

ตัวกรองแบบแอคทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์

ACTIVE POWER FILTER



นายเกษม	รักษ์แป้น
นายจรูญ	พุลแก้ว
นายประเสริฐ	สาม๊ะ

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....50235  
วัน,เดือน,ปี 28 เม.ย. 2547

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

# **ACTIVE POWER FILTER**

**KASEM            RUKPAN**  
**CHAROON        POOLKAEW**  
**PRASERT        SAMAH**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING  
DEPARTMENT OF INSTRUMENTATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

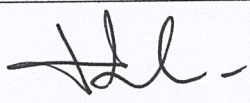
**2002**

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท ตัวกรองกำลังแบบแอคทีฟ  
ACTIVE POWER FILTER

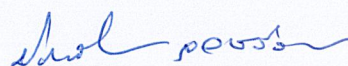
นักศึกษาผู้จัดทำ นายเกษม รัชต์แป้น รหัสประจำตัว 43015501  
นายจรูญ พูลแก้ว รหัสประจำตัว 43015502  
นายประเสริฐ สาม๊ะ รหัสประจำตัว 43015517

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม  
ปีการศึกษา 2545

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท	ลายมือชื่อ
ผศ. สักรียา ชิตวงศ์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 22 เมษายน พ.ศ. 2546  
สถานที่สอบ ณ ห้องสอบปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

ภาควิชารับรองแล้ว



(ผศ. ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ตัวกรองกำลังแบบแอคทีฟ	
	ACTIVE POWER FILTER	
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายเกษม	รักษ์แป้น
	นายจรูญ	พุดแก้ว
	นายประเสริฐ	สาม๊ะ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ศักรียา	จิตวงศ์
ปีการศึกษา	2545	

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการแก้ปัญหาของค่าฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้ากำลัง เมื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดที่ไม่ต่อเนื่อง เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่างๆ ซึ่งมีผลทำให้เกิดค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ต่ำลงและให้ความคิดเห็นของสัญญาณไฟฟ้า วงจรแอคทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์แบบฉีดกระแสฮาร์มอนิกจึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อแสดงการทำงานของระบบ โดยต่อตัวกรองกำลังแบบแอคทีฟขนานกับ โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

<b>Thesis Title</b>	Active Power Filter	
<b>Authors</b>	Mr. Kasem	Rukpan
	Mr. Charoon	Poolkaew
	Mr. Prasert	Samah
<b>Thesis Advisor</b>	Asst.Prof.Sakreya	Chitwong
<b>Year</b>	2002	

### **ABSTRACT**

This thesis is improving harmonics of transmission power system when distributes electrical energy to nonlinear load such as power electronic equipment. It is an effect to lower power factor and electrical signal distortion. Harmonics current injection active power filter is developed to solve these problems. By simulating with Matlab program to show operating of system , active power filter is connected as parallel with nonlinear load.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเพราะได้รับความเมตตาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สักกรียา ชิตวงศ์ ที่ได้ให้คำแนะนำแก่ผู้วิจัยตลอดมา อีกทั้งยังเอื้อเฟื้ออุปการะต่างๆ ในการทำปริญญา นิพนธ์นี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่านซึ่งเป็นผู้ที่ให้คำแนะนำอันเป็น ประโยชน์ต่อการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

และที่ลืมเสียมิได้คือ ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อคุณแม่ ผู้อันเป็นที่รักยิ่งที่สนับสนุนและ เป็นแรงบันดาลใจในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและเหตุจูงใจของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน.....	4
2.1 คำศัพท์และปริมาณต่างๆ.....	4
2.1.1 ฮาร์โมนิก ( Harmonic ).....	4
2.1.2 กระแสฮาร์โมนิก ( Harmonic current ).....	5
2.1.3 แรงดันฮาร์โมนิก ( Harmonic voltage ).....	5
2.1.4 ตัวประกอบความเพี้ยน ( Distortion Factor: DF ).....	6
2.1.5 ลำดับฮาร์โมนิก ( Harmonic order ).....	7
2.1.6 ตัวประกอบกำลัง ( Power Factor ).....	8
2.2 ประเภทของฮาร์โมนิก.....	8
2.2.1 อินเตอร์ฮาร์โมนิก ( Interharmonic ).....	8
2.2.2 ฮาร์โมนิกคุณลักษณะ ( Characteristic Harmonic ).....	9
2.2.3 ฮาร์โมนิกที่ไม่ได้เกิดจากคุณลักษณะ ( Noncharacteristic Harmonic ).....	9
2.2.4 ฮาร์โมนิกที่สามหารลงตัว ( Triplen Harmonic ).....	9
2.3 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิก.....	9
2.3.1 โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ( Nonlinear Load ).....	10

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2 ความไม่สมดุลของเฟส ( Phase unbalance ).....	13
2.3.3 กระแสเอ็กไซตัสและเฟอโรเรโซแนนซ์ ( Exciting current and ferroresonance ).....	13
2.4 เรโซแนนซ์.....	14
2.5 ผลกระทบของฮาร์โมนิก.....	16
2.5.1 ผลกระทบฮาร์โมนิกต่อการเกิดเรโซแนนซ์.....	16
2.5.2 ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อระบบสายส่ง.....	16
2.5.3 ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อหม้อแปลง.....	17
2.5.4 ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อเครื่องจักรไฟฟ้า.....	18
2.5.5 ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อสวิตช์ชิง.....	18
2.5.6 ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อคาปาซิเตอร์แบงค์.....	18
2.5.7 ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อระบบป้องกันของระบบไฟฟ้ากำลัง.....	19
2.5.8 ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อมิเตอร์วัดไฟฟ้า.....	19
2.5.9 ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่ออุปกรณ์ผู้ใช้ไฟฟ้า.....	20
2.5.10 ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อระบบสื่อสาร.....	20
2.6 การแก้ปัญหาฮาร์โมนิก.....	20
2.6.1 การเปลี่ยนตำแหน่งหรือขนาดคาปาซิเตอร์.....	21
2.6.2 การ LC ฟิลเตอร์.....	21
2.6.3 การเพิ่มรีแอกเตอร์.....	22
2.6.4 ชนิดของอุปกรณ์กรองฮาร์โมนิก.....	23
2.6.4.1 พาสซีฟฟิลเตอร์ ( Passive Filter ).....	23
2.6.4.2 แอกทีฟฟิลเตอร์ ( Active Filter ).....	24
2.7 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียระหว่างแอกทีฟฟิลเตอร์กับพาสซีฟฟิลเตอร์.....	24
<b>บทที่ 3 ทฤษฎีและการวิเคราะห์แบบจำลองของ แอกทีฟฟิลเตอร์.....</b>	<b>26</b>
3.1 อนุกรมฟูเรียร์.....	26
3.2 การแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณมีคาบ.....	29
3.3 หลักการและขั้นตอนในการวิเคราะห์เพื่อสร้างบล็อกไดอะแกรม	



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของกระแสสลับที่จ่ายให้กับโหลดที่ใช้ไฟกระแสตรงเรียบ.....	11
2.2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างแอกทีฟฟิลเตอร์กับพาสซีฟฟิลเตอร์.....	25
4.1 ขณะยังไม่ได้ทำการแก้ไขฮาร์มอนิก (โดยใช้ FFT วิเคราะห์) .....	55
4.2 ขณะได้ทำการแก้ไขฮาร์มอนิก (โดยใช้ FFT วิเคราะห์) .....	55

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่หลักมูล.....	4
2.2 รูปแบบของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่ฮาร์มอนิก .....	5
2.3 การต่อคาปาซิเตอร์ขนานเข้าไปในระบบ .....	6
2.4 การควบคุมกระแสที่ไหลผ่านโหลดแบบ ( Integral Cycle control ).....	8
2.5 วงจรและสัญญาณของคอนเวอเตอร์ 3 เฟส 6 พัลส์.....	12
2.6 วงจรและค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่างๆ .....	14
2.7 ฟิวเตอร์เพื่อกำจัดฮาร์มอนิก.....	22
2.8 การต่อพาสซีฟฟิวเตอร์ในระบบไฟฟ้า.....	24
3.1 ภาพตัวอย่างสเปกตรัมของสัญญาณใน 3 มิติ.....	28
3.2 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมแอมพลิจูด และเฟสของสัญญาณ.....	29
3.3 ภาพเปรียบเทียบสเปกตรัมและความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณมีคาบ .....	30
3.4 โครงสร้างของระบบแอคทีฟเพาเวอร์ฟิวเตอร์ .....	31
3.5 บล็อกไดอะแกรมของกระแสอ้างอิงแกน $d$ และ $q$ ของแอคทีฟเพาเวอร์ฟิวเตอร์.....	36
3.6 บล็อกไดอะแกรมกระแสควบคุมของแกน $d$ และ $q$ ของแอคทีฟเพาเวอร์ฟิวเตอร์.....	37
3.7 บล็อกไดอะแกรมตัวกรองผ่านความถี่ต่ำของกระแสอ้างอิงแกน $d$ .....	38
3.8 บล็อกไดอะแกรมกระแสควบคุมลูปของแกน $d$ และ $q$ ของแอคทีฟเพาเวอร์ฟิวเตอร์.....	39
3.9 บล็อกไดอะแกรมที่ได้จากการลดรูปของกระแสควบคุมลูปของแกน $d$ และ $q$ .....	41
3.10 บล็อกไดอะแกรมดีซี-ลิงค์ เรกกูเลเตอร์ .....	42
3.11 บล็อกไดอะแกรมการวิเคราะห์สำหรับแอคทีฟเพาเวอร์ฟิวเตอร์ .....	44
3.12 บล็อกไดอะแกรมแสดงระบบควบคุมรวมของระบบแอคทีฟเพาเวอร์ฟิวเตอร์ .....	45
4.1 โหลดแบบ Nonlinear load.....	51
4.2 แสดงรูปคลื่นกระแสฮาร์มอนิกก่อนการชดเชย.....	53
4.3 แสดงรูปคลื่นแรงดันแหล่งจ่ายของแต่ละเฟส.....	53
4.4 แสดงรูปคลื่นกระแสของแหล่งจ่ายหลังจากชดเชย .....	54
4.5 แสดงรูปคลื่นกระแสของแหล่งจ่ายชดเชยเมื่อผ่านการกรอง.....	54
4.6 ความถี่สเปกตรัมของกระแส $i_a$ ก่อนการชดเชย .....	56
4.7 ความถี่สเปกตรัมของกระแส $i_a$ หลังการชดเชย .....	56
4.8 ความถี่สเปกตรัมของกระแส $i_b$ ก่อนการชดเชย.....	57

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ความถี่สเปกตรัมของกระแส $i_b$ หลังการชดเชย .....	57
4.10 ความถี่สเปกตรัมของกระแส $i_c$ ก่อนการชดเชย .....	58
4.11 ความถี่สเปกตรัมของกระแส $i_c$ หลังการชดเชย .....	58
4.12 ฮาร์มอนิกรวมของกระแส $i_a$ ก่อนการชดเชย .....	59
4.13 ฮาร์มอนิกรวมของกระแส $i_a$ หลังการชดเชย.....	59
4.14 ฮาร์มอนิกรวมของกระแส $i_b$ ก่อนการชดเชย.....	60
4.15 ฮาร์มอนิกรวมของกระแส $i_b$ หลังการชดเชย .....	60
4.16 ฮาร์มอนิกรวมของกระแส $i_c$ ก่อนการชดเชย .....	61
4.17 ฮาร์มอนิกรวมของกระแส $i_c$ หลังการชดเชย.....	61
4.18 ระบบไฟฟ้า 3 เฟส Nonlinear load แบบสมมูล ซึ่งเป็นระบบที่ยังไม่ได้มีการชดเชย กระแสฮาร์มอนิก .....	66
4.19 ระบบไฟฟ้า 3 เฟส Nonlinear load ที่มีแอกทีฟเพาเวอร์ฟิเตอร์เป็นตัวสร้างกระแส ชดเชยต่ออยู่ในระบบ .....	68

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและเหตุจูงใจของการวิจัย

ในปัจจุบันนี้ประเทศไทยก็ได้เริ่มที่จะหันมาให้ความสำคัญกับปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นกันบ้างแล้ว ซึ่งแตกต่างกันกับต่างประเทศที่ได้ให้ความสนใจและศึกษาค้นคว้าวิจัยในปัญหาฮาร์มอนิกกันมาก่อนหน้านี้แล้ว

ฮาร์มอนิก คือ สัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล (50Hz) ปัญหาก็คือว่า สัญญาณที่มีความถี่สูงนี้จะเข้าไปรวมกับสัญญาณที่เป็นความถี่มูลฐาน ซึ่งจะทำให้รูปคลื่นที่ควรจะเป็นรูปไซน์ (sine wave) ต้องผิดเพี้ยนไปและทำให้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ต่ำลงด้วย แหล่งกำเนิดของฮาร์มอนิกเกิดจากอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear load) ซึ่งได้แก่ อุปกรณ์เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ หรืออาจจะมาจากด้านระบบ ไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้า

ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่อระบบต่างๆ เช่น ทำให้เกิดการสูญเสีย (loss) ในหม้อแปลงไฟฟ้า มอเตอร์ แหล่งจ่ายไฟฟ้าฉุกเฉินหรือแม้แต่สายไฟฟ้า ซึ่งหากการออกแบบไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบจากกระแสฮาร์มอนิกด้วยแล้ว ก็อาจจะทำให้เกิดการสูญเสียเกิดขึ้นกับระบบได้และโดย Crossing หรือรีเลย์บางประเภทที่ตอบสนองค่า  $THD_v$  ได้ไม่เกิน 5% ก็อาจจะทำให้เกิดการทำงานผิดพลาดและอาจจะตัดวงจรจนไม่สามารถทำงานได้ในสภาพที่เกิดฮาร์มอนิกสูงๆ ได้และนอกจากนี้ฮาร์มอนิกยังส่งผลกระทบต่อระบบจ่ายไฟฟ้ากำลัง การป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลัง การรบกวนต่อระบบสื่อสารตลอดถึงการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าเป็นต้น

การแก้ปัญหาในการเกิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังที่สำคัญ นั้นมีอยู่ 2 วิธีด้วยกันก็คือ พาสซีฟแอลซีฟิลเตอร์ (Passive LC Filter) และ แอกทีฟฟิลเตอร์ (Active Filter) ซึ่งในส่วนวงจรแอกทีฟฟิลเตอร์นั้นจัดว่าเป็นวิธีที่ให้ประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด ถ้าหากได้รับการออกแบบและติดตั้งอย่างถูกวิธี ทั้งนี้เพราะสาเหตุดังต่อไปนี้

1. การติดตั้งแอกทีฟฟิลเตอร์นั้นนอกจากสามารถกำจัดกระแสฮาร์มอนิกได้สูงถึง 80-90% แล้วยังสามารถปรับรูปร่างของเพาเวอร์แฟคเตอร์ ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ดีได้ในเวลาเดียวกันได้ด้วย
2. สามารถทำการติดตั้งตัวแอกทีฟฟิลเตอร์ที่ตำแหน่งเมนของระบบเพียงจุดเดียวได้ซึ่งทำให้การควบคุมเป็นไปอย่างอัตโนมัติและการดูแลรักษาทำได้ง่ายแทนที่จะติดตั้งตามจุดต่างๆ ในแต่ละอุปกรณ์ซึ่งมักมีหลายจุดที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก
3. การใช้แอกทีฟฟิลเตอร์นั้นจะไม่มีข้อจำกัดในส่วนของการกระแสโหลด หรือในส่วนของการกระแสฮาร์มอนิกว่ามากหรือน้อยเพียงใด กล่าวคือ ถ้ากระแสฮาร์มอนิกมากหลายร้อย

หลายพันแอมแปร์ ก็จะสามารถออกแบบแอกทีฟฟิลเตอร์ที่สามารถรับกระแสดังกล่าวได้ ( ขึ้นกับขนาดหม้อแปลงและโหลด ) ด้วยเหตุนี้จึงสามารถรักษาคุณภาพของระบบไฟฟ้าที่ระดับแรงดันค่อนข้างคงที่มาก เมื่อเทียบกับการแก้ฮาร์มอนิกด้วยวิธีอื่นๆ

4. สามารถออกแบบติดตั้งได้ทั้งในด้านแรงดันต่ำและด้านแรงดันสูงอีกทั้งมีข้อจำกัดน้อยมากกับโหลดในระบบ

วงจรแอกทีฟฟิลเตอร์ที่นำมาปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้ดังนี้

1. วงจรแอกทีฟฟิลเตอร์แบบฉีดกระแสฮาร์มอนิก (Harmonic Current Injection)
2. วงจรแอกทีฟฟิลเตอร์แบบปรับเรกกูเลเตอร์ ( Preregulation )

แต่เนื่องจากในปัจจุบันประเทศไทยเรายังไม่สามารถผลิตแอกทีฟฟิลเตอร์ที่มีประสิทธิภาพ เพียงพอขึ้นใช้งานเองภายในประเทศได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องนำเข้าอุปกรณ์ประเภทนี้จากบริษัทผู้ผลิตในต่างประเทศ ซึ่งค่อนข้างจะมีราคาสูงมากดังนั้นทางกลุ่มจึงได้มีความคิดที่จะทำการศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์แอกทีฟฟิลเตอร์ เพื่อที่จะเป็นพื้นฐานเบื้องต้นสำหรับการพัฒนาอุปกรณ์แอกทีฟฟิลเตอร์ที่มีประสิทธิภาพดีและเพื่อใช้งานภายในประเทศ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. เพื่อทำการศึกษาการทำงานของตัวแอกทีฟฟิลเตอร์และโครงสร้างภายในของวงจรของแอกทีฟฟิลเตอร์
2. เพื่อศึกษาถึงแหล่งกำเนิดที่ทำให้เกิดฮาร์มอนิกขึ้น และผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่อระบบ และต่ออุปกรณ์ต่างๆ
3. เพื่อศึกษาการใช้งานโปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์ค่าฮาร์มอนิกในลำดับต่างๆ และ ใช้โปรแกรม MATLAB สร้างแบบจำลองระบบเพื่อกำจัดฮาร์มอนิก

## 1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้จะกล่าวถึง การใช้งานโปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์หาค่าของฮาร์มอนิกในลำดับต่างๆ แล้วใช้โปรแกรม MATLAB ในการกำจัดฮาร์มอนิก ซึ่งในที่นี้จำเป็นต้องทำการศึกษาการทำงานของวงจร แอกทีฟฟิลเตอร์ และศึกษาถึงแหล่งที่ทำให้เกิดฮาร์มอนิกขึ้นและผลของฮาร์มอนิกต่อระบบและอุปกรณ์ต่างๆ

## 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

การทำโครงการวิจัยในปริยญาณิพนธ์ฉบับนี้นั้นมีขั้นตอนการศึกษาเริ่มจากการ ศึกษาการทำงาน of วงจรแอกทีฟฟิลเตอร์ ศึกษาชนิดของโพลคที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก และศึกษาการใช้งานโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ในการวิเคราะห์แยกอันดับของฮาร์มอนิก พร้อมทั้งทำการใช้โปรแกรม MATLAB สร้างแบบจำลองระบบเพื่อกำจัดฮาร์มอนิก

## บทที่ 2

# ทฤษฎีพื้นฐาน

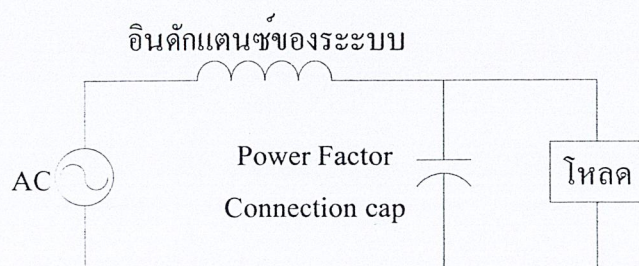
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการทั่วไปที่เกี่ยวกับฮาร์มอนิก ในเรื่องของค่าศัพท์และปริมาณต่างๆ ประเภทของฮาร์มอนิก แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก เรโซแนนซ์ ผลกระทบของฮาร์มอนิก และวิธีการแก้ไขฮาร์มอนิก

### 2.1 คำศัพท์และปริมาณต่างๆ

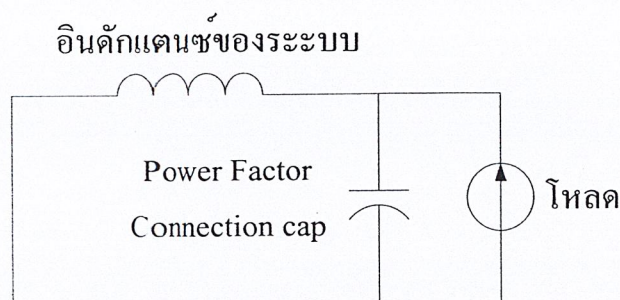
#### 2.1.1 ฮาร์มอนิก ( Harmonic )

ฮาร์มอนิก คือ สัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล เช่น ความถี่มูลฐานคือ 50 Hz ฮาร์มอนิก คือ 100 , 200Hz เป็นต้น ความถี่มูลฐานเรียกว่า ฮาร์มอนิกที่ 1 ส่วนฮาร์มอนิกลำดับอื่นๆ ก็หาได้จากคูณเอาเลขจำนวนเต็มบวกคูณกับความถี่มูลฐาน การวัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกสามารถทำได้หลายวิธีที่แตกต่างกันออกไป แต่โดยส่วนมากแล้วจะใช้วัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ( Total Harmonic Distortion : THD ) ที่ความถี่ฮาร์มอนิกต่างๆ กัน ปริมาณของขนาดฮาร์มอนิกจะถูกแสดงด้วยจำนวนเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่หลักมูล โดยปกติเครื่องมือวัดฮาร์มอนิกทั้งหลายจะแสดงค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมและความเพี้ยนของฮาร์มอนิกแต่ละส่วนด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ของขนาดที่ความถี่หลักมูลเช่นกัน

เมื่อโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นถูกป้อนด้วยแรงดันหลักมูลโดยแหล่งจ่าย ซึ่งไม่มีค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ มันจะมีผลทำให้รูปร่างของกระแสมีความแตกต่างไปจากแรงดันที่ป้อน ความเพี้ยนของกระแสนี้จะมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบจ่าย เมื่ออิมพีแดนซ์ของระบบถูกเพิ่มเข้ามา ความเพี้ยนของกระแสจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ตัวอิมพีแดนซ์ของระบบถูกเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้เกิดความเพี้ยนของแรงดันดังแสดงในรูปที่ 2.1 ด้วยเหตุนี้ โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นหรือตัวผลิตฮาร์มอนิกจะถูกแทนที่ด้วยแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกด้วยอิมพีแดนซ์ของระบบที่เหมาะสม ซึ่งได้แสดงดังในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 รูปแบบของระบบไฟฟ้าและโหลดที่ความถี่หลักมูล



รูปที่ 2.2 รูปแบบของระบบไฟฟ้าและ โหลดที่ความถี่ฮาร์มอนิก

### 2.1.2 กระแสฮาร์มอนิก ( Harmonic Current )

ฮาร์มอนิกที่อยู่ในรูปของกระแสในไลน์ซึ่งในระบบไฟฟ้าเกิดขึ้นจากอุปกรณ์ที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ( Non-linear Devices ) ซึ่งอาจเป็น โหลดหรือแหล่งกำเนิดก็ได้ ในอดีตไม่มีการศึกษาอย่างจริงจังเนื่องจากอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นน้อยมากทำให้ผลของฮาร์มอนิกต่อระบบไฟฟ้ามีค่าน้อย แต่ในช่วงสิบปีที่ผ่านมา อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น ได้ขยายตัวเป็นอย่างมาก เป็นผลให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกอย่างมากมาย

### 2.1.3 แรงดันฮาร์มอนิก ( Harmonic Voltage )

เกิดจากการที่กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านค่า รีแอกแตนซ์ ( Reactance ) ของระบบแหล่งจ่าย สายส่งหรือรีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่ต่อขนานเข้าไปในระบบ เพื่อทำการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปแรงดัน อันเนื่องจากรีแอกแตนซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ ส่วนค่าความต้านทานไม่เปลี่ยนแปลง กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบนั้นจะเป็นตัวที่จะทำให้เกิดความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิก ( Harmonic Voltage Distortion ) ซึ่งเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

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

เมื่อ

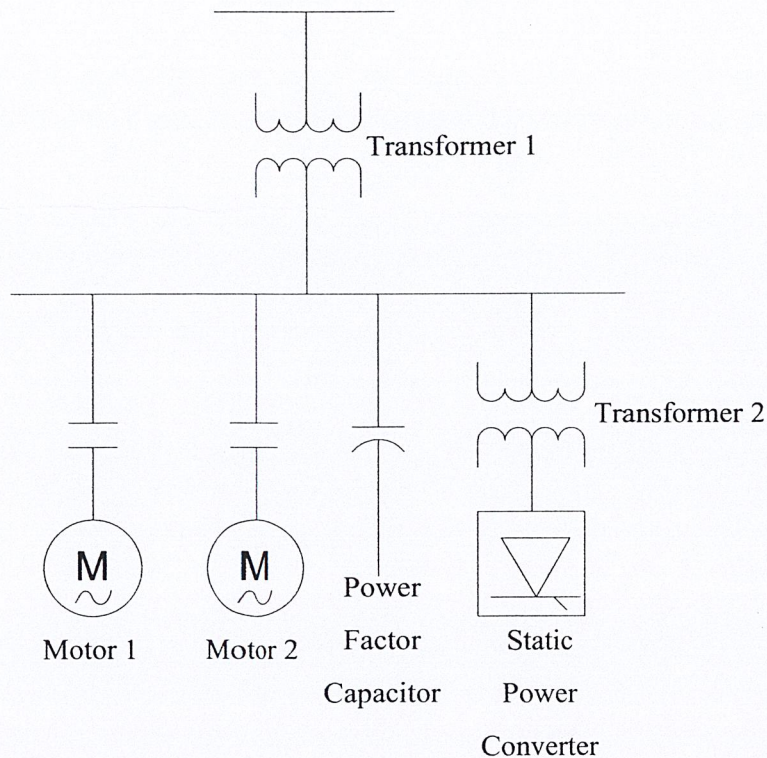
$$V_n = \text{แรงดันฮาร์มอนิก}$$

$$I_n = \text{กระแสฮาร์มอนิกในระบบ}$$

$$Z_n = \text{ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ}$$

ถ้าในระบบไฟฟ้าใช้คาปาซิเตอร์ต่อขนานเข้าไปในระบบ เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังจะทำให้มีอิทธิพลต่อระดับฮาร์มอนิกในระบบจำหน่าย คาปาซิเตอร์มิได้กำเนิดฮาร์มอนิก แต่จากการ

ต่อวงจรในระบบมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดเงื่อนไขเรโซแนนซ์แบบขนานระหว่างคาปาซิเตอร์ และ รีแอกแตนซ์ ของระบบดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การต่อคาปาซิเตอร์ขนานเข้าไปในระบบ

เมื่อพิจารณาให้โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสฮาร์โมนิก ถ้าเรโซแนนซ์แบบขนานเกิดขึ้นที่ความถี่เดียวกันหรือใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์โมนิกของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะทำให้เกิดกระแสจำนวนมากไหลผ่านระหว่างรีแอกแตนซ์ของระบบกับรีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ ซึ่งค่ากระแสนี้จะรวมกับกระแสฮาร์โมนิกของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมรีแอกแตนซ์ของระบบ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ตัวประกอบความเพี้ยนของแรงดัน มีค่ามาก (Distortion Factor : DF )

#### 2.1.4 ตัวประกอบความเพี้ยน ( Distortion Factor: DF )

ตัวประกอบความเพี้ยน (Distortion Factor : DF) ตัวประกอบฮาร์โมนิก (Harmonic Factor : HF ) ความเพี้ยนฮาร์โมนิกทั้งหมด (Total Harmonic Distortion: THD) ความหมายทั้งสามตัวนั้นมาตรฐานของ IEEE ได้ให้ความหมายไว้เหมือนกัน กล่าวคือ ค่าที่บอกถึงปริมาณของฮาร์โมนิกที่มีอยู่ทั้งหมด โดยเปรียบเทียบกับค่า *rms* ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล

IEEE 519-1992

Harmonic voltage And Harmonic current

$$DF_v = HF_v = THD_v = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{V_1^2}} \times 100\% \quad (2.2)$$

$$= \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad (2.3)$$

$$DF_i = HF_i = THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}} \times 100\% \quad (2.4)$$

$$= \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (2.5)$$

ICE 555-1:1992

$$HD_v = THD_v = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2}}}{1} \times 100\% \quad (2.6)$$

$$HD_i = THD_i = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}}}{1} \times 100\% \quad (2.7)$$

ถ้ารับมาตรฐาน IEC นั้นได้ให้ความหมายทั้งสามตัว ว่ามันคือความเพี้ยนของฮาร์โมนิก (Harmonic Distortion : HD) กล่าวคือ บอกถึงปริมาณของฮาร์โมนิกที่มีอยู่ทั้งหมด โดยเปรียบเทียบกับค่า *rms* ของปริมาณทั้งหมด

