้

โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์

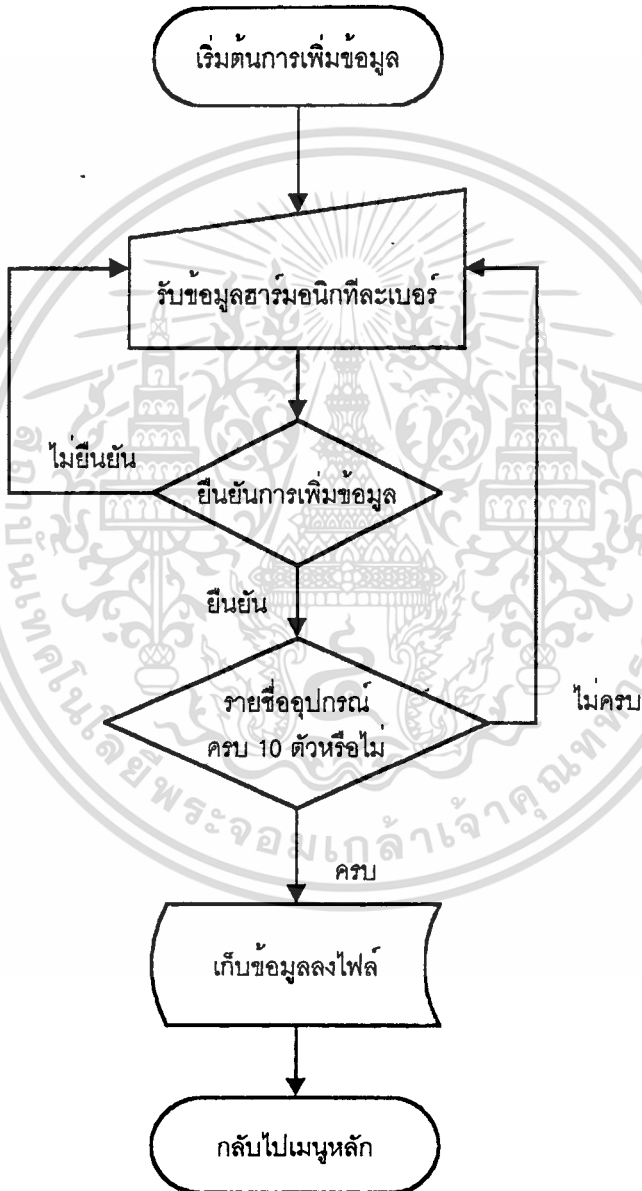
ในส่วนของโปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง มีหลักการทำงานเบื้องต้น ตามผังงาน (Flow Chart) อันประกอบไปด้วย

ผังงานที่ 3.1 แสดงระบบโดยรวมของการวิเคราะห์ โดยใช้โปรแกรม และผังงานที่ 3.1 จนถึง 3.6 จะเป็นระบบย่อยที่ใช้ในการวิเคราะห์

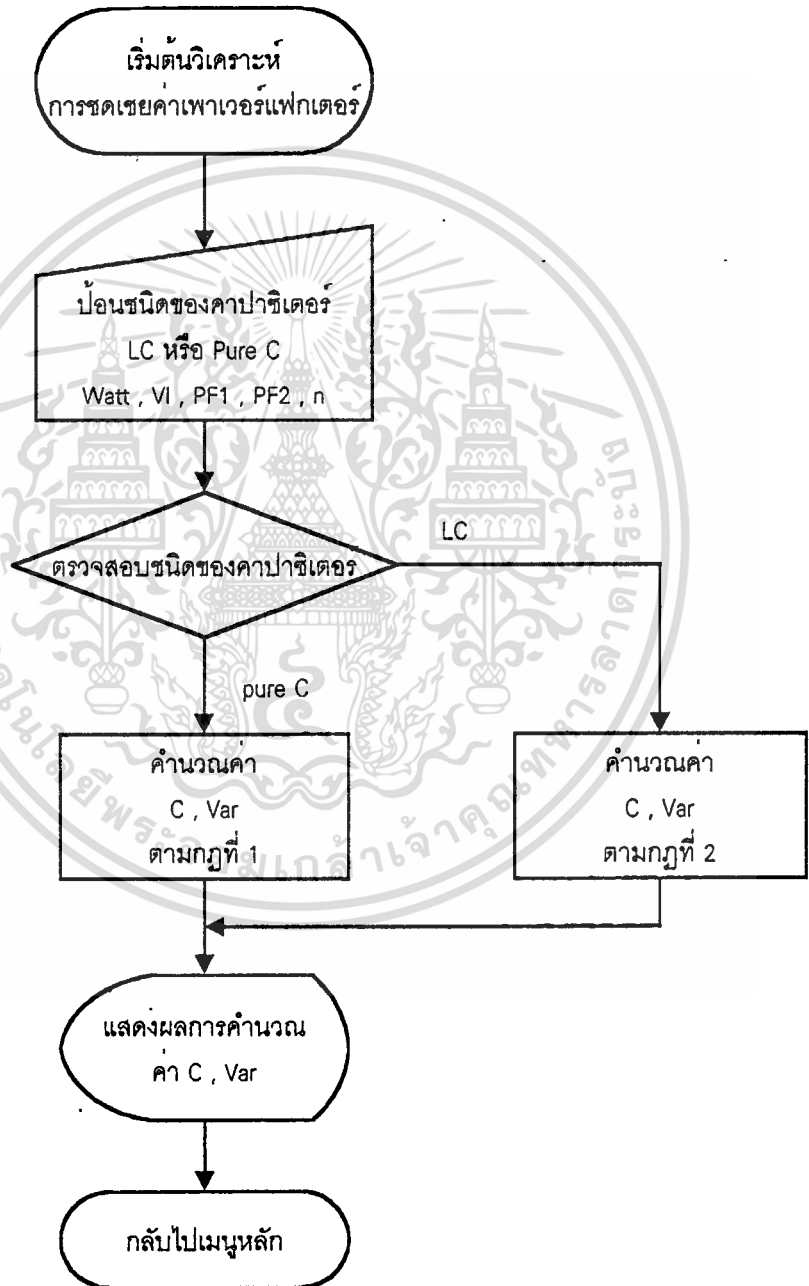
ผังงานที่ 3.1โปรแกรมแสดงเมนูหลักในการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ฮาร์โมนิก



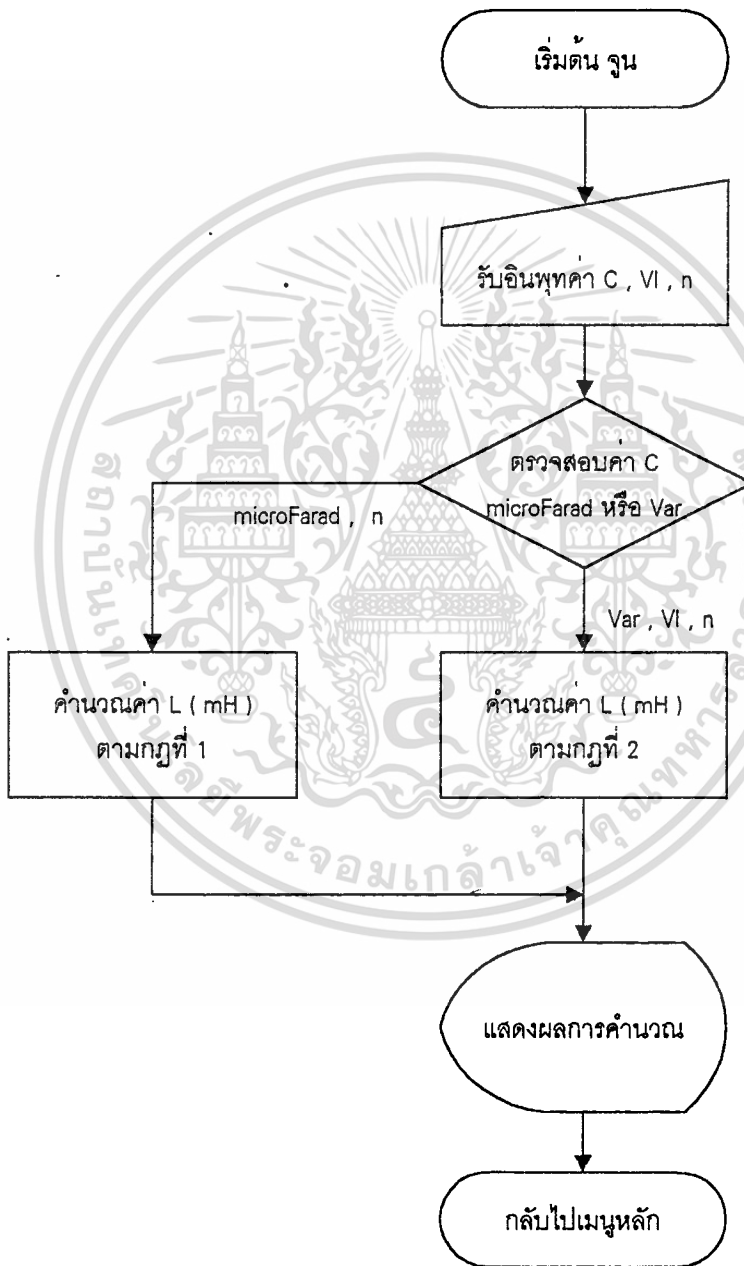
ผังงานที่ 3.2 แสดงการเพิ่มข้อมูล



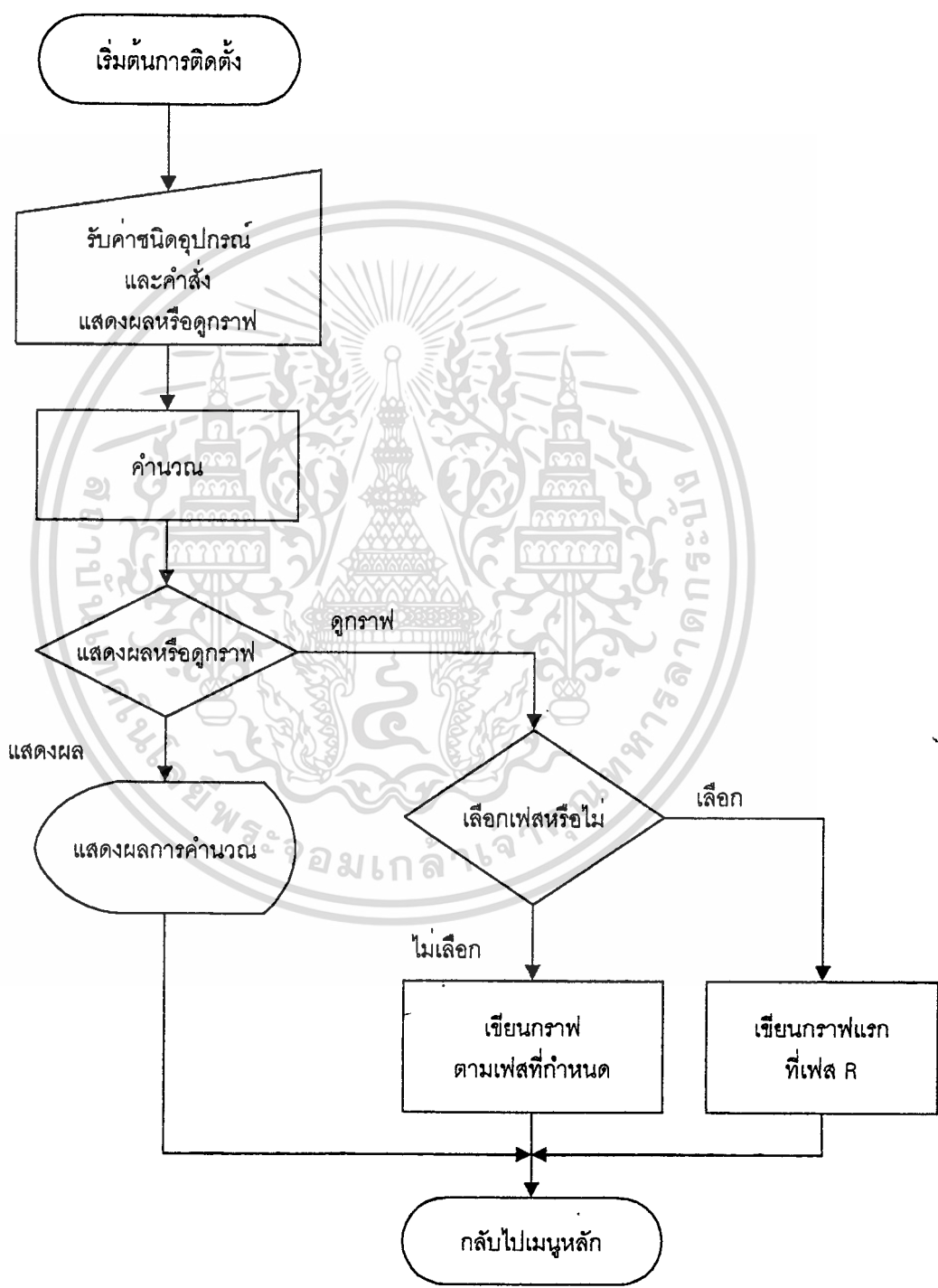
ผังงานที่ 3.3 แสดงการวิเคราะห์การชดเชยค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์



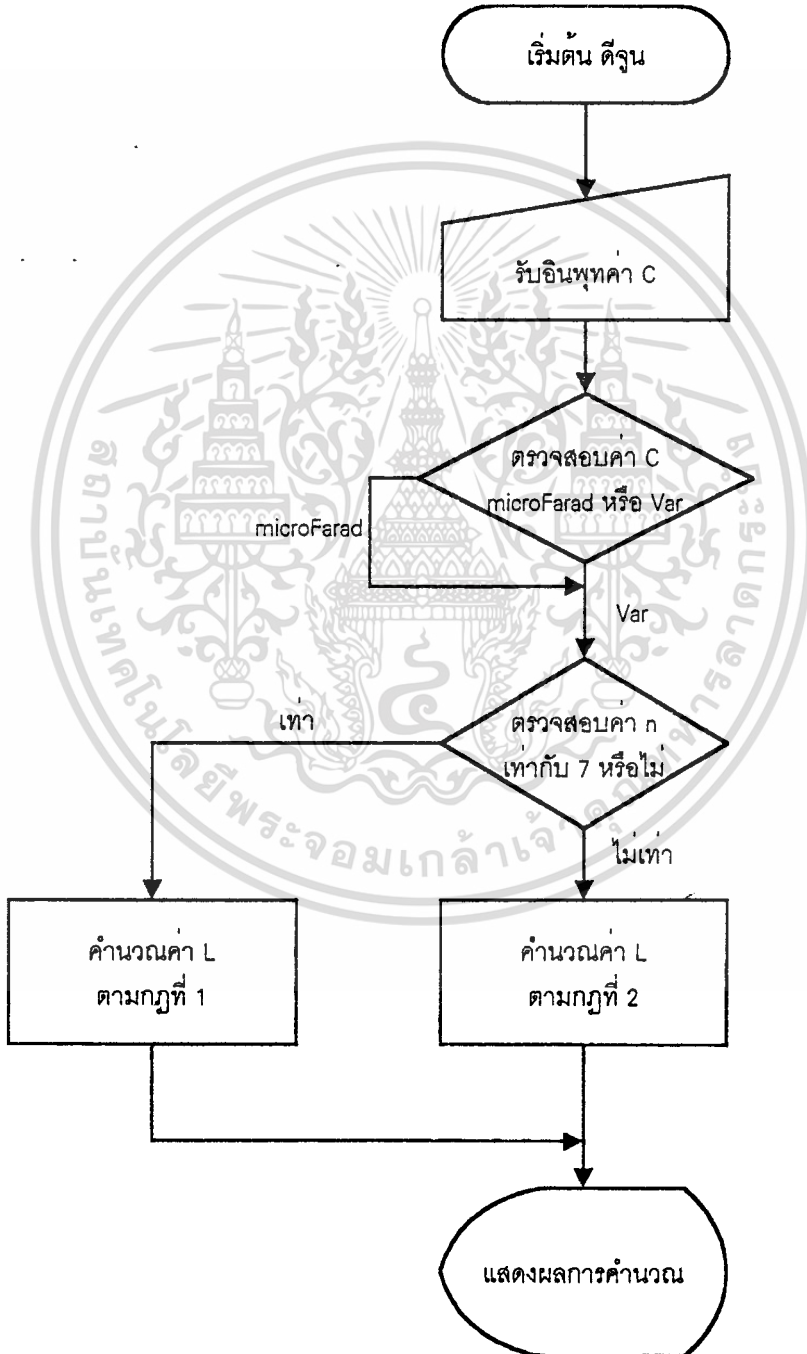
ผังงานที่ 3.4 แสดงคำนวณวงจรกรองแบบป้องกันระบบ



ผังงานที่ 3.5 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์



ผังงานที่ 3.6 แสดงคำนวณวงจรกรองแบบป้องกันตัวเก็บประจุ



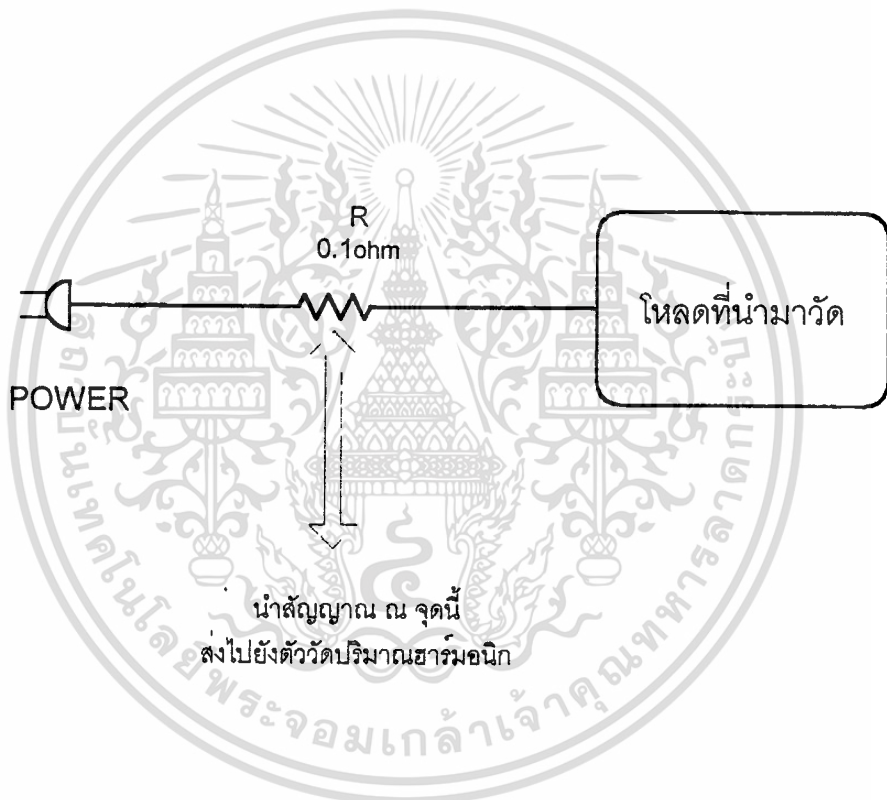
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การวัดฮาร์มอนิกจากอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้น

4.1.1 การวัดอุปกรณ์ทั่วไป เพื่อหาปริมาณฮาร์มอนิก

วงจรที่ใช้ในการวัดค่าปริมาณฮาร์มอนิก แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยที่เครื่องมือวัดที่ใช้ คือ เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer) ดังแสดงใน รูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 แสดงวงจรที่ใช้ในการวัดปริมาณฮาร์มอนิก



รูปที่ 4.2 แสดงเครื่องมือวัด ที่ใช้ในการทดลอง คือ เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการทดลองการวัดอุปกรณ์ทั่วไป

1. หลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 40 วัตต์ บัลลาสต์ธรรมดา จำนวน 1 หลอด

ความถี่ (เฮิรตซ์)	กระแส (มิลลิแอมป์)	เปอร์เซ็นต์ (%)
50.0137	503.852	100
150.082	21.9382	4.35
99.5781	13.7934	2.73
142.066	11.4677	2.28
250.18	10.4110	2.07
350.328	9.28282	1.84
274.078	7.98453	1.58
361.547	7.87269	1.56
30.8521	7.70927	1.53
81.3301	7.69746	1.52

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกของหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 40 วัตต์ บัลลาสต์ธรรมดา จำนวน 1 หลอด

2. อุปกรณ์สวิตซ์ชิง เพาเวอร์ซัพพลาย (switching power supply)

ความถี่ (Hz)	กระแส (มิลลิแอมป์)	เปอร์เซ็นต์ (%)
49.9551	133.718	100
150	27.9666	20.91
350.102	17.7338	13.26
250.020	16.4405	12.29
27.0225	8.13405	6.08
449.797	7.65303	5.72
312.258	7.46961	5.59
380.430	7.21884	5.40
217.859	6.94270	5.20
480.508	6.86365	5.13

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกของอุปกรณ์สวิตซ์ชิง เพาเวอร์ซัพพลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.คอมพิวเตอร์ (computer)

ความถี่ (Hz)	กระแส (มิลลิแอมป์)	เปอร์เซ็นต์ (%)
50.0117	947.106	100
150.043	500.142	52.81
250.082	340.506	35.95
350.117	245.846	25.96
450.117	146.830	15.50
99.7773	20.0947	2.12
200.531	12.8902	1.36
399.500	11.5978	1.22
70.4141	9.13966	0.97
480.414	8.64622	0.91

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกของอุปกรณ์คอมพิวเตอร์

4.มอเตอร์กระแสตรง ขั้ว เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ ความเร็วเชิงโครนัส

4.1 สถานะไร้โหลด

ความถี่ (Hz)	กระแส (มิลลิแอมป์)	เปอร์เซ็นต์ (%)
50.0059	2292.14	100
150.020	1009.55	44.04
250.027	192.462	8.40
350.039	128.298	5.60
450.087	64.0355	2.80
37.5459	28.0056	1.22
62.2793	26.4422	1.15
99.8652	16.8665	0.74
74.9805	16.1446	0.70
25.0000	13.4021	0.58

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกของมอเตอร์กระแสตรง ขั้ว เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่

ความเร็วเชิงโครนัส ขณะไร้ โหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ภาวะที่จ่ายโหลด 400 วัตต์

ความถี่ (Hz)	กระแส (มิลลิแอมป์)	เปอร์เซ็นต์ (%)
50.0010	5067.20	100
150.012	1517.77	29.95
250.012	428.868	8.46
350.000	151.513	3.00
450.047	103.628	2.05
25.6187	31.3054	0.62
74.5156	29.5848	0.58
439.070	16.8988	0.33
496.836	7.28469	0.14
400.109	7.26281	0.14

ตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ความเร็วเชิงโคไซน์ จ่ายโหลด 400 วัตต์

5 อินเวอร์เตอร์ ขับ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 1485 rpm

ความถี่ (Hz)	กระแส (มิลลิแอมป์)	เปอร์เซ็นต์ (%)
50.0693	360.177	100
250.320	84.4056	23.43
350.594	69.8397	19.39
150.133	22.1445	6.15
99.8672	21.1874	5.88
463.836	12.3350	3.42
449.289	10.7598	2.99
62.5000	10.4858	2.91
167.945	8.63833	2.41
69.2793	8.60933	2.39

ตารางที่ 4.6 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ ขับ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 1485 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เครื่องกำเนิดสัญญาณ (signal generator)

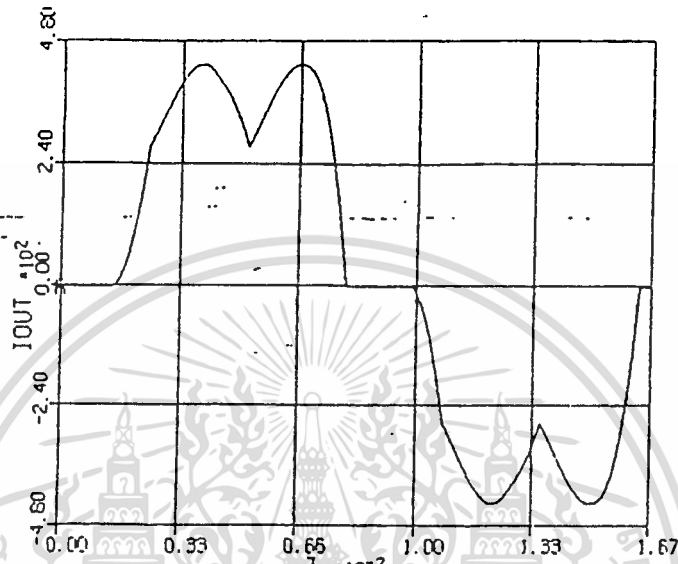
ความถี่ (Hz)	กระแส (มิลลิแอมป์)	เปอร์เซ็นต์ (%)
50.0527	1.000	100
150.152	613.138	61.31
250.262	175.442	17.54
200.352	110.053	11.00
300.352	62.6495	6.26
350.398	31.4435	3.14
550.625	22.6242	2.26
450.539	20.0117	2.00
500.539	19.7479	1.97
100.035	15.8926	1.59
600.035	15.1301	1.51
650.375	9.95921	1.00

ตารางที่ 4.7 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกของ เครื่องกำเนิดสัญญาณ

4.2 ผลของข้อมูลปริมาณฮาร์มอนิกจากโรงงาน

4.2.1 ผลการวัดอุปกรณ์แต่ละชนิด ในโรงงาน

1.เรกติไฟเออร์ควบคุมเฟส (Phase controlled Rectifiers)