### 2.1.5 ลำดับฮาร์โมนิก ( Harmonic Order )

ลำดับฮาร์โมนิก คือ อัตราส่วนของความถี่ฮาร์โมนิกและความถี่หลักมูล เช่น เมื่อเราเอ่ยถึงฮาร์โมนิกที่ 3 หากความถี่หลักมูลเป็น 50Hz ก็จะได้ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 3 เป็น 150 Hz

### 2.1.6 ตัวประกอบกำลัง (Power Factor)

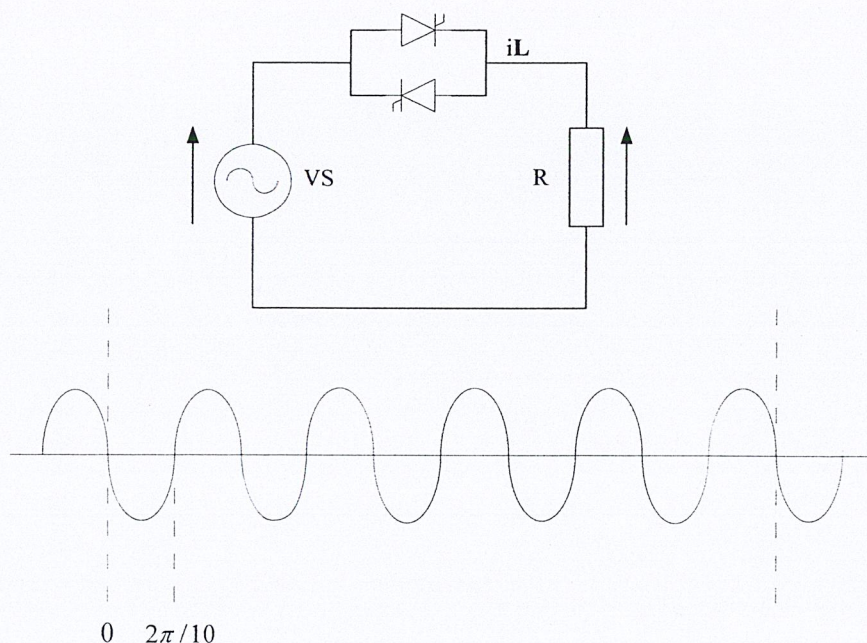
หมายถึง อัตราส่วนของกำลังงานจริง ( W, kW) ต่อกำลังงานปรากฏ (VA, kVA) อย่างไรก็ดี ตามหากรูปคลื่นของแรงดันและกระแสมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์ เราอาจพูดถึงตัวประกอบกำลัง ในเทอมค่าโคไซน์ (cosine) ของมุมเฟสระหว่างแรงดันกับกระแสก็ได้

## 2.2 ประเภทของฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นและปะปนอยู่ในกระแสหรือแรงดัน ไฟฟ้านั้นอาจแบ่งเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

### 2.2.1 อินเตอร์ฮาร์มอนิก ( Interharmonic )

หมายถึง ส่วนประกอบของรูปคลื่นไซน์ที่มีค่าความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน อินเตอร์ฮาร์มอนิกนี้ส่วนมากจะพบในกระแสเตาหลอมแบบอาร์คเนื่องจากตอนหลอมกระแสอาร์ค จะไม่เสถียร ทำให้คาบกระแสไม่แน่นอน กล่าวคือ ความถี่ 50Hz คาบจะกินเวลา 20 มิลลิวินาที แต่กระแสอาร์คจะมีคาบเวลาไม่เป็น 20 มิลลิวินาที ทุกคาบ ทำให้เกิดอินเตอร์ฮาร์มอนิกขึ้น นอกจากนี้ ก็จะพบอินเตอร์ฮาร์มอนิก ในอุปกรณ์ที่มีการควบคุมทำงานแบบ Integral Cycle Control ดังแสดง ได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การควบคุมกระแสที่ไหลผ่าน โหลดแบบ Integral Cycle Control

### 2.2.2 ฮาร์โมนิกคุณลักษณะ ( Characteristic Harmonic )

หมายถึง ฮาร์โมนิก ที่ถูกสร้างโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้า ( แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้สารกึ่งตัวนำเช่น ไดโอด , SCR) ซึ่งในสภาวะการทำงานปกติ ลำดับของฮาร์โมนิก สามารถหาได้จาก

$$n \equiv kp \pm 1 \quad (2.8)$$

เมื่อ

$n$  = ลำดับของฮาร์โมนิก

$k$  = เลขจำนวนเต็มบวกใดๆ

$p$  = จำนวนพัลส์ของเครื่องแปลงผันไฟฟ้า

### 2.2.3 ฮาร์โมนิกที่ไม่ได้เกิดจากคุณลักษณะ ( Noncharacteristic Harmonic )

ฮาร์โมนิกที่ไม่ได้เกิดจากคุณลักษณะ หมายถึง ฮาร์โมนิกที่ถูกสร้างโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้า ซึ่งจะไม่เป็นไปตามสมการ เช่น เครื่องแปลงผันไฟฟ้าชนิด 12 พัลส์ ควรจะมีเฉพาะฮาร์โมนิกคุณลักษณะที่มีลำดับ 11, 13, 23, 25, 35, 37 ดังนั้นถ้ามีฮาร์โมนิกที่มีลำดับเป็น 5, 7, 17, 19 ปะปนมาด้วยฮาร์โมนิกเหล่านี้ถือว่าเป็นฮาร์โมนิกที่ไม่ได้เกิดจากคุณลักษณะ

### 2.2.4 ฮาร์โมนิกที่สามหารลงตัว ( Triplen Harmonic )

ฮาร์โมนิกที่สามหารลงตัว หมายถึง ฮาร์โมนิกลำดับสามหารลงตัวได้แก่ ฮาร์โมนิกลำดับที่ 3, 6, 9 ซึ่งจัดอยู่กลุ่มลำดับ (sequence) เป็นศูนย์ ในกรณีที่เป็นระบบ 3 เฟส 4 สาย ฮาร์โมนิก กลุ่มนี้จะไหลอยู่ในสายนิวตรอน ทำให้เกิดปัญหากับระบบไฟฟ้าขึ้นเช่น สายนิวตรอนร้อน ฉนวนเสียหาย เกิดลัดวงจร เป็นต้น

## 2.3 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิก

แหล่งกำเนิดของฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้านั้นมีอยู่ด้วยกันหลายแหล่ง ทั้งจากอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภท Static power converter ที่เริ่มนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมและเกิดเนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทต่างๆ ที่ได้มีการนำมาใช้งานกันนานแล้ว กล่าวคือได้รวบรวมสรุปแหล่งที่มาทั้งหมดที่เป็นตัวกำเนิดฮาร์โมนิกขึ้นมาในระบบไฟฟ้ากำลัง รวมทั้งกล่าวถึงรายละเอียดของการเกิดและขนาดของฮาร์โมนิกว่ามีมากน้อยเพียงใดซึ่งจะมีผลทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบไฟฟ้าหรืออุปกรณ์

แหล่งกำเนิดสัญญาณฮาร์โมนิก สามารถแยกได้หลายประเภทดังนี้

ก. โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

- เรคตีไฟเออร์ ( rectifier )
- เรคตีไฟเออร์แบบมีการควบคุม ( controlled rectifier )
- คอนเวอร์เตอร์แบบความถี่ ( static frequency converter )
- รีแอคเตอร์แบบอิ่มตัว ( saturable reactor )
- เตาหลอมแบบอาร์ค ( arc furnace )
- เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบอาร์ค

ข. แหล่งกำเนิดแบบไม่สมดุล ( phase unbalance sources )

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

ค. กระแสกระตุ้น ( exciting current )

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

ง. แหล่งกำเนิดอื่นๆ

- สวิตช์ชิงเสิร์จ
- ฟิวส์
- ฟอลต์
- กระแสตรงในวงจรกระแสสลับ

รายละเอียดของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในหัวข้อต่างๆ ข้างต้นนี้จะได้กล่าวไว้เป็นข้อๆ ถึงการกำเนิดฮาร์มอนิกและผลที่มีต่อระบบอย่างน้อยเพียงใด เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจในเรื่องของแหล่งกำเนิดและวิธีการแก้ไขปัญหเกี่ยวกับฮาร์มอนิกในโอกาสต่อไป

### 2.3.1 โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ( Nonlinear load )

โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่มีใช้กันมากในปัจจุบันนี้ ได้แก่ โหลดที่รับไฟผ่านตัวเรคตีไฟเออร์ มา โหลดที่รับไฟรวมทั้งระบบจากรีเฟคตีไฟร์ซึ่งมีผลต่อแหล่งจ่ายไฟหรือเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ซึ่งจะอย่างน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของวงจรทางด้านกระแสตรง ตัวเหนี่ยวนำซึ่งมีหน้าที่ทำให้สัญญาณกระแสตรงเรียบขึ้นในวงจรไทรสเตอร์นั้น เป็นตัวต้นเหตุที่ทำให้กระแสทางด้านของแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับมีรูปคลื่นที่ใกล้เคียงคลื่นสแควร์ ( square wave ) มาก ในเรคตีไฟเออร์

แบบที่ไม่มีมีการควบคุม ( uncontrolled rectifier ) และในส่วนคอนเวอร์เตอร์แบบความถี่ ( frequency converter ) ก็จะมีผลในรูปแบบเดียวกันเกิดขึ้น ถ้าหากมีการใช้ตัวเหนี่ยวนำสำหรับทำให้สัญญาณกระแสตรงเรียบขึ้น

ถ้าหากกระแสทางด้านโหลดใช้คาปาซิเตอร์สำหรับทำให้ค่าสัญญาณที่เรียบขึ้น แทนที่จะใช้ความเหนี่ยวนำกระแสกลับทางด้านอินพุทจะไหลเฉพาะช่วงแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ( peak voltage ) เท่านั้นในช่วงครึ่งไซเคิล สัญญาณกระแสแบบตัด ( chopped current wave ) เกิดขึ้นได้เนื่องจากกระแสไหลได้เฉพาะในช่วงของไซเคิลที่ค่าของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับกับแหล่งจ่าย มีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่คร่อมตัวคาปาซิเตอร์ช่วงระยะที่กระแสไหลในแต่ละครึ่งไซเคิลขึ้นอยู่กับขนาดของความจุ ความจุยิ่งขนาดใหญ่ก็ทำให้กระแสตรงที่ออกมาเรียบมากขึ้นและพัลส์ ( pulse ) กระแสสลับมีระยะเวลาสั้นแต่มีขนาดสูง

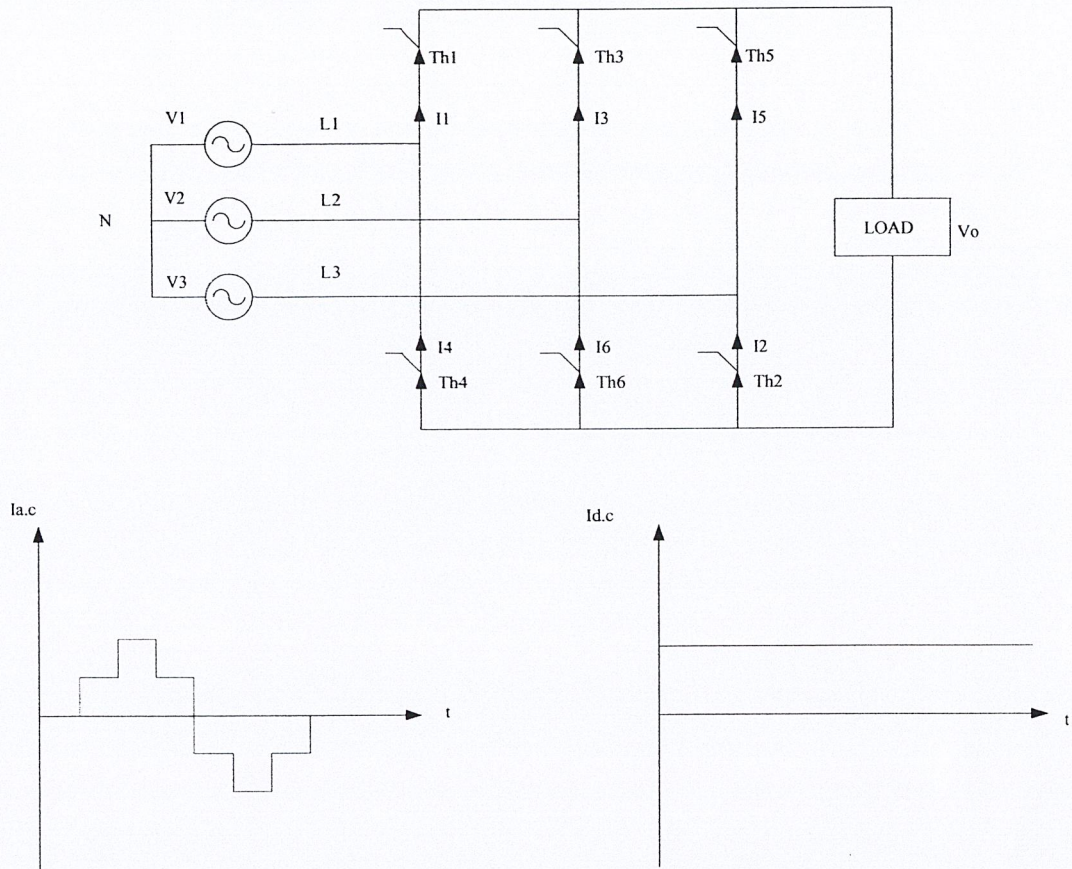
ในกรณีที่ไม่ได้มีการใช้ทั้งค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุ เพื่อทำให้สัญญาณกระแสตรงเรียบนั้นจะทำให้กระแสสลับจากแหล่งจ่ายไฟมีการเบี่ยงเบนจากไซน์ ( distort ) น้อย เเรกติไฟเออร์แบบ full wave single phase นั้น เมื่อจ่ายกระแสให้โหลดที่เป็นความต้านทานอย่างเดียวก็ไม่มีกการเบี่ยงเบนของไซน์เกิดขึ้นทางด้านกระแสสลับของแหล่งจ่ายไฟ อย่างไรก็ตามถ้าเป็นแบบสามเฟสการเบี่ยงเบนของไซน์ทางด้านกระแสของแหล่งจ่ายก็จะเกิดขึ้น

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของกระแสสลับที่จ่ายให้กับโหลดที่ใช้ไฟกระแสตรงเรียบ

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

รูปที่ 2.5 เป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส 6 พัลส์ ที่ทำหน้าที่แปลงกระแสสลับเป็นกระแสตรงโดยจ่ายกระแสตรงที่เรียบออกมา ส่วนกระแสสลับมีลักษณะเป็นคลื่นสแควร์ทางอินพุทที่มาจากแหล่งจ่ายไฟนี้ก็คือคลื่นที่เบี่ยงเบนจากไซน์ซึ่งเมื่อแยกคลื่นออกโดยใช้สมการ Fourier จะได้

$$L_{ac} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} Id (\cos\theta - \frac{1}{5}\cos 5\theta + \frac{1}{7}\cos 7\theta - \frac{1}{11}\cos 11\theta + \frac{1}{13}\cos 13\theta \dots) \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.5 วงจรและสัญญาณของคอนเวอเตอร์ 3 เฟส 6 พัลส์

การเบี่ยงเบนจากไซน์ของสัญญาณที่แหล่งจ่ายไฟอันเนื่องมาจากวงจรไทรสเตอร์ก็มีสาเหตุอีกประการที่เรียกว่า คอมมิวเตชันนอช (commutation notches) มันจะเกิดขึ้นทุกๆ ครึ่งไซเคิลในแต่ละเฟสของระบบ 6 พัลส์ ซึ่งสาเหตุเกิดเนื่องจากการควบคุมสัปดาห์ไฟฟ้าเอาท์พุทนั้น การทำงานของตัวไทรสเตอร์นั้น ซึ่งบางขณะก็จะอยู่ในช่วงเป็นตัวนำและบางขณะก็ไม่เป็นตัวนำ (conducting and nonconducting) การที่ทำเช่นนี้ได้คือการคอมมิวเตทกระแสกับไทรสเตอร์ตัวถัดไปจำเป็นต้องลดวงจรทางด้านกระแสสลับชั่วขณะเป็นเวลาไมโครวินาที การจำกัดกระแสลดวงจร ให้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้นั้นขึ้นอยู่กับขนาดค่าความเหนี่ยวนำของสายและระบบ ค่าความเหนี่ยวนำยิ่งมาก กระแสลดวงจรยิ่งน้อยและระยะเวลาที่เกิดก็ต้องให้นานพอควรในการทำให้เกิด การคอมมิวเตชันที่สมบูรณ์ คอมมิวเตชันนอชอาจเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของไซน์ เช่น มอเตอร์ขนาด 500 แรงม้า อาจมีการคอมมิวเตชันนอชเกิดขึ้นขนาด 70% เป็นเวลา  $\frac{1}{4}$  m/s โดยเกิดขึ้น 6 ครั้งภายในครึ่งไซเคิลซึ่งก็คือ 1.5 m/s ภายในหนึ่งไซเคิลหรือประมาณ 10% ของเวลา และถ้าหากมี

มอเตอร์ดังกล่าวหลายๆ ชุดต่อที่บัสเดียวกันแล้ว ก็อาจทำให้เกิดผลเสียหายมากขึ้นได้ ความถี่ของคอมมิวเตชันขออยู่ในย่านความถี่ mid-audio หรือสูงกว่าที่ทำให้เกิดการรบกวนคลื่นวิทยุและเกิดการเบี่ยงเบนจากไซนัสในสัญญาณจากแหล่งจ่ายไฟ

### 2.3.2 ความไม่สมดุลของเฟส ( Phase unbalance )

ความไม่สมดุลของเฟสที่เกิดขึ้นในระบบ ก็จะมีผลต่อระบบเช่นเดียวกับการเบี่ยงเบนจากไซนัสเพราะมันมีผลต่อมอเตอร์เช่นเดียวกับการเบี่ยงเบนของความถี่ สาเหตุของการความไม่สมดุลของเฟสก็เนื่องมาจากโหลดไม่สมดุลหรืออิมพีแดนซ์ของเฟสไม่สมดุล หรืออาจเกิดเนื่องมาจากมีโหลดแบบเฟสเดียวที่เป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น เช่น การขับเคลื่อนแบบใช้ทรินสเตอร์แบบเฟสเดียวเป็นต้น ซึ่งทำให้มีปัญหาทางด้านฮาร์มอนิกเกิดขึ้นนอกเหนือจากเฟสไม่สมดุล

สาเหตุสำคัญของความไม่สมดุลของเฟสที่คาดไม่ถึงอีกประการหนึ่งก็คือ ตัวเมนเฟสของเฟสหนึ่งเฟสใดของคาปาซิเตอร์ขาดและเฟสที่ขาดแบบนี้โดยทั่วไปก็ไม่ทราบว่ามันเกิดขึ้น ดังนั้นจึงทำให้เกิดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าเฟส ถ้าคาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งไว้ใช้เพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้น 4% ของระบบ เมื่อเฟสขาดไปหนึ่งเฟสก็จะเกิดความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้า 2% ทำให้เกิดความสูญเสียในมอเตอร์ประมาณ 8%

### 2.3.3 กระแสเอ็กไซต์และเฟอร์โรเรโซแนนซ์ ( Exciting current and ferroresonance )

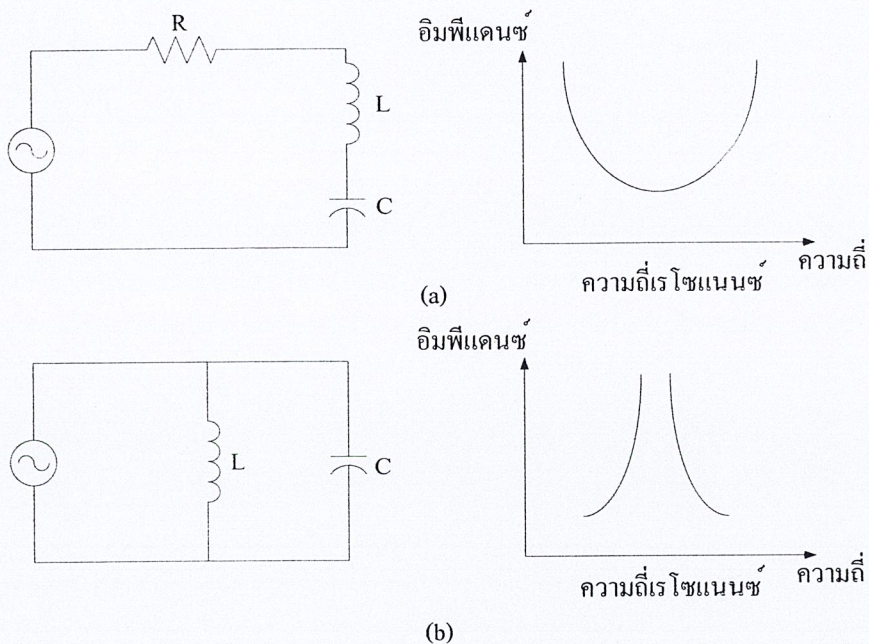
กระแสเอ็กไซต์โดยปกติไม่ได้ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของรูปคลื่น ( wave distortion ) แต่ปัญหาเกิดเนื่องจากแรงดันไฟฟ้า เพราะว่ากระแสเอ็กไซต์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ซึ่งตามมาตรฐานแล้วหม้อแปลงที่มีแรงดันไฟฟ้า 110% ของอัตรากระแสไม่ควรเกิดความร้อนมากเกินไป ( overheat ) เมื่อไม่มีโหลด นั่นก็คือที่ 110% ของอัตราแรงดันไฟฟ้าสูญเสียอันเนื่องมาจากการที่กระแสเอ็กไซต์มีค่าเท่ากับความสูญเสียในหม้อแปลงเมื่อได้จ่ายโหลดเต็มที่ที่ 130% ของอัตราแรงดันไฟฟ้ากระแสเอ็กไซต์ ซึ่งอาจมีขนาดใกล้เคียงกับค่ากระแสโหลดเต็มที่ ซึ่งกระแสดังกล่าวประกอบด้วยฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 หรือมากกว่า มีขนาดมากกว่า 50% และทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของรูปคลื่น

เฟอร์โรเรโซแนนซ์เป็นอีกอย่างที่เกิดขึ้นไม่บ่อยครั้งนัก แต่เมื่อเกิดขึ้นแล้วก็จะทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของรูปคลื่นและเกิดแรงดันไฟฟ้าเกิน ( overvoltage ) เฟอร์โรเรโซแนนซ์อาจเกิดขึ้นได้เมื่อเฟสหนึ่งเฟสใดถูกเปิดออกและเฟสหนึ่งเฟสใดของหม้อแปลงถูกจ่ายไฟผ่านทางความจุ เคเบิลยาว 30-60 เมตร สามารถให้ค่าความจุที่มากพอที่จะทำให้เกิดเฟอร์โรเรโซแนนซ์ ซึ่งสาเหตุที่เกิดอาจเป็นไปได้ เช่น เฟสต้นทางตัวหนึ่งตัวใดของสายที่จ่ายมายังหม้อแปลงขนาดไม่เกิน 5000 KVA ขาดลงขนาดของกระแสคาปาซิเตอร์แม้เพียง 1% ของกระแสเอ็กไซต์ของหม้อแปลงก็สามารถทำให้เกิดเฟอร์โรเรแนนซ์ขึ้นได้กับหม้อแปลงที่ยังไม่ได้จ่ายโหลด โดยปกติแล้วเฟอร์โรเรแนนซ์จะไม่เกิดขึ้น

ถ้าหม้อแปลงมีการจ่ายโหลดมากกว่า 30% ของอัตราการป้องกันระบบซึ่งก็คือ การพยายามไม่ให้เกิดกระแสเอ็กไซต์ของหม้อแปลงไหลผ่านความจุที่ต่ออนุกรม และพยายามให้หม้อแปลงมีการจ่ายโหลดเสมอ เมื่อเกิดเฟโอโรเรโซแนนซ์ขึ้นให้รีบปลดเฟสอื่นๆ ของหม้อแปลงออกทันที

## 2.4 เรโซแนนซ์

เมื่อทราบถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดฮาร์โมนิกขึ้นแล้วปัญหาต่อไปที่ต้องทำการศึกษาก็คือ เมื่อมีกระแสฮาร์โมนิกไหลไปในระบบจะมีผลอะไรตามมาบ้าง สำหรับผลเสียอันเนื่องมาจากฮาร์โมนิกนั้นจะขอกกล่าวในภายหลัง แต่ในที่นี้จะขอกกล่าวถึงฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบกรณีที่มีความถี่ตรงกับเรโซแนนซ์ของระบบ



รูปที่ 2.6 วงจรและค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่างๆ

(a) เรโซแนนซ์อนุกรม

(b) เรโซแนนซ์ขนาน

เรโซแนนซ์ในระบบมี 2 แบบคือ เรโซแนนซ์ขนานกับเรโซแนนซ์อนุกรมวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมและขนานรวมทั้งค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่ความถี่ต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.6

เมื่อเกิดเรโซแนนซ์ขนานขึ้นมาจะทำให้กระแสที่มีค่าเพียงเล็กน้อยสามารถทำให้เกิดค่าของแรงดันไฟฟ้าสูงๆ ส่วนเรโซแนนซ์อนุกรมเมื่อเกิดแล้วแรงดันไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดกระแส

ค่าสูงๆ ที่ความถี่เรโซแนนซ์ถ้าไม่มีการเบี่ยงเบนของรูปคลื่นหรือไม่มีโหนดประเภทไม่เป็นเชิงเส้นแล้ว เรโซแนนซ์ที่มีอยู่ในระบบก็ไม่สร้างปัญหาแต่อย่างใด

ความถี่เรโซแนนซ์สามารถหาได้จากสมการ

$$F_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{X_c}{X_{sc}}} \quad (2.10)$$

$$= 50 \sqrt{\frac{KVAsc}{KVAc}} \quad (2.11)$$

$$= \frac{50}{\sqrt{\Delta e}} \quad (2.12)$$

เมื่อ

$L$  = ความเหนี่ยวนำของระบบ

$C$  = ความจุของระบบหรือคาปาซิเตอร์

$KVAsc$  = KVA ลัดวงจรของระบบตำแหน่งที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์

$KVAc$  = KVA ของคาปาซิเตอร์

$\Delta e$  = การเปลี่ยนแปลงของศักดาไฟฟ้าเนื่องจากการใส่คาปาซิเตอร์เข้าไปในระบบ ( per unit )

เช่น ระบบไฟฟ้า 5 Hz ที่มี KVA ลัดวงจร 20000 และคาปาซิเตอร์ที่ใช้ 800 KVA

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

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

เรโซแนนซ์อนุกรมปกติเป็นวงจรที่ถูกออกแบบไว้ กล่าวคือ ตั้งใจทำขึ้นเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาอันเนื่องมาจากเรโซแนนซ์ขนาน โดยใช้เรโซแนนซ์อนุกรมเป็นทางผ่านสำหรับฮาร์มอนิกที่ต้องการ ซึ่งเรโซแนนซ์อนุกรมประกอบด้วยความเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับความจุหรือคาปาซิเตอร์เพื่อทำให้เกิดค่าเรโซแนนซ์ขึ้นที่ความถี่หนึ่งและอิมพีแดนซ์รวมของความเหนี่ยวนำและความจุจะมีค่าต่ำมากจะทำให้กระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่ดังกล่าวนี้ไหลผ่านไปในช่วงจรเรโซแนนซ์ที่ได้ทำล่อไว้เพื่อไม่ให้เข้าไปในระบบไฟฟ้า บางครั้งก็เรียกววงจรเรโซแนนซ์ที่ทำล่อไว้ว่า แทรป ( trap ) ซึ่งวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมจะทำหน้าที่เหมือนความเหนี่ยวนำที่ความถี่สูงมากๆ ดังนั้นจึงไม่มีโอกาส

ที่จะเกิดเรโซแนนซ์ขนานที่ความถี่สูงกว่านี้ได้ เมื่อเพิ่มวงจรเรโซแนนซ์อนุกรมเข้าไปการต่อความเหนี่ยวนำอนุกรมเข้าไปทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ขนานต่ำลง

สำหรับกรณีการทำงานปกติของคอนเวอเตอร์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรซึ่งได้แก่ ความเหนี่ยวนำ ความจุและความต้านทานจะไม่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์เข้ากับความถี่ที่เกิดจากคอนเวอเตอร์ ความจุของหม้อแปลง เคเบิลและสายมีค่าน้อยมากและความเหนี่ยวนำของหม้อแปลง เคเบิลและสายทำให้เกิดเรโซแนนซ์ได้แต่เป็นความถี่สูงมากๆ ซึ่งไม่มีปัญหาต่อระบบแต่ถ้าเพิ่มคาปาซิเตอร์เข้าไปในระบบ ค่าเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในระบบมีโอกาที่จะตรงกับความถี่ฮาร์มอนิกที่เกิดจากตัวคอนเวอเตอร์และเป็นปัญหาที่ต้องแก้ไขเมื่อจะใช้คาปาซิเตอร์