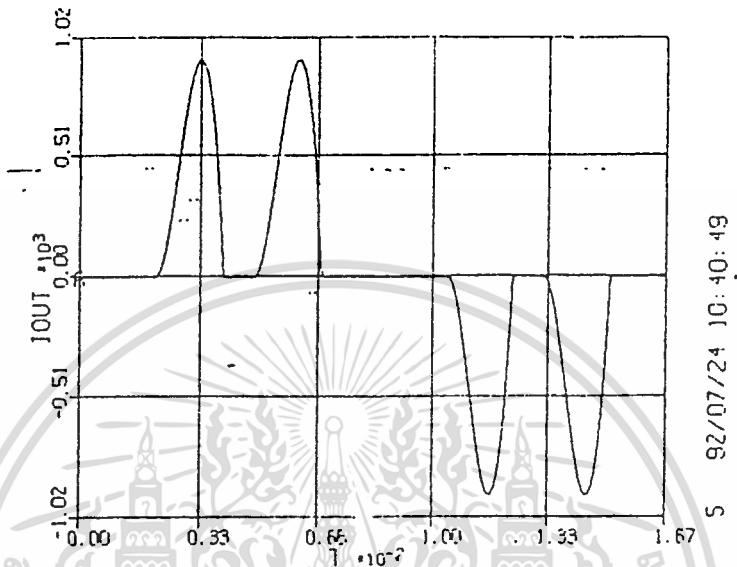
รูปที่ 4.3 แสดงรูปคลื่นของกระแสฮาร์มอนิก

ลำดับ ฮาร์มอนิกที่	กระแส (%)
Fundamental	100
5-TH	20
7-TH	14
11-TH	9
13-TH	8

ตารางที่ 4.8 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกของเรกติไฟเออร์ควบคุมเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. พี ดับเบิลยู เอ็ม อินเวอร์เตอร์แบบ สติฟ (PWM Inverters with stiff sources)

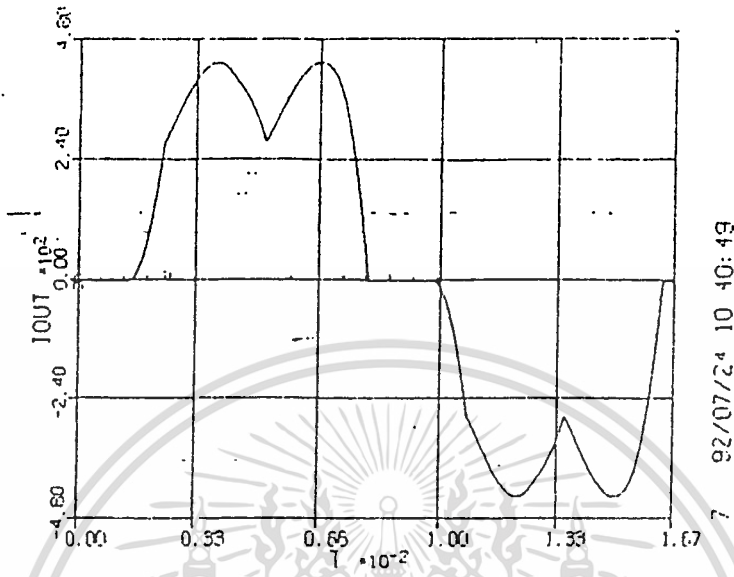


รูปที่ 4.4 แสดงรูปคลื่นของกระแสฮาร์มอนิก

ลำดับ ฮาร์มอนิกที่	กระแส (%)
Fundamental	100
5-TH	85
7-TH	71
11-TH	40
13-TH	26

ตารางที่ 4.9 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกของพี ดับเบิลยู เอ็ม อินเวอร์เตอร์แบบ สติฟ

3. พี ดับเบิลยู เอ็ม อินเวอร์เตอร์แบบ ซอฟท์(PWM Inverters with soft sources)

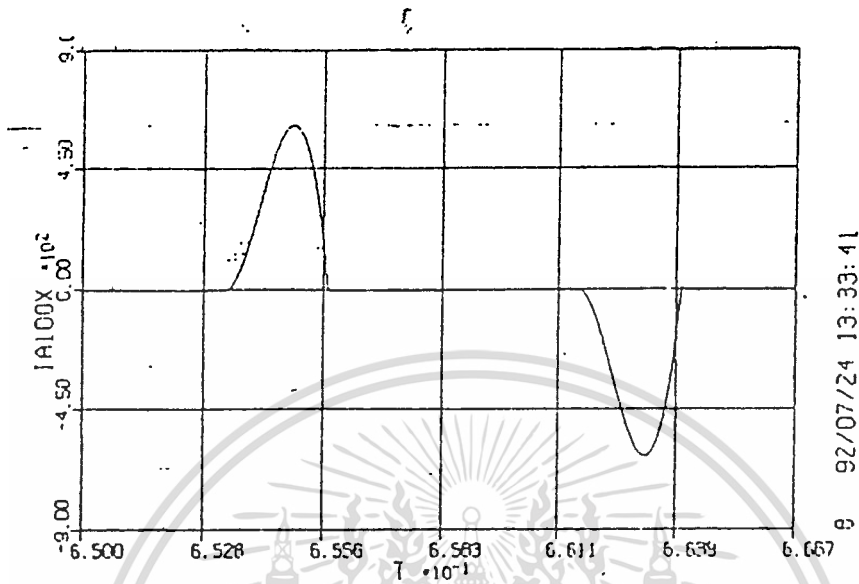


รูปที่ 4.5 แสดงรูปคลื่นของกระแสฮาร์มอนิก

ลำดับ ฮาร์มอนิกที่	กระแส (%)
Fundamental	100
5-TH	29
7-TH	8
11-TH	6
13-TH	3

ตารางที่ 4.10 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกของพี ดับเบิลยู เอ็ม อินเวอร์เตอร์แบบ ซอฟท์

4.แหล่งจ่ายไฟแบบ ซิงเกิล เฟส สวิตติ่ง(Single-phase switching mode power supply)

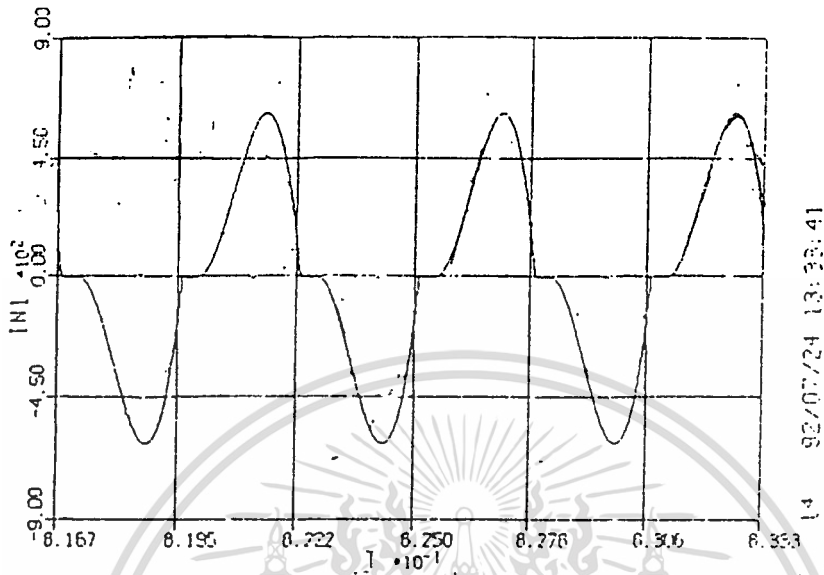


รูปที่ 4.6 แสดงรูปคลื่นของกระแสฮาร์มอนิก

ลำดับ ฮาร์มอนิกที่	กระแส (%)
Fundamental	100
3-RD	88
5-TH	66
7-TH	42
9-TH	22
11-TH	10
13-TH	8

ตารางที่ 4.11 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกของแหล่งจ่ายไฟแบบ ซิงเกิล เฟส สวิตติ่ง

5. กระแสนิวทรัล (Neutral Current) ในระบบไฟ 3 เฟส 4 สาย



รูปที่ 4.7 แสดงรูปคลื่นของกระแสฮาร์โมนิก

ลำดับ ฮาร์โมนิกที่	กระแส (%)
Fundamental	0
3-RD	230
5-TH	0
7-TH	0
9-TH	24
11-TH	0
13-TH	0

ตารางที่ 4.12 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกของกระแสนิวทรัล

6. ตัวชดเชย วาร์ สถิตย แบบใช้ไทรสเตอร์ควบคุมค่ารีแอคเตอร์ (Static var compensator (thyristor controlled reactor (TCR)))

ลำดับ ฮาร์โมนิกที่	กระแส (%)
Fundamental	100
3-RD	14
5-TH	5
7-TH	3
9-TH	2
11-TH	1
13-TH	1

ตารางที่ 4.13 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกของตัวชดเชย วาร์ สถิตย แบบใช้ไทรสเตอร์ควบคุมค่ารีแอคเตอร์

7.เตาหลอมอาร์ค

7.1 ขณะเริ่มต้น (ArcFurnaces (initial Melting))

ลำดับ ฮาร์โมนิกที่	กระแส (%)
Fundamental	100
2-ND	8
3-RD	6
4-TH	3
5-TH	4
7-TH	3

ตารางที่ 4.14 แสดงปริมาณฮาร์โมนิกของเตาหลอมอาร์ค ขณะเริ่มต้น

7.2 เตาหลอมอาร์ค ชนิดคงที่ (Arc Furnaces (Stable Arc)

ลำดับ ฮาร์มอนิกที่	กระแส (%)
Fundamental	100
3-RD	2
5-TH	2

ตารางที่ 4.15 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกของเตาหลอมอาร์ค ชนิดคงที่

8.หลอดฟลูออเรสเซนต์ ขนาด 15 วัตต์ 220 โวลท์ (Fluorescent 15w. 220 v)

ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

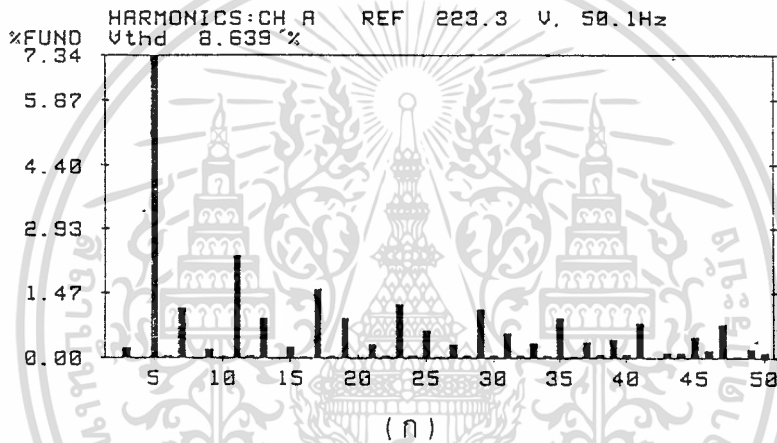
ลำดับ ฮาร์มอนิกที่	กระแส (%)
Fundamental	100
3-RD	82
5-TH	54.8
7-TH	32
9-TH	23.5
11-TH	19.9
13-TH	13.9
15-TH	11.6
17-TH	13.2

ตารางที่ 4.16 แสดงปริมาณฮาร์มอนิกของหลอดฟลูออเรสเซนต์ ขนาด 15 วัตต์ 220 โวลท์

4.2.2 ผลการวัดปริมาณฮาร์มอนิกโดยรวม จากโรงงานประเภทต่างๆ

1. สำหรับโรงงานที่เป็นโหลดประเภทมอเตอร์ ที่ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ควบคุม

ONE-CHANNEL METER MODE		ONE-CHANNEL METER MODE		ONE-CHANNEL METER MODE	
CHANNEL: A		CHANNEL: A		CHANNEL: A	
PARAMETER	VALUE	PARAMETER	VALUE	PARAMETER	VALUE
U	223.2	VAR	230.0k	Uthd	8.193
I	1.647k	PF	0.775	Ithd	41.38
W	283.7k	Hz	50.04	Utif	65.22k
VA	367.5k			Itif	450.9k
	919.2				
	407.1				
	493.8				



HARMONICS:CH A REF 222.9 V, 50.1Hz
Uthd 8.733 %

%FUND	H#	MAG%	PHS	H#	MAG%	PHS	H#	MAG%	PHS
02	0.048	357	19	0.957	321	36	0.048	043	
03	0.253	174	20	0.024	015	37	0.407	300	
04	0.096	153	21	0.335	163	38	0.120	056	
05	7.468	140	22	0.072	343	39	0.455	207	
06	0.096	245	23	1.316	222	40	0.144	133	
07	1.269	028	24	0.096	320	41	0.062	275	
08	0.024	145	25	0.694	312	42	0.000	000	
09	0.215	127	26	0.048	015	43	0.150	248	
10	0.048	298	27	0.335	176	44	0.168	104	
11	2.537	173	28	0.072	050	45	0.551	225	
12	0.072	284	29	1.149	255	46	0.216	165	
13	0.957	318	30	0.096	349	47	0.014	273	
14	0.024	329	31	0.598	309	48	0.040	253	
15	0.287	141	32	0.072	057	49	0.239	210	
16	0.048	307	33	0.335	191	50	0.168	120	
17	1.699	189	34	0.072	106				
18	0.072	311	35	0.957	270				

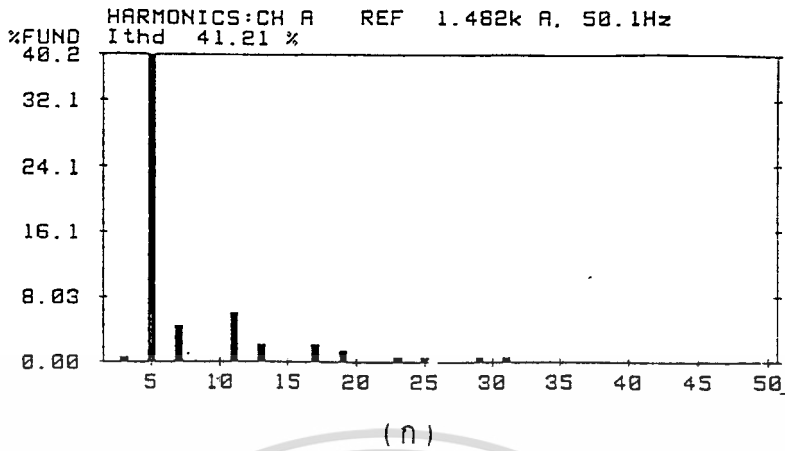
(ข)

รูปที่ 4.8 แสดงปริมาณของความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกในไลน์ที่ 1

ก. แสดงสเปกตรัม

ข. แสดงเป็นตัวเลข

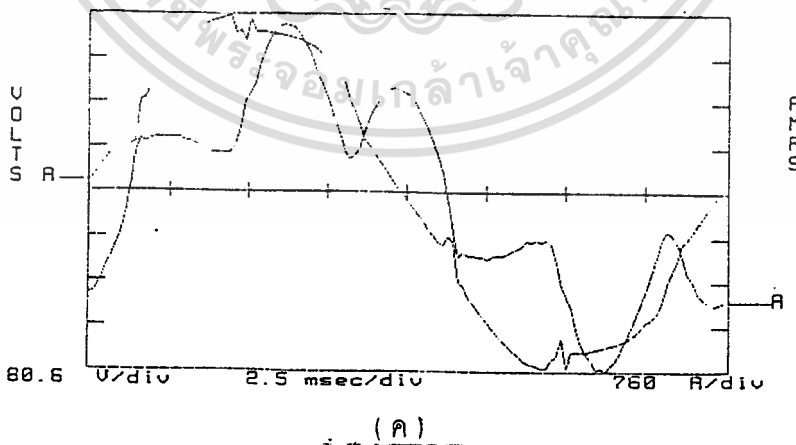
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



HARMONICS:CH A REF 1.482k A, 50.1Hz
%FUND Ithd 41.17 %

H#	MAG%	PHS	H#	MAG%	PHS	H#	MAG%	PHS
02	0.0000	000	19	1.6339	275	36	0.0000	000
03	0.8220	041	20	0.0000	000	37	0.0000	000
04	0.0000	000	21	0.0000	000	38	0.0000	000
05	40.16	043	22	0.0000	000	39	0.0000	000
06	0.0000	000	23	0.8220	284	40	0.0000	000
07	4.918	348	24	0.0000	000	41	0.0000	000
08	0.0000	000	25	0.8220	035	42	0.0000	000
09	0.0000	000	26	0.0000	000	43	0.0000	000
10	0.0000	000	27	0.0000	000	44	0.0000	000
11	6.557	229	28	0.0000	000	45	0.0000	000
12	0.0000	000	29	0.8220	032	46	0.0000	000
13	1.6339	111	30	0.0000	000	47	0.0000	000
14	0.0000	000	31	0.8220	253	48	0.0000	000
15	0.0000	000	32	0.0000	000	49	0.0000	000
16	0.0000	000	33	0.0000	000	50	0.0000	000
17	2.459	062	34	0.0000	000			
18	0.0000	000	35	0.0000	000			

(ข)



รูปที่ 4.9 แสดงปริมาณของความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกในไลน์ที่ 1

ก. แสดงสเปกตรัม

ข. แสดงเป็นตัวเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ค. แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิก
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ONE-CHANNEL METER MODE

CHANNEL: A

PARAMETER	VALUE
V	223.0
I	1.880k
W	245.0k
VA	419.2k

ONE-CHANNEL METER MODE

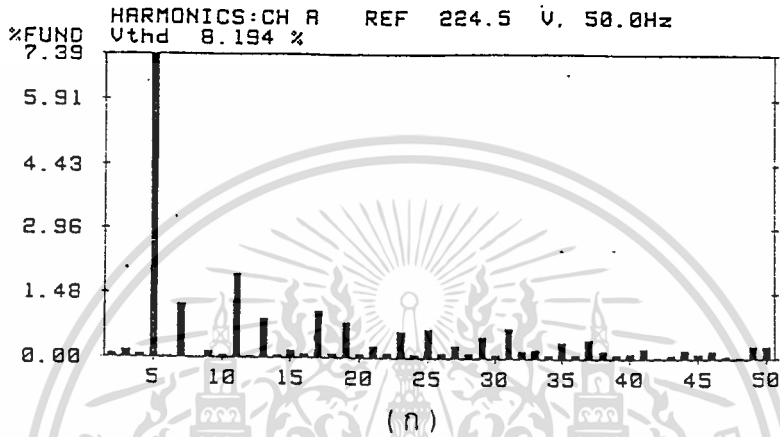
CHANNEL: A

PARAMETER	VALUE
VAR	341.8k
PF	0.579
Hz	50.06

ONE-CHANNEL METER MODE

CHANNEL: A

PARAMETER	VALUE
Vthd	8.122
Ithd	32.16
Vtif	48.94k
Itif	338.5k



HARMONICS:CH A REF 226.1 V, 50.1Hz
%FUND Vthd 7.969 %

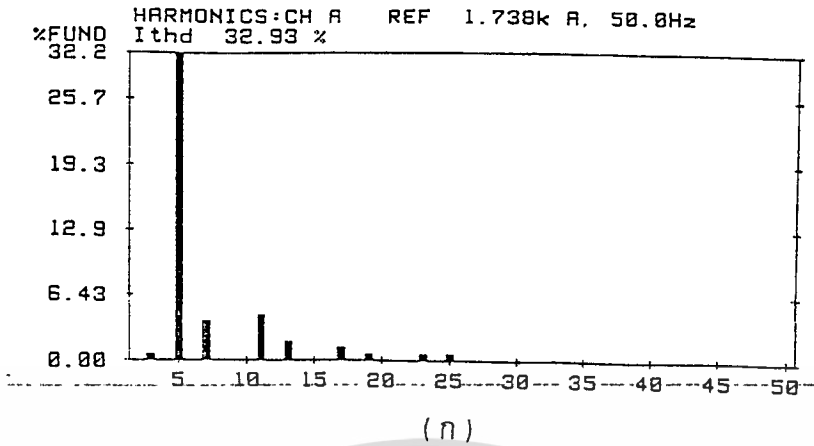
H#	MAG%	PHS	H#	MAG%	PHS	H#	MAG%	PHS
02	0.071	324	19	0.002	332	36	0.094	030
03	0.047	077	20	0.094	087	37	0.448	318
04	0.094	082	21	0.268	286	38	0.212	137
05	7.173	132	22	0.165	190	39	0.118	031
06	0.024	024	23	0.637	233	40	0.142	208
07	1.392	036	24	0.118	342	41	0.236	208
08	0.047	074	25	0.637	306	42	0.047	028
09	0.189	195	26	0.142	106	43	0.165	207
10	0.071	162	27	0.283	333	44	0.236	150
11	2.076	174	28	0.142	202	45	0.142	299
12	0.047	297	29	0.519	270	46	0.212	232
13	0.944	338	30	0.118	007	47	0.142	266
14	0.071	062	31	0.684	314	48	0.047	057
15	0.212	221	32	0.189	128	49	0.401	197
16	0.118	154	33	0.212	015	50	0.307	166
17	1.133	192	34	0.142	238			
18	0.094	321	35	0.425	268			

(ข)

รูปที่ 4.10 แสดงปริมาณของความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกในไลน์ที่ 2

ก. แสดงสเปกตรัม

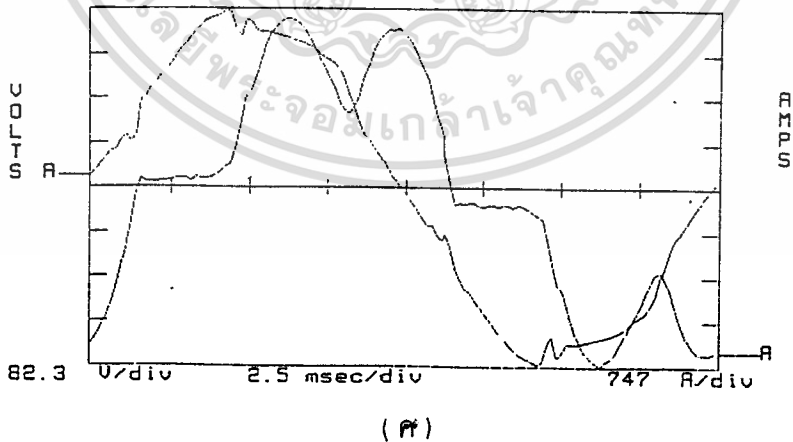
ข. แสดงเป็นตัวเลข



HARMONICS:CH A REF 1.762k A, 50.0Hz
%FUND Ithd 32.50 %

H#	MAG%	PHS	H#	MAG%	PHS	H#	MAG%	PHS
02	0.0000	000	19	0.6900	283	36	0.0000	000
03	0.6900	246	20	0.0000	000	37	0.6900	156
04	0.0000	000	21	0.0000	000	38	0.0000	000
05	31.72	152	22	0.0000	000	39	0.0000	000
06	0.0000	000	23	0.6900	059	40	0.0000	000
07	4.130	118	24	0.0000	000	41	0.0000	000
08	0.0000	000	25	0.6900	221	42	0.0000	000
09	0.0000	000	26	0.0000	000	43	0.0000	000
10	0.0000	000	27	0.0000	000	44	0.0000	000
11	4.820	167	28	0.0000	000	45	0.0000	000
12	0.0000	000	29	0.0000	000	46	0.0000	000
13	2.050	001	30	0.0000	000	47	0.0000	000
14	0.0000	000	31	0.6900	155	48	0.0000	000
15	0.0000	000	32	0.0000	000	49	0.0000	000
16	0.0000	000	33	0.0000	000	50	0.0000	000
17	1.370	054	34	0.0000	000			
18	0.0000	000	35	0.6900	333			

(ข)



รูปที่ 4.11 แสดงปริมาณของความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกในไลน์ที่ 2

ก. แสดงสเปกตรัม

ข. แสดงเป็นตัวเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่ง ค. แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิก ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ONE-CHANNEL METER MODE

CHANNEL: A

PARAMETER	VALUE
U	222.6
I	1.829k
W	213.5k
VA	407.1k

ONE-CHANNEL METER MODE

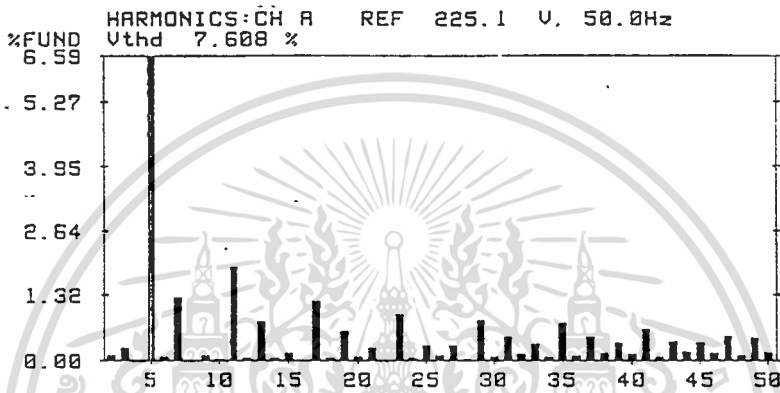
CHANNEL: A

PARAMETER	VALUE
VAR	347.9k
PF	0.523
Hz	50.05

ONE-CHANNEL METER MODE

CHANNEL: A

PARAMETER	VALUE
Uthd	7.893
Ithd	32.11
Utif	58.62k
Itif	369.6k



(ก)

HARMONICS: CH A REF 224.8 V, 50.0Hz
%FUND Uthd 7.781 %

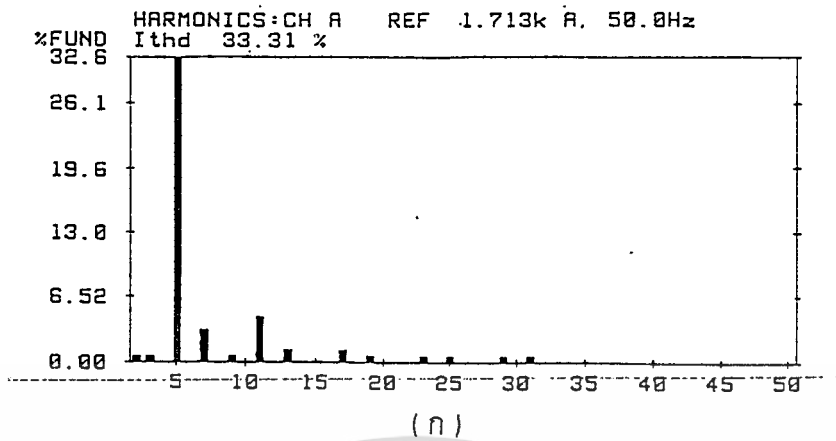
H#	MAG%	PHS	H#	MAG%	PHS	H#	MAG%	PHS
02	0.119	042	19	0.593	324	36	0.119	168
03	0.261	359	20	0.071	245	37	0.617	262
04	0.071	309	21	0.237	120	38	0.142	313
05	6.811	142	22	0.071	009	39	0.380	271
06	0.071	096	23	1.020	211	40	0.190	050
07	1.258	033	24	0.071	159	41	0.654	280
08	0.024	194	25	0.403	254	42	0.047	186
09	0.095	342	26	0.095	274	43	0.498	239
10	0.000	000	27	0.308	175	44	0.166	336
11	2.041	171	28	0.071	034	45	0.427	286
12	0.047	159	29	0.878	247	46	0.237	055
13	0.831	329	30	0.095	170	47	0.475	285
14	0.047	242	31	0.641	262	48	0.071	174
15	0.166	039	32	0.119	292	49	0.546	217
16	0.047	005	33	0.356	229	50	0.166	350
17	1.305	193	34	0.119	033			
18	0.047	171	35	0.631	267			

(ข)

รูปที่ 4.12 แสดงปริมาณของความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกในไลน์ที่ 3

ก. แสดงสเปกตรัม

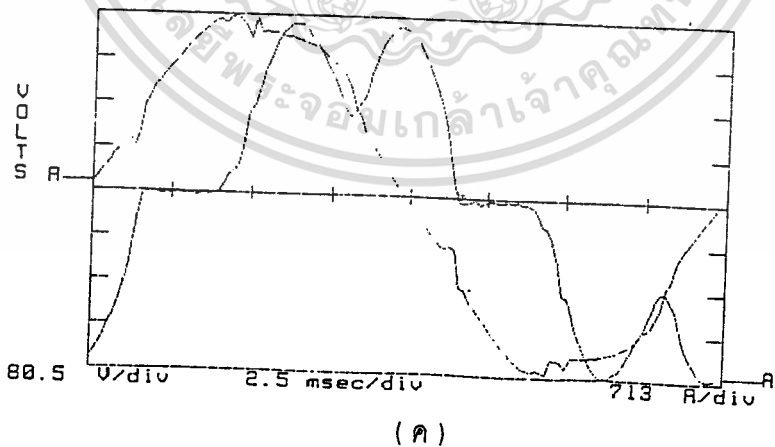
ข. แสดงเป็นตัวเลข



HARMONICS:CH A REF 1.713k A, 50.0Hz
%FUND Ithd 33.29 %

H#	MAG%	PHS	H#	MAG%	PHS	H#	MAG%	PHS
02	0.709	196	19	0.709	028	36	0.000	000
03	0.000	000	20	0.000	000	37	0.000	000
04	0.000	000	21	0.000	000	38	0.000	000
05	32.622	177	22	0.000	000	39	0.000	000
06	0.000	000	23	0.709	169	40	0.000	000
07	3.546	150	24	0.000	000	41	0.000	000
08	0.000	000	25	0.709	245	42	0.000	000
09	0.000	000	26	0.000	000	43	0.000	000
10	0.000	000	27	0.000	000	44	0.000	000
11	4.965	157	28	0.000	000	45	0.000	000
12	0.000	000	29	0.709	097	46	0.000	000
13	1.418	063	30	0.000	000	47	0.000	000
14	0.000	000	31	0.000	000	48	0.000	000
15	0.000	000	32	0.000	000	49	0.000	000
16	0.000	000	33	0.000	000	50	0.000	000
17	1.418	140	34	0.000	000			
18	0.000	000	35	0.000	000			

(ข)



รูปที่ 4.13 แสดงปริมาณของความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกในไลน์ที่ 3

ก. แสดงสเปกตรัม

ข. แสดงเป็นตัวเลข

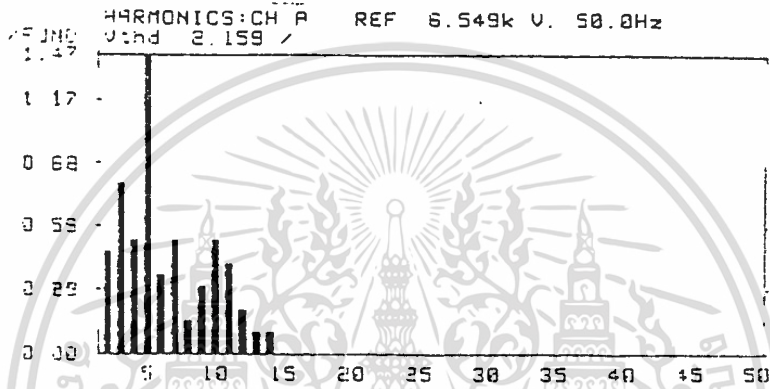
ค. แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสฮาร์โมนิก

2.สำหรับโรงงานประเภทเตาหลอม

ONE-CHANNEL METER MODE ONE-CHANNEL METER MODE ONE-CHANNEL METER MODE

CHANNEL: A		CHANNEL: A		CHANNEL: A	
PARAMETER	VALUE	PARAMETER	VALUE	PARAMETER	VALUE
V	6.485k	VAR	1.633M	Vthd	2.042
I	941.6	PF	0.887	Ithd	4.095
W	2.740M	Hz	50.02	Utif	225.7k
VA	6.106M			Itif	46.71k

(ก)



(ข)

HARMONICS: CH A REF 6.578k V. 0.0Hz

H#	MAG	PHS	H#	MAG	PHS	H#	MAG	PHS
02	0.618	018	19	0.000	000	36	0.000	000
03	0.742	198	20	0.000	000	37	0.000	000
04	0.506	330	21	0.000	000	38	0.000	000
05	0.056	151	22	0.000	000	39	0.000	000
06	0.056	144	23	0.000	000	40	0.000	000
07	0.393	071	24	0.000	000	41	0.000	000
08	0.056	087	25	0.000	000	42	0.000	000
09	0.112	283	26	0.000	000	43	0.000	000
10	0.449	299	27	0.000	000	44	0.000	000
11	1.404	318	28	0.000	000	45	0.000	000
12	0.225	198	29	0.000	000	46	0.000	000
13	0.225	252	30	0.000	000	47	0.000	000
14	0.000	000	31	0.000	000	48	0.000	000
15	0.000	000	32	0.000	000	49	0.000	000
16	0.056	054	33	0.000	000	50	0.000	000
17	0.000	000	34	0.000	000			
18	0.000	000	35	0.000	000			

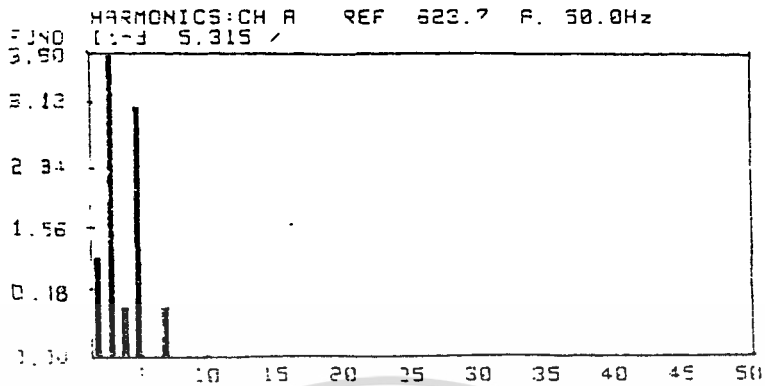
(ค)

รูปที่ 4.14 แสดงปริมาณของความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกในไลน์ที่ 1

ก. แสดงสเปกตรัม

ข. แสดงเป็นตัวเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

HARMONICS:CH A REF 560.2 F. 0.0Hz
TUNED 1:chd 6.832 /

LINE	MAG/	PHS	H#	MAG/	PHS	H#	MAG/	PHS
32	0.067	120	19	0.000	000	36	0.000	000
33	0.031	138	20	0.000	000	37	0.000	000
34	0.040	000	21	0.000	000	38	0.000	000
35	0.027	136	22	0.000	000	39	0.000	000
36	0.027	209	23	0.000	000	40	0.000	000
37	0.013	041	24	0.000	000	41	0.000	000
38	0.000	000	25	0.000	000	42	0.000	000
39	0.000	000	26	0.000	000	43	0.000	000
40	0.000	000	27	0.000	000	44	0.000	000
41	0.000	000	28	0.000	000	45	0.000	000
42	0.000	000	29	0.000	000	46	0.000	000
43	0.000	000	30	0.000	000	47	0.000	000
44	0.000	000	31	0.000	000	48	0.000	000
45	0.000	000	32	0.000	000	49	0.000	000
46	0.000	000	33	0.000	000	50	0.000	000
47	0.000	000	34	0.000	000			
48	0.000	000	35	0.000	000			

(ข)

รูปที่ 4.15 แสดงปริมาณของความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกในไลน์ที่ 1

ก. แสดงสเปกตรัม

ข. แสดงเป็นตัวเลข

ONE-CHANNEL METER MODE

CHANNEL: A

PARAMETER	VALUE
U	6.713k
I	829.4
W	5.555M
VA	5.568M

ONE-CHANNEL METER MODE

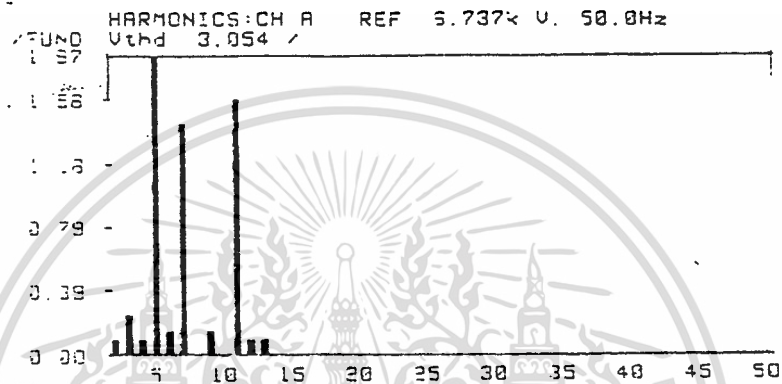
CHANNEL: A

PARAMETER	VALUE
VAR	4.769M
PF	0.847
Hz.	0.000

ONE-CHANNEL METER MODE

CHANNEL: A

PARAMETER	VALUE
Uthd	2.839
Ithd	2.763
Utif	202.9k
Itif	5.697k



(ก)

HARMONICS:CH A REF 6.578k U. 0.0Hz

FUND Uthd 2.475 %

H#	MAG%	PHS	H#	MAG%	PHS	H#	MAG%
02	0.618	010	19	0.000	000	36	0.000
03	1.742	198	20	0.000	000	37	0.000
04	0.506	330	21	0.000	000	38	0.000
05	0.056	151	22	0.000	000	39	0.000
06	0.056	144	23	0.000	000	40	0.000
07	0.393	071	24	0.000	000	41	0.000
08	0.056	087	25	0.000	000	42	0.000
09	0.112	203	26	0.000	000	43	0.000
10	0.449	299	27	0.000	000	44	0.000
11	1.404	319	28	0.000	000	45	0.000
12	0.225	198	29	0.000	000	46	0.000
13	0.225	252	30	0.000	000	47	0.000
14	0.000	000	31	0.000	000	48	0.000
15	0.000	000	32	0.000	000	49	0.000
16	0.056	054	33	0.000	000	50	0.000
17	0.000	000	34	0.000	000		
18	0.000	000	35	0.000	000		

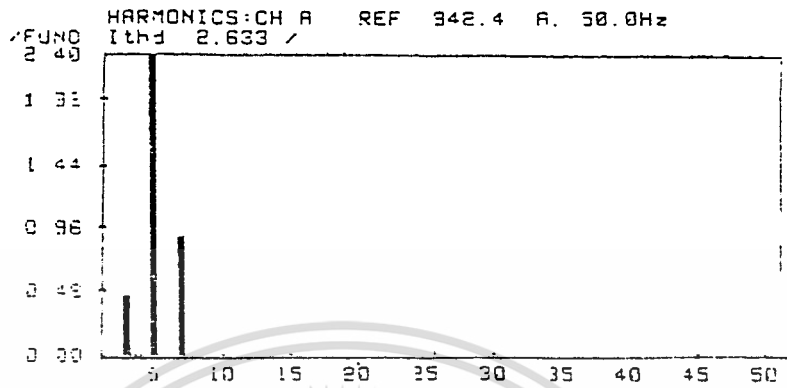
(ข)

รูปที่ 4.16 แสดงปริมาณของความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกในไลน์ที่ 2

ก. แสดงสเปกตรัม

ข. แสดงเป็นตัวเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

HARMONICS:CH A REF 342.4 A. 50.0Hz
FUND 2.633 /

H#	MAG	PHS	H#	MAG	PHS	H#	MAG
02	0.000	000	19	0.000	000	36	0.000
03	0.400	000	20	0.000	000	37	0.000
04	0.000	000	21	0.000	000	38	0.000
05	0.300	000	22	0.000	000	39	0.000
06	0.000	000	23	0.000	000	40	0.000
07	0.250	000	24	0.000	000	41	0.000
08	0.000	000	25	0.000	000	42	0.000
09	0.000	000	26	0.000	000	43	0.000
10	0.000	000	27	0.000	000	44	0.000
11	0.000	000	28	0.000	000	45	0.000
12	0.000	000	29	0.000	000	46	0.000
13	0.000	000	30	0.000	000	47	0.000
14	0.000	000	31	0.000	000	48	0.000
15	0.000	000	32	0.000	000	49	0.000
16	0.000	000	33	0.000	000	50	0.000
17	0.000	000	34	0.000	000		
18	0.000	000	35	0.000	000		

(ข)

รูปที่ 4.17 แสดงปริมาณของความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกในไลน์ที่ 2

ก. แสดงสเปกตรัม

ข. แสดงเป็นตัวเลข

ONE-CHANNEL METER MODE

CHANNEL: A

PARAMETER	VALUE
V	6.713k
I	829.4
W	5.555M
VA	5.568M

ONE-CHANNEL METER MODE

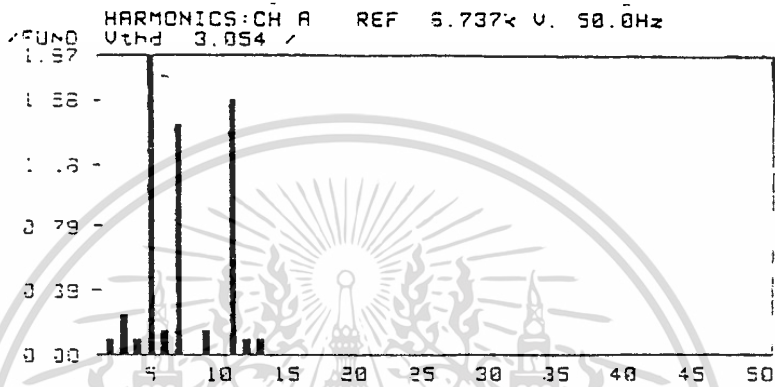
CHANNEL: A

PARAMETER	VALUE
VAR	4.769M
PF	0.847
Hz	0.000

ONE-CHANNEL METER MODE

CHANNEL: A

PARAMETER	VALUE
Uthd	2.839
Ithd	2.763
Utif	202.9k
Itif	5.697k



(ก)

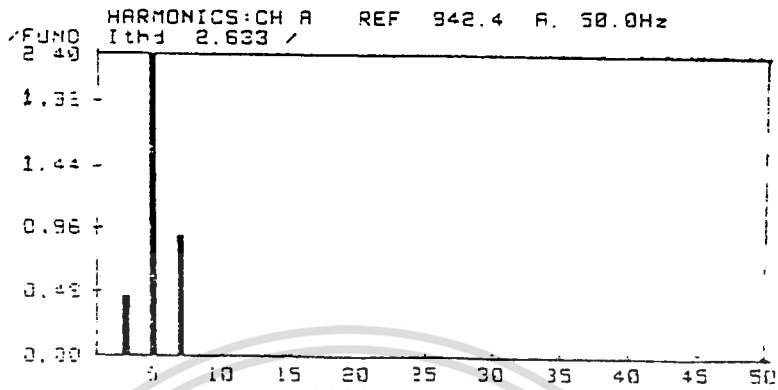
HARMONICS: CH A REF 6.578k V, 0.0Hz					
Uthd 2.475 %					
H#	MAG%	PHS	H#	MAG%	PHS
02	0.618	010	19	0.000	000
03	1.742	198	20	0.000	000
04	0.506	330	21	0.000	000
05	0.056	151	22	0.000	000
06	0.056	144	23	0.000	000
07	0.393	071	24	0.000	000
08	0.056	087	25	0.000	000
09	0.112	202	26	0.000	000
10	0.449	299	27	0.000	000
11	1.404	318	28	0.000	000
12	0.225	198	29	0.000	000
13	0.225	252	30	0.000	000
14	0.000	000	31	0.000	000
15	0.000	000	32	0.000	000
16	0.056	054	33	0.000	000
17	0.000	000	34	0.000	000
18	0.000	000	35	0.000	000
			36	0.000	000
			37	0.000	000
			38	0.000	000
			39	0.000	000
			40	0.000	000
			41	0.000	000
			42	0.000	000
			43	0.000	000
			44	0.000	000
			45	0.000	000
			46	0.000	000
			47	0.000	000
			48	0.000	000
			49	0.000	000
			50	0.000	000

(ข)

รูปที่ 4.18 แสดงปริมาณของความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกในไลน์ที่ 3

ก. แสดงสเปกตรัม

ข. แสดงเป็นตัวเลข



(ก)

HARMONICS:CH A REF 942.4 A. 50.0Hz
FUND 2.633 /

H#	MAG	PHS	H#	MAG	PHS	H#	MAG
02	0.000	000	19	0.000	000	36	0.000
03	0.451	000	20	0.000	000	37	0.000
04	0.000	000	21	0.000	000	38	0.000
05	0.404	000	22	0.000	000	39	0.000
06	0.000	000	23	0.000	000	40	0.000
07	0.962	000	24	0.000	000	41	0.000
08	0.000	000	25	0.000	000	42	0.000
09	0.000	000	26	0.000	000	43	0.000
10	0.000	000	27	0.000	000	44	0.000
11	0.000	000	28	0.000	000	45	0.000
12	0.000	000	29	0.000	000	46	0.000
13	0.000	000	30	0.000	000	47	0.000
14	0.000	000	31	0.000	000	48	0.000
15	0.000	000	32	0.000	000	49	0.000
16	0.000	000	33	0.000	000	50	0.000
17	0.000	000	34	0.000	000		
18	0.000	000	35	0.000	000		

(ข)

รูปที่ 4.19 แสดงปริมาณของความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกในไลน์ที่ 3

ก. แสดงสเปกตรัม

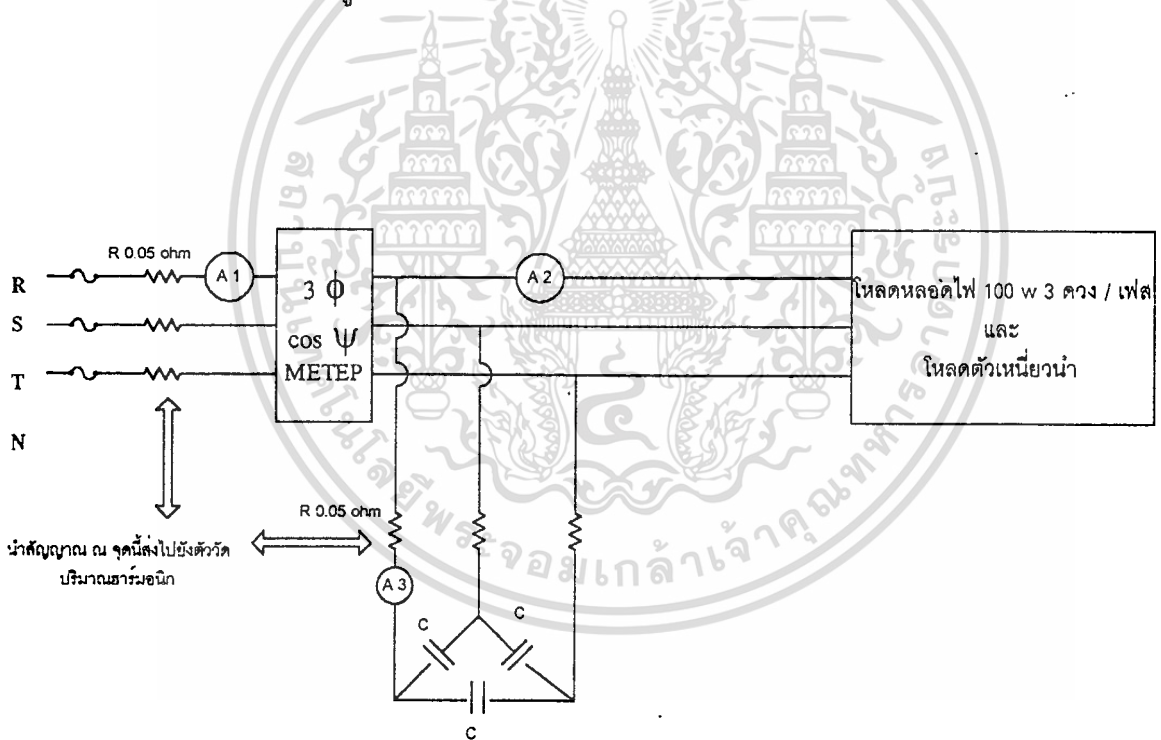
ข. แสดงเป็นตัวเลข

4.3 ผลการทดลองสร้างวงจรกรองฮาร์มอนิก

จากการออกแบบสร้างวงจรกรอง ตามหลักการคำนวณในบทที่ 3 เพื่อทำการทดสอบผลการลดปริมาณฮาร์มอนิกของวงจรกรอง โดยสร้างระบบจำลอง ดังสถานการณ์ต่อไปนี้

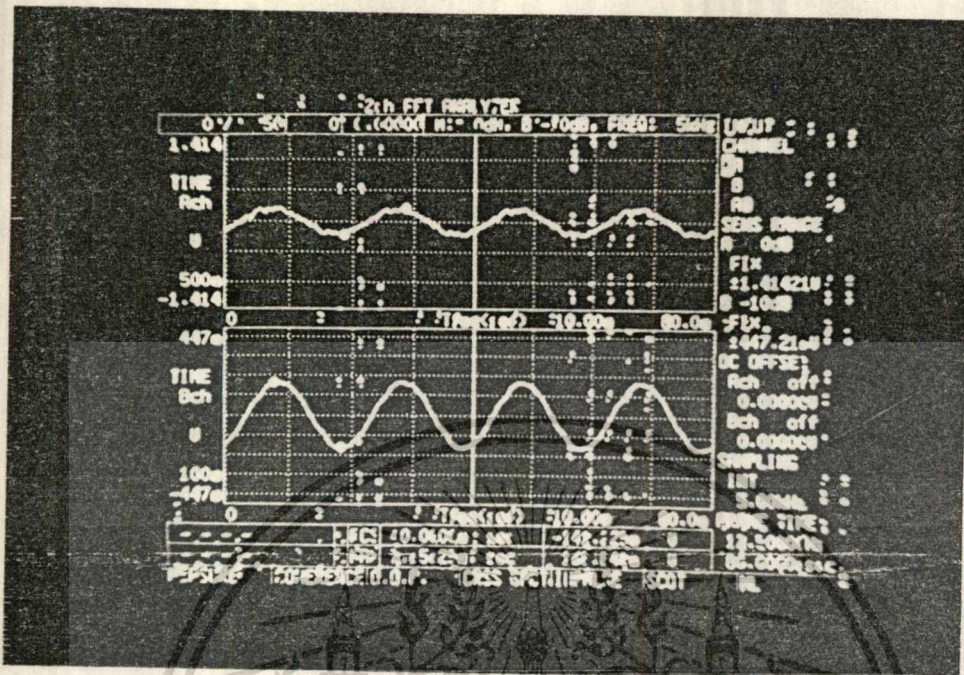
1. กรณีที่ ระบบประกอบไปด้วยโหลดที่เป็นโหลดไฟ ขนาด 100 วัตต์ จำนวน 9 โหลด โหลดตัวเหนี่ยวนำที่ต่อแบบเดลต้า ซึ่งมีค่าตัวประกอบกำลัง 0.75 กระแส $I_1=1.5$ แอมป์ $I_2=5$ แอมป์ $I_3=4$ แอมป์ ดังรูปที่ 4.20