## 2.5 ผลกระทบของฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิกมีผลกระทบต่อระบบและอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังดังนี้

- ทำให้เกิดการขยายระดับฮาร์มอนิก เนื่องจากผลของเรโซแนนซ์อนุกรมและขนาน
- ทำให้การผลิตกำลังไฟฟ้า การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและการใช้กำลังไฟฟ้ามีประสิทธิภาพลดลง
- ทำให้ฉนวนของอุปกรณ์เสื่อมสภาพเป็นผลให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าสั้นลง

ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่อระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น สามารถที่จะแสดงรายละเอียดออกได้เป็นดังนี้

### 2.5.1 ผลกระทบฮาร์มอนิกต่อการเกิดเรโซแนนซ์

คาปาซิเตอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ในระบบอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเรโซแนนซ์เฉพาะแห่งได้ ซึ่งจะเป็นสาเหตุที่ทำให้คาปาซิเตอร์ได้รับกระแสที่มากเกินไป ซึ่งจะเป็นเหตุให้ คาปาซิเตอร์เสียหายได้

### 2.5.2 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบสายส่ง

เมื่อมีกระแสฮาร์มอนิกไหลในระบบสายส่ง ทำให้เกิดผลเสียหลักๆ 2 ประการ คือ

1. ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้นโดยเป็นผลมาจากค่า  $rms$  ของรูปคลื่นกระแสตามสมการ

$$P_L = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n \quad (2.13)$$

เมื่อ

$P_L$  = กำลังสูญเสียในระบบ

$I_n$  = กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่  $n$  ( ค่า *rms* )

$R_n$  = ความต้านทานระบบที่ความถี่ฮาร์มอนิก

2. ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของวงจร โดยเป็นผลจากกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในวงจร กรณีระบบไม่คงที่ (weak system) คือระบบที่มีอิมพีแดนซ์สูงและมีระบบฟอลต์ต่ำ ( low fault level) ทำให้เกิดแรงดันตกมากเป็นผลให้เกิดการเพี้ยนของแรงดันซึ่งผิดกับระบบมั่นคง (stiff system) ที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำและมีระดับฟอลต์สูง

แรงดันตกคร่อมนี้มีผลต่อเคเบิลทำให้เกิดความเครียด ไดอิเล็กตริก ( Dielectric Stress ) สูงกว่าปกติ เป็นผลให้อายุการใช้งานของเคเบิลสั้นลงและทำให้เกิดฟอลต์ได้ง่าย

### 2.5.3 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อหม้อแปลง

ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อหม้อแปลง มี 3 ประการ ดังนี้

1. ทำให้เกิดกำลังสูญเสียในหม้อแปลง กระแสฮาร์มอนิกจะทำให้เกิดกำลังสูญเสีย ขณะมีโหลดและกำลังสูญเสีย Stray flux loss มีค่าเพิ่มขึ้น

2. ฮาร์โมนิกทำให้เกิดกำลังสูญเสียกระแสไหลวน ( eddy current loss ) และกำลังสูญเสียฮิสเทอรีซิส ( hysteresis loss) เพิ่มขึ้น โดยถ้าแหล่งจ่ายจ่ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้หม้อแปลง กำลังสูญเสียแกนเหล็กของหม้อแปลงจะเป็นไปตามสมการ

$$P_{CORE} = (k_1 f + k_2 f^2) v^2 \quad (2.14)$$

เมื่อ

$P_{CORE}$  = กำลังสูญเสียแกนเหล็ก

$k_1 f$  = กำลังสูญเสียฮิสเทอรีซิส

$k_2 f^2$  = กำลังสูญเสียกระแสไหลวนในแกนเหล็ก

$v^2$  = แรงดันรูปคลื่นไซน์ของแหล่งจ่าย

3. ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ ( ที่ความถี่ฮาร์มอนิก ) ระหว่างขดลวดหม้อแปลงกับคาปาซิเตอร์ของสาย ( line capacitor )

จะเห็นว่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงเกิดจากกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกซึ่งขึ้นกับ ความถี่ โดยกำลังสูญเสียจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่ม ดังนั้นที่ฮาร์มอนิกสูงๆ จะทำให้เกิดค่าความร้อนแก่ หม้อแปลงมากกว่าฮาร์มอนิกต่ำๆ แต่อย่างไรก็ตามผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อหม้อแปลงนี้ยังไม่มี มาตรฐานกำหนด

#### 2.5.4 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อเครื่องจักรไฟฟ้า

ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อเครื่องจักรไฟฟ้า ทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและขณะไม่มี โหลดเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เครื่องจักรร้อนกว่าปกติ นอกจากนี้แล้วฮาร์มอนิกก็ยังมีผลต่อประสิทธิภาพ และแรงบิดของเครื่องจักรด้วย

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่มีแหล่งจ่ายไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ ( Nonsinusoidal supply ) จะ สร้างคลื่นความหนาแน่นฟลักซ์ ( flux density wave ) ขึ้นมารบกวนอย่างมาก เมื่อเทียบกับกรณี มีแหล่งจ่ายรูปคลื่นไซน์ ( Sinusoidal Supply ) ฮาร์มอนิกจะทำให้เกิดฟลักซ์ผลลัพท์กระจายใน ช่องอากาศ ( air gap ) และทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า คอกกิง ( cogging ) คือการที่ไม่ สามารถเดินเครื่องได้ หรือเกิด crawling คือการที่ความเร็วมอเตอร์ต่ำกว่าซิงโครนัส ซึ่งยังไม่มี มาตรฐานกำหนดแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกสำหรับมอเตอร์

#### 2.5.5 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อสวิตช์เกียร์

กระแสฮาร์มอนิกจะเพิ่มความร้อนและกำลังสูญเสียให้แก่ สวิตช์เกียร์ โดยที่ส่วนประกอบ ฮาร์มอนิกในรูปคลื่นกระแสมีผลกระทบต่อความสามารถในการตัดกระแส ( current interruption capability ) ของสวิตช์เกียร์ เป็นผลให้การทำงานในการตัดวงจร ( making interruption ) ยากมาก เซอร์คิตเบรกเกอร์จะไม่สามารถตัดกระแสเมื่อมีฮาร์มอนิกได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากขดลวดเป่าดับอาร์ค ( blowout coils ) ซึ่งทำหน้าที่ช่วยให้อาร์คเข้าไปในอาร์คชุต ( arc - chute ) เพื่อทำการตัดการ ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ เป็นผลให้อาร์คไม่ขาดทำให้เบรกเกอร์ไม่สามารถตัดกระแสได้ ปัญหา นี้จะเกิดกับอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ตัดกระแส เช่น โหลดเบรกสวิตช์ ตัวปิด-เปิดวงจร เป็นต้น แต่ เบรกเกอร์สูญญากาศ จะมีความไวน้อยต่อกระแสฮาร์มอนิก

#### 2.5.6 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อคาปาซิเตอร์แบงก์

ผลกระทบของฮาร์มอนิกจะทำให้เกิดความร้อนและความเครียดไดอิเล็กตริก ( Dielectric stress ) กับคาปาซิเตอร์อย่างมาก การเพิ่มขึ้นของแรงดันทำให้เกิดกำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์เป็นไป ตามสมการ

$$P_L = \sum_{n=1}^{\infty} C \omega_n V_n \tan \delta \quad (2.15)$$

เมื่อ

$$P_L = \text{กำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์}$$

$$\tan \delta = R/(1/\omega c) \text{ แฟคเตอร์การสูญเสีย (loss factor)}$$

$$\omega = 2\pi f_n$$

$$V_n = \text{แรงดัน rms ฮาร์โมนิกอันดับที่ } n$$

มากกว่านั้นในกำลังงานรีแอกทีฟ (Reactive power) ก็ยังมีฮาร์โมนิกรวมอยู่ด้วย ดังเช่น

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \quad (2.16)$$

ผลของเรโซแนนซ์อนุกรมและขนานที่ตัวเก็บประจุเป็นสาเหตุของสัปดาห์และกระแสที่มากเกินไป ซึ่งทำให้มีความสูญเสียและความร้อนสูงขึ้น ทำให้เกิดความเสียหายแก่ตัวเก็บประจุ

### 2.5.7 ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อระบบป้องกันของระบบไฟฟ้ากำลัง

ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อรีเลย์สามารถสรุปได้ดังนี้

- ฮาร์โมนิกทำให้รีเลย์มีแนวโน้มที่จะทำงานช้าลงหรือทำงานด้วยค่าเริ่ม (Pickup values) ที่สูงขึ้นแทนที่จะทำงานอย่างรวดเร็วหรือทำงานด้วยค่าเริ่มต่ำๆ
- ฮาร์โมนิกทำให้รีเลย์สถิตย์แบบความถี่ต่ำ (Static under frequency relay) มีความไวต่ำกว่าปกติทำให้การทรูปผิดพลาด
- ฮาร์โมนิกทำให้รีเลย์กระแสและแรงดันเกิน ( Over current and overvoltage relay ) เปลี่ยนลักษณะการทำงาน (Operating Characteristics)
- ฮาร์โมนิกทำให้แรงบิดทำงาน (Operating torque) ของรีเลย์กลับทิศทาง
- ฮาร์โมนิกทำให้อิมพีแดนซ์รีเลย์ชนิดคานสมดุล ( Balanced beam impedance relay ) วัดระยะที่เกิดฟอลต์ผิดพลาดมากเกินไป ( Over reach ) หรือน้อยเกินไป ( under reach )
- ฮาร์โมนิกทำให้ความเร็วในการทำงานของรีเลย์ชนิดผลต่างช้าลง ( Differential relay )

### 2.5.8 ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อมิเตอร์วัดไฟฟ้า

มิเตอร์และเครื่องวัดต่างๆ ก่อนใช้ต้องทำการปรับแต่ง ( Calibration ) ที่กระแสไฟฟ้าสลับ รูปคลื่นไซน์ที่ความถี่หลักมูล ดังนั้นถ้านำมิเตอร์มาใช้กับระบบที่มีฮาร์โมนิกค่าที่วัดได้จะผิดพลาด หรือในกรณีเกิดเรโซแนนซ์ในระบบจะมีผลทำให้เกิดแรงดันฮาร์โมนิกมีค่าสูงในวงจร ซึ่งจะทำให้มิเตอร์ประเภทงานเหนี่ยวนำ ( Induction Disk ) เช่น มิเตอร์วัดกำลังไฟฟ้า ( Watt - hour Meter )

ทำงานผิดพลาดได้เนื่องจากผลของฮาร์มอนิก โดยทั่วไปการเพี้ยนของฮาร์มอนิกมากกว่า 20 % จะมีผลต่อมอเตอร์

### 2.5.9 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่ออุปกรณ์ผู้ใช้ไฟฟ้า

- เครื่องรับโทรทัศน์ ฮาร์มอนิกจะมีผลต่อแรงดันยอด ( peak voltage ) ทำให้ขนาดและความสว่างของภาพเปลี่ยนไป
- หลอดฟลูออเรสเซนต์และหลอดเมอร์คิวไรต์ การทำงานของหลอดชนิดเหล่านี้ต้องมีบัลลาสต์บางครั้งมีคาปาซิเตอร์ด้วย จึงเป็นสาเหตุการเกิดเรโซแนนซ์กับอินดักแตนซ์ของบัลลาสต์และวงจรทำให้หลอดเกิดความร้อนสูงจนเกิดความเสียหาย
- คอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์จะไวต่อความเพี้ยนของฮาร์มอนิกเป็นอย่างมาก ถ้าระบบไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกส์มากกว่าขีดจำกัดจะทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์เสียหายได้

### 2.5.10 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบสื่อสาร

ฮาร์มอนิกจะก่อให้เกิดสัญญาณรบกวน ( noise ) ในระบบสื่อสารทำให้คุณภาพของการส่งสัญญาณลดลง สัญญาณรบกวนระดับต่ำ ( low level noise ) เช่น ในระบบโทรศัพท์อาจก่อให้เกิดความรำคาญ ซึ่งฮาร์มอนิกจะเหนี่ยวนำให้เกิดสัญญาณรบกวนทำให้ได้ยินเสียงเบากว่าปกติหรือมีเสียงรบกวน แต่ที่ระดับสูงฮาร์มอนิกทำให้คุณภาพการส่งลดลงและอาจเกิดการสูญเสียของข่าวสารหรือระบบสื่อสารถึงกับใช้งานไม่ได้

## 2.6 การแก้ปัญหาฮาร์มอนิก

ในระบบไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์กำเนิดฮาร์มอนิกเมื่อใส่คาปาซิเตอร์เข้าไปในระบบอาจทำให้เกิดเรโซแนนซ์กระแสสูงในระบบซึ่งอาจทำให้อุปกรณ์เสียหายได้ วิธีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้หลายประการดังนี้

- 1) เปลี่ยนตำแหน่งหรือขนาดของคาปาซิเตอร์ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิก
- 2) ใส่ LC ฟิวเจอร์ที่ตำแหน่งแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกและจูน ( tune ) ให้เข้ากับฮาร์มอนิกที่เกิดปัญหา LC ฟิวเจอร์ดังกล่าวจะให้อิมพีแดนซ์ต่ำที่ฮาร์มอนิกที่มีปัญหา ในกรณีที่ใส่ฟิวเจอร์เข้าไปแล้วนั้นก็ต้องทำการตรวจเช็คต่อไปอีกว่า อาจเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ตรงกับฮาร์มอนิกตัวอื่นหรือไม่ ถ้าเป็นอย่างนั้นก็ต้องใส่ LC ฟิวเจอร์กรองฮาร์มอนิกที่มีปัญหาตัวต่อไปอีก
- 3) ใส่ L เข้าไปกับคาปาซิเตอร์เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ที่ไม่ให้ใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิกหรือใส่ L เข้าไปอนุกรมกับคาปาซิเตอร์เพื่อใช้เป็นฟิวเจอร์เลย

### 2.6.1 การเปลี่ยนตำแหน่งหรือขนาดคาปาซิเตอร์

ปัญหาของเรโซแนนซ์ที่มีความถี่ตรงหรือใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น สมควรที่จะได้รับการแก้ไขด้วยการเปลี่ยนตำแหน่งหรือขนาดคาปาซิเตอร์ก่อนเป็นอันดับแรก เพราะเป็นวิธีที่เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด พิจารณาความถี่เรโซแนนซ์ของระบบที่เกิดขึ้นตามสมการอีกครั้ง

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{X_c}{X_L}} = \sqrt{\frac{KVA_{sc}}{KVA_c}} \quad (2.17)$$

จากสมการที่ 2.17 จะเห็นว่าความถี่เรโซแนนซ์  $f_p$  เปลี่ยนแปลงโดยการเปลี่ยนแปลงค่าของ L และ C ดังนั้นในการเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งของคาปาซิเตอร์ในระบบก็เพื่อเปลี่ยนค่า L ที่จะมีมาอนุกรมหรือขนานกับคาปาซิเตอร์ในการเกิดเรโซแนนซ์อนุกรมหรือขนานตามลำดับ แต่ในทางปฏิบัติโอกาสที่จะแก้ไขปัญหของฮาร์มอนิกด้วยวิธีดังกล่าว อาจจะไม่ประสบความสำเร็จมากนัก เพราะการเปลี่ยนแปลงของ L แต่ถ้าหากเปลี่ยนตำแหน่งของคาปาซิเตอร์จากต้นทางของระบบไปติดตั้งที่โหลดหรือการเปลี่ยนไปติดตั้งที่ต้นทางของระบบในกรณีเช่นนี้อาจแก้ไขปัญหาได้ แต่ทั้งนี้ก็จะขึ้นอยู่กับขนาดของโหลดนั้นด้วย มิฉะนั้นแล้วการนำคาปาซิเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ไปติดตั้งที่โหลดขนาดเล็กก็อาจมีปัญหาด้านแรงดันไฟฟ้าเกินเกิดขึ้นได้ ซึ่งจะกลายเป็นการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกแต่กลับไปสร้างปัญหาอย่างอื่นไว้อีก

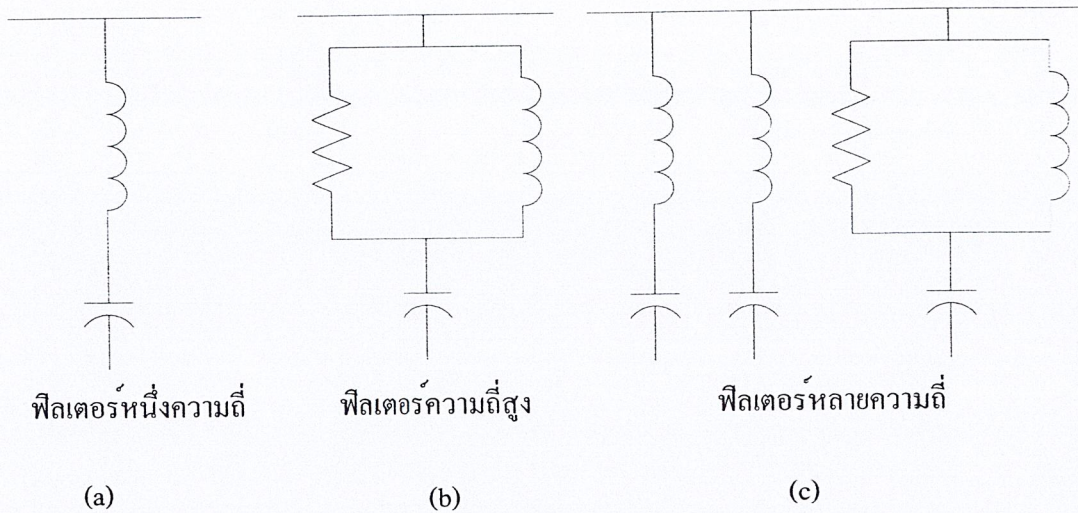
ในการเปลี่ยนแปลงขนาดของคาปาซิเตอร์สามารถช่วยแก้ปัญหาฮาร์มอนิกได้ เพราะจะทำให้  $f_p$  ในสมการที่ 2.17 เปลี่ยนแปลงไป การเปลี่ยนแปลงขนาดของคาปาซิเตอร์นั้นต้องคิดเสมอว่า ถ้าเปลี่ยนแปลงขนาดของคาปาซิเตอร์มากเกินไปก็อาจทำให้การแก้ไขปัญหาเพาเวอร์แฟกเตอร์ด้วยคาปาซิเตอร์มีผลไม่ดีขึ้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงขนาดของคาปาซิเตอร์ต้องให้อยู่ในเกณฑ์ที่ไม่สูญเสีย ผลทางด้านแก้ไขเพาเวอร์แฟกเตอร์จนอยู่นอกเกณฑ์ที่จะยอมรับได้ เช่น จุดประสงค์เพื่อต้องการที่จะปรับปรุงระบบให้มีค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์สูงกว่า 0.85 แต่มีปัญหาด้านฮาร์มอนิกและการเปลี่ยนแปลงขนาดของคาปาซิเตอร์จนทำให้ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ที่ต้องการมีค่าต่ำกว่า 0.85 ก็ถือว่าการแก้ไขปัญหาดังกล่าวไม่ได้ผล

### 2.6.2 การใส่ LC ฟิลเตอร์

ฟิลเตอร์ที่เลือกใช้สำหรับเป็นทางผ่านให้ฮาร์มอนิกไหลออกจากระบบได้ง่ายโดยไม่เข้าไปรบกวนในระบบ มีด้วยกันหลายแบบดังแสดงในรูปที่ 2.7 การเลือกใช้ชนิดของฟิลเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.7 นั้นขึ้นอยู่กับความต้องการที่จะกำจัดฮาร์มอนิกว่าจะกำจัดมากน้อยเพียงใด

รูปที่ 2.7 (a) เป็นฟิลเตอร์ประเภทแบบที่ถูกลที่สุดและใช้แพร์หลายที่สุด แต่ถ้าใช้รีแอกเตอร์ไม่ถูกต้องความถี่ฮาร์มอนิกที่จูนไว้อาจลดลงในระดับที่ยังยอมรับได้แต่อาจเกิดเรโซแนนซ์ที่มีความถี่

ฮาร์มอนิกอื่นๆ ฟิลเตอร์ในรูป 2.7 (b) ใช้เมื่อต้องการกำจัดฮาร์มอนิกที่ความถี่สูง ส่วนฟิลเตอร์ในรูป 2.7 (c) ประกอบด้วยฟิลเตอร์ที่กำจัดฮาร์มอนิกที่รุนแรง 2 ความถี่และฟิลเตอร์ทางขาสุดของรูปมีไว้เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกที่สูงๆ



รูปที่ 2.7 ฟิลเตอร์เพื่อกำจัดฮาร์มอนิก

- (a) ฟิลเตอร์กำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะความถี่
- (b) ฟิลเตอร์กำจัดฮาร์มอนิกความถี่สูง
- (c) ฟิลเตอร์กำจัดฮาร์มอนิกหลายๆ ความถี่

ในการแก้ปัญหาของฮาร์มอนิกจะใช้อุปกรณ์กรองฮาร์มอนิกซึ่งหมายถึงชุดอุปกรณ์ที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้าแล้วสามารถกรองฮาร์มอนิกออกจากระบบไฟฟ้าได้หรืออีกนัยหนึ่งคือ ดูดฮาร์มอนิกออกจากระบบไฟฟ้า โดยให้ฮาร์มอนิกไหลผ่านตัวมันหรือสร้างกระแสไปชดเชยจนฮาร์มอนิกหายไป

### 2.6.3 การเพิ่มรีแอกเตอร์

การแก้ไขปัญหารฮาร์มอนิกที่นิยมใช้กันและได้ผลก็คือ การเพิ่มรีแอกเตอร์เข้าไปอนุกรมกับคาปาซิเตอร์ โดยจูนให้มีเรโซแนนซ์ที่ค่าความถี่ต่ำกว่าฮาร์มอนิกที่ 5 ซึ่งใช้ได้กับระบบที่มีความถี่ตั้งแต่ที่ 5 ขึ้นไป วงจรดังกล่าวทำหน้าที่เหมือนความเหนี่ยวนำที่ฮาร์มอนิกที่ 5 หรือสูงกว่าคั้งนั้น การเรโซแนนซ์เข้ากับความเหนี่ยวนำของระบบก็จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ที่ฮาร์มอนิก ซึ่งกำเนิดจากอุปกรณ์กำเนิดฮาร์มอนิกต่อมาพิจารณาว่ารีแอกเตอร์ที่ต่ออนุกรมเข้ากับคาปาซิเตอร์นั้นควรมีขนาดเท่าใด เพื่อจูนให้มีเรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำกว่าฮาร์มอนิกที่ 5 โดยที่ขนาดของรีแอกเตอร์ที่ใช้จูนให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ฮาร์มอนิกที่ 5 หาได้จาก

$$2\pi f_s L = \frac{1}{2\pi f_s C} \quad (2.18)$$

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

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

$$\frac{X_L}{X_C} = \frac{1}{25} = 0.04 \quad (2.19)$$

$f_1$  คือ ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 1,  $f_5$  คือ ฮาร์โมนิกที่ 5,  $X_L$  คือ รีแอกเตอ์ที่ความถี่ปกติและ  $X_C$  คือ รีแอกแตนซ์คาปาซิเตอร์ปกติ

จากสมการที่ 2.19 พบว่ารีแอกเตอ์ขนาด 4% ของรีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์เมื่ออนุกรมเข้ากับคาปาซิเตอร์จะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ฮาร์โมนิกที่ 5 และจากสมการที่ 2.19 นั้นถ้าใส่รีแอกเตอ์มากกว่า 4% ก็ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่มีความถี่ต่ำกว่าฮาร์โมนิกที่ 5 ถ้าใส่รีแอกเตอ์น้อยกว่า 4% ก็อาจทำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ใกล้เคียงกับฮาร์โมนิกที่ 7, 9 หรือ 11 เป็นต้น

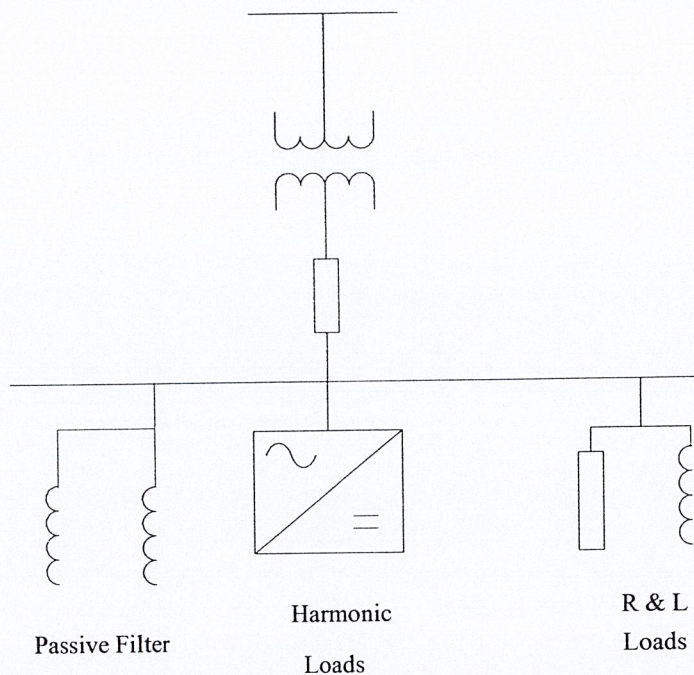
ดังนั้นในการหลีกเลี่ยงเพื่อที่ไม่ให้คาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งไว้เกิดเรโซแนนซ์กับความเหนี่ยวนำของระบบที่มีความถี่ฮาร์โมนิกก็สามารถทำได้โดยเพิ่มรีแอกเตอ์ต่ออนุกรมเข้าไป โดยที่ขนาดของรีแอกเตอ์ที่เพิ่มเข้าไปนั้นต้องมากกว่า 4% เพื่อที่จะไม่ให้เกิดการเรโซแนนซ์ระหว่างรีแอกเตอ์ที่ใส่เข้าไปกับคาปาซิเตอร์ที่ใช้กันซึ่งมีค่าตั้งแต่ 4.5 - 7% การใช้ขนาดค่าเปอร์เซ็นต์ของรีแอกเตอ์ซึ่งมากกว่า 4% ขึ้นไปก็มีผลดีในกรณีที่คาปาซิเตอร์บางหน่วยลัดวงจรจะทำให้  $X_C$  มากขึ้น ความถี่ของเรโซแนนซ์ก็มากขึ้นทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ไปตรงกับความถี่ฮาร์โมนิกได้ยากขึ้น

## 2.6.4 ชนิดของอุปกรณ์กรองฮาร์โมนิก

### 2.6.4.1 พาสซีฟฟิลเตอร์ (Passive Filter)

หมายถึง อุปกรณ์กรองฮาร์โมนิกที่ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ ตัวต้านทาน (R) รีแอกเตอ์ (L) และคาปาซิเตอร์ (C) ที่ได้รับการออกแบบให้มีค่า R, L และ C ที่สัมพันธ์กันจนประพุดิตัวเสมือนลัดวงจร (Low Impedance) สำหรับฮาร์โมนิกแต่เป็นเพียงโหลดธรรมดาตัวหนึ่งสำหรับไฟฟ้า 50Hz ดังนั้นกระแสฮาร์โมนิกในระบบจะเห็นพาสซีฟฟิลเตอร์เป็นเสมือนลัดวงจรและกระแสที่ไหลผ่านพาสซีฟฟิลเตอร์นั้นแทบจะไม่รบกวนต่อระบบไฟฟ้าเลย ซึ่งพาสซีฟฟิลเตอร์เป็นวงจรไฟฟ้าง่ายๆ แต่ต้องทำการออกแบบและวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่ซับซ้อนรวมถึงการผลิตตัว

R, L และ C ที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำจึงสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและปลอดภัยพาสซีฟฟิลเตอร์มีข้อจำกัดในการใช้งานที่ไม่ยืดหยุ่น การต่อพาสซีฟฟิลเตอร์ในระบบไฟฟ้าจะแสดงในรูปที่ 2.8



รูป 2.8 การต่อพาสซีฟฟิลเตอร์ในระบบไฟฟ้า

#### 2.6.4.2 แอคทีฟฟิลเตอร์ ( Active Filter )

แอคทีฟฟิลเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ คือ อุปกรณ์กรองฮาร์มอนิกที่ใช้กำลังของ IGBT ประกอบกับระบบควบคุมการทำงานแบบอิเล็กทรอนิกส์ ( DSP, ไมโครคอนโทรลเลอร์ ) โดยจะทำหน้าที่ตรวจวัดค่ากระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าโดยทำการวิเคราะห์และคำนวณ แล้วจึงทำการฉีดกระแสฮาร์มอนิกในเฟสที่ตรงกันข้ามกับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ผลที่ได้คือกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าจะถูกหักล้างออกไปจนเหลือแต่กระแสที่ความถี่ 50Hz แอคทีฟฟิลเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถกรองฮาร์มอนิกได้ดีที่สุดแต่จะมีราคาสูงกว่าจูนฟิลเตอร์

### 2.7 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียระหว่างแอคทีฟฟิลเตอร์กับพาสซีฟฟิลเตอร์

จากตารางที่ 2.2 จะเห็นว่าแอคทีฟฟิลเตอร์นั้นมีข้อดีมากกว่าวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ ซึ่งในปฏิญญานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟฟิลเตอร์