จุดประสงค์เพื่อทำการวัดปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดจากการต่อโหลด โดยทำการวัดเปรียบเทียบกัน 2 จุด คือที่ระบบโดยรวม และที่ตัวคาปาซิเตอร์ แสดงรูปคลื่นแรงดัน , กระแส และปริมาณฮาร์มอนิกดังรูป

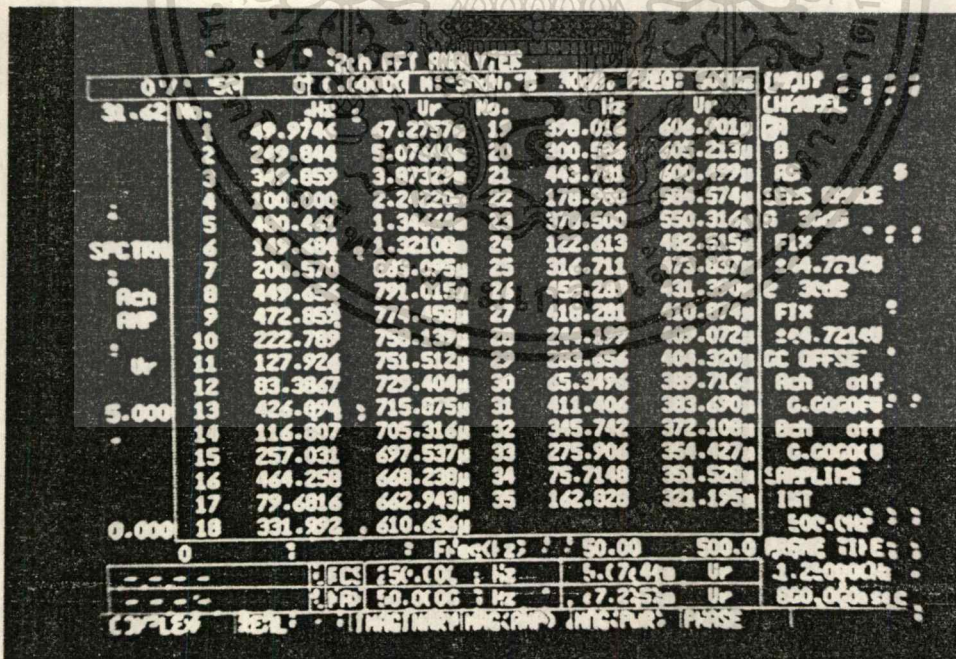


รูปที่ 4.20 แสดงระบบจำลอง กรณีที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่ระบบ



รูปที่ 4.22 แสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ที่ระบบ

ก) สายไลน์ที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2nd FT ANALYZER									
0.000		0.0000		N: 5nd. "0		NOISE FREQ: 500Hz		UNZIP	
3rd. 62	No.	Hz		Ur		Hz		Ur	
1	50.0020	95.3769m		19		123.144		593.444m	
2	249.953	5.37672m		20		324.108		582.431m	
3	149.584	1.99402m		21		220.896		495.762m	
4	449.983	1.61784m		22		439.680		492.772m	
5	99.8534	1.49618m		23		169.082		485.802m	
6	349.834	1.41043m		24		114.039		478.134m	
7	399.477	894.383m		25		232.875		452.232m	
8	300.175	841.703m		26		379.117		430.842m	
9	444.734	797.883m		27		474.383		349.502m	
10	78.0859	770.042m		28		488.750		353.424m	
11	32.3388	752.420m		29		171.250		332.924m	
12	89.1460	725.027m							
13	281.938	721.884m							
14	241.453	711.734m							
15	179.348	676.354m							
16	242.195	619.508m							
17	135.516	617.670m							
18	11.5034	613.607m							

0.000

0.0000

50.00

500.0

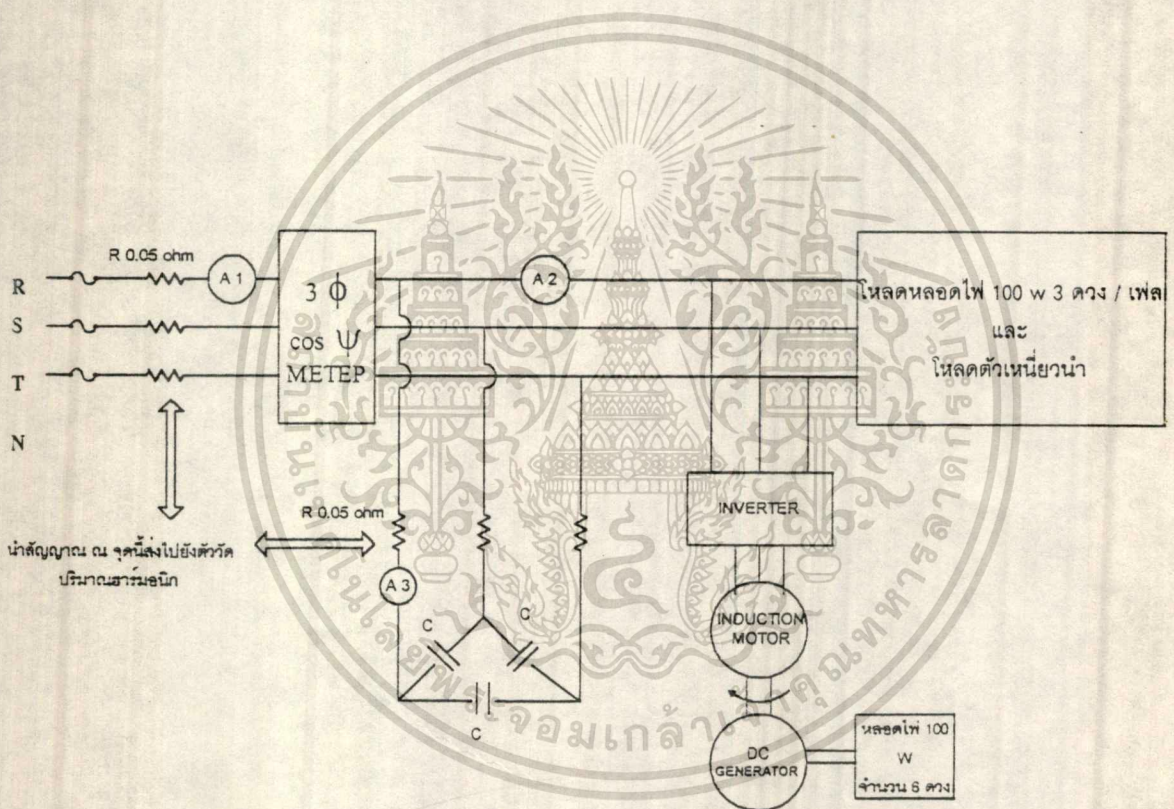
1.250000m

800.000000c

[illegible]

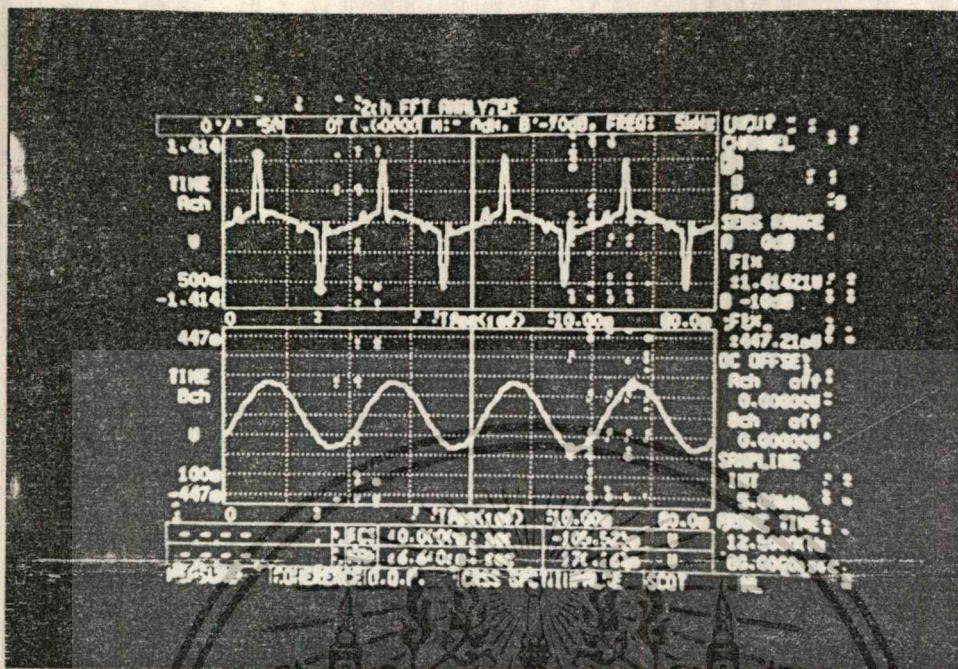
2. กรณีที่ ระบบประกอบไปด้วยโหลดหลอดไฟขนาด 100 วัตต์ 9 หลอด โหลด ตัวเหนี่ยวนำ ต่อแบบเดลต้า และมี อินเวอร์เตอร์ ขับมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 กิโลวัตต์ คับปลั๊ กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง และจ่ายโหลด 600 วัตต์ มีค่าตัวประกอบกำลัง 0.75 กระแส $I_1=3.5$ แอมป์ $I_2=6$ แอมป์ $I_3=4$ แอมป์ ดังรูปที่ 4.25

จุดประสงค์เพื่อทำการวัดปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดจากการต่อ โหลดที่เป็นแหล่ง กำเนิดฮาร์มอนิก เพิ่มเข้ามา โดยทำการวัดเปรียบเทียบกัน 2 จุด คือที่ระบบโดยรวม และที่ตัวคาปาซิเตอร์ แสดงรูปคลื่นแรงดัน , กระแสและปริมาณฮาร์มอนิกดังรูป

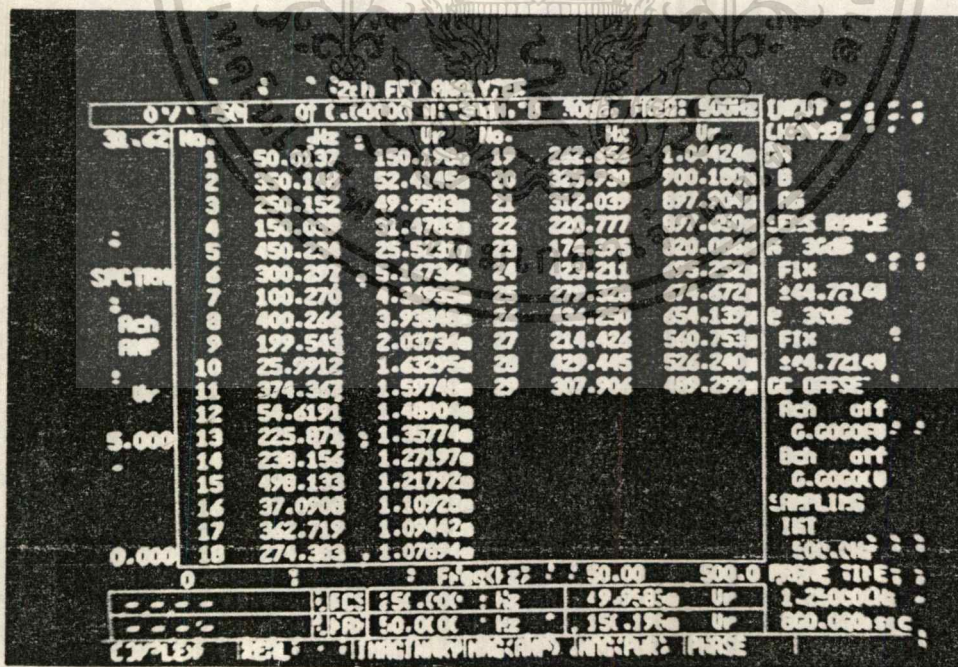


รูปที่ 4.25 แสดงระบบจำลองกรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสในระบบ



รูปที่ 4.27 แสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกลำดับต่างๆ ที่ระบบ

ก) สายไลน์ที่ 1

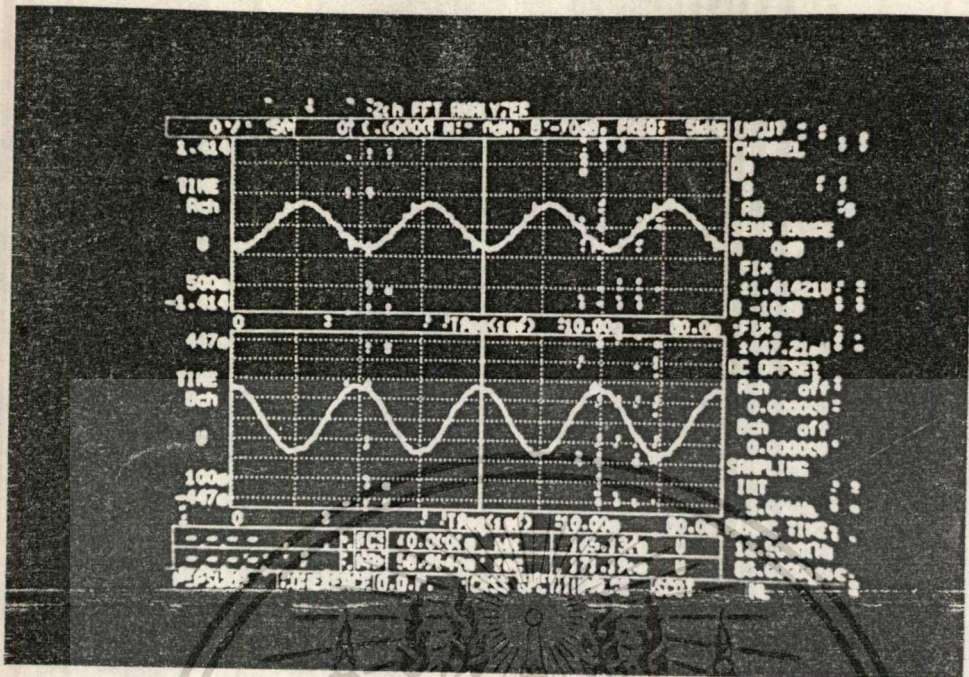
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2th FFT ANALYSES										
0.0	50	OF 1.0000 N=5000, B				MODE, FREQ: 5000		UNOUT : : : :		
31.42	No.	Hz	Ur	No.	Hz	Ur	LWSEL : : : :			
	1	50.0000	161.388n	19	474.984	1.01150n	GR			
	2	250.012	51.3918n	20	218.293	935.844n	B			
	3	350.000	49.4404n	21	242.014	930.728n	AS			
	4	150.000	36.3349n	22	175.539	890.019n	SEPS RMSE			
	5	450.008	32.1081n	23	369.188	879.483n	A 30dB			
SPECTRUM	6	199.758	5.64055n	24	322.102	784.691n	FIX			
:	7	399.773	4.04932n	25	424.109	731.583n	±44.7714n			
Rich	8	99.5254	3.64191n	26	314.941	718.095n	E 30dB			
AMP	9	25.3768	2.07184n	27	248.790	611.300n	FIX			
:	10	37.3887	1.88184n	28	432.904	559.941n	±44.7214n			
Ur	11	299.773	1.73345n	29	160.578	549.694n	GC OFFSE			
	12	74.5234	1.71775n	30	413.148	524.672n	Rich off			
5.000	13	225.484	1.53417n				G.00000n			
	14	375.258	1.47367n				Rich off			
	15	274.398	1.44503n				G.00000			
	16	325.441	1.41450n				LWFLING			
	17	331.570	1.38271n				INT			
0.000	18	120.334	1.25940n				LOC. CH			
0	FREQ: 2 : : 50.00						500.0			
---	FREQ		50.000	Hz	51.3918n	Ur	FREQ TIME :			
---	LWFL		50.0000	Hz	161.388n	Ur	1.23000n			
C:\PLOT		REAL	IMAG		PHASE					

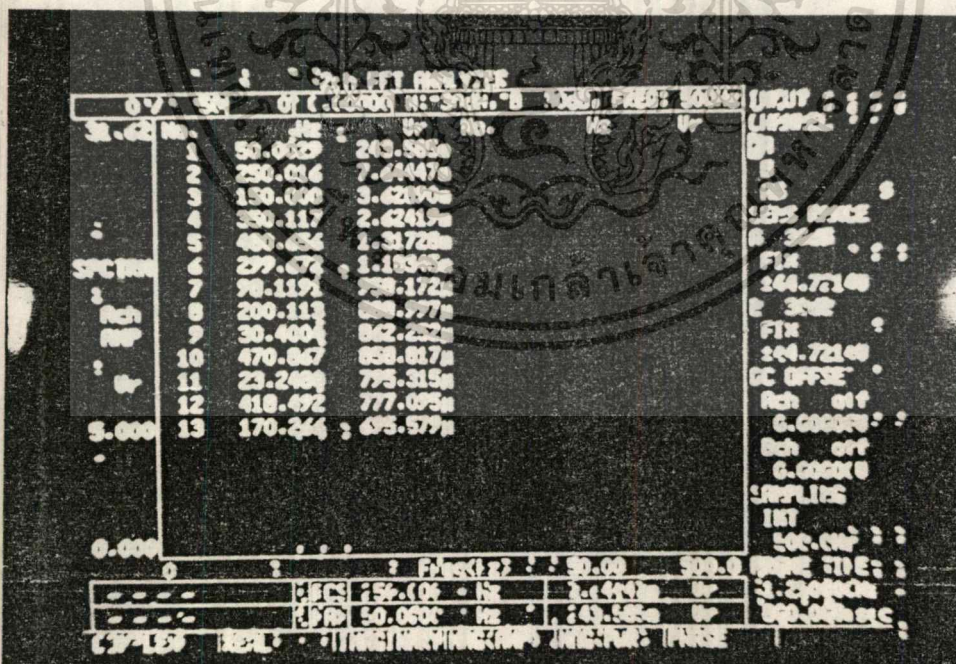
ข) สายโลนที่ 2

2ch FTI ANALYZER									
0.000		500		of 1.0000 Hz		500.000		500.000	
31.62	No.	Hz	Ur	No.	Hz	Ur	Ur	Ur	Ur
1	49.9824	184.240m	19	225.184	1.10105m	1.10105m	1.10105m	1.10105m	1.10105m
2	349.904	68.2924m	20	337.109	1.10022m	1.10022m	1.10022m	1.10022m	1.10022m
3	249.918	68.0735m	21	30.5306	1.04902m	1.04902m	1.04902m	1.04902m	1.04902m
4	199.742	7.50423m	22	237.640	999.614m	999.614m	999.614m	999.614m	999.614m
5	100.150	7.42039m	23	180.148	923.843m	923.843m	923.843m	923.843m	923.843m
6	399.297	4.58283m	24	490.472	916.202m	916.202m	916.202m	916.202m	916.202m
7	149.801	4.93246m	25	262.164	896.393m	896.393m	896.393m	896.393m	896.393m
8	449.992	3.93818m	26	311.695	826.788m	826.788m	826.788m	826.788m	826.788m
9	299.690	3.12004m	27	469.595	811.724m	811.724m	811.724m	811.724m	811.724m
10	374.594	1.88138m	28	122.598	781.472m	781.472m	781.472m	781.472m	781.472m
11	24.6865	1.78106m	29	143.441	740.541m	740.541m	740.541m	740.541m	740.541m
12	274.537	1.44441m	30	485.602	646.705m	646.705m	646.705m	646.705m	646.705m
13	74.6855	1.45005m	31	136.898	631.323m	631.323m	631.323m	631.323m	631.323m
14	325.273	1.44503m	32	117.885	623.714m	623.714m	623.714m	623.714m	623.714m
15	94.6191	1.43998m	33	404.391	590.380m	590.380m	590.380m	590.380m	590.380m
16	62.1543	1.38460m							
17	37.4111	1.27981m							
18	294.633	1.17381m							

ค) สายโลนที่ 3



รูปที่ 4.28 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่คาปาซิเตอร์



รูปที่ 4.29 แสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกลำดับต่างๆ ที่คาปาซิเตอร์

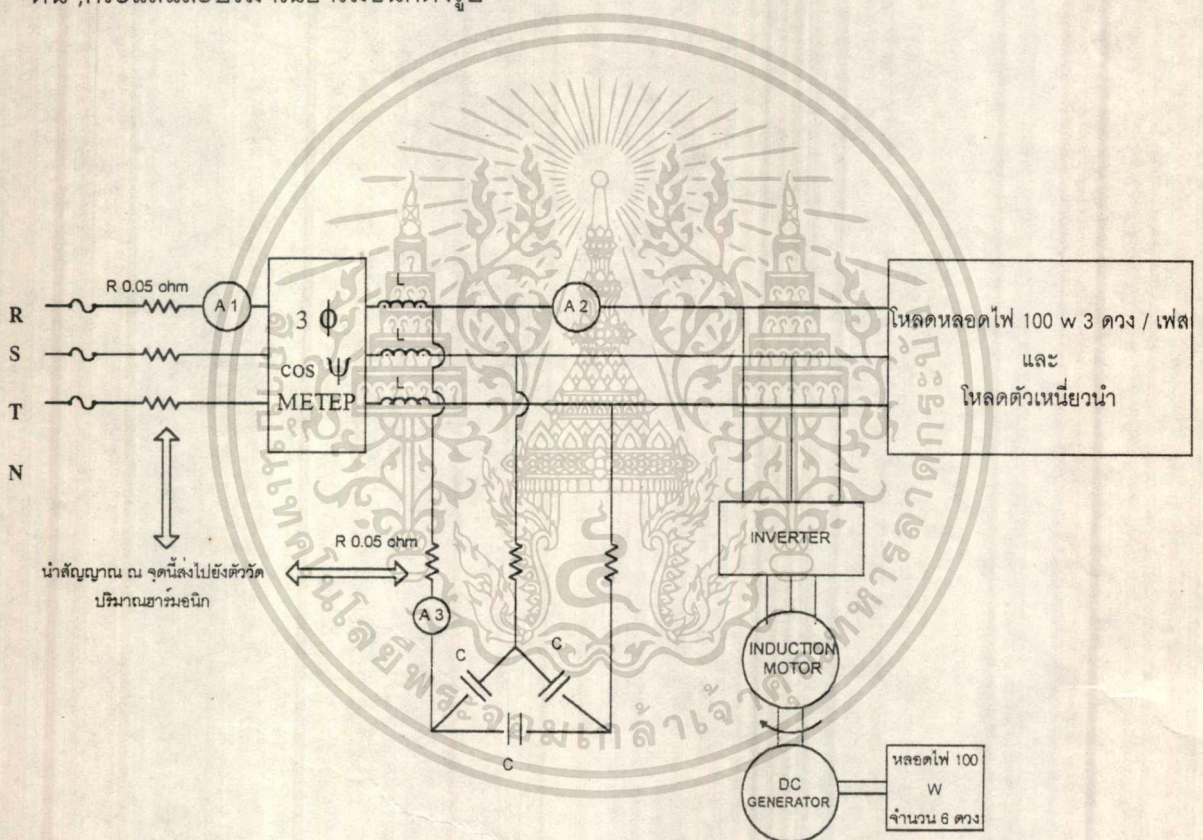
ก) สายไลน์ที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[illegible]

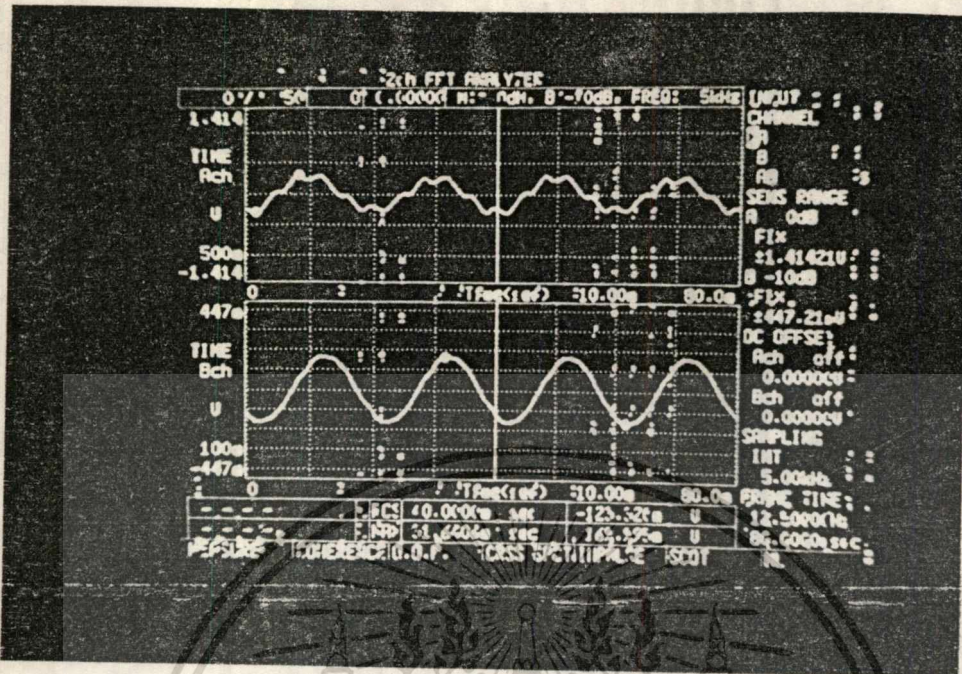
3. กรณีที่ ระบบประกอบไปด้วยโหลดหลอดไฟขนาด 100 วัตต์ 9 หลอด โหลดตัวเหนี่ยวนำที่ต่อแบบเดลต้า และมี อินเวอร์เตอร์ ขับมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 กิโลวัตต์ คับปลั๊กกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง และจ่ายโหลด 600 วัตต์ และมีวงจรกรองฮาร์มอนิกเพื่อป้องกันระบบ โดยมีค่าตัวประกอบกำลัง 1.0 กระแส $I_1=4.0$ แอมป์ $I_2=6$ แอมป์ $I_3=4$ แอมป์ ดังรูปที่ 4.30

จุดประสงค์เพื่อทำการวัดปริมาณฮาร์มอนิกเมื่อทำการต่อวงจรกรองแบบป้องกันระบบ โดยทำการวัดเปรียบเทียบกัน 2 จุด คือที่ระบบโดยรวม และที่ตัวคาปาซิเตอร์ แสดงรูปคลื่นแรงดัน , กระแสและปริมาณฮาร์มอนิกดังรูป



รูปที่ 4.30 แสดงระบบจำลองกรณีที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารของงานวิจัยที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่ระบบ

No.	Hz	Ur	No.	Hz	Ur
1	50.0144	99.4482μ	19	395.454	428.435μ
2	250.051	20.5451μ	20	143.140	594.128μ
3	150.109	10.5051μ	21	294.375	594.027μ
4	350.141	5.82275μ	22	409.852	583.212μ
5	37.4367	2.03444μ	23	318.852	575.144μ
6	42.3240	1.89870μ	24	487.023	547.417μ
7	100.352	1.41835μ	25	209.875	539.941μ
8	74.4211	1.34948μ	26	225.500	530.114μ
9	259.133	957.935μ	27	231.723	523.859μ
10	220.813	915.954μ	28	324.543	472.155μ
11	185.739	903.709μ	29	425.449	454.858μ
12	450.273	817.031μ			
13	482.834	814.474μ			
14	249.441	761.132μ			
15	441.084	696.232μ			
16	310.508	642.943μ			
17	419.438	642.744μ			
18	328.423	640.973μ			

CHS	Hz	Ur	TIME
1	151.104	70.5451μ	1.250001s
2	100.000	100.000μ	800.0000s

รูปที่ 4.32 แสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ที่ระบบ

ก) สายไลน์ที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2ch FFT ANALYZER

0.0000 Hz		5.0000 Hz		500.0000 Hz		UNIT
No.	Hz	Ur	No.	Hz	Ur	CHANNEL
1	49.9707	129.069m	19	98.2949	633.480m	CH
2	249.828	28.3659m	20	290.578	613.978m	B
3	349.758	6.10576m	21	371.727	612.495m	AG
4	149.805	4.54083m	22	114.352	594.601m	LEIS RANCE
5	62.3818	1.62773m	23	237.744	592.684m	30dB
6	37.6814	1.20892m	24	107.314	579.104m	Fix
7	74.5801	954.844m	25	390.766	572.986m	144.721m
8	299.508	931.441m	26	191.707	571.794m	30dB
9	448.273	898.916m	27	163.129	569.403m	Fix
10	335.758	875.077m	28	215.715	537.779m	144.721m
11	178.359	765.600m	29	435.656	465.242m	DC OFFSE
12	17.2212	755.435m	30	473.750	459.711m	Rich off
13	412.173	755.435m	31	495.828	458.845m	G.COCOF
14	418.016	735.612m	32	235.000	444.498m	Rich off
15	479.430	718.095m	33	85.0000	437.279m	G.COCOF
16	123.121	658.124m				AMPLIF
17	280.391	642.920m				INT
18	60.7832	641.682m				500.000

0.0000 Hz : Freq (Hz) : 50.00 500.0 HZ TIME : 1.250000s

0.0000 Hz : Freq (Hz) : 125.000 500.0 HZ TIME : 800.0000s

CH1 : 1.250000s CH2 : 800.0000s

ข) สายไลน์ที่ 2

2ch FFT ANALYZER

0.0000 Hz		5.0000 Hz		500.0000 Hz		UNIT
No.	Hz	Ur	No.	Hz	Ur	CHANNEL
1	50.0303	123.825m	19	274.328	670.615m	CH
2	250.156	20.4827m	20	233.023	667.387m	B
3	150.023	9.87977m	21	495.555	640.440m	AG
4	350.234	5.21222m	22	215.520	594.319m	LEIS RANCE
5	37.7588	1.90540m	23	474.250	565.796m	30dB
6	100.152	1.88090m	24	159.000	537.568m	Fix
7	62.1933	1.81795m	25	112.723	462.177m	144.721m
8	25.2544	1.16778m	26	457.633	454.863m	30dB
9	415.414	1.09981m	27	444.500	448.952m	Fix
10	10.7371	1.03045m	28	178.074	436.889m	144.721m
11	211.243	913.219m				DC OFFSE
12	144.289	858.553m				Rich off
13	397.133	815.080m				G.COCOF
14	184.676	766.194m				Rich off
15	282.969	749.998m				G.COCOF
16	197.281	737.772m				AMPLIF
17	134.336	728.781m				INT
18	124.561	718.728m				500.000

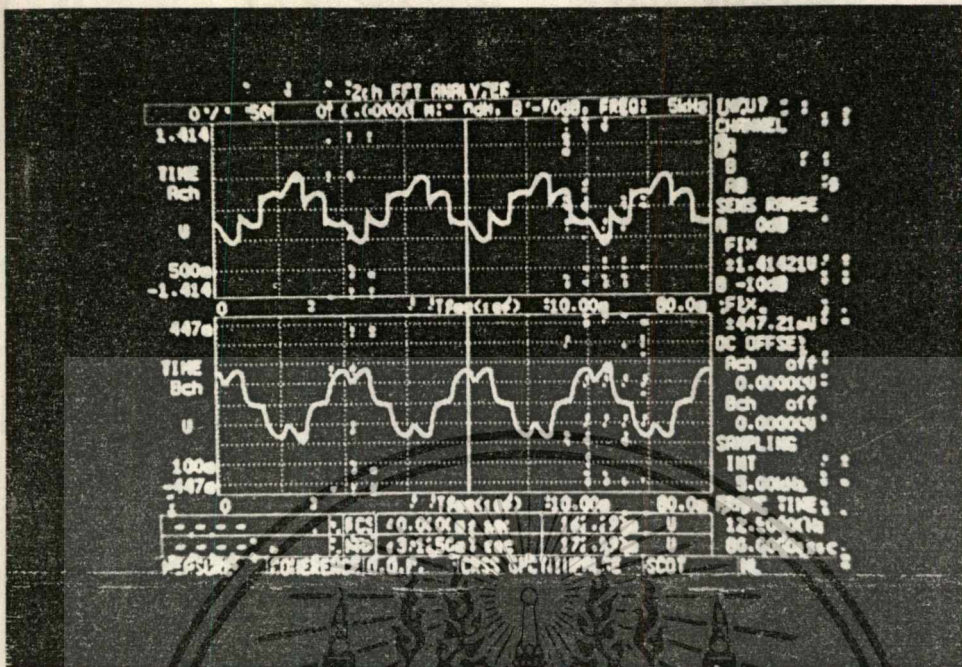
0.0000 Hz : Freq (Hz) : 50.00 500.0 HZ TIME : 1.250000s

0.0000 Hz : Freq (Hz) : 125.000 500.0 HZ TIME : 800.0000s

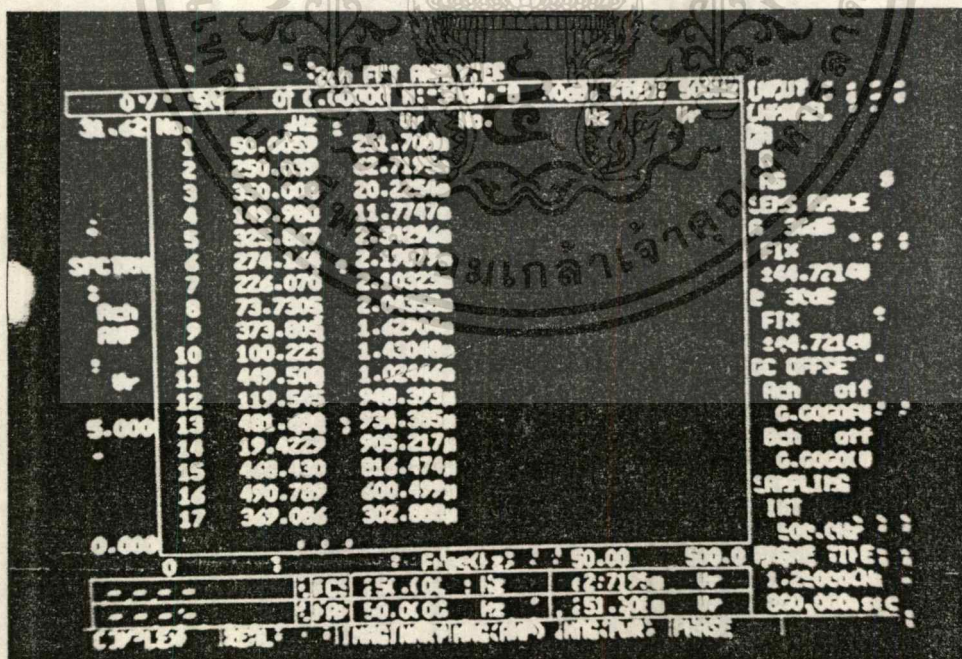
CH1 : 1.250000s CH2 : 800.0000s

ค) สายไลน์ที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



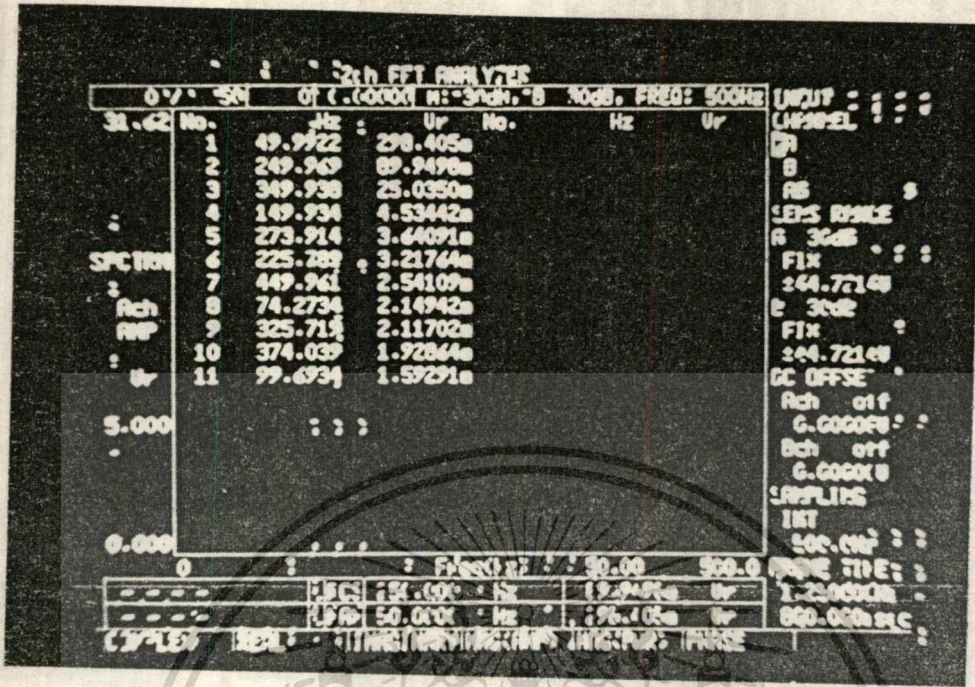
รูปที่ 4.33 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่คาปาซิเตอร์



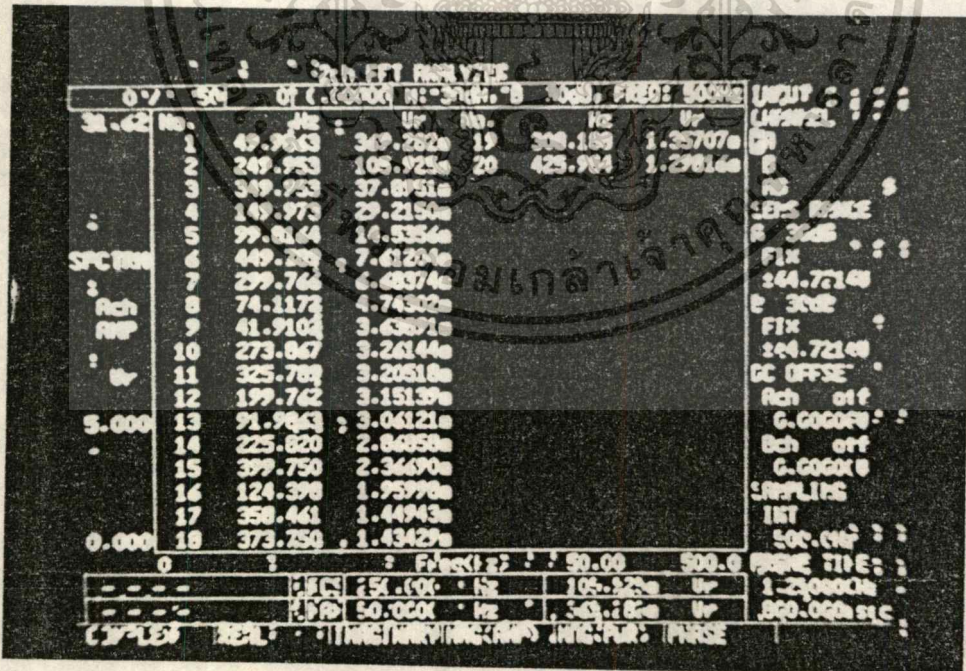
รูปที่ 4.34 แสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ที่คาปาซิเตอร์

ก) สายไลน์ที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) สายไลน์ที่ 2

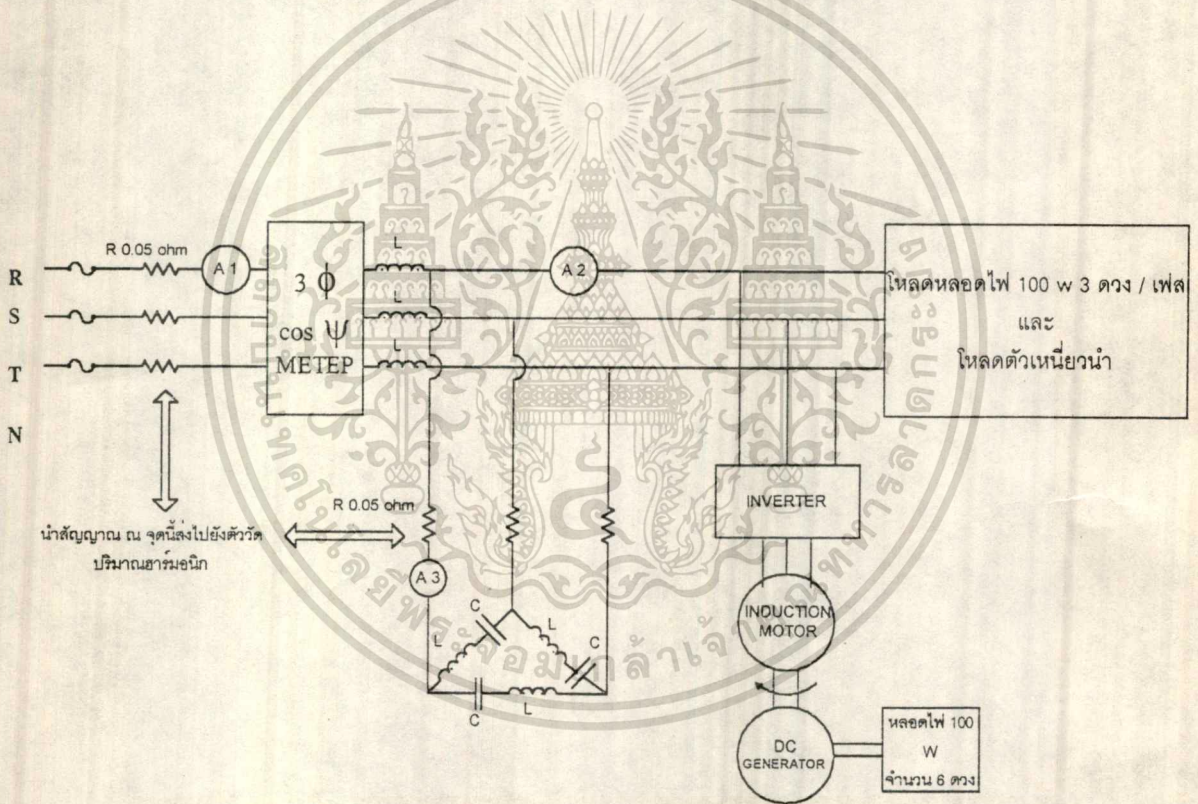


ค) สายโลนที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

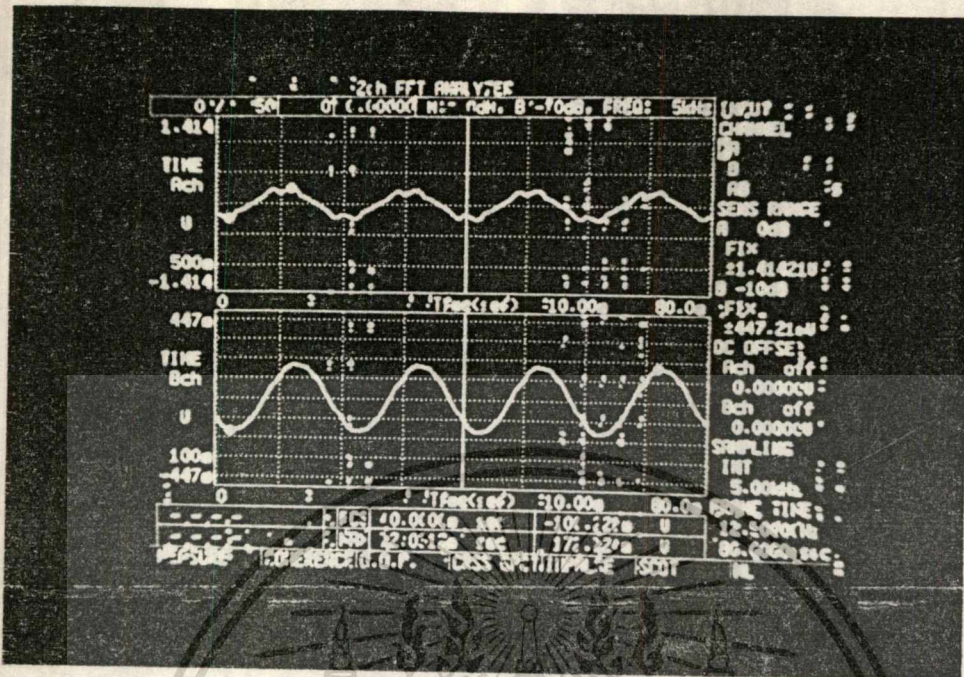
4. กรณีระบบประกอบไปด้วยโหลดหลอดไฟขนาด 100 วัตต์ 9 หลอด โหลดตัวเหนี่ยวนำ ต่อแบบเดลต้า และมี อินเวอร์เตอร์ ขับมอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 กิโลวัตต์ คับปลั๊กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง และจ่ายโหลด 600 วัตต์ และมีวงจรกรองฮาร์มอนิกเพื่อป้องกันคาปาซิเตอร์เสียหายเนื่องจากฮาร์มอนิกโดยมีค่าตัวประกอบกำลัง 1.0 กระแส $I_1=4.0$ แอมป์ $I_2=6$ แอมป์ $I_3=4$ แอมป์ ดังรูปที่ 4.33

จุดประสงค์เพื่อทำการวัดปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดจากการต่อวงจรแบบป้องกันคาปาซิเตอร์ โดยทำการวัดเปรียบเทียบกัน 2 จุด คือที่ระบบโดยรวม และที่ตัวคาปาซิเตอร์ แสดงรูปคลื่นแรงดัน , กระแสและปริมาณฮาร์มอนิกดังรูป



รูปที่ 4.35 แสดงระบบจำลอง กรณีที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



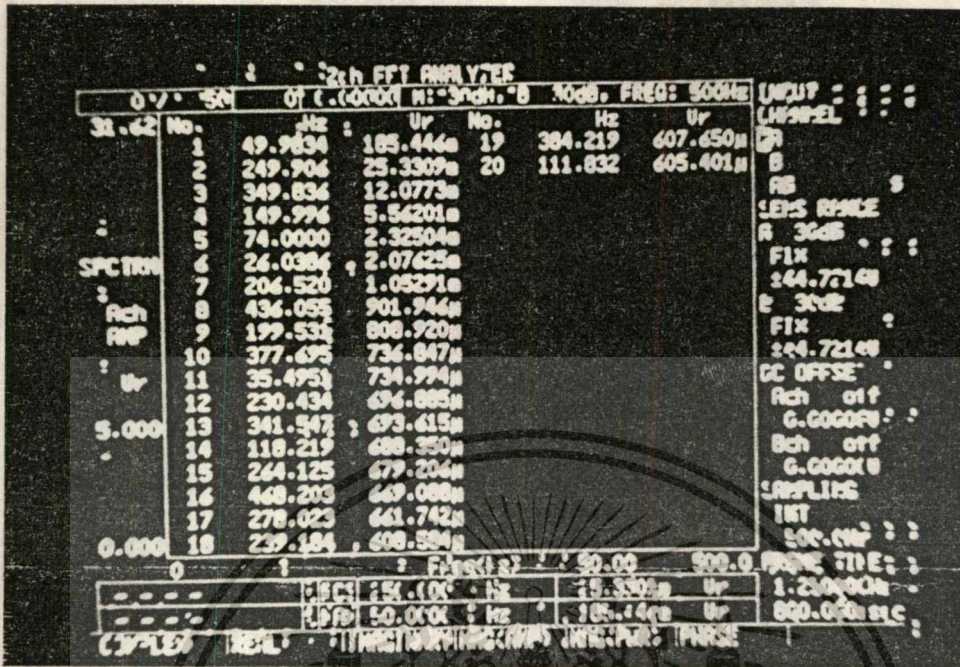
รูปที่ 4.36 แสดงรูปคลื่นของแรงดันและกระแสที่ระบบ

2ch FFT ANALYZER							UNIT
0.7 V 50 Hz 10.00ms 50.00Hz	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	UNIT
1	50.0107	190.788m	19	330.680	629.158m		UNIT
2	250.004	24.3849m					UNIT
3	350.000	13.2845m					UNIT
4	149.967	5.67443m					UNIT
5	53.8374	3.75308m					UNIT
6	74.0527	2.78623m					UNIT
7	25.7676	1.88717m					UNIT
8	100.408	1.14775m					UNIT
9	450.383	942.140m					UNIT
10	234.371	940.932m					UNIT
11	281.688	891.551m					UNIT
12	138.926	849.769m					UNIT
13	85.5828	829.733m					UNIT
14	482.953	701.113m					UNIT
15	78.2788	697.537m					UNIT
16	90.5605	689.010m					UNIT
17	405.750	645.340m					UNIT
18	477.853	658.987m					UNIT
0.000							UNIT
0							UNIT
10.00ms							UNIT
50.00Hz							UNIT
12.5000Hz							UNIT
80.0000ms							UNIT

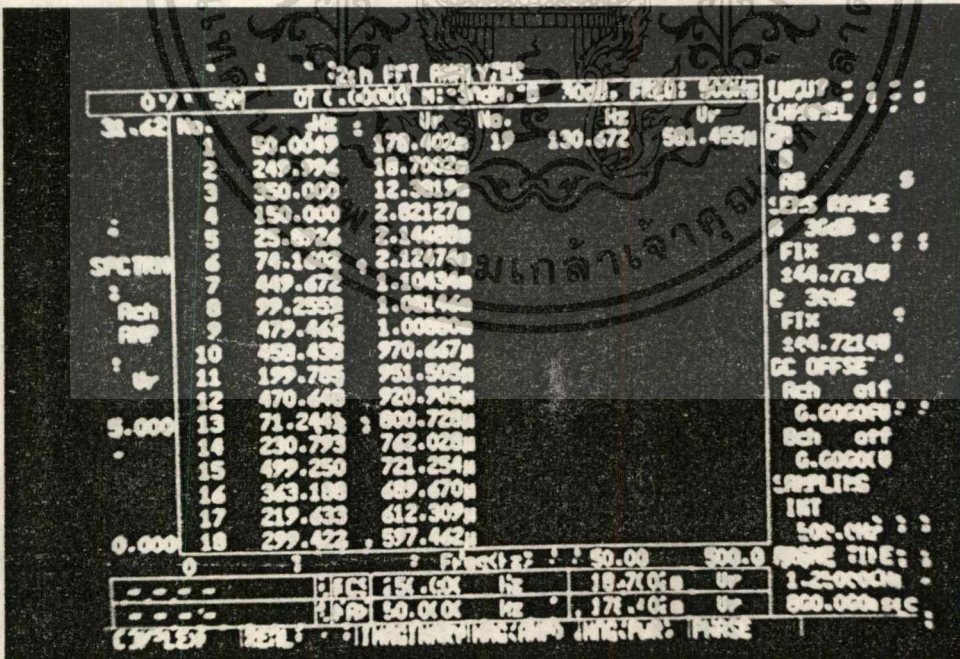
รูปที่ 4.37 แสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ที่ระบบ

ก) สายไลน์ที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) สายโลนที่ 2



ค.) สายไลน์ที่ 3

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[illegible]

ก) สายไลน์ที่ 1

[illegible]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการทดลองใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์วิเคราะห์ฟูเรียร์