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างแอกทีฟฟิลเตอร์กับพาสซีฟฟิลเตอร์

ความสามารถของวงจร	วงจรแอกทีฟฟิลเตอร์	วงจรพาสซีฟฟิลเตอร์
สามารถกรองฮาร์มอนิกจากระบบไฟฟ้าทั้งหมด	ได้	ได้
สามารถกรองฮาร์มอนิกได้หลายฮาร์มอนิก	ได้	ได้
ต้องการการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าอย่างละเอียด	ไม่ต้องการ	ต้องการอย่างยิ่ง
สามารถเปลี่ยนแปลงฮาร์มอนิกที่ต้องการภายหลังได้	ได้	ไม่ได้
สามารถต่อเพิ่มขนาดได้ภายหลัง หากโหลดเพิ่ม	ได้	อาจเกิดโอเวอร์โวลด์ได้
สามารถเลือกฮาร์มอนิกแบบไม่ต่อเนื่อง	ได้	ต้องเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก
สามารถโปรแกรมการใช้งานได้โดยผู้ใช้งาน	ได้	ไม่ได้
สามารถกำหนดฮาร์มอนิกที่ต้องการได้	ได้	กำหนดไม่ได้, กรองทั้งหมด
ออกแบบโมดูล (Module) สามารถเพิ่มหรือลดได้	ได้	แก้ไขไม่ได้
มีขนาดเล็กและเบา	ใช่	ขนาดใหญ่และหนัก
ไม่เกิดโอเวอร์โวลด์แม้ฮาร์มอนิกจะมาก	ไม่โอเวอร์โวลด์	เกิดโอเวอร์โวลด์ได้ง่าย
สามารถกรองฮาร์มอนิกได้แม้ในระบบที่มีเพาเวอร์แฟกเตอร์	ได้	ไม่ได้เพราะต้องใช้ตัวเก็บประจุจำนวนมากเป็นส่วนประกอบหลัก

## บทที่ 3

# ทฤษฎีและการวิเคราะห์แบบจำลองของแอกทีฟฟิลเตอร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีหลักๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดลองซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องรู้และทำความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีเหล่านี้ก่อนและได้กล่าวถึงหลักการและวิธีการทดลอง

### 3.1 อนุกรมฟูเรียร์

ในการวิเคราะห์คาบสัญญาณนิยมนำฟังก์ชันรูปไซน์ เนื่องจากฟังก์ชันรูปไซน์เป็นฟังก์ชันพื้นฐานที่เกิดขึ้นและพบเห็นกันอยู่เป็นประจำ ตัวอย่างเช่นวงจรออสซิลเลเตอร์หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับก็จะมีเอาต์พุตเป็นคลื่นรูปไซน์ ดังนั้นการที่จะกำหนดว่าสัญญาณใดๆ โดยทั่วไปแล้วประกอบขึ้นจากสัญญาณที่เป็นองค์ประกอบย่อยๆ ที่มีลักษณะเป็นสัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่ต่างๆ กัน จึงดูเหมาะสมว่าน่าจะนำไปใช้ให้เป็นประโยชน์ในเชิงปฏิบัติได้มากที่สุด อนุกรมฟูเรียร์ที่กระจายออกมาเป็นผลรวมของฟังก์ชันเชิงตั้งฉากรูปไซน์นี้ จะมีชื่อเรียกเฉพาะว่า อนุกรมฟูเรียร์เชิงตรีโกณ ( Trigonometric Fourier series) ซึ่งมีรูปแบบโดยทั่วไปในลักษณะกระชับรูป (compact Form) ดังนี้ คือ

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n \cos(n\omega_0 t + \phi_n), t_0 < t < t_1 \quad (3.1)$$

( โดยทั่วไป  $f(t)$  อาจเป็นฟังก์ชันค่าเชิงซ้อน แต่ที่นี่จะมุ่งเน้นเฉพาะในกรณีที่เป็นฟังก์ชันค่าจริง ) หรืออาจกระจายได้เป็น

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \{ a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t) \}, t_0 < t < t_1 \quad (3.2)$$

โดยค่า  $\omega_0, a_n, b_n, c_n$  และ  $\phi_n$  นั้นสามารถกำหนดได้ดังต่อไปนี้

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{t_1 - t_0} = \frac{2\pi}{T} \quad (3.3)$$

โดยในที่นี้ กำหนดให้  $T = t_1 - t_0$

$$a_0 = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_0^{t_1} f(t) dt \quad (3.4)$$

$$a_n = \frac{2}{t_1 - t_0} \int_0^{t_1} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt, \quad n = 1, 2, \dots \quad (3.5)$$

$$b_n = \frac{2}{t_1 - t_0} \int_0^{t_1} f(t) \sin(n\omega_0 t) dt, \quad n = 0, 1, \dots \quad (3.6)$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (3.7)$$

และ

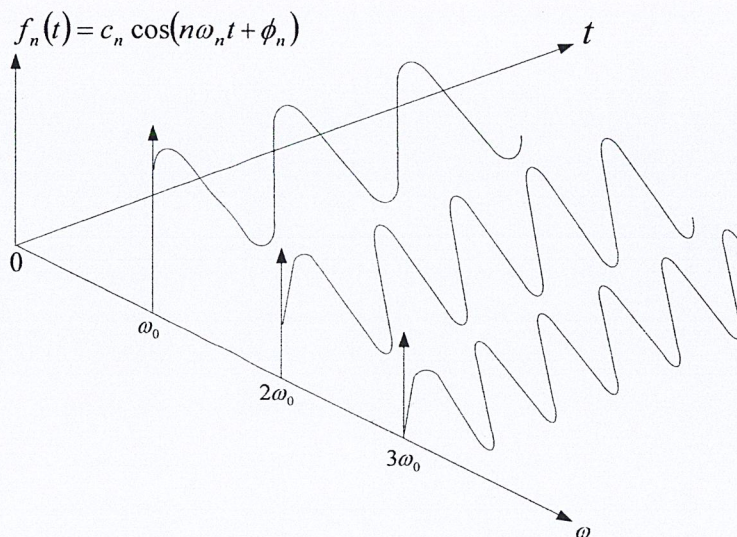
$$\phi_n = \tan^{-1} \left( \frac{-b_n}{a_n} \right) \quad (3.8)$$

เมื่อพิจารณาอนุกรมฟูเรียร์ตามสมการที่ (3.1) หรือสมการที่ (3.2) จะเห็นว่าฟังก์ชันต่างๆ ที่เป็นฟังก์ชันพื้นฐานของอนุกรม กล่าวคือ  $\cos(n\omega_0 t)$  และ  $\sin(n\omega_0 t)$  หรือ  $\cos(n\omega_0 t + \phi_n)$  นั้น แต่ละฟังก์ชันจะมีค่าที่เกิดแล้วกลับมาเกิดซ้ำรูปแบบค่าเดิมอีกที่ทุกคาบเวลา  $T = 2\pi/n\omega_0$  ดังนั้น ผลรวมของฟังก์ชันเหล่านี้จะมีค่ากลับมาซ้ำรูปแบบเดิมในทุกๆ คาบเวลาที่มีค่ามากที่สุด โดยจากค่าของสมการ  $T = (2\pi/\omega_0) = (t_1 - t_0)$  ทำให้ค่าผลรวมในอนุกรมฟูเรียร์นั้นมีคาบเวลาที่จะมีค่าซ้ำรูปแบบเดิมทุกช่วงเวลา  $T = t_1 - t_0$  นี้ด้วย ด้วยเหตุนี้การกระจายฟังก์ชันในรูปอนุกรมตามสมการที่ (3.1) หรือตามสมการที่ (3.2) จึงจะเหมาะสมอย่างยิ่งเมื่อ  $f(t)$  นั้นเป็นฟังก์ชันหรือสัญญาณที่มีคาบเวลาเท่ากับ  $t_1 - t_0$  ซึ่งจะทำให้การแทนฟังก์ชันด้วยอนุกรมฟูเรียร์เชิงตรีโกณนี้ใช้ได้ตลอดทุกคาบเวลา  $t$

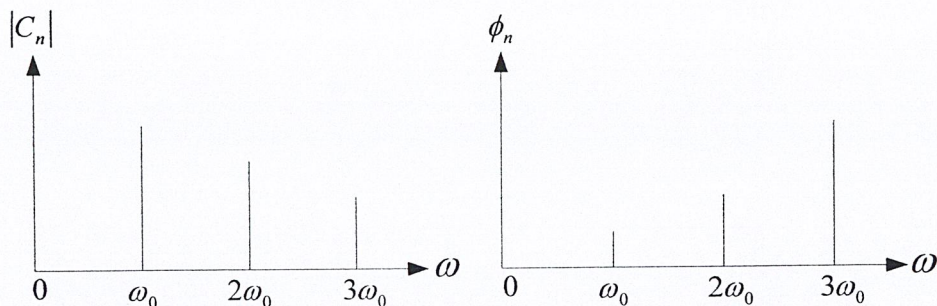
อนุกรมฟูเรียร์นั้นจะใช้เพื่อวิเคราะห์สัญญาณที่มีคาบได้เป็นอย่างดี เพราะเมื่อคาบสัญญาณใดๆ ถูกแยกออกเป็นองค์ประกอบย่อย กล่าวคือ สัญญาณรูปไซน์แล้ว ก็จะทำให้การคำนวณหาค่าผลตอบสนองของระบบเชิงเส้นที่มีต่อสัญญาณนั้นๆ สามารถทำได้ง่าย โดยอาศัยหลักการทับซ้อน (Superposition principle) และทฤษฎีเบื้องต้นอื่นที่เกี่ยวข้องกับระบบมาใช้ให้เป็นประโยชน์

เกี่ยวเนื่องกับเรื่องสัญญาณ  $f(t)$  ที่สามารถแยกส่วนประกอบออกเป็นคลื่นรูปไซน์หลายๆ คลื่นมารวมกันนี้ ซึ่งได้มีการกำหนดเรียกชื่อรูปคลื่นไซน์ที่เป็นองค์ประกอบย่อยของสัญญาณนั้นว่า ฮาร์โมนิก (Harmonic) ของสัญญาณนั้น คลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของสัญญาณต้นแบบ  $f(t)$  ได้ชื่อว่า ฮาร์โมนิกที่ 1 หรือ คลื่นมูลฐาน (fundamental wave) และคลื่นรูปไซน์ที่เป็นส่วนประกอบย่อยอื่นๆ ที่มีความถี่สูงขึ้นไปเป็นจำนวน  $n$  เท่าของความถี่มูลฐานนั้นจะได้อีกชื่อเรียกว่า ฮาร์โมนิกที่  $n$  ของสัญญาณต้นแบบ

เมื่อเรากล่าวรวมถึงว่า ค่าสัญญาณใดสัญญาณหนึ่งที่มีฮาร์มอนิกต่างๆ กระจายกันอยู่หรือประกอบรวมกันอยู่อย่างไรนั้น เราจะใช้คำศัพท์เฉพาะที่กระชับขึ้นว่า สเปกตรัมฟูรีเยร์ ( Fourier spectrum ) ของสัญญาณนั้นมีลักษณะเป็นอย่างไร หรือบางครั้งจะใช้คำที่สั้นลงว่า สเปกตรัมของสัญญาณนั้นเป็นอย่างไรเท่านั้น ทั้งนี้เพราะค่าสเปกตรัมของสัญญาณเป็นตัวบอกให้เราทราบว่าสัญญาณนั้นประกอบด้วยสัญญาณย่อยที่เป็นคลื่นรูปไซน์ขึ้นมาด้วยสัดส่วนอย่างไร ดังนั้นในการแสดงด้วยภาพให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของฮาร์มอนิกต่างๆ ในสเปกตรัมของสัญญาณนั้นจึงมีความสำคัญและถ้าจะให้ดีก็ควรจะต้องใช้ภาพ 3 มิติ มาแสดงดังเช่นรูปที่ 3.1 เป็นตัวอย่าง แต่อย่างไรก็ตามเนื่องด้วยการเขียนภาพ 3 มิติเป็นเรื่องที่ยุ่งยาก ดังนั้นจึงนิยมที่จะลดความยุ่งยากนี้ลงด้วยการมองภาพของสเปกตรัมให้เหลือเพียง 2 มิติ แต่ใช้จำนวนภาพเพิ่มขึ้นเป็น 2 ภาพแทน โดยภาพหนึ่งแสดงถึงขนาดของฮาร์มอนิกที่เป็นองค์ประกอบของสัญญาณบนแกนความถี่ที่เรียกว่า สเปกตรัมแอมพลิจูด ( Amplitude spectrum ) และอีกภาพหนึ่งแสดงถึงค่าเฟสของฮาร์มอนิกที่เป็นองค์ประกอบของสัญญาณซึ่งเรียกว่า สเปกตรัมเฟส ( Phase spectrum ) ตัวอย่างรูปแสดงสเปกตรัมแอมพลิจูดและสเปกตรัมเฟสของสัญญาณที่มีสเปกตรัม 3 มิติ ตามรูป 3.1 นั้นจะเป็นดังรูป 3.2 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 ภาพตัวอย่างสเปกตรัมของสัญญาณใน 3 มิติ



(ก) สเปกตรัมแอมพลิจูด

(ข) สเปกตรัมเฟส

รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมแอมพลิจูด และเฟสของสัญญาณ

### 3.2 การแปลงฟูรีเยร์ของสัญญาณมีคาบ

สัญญาณมีคาบนั้นสามารถกระจายออกอยู่ในรูปของอนุกรมฟูรีเยร์ได้ กล่าวคือ  $f_T(t)$  คือ สัญญาณมีคาบเวลา  $T$  หรือมีค่า  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$  โดยอาศัยสมการ  $f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n e^{jn\omega_0 t}$  จะได้

$$f_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n e^{jn\omega_0 t} \quad (3.9)$$

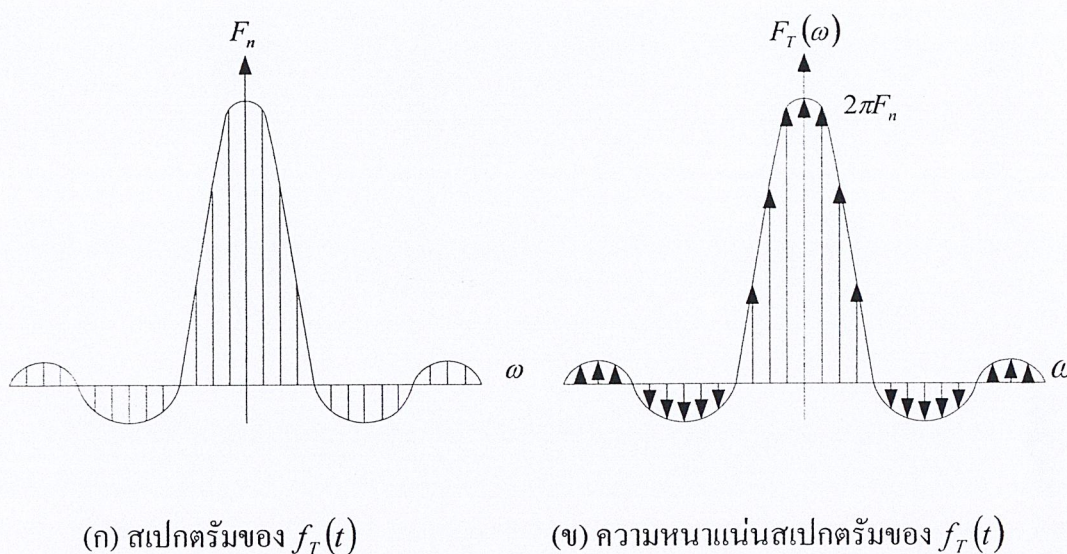
โดยการแปลงฟูรีเยร์ตามสมการ  $F(\omega) = \mathcal{F}\{f(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt$  จะได้

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\{f(t)\} &= \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n e^{jn\omega_0 t} e^{-j\omega t} dt \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n \int_{-\infty}^{\infty} e^{jn\omega_0 t} e^{-j\omega t} dt \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n \mathcal{F}\{e^{jn\omega_0 t}\} \end{aligned} \quad (3.10)$$

โดยอาศัยสมการ  $e^{j\omega_0 t} \leftrightarrow 2\pi\delta(\omega - \omega_0)$  ทำให้สรุปสมการ (3.10) ได้เป็นคู่การแปลงฟูรีเยร์ คือ

$$f_T(t) \leftrightarrow \sum_{n=-\infty}^{\infty} 2\pi F_n \delta(\omega - \omega_0) \quad (3.11)$$

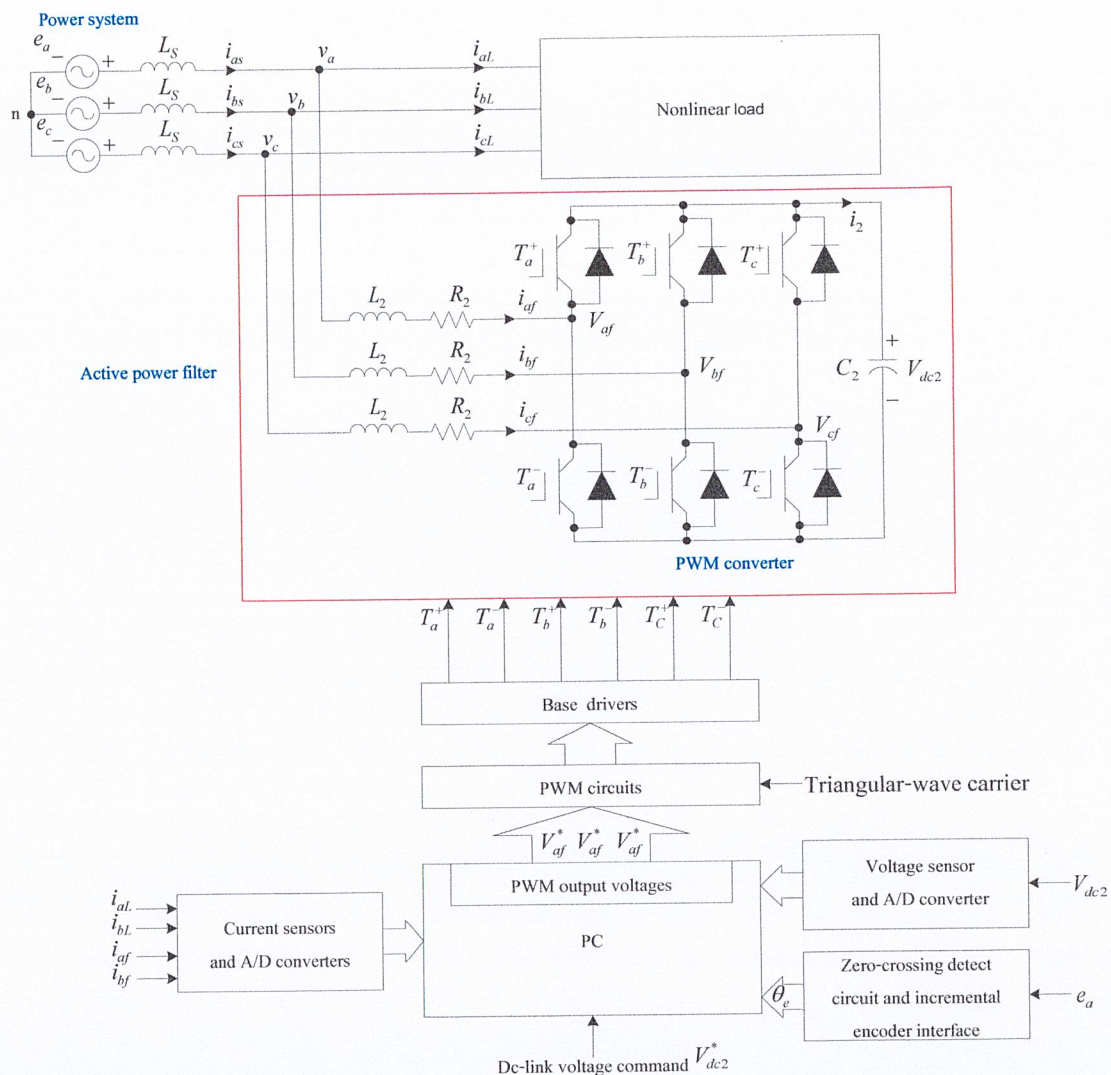
จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณที่มีคาบจะมีลักษณะเป็นอิมพัลส์ที่มีความถี่ต่างๆ ที่ห่างกัน  $\omega_0$  โดยที่ขนาดหรือน้ำหนักของอิมพัลส์ที่มีความถี่  $n\omega_0$  มีค่าเท่ากับ  $2\pi F_n$  เมื่อ  $F_n$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์หรือขนาดของคลื่นฮาร์มอนิกที่  $n$  ในอนุกรมฟูเรียร์ ดังนั้นถ้าสเปกตรัมของ  $f_T(t)$  แสดงในรูปที่ 3.3 (ก) ความหนาแน่นสเปกตรัม  $F(\omega)$  ของ  $f_T(t)$  ก็จะมีลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ข) จะเห็นว่าลักษณะสเปกตรัมของ  $f_T(t)$  มีลักษณะเป็นเส้นๆ ด้วยเหตุนี้จึงมีการเรียกชื่อสเปกตรัมชนิดนี้ว่า สเปกตรัมเส้น (Line spectrum)



รูปที่ 3.3 ภาพเปรียบเทียบสเปกตรัมและความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณมีคาบ

### 3.3 หลักการและขั้นตอนในการวิเคราะห์เพื่อสร้างบล็อกไดอะแกรมของแอกทีฟฟิลเตอร์

อุปกรณ์เพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ เป็นตัวทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิก กระแสฮาร์มอนิกเหล่านี้มีผลก่อให้เกิดปัญหาของระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น ทำให้เพาเวอร์แฟคเตอร์ต่ำ (low power factor) ประสิทธิภาพของระบบต่ำลงและมีผลรบกวนด้านการสื่อสาร ในการแก้ปัญหากระแสฮาร์มอนิกจะใช้หลักการของการกรองแบบพาสซีฟ (passive filter) ซึ่งจะประกอบไปด้วย LC filters เพื่อกำจัดกระแสฮาร์มอนิกซึ่งเกิดจาก nonlinear load จากปัญหาที่เกิดขึ้นเหล่านี้จึงได้มีการคิดค้นระบบการกรองแบบพาสซีฟ (passive filter) แต่การกรองแบบพาสซีฟนี้มีข้อเสีย เช่น การเกิดเรโซแนนซ์ ระบบชดเชยมีขนาดที่ใหญ่ คุณลักษณะด้านการชดเชยมีค่าคงที่และอาจเกิดการโอเวอร์โวลด์ได้ เพื่อให้ข้อเสียเหล่านี้หมดไปตัวกรองกำลังแบบแอกทีฟ (active power filters) จึงถูกนำมาใช้เพื่อชดเชยกระแสฮาร์มอนิกเพื่อลดค่ากระแสฮาร์มอนิกและให้ได้รูปคลื่นที่แหล่งจ่าย อินพุตมีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากขึ้นและเพาเวอร์แฟคเตอร์มีค่าใกล้เคียงหนึ่งมากขึ้น



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของระบบแอคทีฟพาวเวอร์ฟิลเตอร์

ในรูปที่ 3.4 เป็นการแสดงระบบสามเฟส ซึ่งแอคทีฟพาวเวอร์ฟิลเตอร์จะถูกต่อในลักษณะขนานกับ nonlinear load ซึ่งวงจรกำลังโดยหลักของมันจะประกอบด้วย pulse – width modulation ( PWM ) converter ลวดตัวนำ  $L_2$  ใช้เพื่อกระทำให้แรงดันเสริมการทำงานในลักษณะการรวมกันกับ DC-link capacitor ;  $C_2$  และฟังก์ชันตัวกรองผ่านความถี่ต่ำสำหรับกระแสไลน์ของแอคทีฟพาวเวอร์ฟิลเตอร์ โดยที่หลักการของการทำงานของแอคทีฟพาวเวอร์ฟิลเตอร์ คือ การสร้างกระแสชดเชยเข้าไปภายในระบบกำลังเพื่อกำจัดกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากอุปกรณ์ nonlinear load เพื่อให้สะดวกในการทำงานของแอคทีฟพาวเวอร์ฟิลเตอร์ จึงได้มีการใช้การวิเคราะห์แบบจำลอง ( derive analytical model ) การวิเคราะห์ผลของแรงดัน DC-link และสมรรถภาพของกระแสติดตาม ( current tracking capability ) สำหรับ แอคทีฟพาวเวอร์ฟิลเตอร์ก็จะง่ายขึ้น กระแสฮาร์มอนิกของ nonlinear load จะ

สามารถชดเชยได้อย่างเร็วและความผิดเพี้ยนของแรงดัน DC-link ในระหว่าง ช่วงเริ่มต้นและช่วง  
คงที่จะถูกกำจัดไปด้วย

แอคทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์ ในรูปที่ 3.4 ประกอบด้วย power converter , DC-link capacitor  
และ filter Inductor เพื่อที่จะกำจัดค่ากระแสฮาร์มอนิกซึ่งเป็นส่วนที่ถูกผลิตมาจาก nonlinear load  
แอคทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์ก็จะผลิตค่ากระแสฮาร์มอนิกที่มีขนาดเท่ากันแต่จะมีมุมตรงข้ามกันที่จุดต่อ  
กับ nonlinear load ซึ่งผลที่ได้จะลดความผิดเพี้ยนและแก้ไขเพาเวอร์แฟกเตอร์ให้ดีขึ้น ซึ่งหลักการ  
และขั้นตอนในการวิเคราะห์เพื่อสร้างบล็อกไดอะแกรมของแอคทีฟฟิลเตอร์นี้ แบ่งเป็นขั้นตอนได้  
ดังต่อไปนี้

### 3.3.1 การคำนวณหากระแสชดเชย

พิจารณาจากรูปที่ 3.4 กำหนดให้ในที่นี่จะไม่สนใจรีแอคเตอร์  $L_s$  ของอินพุทระบบกำลัง  
ใช้สมการเชิงอนุพันธ์ (differential equations) ในรูปที่ 3.4 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$L_2 \frac{d}{dt} i_{af} = e_a - R_2 i_{af} - v_{af} \quad (3.12)$$

$$L_2 \frac{d}{dt} i_{bf} = e_b - R_2 i_{bf} - v_{bf} \quad (3.13)$$

$$L_2 \frac{d}{dt} i_{cf} = e_c - R_2 i_{cf} - v_{cf} \quad (3.14)$$

$$C_2 \frac{d}{df} v_{dc2} = f_a i_{af} + f_b i_{bf} + f_c i_{cf} \quad (3.15)$$

เมื่อ

$e_a, e_b, e_c$  = แรงดันเฟสของระบบกำลัง

$v_{af}, v_{bf}, v_{cf}$  = แรงดันอินพุทของ power converter

$i_{af}, i_{bf}, i_{cf}$  = กระแสอินพุทของ active power filter

$v_{dc2}$  = แรงดัน DC-link

เมื่อ  $C_2$  เป็นคาปาซิแตนซ์ของ DC-link capacitor,  $R_2$  และ  $L_2$  เป็นความต้านทานและ  
ค่าความเหนี่ยวนำของแอคทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์ของ line reactors ตามลำดับ ส่วน  $f_a, f_b$  และ  $f_c$   
เป็นฟังก์ชันสวิตซ์ซึ่งซึ่งค่าที่ใช้อาจเป็น  $0, \pm 1/3$  และ  $\pm 2/3$

ส่วนแบบจำลองการวิเคราะห์และการออกแบบตัวควบคุมแรงดันสามเฟส โดยกระแสและฟังก์ชันสวิตช์ซึ่งสามารถเปลี่ยนอยู่ในรูป  $d-q-o$  การหมุนเฟรม ( rotating frame ) ซึ่งผลที่ได้คือ

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \theta_e & \sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos \theta_e & \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

เมื่อ  $\theta_e$  เป็นการเปลี่ยนแปลงมุมของการหมุนเฟรม ( rotating frame ) และตัวแปร  $x$  ใช้แสดงกระแส แรงดัน หรือฟังก์ชันสวิตช์ซึ่ง จากสมการที่ (3.12) ถึง (3.16) ลักษณะแบบจำลองในการหมุนเฟรมสามารถเขียนได้ดังนี้

$$L_2 \frac{d}{dt} i_{df} = e_d - R_2 i_{df} + \omega_e L_2 i_{qf} - v_{df} \quad (3.17)$$

$$L_2 \frac{d}{dt} i_{qf} = e_q - R_2 i_{qf} - \omega_e L_2 i_{df} - v_{qf} \quad (3.18)$$

$$C_2 \frac{d}{dt} v_{dc2} = \frac{3}{2} (f_d i_{df} + f_q i_{qf}) \quad (3.19)$$

เมื่อ

$$v_{df} = f_d v_{dc2} \quad (3.20)$$

$$v_{qf} = f_q v_{dc2} \quad (3.21)$$

เมื่อ  $\omega_e$  เป็นความถี่ของระบบกำลังและอักษร  $d, q$  จะใช้กำหนดส่วนประกอบของแกน  $d, q$  ในการหมุนเฟรมตามลำดับ สมการ (3.17) ถึง (3.19) ได้มาจากการวิเคราะห์บล็อกไดอะแกรมของแอกทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์และการคำนวณแรงดันอินพุทบังคับ ( input voltage commands ) ของเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์

ในที่นี้ให้การเปลี่ยนแปลงมุม  $\theta_e$  เท่ากับมุมของแรงดันเฟสและสมมติแรงดันสามเฟส เป็นแบบสมดุล ดังนั้นส่วนประกอบแรงดัน ( voltage components ) จะได้คือ

$$e_d = V_m \quad (3.22)$$

$$e_q = 0 \quad (3.23)$$

เมื่อ

$$V_m = \text{ค่าสูงสุดของแรงดันเฟสของอินพุทของระบบกำลัง}$$

ภายใต้เงื่อนไขของแรงดันสามเฟสแบบสมดุล ตัว instantaneous real power ;  $p_L$  และตัว reactive power :  $q_L$  ของโหลดจะแสดงได้ด้วย

$$p_L = \frac{3}{2} V_m i_{dL} \quad (3.24)$$

$$q_L = \frac{-3}{2} V_m i_{qL} \quad (3.25)$$

สมการที่ (3.24) และ (3.25) นี้เหมาะกับโหลดทั้งแบบสมดุลและไม่สมดุล เมื่อแรงดันเฟสของระบบกำลังเป็นแบบสมดุล ฉะนั้น  $p_L$  และ  $q_L$  จะขึ้นกับค่า  $i_{dL}$  และ  $i_{qL}$  ตามลำดับ สำหรับกระแสฮาร์มอนิก ที่จะชดเชยระบบแอกทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์นั้นค่า instantaneous real power :  $p_s$  และ reactive power :  $q_s$  จากระบบกำลังจะแสดงได้คือ

$$p_s = \frac{3}{2} V_m i_1 \quad (3.26)$$

$$q_s = 0 \quad (3.27)$$

ในที่นี้องค์ประกอบมูลฐาน ( Fundamental component ) ของกระแสโหลด  $i_1$  จะได้จากแกนกระแส  $d$  ( $d$  - axis current) :  $i_{dL}$  โดยวิธีการของตัวกรองผ่านความถี่ต่ำซึ่งสอดคล้องกับกระแสอ้างอิง (reference current)  $i_{df}^*$  และ  $i_{qL}^*$  ของแอกทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์ในการหมุนฟิลเตอร์ (Rotating filter) คือ

$$i_{df}^* = i_1 - i_{dL} \quad (3.28)$$

$$i_{qf}^* = -i_{qL} \quad (3.29)$$

สมการที่ (3.28) และ (3.29) ได้จากการเสนอวิธีการคำนวณใหม่สำหรับกระแสอ้างอิงของแอกทีฟพาวเวอร์ฟิลเตอร์ โดยใช้การป้อนกลับของกระแสโหลดการอ้างอิง การเปลี่ยนแปลงเฟรม (Transformation frame) และที่ตัวกรองผ่านความถี่ต่ำแบบดิจิทัล กระแสอ้างอิงจะหาได้โดยง่ายจากการลบส่วนประกอบมูลฐานออกจากกระแสโหลดโดยไม่คำนึงถึงว่าเป็นโหลดที่สมดุลหรือไม่

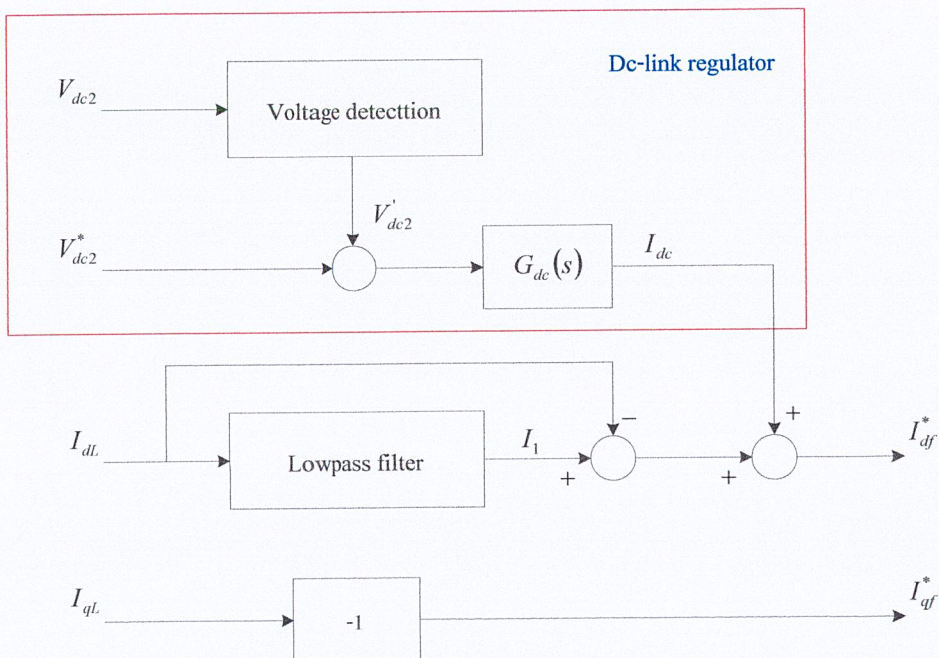
### 3.3.2 การควบคุม power converter ( power converter control )

เพื่อลดการแกว่งของแรงดัน DC-link capacitor และชดเชยระบบที่เสียไปนั้นตัวควบคุมแบบ PI,  $G_{dc}(s)$  จะถูกนำมาใช้ในลูปรการควบคุมแรงดัน DC-link ซึ่งจากผลอันนี้กระแสอ้างอิงแกน  $d$  (d-axis reference current) ของแอกทีฟพาวเวอร์ฟิลเตอร์ ก็จะถูกแปลงไปเป็น

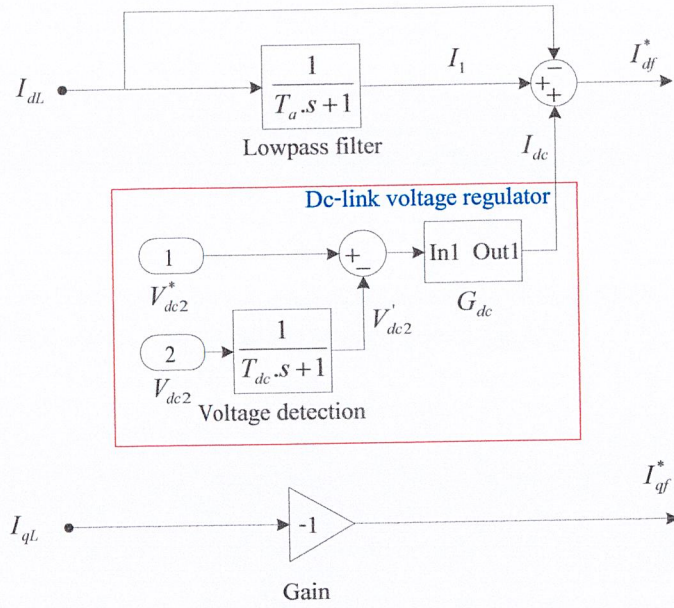
$$I_{df}^* = I_1 - I_{dL} + I_{dc} \quad (3.30)$$

$$I_{dc} = G_{dc}(s)(V_{dc}^* - V'_{dc}) \quad (3.31)$$

เมื่อ  $I_{dc}$  เป็นกระแสบังคับ ( Current command ) ของดีซี-ลิงค์ โวลต์เตจเรกกูเลเตอร์และ  $V_{dc}^*$  และ  $V'_{dc}$  เป็นแรงดันบังคับและป้อนกลับของ DC-link voltage ตามลำดับ



(ก)



(จ)

รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมของกระแสอ้างอิงแกน  $d$  และ  $q$  ของแอกทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์

บล็อกไดอะแกรมของกระแสอ้างอิงแกน  $d$  และ  $q$  ของแอกทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ก) เป็นบล็อกไดอะแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์สมการ ส่วนในรูปที่ 3.5 (ข) เป็นบล็อกไดอะแกรมย่อยที่ได้จากการนำรูปที่ 3.5 (ก) มาสร้างในโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ในการ simulate ซึ่งตัวตรวจจับแรงดันจะถูกแทนด้วยวงจร DC-link voltage detecting แรงดันบังคับอินพุต  $V_{df}^*$  และ  $V_{qf}^*$  ของเพาเวอร์คอนเวอร์เตอร์จะได้จากการใช้สมการที่ (3.17), (3.18), (3.22) และ (3.23) ซึ่งจะได้

$$V_{df}^* = V_m - R_2 I_{df} + \omega_e L_2 I_{df} - U_{df} \quad (3.32)$$

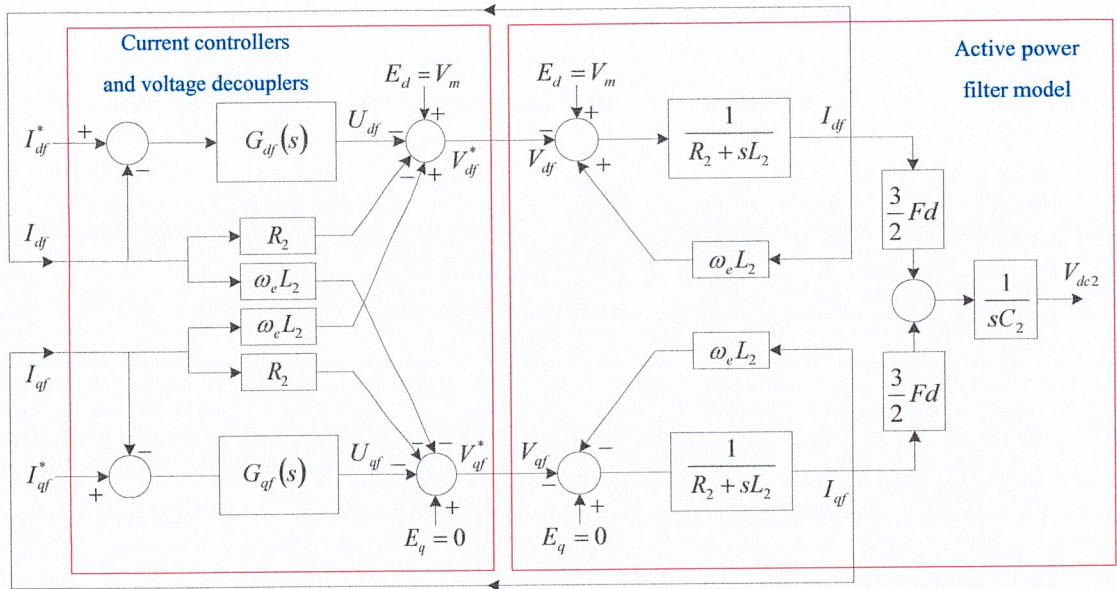
$$V_{qf}^* = -R_2 I_{qf} - \omega_e L_2 I_{qf} - U_{qf} \quad (3.33)$$

เมื่อ  $U_{df}$  และ  $U_{qf}$  เป็นแรงดันบังคับ (voltage commands) ของกระแสเรกกูเลเตอร์ของแอกทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์ จากสมการที่ (3.32) และ (3.33) เทอม  $\omega_e L_2 I_{df}$  และ  $\omega_e L_2 I_{qf}$  อยู่ในกระแสลูปควบคุม  $d-q$  และแรงดัน decouplers สามารถจะออกแบบได้จาก

$$U_{df}(s) = G_{df}(s)(I_{df}^*(s) - I_{df}) \quad (3.34)$$

$$U_{qf}(s) = G_{qf}(s)(I_{qf}^*(s) - I_{qf}) \quad (3.35)$$

ในที่นี้  $G_{df}(s)$  และ  $G_{qf}(s)$  เป็นเกณฑ์ขยายของตัวควบคุมแบบ PI ของแกน  $d$  และ  $q$  กระแสลูปควบคุมของแอกทีฟเฟาเวอร์ฟิเตอร์ตามลำดับ บล็อกไดอะแกรมของ  $d$  และ  $q$  กระแสลูปควบคุมจะได้จากสมการที่ (3.17) ถึง (3.19) และสมการที่ (3.32) ถึง (3.35) ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 บล็อกไดอะแกรมกระแสควบคุมของแกน  $d$  และ  $q$  ของแอกทีฟเฟาเวอร์ฟิเตอร์

ถ้าให้มีการเปลี่ยนแปลงในทางตรงข้าม ( inverse ) ของการหมุนเฟรม ( rotating frame ) แรงดันบังคับอินพุตสามเฟส  $v_{af}^*$ ,  $v_{bf}^*$  และ  $v_{cf}^*$  ของเฟาเวอร์คอนเวอร์เตอร์จะได้เป็น

$$\begin{bmatrix} v_{af}^* \\ v_{bf}^* \\ v_{cf}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \theta_e & \cos \theta_e & 1 \\ \sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \sin(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{df}^* \\ v_{qf}^* \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

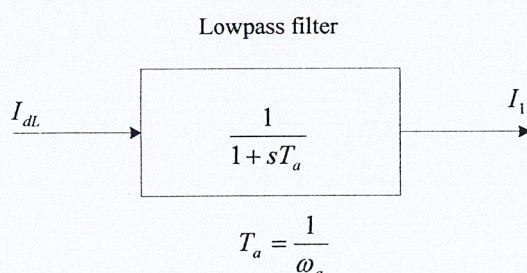
ซึ่งค่าเอาต์พุตของแรงดันบังคับอินพุตสามเฟส  $v_{af}^*$ ,  $v_{bf}^*$  และ  $v_{cf}^*$  จะได้มาโดยผ่าน อินเตอร์เฟสอินพุตหรือเอาต์พุต (I/O) ของคอมพิวเตอร์ แรงดันเหล่านี้ถูกนำมาใช้เปรียบเทียบกับ รูปคลื่นสามเหลี่ยมนำพา ( triangular-wave carrier ) เพื่อผลิตสวิดซ์ซิง (switching pattern) สำหรับ ตัว IGBT

### 3.3.3 การสร้างแบบจำลอง ( Model establishment )

ในส่วนนี้สิ่งแรกที่จะพิจารณาก็คือ การหน่วงเวลา (time-delay) ซึ่งประกอบด้วยการหน่วงกระแสอ้างอิง ( reference current delay ) การหน่วงกระแสตอบสนอง ( current response delay ) และการหน่วงแรงดันป้อนกลับของ DC-link ( DC-link voltage feedback delay ) ในการพิจารณาเวลาหน่วง ( delay times ) วิเคราะห์แบบจำลองและฟังก์ชันถ่ายโอนลูปปิดสำหรับแอกทีฟฟิลเตอร์โดยขั้นตอนท้ายสุด เอาเงื่อนไขการทำงานที่สภาวะเสถียรภาพกับสภาวะไม่เสถียรมาเป็นตัวกำหนดแล้ว เราจำเป็นต้องนำรายละเอียดต่างๆ มาพิจารณาดังนี้

#### 3.3.3.1 เวลาหน่วงของกระแสอ้างอิง ( Time delay of reference current )

กระแสอ้างอิงที่แกน  $d$  ของแอกทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์นั้นจะถูกกำหนดโดยการใช้ความแตกต่างระหว่างกระแสโหลดและกระแสเอาต์พุตของตัวกรองผ่านความถี่ต่ำ ซึ่งการแสดงค่าของตัวกรองผ่านความถี่ต่ำอันดับที่ 1 จะแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่ง  $T_s$  เป็นเวลาหน่วงระหว่างกระแสโหลดและกระแสอ้างอิงของแอกทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์ ส่วน  $\omega_a$  จะแทนค่าความถี่คutoffของตัวกรองผ่านความถี่ต่ำและความถี่คutoffนี้จะส่งผลต่อคุณลักษณะการชดเชยแอกทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์ เช่น ในการกำจัดค่ากระแสฮาร์มอนิก การตั้งเวลาของแรงดัน DC-link และควมมีเสถียรภาพของรูปแบบการควบคุม โดยกาหนดค่าความถี่คutoffนั้นจะต้องคำนึงถึงผลของความรวดเร็วในการตอบสนองที่เปลี่ยนแปลงด้วย



รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมตัวกรองผ่านความถี่ต่ำของกระแสอ้างอิงแกน  $d$

#### 3.3.3.2 เวลาหน่วงของกระแสตอบสนอง ( Time delay of current response )

ตัวควบคุมแบบ PI (PI Controller) นั้นค่า  $G_{df}(s)$  และ  $G_{df}(s)$  สำหรับกระแสลูปควบคุมของแอกทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์ในสมการที่ (3.34) และ (3.35) นั้นเป็นค่าคุณลักษณะ ซึ่งมีค่าดังสมการต่อไปนี้ คือ



สำหรับการลดอันดับฟังก์ชันถ่ายโอนรูปปิดของกระแสควบคุมแกน  $d$  นั้น วิธี pole-zero cancellation จะถูกนำมาใช้เพื่อลดอันดับของฟังก์ชันถ่ายโอนรูปปิด ส่วนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PI จะต้องเลือกใช้ดังสมการที่ (3.39) คือ

$$K_{pdf} = K_{idf} \frac{L_2}{R_2} \quad (3.40)$$

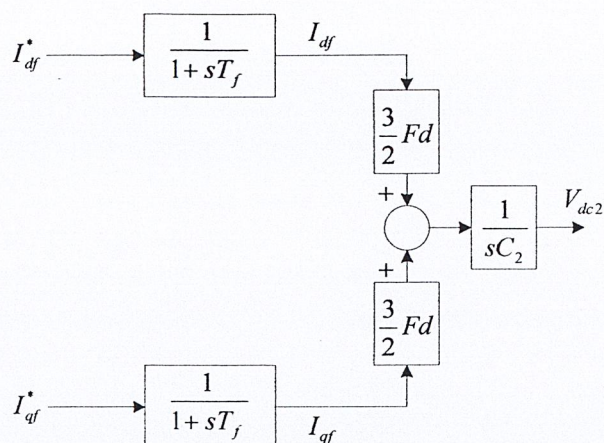
แทนสมการที่ (3.40) เข้าไปในสมการที่ (3.39) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่หนึ่ง ดังสมการที่ (3.41)

$$\frac{I_{df}(s)}{I_{df}^*(s)} = \frac{K_{pdf}}{K_{pdf} + L_2 s} = \frac{1}{1 + sT_f} \quad (3.41)$$

เมื่อ  $T_f = L_2 / K_{pdf}$  เป็นค่าเวลาหน่วงคงที่ของกระแสตอบสนองของแกน  $d$  ความถี่คัทออฟ  $\omega_c$  ของกระแสควบคุมซึ่งเท่ากับ  $1/T_f$  การตอบสนองทางกระแสไดนามิกส์ของแอกทีฟเพาเวอร์ฟิเตอร์ในกรณีที่ความถี่คัทออฟนี้มีค่ามากกว่าในกรณีที่ค่าความถี่คัทออฟต่ำ ซึ่งที่ค่าความถี่คัทออฟต่ำนี้จะเป็นผลให้เกิดการหน่วงเวลามากและเกิดการโอเวอร์ชูตของกระแสสูง การกำหนดพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบ PI สำหรับกระแสควบคุมแกน  $q$  นั้นก็เหมือนกับแกน  $d$  เช่น  $K_{pqf} = K_{pdf}$  และ  $K_{iqf} = K_{idf}$  ฟังก์ชันถ่ายโอนรูปปิดของกระแสควบคุมแกน  $q$  (q-axis current control loop) แสดงได้ดังนี้

$$\frac{I_{qf}(s)}{I_{qf}^*(s)} = \frac{K_{pqf}}{K_{pqf} + L_2 s} = \frac{1}{1 + sT_f} \quad (3.42)$$

จากสมการที่ (3.41) และ (3.42) และรูปที่ 3.8 สามารถทำให้ง่ายขึ้นได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 บล็อกไคอะแกรมที่ได้จากการลดรูปของกระแสควบคุมลูปของแกน  $d$  และ  $q$

### 3.3.3.3 การหน่วงเวลาของดีซี-ลิงค์ โวลต์ที่เตจป้อนกลับ (Time-Delay of DC-Link Voltage Feedback)

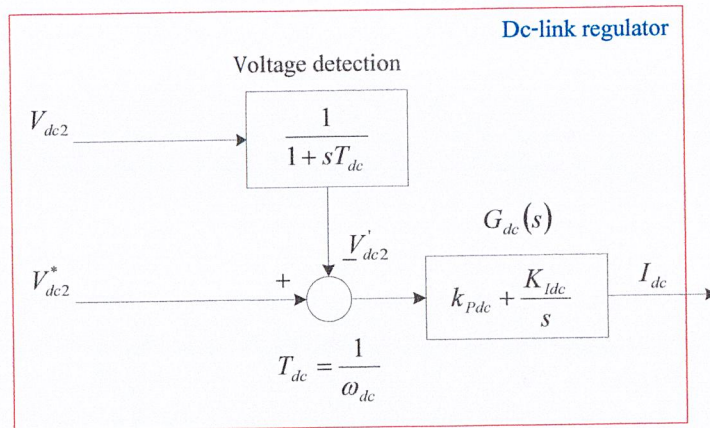
บล็อกไคอะแกรมของแรงดันเรกกูเลเตอร์ดีซี-ลิงค์ (DC-Link Voltage Regulator) แสดงในรูปที่ 3.10 ตัวควบคุมแบบ PI ;  $G_{dc}(s)$  สำหรับการควบคุมแรงดันลูปดีซี-ลิงค์ (DC-Link Voltage) ในสมการที่ (3.31) จะมีคุณลักษณะดังสมการที่ (3.43)

$$G_{dc}(s) = \left( K_{Pdc} + \frac{K_{Idc}}{s} \right) \quad (3.43)$$

เพื่อที่จะให้กระแสบังคับ ;  $i_{dc}$  ( current command ) มีความราบเรียบสม่ำเสมอ สำหรับแรงดันเรกกูเลเตอร์ดีซี-ลิงค์ (DC-Link Voltage Regulator) นั้น ตัวตรวจจับแรงดัน (voltage detection) เป็นการใช้ตัวกรองผ่านความถี่ต่ำอันดับที่หนึ่ง (first-order lowpass filter) เพิ่มเข้าไปที่ ดีซี-ลิงค์ป้อนกลับ ( DC-link voltage feedback ) เข้าไปที่ตัวควบคุมลูปดังรูปที่ 3.10

ซึ่ง  $T_{dc}$  คือ ค่าคงที่เวลาหน่วง (Delay time) ระหว่าง  $V_{dc2}$  (real dc-link voltage) กับ  $V'_{dc2}$  (measured dc-link voltage)

ส่วน  $\omega_{dc}$  จะแทนความถี่คัทออฟ ( Frequency cutoff ) ของตัวกรองผ่านความถี่ต่ำของดีซี-ลิงค์โวลต์ที่เตจ (DC-Link Voltage Feedback)



รูปที่ 3.10 บล็อกไดอะแกรมดีซี-ลิงค์ เรกกูเลเตอร์

### 3.3.3.4 การสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์เสถียรภาพ ( Model Establishment and Stability )

จากรูปที่ 3.5, 3.7, 3.9 และ 3.10 การวิเคราะห์แบบจำลองสำหรับแอคทีฟฟิลเตอร์ (Active Power Filter) จะสามารถสร้างได้ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งส่วนนี้จะประกอบไปด้วย วงจรคำนวณสำหรับกระแสอ้างอิง แรงดันเรกกูเลเตอร์ (dc-link voltage regulator) และแบบจำลองอย่างง่าย ๆ สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างกระแสอ้างอิงและกระแสจริงของแอคทีฟพาวเวอร์ฟิลเตอร์ ซึ่งพื้นฐานในการวิเคราะห์แบบจำลองตามการออกแบบของค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ PI ,  $K_{Pdc}$  และ  $K_{Idc}$  ของดีซี-ลิงค์โวลต์เตจเรกกูเลเตอร์ ( DC-Link Voltage Regulator ) และในการวิเคราะห์ของแรงดันตอบสนองของดีซี-ลิงค์ (DC-Link Voltage Response) ที่กำหนดให้

$$\frac{Idf(s)}{IdL(s)} = \frac{-2(1+sT_{dc})C_2T_a s^3}{(1+sT_a)\Delta(s)} \quad (3.44)$$

$$\frac{Vdc2(s)}{IdL(s)} = \frac{-3(1+sT_{dc})F_d T_a s^2}{(1+sT_a)\Delta(s)} \quad (3.45)$$

จากรูปที่ 3.11 ฟังก์ชันถ่ายโอนลูปปิดสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\frac{Iqf(s)}{IqL(s)} = \frac{-1}{1+sT_f} \quad (3.46)$$

$$\frac{Vdc2(s)}{IqL(s)} = \frac{-3(1+sT_{dc})F_{qs}}{\Delta(s)} \quad (3.47)$$

เมื่อ  $F_d$  และ  $F_q$  คือ ลاپลาซทรานส์ฟอร์ม (Laplace Transform) ของ  $fd$  และ  $fq$  ตามลำดับ ส่วน  $\Delta(s)$  นั้นเป็นคุณลักษณะโพลินอเมียล (Polynomial Characteristic) ซึ่งมีค่าดังสมการที่ (3.48)

$$\Delta(s) = 2C_2T_fT_{dc}s^4 + 2C_2(T_f + T_{dc})s^3 + 2C_2s^2 + 3F_dK_{Pdc}s + 3F_dK_{Idc} \quad (3.48)$$

ความผันแปรของแรงดันดีซี-ลิงค์ (dc-link voltage) จะถูกกำหนดโดย  $i_{df}$  เพราะสวิตซ์ซิงฟังก์ชันในองค์ประกอบแกน  $d$  ( $d$ -axis component) มีขนาดใหญ่กว่าแกน  $q$  ( $q$ -axis) มาก ( $f_d \gg f_q$ ) ในทางบวก แรงดันตกคร่อมที่  $L_2$  ของแอกทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของค่าแรงดันเฟส ( $V_m$ ) โดยค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่ตัว  $L_2$  นั้นเราไม่ต้องสนใจในที่นี้  $e_d = v_{df}$  และจากสมการที่ (3.20) และ (3.21)  $F_d$  จะได้ว่า

$$F_d = \frac{V_m}{V_{dc2}} \quad (3.49)$$

แทนสมการที่ (3.49) ลงในสมการที่ (3.34), (3.35), (3.48) ฉะนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนลูปปิดจะได้ว่า

$$\frac{I_{df}(s)}{I_{dL}(s)} = \frac{-2(1+sT_{dc})C_2V_{dc2}T_a s^3}{(1+sT_a)\Delta(s)} \quad (3.50)$$

$$\frac{V_{dc2}(s)}{I_{dL}(s)} = \frac{-3(1+sT_{dc})V_mT_a s^2}{(1+sT_a)\Delta(s)} \quad (3.51)$$

และคุณลักษณะโพลินอเมียล (Polynomial Characteristic)

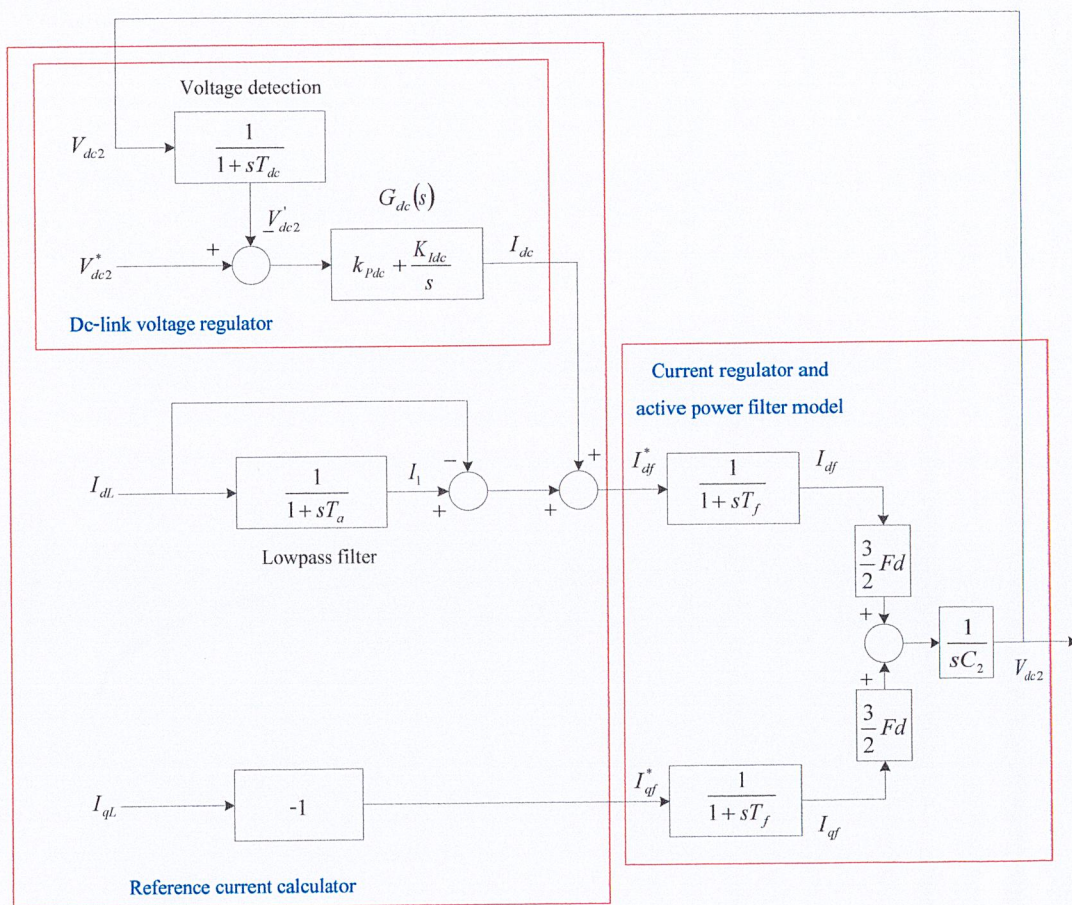
$$\Delta(s) = 2C_2V_{dc2}T_fT_{dc}s^4 + 2C_2V_{dc2}(T_f + T_{dc})s^3 + 2C_2V_{dc}s^2 + 3V_mK_{Pdc}s + 3V_mK_{Idc} \quad (3.52)$$