4.4.1 รูปคลื่นสี่เหลี่ยม

PERIOD IN SECONDS = .01

NUMBER OF SAMPLES PER CYCLE = 20

NUMBER OF HARMONICS = 10

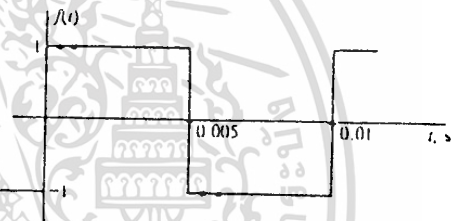
SUMMARY OF INPUT DATA

THE PERIOD T = .01

THE SAMPLES ARE:

$F(1) = 1$
 $F(2) = 1$
 $F(3) = 1$
 $F(4) = 1$
 $F(5) = 1$
 $F(6) = 1$
 $F(7) = 1$
 $F(8) = 1$
 $F(9) = 1$
 $F(10) = 0$
 $F(11) = -1$
 $F(12) = -1$
 $F(13) = -1$
 $F(14) = -1$
 $F(15) = -1$
 $F(16) = -1$
 $F(17) = -1$
 $F(18) = -1$
 $F(19) = -1$
 $F(20) = 0$

วงจรรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square wave)



THE AVERAGE VALUE $A(0)/2 = 0$

N	FREQ. IN Hz.	a(n)	b(n)
1	100	-.0001	1.2627
2	200	0	0
3	300	-.0001	.3925
4	400	-.0001	0
5	500	-.0001	.2
6	600	0	0
7	700	-.0001	.1019
8	800	-.0001	0
9	900	-.0001	.0316
10	1000	-.0001	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N	FREQ. IN Hz.	C(n)	THETA(n)
0	0	0	-----
1	100	1.2626	90.01102
2	200	0	-180.0131
3	300	.3925	90.02109
4	400	0	-180.0131
5	500	.2	90.03513
6	600	0	-180.0131
7	700	.1019	90.06272
8	800	0	-180.0131
9	900	.0316	90.18781
10	1000	0	-180.0131

THE PERCENT OF HARMONIC

N	PERCENT
1	100
2	0
3	31.08665
4	0
5	15.84033
6	0
7	8.070643
8	0
9	2.502772
10	0
%THD (IEEE STANDARD) = 35.8984	

4.4.2 รูปคลื่นอุปกรณ์ เฟสคอนโทรลเรกติไฟเออร์

PERIOD IN SECONDS = .02

NUMBER OF SAMPLES PER CYCLE = 24

NUMBER OF HARMONICS = 15

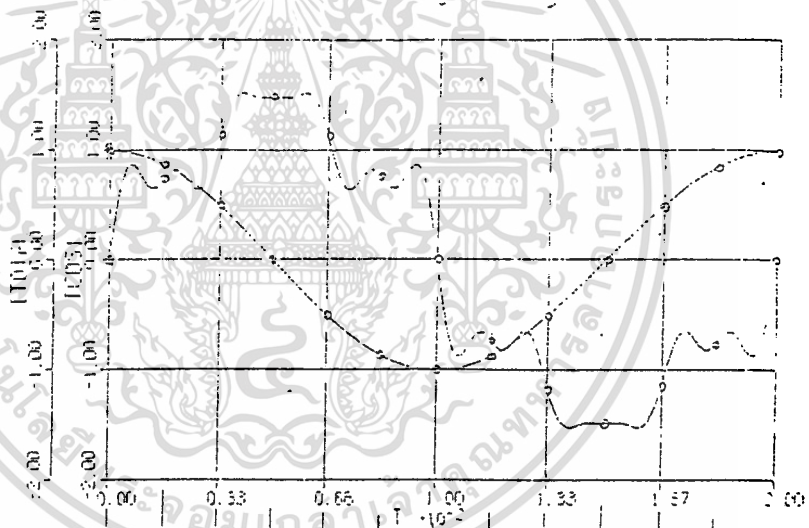
SUMMARY OF INPUT DATA

THE PERIOD T = .02

THE SAMPLES ARE:

F(1) = 0
 F(2) = .79
 F(3) = .75
 F(4) = .65
 F(5) = 1.12
 F(6) = 1.52
 F(7) = 1.5
 F(8) = 1.52
 F(9) = 1.12
 F(10) = .67
 F(11) = .75
 F(12) = .87
 F(13) = 0
 F(14) = -.79
 F(15) = -.75
 F(16) = -.65
 F(17) = -1.12
 F(18) = -1.52
 F(19) = -1.5
 F(20) = -1.52
 F(21) = -1.12
 F(22) = -.67
 F(23) = -.75
 F(24) = -.87

วงจร เฟสคอนโทรลเรกติไฟเออร์ (Phase Controlled Rectifiers)



THE AVERAGE VALUE $A(0)/2 = 3.476937E-08$

N	FREQ. IN Hz.	a(n)	b(n)
1	50	-.381	1.3627
2	100	-.0001	0
3	150	-.0001	-.01
4	200	0	-.0001
5	250	-.2848	.0751
6	300	-.0001	-.0001
7	350	-.1849	-.0485
8	400	-.0001	-.0001
9	450	-.0001	.0099
10	500	-.0001	-.0001
11	550	-.0195	-.0137
12	600	-.0001	-.0001
13	650	-.0195	.0136
14	700	0	-.0001
15	750	0	-.0101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด 14 ยังสิ้น อีกทั้งห้ามให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE C(n) AND THETA(n) ARE

N	FREQ. IN Hz.	C(n)	THETA(n)
0	0	3.476937E-08	
1	50	1.4149	105.6282
2	100	0	-180.0131
3	150	.01	-90.57947
4	200	0	-90.00684
5	250	.2945	165.2397
6	300	.0001	-135.0098
7	350	.1911	-165.3142
8	400	.0001	-135.0098
9	450	.0099	90.58525
10	500	.0001	-135.0098
11	550	.0238	-144.92
12	600	.0001	-135.0098
13	650	.0237	145.1172
14	700	0	-90.00684
15	750	.01	-90.00684

THE PERCENT OF HARMONIC

N	PERCENT
1	100
2	0
3	.7067637
4	0
5	20.81419
6	7.067638E-03
7	13.50626
8	7.067638E-03
9	.6996961
10	7.067638E-03
11	1.682098
12	7.067638E-03
13	1.67503
14	0
15	.7067637

%THD (IEEE STANDARD) = 24.95543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 รูปคลื่นอุปกรณ์ซึ่งเกิดเฟส สวิทชิงเพาเวอร์เวอร์ซัพพลาย

PERIOD IN SECONDS = .0167

NUMBER OF SAMPLES PER CYCLE = 24

NUMBER OF HARMONICS = 13

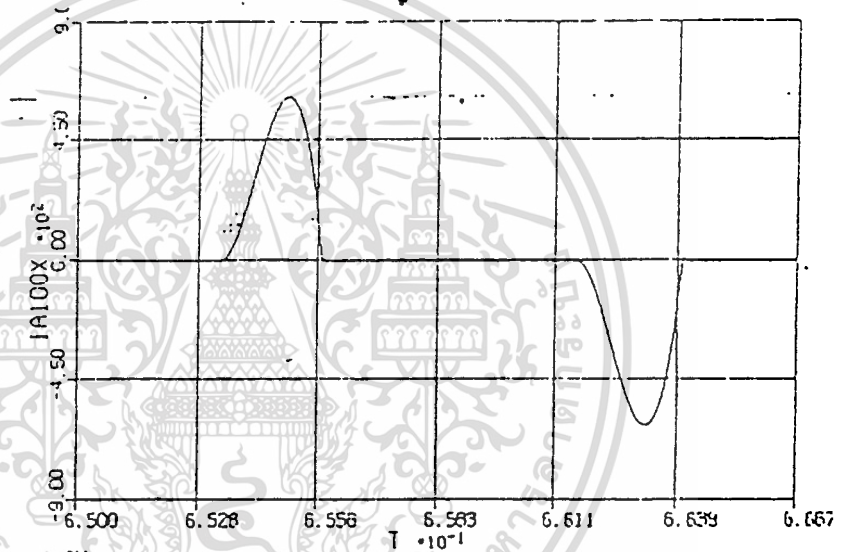
SUMMARY OF INPUT DATA

THE PERIOD T = .0167

THE SAMPLES ARE:

F(1) = 0
 F(2) = 0
 F(3) = 0
 F(4) = 0
 F(5) = 0
 F(6) = 0
 F(7) = 3.656
 F(8) = 6.047
 F(9) = 1.688
 F(10) = 0
 F(11) = 0
 F(12) = 0
 F(13) = 0
 F(14) = 0
 F(15) = 0
 F(16) = 0
 F(17) = 0
 F(18) = 0
 F(19) = -3.656
 F(20) = -6.047
 F(21) = -1.688
 F(22) = 0
 F(23) = 0
 F(24) = 0

Single Phase Switching Mode Power Supply



THE AVERAGE VALUE $A(0)/2 = -9.934103E-09$

N	FREQ. IN HZ.	a(n)	b(n)
1	59.83024	-.3606	1.6603
2	119.7605	-.0001	0
3	179.6407	1.6376	-.2319
4	239.521	0	0
5	299.4012	-.8936	-.9141
6	359.2814	-.0001	-.0001
7	419.1617	-.1144	.3315
8	479.0419	-.0001	0
9	538.9222	.378	-.232
10	598.8024	0	-.0001
11	658.6827	-.1473	-.0854
12	718.5629	-.0001	-.0001
13	778.4431	-.1473	.0852

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE C(n) AND THETA(n) ARE

N	FREQ. IN Hz.	C(n)	THETA(n)
0	0	-9.934108E-09	
1	59.83024	1.87	117.408
2	119.7605	0	-180.0131
3	179.6407	1.6539	-8.060638
4	239.521	0	-180.0131
5	299.4012	1.2783	-134.36
6	359.2814	.0001	-135.0098
7	419.1617	.8393	97.84078
8	479.0419	0	-180.0131
9	538.9222	.4435	-31.54212
10	598.8024	0	-90.00684
11	658.6827	.1702	-149.9071
12	718.5629	.0001	-135.0098
13	778.4431	.1701	149.9653

THE PERCENT OF HARMONIC

N	PERCENT
1	100
2	0
3	88.44386
4	0
5	68.35829
6	5.347593E-03
7	44.88235
8	0
9	23.71658
10	0
11	9.101604
12	5.347593E-03
13	9.096257

%THD (IEEE STANDARD) = 125.163

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.4 รูปคลื่นอุปกรณ์ พัดบลิเอ็ม

PERIOD IN SECONDS = .0167

NUMBER OF SAMPLES PER CYCLE = 25

NUMBER OF HARMONICS = 15

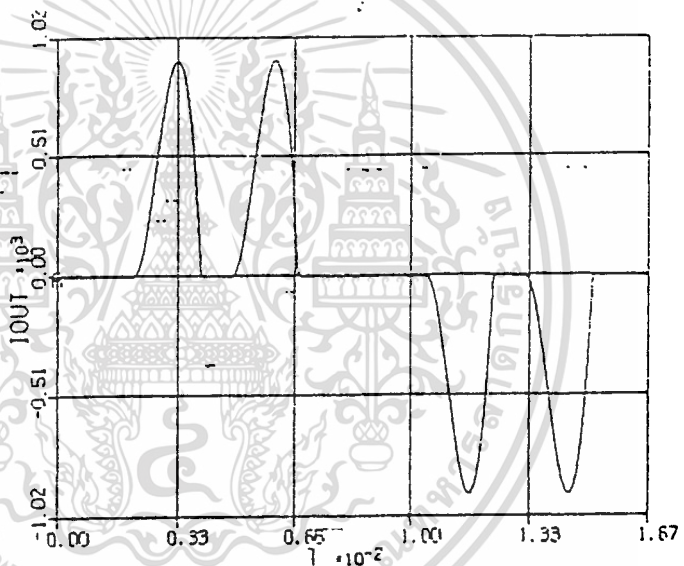
SUMMARY OF INPUT DATA

THE PERIOD T = .0167

THE SAMPLES ARE:

F(1) = 0
 F(2) = 0
 F(3) = 0
 F(4) = 0
 F(5) = .374
 F(6) = .952
 F(7) = 0
 F(8) = 0
 F(9) = .272
 F(10) = .544
 F(11) = .408
 F(12) = 0
 F(13) = 0
 F(14) = 0
 F(15) = 0
 F(16) = 0
 F(17) = -.374
 F(18) = -.952
 F(19) = 0
 F(20) = 0
 F(21) = -.272
 F(22) = -.544
 F(23) = -.408
 F(24) = 0
 F(25) = 0

(PWM Invertors with Stiff Sources)



THE AVERAGE VALUE $A(0)/2 = 2.384186E-09$

N	FREQ. IN Hz.	a(n)	b(n)
1	59.88024	-.1104	.3245
2	119.7605	.0123	-.0184
3	179.6407	-.0424	-.014
4	239.521	.0506	.0022
5	299.4012	.2544	.0828
6	359.2814	-.0803	-.0522
7	419.1617	-.1207	-.1027
8	479.0419	.0452	.0185
9	538.9222	.0897	-.0093
10	598.8024	-.0709	.0047
11	658.6827	-.0797	-.0094
12	718.5629	.0516	.0066
13	778.4431	.0516	-.0067
14	838.3234	-.0797	.0093
15	898.2036	-.071	-.0048

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE C(n) AND THETA(n) ARE

N	FREQ. IN Hz.	C(n)	THETA(n)
0	0	2.384186E-09	
1	59.88024	.3427	108.797
2	119.7605	.0221	-56.24228
3	179.6407	.0446	-161.7391
4	239.521	.0506	2.489736
5	299.4012	.2675	18.02993
6	359.2814	.0957	-146.9843
7	419.1617	.1584	-139.6167
8	479.0419	.0488	22.26053
9	538.9222	.0901	-5.919652
10	598.8024	.071	176.2202
11	658.6827	.0802	-173.2861
12	718.5629	.052	7.289488
13	778.4431	.052	-7.398721
14	838.3234	.0802	173.357
15	898.2036	.0711	-176.1452

THE PERCENT OF HARMONIC

N	PERCENT
1	100
2	6.448789
3	13.0143
4	14.7651
5	78.05661
6	27.9253
7	46.22118
8	14.23936
9	26.29122
10	20.71783
11	23.40239
12	15.17362
13	15.17362
14	23.40239
15	20.74701

THD (IEEE STANDARD) = 112.9049

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5 รูปคลื่นอุปกรณ์ พัดดับลิแวม อินเวอร์เตอร์

PERIOD IN SECONDS = .0167

NUMBER OF SAMPLES PER CYCLE = 26

NUMBER OF HARMONICS = 13

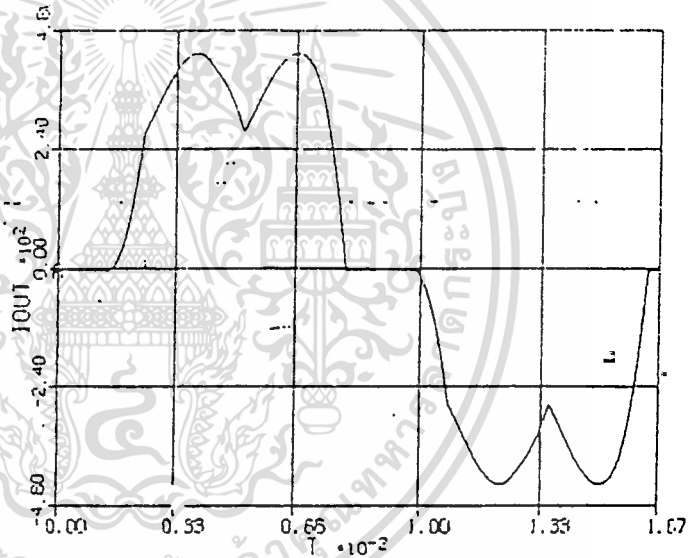
SUMMARY OF INPUT DATA

THE PERIOD T = .0167

THE SAMPLES ARE:

F(1) = 0
 F(2) = 0
 F(3) = 0
 F(4) = .96
 F(5) = 3.04
 F(6) = 4
 F(7) = 4.32
 F(8) = 3.68
 F(9) = 3.04
 F(10) = 3.92
 F(11) = 4.48
 F(12) = 3.36
 F(13) = 0
 F(14) = 0
 F(15) = 0
 F(16) = 0
 F(17) = -.96
 F(18) = -3.04
 F(19) = -4
 F(20) = -4.32
 F(21) = -3.68
 F(22) = -3.04
 F(23) = -3.92
 F(24) = -4.48
 F(25) = -3.36
 F(26) = 0

(PWM Invertors with Soft Sources)



THE AVERAGE VALUE $A(0)/2 = 1.192093E-07$

N	FREQ. IN Hz.	a(n)	b(n)
1	59.38024	-1.7863	3.3876
2	119.7605	-.0001	0
3	179.6407	.2879	-.0067
4	239.521	-.0001	-.0001
5	299.4012	.7044	.8552
6	359.2814	-.0001	0
7	419.1617	.327	.0723
8	479.0419	-.0001	0
9	538.9222	.1603	-.0981
10	598.8024	-.0001	0
11	658.6827	.2264	.0755
12	718.5629	0	0
13	778.4431	.1599	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่คำนวณไว้สำหรับ... เพื่อการ... เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ห้ามมิให้ดัดแปลง... และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE C(n) AND THETA(n) ARE

N	FREQ. IN Hz.	C(n)	THETA(n)
0	0	1.192093E-07	
1	59.88024	4.0077	116.4776
2	119.7605	0	-180.0131
3	179.6407	.2879	-1.333243
4	239.521	.0001	-135.0098
5	299.4012	1.1079	50.52657
6	359.2814	0	-180.0131
7	419.1617	.3348	12.46849
8	479.0419	0	-180.0131
9	538.9222	.1879	-31.46801
10	598.8024	0	-180.0131
11	658.6827	.2386	18.4439
12	718.5629	0	-180.0131
13	778.4431	.1598	0

THE PERCENT OF HARMONIC

N	PERCENT
1	100
2	0
3	7.183671
4	2.495197E-03
5	27.64429
6	0
7	8.353919
8	0
9	4.688475
10	0
11	5.953539
12	0
13	3.987324

%THD (IEEE STANDARD) = 66.10322

4.5 ผลการทดลองใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณหาค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบต่าง ๆ

ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าตัวแปรซึ่งคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ตามอัลกอริทึมในหัวข้อ 3.3 กับค่าซึ่งเกิดจากการคำนวณโดยตรงในหัวข้อ 3.1

4.5.1 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในการชดเชยค่าตัวประกอบกำลัง

Enter Line Voltage : 380 Enter 3 Phase Watt : 2226 Enter Old Power factor : 0.5 Enter New Power factor : 0.951 The Capacitor value = 23.01 uF/Phase The Capacitor value = 1043.94 Var/Phase	
--	--

LC_filter Pure_Cap Exit

รูปที่ 4.40 ผลการรัน (run) โปรแกรมเพื่อหาค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในการชดเชยค่าตัวประกอบกำลัง

4.5.2 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรกรองแบบป้องกันระบบ

Enter Capacitor Value Type. 1).(uF) or 2).(Var 1 Phase) : 1 Cap = 18.75 uF Enter Hamonic number : 5 The inductor value = 21.615185 mH.	
--	--

Install Detune_LC Tune_Filter PF_Compensate Add See_Component Quit

รูปที่ 4.41 ผลการรัน (run) โปรแกรมเพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกอันดับที่ 5

Enter Capacitor Value Type.
 1).(uF) or 2).(Var 1 Phase) : 1
 Cap = 18.75 uF
 Enter Hamonic number : 7
 The inductor value = 11.028156 mH.

Install Detune_LC Tune_Filter PF_Compensate Add See_Component Quit

รูปที่ 4.42 ผลการรัน (run) โปรแกรมเพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกอันดับที่ 7

4.5.3 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในวงจรกรองแบบป้องกันตัวเก็บประจุ

Enter Capacitor value. 1).(uF) or 2).(Var 1 Phase) : 1 Cap = 18.75 uF Enter Hamonic number : 5 The inductor value = 37.826572 mH.	
---	--

Install Detune_LC Tune_Filter PF_Compensate Add See_Component Quit

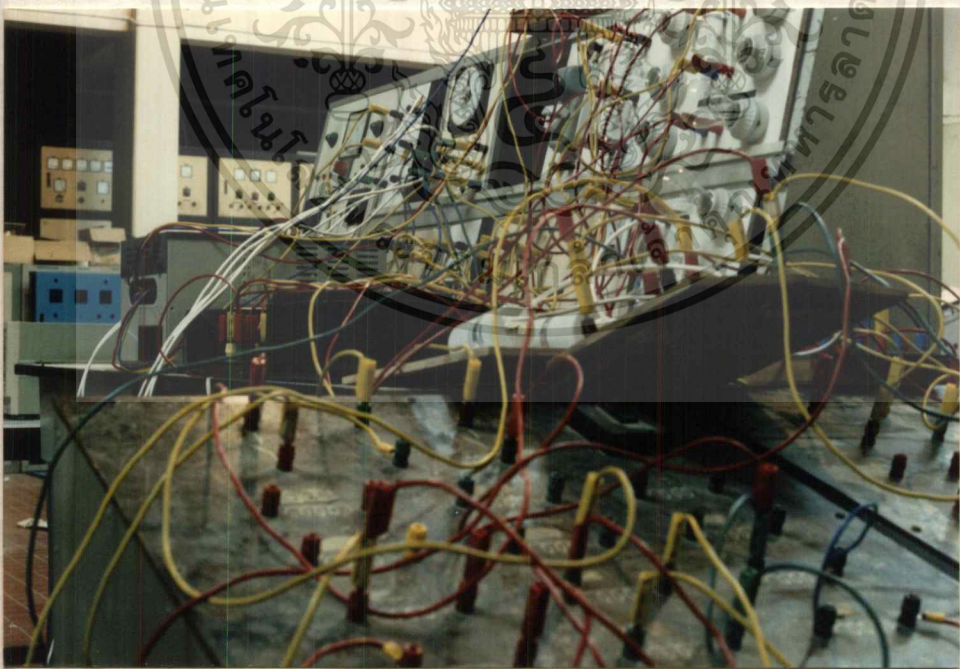
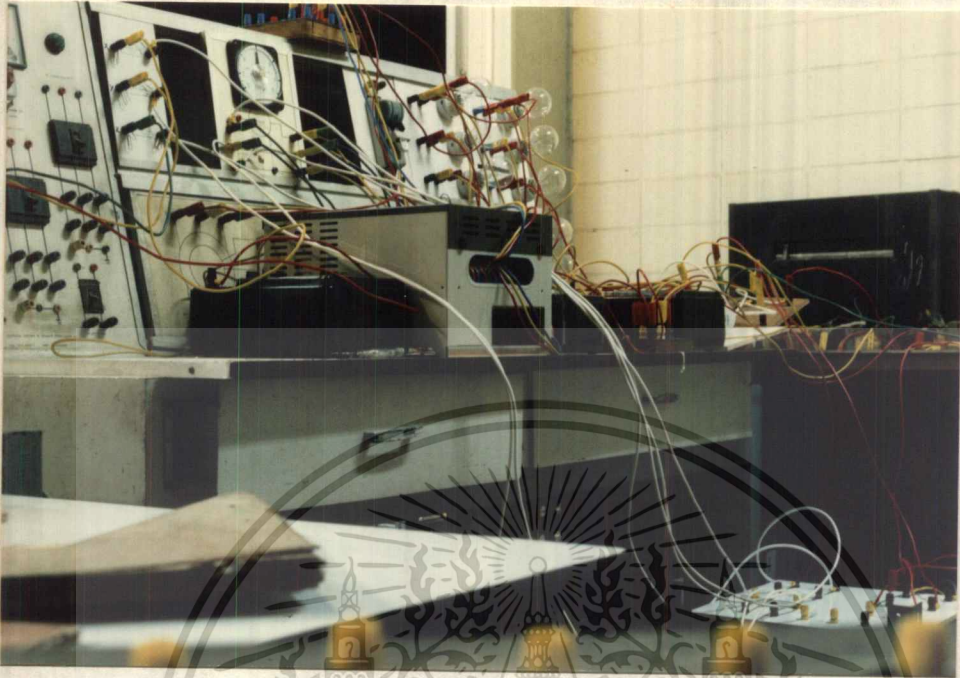
รูปที่ 4.43 ผลการรัน (run) โปรแกรมเพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่สาร์โมนิกอันดับที่ 5

Enter Capacitor value. 1). (uF) or 2). (Var 1 Phase) : 1 Cap = 18.75 uF Enter Hamonic number : 7 The inductor value = 24.479198 mH.	
--	--

Install Detune_LC Tune_Filter PF_Compensate Add See_Component Quit

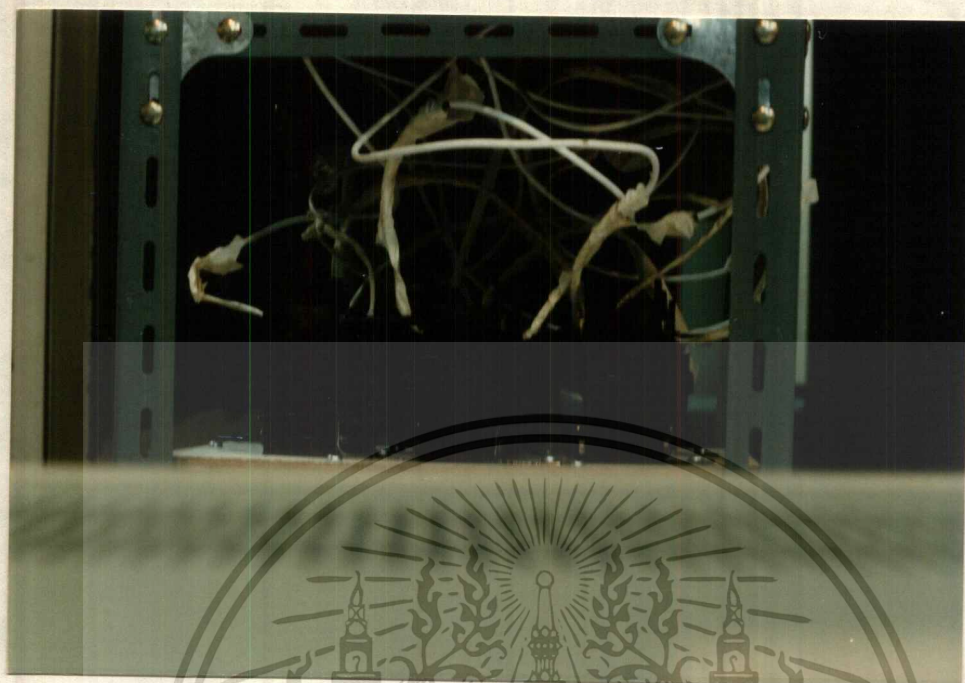
รูปที่ 4.44 ผลการรัน (run) โปรแกรมเพื่อหาค่าตัวเหนี่ยวนำที่ฮาร์โมนิกอันดับที่ 7

4.6 รูปที่ แสดงการทดลองต่ออุปกรณ์จริงในห้องปฏิบัติการและตัววงจรกรองที่ได้ทำการสร้างขึ้น



รูปที่ 4.4.5 แสดงการต่อสายระหว่างอุปกรณ์ที่นำมาทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.46 แสดงวงจรกรองที่ได้ทำการสร้างขึ้น



บทที่ 5

สรุป วิจารณ์ และปัญหาที่พบ

สำหรับการทดลองนั้น ได้ทำการสร้างวงจรกรองฮาร์มอนิกด้วยกันสองแบบ คือ

1. วงจรกรองป้องกันระบบ
2. วงจรกรองป้องกันคาปาซิเตอร์อันเนื่องมาจากฮาร์มอนิก

กรณีในการติดตั้งคาปาซิเตอร์ เพื่อแก้ค่าตัวประกอบกำลังให้สูงขึ้น เพื่อประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้า และทำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นนั้น เมื่อมีโหลดซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ได้สร้างฮาร์มอนิกออกมา ทำให้ค่ารีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์มีค่าลดลงที่ความถี่สูงๆ ตามปริมาณของฮาร์มอนิก ทำให้มีปริมาณกระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าคาปาซิเตอร์มาก และมีปริมาณมากขึ้นถ้าเกิดเงื่อนไขรีโซแนนซ์ อาจทำให้คาปาซิเตอร์ระเบิดได้ ดังนั้นจึงทำการออกแบบฟิลเตอร์ ไม่ให้กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านเข้าคาปาซิเตอร์ เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับคาปาซิเตอร์

แต่ในอนาคต การไฟฟ้า ฯ จะออกข้อบังคับเพื่อกำหนดปริมาณฮาร์มอนิกที่จะไหลผ่านเข้าระบบ เพราะฮาร์มอนิกเป็นสาเหตุที่ทำให้สายไฟมีพื้นที่การใช้งานลดลง เนื่องมาจากมีฮาร์มอนิกปะปนอยู่ กระแสจะเต็มพิกัดเร็วขึ้น ทำให้สายไฟและหม้อแปลงไหม้ได้ ทั้งๆ ที่กระแสหลักมูลมีปริมาณไม่มากนัก ดังนั้นจึงศึกษาและสร้าง ฟิลเตอร์ขึ้นมาเพื่อใช้ในการป้องกันฮาร์มอนิกที่จะไหลเข้าสู่ระบบ โดยให้ปริมาณฮาร์มอนิกไหลเข้าที่ตัว คาปาซิเตอร์แทน และสำหรับใน กรณีที่เป็นวงจรกรองแบบป้องกันระบบ ตัวคาปาซิเตอร์ที่ใช้แก้ค่าตัวประกอบกำลังต้องมีขนาดพิกัดที่ทนแรงดันได้สูงขึ้นกว่าตัวคาปาซิเตอร์ที่ใช้สำหรับวงจรกรองแบบป้องกันคาปาซิเตอร์

สำหรับปัญหาที่เกิดขึ้น คือ การจำลองระบบไฟฟ้าที่โหลดเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกนั้น ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากมีข้อจำกัดหลายอย่าง คือ ต้องหาโหลดที่มีค่าความต้องการกำลังเสมือนสูง เพื่อกออกแบบคาปาซิเตอร์เพื่อจ่ายกำลังเสมือนแทนจากการไฟฟ้า ฯ โดยใช้โหลดที่เป็นตัวเหนี่ยวนำต้องทนแรงดันที่สูง เนื่องจากต่อโหลดเป็นแบบเดลต้า คือ ต้องทนแรงดันถึง 380 โวลต์ แต่โหลดตัวเหนี่ยวนำพิกัดนี้ไม่มีในท้องปฏิบัติการ จึงทำการต่ออนุกรมกันทำให้ค่ารีแอคแตนซ์สูงขึ้น ทำให้ต้องการค่ากำลังเสมือนน้อยลง ทำให้การออกแบบคาปาซิเตอร์มีขนาดไม่มาก สำหรับแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกจะใช้อินเวอร์เตอร์ ขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ และดับปลั๊กกับเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงและจ่ายโหลดที่เป็นหลอดไฟขนาด 600 วัตต์ ทำให้สามารถจ่ายโหลดได้น้อยลง เนื่องจากเกิดสปาร์คที่ระหว่างขั้วคอมมิวกับแปรงถ่าน เป็นผลให้ปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น น้อยลง ผลที่ได้จึงไม่เป็นไปตามต้องการมากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อคาปาซิเตอร์มีค่าน้อย ค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่ามาก ถึงแม้จะมีปริมาณฮาร์มอนิกที่ความถี่ต่างๆ กันอยู่บ้าง แต่ก็ถือว่าปริมาณน้อย ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของคาปาซิเตอร์ยังมีค่ามาก จึงเป็นผลให้กระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าระบบ โดยไม่ผ่านคาปาซิเตอร์ แต่ถ้าเมื่อใดที่คาปาซิเตอร์มีค่ามากและเกิดปริมาณฮาร์มอนิกสูงๆ จะทำให้มี ปริมาณฮาร์มอนิกไหลเข้าคาปาซิเตอร์มากขึ้น

สำหรับวงจรกรองฮาร์มอนิก ในการออกแบบให้ได้ค่า ตัวรีแอคเตอร์ตามความต้องการจะเป็นไปได้ค่อนข้างยาก เนื่องจาก จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่อันเนื่องมาจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ทำให้ บี-เฮสซ์ เคิร์ฟ (B - H Curve) ของแกนเหล็กเปลี่ยนไป ทำให้ค่าของตัวรีแอคเตอร์คลาดเคลื่อนตามไปด้วย ทำให้ฟิลเตอร์ที่ออกแบบมีประสิทธิภาพไม่ดีพอ ซึ่งประสิทธิผลของฟิลเตอร์จะดีหรือไม่อย่างไรนั้น ยังขึ้นอยู่กับอีกปัจจัยอื่นๆ อีกหลายประการ เช่น ขนาดของฟิลเตอร์ ค่าความคลาดเคลื่อนในการกำหนดพิกัดคาปาซิเตอร์, ค่าความคลาดเคลื่อนในการกำหนดพิกัดรีแอคเตอร์, อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อคาปาซิเตอร์, ค่าความเบี่ยงเบนจากความถี่ที่ระบุไว้ของโครงข่ายระบบไฟฟ้า เป็นต้น และคาร์รีแอคเตอร์ ที่ติดตั้งมีคุณสมบัติที่ไม่อึดตัว ขณะเริ่มใช้งานแต่ละครั้ง ,มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยและมีค่าการสูญเสียต่ำ

สำหรับการวัดปริมาณฮาร์มอนิกจากอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น เครื่องมือที่ใช้วัดมีประสิทธิภาพไม่ค่อยดี สำหรับการวัดแต่ละครั้งจะมีค่าความคลาดเคลื่อนสูง เพื่อป้องกันความผิดพลาดควรใช้เครื่องมือวัดที่มีประสิทธิภาพสูงจึงจะได้ผลที่ถูกต้องแม่นยำ

ภาคผนวก

1. การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

1.1 การคำนวณส่วนประกอบฮาร์มอนิกของฟังก์ชันคาบใดๆ โดยวิธีการวิเคราะห์ฟูรีเยร์เชิงตัวเลข (Numerical Fourier Analysis)

การวิเคราะห์ฟูรีเยร์เชิงตัวเลขสามารถนำมาวิเคราะห์ในทางวิศวกรรมได้ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ฟังก์ชันคาบ ที่ไม่รู้สมการของรูปคลื่นที่ได้จากการพล็อต (Plot) ลงบนกระดาษหรือภาพในออสซิลโลสโคปชนิด Analog หรือ Digital ที่ tape recording ในที่นี้ สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์จำนวนทั้งหมดไม่สามารถหาค่าได้ในขั้นตอนการวิเคราะห์และประมาณค่าแต่จะถูกแสดงให้เห็นในตัวอย่างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อจะหาค่าสัมประสิทธิ์ของฟูรีเยร์ได้

อนุกรมฟูรีเยร์มีฟังก์ชันคาบเป็น T ดังสมการ

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n2\pi f_1 t) + b_n \sin(n2\pi f_1 t)] \quad \dots 1.1$$

เมื่อให้ f_1 เป็นความถี่หลักมูลของคาบ T

สัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ทั้งหมดถูกแสดงให้เห็นดังสมการ

$$a_n = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T f(t) \cos(n2\pi f_1 t) dt, \quad n=0,1,2,\dots \quad \dots 1.2$$

$$b_n = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T f(t) \sin(n2\pi f_1 t) dt, \quad n=0,1,2,\dots \quad \dots 1.3$$

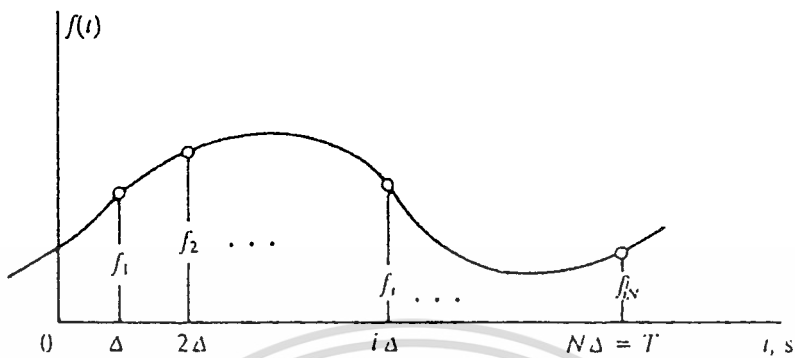
ขณะที่ค่าเฉลี่ย a_0 ณ.ที่ $n=0$ จะได้ว่า

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T f(t) dt \quad \dots 1.3$$

แต่ในที่นี้ไม่รู้ค่า $f(t)$ โดยต้องทำการคำนวณประมาณค่าทั้งหมดด้วยวิธีเชิงตัวเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Numerical) พิจารณาฟังก์ชันคาบ $f(t)$ โดยดูระยะห่างของคาบ $(0,T)$ ในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ฟังก์ชันคาบ

เราจะแบ่งย่อยในระหว่าง $(0,T)$ ให้เป็น N ครั้งภายในด้วยความกว้าง ΔS ทำการสุ่ม $f(t)$ ที่เวลา $i\Delta$ ณ ที่ f_i เราสามารถประมาณหาค่าเฉลี่ยได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{a_0}{2} &\cong \frac{1}{N\Delta} \sum_{i=1}^N f_i \Delta \\ &\cong \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i \end{aligned} \tag{1.4}$$

ในทางเรขาคณิตการสุ่มได้จากรูปคลื่น เราสามารถประมาณค่า a_n ได้ดังนี้

$$a_n \cong \frac{2}{N\Delta} \sum_{i=1}^N f_i \cos\left(\frac{n2\pi \Delta i}{N\Delta}\right) \Delta \tag{1.5}$$

จัดรูปใหม่ในผลบวกทางพีชคณิตประมาณค่า a_n ให้สั้นลงจะได้

$$a_n \cong \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N f_i \cos\left(\frac{n2\pi i}{N}\right) \tag{1.6}$$

$$b_n \cong \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N f_i \sin\left(\frac{n2\pi i}{N}\right) \tag{1.7}$$

ในสมการที่ 1.4, 1.6 และ 1.7 สามารถใช้อัลกอรึทึมหาค่าสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ได้ ถ้าเรารู้ค่าสัมประสิทธิ์อนุกรมจาก

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \tag{.....1.8}$$

และมุมเฟส angle จาก

$$\theta_n = \tan^{-1} \left[\frac{b_n}{a_n} \right] \tag{.....1.9}$$

ฟังก์ชันตรีโกณมิติที่เป็นความถี่ (หรือเวลาก็ดี) พยายามหาค่าให้มากกว่า N/2 ฮาร์โมนิกจากการสุ่มจำนวน N ครั้งต่อ 1 ไซเคิล ของรูปคลื่นที่มีขนาดซ้ำขึ้นมาและคอนจูเกตมุมเฟส (Phase angle) ในการสุ่มความถี่สูงสุด fmax ที่ถูกประมาณในสัญญาณมีความสัมพันธ์กับระยะห่างการสุ่ม Δ โดย

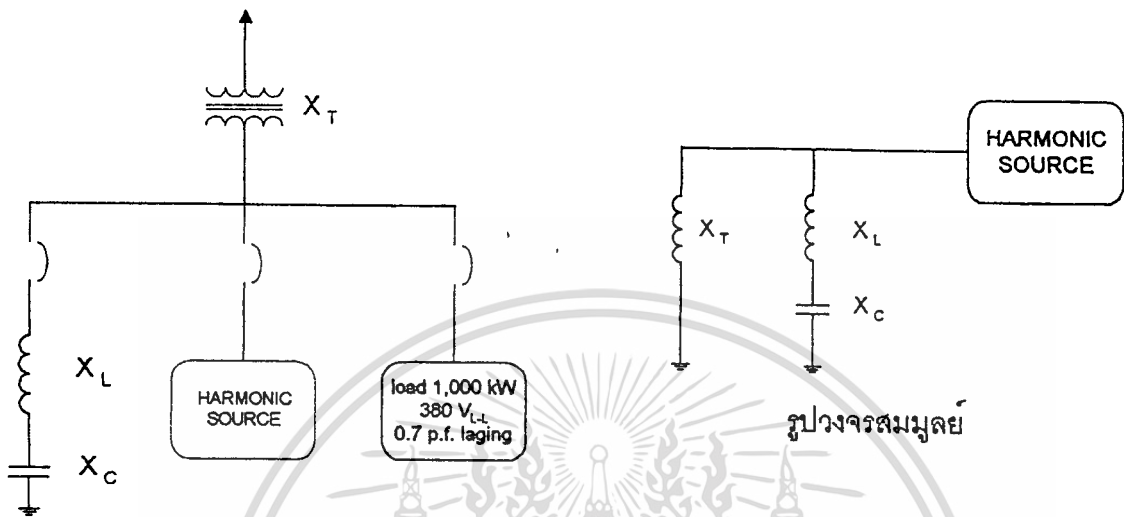
$$\Delta < \frac{1}{2f_{\max}} \tag{.....1.10}$$

ตารางวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อหาค่ารีแอคแตนซ์ที่เหมาะสมในการนำ มาสร้างวงจรเป็น
กรองฮาร์มอนิก

$\frac{X_L}{X_C} (\%)$	$n = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$	$\frac{X_L}{X_C} (\%)$	$n = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$
0.25	20	7.5	3.65
0.5	14.4	8.0	3.54
1.0	10	8.5	3.43
1.5	8.165	9.0	3.33
2.0	7.07	9.5	3.24
2.04	7.0	10.0	3.16
2.5	6.325	10.5	3.09
3.0	5.57	11.0	3.01
3.5	5.34	11.5	2.95
4.0	5	12.0	2.88
4.5	4.7	12.5	2.83
5.0	4.47	13.0	2.77
5.5	4.264	13.5	2.72
6.0	4.08	14.0	2.67
6.5	3.92	14.5	2.62
<u>7.0</u>	<u>3.78</u>	15.0	2.58

สาเหตุที่เลือกขนาดของรีแอคเตอร์เพื่อนำมาประกอบเป็นวงจรกรองแบบป้องกันตัวเก็บประจุเสียหายหรือดีจูนฟิลเตอร์ ซึ่งส่วนใหญ่ นิยมใช้ รีแอคเตอร์ขนาด 7% เพราะว่า สังเกตจากตาราง ค่ารีแอคเตอร์ที่ 7% นี้ จะเป็นค่าที่อยู่ระหว่างการเกิดรีโซแนนซ์ของฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และ 3 ในอัตราที่ใกล้เคียงกัน

ตัวอย่างการคำนวณในระบบที่มีเงื่อนไขสมมติ ดังรูป



เมื่อเกิดรีโซแนนซ์ขนาน ระหว่างหม้อแปลง (X_T) กับ ตัวเก็บประจุ ไปตรงกับ ฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบ ทำให้กระแสที่แยกไหลไปสู่ระบบและตัวเก็บประจุมีปริมาณเพิ่มขึ้นมาก จึงศึกษาโดยการสร้างวงจรกรองเพื่อป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้น

1. ผลที่ทำให้ตัวเก็บประจุเกิดความเสียหาย ในการคำนวณหาค่าอินดักแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ (X_L) และค่าคาปาซิแตนซ์ (X_C) ของตัวเก็บประจุ ที่จะใช้ในวงจรกรองเพื่อป้องกันตัวเก็บประจุ

วิธีคำนวณ

การคำนวณค่าตัวเก็บประจุเพื่อทำการแก้ค่าตัวประกอบกำลัง สมมติให้ค่าตัวประกอบกำลังใหม่ที่เราต้องการ เป็น 0.85 lagging

$$\text{ดังนั้น } \text{Var } 1\phi = \text{kW} (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad \text{kVar}$$

$$\text{แทนค่า } \theta_1 = \cos^{-1} 0.7 = 45.57 \text{ องศา}$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} 0.85 = 31.79 \text{ องศา}$$

$$\text{kW} = 1000/3$$

$$\text{Var } 1\phi = 133.4 \text{ kVar}$$

$$X_C = V_L^2 / \text{Var } 1\phi = 380^2 / 133.4 \times 10^3 = 1.082 \Omega$$

$$C = 1/2\pi f X_C = 2941.8 \mu\text{F}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการหาขนาดรีแอคเตอร์ที่เหมาะสมของวงจรกรอง โดยส่วนใหญ่นิยมใช้รีแอคเตอร์ขนาด 7 % (ดูจากตารางเปรียบเทียบเพื่อหาค่ารีแอคแตนซ์ที่เหมาะสม)

สมมติในระบบมีฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 มาก

$$X_L = 7 \% X_C$$

$$= 0.07575 \Omega$$

$$L = X_L / 2\pi f$$

$$= 0.24 \text{ mH}$$

2. เมื่อต้องการขจัด ผลของฮาร์มอนิกต่อระบบ เพื่อไม่ให้ค่ากระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าในปริมาณที่มากเกินไปกว่าที่การไฟฟ้า จะกำหนดในอนาคต
คิดที่ 1φ

$$\text{Var } C - \text{Var } L = W_{1f} (\tan \theta_1 - \tan \theta_2)$$

$$\frac{V_C^2}{X_C} - \frac{V_L^2}{X_L} = W (\tan \theta_1 - \tan \theta_2)$$

$$V_C = \frac{V_{L-L}}{X_C - X_L} \cdot X_C, \quad V_L = \frac{V_{L-L}}{X_C - X_L} \cdot X_L$$

$$\left(\frac{V_{L-L}^2}{(X_C - X_L)^2} \cdot \frac{X_C^2}{X_C} \right) - \frac{V_{L-L}^2 \cdot X_L^2}{(X_C - X_L)^2 \cdot X_L} = W (\tan \theta_1 - \tan \theta_2)$$

$$\frac{V_{L-L}^2}{X_C - X_L} = W (\tan \theta_1 - \tan \theta_2)$$

$$X_L = \frac{X_C}{n^2}$$

$$\frac{V_{L-L}^2}{X_C (1 - \frac{1}{n^2})} = W (\tan \theta_1 - \tan \theta_2)$$

$$\therefore X_C = \frac{V_{L-L}^2}{W (\tan \theta_1 - \tan \theta_2)} \cdot \frac{n^2}{(n^2 - 1)}$$

$$X_C = \frac{25 (380)^2}{24 (1000 / 3) 10^3 (\tan 45.57 - \tan 31.25)}$$

$$= 1.09 \text{ ohm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน $C = 1/2\pi f X_C = 2920.27 \mu\text{F}$ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ารีแอกเตอร์ที่ไว้ในกรณีนี้ จะใช้ที่ 4% ในการแก้ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 (ดูจากตาราง)

$$X_L = 4 \% X_C$$

$$= 0.0436 \Omega$$

$$L = X_L / 2\pi f$$

$$= 0.138 \text{ mH}$$

วงจรกรองที่ออกแบบจากวิธีนี้สามารถนำไปใช้ในการแก้ค่าตัวประกอบกำลังได้ แต่ตัวเก็บประจุจะต้องทนแรงดันได้เพิ่มขึ้นจากปกติ



2. โปรแกรมวิเคราะห์ฟูเรียร์ เพื่อหาปริมาณฮาร์มอนิก

การเขียนโปรแกรมโดยอาศัยอัลกอริทึม จากวิธีการวิเคราะห์ฟูเรียร์เชิงตัวเลข มี
ภาษาโปรแกรมดังนี้

```
3 CLS : PRINT : PRINT : PRINT "          **** FOURIER ANALYSIS PROGRAM **** "
10 DIM A(20), B(20), C(20), P(20), F(100)
15 PRINT : PRINT : INPUT "    PERIOD IN SECONDS = "; T
20 PRINT : PRINT : INPUT "    NUMBER OF SAMPLES PER CYCLE = "; K
25 PRINT : PRINT : PRINT "    NUMBER OF HARMONICS MUST BE LESS THAN HALF THE NUMBER OF SAMPLES"
30 PRINT : PRINT : INPUT "    NUMBER OF HARMONICS = "; M
35 PRINT : PRINT : PRINT "    TYPE IN SAMPLED DATA POINTS STARTING ONE POINT RIGHT OF THE TIME ORIGIN"
40 S = 0
45 FOR I = 1 TO K
50 PRINT "      F("; I; ")="; : INPUT "      "; F(I)
55 S = S + F(I)
60 NEXT I
65 CLS : PRINT : PRINT : PRINT "    SUMMARY OF INPUT DATA ": PRINT : PRINT
70 PRINT "    THE PERIOD T ="; T: PRINT : PRINT
75 PRINT "    THE SAMPLES ARE:"
80 FOR I = 1 TO K
85 PRINT "      F("; I; ") ="; F(I)
90 NEXT I
95 PRINT : PRINT : PRINT "    ARE THESE DATA CORRECT ? (Y OR N)":
100 INPUT "      "; X$
105 IF X$ = "Y" THEN 120
110 IF X$ = "N" THEN 40
115 GOTO 95
120 S = S / K: PRINT : PRINT "    THE AVERAGE VALUE A(0)/2 ="; S
125 PRINT : PRINT : PRINT "          ORDER      FREQ. IN Hz.      A(N)      B(N)"
130 FOR J = 1 TO M
135 S1 = 0: S2 = 0
140 FOR I = 1 TO K
145 X = J * I * 6.2832 / K
150 S1 = S1 + F(I) * COS(X)
155 S2 = S2 + F(I) * SIN(X)
160 NEXT I
165 A(J) = S1 * 2 / K: B(J) = S2 * 2 / K
170 F1 = J / T
175 A(J) = INT(A(J) * 10000) / 10000: B(J) = INT(B(J) * 10000) / 10000
180 PRINT "          ", J, F1, A(J), B(J)
185 NEXT J
190 PRINT : PRINT : PRINT "    DO YOU WANT THE C(N)'S AND THETA(N)'S ? (Y OR N)": INPUT "      "; X$
195 IF X$ = "Y" THEN 210
200 IF X$ = "N" THEN 256
205 GOTO 190
210 PRINT : PRINT : PRINT "          ORDER      FREQ. IN Hz.      C(N)      THETA(N)"
215 PRINT "          ", 0, 0, S, "-----"
220 FOR J = 1 TO M
225 A = A(J): B = B(J): F1 = J / T
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

230 GOSUB 265
235 P(J) = 57.3 * P
240 C(J) = SQR(A(J) ^ 2 + B(J) ^ 2)
245 C(J) = INT(10000 * C(J)) / 10000
250 PRINT "      ", J, F1, C(J), P(J)
251 NEXT J
252 PRINT : PRINT : PRINT " DO YOU WANT THE PERCENT OF HARMONIC ? (Y OR N)": INPUT "      "; X$
  IF X$ = "Y" THEN GOTO 253
  IF X$ = "N" THEN GOTO 256
253 PRINT : PRINT : PRINT "                ORDER                PERCENT"
  FOR J = 1 TO M
    PRINT "      ", J, (C(J) / C(1)) * 100
  NEXT J
  FOR J = 2 TO M
    C(J) = C(J) ^ 2
    SQ = SQ + C(J)
  NEXT J
  PRINT : PRINT "                %THD (IEEE STANDARD) = ", (SQR(SQ) / C(1)) * 100
256 PRINT : PRINT " DO YOU WANT TO QUIT ? (Y OR N)": INPUT "      "; X$
257 IF X$ = "Y" THEN END
258 IF X$ = "N" THEN GOTO 5
265 IF A = 0 THEN P = 1.57079: GOTO 285
270 P = ATN(B / A)
275 IF A > 0 THEN 295
280 IF B > 0 THEN P = P + 3.14159: GOTO 295
285 IF B < 0 THEN P = P - 3.14159: GOTO 295
290 IF B = 0 THEN P = -3.14159: GOTO 295
295 RETURN