สมมติให้ค่าสถานะคงที่ของแรงดันดีซี-ลิงค์ (dc-link voltage) มีค่าเท่ากับแรงดันบังคับดีซี-ลิงค์ (dc-link voltage command) คือ  $V_{dc2} = V_{dc2}^*$  โดยการใช้ Routh-Hurwitz criterion ซึ่งมันง่ายมากในการหาค่าพารามิเตอร์แรงดันเรกกูเลเตอร์ของดีซี-ลิงค์ (dc-link voltage regulator parameter)  $K_{Pdc}$  และ  $K_{Idc}$  ซึ่งจะต้องทำการแก้ไขปัญหานี้ตามความสัมพันธ์สำหรับการทำงานที่สถานะเสถียรภาพ (stable operation)

$$K_{Pdc} < \frac{2C_2V_{dc}^*(T_f + T_{dc})}{3V_m(T_f T_{dc})} \tag{3.53}$$

$$0 < K_{Idc}$$

$$< \left[ \frac{2C_2V_{dc}^*(T_f + T_{dc}) - 3V_m K_{Pdc}(T_f T_{dc})}{2C_2V_{dc}^*(T_f + T_{dc})^2} \right] \tag{3.54}$$

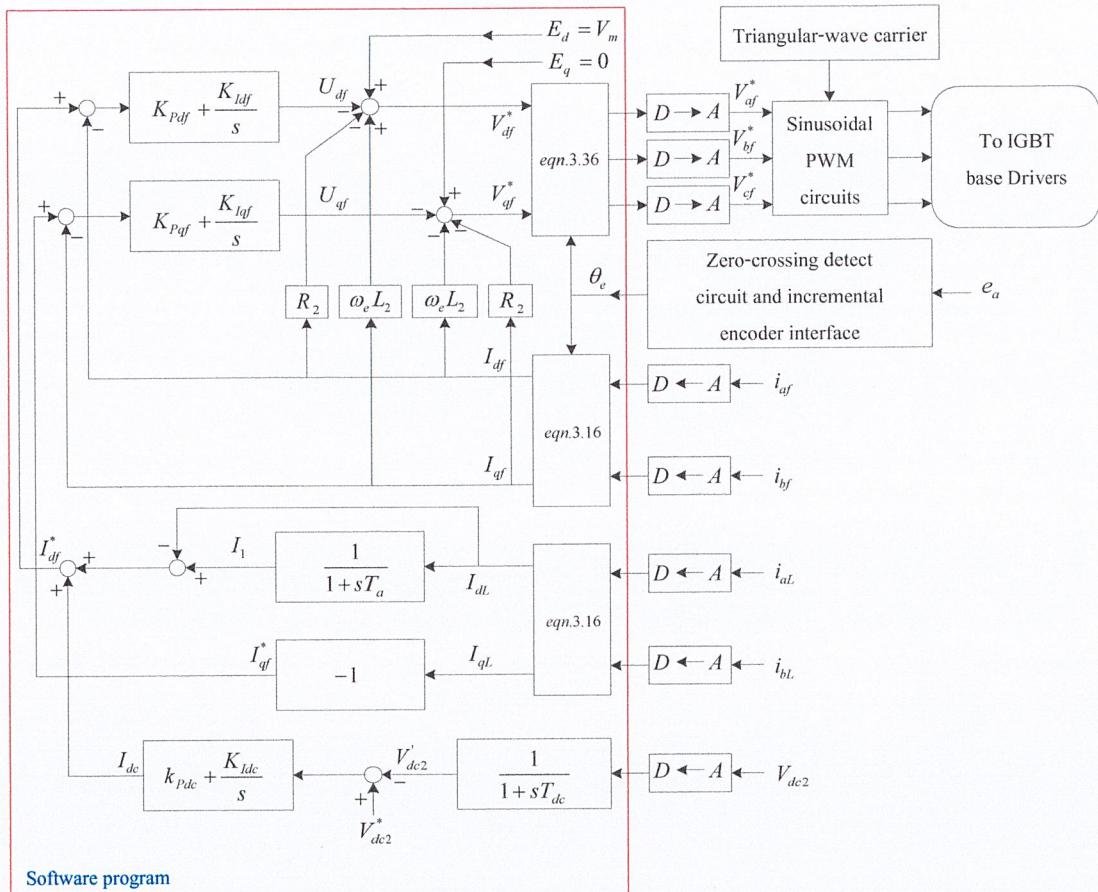


รูปที่ 3.11 บล็อกไดอะแกรมการวิเคราะห์สำหรับแอคทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์

### 3.3.4 การออกแบบตัวควบคุม ( Design of controllers )

วงจรของ PWM ที่เห็นในบล็อกไดอะแกรมควบคุมของแอคทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.12 นั้นจะมีแรงดันบังคับสามเฟส ( three phase voltage commands )  $v_{af}^*$ ,  $v_{bf}^*$  และ  $v_{cf}^*$  ซึ่งจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยมพาหะ ( triangular-wave carrier ) ที่ความถี่

10 KHz สัญญาณเอาท์พุทของวงจร PWM จะใช้เพื่อไปทำให้ตัว IGBT ทำงาน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าของมุม  $\theta_o$  สามารถจะหาได้จากแรงดันเฟส a :  $e_a$  โดยเป็นการเฉลี่ยค่าของวงจร zero-crossing detect และ incremental encoder interface ซึ่งวงจรของ zero-crossing detect ได้มีการกำหนดสัญญาณพัลส์เพื่อทำการรีเซต incremental encoder interface อย่างสอดคล้องกันด้วย



รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมแสดงระบบควบคุมรวมของระบบแอคทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์

Incremental encoder interface จะนับการเปลี่ยนแปลงมุมที่เกี่ยวข้องกับแรงดันเฟส a เมื่อช่วงเวลาของการแซมปลิงสั้นการเปลี่ยนแปลงค่ามุมจากเดิมจะมีค่าเล็กมากๆ ฉะนั้นผลกระทบของการหน่วงเวลาบนตัวแอคทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์ก็ยังคงมีการกระทำที่เหมาะสมกับตัวตรวจจับ โดยที่การเปลี่ยนแปลงมุม ( transformation angle detectors ) สามารถที่จะละทิ้งไม่สนใจได้ ในทางโปรแกรมซอฟต์แวร์ของรูปที่ 3.12 นั้นภายในลูปกระแส ( current loops ) และภายนอกลูปแรงดัน ( voltage loops ) จะใช้กฎการควบคุม PI ( Proportional-integral control law ) เพื่อควบคุมหรือปรับกระแสไลน์ของแอคทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์และแรงดัน DC-link ตามลำดับ

โดยที่ค่าของพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI และค่าความถี่คัทออฟจะมีผลต่อการกระทำของระบบ สำหรับการออกแบบตัวควบคุมนั้นค่าพารามิเตอร์ของระบบ (system parameter) จะใช้ตามนี้

$$V_m = 98 \text{ V} \quad \omega_e = 377 \text{ rad/s} \quad \omega_c = 0 \text{ mH}$$

$$V_{dc2}^* = 240 \text{ V} \quad L_2 = 5 \text{ mH} \quad R_2 = 0.03 \text{ } \Omega$$

$$C_2 = 4700 \text{ } \mu\text{F}$$

### 3.3.4.1 การออกแบบตัวกรองผ่านความถี่ต่ำสำหรับการคำนวณกระแสอ้างอิง

#### ( Design of lowpass filter for reference current calculation )

บล็อกไดอะแกรมของตัวกรองผ่านความถี่ต่ำ สำหรับการคำนวณกระแสอ้างอิงจะแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 เมื่อ  $\omega_a$  มีค่าน้อยๆ ค่ากระแสฮาร์มอนิกที่แหล่งจ่ายและการแกว่งของแรงดันที่ ดีซี-ลิงก์ ( dc-link voltage ) จะมีค่าลดลง ฉะนั้นการตั้งเวลา (setting time) ของกระแสฮาร์มอนิกและเวลาของกระแสชดเชยฮาร์มอนิกมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นการออกแบบความถี่คัทออฟของตัว  $\omega_a$  นั้นมีผลกระทบโดยตรงต่อคุณสมบัติการชดเชยของตัวแอคทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์

ปริญญานิพนธ์นี้ ใช้การสร้างแบบจำลองระบบสามเฟสแบบโหลดไม่เป็นเชิงเส้น ( Tree-Phase nonlinear load ) แบบโหลดสมดุล แต่ถ้าหากต้องการทดลองแบบสามเฟสแบบโหลดไม่สมดุลสามารถจะกระทำได้ โดยวิธีการปลดสายเส้นใดเส้นหนึ่งของระบบออกไปก็จะกลายเป็นระบบสามเฟสโหลดแบบไม่สมดุลแล้ว โดยทั่วไปแล้วทั้งระบบสามเฟสโหลดสมดุลและโหลดไม่สมดุลประกอบด้วยส่วนประกอบฮาร์มอนิกต่างๆ สามารถแบ่งได้ดังนี้

สำหรับกรณีของโหลดแบบสมดุล

$$i_{aL} = i_1 \sin(\theta_e - \phi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} i_n \sin(n\theta_e - \phi_n) \quad (3.55)$$

$$i_{bL} = i_1 \sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3} - \phi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} i_n \sin(n(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) - \phi_n) \quad (3.56)$$

$$i_{cL} = i_1 \sin(\theta_e + \frac{2\pi}{3} - \phi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} i_n \sin(n(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) - \phi_n) \quad (3.57)$$

สำหรับโหลดแบบไม่สมดุล สมมติให้เฟส B เปิดวงจร  $i_{bL} = 0, i_{cL} = -i_{aL}$

$$i'_{aL} = i'_1 \sin(\theta_e - \phi'_1) + \sum_{n=2}^{\infty} i'_n \sin(n\theta_e - \phi'_n) \quad (3.58)$$

$$i'_{bL} = 0 \quad (3.59)$$

$$i'_{bL} = -i'_{aL} = -i'_1 \sin(\theta_e - \phi'_1) + \sum_{n=2}^{\infty} i'_n \sin(n\theta_e - \phi'_n) \quad (3.60)$$

เมื่อ  $i_n$  และ  $i'_n$  แทนค่าสูงสุดของกระแสฮาร์มอนิกสำหรับระบบสามเฟสโหลดสมดุลและโหลดไม่สมดุล และ  $\phi_n$  และ  $\phi'_n$  เป็นค่ามุมเพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power factor angle) ของส่วนประกอบฮาร์มอนิกสำหรับโหลดสมดุลและโหลดไม่สมดุลตามลำดับ

การอธิบายการเปลี่ยนแปลงของเฟรมของสมการที่ (3.16) และของสมการที่ (3.55) ถึงสมการที่ (3.60) นั้น กระแสแกน  $d$  สำหรับโหลดแบบสมดุลและไม่สมดุลสามารถเขียนได้ดังนี้

$$i_{dL} = i_1 \cos \phi_1 + \sum_{n=3,6,9,\dots}^{\infty} [i_{n+1} \cos(n\theta_e - \phi_{n+1}) - i_{n-1} \cos(n\theta_e - \phi_{n-1})] \quad (3.61)$$

$$\begin{aligned} i'_{dL} &= \frac{i'_1}{\sqrt{3}} \cos\left(\frac{\pi}{3} - \phi'_1\right) - \frac{i'_1}{\sqrt{3}} \cos\left(2\theta_e - \frac{\pi}{6} - \phi'_1\right) \\ &+ \sum_{n=2}^{\infty} \frac{i'_n}{\sqrt{3}} \left\{ \cos\left[(n-1)\theta_e + \frac{\pi}{6} - \phi'_n\right] \right. \\ &\quad \left. - \cos\left[(n+1)\theta_e - \frac{\pi}{6} - \phi'_n\right] \right\} \quad (3.62) \end{aligned}$$

สมการที่ (3.61) และ (3.62) เทอมแรกก็คือส่วนประกอบมูลฐานของกระแสโหลด ซึ่งค่าทั้งสองเป็นค่ากระแสตรง (DC Value) โดยความถี่ต่ำสุดในกระแสแกน  $d$  ( $d$ -axis current) คือ ค่าฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 สำหรับโหลดสมดุลและโหลดไม่สมดุล ดังนั้นเราจะได้ส่วนประกอบมูลฐานสำหรับกรณีของโหลดสมดุลและโหลดไม่สมดุล ความถี่คัทออฟ (frequency cutoff)  $\omega_a$  จะต้องมีค่าระหว่างความถี่ดีซี (DC frequency ; 0 rad/sec) และความถี่มูลฐาน (fundamental frequency ; 377 rad/sec) ในปริภูมิพิกัดนี้เลือกให้  $\omega_a = 100 \text{ rad/sec}$  และ  $T_a = 10 \text{ ms}$

### 3.3.4.2 การออกแบบกระแสรีกกุลเลเตอร์ ( Design of current regulator )

การเลือกความถี่คัทออฟ ( frequency cutoff ;  $\omega_f$  ) สำหรับการวิเคราะห์ระบบ จำลองอย่างง่ายนี้มีผลต่อการติดตามการชดเชยกระแสไล่นซ์ของตัวแอกทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์ จากผลการตอบสนองที่รวดเร็วและมีโอเวอร์ชูตต่ำ สำหรับค่ากระแสของตัวแอกทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์เราจะเลือกใช้ค่า  $\omega_f$  สูงๆ ในระบบที่จำลองมานี้จะถูกจำกัดโดยค่าสูงสุดของความถี่สวิทซ์ซิงของอุปกรณ์ไอจีบีที (IGBT Device) ซึ่งจะทำงานที่ความถี่ 100 KHz ดังนั้นค่าความถี่คัทออฟที่ออกแบบจะมีค่าเท่ากับ  $\omega_a / 5$  หรือมีค่าเท่ากับ 12500 rad/sec ค่าคงที่เวลาหน่วง (Delay time) มีค่าเท่ากับ 0.08 ms จากสมการที่ (3.51) ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ของตัวควบคุมแบบ PI (Proportional Controller) ของกระแสรีกกุลเลเตอร์ (current regulator)  $K_{pqf} = K_{pdf} = 625$  และ  $K_{lqf} = K_{ldf} = 375$

### 3.3.4.3 การออกแบบแรงดันเรกกุลเลเตอร์ของดีซี-ลิงก์ (Design of DC-link voltage regulator)

ความถี่คัทออฟ ( frequency cutoff ;  $\omega_{dc}$  ) ของตัวกรองผ่านความถี่ต่ำที่แสดงในบล็อกตัวตรวจจับแรงดัน (voltage detector) ของรูปที่ 3.10 มีค่าเท่ากับ  $\omega_a$  จะได้

$$\omega_{dc} = \omega_a = 100 \text{ rad/sec} \quad (3.63)$$

$$\frac{V_{dc2}(s)}{I_{dl}(s)} = \frac{-3V_m T_a s^2}{\Delta(s)} \quad (3.64)$$

สำหรับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสม เราสามารถลดทอนอันดับของสมการที่ (3.64) ให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐานของฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับที่ 2 ได้ดังนี้

$$\frac{V_{dc2}(s)}{I_{dl}(s)} = \frac{-3V_m T_a s}{2C_2 V_{dc2} (T_f + T_{dc}) (s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2)} \quad (3.65)$$

เมื่อ

$$\zeta = \sqrt{\frac{C_2 V_{dc2}}{6V_m K_{pdc} (T_f + T_{dc})}} \quad (3.66)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{3V_m K_{pdc}}{2C_2 V_{dc2} (T_f + T_{dc})}} \quad (3.67)$$

เราสามารถหาค่าเกณฑ์ขยายแบบสัดส่วนต่อผลตอบสนองของตัวควบคุมแรงดัน ดีซี-ลิงค์ (DC-link voltag controller) จากสมการ (3.66)

$$K_{Pdc} = \frac{C_2 V_{dc2}}{3V_m (T_f + T_d)} \quad (3.68)$$

จากสมการ (3.67) แสดงให้เห็นค่าเกณฑ์ขยายแบบสัดส่วนซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของ ตัวเก็บประจุที่ ดีซี-ลิงค์ (DC-link capacitance ;  $C_2$ ) และแรงดันบังคับที่ ดีซี-ลิงค์ (DC-link voltag command ;  $V_{dc2}^*$ ) ค่าแรงดันสูงสุดของเฟส ( $V_m$ ) และค่าเวลาหน่วง (delay time ;  $T_f$  และ  $T_d$ ) จะสามารถเขียนย่อเป็น  $K_{Pdc}$  ซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับค่าคงที่เวลาหน่วง (delay time ;  $T_a$ ) เราสามารถแทน สมการที่ (3.68) เข้าไปในสมการที่ (3.67) จะได้

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{(T_f + T_d)} \quad (3.69)$$

จากนั้นแทนที่ค่าพารามิเตอร์ของระบบเข้าไปในสมการที่ (3.68) และ (3.69) จะได้  $K_{Pdc} = 0.381$  และ  $\omega_n = 70.15 \text{ rad/sec}$  ค่า  $K_{Pdc} = 0.381$  นี้มีความเหมาะสมแล้วเพราะเส้น จำกัดช่วงการทำงานที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพตามสมการที่ (3.53)  $K_{Pdc} = 0.381$

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

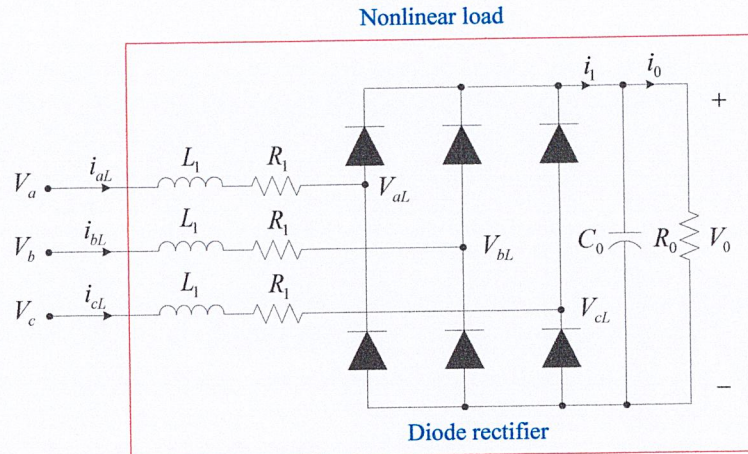
#### 4.1 หลักการทำงานของบล็อกไดอะแกรม

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.19(ข) โดยการจ่ายกระแส IL เข้าที่อินพุทหมายเลขสี่ ซึ่งค่ากระแส IL เป็นค่ากระแสโหลด  $i_{aL}$ ,  $i_{bL}$  และ  $i_{cL}$  จ่ายเข้าสู่บล็อก abc\_to\_dqo Transformation เพื่อแปลงเป็นกระแสแกน d และ q ( กระแสแกน d คือ ค่ากระแส  $I_{dL}$  และกระแสแกน q คือ ค่ากระแส  $I_{qL}$  ) พิจารณาที่  $I_{dL}$  ก่อนซึ่งค่ากระแส  $I_{dL}$  ได้ผ่านตัวกรองความถี่ต่ำ (lowpass filter) เพื่อทำการแยกค่าความถี่สูงและความถี่ต่ำออกจากกัน ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งในการหาค่ากระแสอ้างอิงของแอกทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์ เมื่อผ่านตัวกรองความถี่ต่ำมาแล้วก็แยกค่า low และ high ออกจากกัน ให้เหลือเฉพาะความถี่สูงของระบบ ( ตามสมการที่ (3.28) ) ส่วนค่า  $V_{dc2}^*$  เป็นค่าคงที่ และค่า  $V_{dc2}$  เป็นแรงดันจาก DC-link capacitor แล้วส่งไปยังตัวตรวจจับแรงดันเพื่อนำค่าที่ได้มาลบกัน แล้วนำค่าที่ได้นี้ไปผ่านบล็อกตัวควบคุมแบบ proportional-integral (PI) จะได้กระแส  $I_{dc}$  ( ตามสมการที่ (3.31) ) และจากสมการที่ (3.30) จะได้กระแส  $I_{df}^*$  ที่เกิดจากกระแส lowpass ลบด้วยกระแส  $I_{dL}$  และบวกด้วยกระแส  $I_{dc}$  เพื่อชดเชย กระแสที่เกิดจาก convertor

พิจารณาที่ e ค่ากระแส  $I_f$  คือ ค่ากระแส  $i_{df}$ ,  $i_{bf}$  และ  $i_{cf}$  จากสมการที่ (3.12) ถึง (3.14) นำมาเข้าบล็อก abc\_to\_dqo Transformation เพื่อแปลงเป็นกระแสของแกน d และ q โดยที่กระแสแกน d คือ ค่ากระแส  $I_{df}$  ส่วนค่ากระแสแกน q คือ ค่ากระแส  $I_{qf}$  เมื่อได้กระแส  $I_{df}$  และ  $I_{qf}$  แล้วนำมาลบกับ  $I_{df}^*$  อีกครั้ง ( เมื่อ  $I_{df}^*$  เป็นกระแสที่เกิดมาจากโหลด ส่วน  $I_{df}$  เป็นกระแสที่เกิดจาก convertor ) จะทำให้ได้ค่ากระแสอ้างอิงแกน d แล้วนำไปผ่านบล็อกควบคุมแบบ PI อีกครั้ง ส่วนกระแสอ้างอิงแกน q ก็เหมือนกัน เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.32) และ (3.33) จะได้เกนขยาย (K) และแรงดันแหล่งจ่ายที่แปลงเป็นแกน d และ q เรียบร้อยแล้วมาบวกกันแล้วจะได้ค่า  $V_{df}^*$  และ  $V_{qf}^*$  เมื่อเราได้แรงดันแกน d และ q และนำค่าแรงดันนี้ไปเข้าบล็อก dqo\_to\_abc Transformation เพื่อทำการแปลงแรงดันกลับไปสู่รูปแบบปกติอีกครั้งหนึ่งซึ่งจะได้ค่าแรงดัน  $V_{af}^*$ ,  $V_{bf}^*$  และ  $V_{cf}^*$  เมื่อค่าแรงดันอ้างอิงในตัวชดเชยของแอกทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์เปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมพาหะของบล็อก PWM โดยสัญญาณที่ออกจาก PWM จะเป็นพัลส์ เพื่อไปบังคับให้ converter ทำงานเพื่อสร้างกระแสชดเชยให้กับระบบ

## 4.2 ลำดับขั้นการทดลอง

1. สร้างบล็อกไดอะแกรมการทดลองตามทฤษฎีในบทที่ 3 ซึ่งประกอบด้วยระบบไฟฟ้าสามเฟสแบบ nonlinear load แบบสมมูล ซึ่งเป็นระบบที่ยังไม่ได้มีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกและระบบไฟฟ้าสามเฟสแบบ nonlinear load ที่มีตัวแอกทีฟเพาเวอร์ฟิลเตอร์เป็นตัวสร้างกระแสชดเชยต่ออยู่ในระบบไฟฟ้า การสร้างโหลดแบบ nonlinear นั้น โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังนี้



รูปที่ 4.1 โหลดแบบ nonlinear load

$$L_1 = 3.1 \text{ mH}$$

$$R_1 = 0.03 \text{ } \Omega$$

$$R_0 = 8.67 \text{ } \Omega$$

$$C_0 = 330 \text{ } \mu\text{F}$$

2. ทำการรับบล็อกไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าสามเฟสแบบ nonlinear load แบบสมมูลที่ยังไม่มีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก โดยมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$V_a = 220 V_{rms}$$

ที่ความถี่ 50 Hz มุม 0 องศา

$$V_b = 220 V_{rms}$$

ที่ความถี่ 50 Hz มุม -120 องศา

$$V_c = 220 V_{rms}$$

ที่ความถี่ 50 Hz มุม 120 องศา

จากนั้นทำการรันโปรแกรมโดยตั้งเวลาในการรันไว้ที่ 0.8 วินาที และทำการวัดค่ากระแส  $I_a, I_b, I_c$  และค่าแรงดัน  $V_a, V_b, V_c$

3. ทำการรันบล็อกไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าสามเฟสแบบ nonlinear load ที่ได้มีการต่อแอกทีฟพาวเวอร์ฟิเตอร์ต่อร่วมกับระบบ โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$K_{pf} = 62.5$$

$$K_{lf} = 375$$

$$K_{pdc} = 0.381$$

$$K_{ldc} = 0.381$$

$$T_a = 0.01$$

$$T_{dc} = 0.01$$

ซึ่งค่าตามข้างล่างนี้เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณจากบทที่ 3

$$T_a = T_{dc} = 10 \text{ ms} \quad K_{pqf} = K_{pdf} = 62.5$$

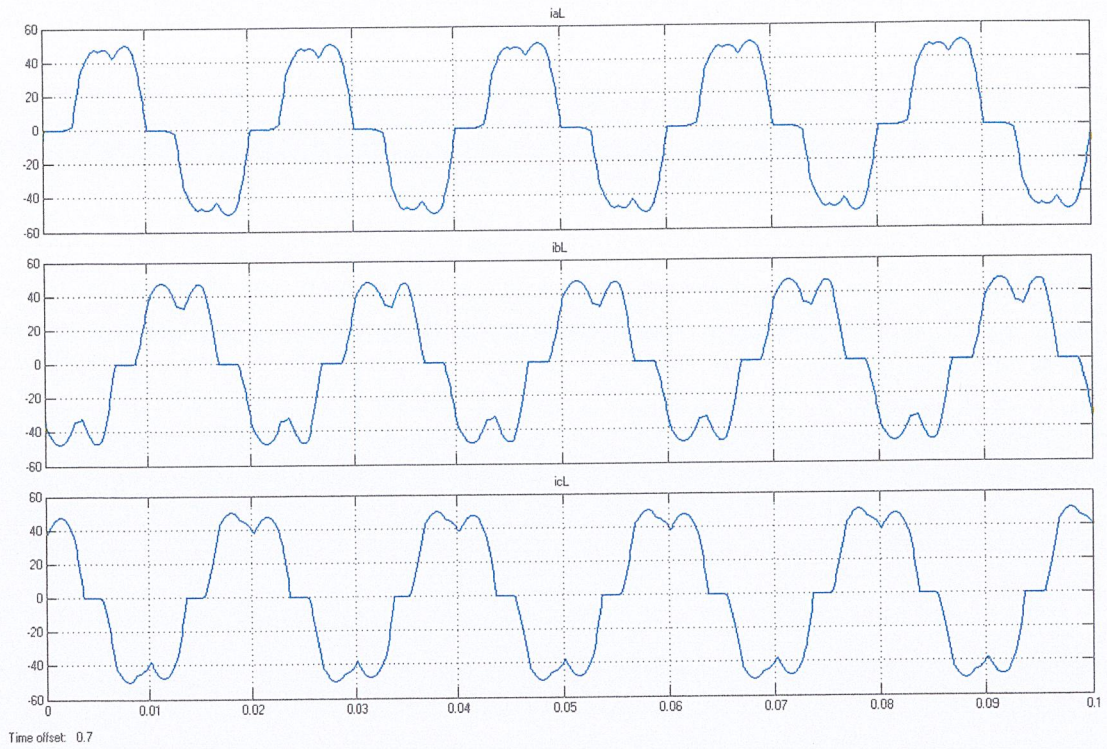
$$K_{pdc} = K_{ldc} = 0.381 \quad K_{lqf} = K_{ldf} = 375$$

4. ทำการวัดค่ากระแส  $I_a, I_b, I_c$  ในระบบไฟฟ้าสามเฟสแบบ nonlinear load ที่มีการชดเชยค่ากระแสฮาร์มอนิกแล้วและนำผลของรูปคลื่นที่ได้มาเปรียบเทียบกับ รูปคลื่นของระบบที่ยังไม่ได้มีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก

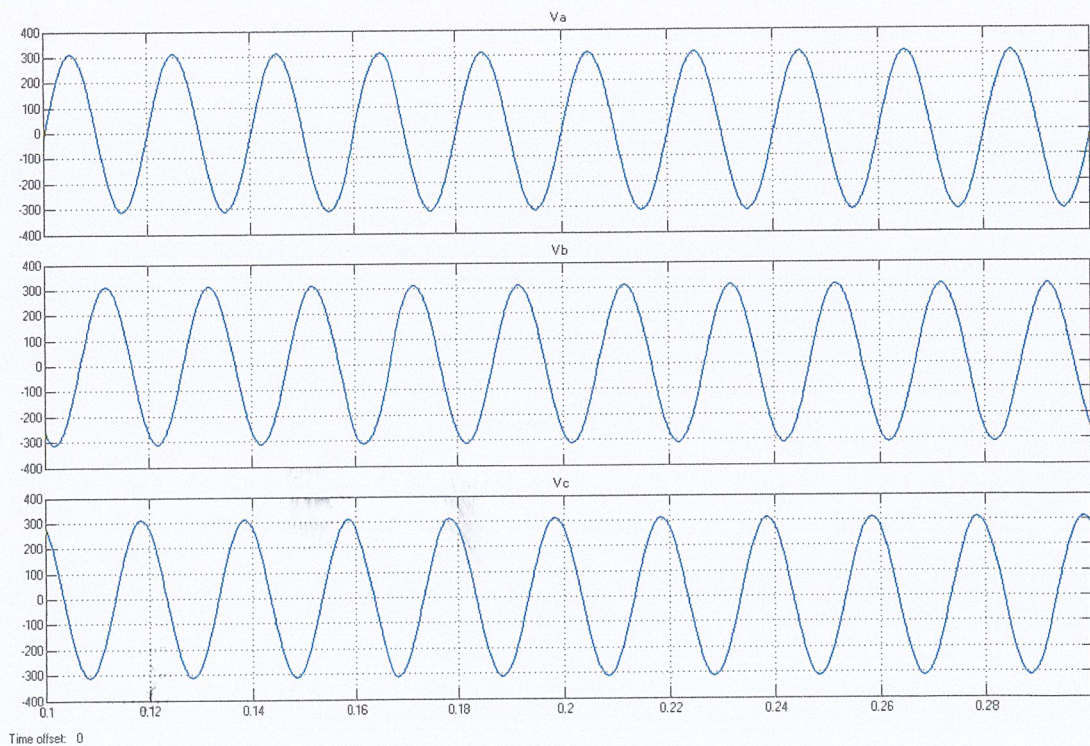
5. นำค่าที่วัดได้จากทั้งสองระบบมาคำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่าง ๆ โดยใช้ทฤษฎีของ FFT ในการวิเคราะห์พร้อมทั้งทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของทั้งสองระบบ

### 4.3 ผลการทดลอง

1. จากการรันบล็อกไดอะแกรมของระบบไฟฟ้า 3 เฟส nonlinear โหลด แบบสมมูลที่ยังไม่ได้มีการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก สามารถแสดงรูปคลื่นของกระแสแต่ละเฟสได้ดังนี้

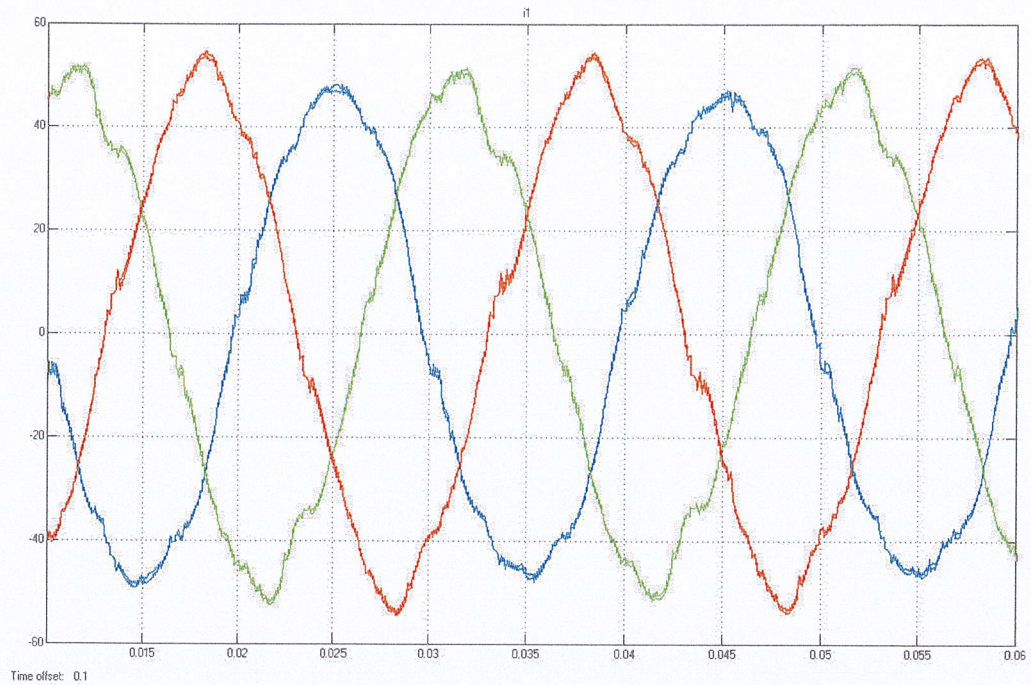


รูปที่ 4.2 แสดงรูปคลื่นกระแสฮาร์มอนิกก่อนการชดเชย

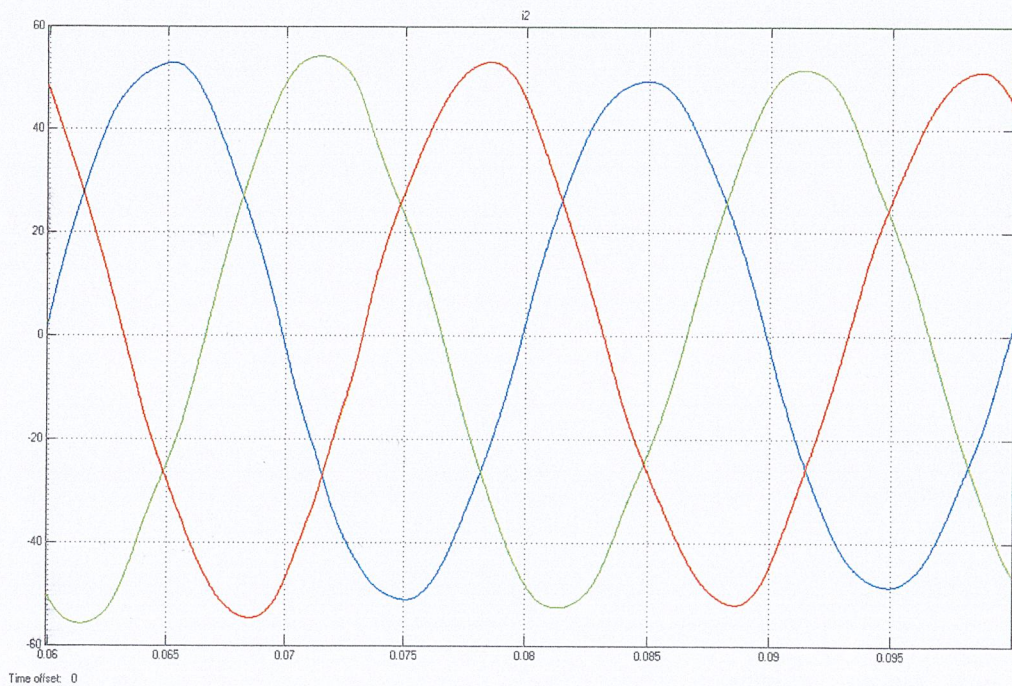


รูปที่ 4.3 แสดงรูปคลื่นแรงดันแหล่งจ่ายของแต่ละเฟส

2. จากการรันบล็อกไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าสามเฟสแบบ nonlinear load แบบสมดุล ที่มีตัวแอกทีฟพาวเวอร์ฟิเตอร์ต่อรวมอยู่ในระบบสามารถแสดงรูปคลื่นที่ดังนี้



รูปที่ 4.4 แสดงรูปคลื่นกระแสของแหล่งจ่ายหลังจากชดเชย



รูปที่ 4.5 แสดงรูปคลื่นกระแสของแหล่งจ่ายหลังจากการชดเชยและผ่านการกรอง

### 3. เปรียบเทียบค่าของกระแสที่ได้ก่อนการชดเชยและหลังการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก

#### 1. ตารางแสดงการก่อนการชดเชยและหลังการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก

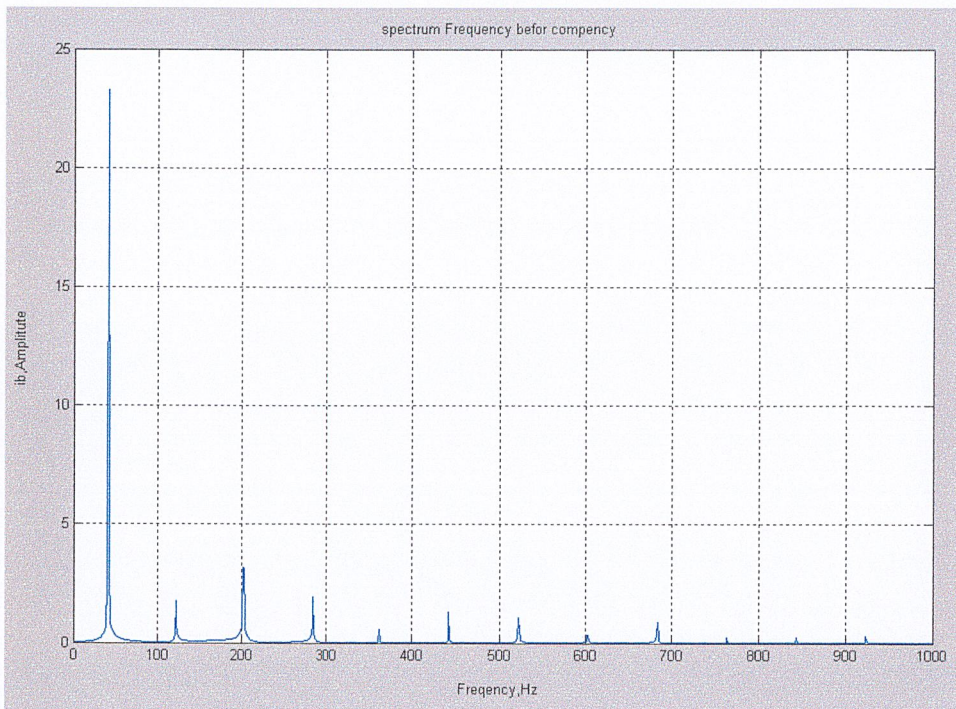
ตารางที่ 4.1 ขณะยังไม่ได้ทำการแก้ไขฮาร์มอนิก (โดยใช้ FFT วิเคราะห์)

Frequency Band	Harmonic component	$I_{aL}$	$I_{bL}$	$I_{cL}$
DC-120	1 st	33.46478	31.74976	34.79053
120-240	3 rd	7.68341	8.43179	7.95787
240-360	5 th	3.21439	4.20344	4.21711
360-480	7 th	2.06683	2.35810	1.88146
480-600	9 th	1.78179	1.95337	2.16320
600-720	11 st	1.64583	1.78212	1.01598
720-840	13 rd	0.35906	0.45023	0.77104
840-960	15 th	0.64416	0.33397	0.58972
Total	$I_{rms}$	35.14767	33.64857	36.58547
	THDi(%)	25.56546	30.04623	26.23070

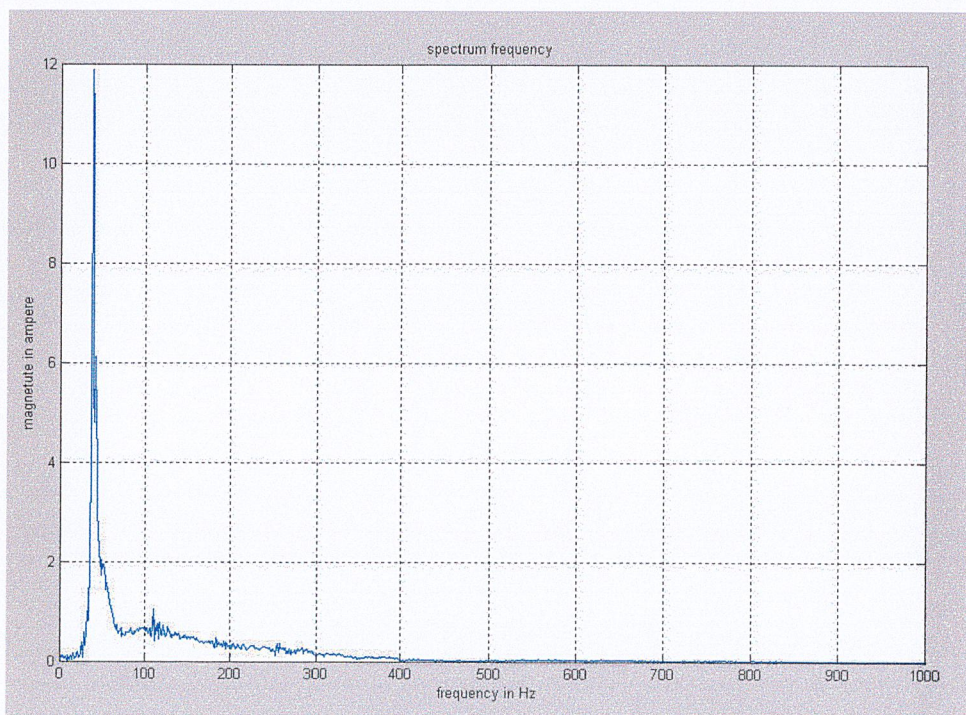
ตารางที่ 4.2 ขณะได้ทำการแก้ไขฮาร์มอนิก (โดยใช้ FFT วิเคราะห์)

Frequency Band	Harmonic component	$I_{aL}$	$I_{bL}$	$I_{cL}$
DC-120	1 st	31.66701	33.87616	34.87719
120-240	3 rd	6.36729	5.82441	5.40928
240-360	5 th	2.84685	3.85081	3.23848
360-480	7 th	0.80946	1.46982	1.41348
480-600	9 th	0.46297	0.58332	0.39325
600-720	11 st	0.41437	0.36233	0.32326
720-840	13 rd	0.30834	0.4447	0.25607
840-960	15 th	0.15366	0.28110	0.21698
Total	$I_{rms}$	32.57889	34.81441	35.73863
	THDi(%)	21.70135	20.71346	18.22803

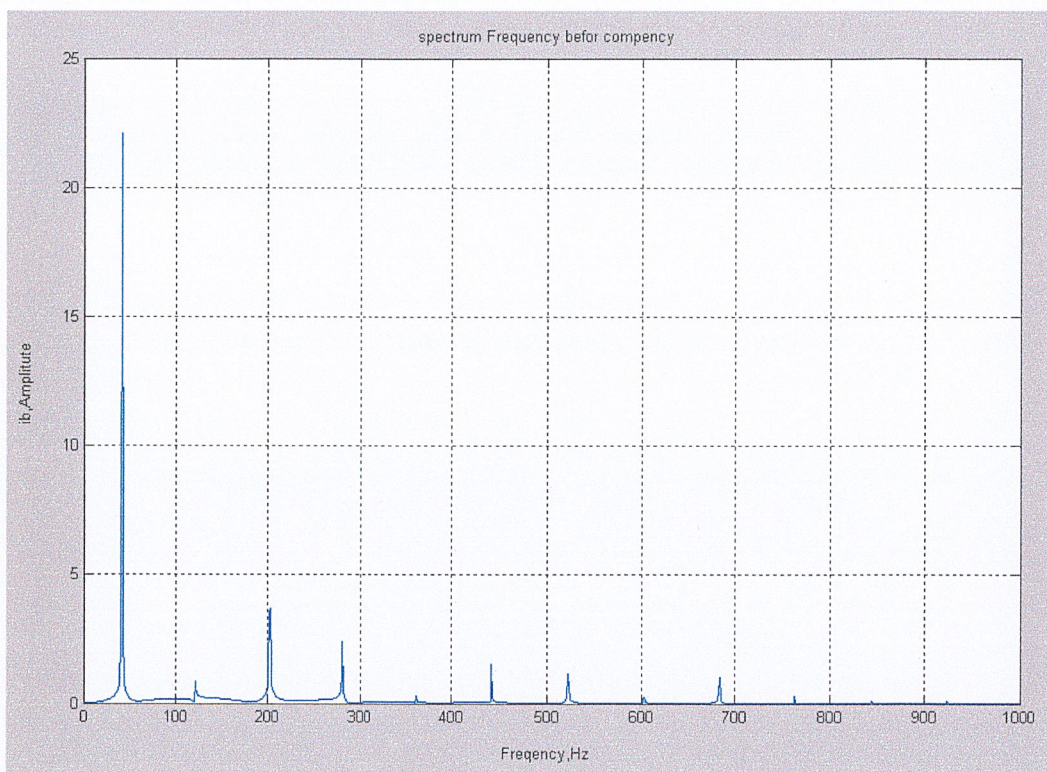
2. แสดงการเปรียบเทียบความถี่สเปกตรัมและเปรียบเทียบผลของฮาร์มอนิก



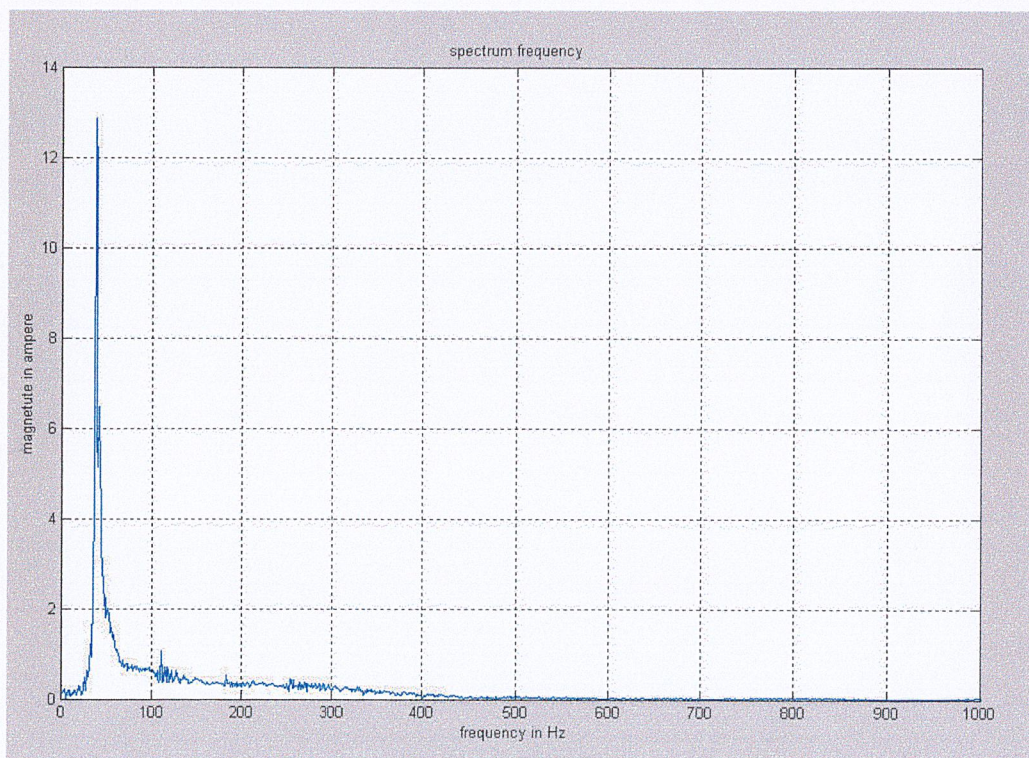
รูปที่ 4.6 ความถี่สเปกตรัมของกระแส ia ก่อนการชดเชย



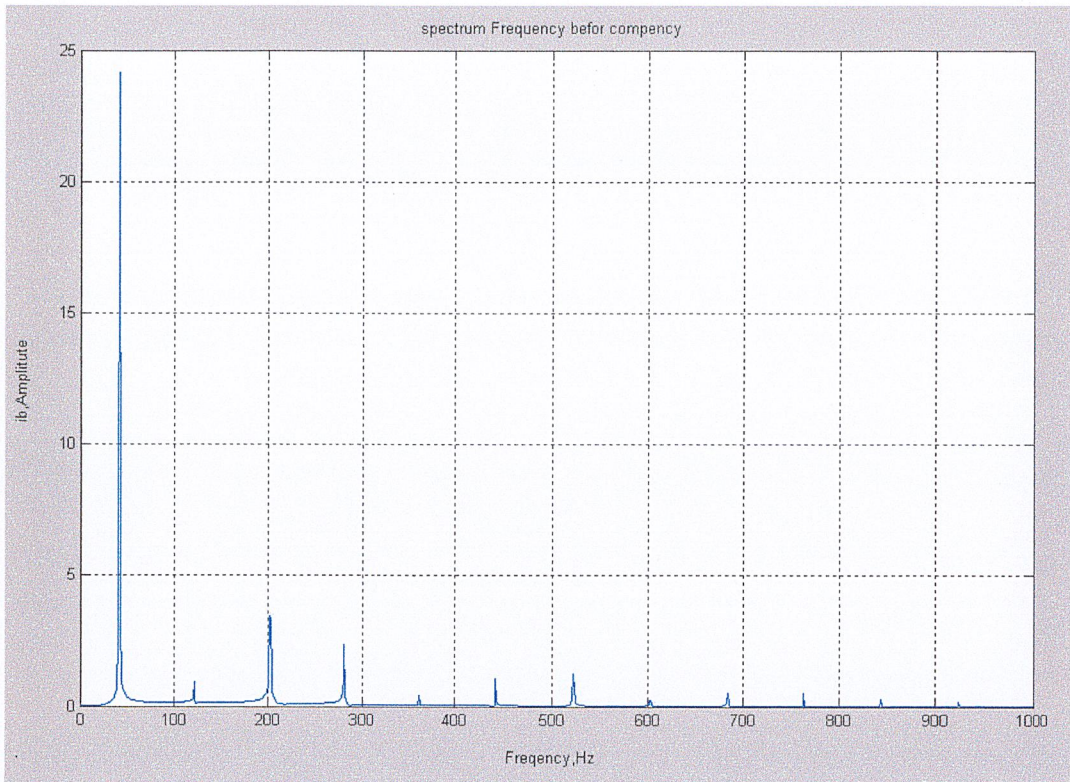
รูปที่ 4.7 ความถี่สเปกตรัมของกระแส ia หลังการชดเชย



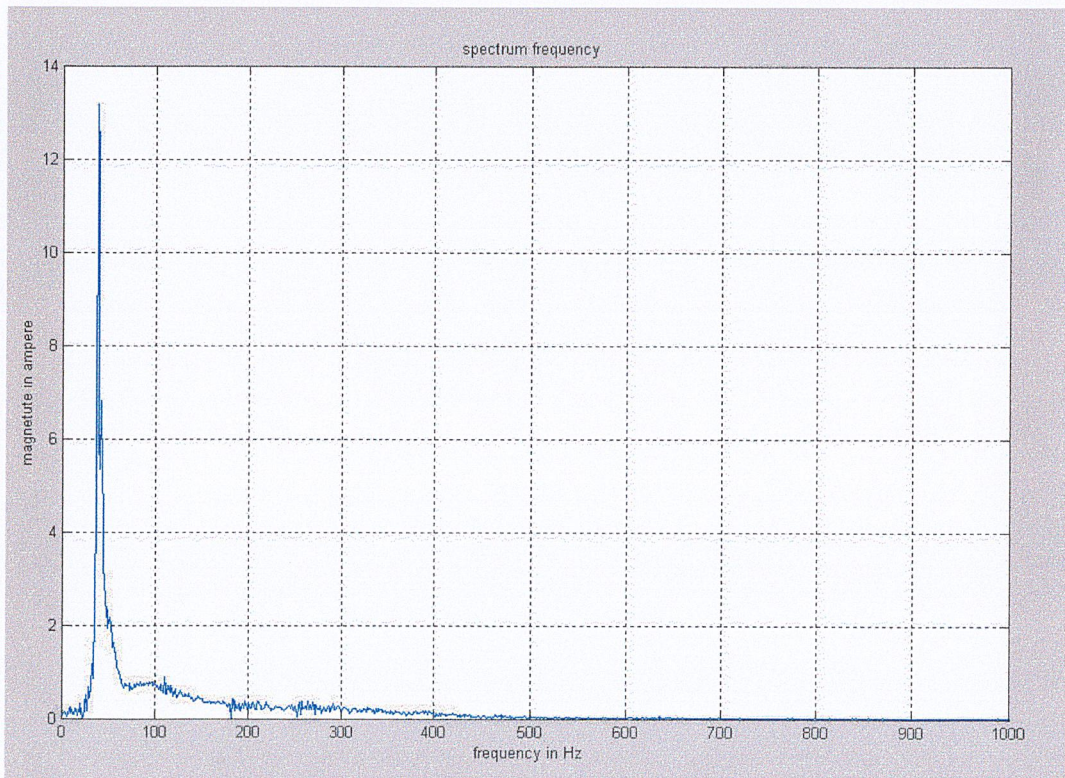
รูปที่ 4.8 ความถี่สเปกตรัมของกระแส ib ก่อนการชดเชย



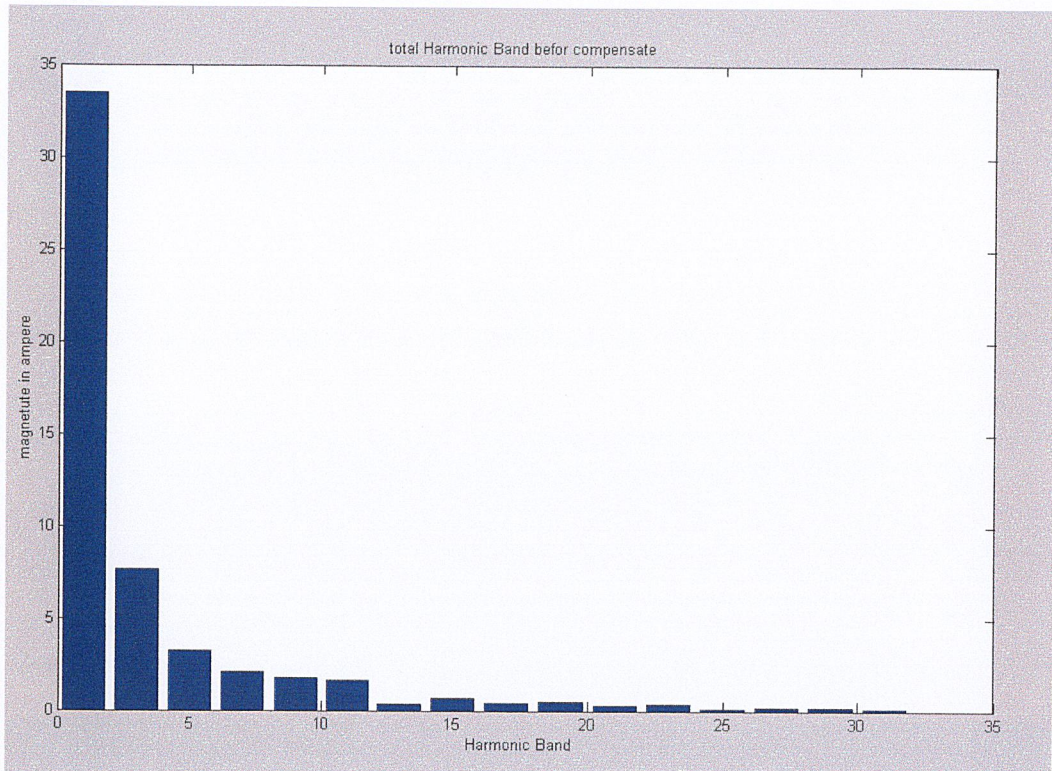
รูปที่ 4.9 ความถี่สเปกตรัมของกระแส ib หลังการชดเชย



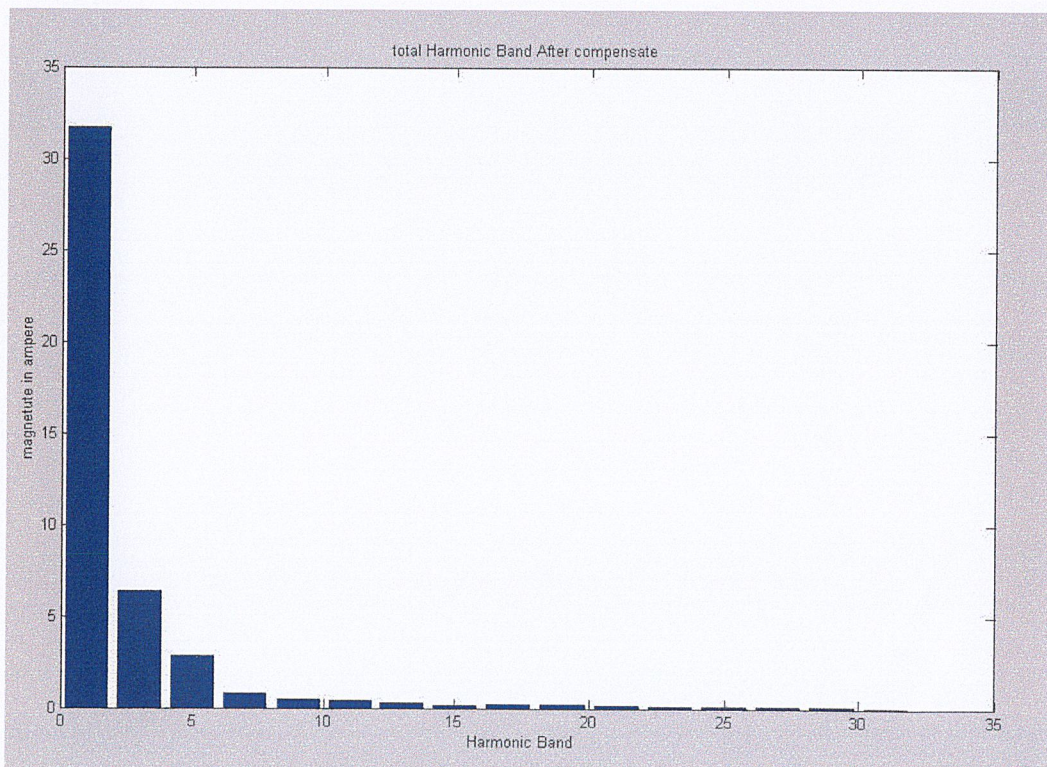
รูปที่ 4.10 ความถี่สเปกตรัมของกระแส ic ก่อนการชดเชย



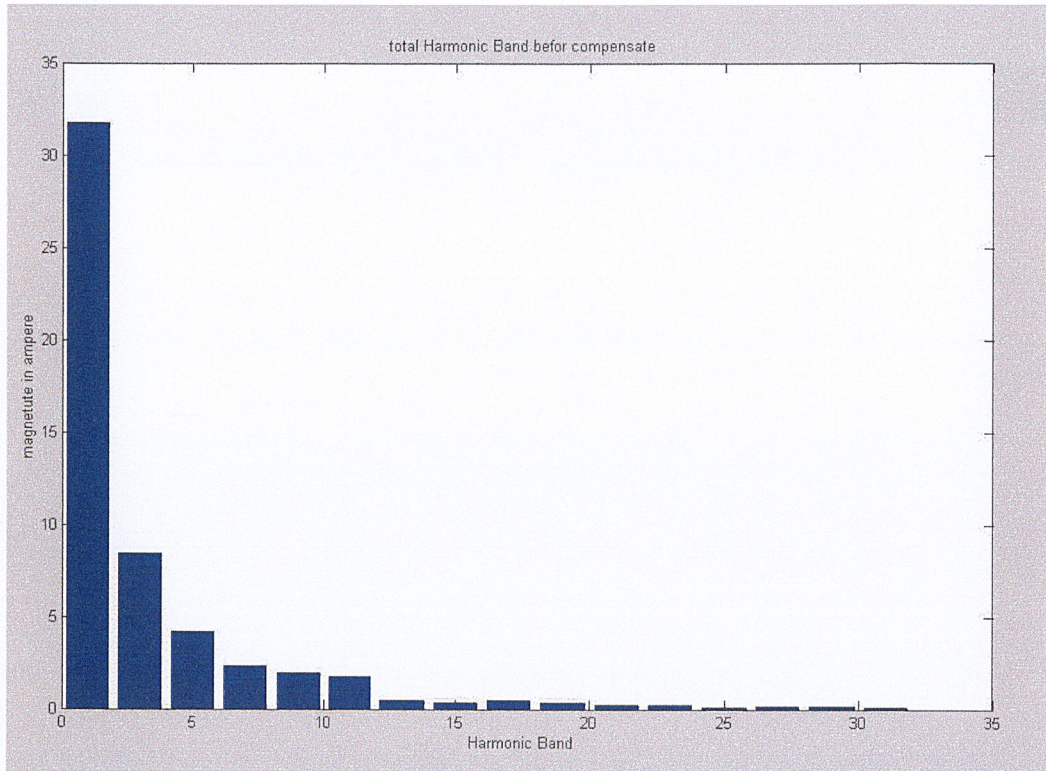
รูปที่ 4.11 ความถี่สเปกตรัมของกระแส ic หลังการชดเชย



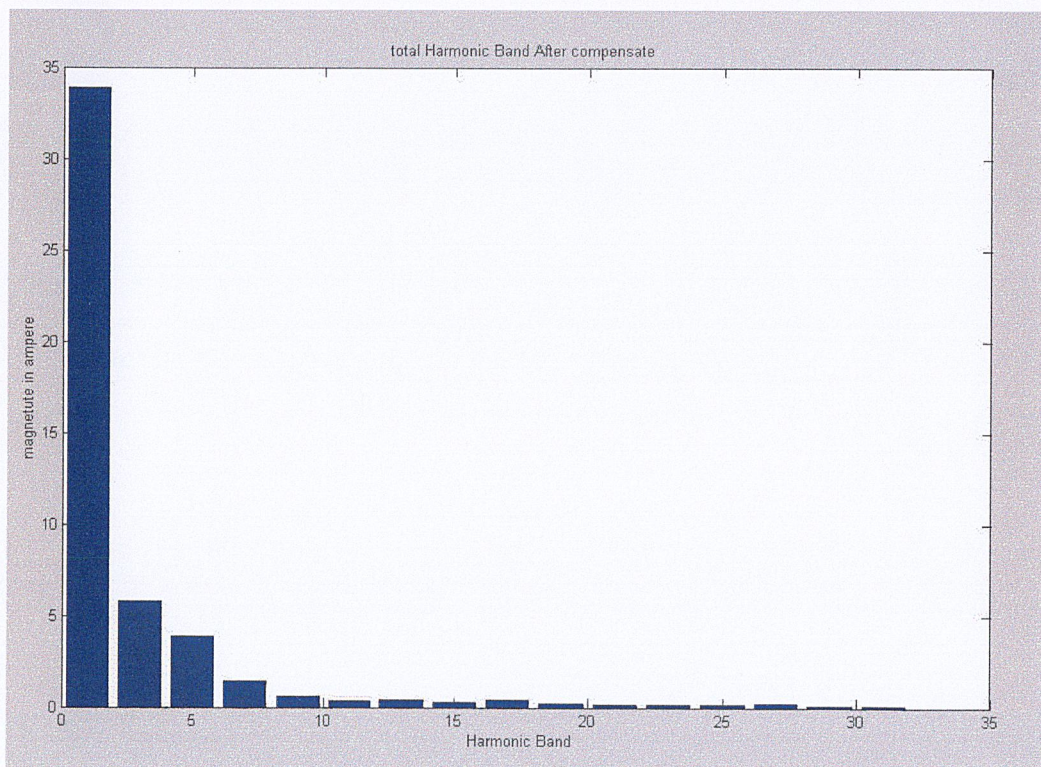
รูปที่ 4.12 ฮาร์มอนิกรวมของกระแส ia ก่อนการชดเชย



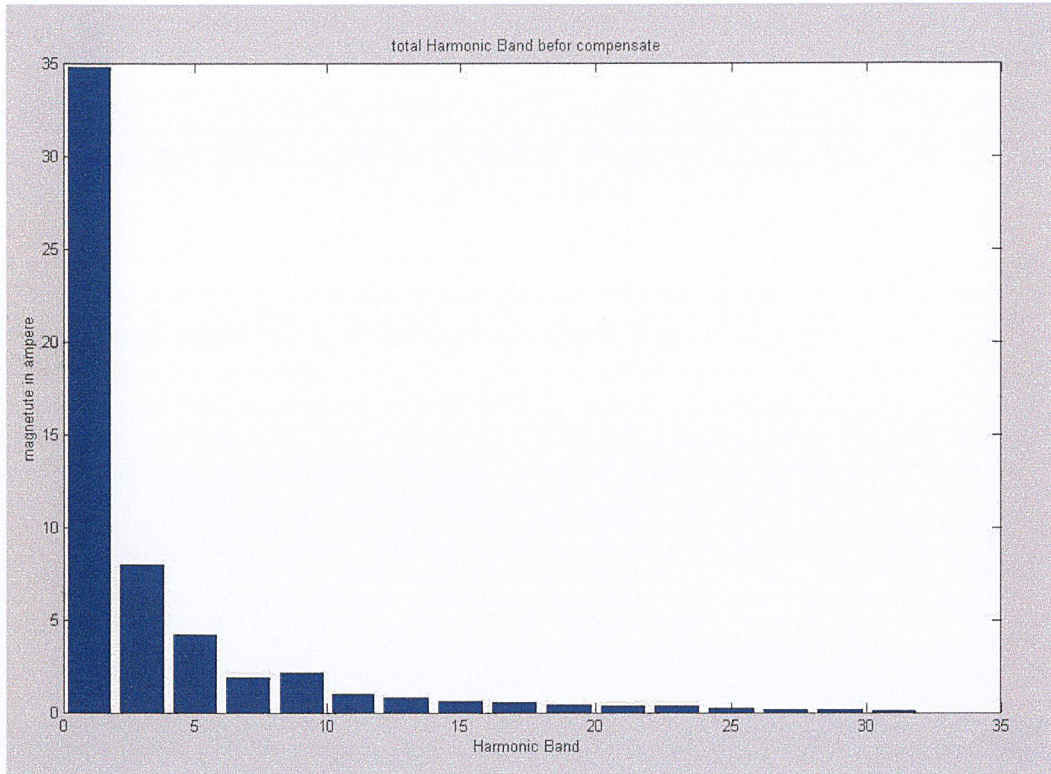
รูปที่ 4.13 ฮาร์มอนิกรวมของกระแส ia หลังการชดเชย



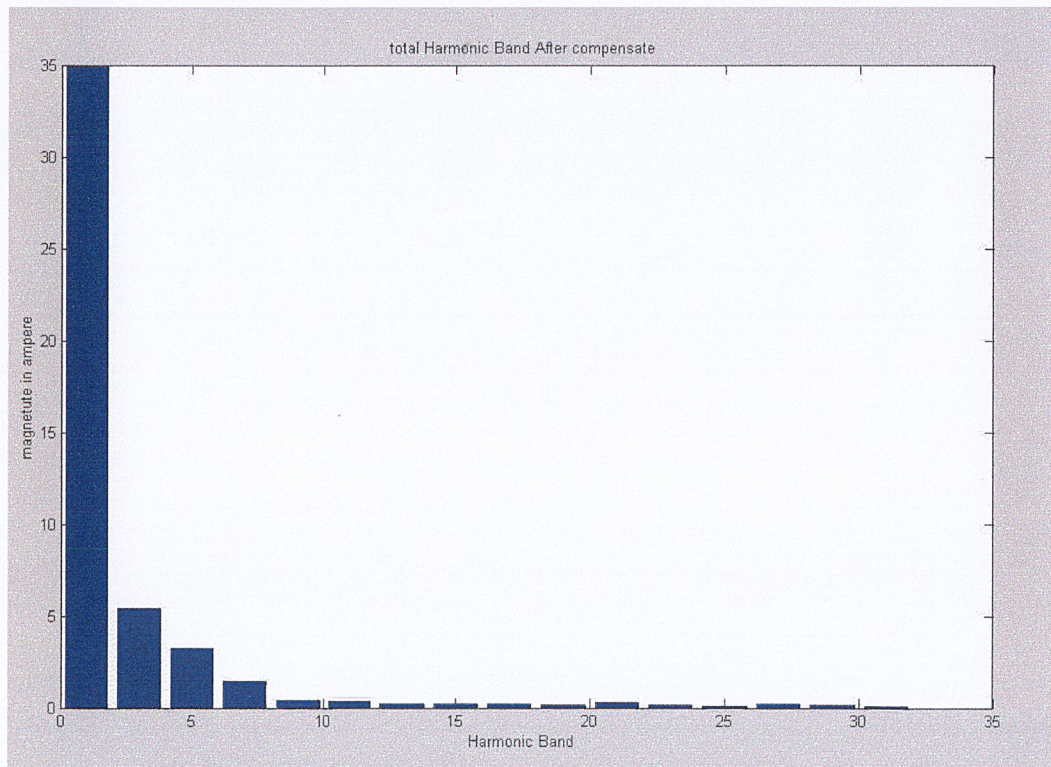
รูปที่ 4.14 ฮาร์มอนิกรวมของกระแส ib ก่อนการชดเชย



รูปที่ 4.15 ฮาร์มอนิกรวมของกระแส ib หลังการชดเชย



รูปที่ 4.16 ฮาร์มอนิกรวมของกระแส ic ก่อนการชดเชย



รูปที่ 4.17 ฮาร์มอนิกรวมของกระแส ic หลังการชดเชย

#### 4. โปรแกรมการคำนวณหาค่าอันดับของฮาร์มอนิกและความถี่สเปกตรัมโดยใช้ FFT

```

% Programe calculate RMS Value and total harmonic band distortion with Fast Furier Transform
(FFT)
%
% ia,ib,ic is same line current in one-dimention
% n is length of current
% I = fft(i) is computed with a fast Fourier transform (FFT) algorithm of vector x.
% If i is a matrix, I is the FFT of each column of the matrix.
% Iabs = abs(x) returns the absolute value of the elements of x.
% abs(x) = sqrt (real(x). ^2 + imag(x). ^2)
% Har_1, 3, 5.....31 is odd harmonic in power system
% Irms is total current in phase a,b,c
% THDi is total harmonic distortion in phase a,b,c

calculate load current in system before compensate
iaL, ibL, icL is load current in phase A, B, C

%clear data in memmory
clear;
load iaL;load ibL;load icL
ia = iaL(2:end,2:end);
ib = ibL(2:end,2:end);
ic = icL(2:end,2:end);
n1 = length(ia);
n2 = length(ib);
n3 = length(ic);
%compute FFT ia
I = fft(ia);
Ia = I/n1;
Ia_abs = abs(Ia);
Ia_rms = sqrt(sum(Ia_abs.^2));

```

```

%compute FFT ib
I      = fft(ib);
Ib     = I/n2;
Ib_abs = abs (Ib);
Ib_rms = sqrt(sum(Ib_abs.^2));

%compute FFT ia
I      = fft(ic);
Ic     = I/n3;
Ic_abs = abs(Ic);
Ic_rms = sqrt (sum (Ic_abs. ^2));

%Find harmonic in frequency band. Each band wide is 100Hz
% phase A
Har_1   ia = sqrt(sum(Ia_abs(1:100).^2)*2);
Har_3   ia = sqrt(sum(Ia_abs(100:200).^2)*2);
Har_5   ia = sqrt(sum(Ia_abs(200:300).^2)*2);
Har_7   ia = sqrt(sum(Ia_abs(300:400).^2)*2);
Har_9   ia = sqrt(sum(Ia_abs(400:500).^2)*2);
Har_11  ia = sqrt(sum(Ia_abs(500:600).^2)*2);
Har_13  ia = sqrt(sum(Ia_abs(600:700).^2)*2);
Har_15  ia = sqrt(sum(Ia_abs(700:800).^2)*2);

%Find total harmonic distortion in 100%
THD-ia = 100*sqrt((Har_3 ia.^2)+(Har_5 ia.^2)+(Har_7 ia.^2)+(Har_9 ia.^2)+...
                (Har_11 ia. ^2) + (Har_13 ia. ^2) + (Har_15 ia. ^2))/Ia_rms;

%Phase B
Har_1   ib = sqrt(sum(Ib_abs(1:100).^2)*2);
Har_3   ib = sqrt(sum(Ib_abs(100:200).^2)*2);
Har_5   ib = sqrt(sum(Ib_abs(200:300).^2)*2);
Har_7   ib = sqrt(sum(Ib_abs(300:400).^2)*2);
Har_9   ib = sqrt(sum(Ib_abs(400:500).^2)*2);

```

```
Har_11      ib = sqrt(sum(Ib_abs(500:600).^2)*2);
```

```
Har_13      ib = sqrt(sum(Ib_abs(600:700).^2)*2);
```

```
Har_15      ib = sqrt(sum(Ib_abs(700:800).^2)*2);
```

```
%Find total harmonic distortion in 100%
```

```
THD-ib = 100*sqrt((Har_3 ib.^2)+(Har_5 ib.^2)+(Har_7 ib.^2)+(Har_9 ib.^2)+...
              (Har_11 ib.^2) + (Har_13 ib.^2) + (Har_15 ib.^2))/Ib_rms;
```

```
%phase C
```

```
Har_1      ic = sqrt(sum(Ic_abs(1:100).^2)*2);
```

```
Har_3      ic = sqrt(sum(Ic_abs(100:200).^2)*2);
```

```
Har_5      ic = sqrt(sum(Ic_abs(200:300).^2)*2);
```

```
Har_7      ic = sqrt(sum(Ic_abs(300:400).^2)*2);
```

```
Har_9      ic = sqrt(sum(Ic_abs(400:500).^2)*2);
```

```
Har_11     ic = sqrt(sum(Ic_abs(500:600).^2)*2);
```

```
Har_13     ic = sqrt(sum(Ic_abs(600:700).^2)*2);
```

```
Har_15     ic = sqrt(sum(Ic_abs(700:800).^2)*2);
```

```
Har_31     ic = sqrt(sum(Ic_abs(1500:1600).^2)*2);
```

```
%Find total harmonic distortion in 100%
```

```
THD = 100*sqrt((Har_3 ic.^2)+(Har_5 ic.^2)+(Har_7 ic.^2)+(Har_9 ic.^2)+...
              (Har_11 ic.^2) + (Har_13 ic.^2) + (Har_15 ic.^2))/Ic_rms;
```

```
%plot figure in line current and spectrum frequency
```

```
figure;subplot(311);plot(ia);grid
```

```
subplot(312);plot(ib);grid
```

```
subplot(313);plot(ic);grid
```

```
figure;
```

```
s = 1:2:31;
```

```
subplot(311);bar(s,Harmonic_iaL);ylabel('iaL');
```

```
subplot(312);bar(s,Harmonic_ibL);ylabel('ibL');
```

```
subplot(313);bar(s,Harmonic_icL);ylabel('icL');
```

```
title('total Harmonic Band before compensete');  
xlabel('Harmonic Band');ylabel('magnetute in ampere')
```

```
%Result of programe
```

```
fprintf('Ia-rms %.5f Ampere\n',Ia_rms')
```

```
fprintf('THDia %.5f percent\n',THD-ia')
```

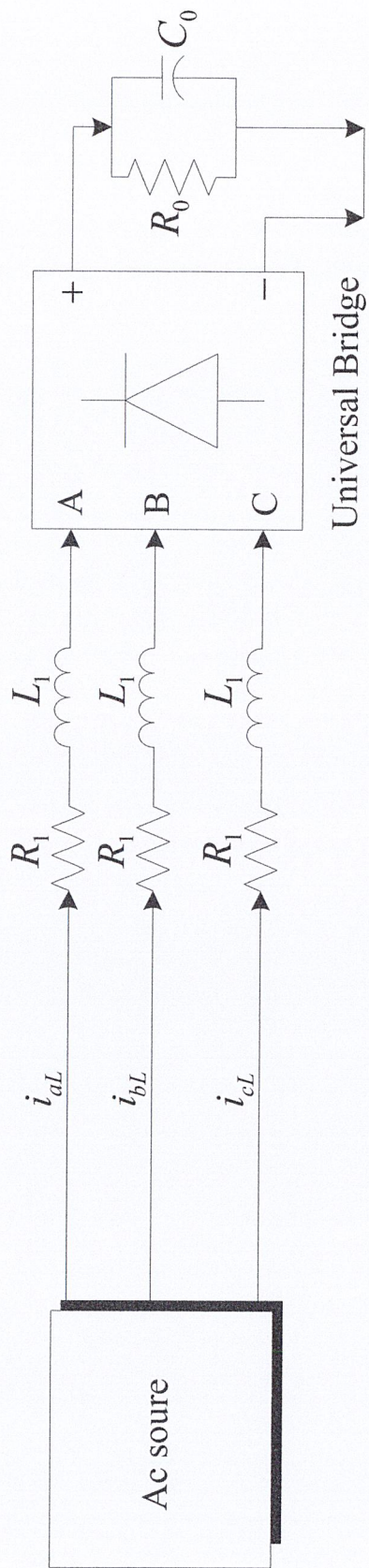
```
fprintf('Ib-rms %.5f Ampere\n',Ib_rms')
```

```
fprintf('THDib %.5f percent\n',THD-ib')
```

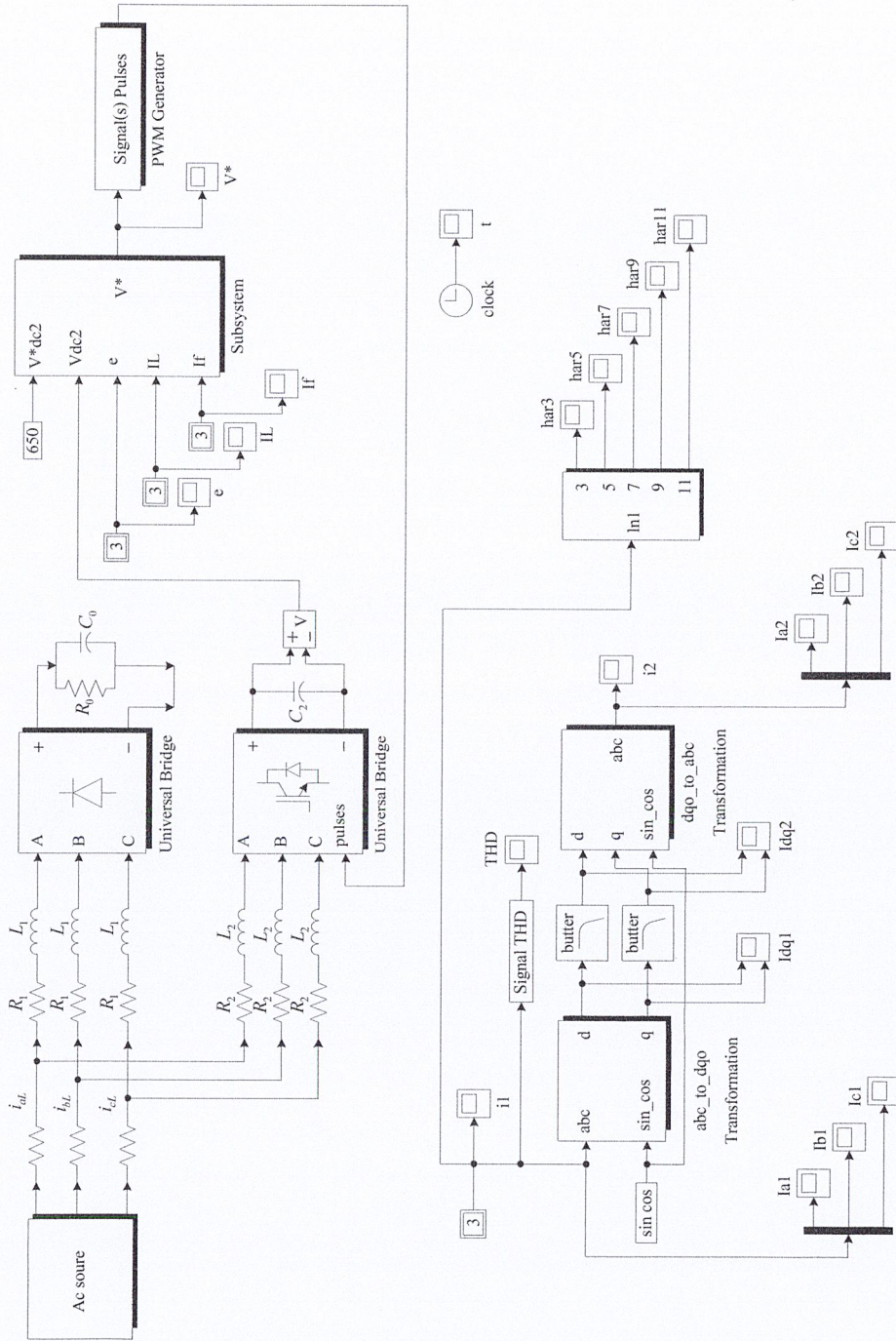
```
fprintf('Ic-rms %.5f Ampere\n',Ic_rms')
```

```
fprintf('THDic %.5f percent\n',THD-ic')
```

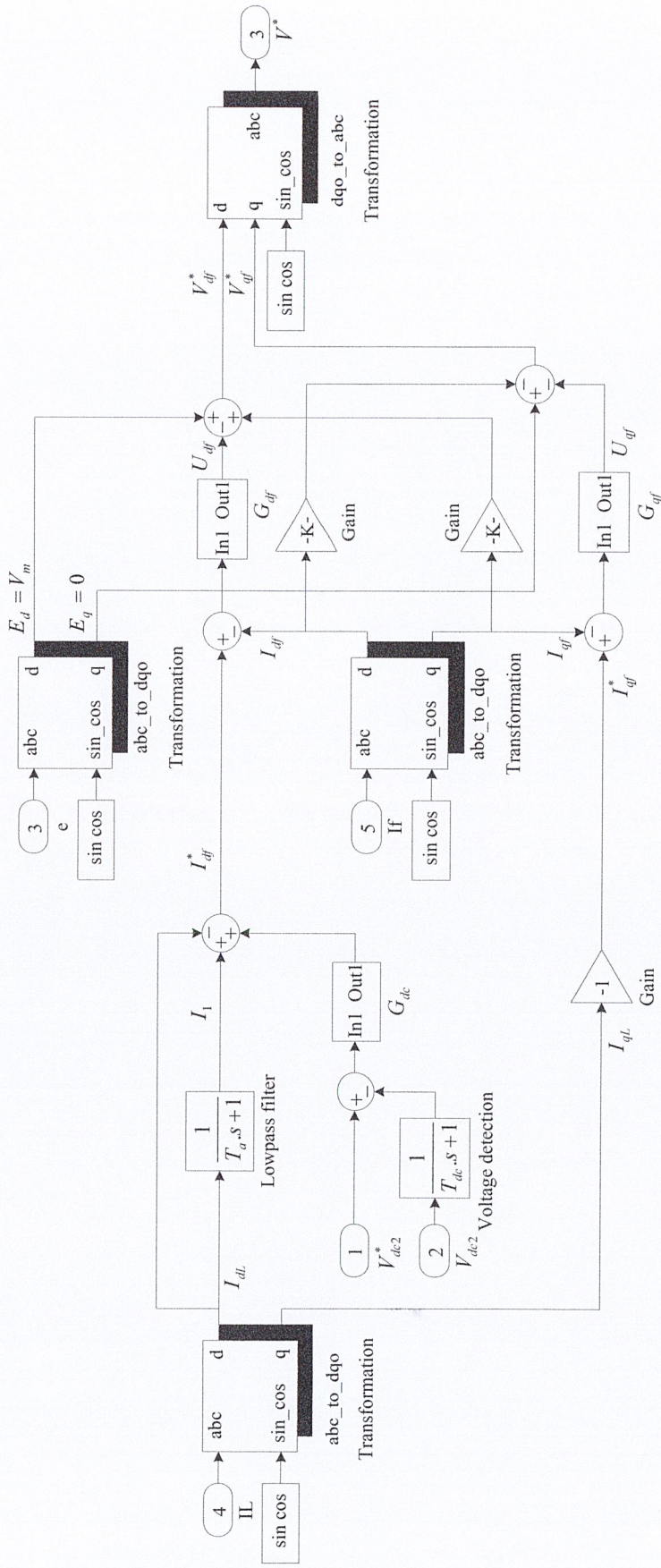
```
*****
```



รูปที่ 4.18 ระบบไฟฟ้าสามเฟสแบบ Nonlinear load แบบสมดุล ซึ่งเป็นการขาดกระแสเสถียรมอนิก



(n)



(จ)

รูปที่ 4.19 ระบบ ไฟฟ้า 3 เฟส Nonlinear load ที่มีแอกที่เฟเซอร์ที่ลดเคอร์รี่เป็นตัวสร้างกระแสชดเชยต่ออยู่ในระบบ

(ก) ระบบไฟฟ้าสามเฟสที่มีการชดเชย

(ข) ระบบที่อยู่ภายในบล็อก Subsystem ของรูป (ก)

## บรรณานุกรม

- [1] รศ. มนต์ สัจวงศิริ, วรรณ ภัทรอมรกุล: “คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์”. สำนักพิมพ์อินโฟเพรส ; นนทบุรี, เมษายน, 2543.
- [2] ประวิทย์ ชัยยืน: “เทคนิค 184 การแก้ปัญหาฮาร์โมนิกส์ด้วยแอกทีฟฟิลเตอร์”. ABB.Ltd, พฤษภาคม, 2543.
- [3] ศาสตราจารย์. ดร. วิวัฒน์ กิรานนท์ : “วิศวกรรมการสื่อสาร”. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542.
- [4] เอกรินทร์ สมเพาะ, ทนงศักดิ์ มณีโชติ, บุญฤทธิ์ ช่างเรือ: “วงจรกรองแบบแอกทีฟ”. ปริญญาณิพนธ์ ( วศ.บ (วิศวกรรมไฟฟ้า) ), สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543.
- [5] H.H.KVO.S-N. Yeh and J.C. Hwang : “ Novel analytical model for design and implementation of three phase active power filter controller ”. IEEE Proc. – Electr. Power, Vol. 148, No 4, Jul, 2001.