```

3. โปรแกรมคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ ที่ใช้ในวงจร ฮาร์มอนิกแบบ ต่างๆ

```
/*-----Program.c-----*/

#include "data.h"

lists list;
output out;
max_out V_max, I_max;
int number, low;

/*-----*/
long filesize(FILE *stream)
{
    long curpos, length;

    curpos = ftell(stream);
    fseek(stream, 0L, SEEK_END);
    length = ftell(stream);
    fseek(stream, curpos, SEEK_SET);
    return length;
}

/*-----*/
int log(unsigned char phase)
{
    switch (phase) {
        case 1 : return 0;
        case 2 : return 1;
        case 4 : return 2;
    }
    return 0;
}

/*-----*/
char upcase(char ch)
{
    if ((ch>96) && (ch<123)) ch-=32;
    return ch;
}

/*-----*/
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

void draw_blk()
{
    int x, y;

    window(1,1,80,25);
    clrscr();

    for (x=1; x<81; x++)
    {
        gotoxy(x,1);
        switch (x) {
            case 1 : printf("É"); break;
            case 50 : printf("Ê"); break;
            case 80 : printf("»"); break;
            default : printf("Í");
        }
        gotoxy(x,24);
        switch (x) {
            case 1 : printf("É"); break;
            case 50 : printf("Ê"); break;
            case 80 : printf("¼"); break;
            default : printf("Í");
        }
    }

    for (y=2; y<24; y++)
    {
        gotoxy(1,y);
        printf("o");
        gotoxy(50,y);
        printf("o");
        gotoxy(80,y);
        printf("o");
    }

    // É Ê Ë Ì Í ° ¼ » 200 201 202 203 205 186 188 187
}

/*-----*/
int menu(char *command)
{
    int num=0, i=0, state=1;
    int pos[10];
    char ch;
    char far *VDO = (char far*) 0XB8000F00L;

    pos[0] = 0;

    do {
        do {} while (((ch=command[i++]) != 32) && (ch != 0));
        num++;
        if (ch!=0) do {} while ((ch=command[i++]) == 32);
        pos[num] = i-1;
    } while (ch!=0);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

scanf("%f",&tmp);
(*component).Ip = tmp;
printf("Power factor = ");
scanf("%f",&tmp);
(*component).Pf = tmp;

printf("Harmonic\n");
for (i=0;i<MAX_HARMONIC;i++)
{
    printf("%d. Harmonic number = ",i+1);
    scanf("%d",&num);
    (*component).harmonic[i].num = num;
    printf(" Harmonic voltage(An) = ");
    scanf("%f",&tmp);
    (*component).harmonic[i].Van = tmp;
    printf(" Harmonic voltage(Bn) = ");
    scanf("%f",&tmp);
    (*component).harmonic[i].Vbn = tmp;
    (*component).harmonic[i].Vcn = sqrt((*component).harmonic[i].Van*(*component).
harmonic[i].Van
                                +(*component).harmonic[i].Vbn*(*component).
harmonic[i].Vbn);
    printf(" Harmonic current(An) = ");
    scanf("%f",&tmp);
    (*component).harmonic[i].Ian = tmp;
    printf(" Harmonic current(Bn) = ");
    scanf("%f",&tmp);
    (*component).harmonic[i].Ibn = tmp;
    printf(" Please <Enter> to continue or any key to back : ");
    if (getch()!=13) i--;
    printf("\n");
}
clrscr();
}
/*-----*/
void write_data()
{
    int command;
    char ch;

    command = menu("Add_data Exit");
    switch (command) {
        case 1 :
        {
            FILE *fi;
            components component;
            fi = fopen("data.dat", "a+b");
            get_dat(&component);
            printf("Are you sure you want to add data(y/n)?");
            ch=getch();
            if ((ch=='y') || (ch=='Y'))
                fwrite(&component, sizeof(components), 1, fi);
            fclose(fi);
        }
        case 2 ::
        {
            break;
        }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}
}
/*-----*/
void show_data(components component)
{
    int i;
    float V, I;

    window(2,2,49,21);
    clrscr();
    printf("Component : %s \r\n\n", component.name);
    printf(" Type : %d Phase\r\n", component.type);
    printf(" Phase voltage = %f V \r\n", component.Vp);
    printf(" Phase current = %f A \r\n", component.Ip);
    printf(" Power factor = %f \r\n\n", component.Pf);
    printf(" Harmonic Voltage Current \r\n");
    for (i=0; i<MAX_HARMONIC; i++)
    {
        V = sqrt(component.harmonic[i].Van*component.harmonic[i].Van
                +component.harmonic[i].Vbn*component.harmonic[i].Vbn);
        I = sqrt(component.harmonic[i].Ian*component.harmonic[i].Ian
                +component.harmonic[i].Ibn*component.harmonic[i].Ibn);
        printf("%5d %10.3f %8.3f\r\n", component.harmonic[i].num, V, I);
    }
}
/*-----*/
void put_list(components component)
{
    unsigned char temp;
    char ch;

    strcpy(list.machine[list.index].c_name, component.name);
    if (component.type == 1)
    {
        printf("Enter the phase to install (R S T) : ");
        do {ch=uppercase(ch=getch());} while ((ch!='R') && (ch!='S') && (ch!='T'));
        switch (ch) {
            case 'R' : temp = 1; break;
            case 'S' : temp = 2; break;
            case 'T' : temp = 4;
        }
    }
    else temp = 7;
    list.machine[list.index].phase = temp;
    list.index++;

    window(51,3,79,23);
    if (!strcmp(list.machine[list.index-2].c_name, component.name))
    {
        number++;
        gotoxy(2,low);
        printf("%d.%s %d", low, component.name, number);
    }
    else

```

```

{
    number = 1;
    low++;
    gotoxy(2,low);
    cprintf("%d.%s", low, component.name);
}
}

/*-----*/
void read_data()
{
    FILE *fi;
    components component;
    char ch=80;
    int i=0 ;

    if ((fi = fopen("data.dat", "rb"))
        == NULL)
    {
        fprintf(stderr, "Cannot open file 'data.dat'.\n");
        exit(1);
    }

    low = 0;
    window(51,2,79,2);
    cprintf(" List of components");
    window(2,22,49,23);
    clrscr();
    cprintf("< > \n Enter to select. ESC to exit.");
    do
    {
        if(ch==80) {
            fread(&component, sizeof(components), 1, fi);
            i++;
        }
        show_data(component);
        do { ch = getch(); } while ((ch!=13) && (ch!=72) &&
                                   (ch!=80 || feof(fi)) && (ch!=27));

        switch (ch) {
            case 13 :
                if (list.index<MAX_COMP) put_list(component);
                else {
                    cprintf("To many components selected.");
                    ch = getch();
                    gotoxy(1,wherey());
                    delline();
                }
                break;
            case 72 :
                if (i>1) {
                    fseek(fi, (i-2)*sizeof(components), SEEK_SET);
                    ch = 80;
                }
            }
        } while (ch!=27);
}

```

```

fclose(fi);
}

/*-----*/
void look_data()
{
    FILE *fi;
    components component1, component2;
    char ch=80;
    int i=0 ,command;

    command = menu("See_data Exit");
    window(2,2,49,21);
    clrscr();

    switch (command) {
    case 1 :
    {
        if((fi = fopen("data.dat", "rb"))
            == NULL)
        {
            fprintf(stderr, "Cannot open file 'data.dat'.\n");
            exit(1);
        }

        window(2,2,49,21);
        do
        {
            clrscr();
            for (i=1; i<40; i++)
            {
                if (!feof(fi)) {
                    fread(&component2, sizeof(components), 1, fi);
                    if (strcmp(component1.name, component2.name))
                        cprintf("%d. %s", i, component2.name);
                    strcpy(component1.name, component2.name);
                }
                i++;
            }
            if (!feof(fi)) {
                fread(&component2, sizeof(components), 1, fi);
                if (strcmp(component1.name, component2.name))
                    cprintf("%20d. %s\r\n", i, component2.name);
                strcpy(component1.name, component2.name);
            }
        }
        do { ch = getch();} while ((ch!=13) && (ch!=27));
    } while ((ch!=27) && (!feof(fi)));
    fclose(fi);
    } break;
    case 2 : ;
    }
}

/*-----*/
void draw_comp()

```

```

{
    int i;

    clrscr();
    for (i=0; i<list.index; i++)
    {
        cprintf("%s\r\n", list.machine[i].c_name);
    }
}

/*-----*/
void init_out()
{
    int i, j;

    for (j=0; j<3; j++)
    {
        out[j].VA = 0;
        out[j].W = 0;
        out[j].I = 0;
        for (i=0; i<MAX_OUT; i++)
        {
            out[j].harmonic[i].num = 0;
            out[j].harmonic[i].Van = 0;
            out[j].harmonic[i].Vbn = 0;
            out[j].harmonic[i].Vcn = 0;
            out[j].harmonic[i].Ian = 0;
            out[j].harmonic[i].Ibn = 0;
        }
    }
}

/*-----*/
void cal_out(unsigned char phase)
{
    FILE *fi;
    components component;
    int i, h;
    float tmp1, tmp2;

    if ((fi = fopen("data.dat", "rb"))
        == NULL)
    {
        fprintf(stderr, "Cannot open file 'data.dat'.\n");
        exit(1);
    }

    for (i=0; i<list.index; i++)
    {
        if ((list.machine[i].phase & phase) != 0)
        {
            do {
                fread(&component, sizeof(components), 1, fi);
            } while (strcmp(list.machine[i].c_name, component.name));
            fseek(fi, 0, SEEK_SET);

```

```

        out[log(phase)].VA += component.Vp * component.Ip;
        out[log(phase)].W += component.Vp * component.Ip * component.Pf;
        out[log(phase)].I += component.Ip;
        for (h=0; h<MAX_HARMONIC; h++)
        {
            out[log(phase)].harmonic[component.harmonic[h].num].num =
            component.harmonic[h].num;
            if (out[log(phase)].harmonic[component.harmonic[h].num].Vcn==0)
                out[log(phase)].harmonic[component.harmonic[h].num].Vcn=
            component.harmonic[h].Vcn;
            else {
                tmp1 = out[log(phase)].harmonic[component.harmonic[h].num].Vcn;
                tmp2 = component.harmonic[h].Vcn;
                out[log(phase)].harmonic[component.harmonic[h].num].Vcn=component.Vp*tmp1*tmp2
                /(component.Vp*(tmp1+tmp2)-tmp1*tmp2);
            }
            // out[log(phase)].harmonic[component.harmonic[h].num].Van +=
            component.harmonic[h].Van;
            // out[log(phase)].harmonic[component.harmonic[h].num].Vbn +=
            component.harmonic[h].Vbn;
            out[log(phase)].harmonic[component.harmonic[h].num].Ian +=
            component.harmonic[h].Ian;
            out[log(phase)].harmonic[component.harmonic[h].num].Ibn +=
            component.harmonic[h].Ibn;
        }
    }
    out[log(phase)].PF = out[log(phase)].W / out[log(phase)].VA;
    out[log(phase)].V = component.Vp;

    fclose(fi);
}

/*-----*/
void find_max(unsigned char phase)
{
    int i, j=0;
    float max;

    for (i=0; i<MAX_OUT; i++)
    {
        if ((out[log(phase)].harmonic[i].num != 0) && (j<MAX_HARMONIC))
        {
            V_max[log(phase)].num[j] = out[log(phase)].harmonic[i].num;
            // V_max[log(phase)].p_unit[j] = sqrt(out[log(phase)].harmonic[i].Van*out[log(phase)].
            harmonic[i].Van
            // +out[log(phase)].harmonic[i].Vbn*out[log(phase)].harmonic[i].Vbn)
            // /sqrt(out[log(phase)].harmonic[1].Van*out[log(phase)].harmonic[1].Van
            // +out[log(phase)].harmonic[1].Vbn*out[log(phase)].harmonic[1].Vbn);
            V_max[log(phase)].p_unit[j] = out[log(phase)].harmonic[i].Vcn/out[log(phase)].
            harmonic[1].Vcn;
            I_max[log(phase)].num[j] = out[log(phase)].harmonic[i].num;

```

```

        I_max[log(phase)].p_unit[j] = sqrt(out[log(phase)].harmonic[i].Ian*out[log(phase)].
harmonic[i].Ian
        +out[log(phase)].harmonic[i].Ibn*out[log(phase)].harmonic[i].Ibn)
        /sqrt(out[log(phase)].harmonic[1].Ian*out[log(phase)].harmonic[1].Ian
        +out[log(phase)].harmonic[1].Ibn*out[log(phase)].harmonic[1].Ibn);
        j++;
    }
}
}

/*-----*/
void print_out(unsigned char phase)
{
    int i, j=0;
    float V, I, V1, I1, Thd_V=0, Thd_I=0;

    window(2,2,49,23);
    clrscr();

    printf("Phase %c\r\n", 82+log(phase));
    printf(" Total VA : %f\r\n", out[log(phase)].VA);
    printf(" Total Watt : %f\r\n", out[log(phase)].W);
    printf(" Total power factor %f\r\n", out[log(phase)].PF);
    printf(" Phase voltage = %f V\r\n", out[log(phase)].V);
    printf(" Phase current = %f A\r\n", out[log(phase)].I);
    printf(" Harmonic Voltage Current \r\n");
    for (i=0; i<MAX_HARMONIC; i++)
    {
        do {j++;} while (out[log(phase)].harmonic[j].num == 0);
//      V = sqrt(out[log(phase)].harmonic[j].Van*out[log(phase)].harmonic[j].Van
//      +out[log(phase)].harmonic[j].Vbn*out[log(phase)].harmonic[j].Vbn);
        V = out[log(phase)].harmonic[j].Vcn;
        I = sqrt(out[log(phase)].harmonic[j].Ian*out[log(phase)].harmonic[j].Ian
        +out[log(phase)].harmonic[j].Ibn*out[log(phase)].harmonic[j].Ibn);
        if (i!=0) {
            Thd_V = Thd_V+V*V;
            Thd_I = Thd_I+I*I;
        }
        else {
            V1 = V;
            I1 = I;
        }
        printf("%5d %10.3f %8.3f\r\n", out[log(phase)].harmonic[j].num, V, I);
    }
    printf("\r\n THDv = %0.3f%\r\n", sqrt(Thd_V)*100/V1);
    printf(" THDi = %0.3f%", sqrt(Thd_I)*100/I1);

    getch();
}

/*-----*/
void plot(unsigned char phase)
{
    int gdriver = DETECT, gmode, errorcode;

```

```

int i;
char *s;

initgraph(&gdriver, &gmode, "c:\\lang\\tc\\bgi");

errorcode = graphresult();
if (errorcode != grOk) /* an error occurred */
{
    printf("Graphics error: %s\n", grapherrormsg(errorcode));
    printf("Press any key to halt:");
    getch();
    exit(1);
}

line(100,201,500,201);
line(100,50,100,201);
line(100,401,500,401);
line(100,250,100,401);
outtextxy(98, 35, "V");
outtextxy(98, 235, "I");
outtextxy(510, 200, "n");
outtextxy(510, 400, "n");

for (i=2; i<=10; i+=2)
{
    gcvt(i/10.0, 1, s);
    line(98,200-i*12,100,200-i*12);
    line(98,400-i*12,100,400-i*12);
    outtextxy(70, 197-i*12, s);
    outtextxy(70, 397-i*12, s);
}

for (i=3; i<20; i+=3)
{
    itoa(i, s, 10);
    line(i*20+100,201,i*20+100,203);
    line(i*20+100,401,i*20+100,403);
    outtextxy(i*20+96, 210, s);
    outtextxy(i*20+96, 410, s);
}

switch (phase) {
    case 1 : outtextxy(290, 450, "Phase R"); break;
    case 2 : outtextxy(290, 450, "Phase S"); break;
    case 4 : outtextxy(290, 450, "Phase T");
}

setfillstyle(1, 3);
for (i=0; i<MAX_HARMONIC; i++)
    bar(V_max[log(phase)].num[i]*20+99, 200, V_max[log(phase)].num[i]*20+101,
        200-V_max[log(phase)].p_unit[i]*120);

for (i=0; i<MAX_HARMONIC; i++)
    bar(I_max[log(phase)].num[i]*20+99, 400, I_max[log(phase)].num[i]*20+101,
        400-I_max[log(phase)].p_unit[i]*120);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 400-I_max[log(phase)].p_unit[i]*120); เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    getch();
    closegraph();
}

/*-----*/
void PF_Compensate()
{
    int command, num;
    float watt, Xl,X,Xc, Vl, Vc, Var, C;
    double seta1, seta2, O_Pf, N_Pf;

    command = menu("LC_filter Pure_Cap Exit");
    window(2,2,49,21);
    clrscr();

    switch (command) {
    case 1 :
    {
        cprintf("Enter LC harmonic number : ");
        scanf("%d", &num);
        cprintf("\rEnter Line Voltage : ");
        scanf("%f", &Vl);
        cprintf("\rEnter 3 Phase Watt (W) : ");
        scanf("%f", &watt);
        cprintf("\rEnter Old Power factor : ");
        scanf("%lf", &O_Pf);
        seta1 = acos(O_Pf);
        cprintf("\rEnter New Power factor : ");
        scanf("%lf", &N_Pf);
        seta2 = acos(N_Pf);
        X = 3*num*Vl*Vl;
        Xl = watt*(num-1)*(tan(seta1)-tan(seta2));
        Xc = X/Xl;
        Vc = Vl*num/(num-1);
        Var = Vc*Vc/Xc;
        C = 10000/(M_PI*Xc);
        cprintf("\r\nThe Capacitor value = %0.2f uF/Phase\r\n", C);
        cprintf("\r\nThe Capacitor value = %0.2f Var/Phase\r\n", Var);
        getch();
    } break;
    case 2 :
    {
        cprintf("\rEnter Line Voltage : ");
        scanf("%f", &Vl);
        cprintf("\rEnter 3 Phase Watt : ");
        scanf("%f", &watt);
        cprintf("\rEnter Old Power factor : ");
        scanf("%lf", &O_Pf);
        seta1 = acos(O_Pf);
        cprintf("\rEnter New Power factor : ");
        scanf("%lf", &N_Pf);
        seta2 = acos(N_Pf);
        Var = watt*(tan(seta1)-tan(seta2))/3;
        Xc = Vl*Vl/Var;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

C = 10000/(M_PI*Xc);
printf("\r\n The Capacitor value = %0.2f uF/Phase\r\n", C);
printf("\r\n The Capacitor value = %0.2f Var/Phase\r\n", Var);
getch();
} break;
case 3 ::
}
}
/*-----*/

void Tune_FT()
{
    float cap, Xc, Xl, L, Vl;
    int num;
    char ch;

    window(2,2,49,21);
    clrscr();

    printf("Enter Capacitor Value Type.\r\n 1).(uF) or 2).(Var 1 Phase) : ");
    do { ch=getch();} while ((ch!='1') && (ch!='2'));
    printf("%c\r\n Cap = ", ch);

    scanf("%f", &cap);
    if(ch=='2') {
        gotoxy(1, 3);
        printf(" Cap = %0.2f Var", cap);
        printf("\r\nEnter line voltage : ");
        scanf("%f", &Vl);
        Xc=Vl*Vl/cap;
    }
    else {
        gotoxy(1, 3);
        printf(" Cap = %0.2f uF", cap);
        Xc=10000/((M_PI)*cap);
    }

    printf("\r\nEnter Harmonic number : ");
    scanf("%d",&num);
    Xl=Xc/(num*num);
    L = Xl/(0.1*(M_PI));
    printf("\r\nThe inductor value = %f mH.", L);
    getch();
}
/*-----*/

void Detune_LC()
{
    float cap, Xc, Xl, L, Vl, Vc;
    int num;
    char ch;

    window(2,2,49,21);
    clrscr();

    printf("Enter Capacitor value.\r\n 1).(uF) or 2).(Var 1 Phase) : ");
    do { ch=getch();} while ((ch!='1') && (ch!='2'));

```

```

cprintf("%c\r\n Cap = ", ch);

scanf("%f", &cap);

if (ch=='2') {
    gotoxy(1, 3);
    cprintf(" Cap = %0.2f Var", cap);
    cprintf("\r\nEnter line voltage : ");
    scanf("%f", &VI);
}
else {
    gotoxy(1, 3);
    cprintf(" Cap = %0.2f uF", cap);
}

cprintf("\r\nEnter Harmonic number : ");
scanf("%d",&num);

if (ch=='1') Xc = 10000.0/(M_PI*cap);
else Xc = (VI*VI)/cap;

if (num==7) Xl = 4.53*Xc/100;
else Xl = 7*Xc/100;

L = Xl/(0.1*M_PI);
cprintf("\r\nThe inductor value = %f mH.", L);
getch();
}

/*-----*/
void main()
{
    list.index=0;
    int command, tmp;

    do {
        draw_blk();
        init_out();
        list.index = 0;

        command = menu("Install Detune_LC Tune_Filter PF_Compensate Add See_Component
        Quit");
        switch (command) {
            case 1 :
                command = menu("Choose Exit");
                switch (command) {
                    case 1 :
                        {
                            read_data();
                            do {
                                command = menu("Phase_R Phase_S Phase_T Exit");
                                tmp = command;
                                switch (command) {
                                    case 1 : cal_out(1); break;

```

```

        case 2 : cal_out(2); break;
        case 3 : cal_out(4); break;
        case 4 : ;
    }
    if (command!=4) {
        find_max(1<<(command-1));
        command = menu("Output Plot ");
        if (command == 1) print_out(1<<(tmp-1));
        else {
            plot(1<<(tmp-1));
            draw_blk();
        }
    }
    } while (command!=4);
} break;
case 2 ;;
}break;
case 2 : Detune_LC(); break;
case 3 : Tune_FT(); break;
case 4 : PF_Compensate(); break;
case 5 : write_data(); break;
case 6 : look_data(); break;
case 7 : ;
}
} while (command!=7);

// draw_comp();

window(1,1,80,25);
clrscr();

}

```

ข้อมูลโปรโตไทป์ที่ใช้กับโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์

```
/*-----Data.h-----*/
```

```
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <stdlib.h>
#include <io.h>
#include <math.h>
#include <string.h>
#include <graphics.h>
```

```
#define MAX_HARMONIC 10
#define MAX_OUT 3*MAX_HARMONIC
#define NAME_SIZE 16
#define MAX_COMP 30
```

```
typedef struct {
    unsigned char num;
    float Van, Vbn, Vcn, Ian, Ibn;
} harmonics;
```

```
typedef struct {
    char name[NAME_SIZE];
    unsigned char type; //type of machine 3 phase or 1 phase
    harmonics harmonic[MAX_HARMONIC];
    float Vp, Ip, Pf;
} components;
```

```
typedef struct {
    char c_name[NAME_SIZE];
    unsigned char phase;
} c_type;
```

```
typedef struct {
    int index;
    c_type machine[MAX_COMP];
} lists;
```

```
typedef struct {
    float VA, W, PF, V, I;
    harmonics harmonic[MAX_OUT];
} outputs;
```

```
typedef outputs output[3];
```

```
typedef struct {
    unsigned char num[MAX_HARMONIC];
    float p_unit[MAX_HARMONIC];
} max_outs;
```

```
typedef max_outs max_out[3];
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล ในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษา
และคำแนะนำในระหว่างการทำโครงการนี้ และขอขอบคุณสุรเดช แห่ง ABB CAPACITORS ที่เอื้อ
เพื่อข้อมูล รวมทั้งเพื่อนนักศึกษาทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEC std 555-2 1982 “ Part 2:Harmonics “ , IEC Publication prepared by Tachnical comittee- No. 7
- [2] IEEE std 519-1992 “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control power System “ , Newyork , NY10017 USA
- [3] John Wiley & Sons “ Power System Harmonic “ , Chichester Newyork Brisbane Toronto , Singapore
- [4] Ray mond .G “ Introduction to Engineering Systems “ , Allyn and Bacon
- [5] Rice D.E. “ Adjustable Speed Drive and Power Rectifier Harmonics Their Effect on Power System Components “ , IEEE Trans. Industrial Applications , Vol.26,No:4 Jul/Aug 1990
- [6]Wagner V.E. “ Effect of Harmonics on Equipment “ , IEEE Tran. on Power Delivery , Vol.8 No.2 April 1993
- [7] ไชยะ แซ่มซ้อย “ ฮาร์โมนิก 1 “ วารสารเทคนิค 122 , เมษายน 2538
- [8] นิรันดร์ คำประเสริฐ “ คณิตศาสตร์วิศวกรรมไฟฟ้า “ , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี , มีนาคม 2536
- [9] วัลลภ สุระกำพลธร “ การประมาณผลลัพท์สัญญาณเชิงตัวเลข “ , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , ตุลาคม 2533
- [10] สุกิจ แสงประดับ “ 51 เรื่องน่ารู้เทคนิคไฟฟ้า “ ชุดที่ 2 บ. ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด