

การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบ AC Drive
Analysis Harmonic in AC Drive System

นายมนตรี มหาพรหม รหัส 46380162

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 25 / พ.ค. 2553 /
เลขทะเบียน..... 500049X
เลขเรียกหนังสือ..... 2/ร.....
มหาวิทยาลัยนเรศวร ม.15/ก
2549

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2549



ใบรับรองโครงการวิศวกรรม

หัวข้อโครงการ การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบ AC Drive
ผู้ดำเนินโครงการ นายมนตรี มหาพรหม รหัส 46380162
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สมพร เรื่องสินชัยวานิช
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ปีการศึกษา 2549

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสกลนคร อนุมัติให้โครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะกรรมการสอบโครงการวิศวกรรมไฟฟ้า

.....ประธานกรรมการ
(ดร. สมพร เรื่องสินชัยวานิช)

ชัชวรินทร์ นันทกรรมการ
(ดร.ชัชวรินทร์ นันท)

อัครพันธ์ วงศ์กั้งแหกรรมการ
(ดร.อัครพันธ์ วงศ์กั้งแห)

หัวข้อโครงการ การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบ AC Drive

ผู้ดำเนินโครงการ นายมนตรี มหาพรหม รหัส 46380162

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

โปรเจกต์นี้เป็นการวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกทางด้านเอาต์พุตของสัญญาณ PWM อินเวอร์เตอร์โดยใช้โปรแกรม Hamcalc และ โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์และยังศึกษาถึงการเกิดฮาร์มอนิกและขนาดของฮาร์มอนิกที่เกิดกับอินเวอร์เตอร์

Project Title : Analysis Harmonic in AC Drive System

Name : Mr. MonTri Mahaprom Code 46380162

Project Adviser : Mr. Somporn Ruangsinchaiwanich

Major : Electrical Engineering

Department : Electrical and computer Engineering, Faculty of Engineering,
Naresuan University

Academic : 2006



Abstract

This Project is Analysis output current harmonic of PWM AC drive. By used Hamcale and MATLAB program. And study to the occurrence and Amplitude of Harmonic in AC drive.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์สมพร เรืองสินชัยวานิช เป็นอย่างยิ่งที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา รวมถึงไปถึงช่วยชี้แนะแนวทางต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาในการทำโครงการในครั้งนี้เป็นอย่างดีตลอดจนให้ความกรุณาช่วยตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องและปัญหาต่างๆ ในการทำโครงการในครั้งนี้ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดียิ่งจนทำให้การศึกษาหัวข้อโครงการในครั้งนี้ประสบผลสำเร็จลุล่วง ไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่คอยกรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา อบรมสั่งสอน และให้ความรู้ในทางด้านวิชาต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการนำมาประยุกต์ใช้ในโครงการนี้ตลอดจนคอยชี้แนะประสบการณ์ที่ดีที่สามารถนำมาใช้แก้ปัญหาและนำมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ในการศึกษาโครงการให้ประสบผลสำเร็จลุล่วง ไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้องทุกคนเป็นอย่างสูงที่คอยเป็นกำลังใจที่ดี ตลอดมาและสนับสนุนในด้านการศึกษามาเป็นอย่างดี รวมถึงคอยให้ความรักความเข้าใจและความปรารถนาดีตลอดมา

ผู้จัดทำ

นายมนตรี มหาพรหม รหัส 46380162

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่ออังกฤษ	ข
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ญ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบข่ายของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนของการดำเนินงาน	2
1.5 แผนการดำเนินงาน	3
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานของฮาร์มอนิกและทฤษฎีเกี่ยวข้อง

2.1 ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า	5
2.1.1) คำนิยามของฮาร์มอนิก	5
2.1.2) ค่าความเพี้ยนของฮาร์มอนิกรวม	8
2.1.3) ความสัมพันธ์ของ %THDi , %THDv และ MVAse	8
2.1.4) ฮาร์มอนิกเกิดจากอะไร ?	11
2.2 ผลกระทบของฮาร์มอนิก	11
2.2.1) ปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์	11
2.2.2) ผลของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลอยู่ในระบบจำหน่ายและสายส่ง	14
2.2.3) ปัญหาฮาร์มอนิก Triple n (ลำดับที่ 3, 6, 9)	15
2.2.4) ผลของกระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดกำลังสูญเสียในหม้อแปลง	16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.5) ผลของกระแสฮาร์มอนิกความร้อนและความเครียดไดอิเล็กตริก (Dielectric Stress) กับตัวคาปาซิเตอร์	18
2.2.6) ผลของกระแสฮาร์มอนิกที่ทำให้เกิดความร้อนในตัวฟิวส์	18
2.2.7) ผลของกระแสฮาร์มอนิกที่ทำให้การทำงานของรีเลย์ทำงานผิดพลาด	18
2.2.8) ผลของกระแสฮาร์มอนิกต่อความสามารถในการตัดกระแส	19
2.2.9) ผลของกระแสฮาร์มอนิกต่อมิเตอร์วัดค่าไฟฟ้า	19
2.2.10) ผลของกระแสฮาร์มอนิกต่อเครื่องจักรไฟฟ้า	19
2.2.11) ผลของกระแสฮาร์มอนิกต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าและสื่อสาร	19
2.3) การประเมินระดับฮาร์มอนิก	19
2.4) การประเมินระดับปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์	22
2.5) มาตรฐานของฮาร์มอนิก	24
2.6) การทำงานของไทรสเตอร์	28
2.7) การควบคุมมุมเฟสพื้นฐาน	28
2.8) การจำลองระบบไฟฟ้าที่มีการใช้ไทรสเตอร์	29
2.9) ผลกระทบของฮาร์มอนิกของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์และแหล่งจ่ายอินพุต	32
2.9.1) ฮาร์มอนิก	35
2.9.2) ความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกทั้งหมด	35
2.9.3) มาตรฐานเกี่ยวกับฮาร์มอนิก	36
2.9.4) ขนาดของภาระส่งผลต่อกระแสอินพุต	38
2.9.5) ผลจากการต่อใช้ค	39
2.9.6) ผลการจำลอง	40
2.10) ผลกระทบของ Voltage (DIP) ต่ออุปกรณ์ควบคุมความเร็วมอเตอร์	42
2.10.1) อุปกรณ์ควบคุมความเร็วของมอเตอร์	42
2.10.2) ลักษณะโดยทั่วไปของการ Drives แบบต่างๆ	43
2.10.3) ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าต่อการ Drives	45
2.10.4) ผลการทดสอบ Drives ที่การเปลี่ยนแปลงของแรงดันระดับต่างๆ	46
2.10.5) ผลการทดสอบ	47
2.10.6) การแก้ไขปัญหา	48

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.11) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก	50
2.11.1) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีทั่วไปตามบ้าน	51
2.11.2) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม	52
2.11.3) อุปกรณ์ประเภทอาร์ค	52
2.11.4) อุปกรณ์ประเภทที่ไม่เป็นเชิงเส้น	52
2.12) อินเวอร์เตอร์	53
2.12.1) อินเวอร์เตอร์ คือ อะไร ?	53
2.12.2) หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์	54
2.12.3) วงจรเร็คติไฟเออร์	54
2.12.4) วงจรความนำไฟฟ้าและตัวเก็บประจุ	55
2.12.5) วงจรอินเวอร์เตอร์	55
2.12.6) วงจรควบคุม	55
2.12.7) ทำไมจึงต้องแปลงผันจาก ไฟกระแสตรง เป็น ไฟกระแสสลับ	55
2.13) การควบคุมมอเตอร์	57
2.13.1) การสตาร์ท	62
2.13.2) การเร่งความเร็ว	62
2.13.3) การลดความเร็ว	62
2.13.4) การหยุด	63
2.13.5) การเลือกขนาดอินเวอร์เตอร์ให้เหมาะสม	63
2.14) คลื่นฮาร์มอนิก (Harmonic waveform)	64
2.14.1) วงจรเร็คติไฟเออร์ และการกำเนิดคลื่นฮาร์มอนิก	65
2.14.2) เส้นทางการไหลของกระแสฮาร์มอนิก	66
2.14.3) ขนาดและคลื่นฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในอินเวอร์เตอร์	69
2.15) การคำนวณกระแสลัดวงจร	70
2.15.1) การคำนวณกระแสลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า	70

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การออกแบบการทดสอบ	
3.1 การออกแบบตัวโครงสร้างที่จะนำมาทำการทดสอบ (Simulation)	72
3.2 โปรแกรม HarmCalc	72
3.3 การตั้งค่าและเลือกวิธีการ Drive	75
3.4 การคำนวณหาพารามิเตอร์เพื่อนำมาใช้ในการทดสอบ	76
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่จำเป็น	78
4.2 รายละเอียดเกี่ยวกับอินเวอร์เตอร์	78
4.3 ทดสอบความแตกต่างของตัว อินเวอร์เตอร์ 2 ยี่ห้อ	78
4.4 ทดสอบจำนวนของตัว อินเวอร์เตอร์ มีผลต่อสัญญาณกระแสและฮาร์มอนิก	89
4.5 ขนาดของโหลดส่งผลต่อสัญญาณกระแส และฮาร์มอนิก	93
บทที่ 5 สรุปผล	
5.1 สรุปผลการทดลอง	106
5.2 กราฟเปรียบเทียบผลต่างของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณี	107
ภาคผนวก 1	109

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1) ชนิดของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น และค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม	9
2) ค่าพิกัดสูงสุดในการใช้งานคาปาซิเตอร์	14
3) ค่าภาระของโหลดฮาร์มอนิกแต่ละตัว	21
4) ผลการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของระบบในลำดับที่ฮาร์มอนิกต่างๆ	23
5) ขนาดสูงสุดของอุปกรณ์ประเภท Converter และ AC Regulator	24
6) ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม	25
7) ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดัน ณ จุดต่อร่วม	26
8) ขีดจำกัดแรงดันไม่สมดุลที่จุดต่อร่วม	27
9) ขีดจำกัดความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิก (แรงดัน 120 V – 69 kV)	36
10) ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนแรงดันต่อร่วม	37
11) ผลการทดสอบ	48
12) อุปกรณ์สำนักงานชนิด 1 เฟส	51
13) บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์	51
14) ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้	52
15) สรุปลักษณะสัมพันธ์ของความเร็วรอบของมอเตอร์	53
16) การแปลงสัญญาณของอินเวอร์เตอร์	60
17) รูปแบบการควบคุม	61
18) ข้อแตกต่างระหว่างคลื่นฮาร์มอนิกกับสัญญาณรบกวน	65
19) อันดับของฮาร์มอนิก	66
20) อัตราส่วนกระแสฮาร์มอนิก (%)	69
21) กำลังไฟฟ้าขั่วของอินเวอร์เตอร์	69
22) มาตรฐานค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลต์เดจของหม้อแปลง	71
23) Transformer Rating	73
24) ค่ารีแอกแตนซ์ของ Generator	74
25) ผลของการ Simulate ของ VSD57(VT)	79
26) ขนาดของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ของ VSD57(VT)	80

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
27) ผลของการ Simulate ของ ATV58(VT)	84
28) ขนาดของฮาร์โมนิกอันดับต่างๆ ของ ATV58(VT)	85
29) ค่าพารามิเตอร์เปรียบเทียบของ VSD57 และ ATV58	89
30) ขนาดของฮาร์โมนิกอันดับต่างๆ ของ ATV58 และ VSD57	90
31) ตารางจาก Harmcale	94



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงโครงสร้างของโครงการงาน	2
2.1 ฮาร์มอนิกอันดับที่ต่างๆ	5
2.2 กราฟรวมของฮาร์มอนิก	6
2.3 กราฟฟังก์ชัน $f(t) = \sin(x) + 1/3(\sin(3x))$	7
2.4 กราฟฟังก์ชัน $f(t) = \sin(x) - 1/3(\sin(3x))$	7
2.5 ความสัมพันธ์ของกระแส แรงดัน และค่าอิมพีแดนซ์	10
2.6 แสดงการเปรียบเทียบค่า THD _v ของแต่ละ ระบบและสถานที่ตั้ง.....	10
2.7 แสดงลักษณะการเกิดเรโซแนนซ์ขนานและอนุกรมในระบบ	11
2.8 แสดงตำแหน่งค่าลำดับที่เกิดฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์	13
2.9 ลำดับความถี่ฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์สัมพันธ์กับขนาดของคาปาซิเตอร์และหม้อแปลง	14
2.10 กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ไหลรวมอยู่ในสายนิวตรอน	15
2.11 กราฟความสัมพันธ์ของการใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นกับพิกัดสายนิวตรอน	16
2.12 กราฟความสัมพันธ์ค่า %THD _v กับค่า SCR ของโหลดคอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ และ 12 พัลส์	22
2.13 ตัวอย่าง Single line ของ กฟภ. และวงจรสมมูลอิมพีแดนซ์	23
2.14 แบบจำลองการทำงานของไทรสเตอร์	28
2.15 การควบคุมแสงสว่างโดยไทรสเตอร์และรูปคลื่นของแรงดันเอาต์พุต	28
2.16 ระบบไฟฟ้าเมื่อมีไทรสเตอร์ในระบบ	30
2.17 ผลกระทบจากแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก ณ จุด A และ B	31
2.18 การสังเคราะห์ด้วยทฤษฎี Fouries series	31
2.19 โครงสร้างวงจรกำลัง	33
2.20 รูปคลื่นแรงดันและกระแส	34
2.21 รูปไดอะแกรมแสดงจุดต่อร่วม ตามมาตรฐาน IEEE519-1992	36
2.22 รูปกระแสอินพุต 5A/div และ Spectrum ของระบบขับเคลื่อน	38
2.23 แสดงผลจากการจำลองเมื่อยังไม่ต่อ LS2 (1) ของกระแสอินพุต (1)	40
2.24 แสดงผลจากการจำลองเมื่อยังไม่ต่อ LS2 ของแรงดัน Line ที่จุดต่อร่วม (1)	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25 แสดงผลจากการจำลองเมื่อยังไม่ต่อ LS2 (1) ของกระแสอินพุต (2)	41
2.26 แสดงผลจากการจำลองเมื่อยังไม่ต่อ LS2 ของแรงดัน Line ที่จุดต่อร่วม (2)	41
2.27 แสดงเปอร์เซ็นต์จำนวนผู้ประกอบกิจการอุตสาหกรรมที่ได้รับผลกระทบ	42
2.28 วงจร Rectifier แบบ 6-Pulse สำหรับ DC Drive	43
2.29 แสดงรูปวงจร AC Drive แบบ PWM	44
2.30 แสดง VSI Drive และ CSI Drive	45
2.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ แรงดัน และความเร็วรอบของ Drive	46
2.32 แสดงผลการทดสอบผลตอบสนองต่อแรงดันของ Drive ที่โรงงานแห่งหนึ่ง	47
2.33 รูปแบบผลการทดสอบที่ได้จากการ Drive	47
2.34 แสดง DC Bus โดยที่เส้นประเป็นแรงดัน AC ด้าน Input และเส้นทึบเป็นแรงดัน DC Bus โดยเปรียบเทียบขณะเกิด Voltage Sag ที่ 50 % และ 70%	49
2.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัน DC Bus	50
2.36 การทำงานของอินเวอร์เตอร์	54
2.37 DC/AC อินเวอร์เตอร์	56
2.38 AC/DC คอนเวอร์เตอร์	56
2.39 หลักการทำงานของ UPS	57
2.40 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์	58
2.41 หลักการเกิดไฟฟ้ากระแสสลับของอินเวอร์เตอร์	58
2.42 การเปิด-ปิดสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์	59
2.43 การใช้ทรานซิสเตอร์แทนสวิตช์	59
2.44 วงจรจำกัดกระแสอินรัช	61
2.45 การลดความเร็วของ อินเวอร์เตอร์	62
2.46 คลื่นพื้นฐานกับคลื่นฮาร์มอนิก	64
2.47 คลื่นที่พี้ยนจากรูปไซน์	64
2.48 ตัวอย่างระบบไฟฟ้า (1)	67
2.49 วงจรสมมูลของคลื่นฮาร์มอนิก	67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.50 ตัวอย่างระบบไฟฟ้า (2) พร้อมวงจรสมมูล	68
2.51 วงจรทดสอบหม้อแปลงขณะลัดวงจร	71
3.1 หน้าต่างตัวโปรแกรม HarmCalc	72
3.2 วงจรทดสอบหม้อแปลงขณะลัดวงจร	75
3.3 ตัวอย่างระบบไฟฟ้า (2) พร้อมวงจรสมมูล	76
3.4 วงจรทดสอบหม้อแปลงขณะลัดวงจร	77
4.1 วงจรที่ทำการทดสอบคิกที่ 25 เปอร์เซ็นต์ของโหลดทั้งระบบของ VSD 57	79
4.2 กระแสของ VSD57 ณ จุด PCC2	81
4.3 ภาพสเปกตรัมของกราฟกระแสที่ได้จาก MATLAB (VSD57)	82
4.4 ภาพขยายของการใช้ Math lab (VSD57)	82
4.5 ขนาดของฮาร์มอนิกอันดับที่ต่างๆ ที่ได้จากสัญญาณกระแสของ VSD57	83
4.6 วงจรที่ทำการทดสอบคิกที่ 25 เปอร์เซ็นต์ของโหลดทั้งระบบของ ATV58	84
4.7 กระแส AVT57 ณ จุด PCC2	86
4.8 ภาพสเปกตรัมของกราฟกระแสที่ได้จาก Math lab ของ ATV58	87
4.9 ภาพขยายของการใช้ Math lab ของ ATV58	88
4.10 ขนาดของฮาร์มอนิกอันดับที่ต่างๆ ที่ได้จากสัญญาณกระแสของ ATV58	88
4.11 การเปรียบเทียบระหว่าง VSD57 และ ATV58	88
4.12 วงจรสมมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์	89
4.13 กราฟกระแสของ VSD57	91
4.14 กราฟกระแสของ ATV58	91
4.15 การเกิดฮาร์มอนิกของ VSD และ ATV	92
4.16 วงจรที่จะใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณกระแสและฮาร์มอนิก	93
4.17 กราฟแสดงกระแสในสถานะโหลดต่ำๆ	95
4.18 กราฟแสดงขนาดของฮาร์มอนิกในสถานะโหลดต่ำๆ	95
4.19 กราฟแสดงสเปกตรัมในสถานะโหลดต่ำๆ	96
4.20 กราฟขยายแสดงสเปกตรัม ในสถานะโหลดต่ำๆ	96
4.21 กราฟขยายแสดง ขนาดในสถานะโหลดต่ำๆ ไปเทียบกับสเปกตรัม	96

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 กราฟแสดงกระแสในสภาวะ โหลด 25 เปอร์เซ็นต์	97
4.23 กราฟแสดงขนาดของฮาร์มอนิกในสภาวะ 25 เปอร์เซ็นต์	97
4.24 กราฟแสดงสเปกตรัมในสภาวะ 25 เปอร์เซ็นต์	98
4.25 กราฟขยายแสดงสเปกตรัม ในสภาวะ 25 เปอร์เซ็นต์	98
4.26 กราฟขยายแสดง ขนาดในสภาวะ 25 เปอร์เซ็นต์ ไปเทียบกับสเปกตรัม	98
4.27 กราฟแสดงกระแสในสภาวะ 50 เปอร์เซ็นต์	99
4.28 กราฟแสดงขนาดของฮาร์มอนิกในสภาวะ 50 เปอร์เซ็นต์	99
4.29 กราฟแสดงสเปกตรัมในสภาวะ 50 เปอร์เซ็นต์	100
4.30 กราฟขยายแสดงสเปกตรัม ในสภาวะ 50 เปอร์เซ็นต์	100
4.31 กราฟขยายแสดง ขนาดในสภาวะ 50 เปอร์เซ็นต์ ไปเทียบกับสเปกตรัม	100
4.32 กราฟแสดงกระแสในสภาวะ 75 เปอร์เซ็นต์.....	101
4.33 กราฟแสดงขนาดของฮาร์มอนิกในสภาวะ 75 เปอร์เซ็นต์	101
4.34 กราฟแสดงสเปกตรัมในสภาวะ 75 เปอร์เซ็นต์	102
4.35 กราฟขยายแสดงสเปกตรัม ในสภาวะ 75 เปอร์เซ็นต์	102
4.36 กราฟขยายแสดง ขนาดในสภาวะ 75 เปอร์เซ็นต์ ไปเทียบกับสเปกตรัม	102
4.37 กราฟแสดงกระแสในสภาวะ 100 เปอร์เซ็นต์.....	103
4.38 กราฟแสดงขนาดของฮาร์มอนิกในสภาวะ 100 เปอร์เซ็นต์	103
4.39 กราฟแสดงสเปกตรัมในสภาวะ 100 เปอร์เซ็นต์	104
4.40 กราฟขยายแสดงสเปกตรัม ในสภาวะ 100 เปอร์เซ็นต์	104
4.41 กราฟขยายแสดง ขนาดในสภาวะ 100 เปอร์เซ็นต์ ไปเทียบกับสเปกตรัม	104
4.42 กราฟขยายแสดงสเปกตรัมที่สภาวะ โหลด ต่ำๆ.....	107
4.43 กราฟขยายแสดงสเปกตรัมที่สภาวะ โหลด 25 เปอร์เซ็นต์.....	107
4.44 กราฟขยายแสดงสเปกตรัมที่สภาวะ โหลด 75 เปอร์เซ็นต์.....	107
4.45 กราฟขยายแสดงสเปกตรัมที่สภาวะ ภาระเต็มพิกัด.....	107

บทที่ 1

บทนำ

1.1) ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันนี้โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ จำเป็นต้องมีเครื่องมือในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ เพื่อควบคุมระบบการผลิตให้ได้ตามต้องการ ซึ่งอินเวอร์เตอร์ก็เป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้สำหรับการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ให้มีความเร็วต่างๆ กัน อินเวอร์เตอร์ คือ วงจรแปลงพลังงานไฟตรงให้เป็นไฟสลับ เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เครื่องผกผัน เพื่อให้ได้แรงดันไฟสลับที่มีค่าแรงดันคงที่หรือปรับค่าได้ หรือเพื่อให้ได้ความถี่ไฟสลับเอาต์พุตที่มีค่าคงที่หรือปรับค่าได้ โดยใช้หลักการปรับค่าแรงดันไฟตรงด้านอินพุตหรือให้หลักการควบคุมเทคนิคการสวิตช์ภายในตัวอินเวอร์เตอร์ และการนำอินเวอร์เตอร์ไปใช้ในงานนั้นๆ บางครั้งก็ทำให้เกิดปัญหาที่ตามมาก็คือ ปัญหาของ ฮาร์โมนิก (Harmonic)

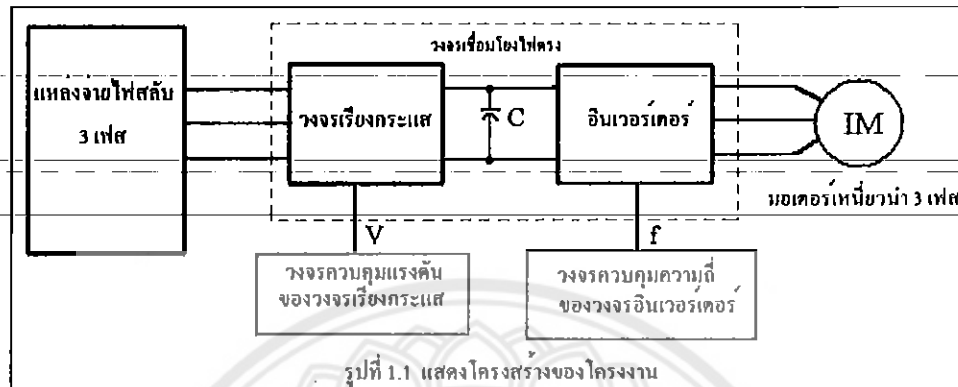
จากปัญหาของฮาร์โมนิกนี้ ผลกระทบของมันก็คือ ทำให้กระแสและแรงดันในระบบมีขนาดและรูปร่างเพี้ยน (Distortion) ซึ่งเป็นผลทำให้อุปกรณ์มีการทำงานผิดพลาดหรือเกิดการชำรุดเสียหายได้

แต่อินเวอร์เตอร์ก็ยังเป็นที่นิยมใช้ในการขับมอเตอร์ เนื่องจากอินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟอิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณสมบัติและการใช้งานที่แตกต่างจากแหล่งจ่ายไฟทั่วไปด้วย

ดังนั้น โครงการนี้จึงได้ทำการศึกษาการเกิดของฮาร์โมนิกในการขับเคลื่อนมอเตอร์ผลกระทบ รวมไปถึงแนวทางการแก้ปัญหา โดยใช้ Software ในการช่วยวิเคราะห์ ในแต่ละกรณีว่าจะเกิดฮาร์โมนิกมากน้อยอย่างไร โดยใช้การควบคุมสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ แล้วเปรียบเทียบผลของฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณี

โดยมอเตอร์ที่เราใช้จะเป็นมอเตอร์กระแสสลับชนิดเหนี่ยวนำ (Induction motor) เพราะเป็นมอเตอร์ที่เป็นที่นิยมใช้กันแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถแปรค่าความเร็วของมอเตอร์ได้อย่างต่อเนื่อง ลดกระแสสตาร์ทและมีฟังก์ชันในการควบคุมมอเตอร์มากมาย ทำให้สามารถใช้งานได้สะดวก และทำให้การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำมีลักษณะคุณสมบัติใกล้เคียงกับมอเตอร์กระแสตรงที่มีราคาสูง

1.2) ส่วนประกอบโครงสร้าง



1.3) วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาที่มาความสำคัญของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นภายในระบบ
2. เพื่อศึกษาลักษณะของคลื่นฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น
3. เพื่อศึกษา Software เพื่อนำมาช่วยในการวิเคราะห์หาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นได้

1.4) ขอบข่ายของโครงการ

เป็นการศึกษาเกี่ยวกับฮาร์มอนิกโดยการใช้ Computer Software เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ วงจรการขับเคลื่อนมอเตอร์ซึ่งมี วงจรทาง Power Electronic เข้ามาเกี่ยวข้องกับวงจรนี้เรียกว่า อินเวอร์เตอร์ เพื่อนำมาช่วยในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ทั้งความเร็วรอบ ทอร์ค และกำลังของมอเตอร์จึง นับได้ว่าเป็นสิ่งจำเป็นในการ Drive AC Motor และผลที่ตามมาของการใช้อินเวอร์เตอร์ก็คือ ฮาร์มอนิก

ในโครงการนี้จะเป็นการวิเคราะห์การเกิดของฮาร์มอนิกในของระบบในการขับเคลื่อนมอเตอร์ กระแสสลับชนิดเหนี่ยวนำ รวมถึงการวิเคราะห์หาการลดฮาร์มอนิกของระบบ โดยการปรับสัญญาณของ อินเวอร์เตอร์ด้วย

1.5) ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.4 แผนการดำเนินงาน

การดำเนินงานของโครงการ	ปี 2548			ปี 2549							ปี 2550						
	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1.1 ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับความสำคัญ การเกิด และปัญหาของ ฮาร์โมนิก																	
1.2 ศึกษาการใช้โปรแกรมเพื่อใช้ในการ วิเคราะห์วงจร																	
1.3 รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง																	
1.4 ศึกษาเกี่ยวกับปัญหาที่เกิดขึ้นใน ระบบ Ac drive																	
1.5 ทำการทดลองแล้วรวบรวมผล																	
1.6 วิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นภายใน ระบบ																	
1.7 สรุปผลการทดลอง แล้วทำเป็นรูป 1.8 เต้นรายงาน																	

1.6) ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเรื่องของฮาร์โมนิคมากขึ้น
2. สามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสมและถูกต้อง
3. มีทักษะในการใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ปัญหา
4. ช่วยให้เรารู้จัก คิด และแก้ไขปัญหาอย่างมีระบบ



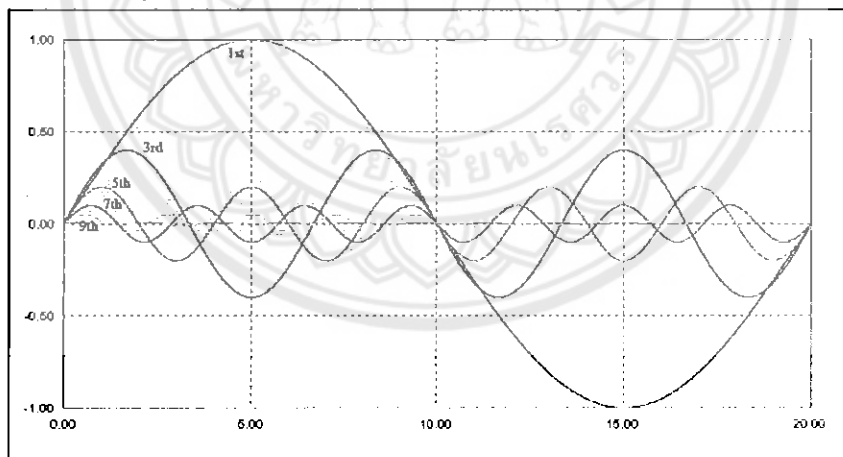
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1) ฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้า (Harmonic in Power System)

โรงงานอุตสาหกรรมและอาคารพาณิชย์ในปัจจุบัน ส่วนใหญ่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non linear load) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิก โดยอุปกรณ์เหล่านี้จะจ่ายกระแสฮาร์โมนิกเข้าสู่ระบบไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าเอง หรือไหลเข้าสู่ระบบใกล้เคียงไปรบกวนการทำงาน หรือสร้างความเสียหายแก่อุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นๆ และอุปกรณ์ในระบบของการไฟฟ้าได้ จากผลกระทบของฮาร์โมนิกทำให้กระแสและแรงดันในระบบมีขนาดและรูปร่างเพี้ยน (Distortion) ไป ซึ่งเป็นผลทำให้อุปกรณ์มีการทำงานผิดพลาดหรือเกิดการชำรุดเสียหายได้

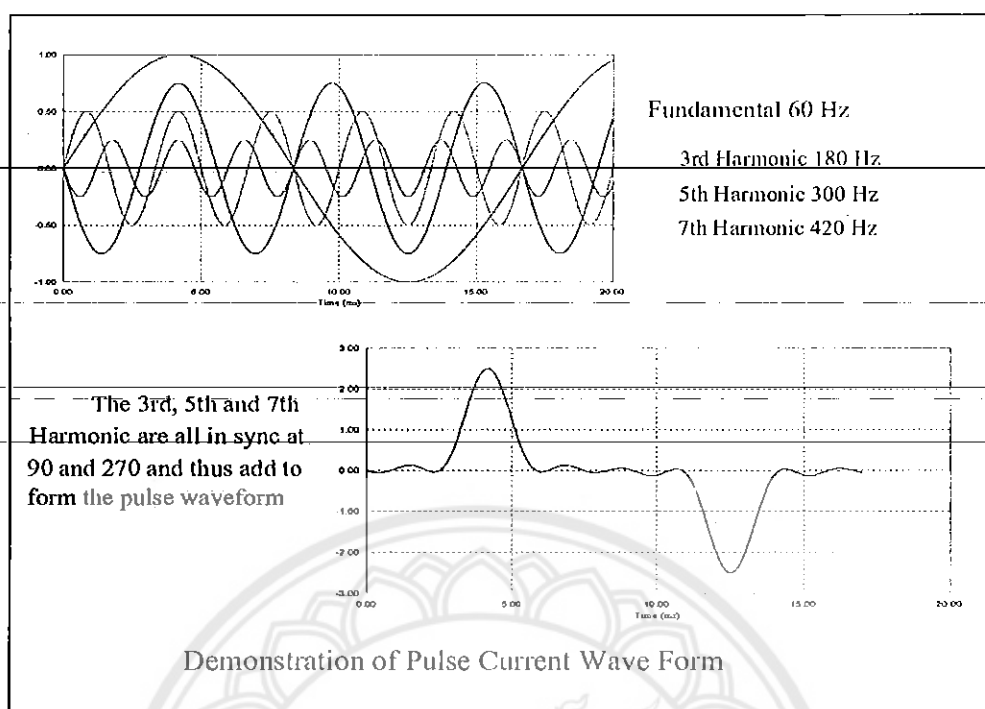
2.1.1 คำนิยามฮาร์โมนิก

ฮาร์โมนิก (Harmonic) คือส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (sine wave) ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใดๆ ซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล (ในระบบไฟฟ้าเรามีค่าเท่ากับ 50 Hz) เช่นฮาร์โมนิกลำดับที่ 3 มีค่าความถี่เป็น 150 Hz และฮาร์โมนิกลำดับที่ 5 มีค่าความถี่เป็น 250 Hz แสดงดังรูป



รูปที่ 2.1 ฮาร์โมนิกที่ลำดับต่างๆ

ผลของฮาร์โมนิกเมื่อรวมกันกับสัญญาณความถี่หลักมูลด้วยทางขนาด (Amplitude) และมุมเฟส (Phase Angle) ทำให้สัญญาณที่เกิดขึ้นมีขนาดเปลี่ยนไปและมีรูปร่างสัญญาณเพี้ยนไปจากสัญญาณคลื่นไซน์ดังรูป



รูปที่ 2.2 กราฟของฮาร์มอนิก

ในทางคณิตศาสตร์สามารถใช้ออนุกรมฟูเรียร์อธิบายคุณลักษณะของฮาร์มอนิกได้ โดยสัญญาณหรือฟังก์ชันที่เป็นคาบใดๆ สามารถกระจายให้อยู่ในรูปผลรวมของฟังก์ชันตรีโกณมิติที่มีความถี่ต่างๆ เป็นฟังก์ชันคาบที่เขียนแทนด้วย $f(t)$ ดังสมการ

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

$$a_0 = \frac{1}{T} \int f(t) dt \quad (2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int f(t) \cos n\omega_0 t dt \quad (3)$$

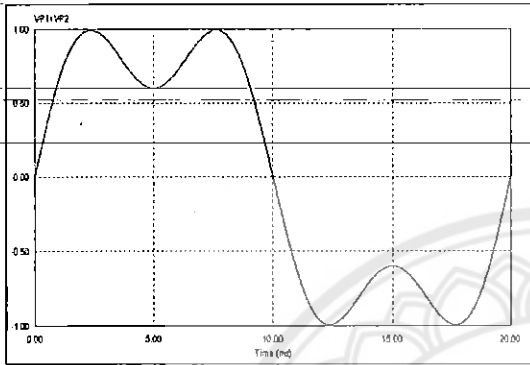
$$b_n = \frac{2}{T} \int f(t) \sin n\omega_0 t dt \quad (4)$$

เมื่อ

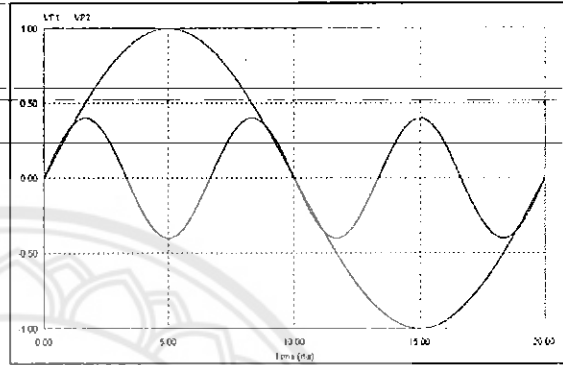
T คือ หนึ่งคาบของสัญญาณและ

n คือ เลขจำนวนเต็มบวก

ในกรณีที่ $n = 0$ จะเป็นความถี่มูลฐาน หรือกรณีที่ n มีค่ามากกว่าศูนย์ เราเรียกความถี่นี้ว่าฮาร์มอนิกลำดับที่ n ซึ่งเป็นได้ทั้งลำดับคู่และคี่ และจากรูปที่ 2.3 (ข) และรูปที่ 2.4 (ข) แสดงถึงความเพี้ยนของสัญญาณที่เกิดขึ้นเกิดจากการรวมสัญญาณคลื่นไซน์ที่มีความถี่หลักมัลกับคลื่นไซน์ที่เป็นฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ดังรูปที่ 2.3 (ก) และรูป 2.4 (ก) ตามลำดับ

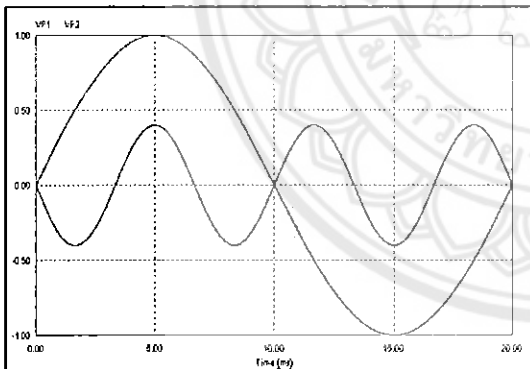


รูปที่ 2.3 (ก)

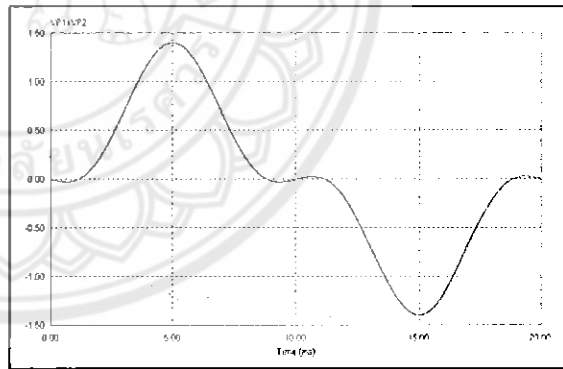


รูปที่ 2.3 (ข)

$$f(t) = \sin(x) + \frac{1}{3} \sin(3x)$$



รูปที่ 2.4 (ก)



รูปที่ 2.4 (ข)

$$f(t) = \sin(x) - \frac{1}{3} \sin(3x)$$

2.1.2 ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม

มาตรฐานสากล IEC และ IEEE ใช้ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิก %THD (Total Harmonic Distortion) เป็นค่าบอกระดับความเพี้ยนฮาร์มอนิก โดยเทียบจากอัตราส่วนระหว่างค่ารากที่สองของผลบวกกำลังสองของส่วนประกอบฮาร์มอนิกกับค่าของส่วนประกอบความถี่หลักมูลเทียบเป็นร้อยละซึ่งจะแยกออกเป็นค่า

ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Current Distortion: THDi)

$$\%THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2(rms)}}{I_1(rms)} \times 100\% \quad (5)$$

ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Voltage Distortion: THDv)

$$\%THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2(rms)}}{V_1(rms)} \times 100\% \quad (6)$$

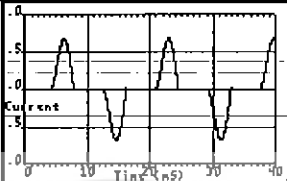
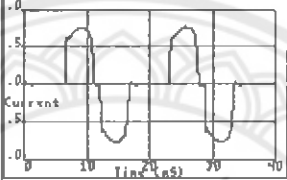
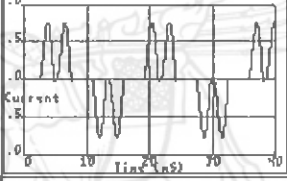
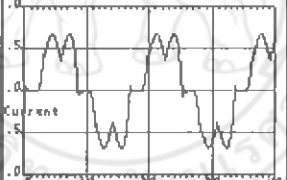
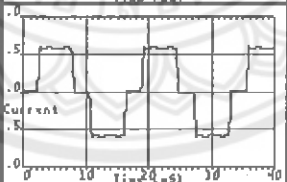
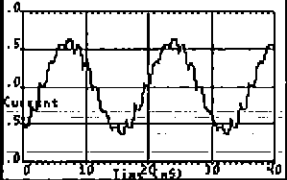
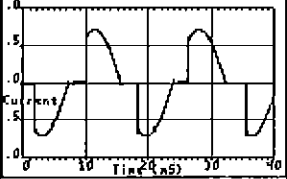
โดยที่ $V_h^2(rms)$ คือค่า RMS ของแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่
 $h, I_h(rms)$ คือค่า RMS ของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่
 $h, V_1(rms)$ คือค่า RMS ของแรงดันที่ความถี่หลักมูล
 $I_1(rms)$ คือค่า RMS ของกระแสที่ความถี่หลักมูล

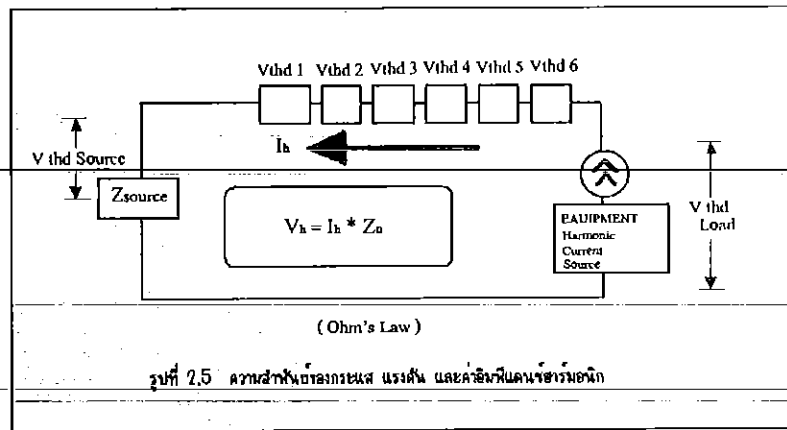
2.1.3) ความสัมพันธ์ของ %THD และ MVA

ในบางครั้งค่าของ %THD ที่มีค่าสูงๆ ในระบบไฟฟ้ามันอาจจะไม่เกิดผลกระทบจากปัญหาฮาร์มอนิกได้ เพราะค่า %THD จะเป็นเพียงค่าที่บอกถึงคุณลักษณะของกระแสฮาร์มอนิกของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นแต่ละชนิด แต่ไม่สามารถที่จะบอกถึงความรุนแรงของระดับฮาร์มอนิกได้อย่างสมบูรณ์ดังในกรณีขนาดพิกัดกำลังของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นชนิดหนึ่งตัวเดียวกันที่ค่าพิกัดกำลังมากหรือน้อย ค่า%THD ของโหลดดังกล่าวก็จะเป็นค่าเดียวกัน แต่ระดับความรุนแรงที่ทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกจะไม่เท่ากัน ดังนั้นถ้าเราจะพิจารณาค่าของ %THD ควรที่จะพิจารณาถึงพิกัดกำลังของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นประกอบกันด้วย เราสามารถที่จะพิจารณาถึงระดับความรุนแรงของปัญหาฮาร์มอนิกในระดับหนึ่งได้ ส่วนค่า %THD นั้นสามารถที่จะบอกถึงระดับความรุนแรงของปัญหาฮาร์มอนิกในระบบได้ซึ่งจะ

ต่างจากค่า %THD โดยจะอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส แรงดันฮาร์มอนิก และค่าพิกัดกำลัง
วงจรของระบบ (MVA) ดังรูปที่ 2.5

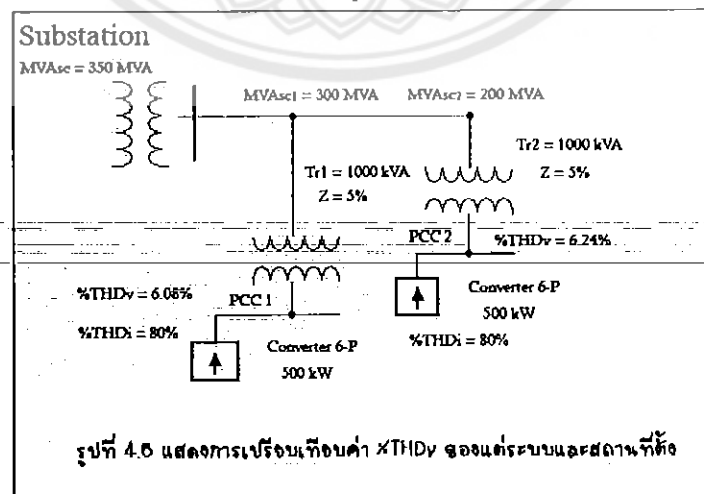
ตารางที่ 1 ชนิดของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น และค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (%THDi)

Type of Load	Typical Waveform	Current Distortion	Weighting Factor (W_i)
Single Phase Power Supply		80% (high 3rd)	2.5
Semiconverter		high 2nd, 3rd, 4th at partial loads	2.5
6 Pulse Converter, capacitive smoothing, no series inductance		80%	2.0
6 Pulse Converter, capacitive smoothing with series inductance > 3%, or dc drive		40%	1.0
6 Pulse Converter with large inductor for current smoothing		28%	0.8
12 Pulse Converter		15%	0.5
ac Voltage Regulator		varies with firing angle	0.7



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของกระแส แรงดัน และค่าอิมพีแดนซ์

จากรูปที่ 2.5 ที่แหล่งกำเนิดแรงดัน ไฟฟ้า จะมีค่าอิมพีแดนซ์ค่าหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของผู้ใช้ไฟเมื่อโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นทำงานจะจ่ายกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ (I_h) เข้าสู่ระบบ และผ่านค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่ความถี่ต่างๆ (Z_h) ของระบบทำให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ (V_h) ทำให้สัญญาณแรงดันในระบบมีขนาดและสัญญาณผิดเพี้ยนไปจากแหล่งจ่ายเดิมตามสมการ $V_h = I_h \times Z_h$. และจากสมการทำให้เราสามารถพิจารณาได้ว่าค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดในระบบหนึ่งนั้น (ไม่คำนึงถึงสถานะปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์) จะขึ้นอยู่กับชนิดและพิกัดกำลังของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (I_h) และค่าพิกัดกำลังลัดวงจรของระบบไฟฟ้า (Z_h) นั่นคือกรณีสถานที่ตั้งของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ใกล้สถานีไฟฟ้า ซึ่งมีค่าพิกัดลัดวงจรสูงจะมีค่าอิมพีแดนซ์ของระบบต่ำ แต่ถ้าอยู่ไกลสถานีไฟฟ้า ค่าพิกัดลัดวงจรสูงจะมีค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสูง ดังนั้น โรงงานที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นที่อยู่ใกล้สถานีไฟฟ้าจะได้รับผลกระทบจากปัญหาฮาร์มอนิกน้อยกว่าโรงงานที่อยู่ไกลสถานีไฟฟ้าในกรณีที่ระบบภายในโรงงานเหมือนกันดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบค่า THDv ของแต่ละระบบและสถานที่ตั้ง

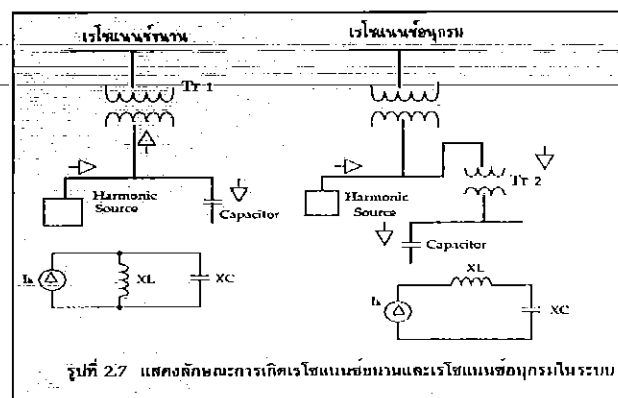
2.1.4 ฮาร์มอนิกเกิดมาจากอะไร?

ฮาร์มอนิกจะเกิดมาจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non linear Load) ซึ่งถ้าแบ่งตามคุณลักษณะการทำงานจะมีดังต่อไปนี้

1. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีทั่วไปในบ้านพัก สำนักงาน ส่วนใหญ่เป็นชนิด 1 เฟส เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ และบลูสแตตอิเล็กทรอนิกส์
2. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ตัวเรียงกระแสกำลัง ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ ลิฟต์ในอาคาร และ PLC
3. อุปกรณ์ที่มีการทำงานประเภทอาร์ค เช่น เตาหลอมแบบอาร์ค เตาหลอมแบบเหนี่ยวนำ และเครื่องเชื่อมแบบอาร์ค
4. อุปกรณ์ที่มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นของแรงดันและกระแสเนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็กทางแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า และเครื่องกลไฟฟ้า

2.2) ผลกระทบของฮาร์มอนิก

2.2.1) ปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ เนื่องจากในระบบไฟฟ้ามีการใช้คาปาซิเตอร์เพื่อแก้ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์เพื่อทำให้การจ่ายไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงสุดเป็นสาเหตุทำให้ระบบเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ขึ้นระหว่างค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์กับค่ารีแอกแตนซ์ของระบบการไฟฟ้าและของหม้อแปลงที่ความถี่หนึ่งและถ้าในระบบมีกระแสฮาร์มอนิกที่มีลำดับความถี่ตรงหรือใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ของระบบแล้วจะเป็นผลทำให้เกิดการขยายกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกขนาดใหญ่ ผลจะทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์และคาปาซิเตอร์ทริปโดยไม่ทราบสาเหตุ หรืออาจทำความเสียหายให้คาปาซิเตอร์เกิดการชำรุดได้ ปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในระบบนั้นเกิดขึ้น 2 ลักษณะคือ ฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ขนานและฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์อนุกรมซึ่งพิจารณาได้จากตำแหน่งการติดตั้งคาปาซิเตอร์และแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกดังรูปที่ 4.7 ซึ่งการเกิดเรโซแนนซ์โดยส่วนใหญ่จะเกิดได้ที่บัสของผู้ใช้ไฟฟ้า



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะการเกิดเรโซแนนซ์ขนานและเรโซแนนซ์อนุกรมในระบบ

จากวงจรดังกล่าว ความถี่เรโซแนนซ์ของระบบ

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LsC}} \quad (7)$$

เมื่อทราบค่าอิมพีแดนซ์ลวดวงจรของระบบและค่าอิมพีแดนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่จุดต่อรวม (PCC) ได้
ค่าลำดับฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์

$$h_r = \sqrt{\frac{MVAsc}{MVARcap}} \quad (8)$$

และเมื่อทราบค่าพิกัดกำลังของคาปาซิเตอร์และหม้อแปลงได้

$$h_r \approx \sqrt{\frac{KVAt \times 100}{KVAcap \times X(\%)}} \quad (9)$$

ดังนั้นความถี่เรโซแนนซ์ในระบบ จะได้

$$f_r \approx f \times \sqrt{\frac{KVAt \times 100}{KVAcap \times X(\%)}} \quad (10)$$

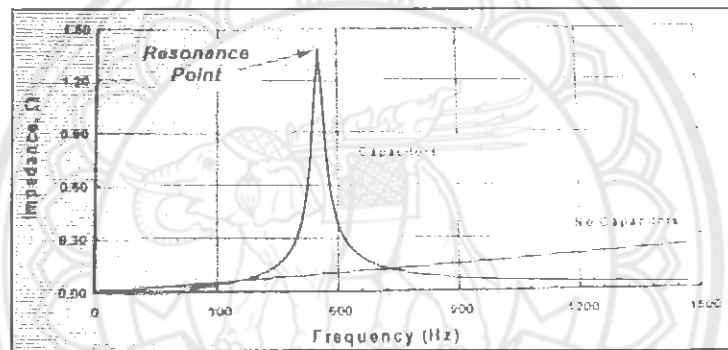
โดยที่ค่า

h_r	คือ ลำดับฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์
f_r	คือ ความถี่เรโซแนนซ์ (Hz)
Xc	คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ (โอห์ม)
Xsc	คือ ค่ารีแอกแตนซ์ลวดวงจรของระบบ (โอห์ม)
$MVAsc$	คือ ค่าพิกัดกำลังลวดวงจรที่สถานีไฟฟ้า (MVA)
$MVAsc$	คือ ค่าพิกัดกำลังลวดวงจรที่บัสของระบบ (MVA)
$MVAcap$	คือ ค่าพิกัดกำลังของคาปาซิเตอร์ (MVar)
$KVAt$	คือ ค่าพิกัดกำลังของหม้อแปลง (kVA)
$KVAcap$	คือ ค่าพิกัดกำลังของคาปาซิเตอร์ (kVar)
Xt	คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลง (%)
f	คือ ความถี่ของระบบ 50 Hz

จากสมการดังกล่าวเราสามารถที่จะตรวจสอบในเบื้องต้นได้ว่า จะเกิดปัญหาฮาร์มอนิกกับระบบไฟฟ้าของเราหรือไม่ ดังตัวอย่างในระบบอุตสาหกรรมหนึ่ง มีขนาดหม้อแปลง 1500 kVar ZT = 6% มีขนาดคาปาซิเตอร์ 500 kVar และถ้าเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ขึ้นที่ระบบนี้ จะมีค่าลำดับฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ของระบบ

$$\sqrt{\frac{1500 \times 100}{500 \times 6}} \approx 7.07 \quad (11)$$

และถ้าระบบดังกล่าวมีกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 อยู่ด้วย อาจจะทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ขึ้นได้ ส่วนการแก้ไขที่นิยมในปัจจุบันคือ ติดตั้งฟิลเตอร์เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกลำดับที่จะทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์นั้นหมดไป หรือเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ในระบบ

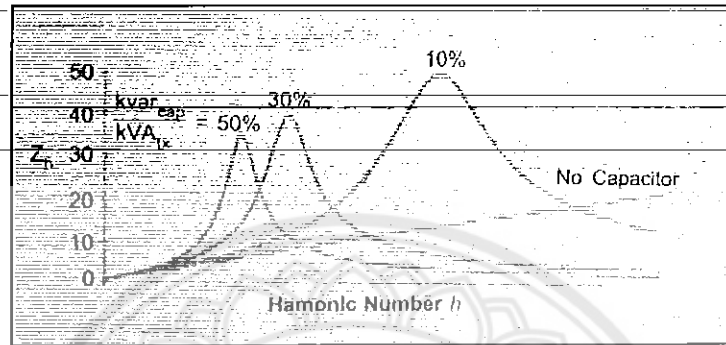


รูปที่ 2.8 แสดงตำแหน่งค่าลำดับที่เกิดฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์

เราสามารถที่จะทำการประเมินการเกิดฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์กับระบบไฟฟ้าแรงต่ำในระบบที่มีการติดตั้งคาปาซิเตอร์ในเบื้องต้นได้ โดยพิจารณาตามขนาดของโหลดฮาร์มอนิก ขนาดหม้อแปลง และขนาดของคาปาซิเตอร์ได้ ซึ่งมีข้อพิจารณาดังนี้

- ถ้าขนาดของโหลดฮาร์มอนิกมีค่าน้อยกว่า 10% ของขนาดหม้อแปลงจะไม่เกิดปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์
- ถ้าขนาดของโหลดฮาร์มอนิกมีค่าน้อยกว่า 30% และขนาดของคาปาซิเตอร์มีค่าน้อยกว่า 20% ของขนาดหม้อแปลง จะไม่เกิดปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์
- ถ้าขนาดโหลดฮาร์มอนิกมีค่ามากกว่า 30% ขนาดหม้อแปลง และมีการติดตั้งฟิลเตอร์จะไม่เกิดปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์

ได้มีการประเมินลำดับความถี่เรโซแนนซ์และขนาดค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นในระบบ โดยมีการเทียบขนาดค่าคาปาซิเตอร์กับหม้อแปลงในระบบ ทำให้พิจารณาความเหมาะสมในการเลือกค่าขนาดคาปาซิเตอร์มาใช้กับระบบที่มีฮาร์มอนิก เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ และดังรูปที่ 2.9 เมื่อพิจารณาชนิด 6 พัลส์ ซึ่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 เข้าสู่ระบบ



รูปที่ 2.9 ลำดับความถี่ฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์สัมพันธ์กับขนาดของคาปาซิเตอร์และหม้อแปลงไฟฟ้า

ดังนั้นจึงควรระวังสำหรับระบบที่มีการติดตั้งคาปาซิเตอร์ และมีฮาร์มอนิกปะปนอยู่ด้วย อาจจะทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ และคาปาซิเตอร์เกิดการชำรุดได้ ซึ่งตามมาตรฐาน IEEE Std. 18-1992 ได้มีการกำหนดค่าใช้งานของคาปาซิเตอร์ดังตารางที่ 2 เพื่อการใช้งานคาปาซิเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและอายุการใช้งานนาน

ตารางที่ 2 ค่าพิกัดสูงสุดการใช้งานของคาปาซิเตอร์

Maximum Operating Voltage	110% of Rated RMS Voltage
Maximum-Peak Voltage	120% of Rated Peak Voltage
Total-RMS Current	180% of Rated RMS Current
Total kVar	135% of Rated kVar

2.2.2) ผลของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลอยู่ในระบบจำหน่ายและสายส่ง

ทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียในสายมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการส่งจ่ายลดลง เนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกทำให้ค่า RMS ของกระแสและความต้านทานของสายสูงขึ้นตามสมการ

$$P_n = \sum_{h=2}^{\infty} I_{h(rms)}^2 \times R_n \tag{12}$$

โดยที่ P_n คือ กำลังสูญเสียในสาย

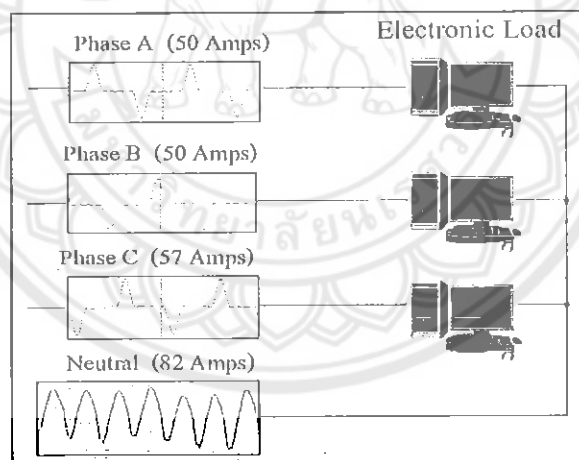
I_n คือ กระแสฮาร์มอนิก (RMS) ลำดับที่ n

R_n คือ ความต้านทานของสายที่ความถี่ฮาร์มอนิก

และกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านสายเคเบิล ทำให้เกิดความร้อนสูงในสายเคเบิลเนื่องจากผลของ Skin Effect และ Proximity Effect คือเกิดการไหลผ่านบริเวณใกล้ผิวของสายไฟฟ้า ซึ่งค่าทั้งสองนี้จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดสาย ระยะห่างระหว่างสาย และความถี่ของสายเคเบิล ซึ่งค่าดังกล่าวจะทำให้ค่าความต้านทานเพิ่มสูงขึ้น

2.2.3) ปัญหาฮาร์มอนิก Triple n (ลำดับที่ 3, 6, 9)

จัดอยู่ในกลุ่มที่มีลำดับเป็นศูนย์ (zero sequence) ในระบบ 3 เฟส 4 สาย และเป็นโหลดประเภทที่มีการใช้อุปกรณ์แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิ่ง (Switching Mode Power Supply: SMPS) เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ จะมีค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 สูงซึ่งโดยทั่วไปแล้วปัญหาฮาร์มอนิก Triple n พิจารณาถึงค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 เป็นสำคัญ ซึ่งแต่ละเฟสจะรวมกันไหลอยู่ในสายนิวทรัล อาจทำให้สายนิวทรัลทำงานเกินพิกัดได้หากไม่มีการออกแบบรองรับไว้ ดัง รูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ไหลรวมอยู่ในสายนิวทรัล

ตัวอย่างการคำนวณ ระบบ 3 เฟส 4 สาย ที่มีการใช้อุปกรณ์ SMPS ซึ่งมีกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 เป็น 70 % ของกระแสที่ความถี่ปกติ 50 Hz

$$I_{phase} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2} = \sqrt{1^2 + 0.7^2} = 1.22$$

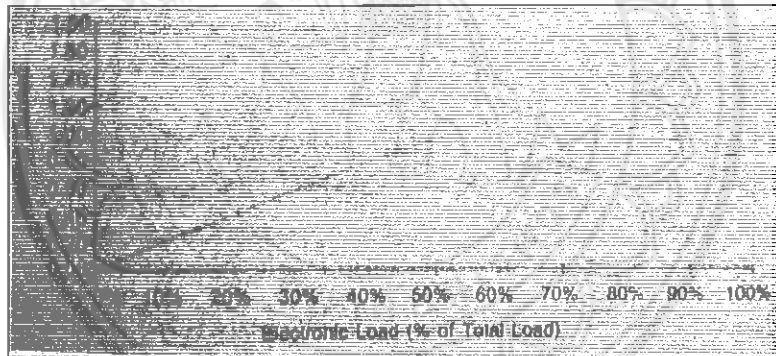
$$I_{neutral} = (I_3 + I_3 + I_3) = (0.7 + 0.7 + 0.7) = 2.1$$

$$I_{phase} / I_{neutral} = \frac{2.1}{1.22} = 1.72$$

จะเห็นว่าสำหรับการออกแบบสายนิวตรอลสำหรับโหลดที่มีการใช้อุปกรณ์ SMPS นั้น พิกัดขนาดของสายนิวตรอล ต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 1.72 เท่าของสายเฟส หรือเราสามารถคำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิกที่สายนิวตรอลจาก โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้จากสมการ

$$I_{phase} = 3 \sqrt{\frac{0.56 p_{nl}^2}{1 + 0.56 p_{nl}^2}} I_{phase(rms)} \quad (13)$$

P_{nl} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าของโหลดอิเล็กทรอนิกส์ชนิดไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการใช้โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นกับพิกัดของสายนิวตรอล

การแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 วิธีที่นิยมใช้กันคือ การเพิ่มขนาดพิกัดสายนิวตรอลในกรณีที่สายนิวตรอลไม่สามารถรองรับ โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ แต่ในกรณีที่กระแสฮาร์มอนิกในสายนิวตรอลไปรบกวนการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์ชนิดที่มีการตรวจจับกราวด์ อาจทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ดังกล่าวทำงานผิดพลาดได้ การแก้ไขอาจติดตั้งฟิวเตอร์ลำดับที่ 3 เพื่อป้องกันไม่ให้กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ไหลเข้าสายนิวตรอล

2.2.4) ผลของกระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดกำลังสูญเสียในหม้อแปลง คือ กำลังสูญเสียสเตรย์ฟลักซ์ (Stray Flux Loss) ของหม้อแปลงมีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้ประสิทธิภาพในการรับ โหลดของหม้อแปลงลดลงไป (Derating) ผลของแรงดันฮาร์มอนิกทำให้เกิดกำลังสูญเสียกระแสไหลวน (Eddy Current

Loss) และกำลังสูญเสียฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loss) เพิ่มขึ้น ทำให้พิจารณาถึงการใช้หม้อแปลงที่มีการใช้โหลดฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEEE Std.C57.110-1986 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่แนะนำวิธีการประเมินการใช้งานลดพิกัดหม้อแปลงที่มีใช้อยู่แล้วในระบบหรือสำหรับการออกแบบสเปคในการจัดซื้อหม้อแปลงที่จ่ายให้กับระบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ด้วยหรือสำหรับการออกแบบ แบบสเปคในการจัดซื้อหม้อแปลงที่จ่ายให้กับระบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นอยู่ด้วยเพื่อป้องกันหม้อแปลงเกิดความร้อนเนื่องจากกระแสฮาร์มอนิก ซึ่งอาจทำให้หม้อแปลงเสียหายหรือมีอายุการใช้งานสั้นลง โดยมีการกำหนดค่ากระแสของหม้อแปลงที่มีการ-Derated-ตามสมการ

$$I_{rms(derated)} = \sqrt{\frac{1 + P_{EC-R}}{1 + K \times P_{EC-R}}} (pu) \quad (14)$$

P_{EC-R} คือ Eddy Current Loss Factor

I_h คือ ลำดับกระแสฮาร์มอนิก

h คือ ลำดับฮาร์มอนิก

K คือ $K - factor = \frac{\sum I_h^2 \times h^2}{\sum I_h^2}$ (14.1)

สำหรับค่า K-factor เป็นค่าที่มาตรฐาน UL 1561 (Underwriter Laboratories) กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ K เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถของหม้อแปลงในการจ่ายโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

ดังตัวอย่างการคำนวณการลดพิกัดหม้อแปลงที่มีการใช้โหลดคอนเวอร์เตอร์ 6-P Transformer Dry Type พิกัดขนาด 1000 kVA 400 V PECC = 0.08 และมีค่า K = 4.828

$$I_{rms(derated)} = \sqrt{\frac{1 + 0.08}{1 + (4.828 \times 0.08)}} = 0.882 pu \quad (14.2)$$

ผลจากการคำนวณอธิบายได้ สำหรับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวข้างต้น เราต้องเลือกใช้หม้อแปลงชนิดที่มีค่า จากผลการคำนวณอธิบายได้ สำหรับโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวข้างต้น เราต้องเลือกใช้หม้อแปลงชนิดที่มีค่า K-factor ที่มีค่าไม่น้อยกว่า 4.826 (อาจใช้ K-factor เท่ากับ 6) และสำหรับหม้อแปลงแบบธรรมดาที่มีการใช้โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวข้างต้นจะต้องลดพิกัดกระแสเหลือ 88.2 % ของกระแสพิกัดหม้อแปลง หม้อแปลงจะไม่เกิดการชำรุดหรือเสียหายจากผลของฮาร์มอนิก

2.2.5) ผลของกระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดความร้อนและความเครียดไดอิเล็กตริกกับตัวคาปาซิเตอร์ และอาจทำให้ฟิวส์ของตัวคาปาซิเตอร์ขาดง่ายกว่าการใช้งานปกติ

ผลของแรงดันฮาร์มอนิกทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์ตามสมการ

$$P_L = \sum_{n=1}^{\infty} C(\tan \delta) \omega_n V_n^2, \text{ Loss_factor : } \tan \delta = \omega RC$$

และผลจากภาวะเรโซแนนซ์ที่ตัวคาปาซิเตอร์ทำให้เกิดการขยายกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกขนาดใหญ่ ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในการใช้งานของคาปาซิเตอร์สามารถทนต่อค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิก คาปาซิเตอร์ที่ผู้ผลิตออกแบบสร้างต้อง ได้ตามมาตรฐาน IEEE Std. 18-1992

2.2.6) ผลของกระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดความร้อนในตัวฟิวส์เพิ่มขึ้น

ทำให้ลักษณะเวลา-กระแส (Time-Current Characteristic) ของฟิวส์เปลี่ยนไป กรณีที่มีฟอลต์ระดับต่ำเกิดขึ้นฟิวส์จะขาดก่อนในเวลาที่กำหนด หรือในกรณีที่ฟิวส์ขาดโดยไม่ทราบสาเหตุอาจเป็นเหตุมาจากฮาร์มอนิกในกรณีเกิดภาวะเรโซแนนซ์ได้เช่นกัน

2.2.7) ผลของฮาร์มอนิกทำให้การทำงานของรีเลย์ผิดพลาด

ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการทำงานของชนิดรีเลย์ การทำงานของรีเลย์ชนิด Electromagnetic ขึ้นอยู่กับค่ากระแสและแรงดัน RMS ส่วนการทำงานของรีเลย์ชนิด Digital ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันยอดคลื่น (Crest Voltage) จากการ Sampling และตรวจค่า Zero Crossing ค่ากระแสหรือแรงดันที่ศูนย์ ถ้ามีฮาร์มอนิกเข้ามารบกวนการทำงานของรีเลย์ ทำให้รีเลย์ทำงานผิดพลาดดังนี้

* ทำให้รีเลย์มีการทำงานช้าลง หรือทำงานด้วยค่า (Pickup Values) ที่สูง โดยปกติรีเลย์จะทำงานอย่างรวดเร็วและทำงานด้วยค่าเริ่มต่ำๆ

* กรณีที่มีกระแสฮาร์มอนิก Triple n มากพอ อาจทำให้กราวด์รีเลย์ทำงานผิดพลาด

* ทำให้รีเลย์ระยะทาง (Distance Relay) ทำงานผิดพลาด ด้วยผลของกระแสฮาร์มอนิกที่ทำให้อิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นต่างจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ทำการเซตตั้งที่ความถี่หลักมูล

* ทำให้รีเลย์สถิตแบบความถี่ต่ำ (Static Under frequency Relay) มีความไวกว่าปกติ อาจทำให้เกิดการทริปผิดพลาด

* ทำให้รีเลย์กระแสและแรงดันเกิน (Over Current and Over Voltage Relay) ทำงานผิดพลาดตามคุณสมบัติที่ตั้งไว้

* ทำให้ความเร็วในการทำงานของรีเลย์ชนิดผลต่าง (Differential Relay) ทำงานช้าลง

2.2.8) ผลของกระแสฮาร์มอนิกต่อความสามารถในการตัดกระแส (Current Interruption Capacity)

ของอุปกรณ์สวิตช์เกียร์ คือ ทำให้ขนาดของอัตราค่ากระแสเทียบกับเวลา di/dt มีค่าสูงในขณะที่กระแสมีค่าเป็นศูนย์ เป็นผลทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ไม่สามารถตัดกระแสได้เมื่อมีฮาร์มอนิก ซึ่งปัญหานี้จะเกิดกับอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ตัดกระแสได้เช่นกัน

2.2.9) ผลของฮาร์มอนิกต่อมิเตอร์วัดค่าไฟฟ้า (Watt-Hour Meter)

ซึ่งเป็นมิเตอร์ประเภทจานเหนี่ยวนำ (Induction-Disk) ทำให้การวัดค่าผิดพลาดได้ ซึ่งโดยปกติการปรับแต่งมิเตอร์นั้นจะทำการปรับแต่งที่ความถี่หลักมูล

2.2.10) ผลของฮาร์มอนิกต่อเครื่องจักรไฟฟ้า

ทำให้กำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้เครื่องจักรร้อนกว่าปกติ ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเกิดปรากฏการณ์คือค็อกกิ้ง (Cogging) คือ ไม่สามารถสตาร์ทมอเตอร์ได้ จากการที่ความเร็วมอเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส และทำให้เกิดการออสซิลเลชันทางกลของเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพและแรงบิดของเครื่องจักร

2.2.11) ผลของฮาร์มอนิกต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าและระบบสื่อสาร

คือจะทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาด และมีอายุการใช้งานน้อยลง หรือเกิดการชำรุดเสียหายด้วยผลของค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกที่มีขนาดและรูปคลื่นสัญญาณไซน์ผิดเพี้ยนไป หรือมีสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสาร เช่น ระบบโทรศัพท์

2.3) การประเมินระดับฮาร์มอนิก

โดยทั่วไปในการพิจารณาค่าฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมว่าอยู่ในระดับใด สามารถทำได้โดยวิธีการวัด แต่ในบางครั้งอาจจะทำการวัดไม่ได้ เช่น ในกรณีของผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหม่ที่ยังไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ในระบบ จึงมีบางมาตรฐานแนะนำแนวทางในการประเมินระดับฮาร์มอนิกขึ้นต้นดังนี้

1. โดยการกำหนดขนาดและชนิดของโหลดฮาร์มอนิกขนาดเล็ก ดังเช่น มาตรฐาน G.5/3-1976 และ PRC-01-PQG-1998
2. โดยการเปรียบเทียบกับขนาดของโหลดกับค่าพิกัดกำลังลัดวงจรของผู้ใช้ไฟขนาดเล็กที่จุดต่อร่วม ซึ่งมีการประเมินออกเป็น 2 ขั้นตอนตามมาตรฐาน IEC-1000-3-6 และมาตรฐาน P519A/D5 คือ

ขั้นตอนที่ 1 ประเมินขนาดของโหลดทั้งหมดในระบบเทียบกับค่าพิกัดกำลังลัดวงจรที่จุดต่อร่วม

$$\text{ตามค่า } \frac{S_i}{S_{sc}} \times 100\% \leq 0.1\% \quad \text{โดยที่}$$

S_i = ขนาดโหลดทั้งหมดของผู้ใช้ไฟฟ้า

S_{sc} = พิกัดกำลังลัดวงจรที่จุดต่อร่วม (PCC)

* ในกรณีขั้นตอนที่ 1 ไม่ผ่านให้ไปประเมินในขั้นที่ 2

ขั้นตอนที่ 2 ประเมินตามขนาดโหลดฮาร์มอนิกเทียบกับค่าพิกัดกำลังลัดวงจรที่จุดต่อร่วมตามค่า

$$\frac{\sum_i S_{DI} \times W_i}{S_{sc}} \times 100 \leq 0.1\% \quad (15)$$

โดยที่

S_{DI} = ขนาดของโหลดฮาร์มอนิกแต่ละตัว (kVA)

S_{sc} = พิกัดกำลังลัดวงจรที่จุดต่อร่วม

W_i = Weight Factor สำหรับโหลดฮาร์มอนิกแต่ละตัว (pu) ดัง ตารางที่ 3

กรณีที่โหลดฮาร์มอนิกไม่มีในตารางที่ 1 มาตรฐาน IEC-1000-3-6 กำหนดให้ $W_i = 2.5$ และมาตรฐาน P519A/D5 กำหนดให้ $W_i = 1$

ดังตัวอย่างการประเมินผู้ใช้ไฟฟ้าของ กฟภ. ราชบุรี ใช้ไฟฟ้าระดับแรงดัน 400/230 V มีค่าพิกัดกำลังลัดวงจรที่จุดต่อร่วมเท่ากับ 10 MVA มีการใช้โหลดคอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ ที่มี Inductor ขนาดใหญ่เพื่อปรับค่ากระแสให้เรียบ (ดังตารางที่ 3) ขนาดเท่ากับ 12 kW และมีการใช้โหลดเชิงเส้นเท่ากับ 8 kW

ประเมินในขั้นตอนที่ 1

ได้ค่า 0.2% ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.1% ซึ่งต้องไปประเมินในขั้นตอนที่ 2 ต่อไป

ประเมินในขั้นตอนที่ 2

จากตารางที่ 3 ค่า $W_i = 0.8$ ได้ค่าเท่ากับ 0.096% ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.1% สามารถนำอุปกรณ์เข้าระบบได้

ตารางที่ 3 ค่า Weight Factor ของโหลดฮาร์โมนิกแต่ละตัว

Type of Load	Current Distortion	Weighting factor (Wi)
Single phase power supply	80% (High 3 rd)	2.5
Semi converter	High 2 nd , 3 rd , 4 th , at Partial Load	2.5
6 pulse Converter, Capacitive Smoothing no Series Inductance	80%	2.0
6 pulse Converter, Capacitive Smoothing with Series Inductance >3 %, or DC Drive	40%	1.0
6 pulse Converter with Large Inductor for Current Smoothing	28%	0.8
12 Pulse Converter	15%	0.5
AC Voltage Regulator	Varies with Firing Angle	0.7
Fluorescent Lighting	17%	0.5

ในกรณีระบบไฟฟ้ามีฮาร์โมนิกอยู่ในระบบ ถ้าไม่เกินค่าจำกัดแรงดันมาตรฐานฮาร์โมนิกก็จะไม่เกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า โดยได้ทำการประเมินโดยหาหาค่า %THD_v จากขนาดโหลดฮาร์โมนิกและค่าพิกัดกำลังฉนวนจร โดยการหาค่า %THD_v เปรียบเทียบค่า

$$\text{Short Circuit Ratio (SCR)} = \text{MVA}_{sc} / \text{MVA}_H \quad (16)$$

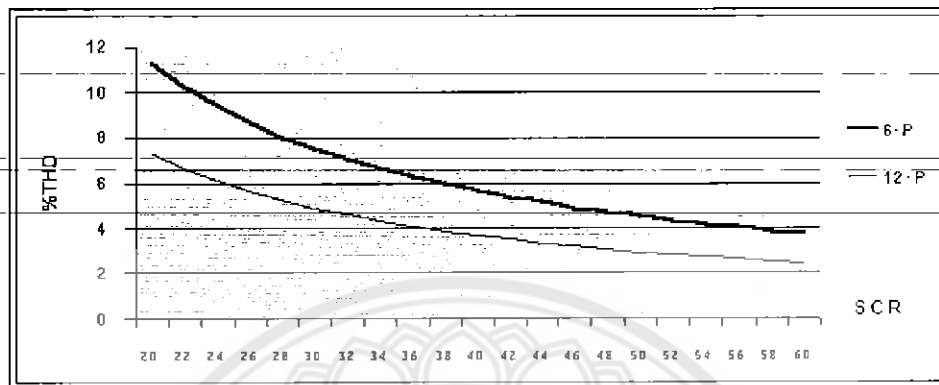
โดยที่

MVA_{sc} คือ ค่าพิกัดกำลังฉนวนจร

MVA_H คือ ค่าขนาดของโหลดฮาร์โมนิก

ซึ่งทำให้เราสามารถหาค่า %THD_v ของโหลดดังกล่าวจากการประเมินเพื่อเป็นข้อพิจารณาในกรณีที่ยังไม่มีติดตั้งโหลดหรือในกรณีที่ไม่สามารถทำการวัดได้ดังตัวอย่างประเมินการใช้โหลดคอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ และ 12 พัลส์ จะได้ค่าตามกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า %THD_v กับ ค่า SCR ของโหลดคอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ และ 12 พัลส์ ดังรูปที่ 2.12 ทำให้ทราบถึงระดับฮาร์โมนิกที่อยู่ในระบบ เมื่อเรารู้ค่าขนาดของโหลดคอนเวอร์เตอร์ และค่าพิกัดกำลังฉนวนจรของระบบ เช่น

กรณีโหลดคอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ มีค่า %THDv มากกว่า 5 % ถ้าค่า SCR น้อยกว่า 45 และสำหรับ โหลดคอนเวอร์เตอร์ชนิด 12 พัลส์ ถ้าค่า SCR น้อยกว่า 29 อาจจะทำให้อุปกรณ์ในระบบนั้นเกิดปัญหาฮาร์มอนิกได้

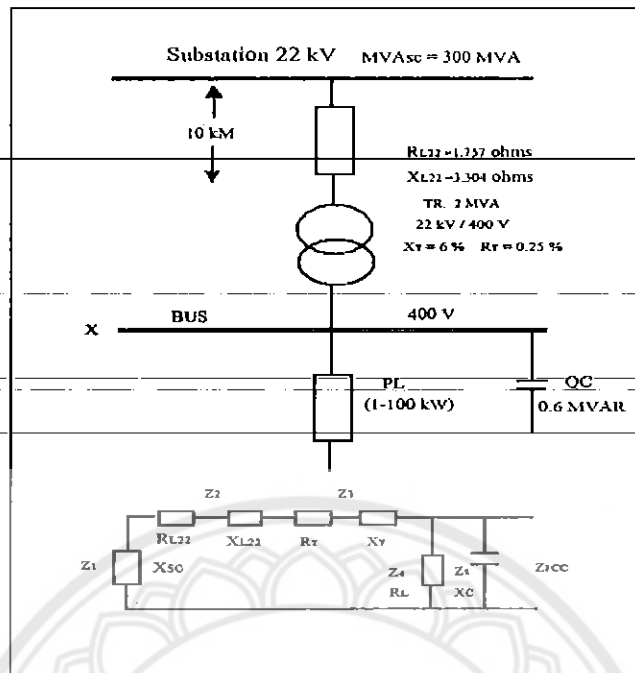


รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ค่า %THDv กับค่า SCR ของโหลดคอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 กับ 12 พัลส์

และจากตัวอย่างการประเมินในข้อที่ 2 ของโหลดคอนเวอร์เตอร์ ชนิด 6 พัลส์ขนาด 12 kW ที่มีค่าพิกัดกำลังตั้งตรงที่จุดต่อร่วม (PCC) เท่ากับ 10 MVA ทำให้เราทราบค่า %THDv มีค่าเท่ากับ 0.175 ของการใช้โหลดดังกล่าวจากการประเมินด้วยวิธีการนี้ ซึ่งพบว่าการประเมินตามมาตรฐาน IEC-1000-3-6 และ P519A/D5 นั้นยอมให้ค่า %THDv ในระบบเกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก

2.4) การประเมินปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์

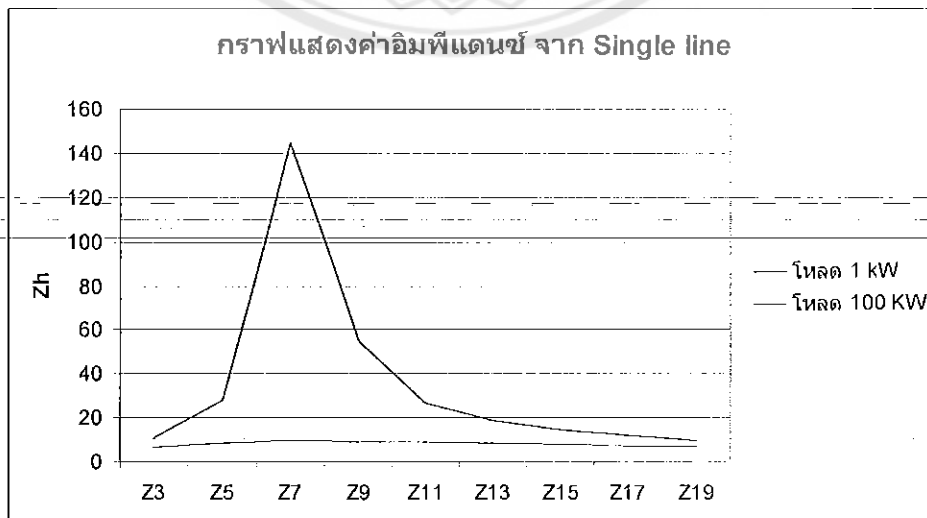
ในการประเมินการเกิดปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ จะใช้ตัวอย่างตาม IEC1000-3-6 โดยใช้กับตัวอย่างผู้ใส่ไฟของ กฟผ. รายหนึ่ง เมื่อพิจารณาที่บัสของผู้ใช้ไฟซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตาม Single line ดังรูปที่ 2.13 เพื่อประเมินค่าอิมพีแดนซ์ที่ลำดับความถี่ต่างๆ ที่ขนาดของโหลดต่างๆกัน ทำให้เราทราบถึงโอกาสที่ระบบอาจจะเกิดปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ขึ้นได้ โดยเฉพาะระบบอยู่ในภาวะ Light Load ที่มีความถี่เรโซแนนซ์ของระบบมีค่าใกล้เคียงตรงกับความถี่ฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบ และทำให้ทราบถึงขนาดของแรงดันฮาร์มอนิก ($Z_{xh} * I_h$) ที่ขยายจากผลการเกิดฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ดังกล่าว ผลการคำนวณในตารางที่ 2 ที่ภาวะ Light Load (ระบบมีการใช้โหลดเพียง 1 kW) และถ้าในระบบมีการใช้โหลดชนิดซูดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ (Adjustable Speed Drive: ASD) ที่จ่ายค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับความถี่ที่ 7 เพียง 2 A อาจจะทำให้มีการขยายแรงดันฮาร์มอนิกเฉพาะลำดับที่ 7 ตกคร่อมคาปาซิเตอร์ที่บัสเกิดกว่าที่จะทนต่อแรงดันที่สูงได้ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้คาปาซิเตอร์ เกิดการชำรุดเสียหายได้



รูปที่ 2.13 ตัวอย่าง Single Line ระบบหนึ่งของ กฟภ และวงจรสมมูลอิมพีแดนซ์

ตารางที่ 4 ผลการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของระบบในลำดับที่ฮาร์โมนิกต่างๆ ที่มีผลจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของโหลดในระบบ

Z_h	Z_3	Z_5	Z_7	Z_9	Z_{11}	Z_{13}	Z_{15}	Z_{17}	Z_{19}
โหลด 1 kW	11	28	145	55	27	19	14.6	12	10
โหลด 100 KW	6.6	8.8	9.6	9.2	9.26	8.7	8.2	7.6	7.1



2.5) มาตรฐานฮาร์มอนิก

โดยทั่วไปแล้วถ้าฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบ มีค่าไม่เกินขีดจำกัดตามมาตรฐานของฮาร์มอนิก ก็จะไม่เกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบ ซึ่งปัจจุบันการไฟฟ้าได้มีการนำ PRC-PQG-01-1998 ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม ซึ่งจัดทำโดยคณะทำงานปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าของสามการไฟฟ้า มาบังคับใช้กับผู้ไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรมที่ทำสัญญาซื้อขายกับการไฟฟ้าแล้ว เพื่อให้ระบบไฟฟ้ามีระดับฮาร์มอนิกที่จะไม่ให้เกิดการทำงาน หรือให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเกิดการชำรุดเสียหายจากปัญหาฮาร์มอนิก โดยอ้างอิงจากมาตรฐานต่างๆ ดังนี้

1. Engineering Recommendation G.5/3 September 1976 The Electricity Council Chief Engineer Conference "Limits for Harmonics in The United Kingdom Electricity Supply System"
 2. The State Energy Commission of Western Australia (SECWA)
Part 2 : Technical Requirement
 3. IEC 1000: Electromagnetic Compatibility (EMC)
Part 4: Testing and Measurement Techniques
Section 7 : General Guide on Harmonics and Inter harmonics Measurements and Instrumentation for Power Supply Systems and Equipment Connected thereto
- ซึ่งปัจจุบันคณะทำงานกำลังพิจารณาปรับปรุงมาตรฐานดังกล่าวโดยอ้างอิงตาม Engineering Recommendation G.5/3 ปี 2000 เป็นหลักในการพิจารณาปรับปรุง โดยจะกล่าวถึงข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิก เกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม โดยสรุปมีขั้นตอนดังนี้
- ขั้นตอนที่ 1

อุปกรณ์ที่สามารถนำเข้าสู่ระบบได้โดยไม่พิจารณาในส่วนฮาร์มอนิก

- 1.2 อุปกรณ์ 3 เฟส ชนิด Converter หรือ AC Regulator ไม่เกินหนึ่งตัว และมีขนาดไม่เกิดตามตารางที่ 6 แต่ถ้ามีหลายตัวให้ไปพิจารณาในขั้นตอนที่ 2

ตารางที่ 5 ขนาดสูงสุดของอุปกรณ์ประเภท Converter และ AC Regulator แต่ละตัว

ระดับแรงดันไฟฟ้า ที่จุดต่อร่วม (KV)	Converter ชนิด 3 เฟส (kVA)			AC Regulator ชนิด 3 เฟส (kVA)	
	3 Pulses	6 Pulses	12 Pulses	6 Thyristor	3 Thyristor /3 Diode
0.4	8	12	-	14	10
11 and 12	85	130	250	150	100

ป.ร.

ม.๒๕๖๓

1500049x

254๗.

1.2 อุปกรณ์ 1 เฟส

1.2.1 ต้องผลิตตามมาตรฐาน IEC-1000-3-2 ซึ่งเป็นมาตรฐานกำหนดขีดจำกัดฮาร์มอนิกที่ปล่อยจากอุปกรณ์ขนาดไม่เกิน 16 แอมป์ต่อเฟส (หรือสามารถดูได้จาก

ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้านซึ่งจัดทำโดยคณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าของสมาคมไฟฟ้า)

1.2.2 อุปกรณ์ Convertor หรือ AC Regulator แปรแรงดัน 230 โวลต์ เพื่อการใช้งานในอุตสาหกรรมที่ไม่สร้างกระแสฮาร์มอนิกอันดับคู่มีขนาดไม่เกิน 5-kVA โดยติดตั้งไม่เกินหนึ่งตัวต่อเฟส

1.2.3 ถ้าไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์มากกว่าหนึ่งตัวต่อหนึ่งเฟสให้พิจารณาตามขั้นตอนที่ 2

ขั้นตอนที่ 2

อุปกรณ์ที่ไม่ผ่านข้อกำหนดในขั้นตอนที่ 1 สามารถต่อเข้าระบบได้เมื่อ

2.1 อุปกรณ์ 3 เฟส

2.1.1 ค่ากระแสฮาร์มอนิกที่จุดต่อรวมต้องไม่เกินค่าขีดจำกัดในตารางที่ 7

ตารางที่ 6 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อรวม

ระดับแรงดันไฟฟ้า ที่จุดต่อรวม (kV)	MVA _{sc} (Base)	อันดับฮาร์มอนิกและขีดจำกัดของกระแส (Arms)																	
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0.400	10	4	3	2	5	1	4	9	8	7	19	6	16	5	5	5	6	4	6
		3	4	2	6	1	0												
11 and 12	100	1	8	6	1	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1
		3			0														
22, 24 and 33	500	1	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1	1
		1																	
69	500	8	5	4	7	3	4	2	1	1	4	1	4	1	1	1	1	1	1
		.	.	.	.	.	.	.	.	.	6	9	6	3	6			6	
		8	9	3	3	3	9	3	6										
115 and Above	1000	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1

2.1.2 หากค่า MVA_{sc} ต่ำสุด ณ จุดต่อร่วมมีค่าแตกต่างจากค่า $MVA_{sc(Base)}$ ที่ระบุไว้ใน ตารางที่ 7 ยอมให้ปรับค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ยอมให้ไหลเข้าสู่ระบบด้วยสมการ

$$I_n = I_{hp} \times \frac{MAV_{sc1}}{MVA_{sc(Base)}} \quad (17)$$

โดยที่

I_h = กระแสฮาร์มอนิก (A) ลำดับที่ h ที่ยอมให้ไหลเข้าสู่ระบบเมื่อ
ค่า MVA_{sc} เป็น MVA_{sc1}

I_{hp} = กระแสฮาร์มอนิก (A) ลำดับที่ h ที่กำหนดในตารางที่ 2

MVA_{sc1} = ค่า MVA_{sc1} ต่ำสุด ณ จุด PCC มีค่าไม่ต่ำกว่าค่า
 $MVA_{sc(Base)}$

$MVA_{sc(Base)}$ = ค่า $MAV_{sc(Base)}$ สำหรับค่ากระแสฮาร์มอนิกตามตารางที่ 7

2.1.3 ยอมให้นำค่าคลาดเคลื่อนร้อยละ 10 หรือ 0.5 A (ค่าที่มากกว่าค่าใดค่าหนึ่ง) มา
ใช้กับขีดจำกัดของกระแสแต่ละอันดับ ตามข้อ 2.1.2 ได้ไม่เกิน 2 อันดับ

2.1.4 ก่อนที่จะมีการเชื่อมต่อโหลดใหม่ ค่าผลรวมแรงดันฮาร์มอนิก (%THDv) ที่จุด
ต่อร่วมก่อนการเชื่อมต่อโหลดต้องมีค่าไม่เกิน 75 % ของขีดจำกัดตามตารางที่ 8

ตารางที่ 7 ขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันสำหรับผู้ใช้งานไฟฟ้ารายใดๆ ที่จุดต่อร่วม

ระดับแรงดันไฟฟ้า ที่จุดต่อร่วม (kv)	ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ของแรงดัน (%)	ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันแต่ละอันดับ (%)	
		อันดับที่	อันดับคู่
0.400	5	4	2
11 12 22 และ 24	4	3	1.75
33	3	2	1
69	2.45	1.63	0.82
115 และสูงกว่า	1.5	1	0.5

2.2 อุปกรณ์ 1 เฟส

2.2.1 ต้องสอดคล้องกับขีดจำกัดแรงดันไม่สมดุลตาม Engineering Recommendation P1.6
ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 8 ขีดจำกัดแรงดันไม่สมดุลที่จุดต่อร่วม

ระดับแรงดัน	Voltage Unbalance factor (%)
ต่ำกว่า 33 kV	1.3
33 kV หรือ มากกว่า	1

$$\text{Voltage Unbalance Factor (\%)} = \frac{\text{Load}_{\text{Single-phase (kVA)}}}{\text{MVA}_{\text{SC}}} \times 10 \quad (18)$$

2.2.2 อุปกรณ์ตามข้อ 1.2.2 ถ้าเกิดขีดจำกัดตามขั้นตอนที่ 2 ไม่อนุญาตให้นำเข้าระบบ

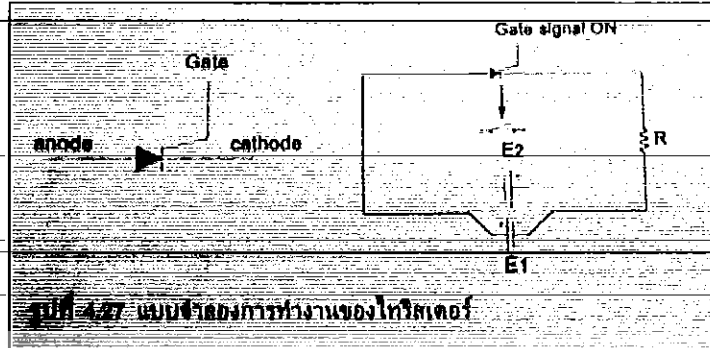
ขั้นตอนที่ 3

อุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นที่ไม่ผ่านการพิจารณาตามขั้นตอนที่ 2 ผู้ใช้ไฟฟ้าอาจสามารถเชื่อมต่อโหลดดังกล่าวกับระบบไฟฟ้าได้ ถ้ามีการศึกษาทำการวิเคราะห์หาคำนวณจากคุณลักษณะระบบ และพฤติกรรมฮาร์มอนิกของโหลดอย่างละเอียด โดยผลของแรงดันฮาร์มอนิกที่ได้ต้องไม่เกินขีดจำกัดตามตารางที่ 8

รู้จักและเข้าใจการเกิดแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก

เมื่อในโรงงานอุตสาหกรรมของคุณหรือโรงงานใกล้เคียงมีการใช้ทรินสเตอร์ในการควบคุมกระแสให้กับโหลดต่างๆ เช่น เตาหลอม ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์และอุปกรณ์มีการทำงานโดยการใช้กระแสไฟฟ้าแบบไม่เต็มรูปคลื่นอื่นๆและถ้าคุณเคยประสบปัญหาคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในการแก้ค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor) เกิดระเบิดขึ้นบ่อยครั้ง อุปกรณ์ควบคุมต่างๆ ทำงานผิดพลาดไป หม้อแปลงและเครื่องจักรไม่สามารถจ่ายหรือใช้งานได้ดีผิดปกติ ซึ่งสาเหตุประการหนึ่งที่ไม่ควรมองข้ามก็คือ ฮาร์มอนิก ปัจจุบันการนำอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) มาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นเครื่องใช้ในที่พักอาศัยหรือในอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมา ทำให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics) เป็นไปอย่างรวดเร็ว โดยเครื่องมือเครื่องจักรที่มีการนำอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมาใช้เป็นส่วนประกอบนั้น กลับกลายเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกและทำให้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของระบบผิดเพี้ยนไปจนกลายเป็นปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งในวงการอุตสาหกรรมที่มีความต้องการคุณภาพทางไฟฟ้าสูง

2.6) การทำงานของไทรสเตอร์

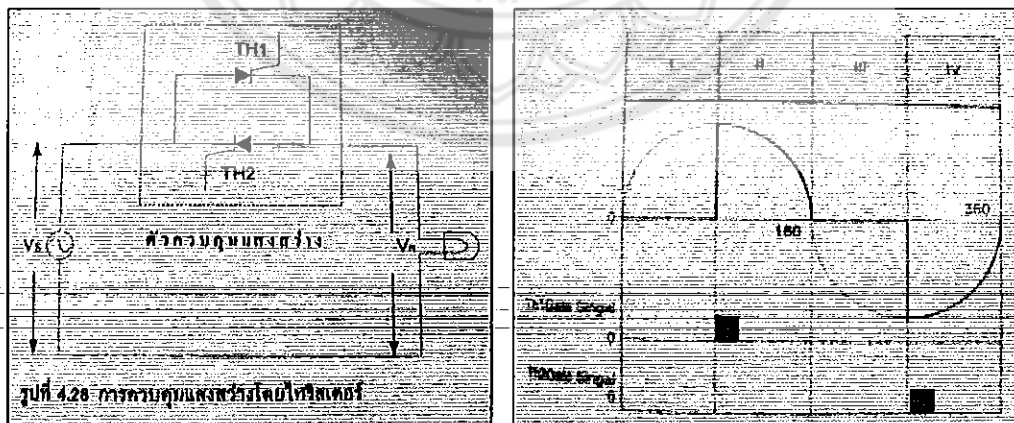


รูปที่ 4.27 แบบจำลองการทำงานของไทรสเตอร์

รูปที่ 2.14 แบบจำลองการทำงานของไทรสเตอร์

จากรูปที่ 2.14 เมื่อไม่มีสัญญาณอินพุตป้อนเข้าขา Gate ไทรสเตอร์ จะทำให้ไทรสเตอร์ยังไม่มี การนำกระแสไฟฟ้า ถึงแม้ว่าจะมีแรงดันไฟฟ้าบวกป้อนเข้าที่ขา Anodes และแรงดันไฟฟ้าลบป้อนเข้าที่ ขาCathodes ก็ตาม แต่เมื่อมีการป้อนสัญญาณอินพุตป้อนเข้าที่ขา Gate แล้วก็จะทำให้ไทรสเตอร์นำกระแส อย่างต่อเนื่อง ถึงแม้ว่าเราจะทำการปลดสัญญาณอินพุตที่ Gate ออกแล้วก็ตาม ในการที่จะทำให้ไทร สเตอร์หยุดนำกระแส นั้น จะต้องทำการสลับการป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ขา Anodes เป็นแรงดันไฟฟ้าลบ และขา Cathodes เป็นแรงดันไฟฟ้าบวก

2.7) การควบคุมมุม (Phase Control) พื้นฐาน



รูปที่ 4.28 การควบคุมแสงสว่างโดยไทรสเตอร์

รูปที่ 2.15 การควบคุมแสงสว่างโดยไทรสเตอร์และรูปคลื่นของแรงดันเอาต์พุต

หลังจากเราทราบหลักการการทำงานของไทรสเตอร์แล้ว ต่อไปจะเป็นการประยุกต์ใช้งานไทรสเตอร์ ในการควบคุมเฟสเพื่อควบคุมแสงสว่างหลอดไฟฟ้า การอธิบายการควบคุมเฟสนั้นเพื่อให้เข้าใจจึงได้ มีการแบ่ง 1 คาบเวลาออกเป็น 4 ส่วน ดังรูปที่ 4.29

ส่วนที่ 1 เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าด้านบวก Th1 จะยังไม่มีการนำกระแสเนื่องจากยังไม่มีการป้อน สัญญาณอินพุตเข้าที่ขา Gate

ส่วนที่ 2 เมื่อมีการป้อนสัญญาณอินพุตเข้าที่ขา Gate ของ Th1 ทำให้ Th1 นำกระแสทำให้กระแสไหลในวงจร ในขณะที่รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าอินพุตมีค่าสูงสุดทางด้านบวก

ส่วนที่ 3 เมื่อรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าอินพุตมีค่าด้านลบป้อนให้ Th1 ก็จะทำให้ Th1 หยุดนำกระแส แต่ในทางกลับกัน กลับกลายเป็นการป้อนแรงดันไฟฟ้าด้านลบให้กับ Th2 แต่ Th2 จะยังไม่มี การนำกระแสเนื่องจากยังไม่มีการป้อนสัญญาณอินพุตเข้าที่ขา Gate ของ Th2

ส่วนที่ 4 เมื่อมีการป้อนสัญญาณอินพุตเข้าที่ขา Gate ของ Th2 ทำให้ Th2 นำกระแสมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร ในขณะที่รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าอินพุตมีค่าสูงสุดทางด้านลบ

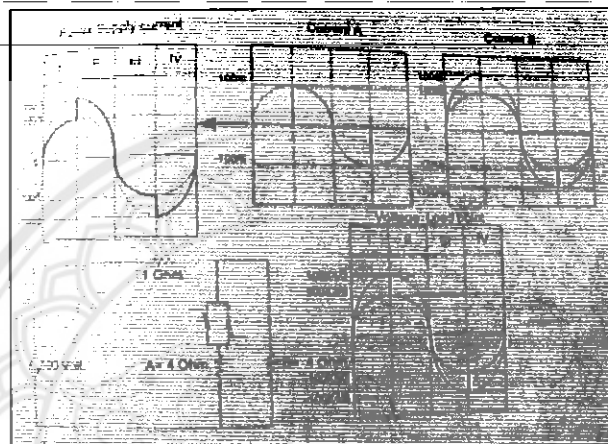
จากการทำงานอย่างต่อเนื่องของทั้ง 4 ส่วนใน 1 คาบเวลา และมีการทำซ้ำอย่างนี้ 50 ครั้งใน 1 วินาทีหรือที่ความถี่ 50 Hz นั้นเอง ทำให้เรามีความรู้สึกว่าหลอดไฟฟ้านั้นมีความสว่างน้อยลง สาเหตุก็ เนื่องจากความสามารถของสายตามนุษย์ไม่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของแสงไฟได้รวดเร็วถึงความถี่ 50 Hz ได้ และถ้าเมื่อเราต้องการควบคุมความสว่างของหลอดไฟฟ้าให้สว่างเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็สามารถทำได้โดยการกำหนดช่วงเวลาในการป้อนอินพุตเข้าที่ขา Gate หรือปรับมุมเพื่อให้ไทรสเตอร์ทำงาน หรือเรียกว่า Firing Angle นั้นเอง ดังรูปที่ 4.30

2.8) การจำลองระบบไฟฟ้าที่มีการใช้ ไทรสเตอร์

เมื่อกำหนดให้ระบบไฟฟ้ามีการใช้ไทรสเตอร์จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดความต้านทาน A อยู่ในระบบโดยที่โหลด B เป็นค่าความต้านทานที่ต่ออยู่ในระบบตลอดเวลา โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 100 โวลต์ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายมีค่าเท่ากับ 1 โอห์ม และค่าความต้านทาน โหลดทั้งชุด A และ B มีค่าเท่ากับ 4 โอห์ม ดังรูปที่ 4.31 จากรูปที่ 4.31 เราสามารถอธิบายการเกิด แหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิก และทำให้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าผิดเพี้ยนได้ เมื่อสมมุติ กำหนดให้ป้อนสัญญาณอินพุตที่ขา Gate ที่ Firing Angle เท่ากับ 90 องศา และสามารถอธิบายทีละส่วน เพื่อง่ายต่อการเข้าใจดังนี้

ส่วนที่ 1 เราจะเห็นได้ว่าไทรสเตอร์ยังไม่มีการนำกระแส แต่อย่างไรก็ตามที่โหนด B จะรับกระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับแหล่งจ่าย $100/5$ แอมป์ และค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดโหนดมีค่าเท่ากับ $100 \cdot 4/5$ โวลต์

ส่วนที่ 2 เราจะเห็นได้ว่าไทรสเตอร์จะนำกระแสไฟฟ้าด้านบวก ซึ่งทำให้ในส่วนนี้ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดโหนด A และ B มีค่าลดลงเท่ากันที่ $100/6$ แอมป์ และค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดโหนดทั้งสองจะมีค่าเท่ากับ $100 \cdot 2/3$ โวลต์ แต่แหล่งจ่ายไฟฟ้าจะต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ $100/3$ แอมป์

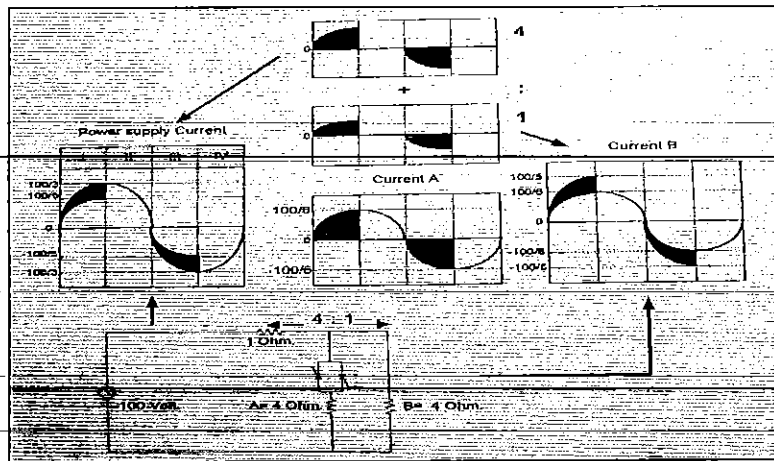


รูปที่ 2.16 ระบบไฟฟ้าเมื่อมีไทรสเตอร์ในระบบ

ส่วนที่ 3 เราจะเห็นได้ว่าไทรสเตอร์ยังไม่มีการนำกระแสไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามที่โหนด B จะรับกระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับแหล่งจ่าย $-100/5$ แอมป์และค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดโหนดมีค่าเท่ากับ $-100 \cdot 4/5$ โวลต์

ส่วนที่ 4 เราจะเห็นได้ว่าไทรสเตอร์จะนำกระแสด้านลบซึ่งทำให้ในส่วนนี้ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดโหนด A และ B มีค่าเท่ากันที่ $-100/6$ แอมป์ และค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดโหนดทั้งสองจะมีค่าเท่ากับ $-100 \cdot 2/3$ โวลต์แต่แหล่งจ่ายไฟฟ้าจะต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ $-100/3$ แอมป์

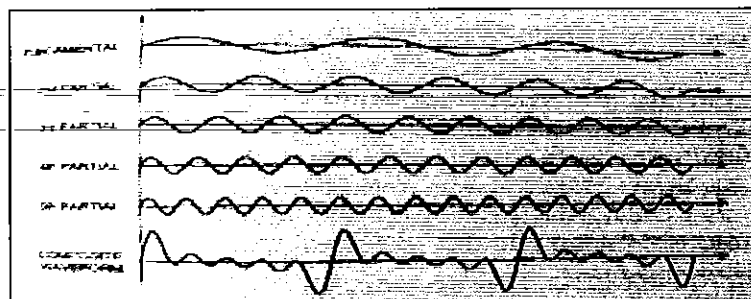
ระบบที่มีไทรสที่มีใช้งานอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมหรือโรงงานข้างเคียงส่งผลทำให้เกิดแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกและทำให้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าผิดเพี้ยนได้อย่างไรซึ่งปัญหาดังกล่าวไม่เพียงแต่ส่งผลกระทบต่อโรงงานอุตสาหกรรมของเราเพียงอย่างเดียว แต่จะส่งผลกระทบต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าด้วย และเพื่อให้คุณเข้าใจได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น เราลองมาเมื่อพิจารณาว่าที่จุดโหนด B และแหล่งจ่ายไฟฟ้านั้นจะมีผลที่ถูกกระทบจากแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก (จุดโหนด A) ได้มากน้อยเพียงใด ดังอธิบายในรูปที่ 4.32



รูปที่ 2.17 ผลกระทบจากแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก (จุด A) ที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าและที่จุดโหลด B

เมื่อเราพูดถึงแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกแล้ว และเพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจได้ง่ายขึ้น แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกก็คือ อุปกรณ์ใดๆ ที่ทำให้รูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟฟ้าพื้นฐาน (Fundamental Wave) ของระบบมีรูปร่างผิดเพี้ยนไป และถ้าเราพิจารณารูปที่ 4.32 จะพบว่ากระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าและจุดโหลด B นั้นจะมีรูปร่างผิดเพี้ยนไป (ส่วนที่แรงเงา) เนื่องจากจุดโหลด A ถ้าเราพิจารณาให้จุดโหลด A เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกแล้ว เราจะพบว่ากระแสที่กระจายของกระแสฮาร์มอนิกออกไป จะมีสัดส่วนผกผันกับค่าอิมพีแดนซ์ของสาย (1 โอห์ม) และความต้านทานของจุดโหลด B (4 โอห์ม) หรือในอัตราส่วน 4 ต่อ 1

แล้วฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ นั้นจะมีรูปคลื่นแตกต่างจากรูปคลื่นพื้นฐาน (Fundamental Wave) อย่างไร ดังรูปที่ 4.33 เมื่อสมมติให้ Fundamental Wave มีความถี่เท่ากับ 50 Hz ดังนั้นความถี่ของฮาร์มอนิกอันดับ 2 จะเท่ากับ 100 Hz และ 150 200 250 Hz ตามลำดับ และเมื่อนำ fundamental wave รวมกับฮาร์มอนิกตั้งแต่อันดับ 2-5 จะพบว่าผลลัพธ์ (Composite waveform) ของรูปคลื่นจะมีความผิดเพี้ยนไป



รูปที่ 2.18 การสังเคราะห์ด้วยทฤษฎี Fourier Series

การสังเคราะห์รูปคลื่นที่คิดขึ้นไปเพื่อหาฮาร์มอนิกอันดับใดประกอบอยู่บ้างและมีขนาดเท่าใดนั้นจะใช้ทฤษฎี Fourier Series มาทำการสังเคราะห์ สำหรับรูปคลื่นที่คิดขึ้นไปโดยมีคุณลักษณะของรูปคลื่นด้านบวกมีลักษณะเหมือนกับรูปคลื่นด้านลบใน 1 คาบเวลานั้น ถ้าเราสังเคราะห์ด้วยทฤษฎี Fourier Series พบว่าจะเกิดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับเลขคี่เท่ากัน (3^{rd} , 5^{th} , 7^{th} , 9^{th} , ...) ดังนั้นในระบบไฟฟ้ากำลังจึงให้ความสนใจฮาร์มอนิกเลขคี่เป็นพิเศษ แต่ในความเป็นจริงนั้นฮาร์มอนิกอันดับเลขคู่ก็สามารถเกิดขึ้นได้เหมือนกัน เช่น ชุด Half wave rectifier หรือชุด Arc Furnace ที่มีการใช้งานแบบไม่ต่อเนื่อง และโดยทั่วไปแล้วฮาร์มอนิกอันดับที่สูงๆ (สูงกว่าอันดับที่ 25^{th} ถึง 50^{th} ขึ้นอยู่กับแต่ละระบบ) ส่วนใหญ่เราจะไม่นำมาพิจารณา ก็เนื่องมาจากไม่ค่อยสร้างความเสียหายให้แก่ระบบไฟฟ้ากำลังมากเท่าใดนักและในการออกแบบชุดกรองฮาร์มอนิกอันดับที่สูง ก็ทำให้ยาก แต่อย่างไรก็ตาม ฮาร์มอนิกอันดับที่สูงๆนั้นก็อาจจะเข้าไปรบกวนการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีกำลังต่ำๆ ได้ ซึ่งทั้งนี้และทั้งนั้นนักอุตสาหกรรมก็ต้องพิจารณาด้วยว่าฮาร์มอนิกอันดับใดมีผลกระทบต่ออุตสาหกรรมของท่าน เพื่อจะได้แก้ไขปัญหาได้ถูกต้อง

2.9) ผลกระทบของฮาร์มอนิกของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แหล่งจ่ายอินพุต

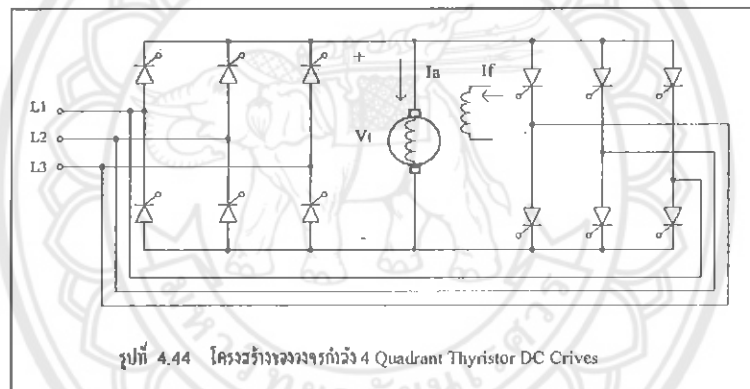
คุณภาพของระบบไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญต่อโหลดชนิดต่างๆ ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ซึ่งเป็นโหลดแบบไม่เชิงเส้นเป็นสาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้คุณภาพของแหล่งจ่ายไฟอินพุตด้อยลง

ในปัจจุบันนี้จะพบว่าพลังงานไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นอันดับต้นๆ ในการดำรงชีวิตของมนุษย์ ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาได้มีการนำพลังงานไฟฟ้ามาใช้ให้เกิดประโยชน์หลายๆ ด้าน แต่ก็ยังอยู่ในขอบเขตที่ค่อนข้างจำกัดเพราะว่าอุปกรณ์ที่นำมาประยุกต์ใช้งานนั้นยังมีประสิทธิภาพไม่สูงมาก แต่เทคโนโลยีในปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และได้นำมาใช้ในการควบคุมแทนสวิทช์ในทางไฟฟ้ากันอย่างแพร่หลาย เพราะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีข้อดีกว่าสวิทช์ในทางไฟฟ้าหลายประการ เช่น ยืดหยุ่นในการควบคุมแรงดัน กระแสและกำลังไฟฟ้า มีขนาดเล็ก เที่ยงตรง และมีความแม่นยำสูง

ดังนั้นจึงเป็นทางเลือกใหม่ในการนำเอาข้อดีของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาประยุกต์ใช้งานที่ต้องการความเที่ยงตรงและแม่นยำสูงๆ เช่น กระบวนการผลิตต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งส่วนใหญ่นำมาใช้ในการควบคุมความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ เราเรียกระบบควบคุมแบบนี้ว่า ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งเป็นระบบที่นำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics) มาใช้ในการควบคุมการถ่ายเทกำลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายเข้าสู่มอเตอร์ สามารถแบ่งออกได้ 2 ระบบใหญ่ๆ คือ

1. ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Drives)
2. ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Drives)

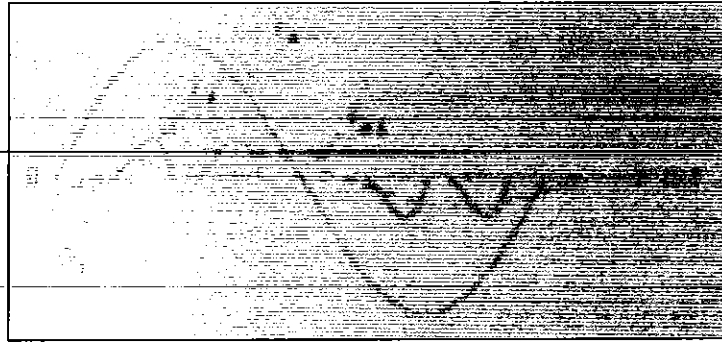
การนำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้ในการควบคุมมอเตอร์ทั้ง 2 ระบบ นอกจากข้อดีที่ได้กล่าวมาแล้ว ก็ยังมีข้อเสียบางประการที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบอื่นๆ ด้วย กล่าวคือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นจะผลิตฮาร์มอนิกและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา เช่น ระบบขับเคลื่อนทั้ง 2 ระบบเมื่อต้องใช้พลังงานไฟฟ้าร่วมกันที่จุดต่อร่วมระหว่างการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า (Point of Common Coupling: PCC) แต่ระบบขับเคลื่อนทั้ง 2 นั้นเป็นภาระแบบไม่เชิงเส้น (Non linear Load) เป็นผลมาจากการนำกระแสของอุปกรณ์สวิตช์ (Solid State Devices) ซึ่งคุณสมบัติของภาระประเภทนี้ จะมีผลทำให้รูปคลื่นกระแสและแรงดันของแหล่งจ่ายเกิดการผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ เนื่องจากภาระแบบไม่เชิงเส้นเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกและจะฉีกฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบ ซึ่งถ้าหากฮาร์มอนิกที่ฉีดเข้าสู่แหล่งจ่ายสูงมาก ก็จะส่งผลกระทบต่อระบบอื่นๆ ทำงานไม่เป็นปกติ เช่น ระบบโทรคมนาคม หม้อแปลงไฟฟ้า ร้อนมากกว่าปกติ เซอร์คิตเบรกเกอร์ทำงานก่อนถึงพิกัด เป็นต้น สิ่งเหล่านี้ถือว่าเป็นปัญหาทางด้านคุณภาพไฟฟ้า ซึ่งจะต้องทำการปรับปรุงให้ดีขึ้น



รูปที่ 4.44 โครงสร้างของวงจรกำลัง 4 Quadrant Thyristor DC Drives

รูปที่ 2.19 โครงสร้างของวงจรกำลัง

จากรูป ได้แสดง โครงสร้างพื้นฐานของระบบ AC Drive และ DC Drive ที่นิยมใช้กันถือได้ว่าเป็นแบบมาตรฐานซึ่งต่างก็ได้รับกำลังงานจากแหล่งจ่ายที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เกิดการไหลของพลังงานเข้าสู่ระบบขับเคลื่อนซึ่งแสดงผลให้เป็นในรูปแรงดันและกระแสโดยที่มุมต่างเฟสของรูปคลื่นแรงดันและกระแสของระบบขับเคลื่อนทั้ง 2 ระบบแสดงได้ดังรูปที่ 4.46



รูปที่ 2.20 รูปคลื่นแรงดันและกระแส

ซึ่งปกติแล้ว Power Factor ของทั้ง 2 ระบบ จะแตกต่างกันตามลักษณะโครงสร้างและการทำงาน กล่าวคือ ในระบบ DC Drives ค่า Power factor จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-0.9 ขึ้นอยู่กับมุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ตามสมการที่ 1

$$PF = \frac{I_{S1}}{I_S} \cos \phi_1 \quad (19)$$

ϕ_1 = มุมต่างเฟสระหว่างแรงดันและกระแสที่ความถี่หลักมูล (มุมจุดชนวนไทรสเตอร์)

I_S = กระแสอินพุต rms

I_{S1} = กระแสอินพุต rms ที่ความถี่หลักมูล

โดยจะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบของมอเตอร์ เช่น ที่ความเร็วรอบต่ำๆ ค่า Power Factor จะมีค่าต่ำ และถ้าความเร็วรอบของมอเตอร์สูงขึ้นค่า Power factor ก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย หรือจะกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ในระบบ DC Drives ค่า Power Factor จะแปรผันตามความเร็วรอบของมอเตอร์ ในขณะที่ระบบ AC Drives ซึ่งใช้ Diode Bridge Rectifier 3 เฟส ค่า Power factor จะมีค่าประมาณ 0.95 และจะไม่เปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยที่ตัวเก็บประจุจะเป็นตัวจ่าย Reactive Power ให้กับมอเตอร์ซึ่งผลจาก Power factor ที่สูงขึ้นจะเป็นส่วนสำคัญทำให้ประสิทธิภาพของระบบจ่ายสูงขึ้น

2.9.1) ฮาร์โมนิก

วงจรในส่วนคอนเวอร์เตอร์นั้นจะบอกให้ทราบถึงอันดับของฮาร์โมนิกที่ฉีดออกมาจากระบบขับเคลื่อนทั้งระบบ DC Drive และ AC Drive โดยสามารถหาอันดับของฮาร์โมนิกได้ดังสมการที่ 2

$$h = kq \pm 1 \quad (20)$$

h = อันดับของฮาร์โมนิก

k = เลขจำนวนเต็ม (1,2,3,...)

q = จำนวนพัลส์

ตัวอย่างเช่น ถ้าวางจรในส่วนคอนเวอร์เตอร์เป็นแบบ 6 พัลส์ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 1 ก็จะทำให้ทราบว่าระบบดังกล่าวฉีดฮาร์โมนิกอันดับที่ 5,7,11,13,15,17,19,... ออกมาสู่แหล่งจ่าย ดังนั้นการเพิ่มจำนวนพัลส์ในส่วนวงจรคอนเวอร์เตอร์ก็จะเป็นวิธีการหนึ่งในการลดฮาร์โมนิกที่จะส่งผลกระทบต่อแหล่งจ่ายอินพุตได้

2.9.2) ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกทั้งหมด

ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกทั้งหมดเป็นปริมาณของฮาร์โมนิกที่มีอยู่ทั้งหมด โดยเปรียบเทียบกับค่า rms ของส่วนประกอบความถี่หลักมูล ซึ่งแบ่งออกได้ดังนี้

1. ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกทั้งหมด (Total Harmonic Distortion Voltage: THD_v)
2. ค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกทั้งหมด (Total Harmonic Distortion Current: THD_i)

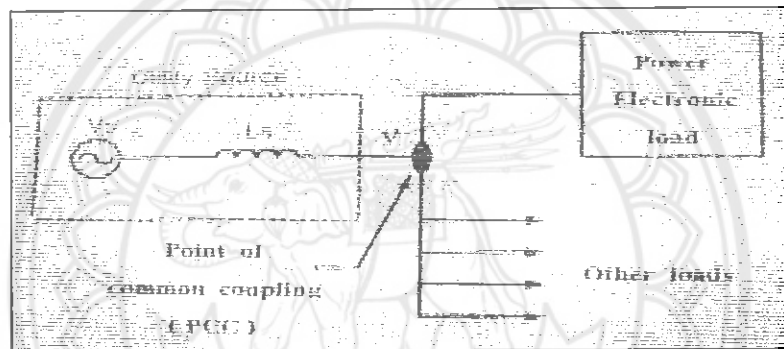
ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกทั้งหมดของแรงดันและกระแสอินพุตจะบอกออกมาในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์ของค่า rms ที่ส่วนประกอบความถี่หลักมูล โดยเขียนให้อยู่ในรูปสมการ ได้ดังนี้

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad (21)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (22)$$

2.9.3) มาตรฐานเกี่ยวกับฮาร์มอนิก

มาตรฐานที่บอกถึงขีดจำกัดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกทั้งหมดที่ยอมรับได้ ณ จุดต่อร่วมระหว่างกริดไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า (PCC) ได้แก่มาตรฐาน IEEE 519-1992 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่กำหนดเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกทั้งหมด ทั้งขีดจำกัดแรงดันและขีดจำกัดกระแสที่ยอมรับได้ ณ จุด PCC ดังรูปที่ 4.47



รูปที่ 2.21 รูปไดอะแกรมแสดงจุดต่อร่วม (PCC) ตามมาตรฐาน IEEE 519-1992

ตารางที่ 9 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิก (แรงดัน 120 V ถึง 69 kV)

I_{sc} / I_1	Odd Harmonic Order h (%)					Total Harmonic Distortion (%)
	$h < 11$	$1 < h < 17$	$7 < h < 23$	$23 < h < 35$	$35 < h$	
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

เมื่อ I_{sc} คือ กระแสลัดวงจรที่จุด PCC

I_1 คือ ความต้องการกระแสสูงสุดที่ความถี่หลักมูล

ตารางที่ 10 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิก

.....	69 kV	69-138 kV	>138 kV
Maximum for Individual Harmonic	3.0	1.5	1.0
Total Harmonic Distortion	5.0	2.5	1.5

จากตารางที่ 16 เป็นขีดจำกัดความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกทั้งหมดของระบบซึ่งเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกที่ยอมรับได้ที่จุด PCC จะมีค่าสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับอัตราส่วน I_{SC} / I_1 ของระบบอยู่ระดับใด ในขณะที่ I_{sc} คือค่ากระแสลัดวงจรที่จุด PCC ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของแปลงจ่าย (Ls) ตัวอย่างเช่น ระบบดังรูปที่ 4.47 มีค่ากระแสลัดวงจรที่จุด PCC เท่ากับ 2500 A และมีความต้องการสูงสุด 100 A ดังนั้นจะได้ I_{SC} / I_1 เท่ากับ 25

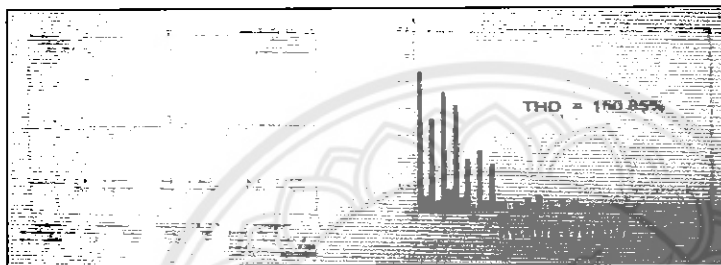
เมื่อตรวจสอบตารางที่ 16 สามารถบอกเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกที่อันดับต่างๆ ได้ดังนี้

1. เปอร์เซนต์ความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 3,5,7 และ 9 จะต้องไม่เกิน 7 %
2. เปอร์เซนต์ความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 11,13 และ 15 จะต้องไม่เกิน 3.5 %
3. เปอร์เซนต์ความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 17,19 และ 21 จะต้องไม่เกิน 2.5%
4. เปอร์เซนต์ความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 23,25,27, และ 33 จะต้องไม่เกิน 1 %
5. เปอร์เซนต์ความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 35 จะต้องไม่เกิน 0.5 %
6. แต่เปอร์เซนต์ความผิดเพี้ยนรวมจาก 1-5 จะต้องไม่เกิน 8 %

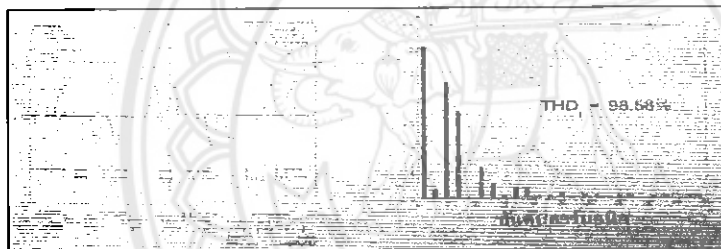
ส่วนในตารางที่ 17 เป็นขีดจำกัดความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกทั้งหมดที่ยอมรับได้ที่จุด PCC จะพบว่าเปอร์เซนต์ความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกจะแบ่งตามระดับแรงดันของระบบ ซึ่งในการหาค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกจะไม่ซับซ้อน ดังเช่น การหาค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกที่ระดับแรงดัน 120 V – 69 kV เปอร์เซนต์ความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกสูงสุดแต่ละอันดับจะต้องไม่เกิน 3% แต่รวมทั้งหมดทุกอันดับจะต้องไม่เกิน 5%

2.9.4) ขนาดของภาระส่งผลต่อกระแสอินพุต

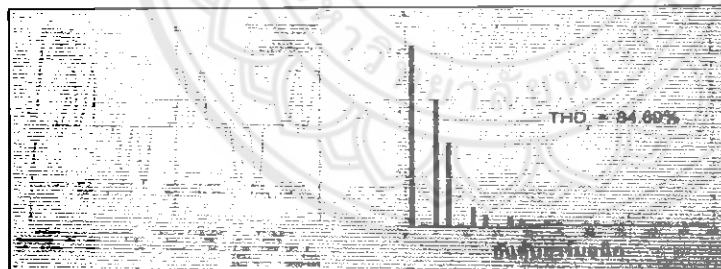
ขนาดภาระของระบบ DC Drive และ AC Drive จะมีผลต่อรูปคลื่นกระแสอินพุต กล่าวคือ ในขณะที่มีภาระหรือภาระต่ำๆ รูปคลื่นของกระแสจะมีความไม่ต่อเนื่อง แต่เมื่อเพิ่มภาระให้กับระบบขับเคลื่อนรูปคลื่นกระแสจะมีความต่อเนื่องมากยิ่งขึ้น ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าในขณะที่ไม่มีภาระหรือภาระต่ำๆ กระแสที่อินพุตก็จะต่ำ แต่เมื่อภาระเพิ่มมากขึ้นทำให้กระแสอินพุตเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และจึงทำให้กระแสความต่อเนื่องมากยิ่งขึ้น ดังรูปที่ 4.48 เป็นผลทางปฏิบัติที่ทำการเปรียบเทียบกระแสอินพุตและ Spectrum เมื่อภาระต่างกันของระบบ AC-Drive



(ก) ภาระไม่มีภาระ



(ข) ภาระที่ 50 %

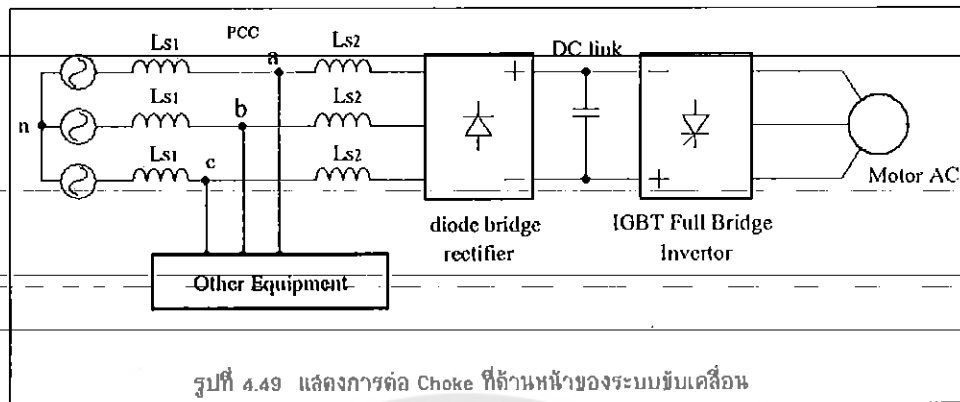


(ค) ภาระ 100 %

รูปที่ 2.22 รูปกระแสอินพุต 5 A/div และ Spectrum ของระบบขับเคลื่อน

จากรูปที่ 4.48 (ก) แสดงรูปกระแสอินพุตในขณะที่ระบบขับเคลื่อนไม่มีภาระจะพบว่าค่า THDi สูงถึง 150.85 % แต่เมื่อเพิ่มภาระให้กับระบบขับเคลื่อนทำให้ค่า THDi จะลดลงนั้นก็แสดงว่าเมื่อภาระของระบบขับเคลื่อนสูงขึ้นก็จะทำให้รูปคลื่นกระแสอินพุตมีการผิดเพี้ยนลดลง แต่ก็ยังคงสูงกว่าขีดจำกัดของมาตรฐานที่กำหนดไว้

2.9.5 ผลจากการต่อไอ้ค (Choke)



จากรูปที่ 4.49 L_{s1} เป็นค่าอินดักแตนซ์ของแหล่งจ่ายในขณะที่ L_{s2} เป็นไอ้คที่ต่อเพิ่มเข้าไป เพื่อลดผลกระทบของวงจรเรียงกระแส และแรงดันที่จุด a, b และ c เป็นจุดที่ต่อใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ การต่อไอ้ค (Choke, L_{s2}) เข้าไปที่ด้านหน้าของระบบขับเคลื่อนก็เพราะคุณสมบัติของอินดักเตอร์จะทำให้กระแสไม่เปลี่ยนแปลงทันทีทันใด จึงทำให้รูปคลื่นกระแสมีความต่อเนื่องและเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์มากยิ่งขึ้นซึ่งถือว่าเป็นการกรองฮาร์มอนิก โดยที่ไอ้คที่ต่อเข้าไปนั้นตามมาตรฐาน VDE ควรค่าไม่ต่ำกว่า 5% ของ Base Impedance ของระบบขับเคลื่อน ซึ่งสามารถคำนวณหาอินดักแตนซ์ได้ดังสมการที่ 5

$$L_{S2} \geq 0.05 \frac{V_{LL}}{\sqrt{3\omega I_{al}}} \quad (23)$$

V_{LL} = แรงดัน Line to Line (V)

I_{al} = กระแสอินพุตที่ความถี่มูลฐาน (A)

L_{s2} = ค่าอินดักแตนซ์ของ Choke (H)

ผลจากการต่อไอ้คเข้าไป นอกจากทำให้รูปคลื่นกระแสเข้าใกล้ รูปคลื่นไซน์แล้วยังทำให้เปอร์เซ็นต์การบิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกลดลง 30-40 % จึงส่งผลดีต่อแหล่งจ่ายอินพุตในแง่ของคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่ดีขึ้น แต่เมื่อทำการพิจารณาถึงกรณีที่แหล่งจ่ายมีค่าอิมพีแดนซ์อยู่ด้วยและการต่อไอ้คเข้าไปที่ด้านหน้าของระบบขับเคลื่อนจะต้องพิจารณาผลของการขาดหาย (Notching) ของรูปคลื่นแรงดันแต่ละเฟสด้วยเนื่องจากผลของ L_s ทำให้เกิดการสับเปลี่ยนการนำกระแสของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งในวงจร Converter เป็นผลทำให้รูปคลื่นแรงดันที่จุด a, b และ c ที่ต่อใช้งานร่วมกับระบบอื่นๆ (PCC) บิดเพี้ยนไป ซึ่งเปอร์เซ็นต์การบิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันที่จุด

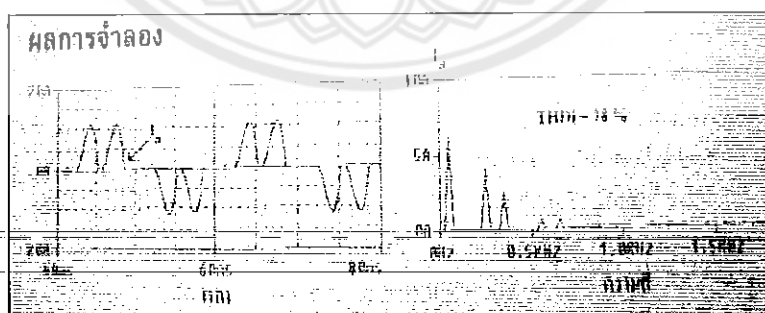
ดังกล่าวจะมีค่าสูงหรือต่ำจะเป็นไปตามแฟกเตอร์ ρ และโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 10-50 % และ $L_{s2} > L_{s1}$ เขียนให้อยู่ในรูปสมการดังนี้

$$\rho = \frac{L_{s1}}{L_{s1} + L_{s2}} \times 100\% \quad (24)$$

จากสมการที่ 5 ถ้าหาก ρ มีค่าต่ำจะทำให้ค่า THDv ของแรงดันที่จุด a, b และ c ต่ำและถ้า ρ สูงค่า THDv ก็จะสูงตามไปด้วยหรือจะกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ค่า THDv ของแรงดันที่ จุด a, b และ c จะแปรผันตาม ρ ดังนั้นในการลดค่า THDv ถ้าดูจากสมการแล้วสามารถทำได้ 2 กรณีคือ ลดค่าอินดักแตนซ์ของแหล่งจ่าย (L_{s1}) ลงซึ่งทำได้ค่อนข้างลำบาก หรือเพิ่มค่าอินดักแตนซ์ (L_{s2}) ที่ต่อเพิ่มเข้าไปให้สูงยิ่งขึ้น

ซึ่งโดยส่วนใหญ่มักจะไม่นิยรมค่าอินดักแตนซ์ของแหล่งจ่ายที่แน่นอนแต่ก็สามารถหาค่า L_{s2} ได้โดยที่เมื่อคำนวณหาค่า L_{s2} ได้มาแล้วยังคงทำให้ $L_{s2} > L_{s1}$ นั่นคือในลำดับแรกที่ยังไม่ได้ต่อ L_{s2} เข้าไปค่ากระแสที่ความถี่หลักมูลที่จ่ายเข้าวงจร Converter (I_{a1}) ก็จะเป็นค่าที่ได้จากผลของอินดักแตนซ์ของแหล่งจ่าย (L_{s1}) เมื่อแทนค่า I_{a1} ลงในสมการที่ 5 ก็จะได้ค่าอินดักแตนซ์ที่ต้องต่อเข้าไปซึ่งจะเป็นไปตามมาตรฐาน VDE ที่กำหนดไว้ ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ THDv ของแรงดันที่จุด a, b และ c ไม่เกินขีดจำกัดตามมาตรฐาน IEEE 519-1992

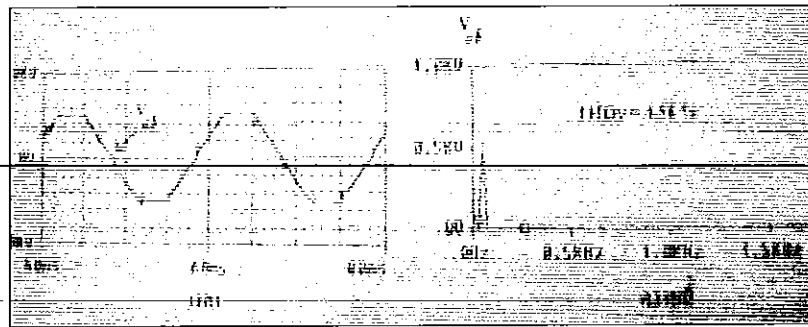
2.9.6) ผลการจำลอง



(ก) กระแสอินพุต

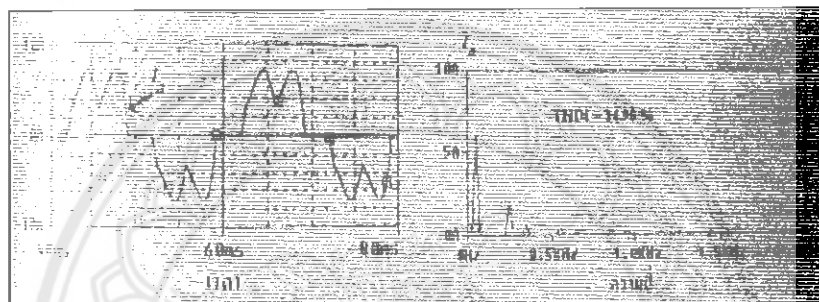
(ข) กระแสฮาร์โมนิก

รูปที่ 2.23 แสดงผลจากการจำลองเมื่อยังไม่ต่อ L_{s2}



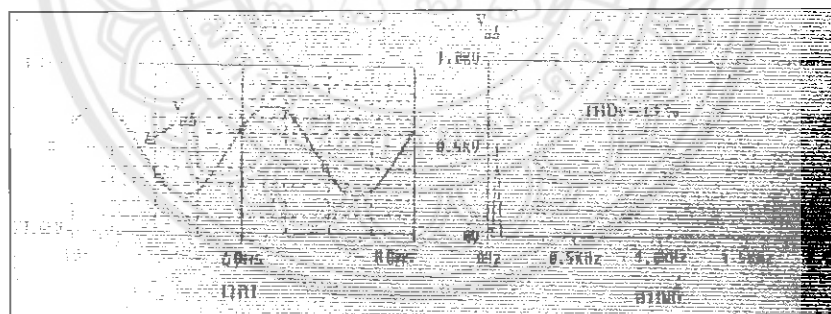
(ก) แรงดัน Line ที่จุด PCC (ข) ฮาร์มอนิกสเปกตรัม

รูปที่ 2.24 แสดงผลจากการจำลองเมื่อยังไม่ต่อ $Ls2$



(ก) กระแสอินพุต (ข) ฮาร์มอนิกสเปกตรัม

รูปที่ 2.25 แสดงผลจากการจำลองเมื่อต่อ $Ls2$



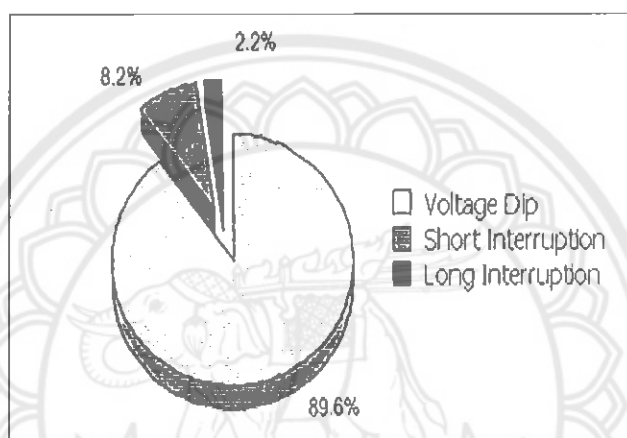
(ก) แรงดัน Line ที่จุด PCC (ข) ฮาร์มอนิกสเปกตรัม

รูปที่ 2.26 แสดงผลจากการจำลองเมื่อต่อ $Ls2$

ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อค่า $Ls2$ เข้าไปแล้วทั้งกระแสอินพุตและแรงดัน Line จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมลดลง และทำให้ทั้งรูปคลื่นกระแสอินพุตและแรงดัน Line เข้าใกล้รูปไซน์มากยิ่งขึ้น จึงส่งผลดีต่อแหล่งจ่ายอินพุตทั้งกรณีที่มีปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่ฉีดเข้าสู่ระบบ จากภาระที่เป็นระบบขับเคลื่อนลดลง และรูปคลื่นแรงดันที่จุด PCC ซึ่งต่อร่วมกับภาระประเภทอื่นๆ เข้าใกล้รูปไซน์มากยิ่งขึ้นจึงทำให้คุณภาพไฟฟ้าที่จุด PCC ดีขึ้นเมื่อภาระเป็นระบบขับเคลื่อน

2.10) ผลกระทบของ Voltage (Dip) ต่ออุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

จากประสบการณ์ของผู้เขียนที่ได้เคยทำการตรวจสอบ วิเคราะห์และแก้ไขปัญหากระแสไฟฟ้าขัดข้องที่ได้รับการร้องเรียน โดยเฉพาะจากลูกค้าประเภทธุรกิจอุตสาหกรรมของการไฟฟ้าฯ นั้นพบว่า ปัญหาส่วนใหญ่ที่ทำให้กระบวนการผลิตต้องหยุดชะงักลงนั้น จะมีสาเหตุมาจาก Voltage Sag ซึ่งผลของ Voltage Sag ที่เกิดขึ้นและเป็นประเด็นหลักที่ทำให้กระบวนการผลิตต้องหยุดชะงัก ก็เกิดจากการที่อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ ทั้งแบบ AC และ DC (Adjustable Speed AC-DC Drives) มีผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในระดับตั้งแต่เป็นมิลลิวินาทีเป็นต้นไป



รูปที่ 2.27 แสดงเปอร์เซ็นต์จำนวนผู้ประกอบการอุตสาหกรรมที่ได้รับผลกระทบต่อ Voltage

2.10.1) อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ (Adjustable Speed Drives: ASD)

ปัจจุบันได้มีการนำอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์(บางครั้งก็มีการเรียกว่า Inverter บ้าง Drive บ้าง หรือ ASD บ้างก็ตามแต่ความคุ้นเคย แต่ผู้เขียนจะขอเรียกสั้น ๆ ว่า Drive) มาใช้กันอย่างกว้างขวาง

เจ้าตัว Drive นี้ส่วนใหญ่ก็จะเป็นที่ทราบและรู้จักกันเป็นอย่างดีแล้ว เนื่องจากปัจจุบันในโรงงานทั่วไปก็จะมี Drive ทั้งแบบ AC และ DC เป็นตัวควบคุมการทำงานของมอเตอร์ โดยเฉพาะโรงงานที่ใช้มอเตอร์จำนวนมาก เป็นอุปกรณ์หลักในการขับเคลื่อนสายพาน หรือกระบวนการผลิตเช่น โรงงานกระดาษ, โรงงานทอผ้า หรือโรงงานที่ประกอบกิจการประเภทโรงงานน้ำแข็ง ฯลฯ ทั้งที่มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมความเร็วรอบที่เกี่ยวกับกระบวนการผลิตจริง ๆ หรือมีวัตถุประสงค์เพื่อการประหยัดพลังงานก็ตาม

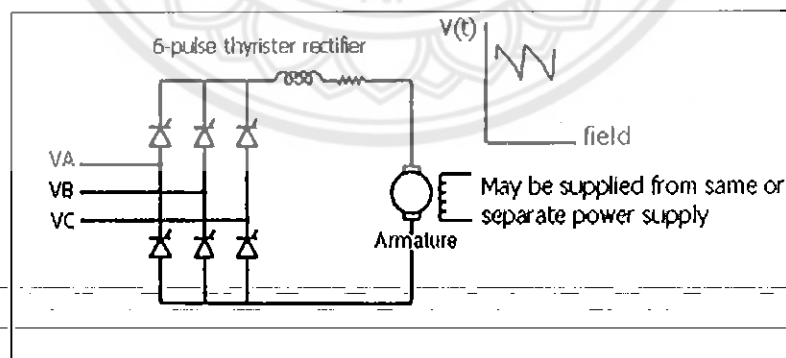
2.10.2) ลักษณะโดยทั่วไปของ Drive แบบต่าง ๆ

1) . DC Drive

จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่า DC Drive นั้นจะประกอบด้วยวงจรควบคุมหลักคือวงจร Rectifier เท่านั้น นอกจากนั้นก็จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ควบคุมอื่น ถ้าเราจะเปรียบเทียบกับ AC Drive แล้วก็จะพบว่า DC Drive จะสามารถควบคุมความเร็วรอบได้อย่างกว้างขวางมากกว่า ทั้งยังให้แรงบิดเริ่มต้น (Starting Torque) มากกว่า AC Drive อีกหลายเท่า อย่างไรก็ตามราคาของ DC Drive และค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงก็จะมากกว่า AC Drive หลายเท่าตัวด้วยเช่นกันดังนั้นการพิจารณาซื้อ DC Drive สักตัวเพื่อที่จะนำมาใช้งานนั้นก็จะต้องนำคุณสมบัติเด่นในข้างต้น เป็นเหตุผลหลักในการจัดซื้อต่อไป

DC Drive จะใช้วงจร Rectifier เป็นวงจรเรียงกระแสแบบ 6 Pulse หรืออาจเป็นแบบ 12 Pulse (ขึ้นอยู่กับขนาด) ซึ่งวงจร Rectifier แบบ 12 Pulse นั้นก็จะสามารถลดภาระการทำงานของ Thyristor โดยจะลดกระแสที่ผ่านตัว Thyristor และด้วยคุณสมบัติดังกล่าว ก็ยังจะทำให้กระแส Harmonic ลดลงอีกด้วย

วงจร Rectifier แบบ 6 Pulse จะทำให้เกิด Current Harmonic สูงที่ Harmonic ลำดับที่ 5 และ 7 ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า แต่สำหรับวงจร Rectifier 12 Pulse จะทำให้ Current Harmonic ที่ลำดับดังกล่าวลดลงมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ (ขึ้นอยู่กับความสมดุลของกระแสไฟฟ้าของระบบไฟฟ้านั้น ๆ ด้วย) อย่างไรก็ตามราคาของ Rectifier 12 Pulse นั้นก็จะมีราคาที่สูงมากกว่า

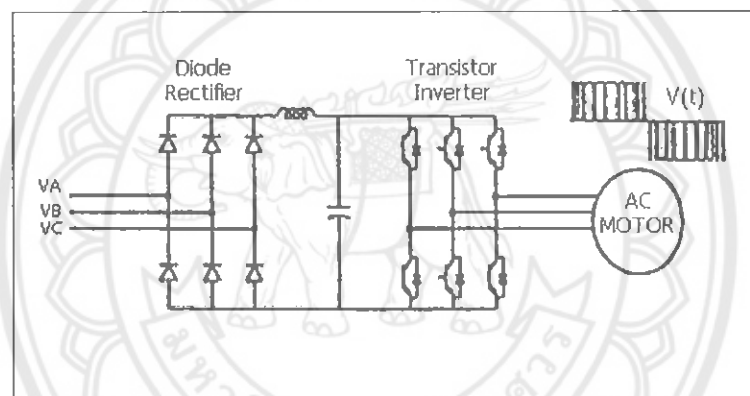


รูปที่ 2.28 วงจร Rectifier แบบ 6 Pulse สำหรับ DC Drive

ในตัว AC Drive วงจร Rectifier ที่เรียงกระแสให้เป็น DC จะถูกเปลี่ยนให้เป็น AC ที่ความถี่ต่าง ๆ และถูกส่งออกไปทางด้าน Output สำหรับการควบคุมมอเตอร์ วงจรแปลงกระแส DC เป็นกระแส AC (Inverter) ในตัว AC Drive สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

ได้แก่ Voltage Source Inverter (VSI) และ Current Source Inverter (CSI) ชุด Inverter แบบ VSI นั้นจะต้องการความราบเรียบของ DC ทางด้าน Input ของ Inverter มากกว่า ดังนั้นวงจร LC Filter ใน DC Bus หรือ DC Link ของ Inverter แบบ VSI จึงมีความจำเป็น แต่สำหรับชุด Inverter แบบ CSI จะต้องการความคงที่ของกระแส (Constant Current) ด้าน Input ของ Inverter มากกว่า ดังนั้น Series Inductor ใน DC Link จึงต้องถูกบรรจุไว้สำหรับ AC Drive แบบที่ใช้ชุด Inverter แบบ CSI ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

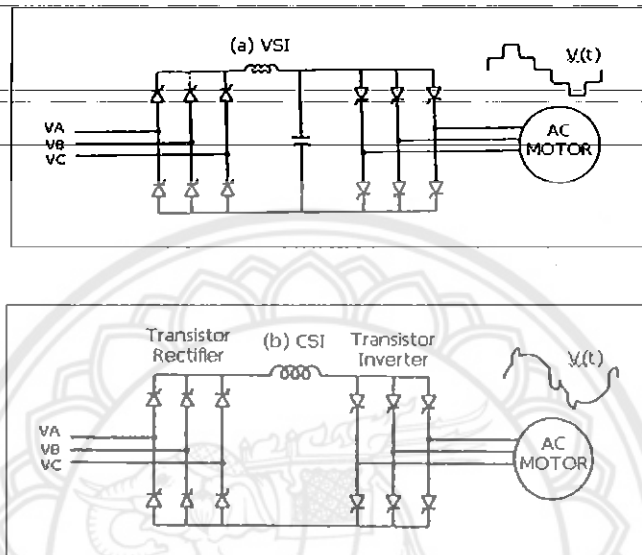
โดยทั่วไปแล้ว AC Drive จะถูกนำไปใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Motor) ในงานที่ไม่ต้องการความเร็วรอบที่คงที่มากนักขณะเดียวกันมอเตอร์แบบนี้ จะมีราคาที่ค่อนข้างถูก และ AC Drive จะถูกนำมาใช้กับซิงโครนัสมอเตอร์ ในกรณีที่งานต้องการความเร็วรอบที่คงที่



รูปที่ 2.29 แสดงรูปวงจร AC Drive แบบ PWM

AC Drive ส่วนใหญ่จะเป็น Inverter แบบ VSI โดยใช้เทคนิค PWM (Pulse-Width Modulation) ในการจัดการแรงดันกระแสสลับด้าน Output ของ Drive ให้เป็นความถี่ต่าง ๆ ในการควบคุมมอเตอร์ (ตามรูปที่ 3) โดย Inverter จะใช้ SCR หรือ Gate Turn Off Thyristor (GTO Thyristor) หรือ Power Transistor ในการจัดการ นอกจากนี้วงจร VSI PWM ยังมีคุณสมบัติเด่นด้านการประหยัดพลังงาน และสามารถในการควบคุมความเร็วรอบได้อย่างหลากหลาย แต่ใน AC Drive ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น วงจร Rectifier จะใช้ SCR แบบ 6 Pulse เป็นตัวควบคุม จากรูป 4 (a) เป็น VSI Drive ที่มีวัตถุประสงค์การใช้งานที่ไม่ต้องการการเปลี่ยนแปลงความเร็วมากนัก

สำหรับ CSI Drive (ตามรูป 4 (b)) เหมาะสำหรับโหลดที่ต้องการการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบบ่อยครั้ง และเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตาม CSI Drive นั้นก็ยังต้องการการติดตั้ง Inductive เพื่อป้องกันแรงดันไฟฟ้าสูงเกินชั่วขณะ (Voltage Spike) ซึ่งก็จะทำให้ราคาสูงขึ้นไปอีก



รูปที่ 2.30 แสดง VSI Drive และ CSI Drive

2.10.3) ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าต่อ Drive

โดยส่วนใหญ่คุณลักษณะของ Drive โดยทั่วไปจะมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าสูง โดยเฉพาะเรื่อง Voltage Sag เมื่อเกิดเหตุการณ์ Voltage Sag ขึ้นก็จะเกิดปรากฏการณ์ที่ทำให้ Drive หยุดการทำงานลงดังนี้

- ชุด Controller หรือชุด Voltage Protection ของ Drive สามารถตรวจจับสภาวะผิดปกติของแรงดัน (Voltage Sag) ได้และตัดไฟเลี้ยงด้าน Input ออกทันทีเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับอุปกรณ์ Power Electronics

- ขณะเกิด Voltage Sag จะทำให้แรงดันกระแสตรงภายใน (DC Bus) ลดลงต่ำกว่าค่าที่กำหนด ส่งผลให้ชุด Controller เองหรือวงจรชุด PWM Inverter ทำงานผิดพลาด

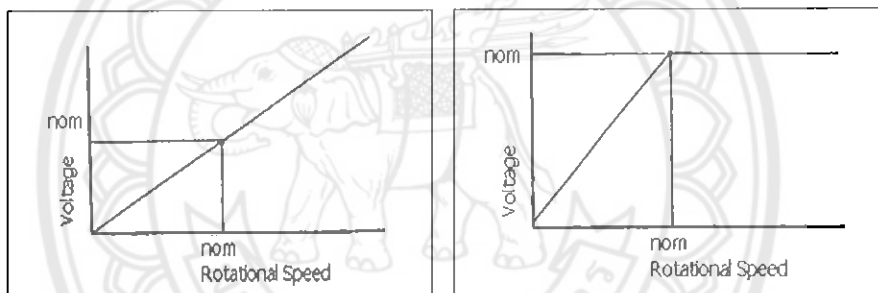
- การเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับด้าน Input ขณะเกิด Voltage Sag (AC Current) หรือกระแสไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดสูงเกิน ซึ่งเป็นกระแสชาร์จของ Capacitor ภายในตัว Drive (Over Currents Charging DC Capacitor) หลังจากแรงดันกลับสู่สภาวะ

(Post-Sag) จะทำให้เกิดสถานะกระแสสูงเกินจนทำให้ฟิวส์ป้องกันชุด Power Electronics ขาด และทำให้ Drive หยุดการทำงานลง

- เกิดสถานะความเร็วรอบตกต่ำหรือทอร์คของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงมากจนไม่สามารถทำงานต่อไปได้ ความเร็วของมอเตอร์จะถูกควบคุมจากขนาดของแรงดัน และความถี่ที่ถูกส่งมาจาก Out Put ของตัว Drive ซึ่งเรียกว่า Voltage Source Converter (VSC) สำหรับ AC มอเตอร์นั้น ความเร็วรอบจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันที่สเตเตอร์ที่ความถี่ที่เปลี่ยนแปลง โดยความเร็วของมอเตอร์และทอร์คจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความถี่ที่มีความสัมพันธ์กันตามรูปที่ 5 และตามสมการ

$$T_{\max} \approx \frac{V^2}{f^2}$$

(25)

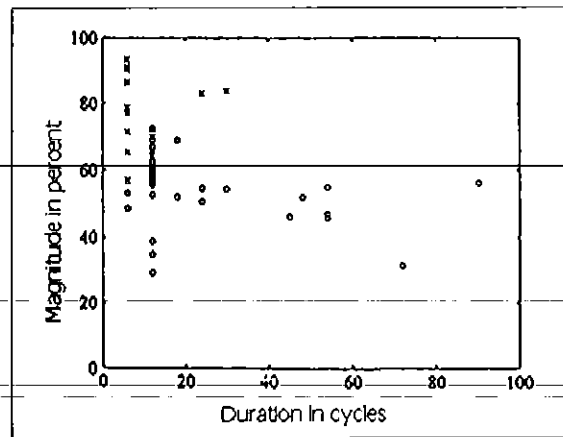


รูปที่ 2.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่, แรงดัน และความเร็วรอบของ Drive

กรณีที่ดินแรงดันและความถี่มีค่าเท่ากันจะทำให้ค่าทอร์คมีค่าสูงมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม ถ้ามีความต้องการเพิ่มความเร็ว จะทำให้ค่าทอร์คลดลงอย่างรวดเร็วด้วยเช่นกัน

2.10.4) ผลการทดสอบ Drive ที่การเปลี่ยนแปลงของแรงดันระดับต่าง ๆ

จากผลการทดสอบ Drive ที่โรงงานแห่งหนึ่ง ตามรูปที่ 6 วงกลมหมายถึงเปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าที่ลดลง และระยะเวลาที่ Drive หยุดการทำงาน กากบาทหมายถึง เปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าที่ลดลง และระยะเวลาที่ Drive ยังสามารถทำงานได้ตามปกติ ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นว่า Drive ที่ใช้ที่โรงงานแห่งนี้ค่อนข้าง Sensitive มากโดยประมาณ 80 % ถ้าเกิดเหตุการณ์ Voltage Sag ยาวนานกว่า 6 ไซเคิล Drive จะหยุดการทำงานทันที ซึ่งจะเห็นได้ว่า Drive นั้นจะมีผลตอบสนองต่อเหตุการณ์ Voltage Sag ที่ระยะเวลาสั้น ๆ



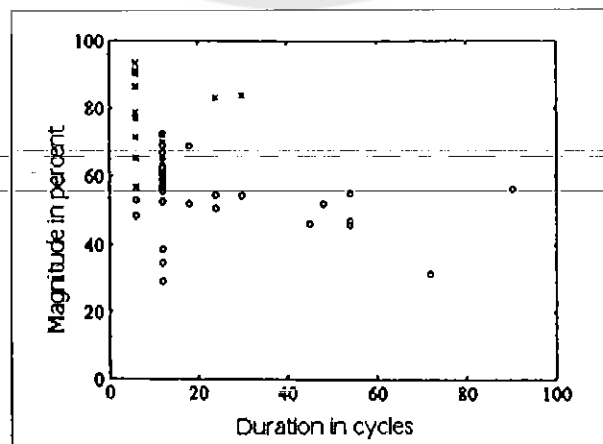
รูปที่ 2.32 แสดงผลการทดสอบผลตอบสนองต่อแรงดันของ Drive ที่โรงงานแห่งหนึ่ง

นอกจากนั้นได้มีการทดสอบผลตอบสนองต่อ Voltage กับ Drive ขนาด 20 แรงม้า และขนาด 3 แรงม้าจาก Drive หลากหลายผลิตภัณฑ์ โดยได้ทดสอบภายใต้เงื่อนไขดังนี้

- ทดสอบที่ขณะแรงดันเป็นศูนย์ ที่เวลา 33 มิลลิวินาที
- ทดสอบที่ขณะแรงดัน 50% ที่เวลา 100 มิลลิวินาที
- ทดสอบที่ขณะแรงดัน 70% ที่เวลา 1 วินาที

2.10.5) ผลการทดสอบสามารถแยกออกได้เป็นสามส่วนตามรูปที่ 4 ดังนี้

- I = ความเร็วของมอเตอร์จะลดลงเล็กน้อย แต่จะกลับเข้าสู่สภาวะปกติอย่างรวดเร็ว
- II = ความเร็วของมอเตอร์จะลดลงเป็นศูนย์ แต่หลังจากนั้น Drive จะมาทำงานเองโดยอัตโนมัติอีกครั้ง
- III = ความเร็วของมอเตอร์จะเป็นศูนย์ และ Drive จะไม่สามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง ซึ่งจะต้องมา ON ให้ Drive กลับมาทำงานอีกครั้ง



รูปที่ 2.33 รูปแบบผลการทดสอบที่ได้จาก Drive

ผลการทดสอบจะสรุปตามตารางที่ 1 โดยแต่ละคอลัมน์ จะแสดงจำนวนของ Drive ในแต่ละเงื่อนไขของการทดสอบ ตัวอย่างเช่นมี Drive ขนาด 20 แรงม้าตกอยู่ในผลการทดสอบที่ II ตามรูปที่ 4 ซึ่งเป็นผลการทดสอบโดยจ่ายแรงดัน 50% ระยะเวลาเป็นระยะเวลาสั้น 100 มิลลิวินาที เป็นจำนวน 4 ตัว และอีก 7 ตัวตกอยู่ในผลการทดสอบที่ III สำหรับตารางที่ 1 นี้เป็นการทดสอบ Drive ที่ขนาด 20 แรงม้าและ 3 แรงม้าขณะมีโหลดเต็มพิกัด

Applied Sag	Drive Performance					
	20 h.p. drives			3 h.p. drives		
	I	II	III	I	II	III
0% 33 ms	4	2	5	12	-	-
50% 100 ms	-	4	7	3	5	4
70% 1000 ms	-	5	6	1	7	4

ตารางที่ 1 แสดงผลการทดสอบ

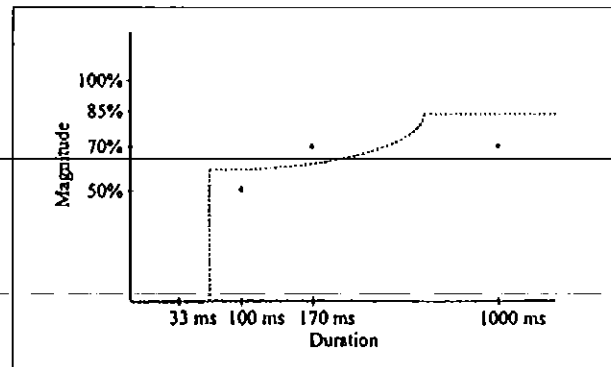
ตารางที่ 11 Drive Performance

สรุปผลการทดสอบตามตารางที่ 1

- Drive ขนาด 3 แรงม้าจะสามารถทนต่อความรุนแรงของ Voltage ได้ดีกว่า
- ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ไม่มากกว่า 30 มิลลิวินาที Drive ขนาด 3 แรงม้าก็จะสามารถทนได้ดีกว่าเช่นกัน
- ในกรณีที่เกิด Voltage นานกว่า 100 มิลลิวินาที Drive ส่วนใหญ่ไม่สามารถทนได้

2.10.6) การแก้ไขปัญหา

การหยุดการทำงานของ Drive ในกรณีเกิด Voltage นั้นส่วนใหญ่จะเกิดจาก DC Bus ภายในตัว Drive ตกต่ำจนชุดควบคุม PWM Inverter ไม่สามารถทำงานได้ เมื่อแรงดัน AC Input ตกต่ำ วงจร Rectifier จะหยุดทำงาน ชุดควบคุม PWM Inverter จะจ่ายพลังงานจาก Capacitor ที่ติดตั้งอยู่ที่ DC Bus ซึ่งก็จะสามารถหน่วงเวลาอยู่ได้นานสัก 1-2 Cycles เท่านั้น Drive ส่วนใหญ่จะติดตั้งฟิวส์อนุกรมไว้กับของวงจรเรียงกระแส การลดลงของแรงดัน จะส่งผลทำให้กระแสไฟกระแสตรง (DC Current) สูงขึ้นส่งผลทำให้ฟิวส์ภายในขาดซึ่งก็จะทำให้เกิดความยุ่งยากมากในการเปลี่ยนฟิวส์ใหม่ การเพิ่มขนาดของ Capacitor เป็นขนาดที่เหมาะสมนั้นก็ยังสามารถยืดเวลาการจ่ายพลังงานไปยังโหลดได้อีกระยะเวลาหนึ่ง



รูปที่ 2.34 แสดง DC Bus โดยที่เส้นประเป็นแรงดัน AC ด้าน Input และเส้นทึบเป็นแรงดัน DC Bus โดยเปรียบเทียบขณะเกิด Voltage Sag ที่ 50% และที่ 70% ตามลำดับ

เมื่อกำหนดให้ P เป็นโหลดของ Drive (หมายถึงมอเตอร์), กำหนดให้ VO เป็น DC Bus และ C เป็น Capacitor ที่ต่ออยู่ที่ DC Bus เราจะสามารถคำนวณหาค่าแรงดัน DC Bus ที่จะสามารถชดเชยได้จากสมการ

$$V(t) = \sqrt{V_0^2 - \frac{2P}{C}t} \quad (26)$$

ชุด Controller จะทำงานผิดปกติเมื่อแรงดัน DC Bus ตกต่ำกว่ากำหนดซึ่งเรียกว่า Vmin ดังนั้นจะสามารถหาค่าเวลาที่ Capacitor จะจ่ายแรงดัน DC Bus ไม่ให้มีค่าต่ำกว่า Vmin ได้จากสมการ

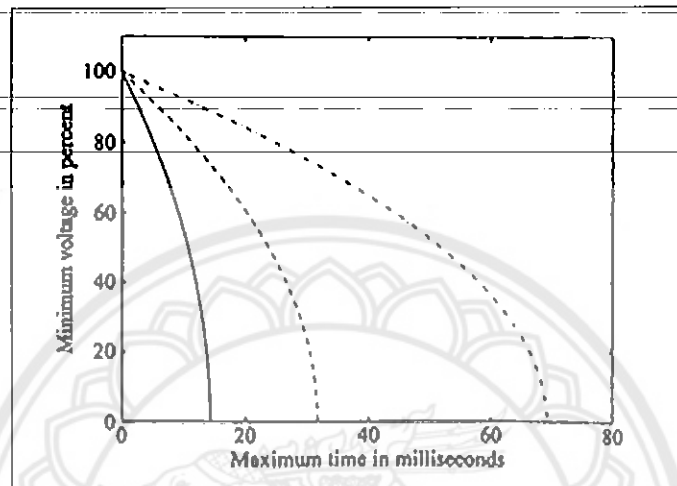
$$t = \frac{C}{2P} (V_0^2 - V_{\min}^2) \quad (27)$$

และค่า Capacitor ที่จะนำมาติดตั้งที่ DC Bus จะสามารถหาได้จากสมการ

$$C = \frac{2Pt_{\max}}{V_0^2 - V_{\min}^2} \quad (28)$$

ขนาดค่า Capacitance ที่ติดตั้งอยู่ที่ DC Bus สำหรับ Drive รุ่นใหม่ ๆ ในปัจจุบันนั้นจะมีอยู่ระหว่าง 75–360 mF/kW จากรูปที่ 9 จะแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัน DC Bus ที่มี (แกนตั้ง), ระยะเวลาที่ Drive จะทริป (แกนนอน) และค่า Capacitance ที่ติดตั้งเพื่อใช้

ย) หน่วยงานขนาดต่าง ๆ โดยเส้นที่บ่งหมายถึงขนาด Capacitor 75 mF/kW, เส้นประหมายถึง Capacitor ขนาด 165 mF/kW และเส้นจุดหมายถึง Capacitor ขนาด 360 mF/kW ซึ่งจะเห็นว่า การหน่วงเวลาการทริปของ Drive ออกไปโดยใช้ Capacitor ขนาดต่าง ๆ จะให้ผลของการหน่วงเวลาที่แตกต่างกันไป



รูปที่ 2.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดัน DC Bus ที่มี (แกนตั้ง), ระยะเวลาที่ Drive จะทริป (แกนนอน) และค่า Capacitance ที่ติดตั้งเพื่อใช้หน่วยงานขนาดต่าง ๆ

2.11) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

จากที่กล่าวมาโดยภาวะปกติการไฟฟ้าจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่เป็นรูปสัญญาณคลื่นไซน์ให้กับ โหลดประเภทต่างๆของผู้ใช้ไฟ แต่ในกรณีในระบบไฟฟ้าที่ผู้ใช้ไฟบางรายมีโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load) ซึ่งโหลดดังกล่าวเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกกระแสฮาร์มอนิกนั้นจะไหลเข้าสู่ระบบของผู้ใช้ไฟเองและระบบไฟฟ้าข้างเคียงผลของกระแสฮาร์มอนิกจะทำให้เกิดแรงดันในระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

จากรูปคลื่นไซน์ ค่าความเพี้ยนของแรงดันจะมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ และขนาดของกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่ต่างๆ ด้วยผลของกระแสฮาร์มอนิกดังกล่าวไหลเข้าสู่ระบบ โหลดเคียง อาจไป ดังนั้นเราจึงมีความจำเป็นต้องทราบว่าโหลดที่อยู่ในอาคารหรือโรงงานอุตสาหกรรม เรานั้น มีโหลดที่เป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์หรือไม่ และโหลดประเภทใดเป็นโหลดที่เป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์ เพื่อที่ทำความเข้าใจก่อนที่จะทำการแก้ไขและป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นจากฮาร์มอนิกส์ต่อไป เราสามารถแบ่งแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกตาม

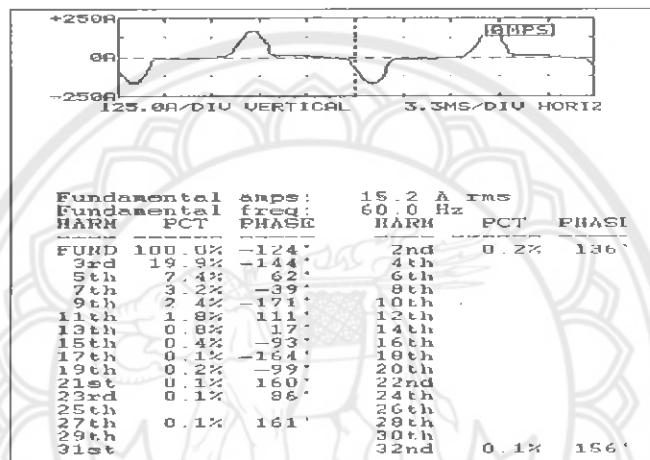
คุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ได้ดังต่อไปนี้

ระบบการทำงานหรือสร้างความเสียหายแก่อุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟรายอื่นๆและอุปกรณ์ในระบบของการไฟฟ้าได้

2.11.1) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีทั่วไปในบ้านพัก,สำนักงาน,ส่วนใหญ่เป็นชนิด 1 เฟส

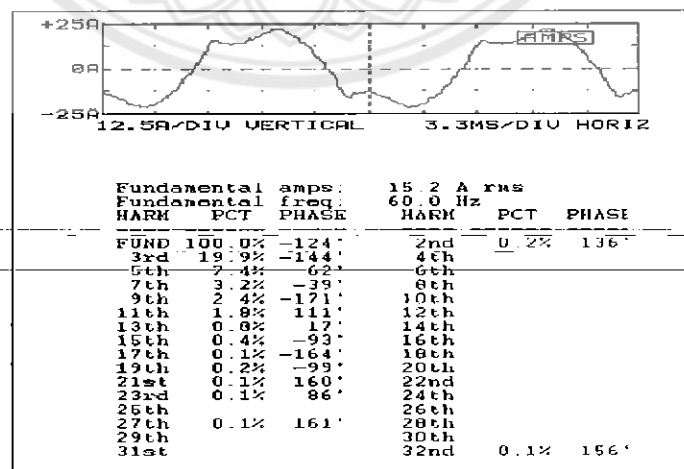
1.1 อุปกรณ์ที่มีการใช้แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตซ์ซิ่ง (SWITCHING MODE

POWER SUPPLY : SMPS) เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ (Computer)



ตารางที่ 12 อุปกรณ์สำนักงาน ชนิด 1 เฟส

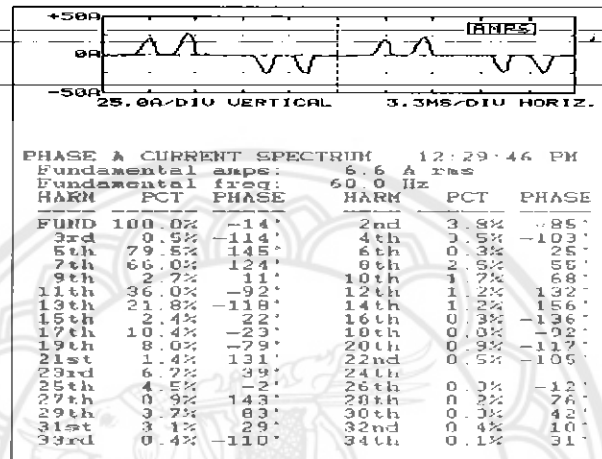
1.2 บาลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Ballast)



ตารางที่ 13 บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

2.11.2) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม

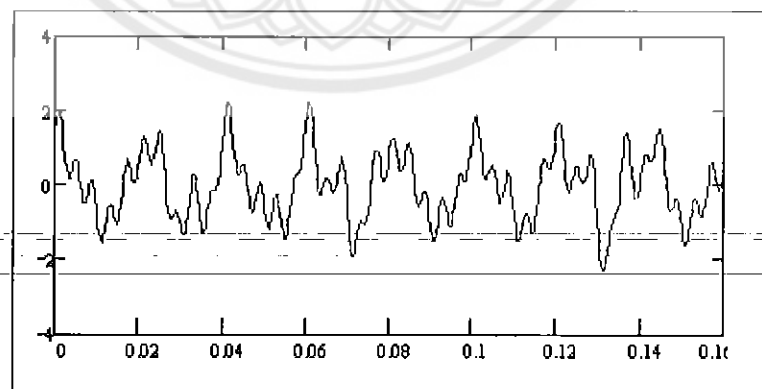
- 2.1 ตัวเรียงกระแสกำลัง (Power Rectifier)
- 2.2 เครื่องแปลงผันกำลังแบบสถิต (Static Power Converter :SPC)
- 2.3 ตัวโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (Logic Controller :PLC)
- 2.4 ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ (Adjustable Speed Drive :ASD)



ตารางที่ 14 ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้

2.11.3) อุปกรณ์ที่มีการทำงานประเภทอาร์ค

- 3.1 เตาหลอมแบบอาร์ค (Arc Furnace)
- 3.2 เตาหลอมแบบเหนี่ยวนำ (Induction Furnace)
- 3.3 เครื่องเชื่อมแบบอาร์ค/แบบสปอต (Arc Welding / Spot Welding)



2.11.4) อุปกรณ์ที่มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นของแรงดันและกระแสเนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็กทางแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer) และเครื่องกลไฟฟ้า (Electric Machine)

2.12) อินเวอร์เตอร์คืออะไร

ปัจจุบันอินเวอร์เตอร์ได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว และมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งหลายท่านได้ใช้ได้เข้าไปเกี่ยวข้องแต่ไม่ทราบว่าอินเวอร์เตอร์คืออะไรทำงานอย่างไร

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของเรา จึงได้เรียบเรียงขึ้นเป็นแนวทางเพื่อช่วยให้ผู้ใช้งานอินเวอร์เตอร์ ได้เกิดความเข้าใจหลักการทำงานพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์ ได้มากยิ่งขึ้น

อินเวอร์เตอร์คืออะไร?

อินเวอร์เตอร์ (inverter) หรือเรียกว่า เอซีไดรฟ์ (AC drives) คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับควบคุมความเร็วรอบ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำหรือเอซีมอเตอร์ (ซึ่งบางครั้งก็ถูกเรียกว่า "อะซิงโครนัส หรือมอเตอร์แบบกรงกระรอก")

ความเร็วรอบสามารถควบคุมได้อย่างไร ?

เนื่องจากความเร็วรอบของอินดักชันมอเตอร์ หรือมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับสมการความเร็วรอบหรือสมการซิงโครนัส-สปีดดังต่อไปนี้

$$\text{Synchronous speed (Ns)} = (120 * f) / P \quad (29)$$

โดยกำหนดให้: f = ความถี่กระแสไฟฟ้า
 P = จำนวนขั้วแม่เหล็ก

จากสมการสมซิงโครนัส-สปีดจะเห็นว่าความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถปรับเปลี่ยนได้ 2 เส้นทางคือ

1. เปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็ก (P) และ
2. เปลี่ยนแปลงความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้า (f)

ดังนั้นหากความถี่กระแสไฟฟ้ามีค่าคงที่คือ 50 Hz. (หรือ 60 Hz. ในบางประเทศ เช่นอเมริกา) ความเร็วรอบของมอเตอร์ แต่ละตัวก็จะมีความเร็วรอบที่แตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์แต่ละตัว ซึ่งสามารถสรุปได้ตามตารางดังนี้

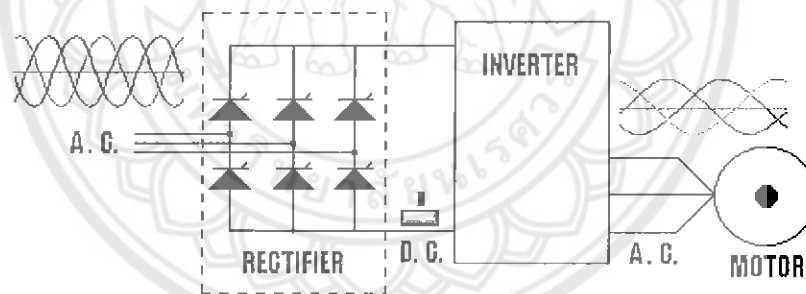
จำนวนขั้วแม่เหล็ก(P)	2	4	6	8	10	15
จำนวนรอบที่ความถี่ 50 Hz. (RPM)	3000	1500	1000	750	600	500
จำนวนรอบที่ความถี่ 60 Hz. (RPM)	3600	1800	1200	900	720	600

ตารางที่ 15 ตารางสรุปความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของมอเตอร์

จากตารางสรุปความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของมอเตอร์ที่มีจำนวนขั้วแม่เหล็กที่แตกต่างกัน จะเห็นว่า วิธีการควบคุมความเร็วรอบด้วยการเปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็กนั้น ความเร็วจะเปลี่ยนแปลงไป ครั้งละมาก ๆ เช่น เปลี่ยนจาก 3000 รอบต่อนาที ไปเป็น 1500 รอบต่อนาที หรือจาก 1500 รอบต่อนาที ไปเป็น 3000 รอบต่อนาที (กรณีเปลี่ยนจากการต่อแบบ 2 ขั้วแม่เหล็กไปเป็นการต่อแบบ 4 ขั้วแม่เหล็ก หรือจาก 4 ขั้วแม่เหล็กลดลงมาเหลือ 2 ขั้วแม่เหล็ก) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในลักษณะนี้ ความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลงจะไม่ละเอียด ,ทำได้เฉพาะในกรณีที่ไม่มีโหลด และที่สำคัญคือต้องใช้ มอเตอร์ที่ออกแบบพิเศษที่สามารถเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วแม่เหล็กได้เท่านั้น ทำให้ไม่เหมาะสมกับ ความต้องการของงานในหลาย ๆประเภทที่ต้องการควบคุมความเร็วรอบในขณะมีโหลดเพื่อให้ ความเร็วเหมาะสมกับความเร็วของกระบวนการผลิต ดังนั้นในกระบวนการผลิตทั่วไปจึงนิยมใช้ อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์มากกว่าเนื่องจากสามารถควบคุมให้มอเตอร์ด้วยความเร็วคงที่ ปรับความเร็วรอบไปที่ความเร็วต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็วและมีความเที่ยงตรงมากกว่า

อินเวอร์เตอร์ทำงานอย่างไร?

จากรูปบล็อกไดอะแกรมพื้นฐานอย่างง่าย ๆ ของอินเวอร์เตอร์ จะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ ๆ และมีการทำงานดังนี้



รูปที่ 2.36 การทำงานของอินเวอร์เตอร์

Rectifier circuit:

วงจรเรกติไฟเออร์ หรือวงจรเรียงกระแส : ทำหน้าที่แปลงคลื่นหรือเปลี่ยนจากแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วงจรประกอบด้วย เพาเวอร์ไดโอด 4 ตัว กรณีที่อินพุตเป็น แบบเฟสเดียว หรือมีเพาเวอร์ไดโอด 6 ตัว กรณีที่อินพุตเป็นแบบ 3 เฟส ดังรูป (สำหรับอินเวอร์เตอร์ บางประเภทจะใช้ SCR ทำหน้าที่เป็นวงจรเรกติไฟเออร์ซึ่งทำให้สามารถควบคุมระดับแรงดันในวงจร ดีซีลิงค์ได้)

DC..link:

ดีซีลิงค์ หรือ วงจรเชื่อมโยงทางดีซี คือวงจรเชื่อมโยงระหว่างวงจรเรียกกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ (ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป) ซึ่งจะประกอบด้วยแคปปาซิเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ พักตึงแรงดันไฟฟ้า 400 VDC หรือ 800 VDC โดยขึ้นอยู่กับแรงดันอินพุตว่าเป็นแบบเฟสเดียวหรือ 3 เฟส ทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงเรกติไฟเออร์ให้เรียบยิ่งขึ้น และทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้า ขณะ ที่มอเตอร์ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในช่วงสั้นเนื่องจากการเบรกหรือมีการลดความเร็วรอบลงอย่างรวดเร็ว (สำหรับกรณีที่ใช้ร่วมกับโหลดที่มีแรงเฉื่อยมาก ๆ และต้องการหยุดอย่างรวดเร็ว จะเกิดแรงดันสูงย้อนกับมาตกคร่อมแคปปาซิเตอร์และทำให้ แคปปาซิเตอร์เสียหาย ได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติจะมีวงจรชอปเปอร์โดยต่อค่าความต้านอนุกรมกับทรานซิสเตอร์ และต่อขนานกับแคปปาซิเตอร์ไว้ โดยทรานซิสเตอร์จะทำให้ที่เป็นสวิตช์ตัดต่อควบคุมให้กระแสไหลผ่านค่าความต้านทานเพื่อลดพลังงานที่เกิดขึ้น

Inverter circuit :

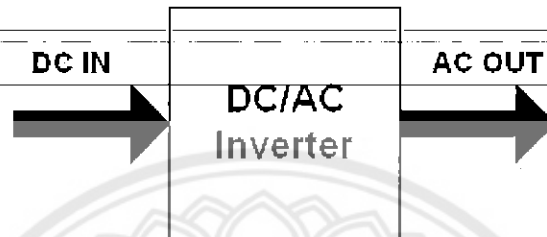
วงจรอินเวอร์เตอร์ คือส่วนที่ทำหน้าที่แปลงผันจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (ที่ผ่านการกรองจากวงจรดีซีลิงค์) เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรจะประกอบด้วยเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์กำลัง 6 ชุด (ปัจจุบันส่วนใหญ่จะใช้ IGBT) ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อกระแสไฟฟ้าเพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยอาศัยเทคนิคที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ PWM (Pulse width modulation)

Control circuit :

วงจรควบคุม จะทำหน้าที่รับข้อมูลจากผู้ใช้เช่น รับข้อมูลความเร็วรอบที่ต้องการเข้าไปทำการประมวลผล และส่งนำเอาที่พุดออกไปควบคุมการทำงานของทรานซิสเตอร์เพื่อจ่ายแรงดันและความถี่ให้ด้วยความเร็วรอบและแรงบิดตาม ที่ผู้ใช้งานต้องการ

ทำไมจึงต้องแปลงผันจาก ดีซีเป็น เอซี และแปลงผันกลับจากดีซีเป็นเอซีอีกครั้ง ? เนื่องจากการแปลงจากเอซีไปเป็นเอซี โดยตรงเลยนั้น ความถี่ทางด้านเอาต์พุดจะได้สูงสุดไม่เกินความถี่ทางด้านอินพุต ทำให้ไม่สามารถควบคุมความเร็วมอเตอร์ให้มีความเร็วมากกว่าความเร็วที่บอกไว้บนแผ่นป้ายของมอเตอร์ แต่การเปลี่ยนจาก เอซี ไปเป็น ดีซี และแปลงกลับมาเป็น เอซี อีกครั้งจะทำให้อินเวอร์เตอร์สามารถสร้างความถี่ได้สูงกว่าความถี่ทางด้านอินพุต

Inverter เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ที่ใช้สำหรับเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรง เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดย ไฟฟ้ากระแสตรงที่จะ นำมาทำการเปลี่ยนนั้นมาจาก แบตเตอรี่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง หรือแผงโซลาร์เซลล์ก็ได้ ไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้มานั้น จะเหมือนกับไฟฟ้าที่ได้จากปลั๊กไฟ ตามผนังบ้านทุกอย่าง โดย inverter ทำให้อุปกรณ์ต่างๆ เช่น มอเตอร์, พัดลม หรืออุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถใช้ได้ด้วยไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 2.37 DC/AC Inverter

Converter: เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ที่ใช้สำหรับเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดย ไฟฟ้ากระแสสลับที่จะ นำมาทำการเปลี่ยนนั้น มาจากแหล่งกำเนิด ไฟฟ้ากระแสสลับทั่วไป

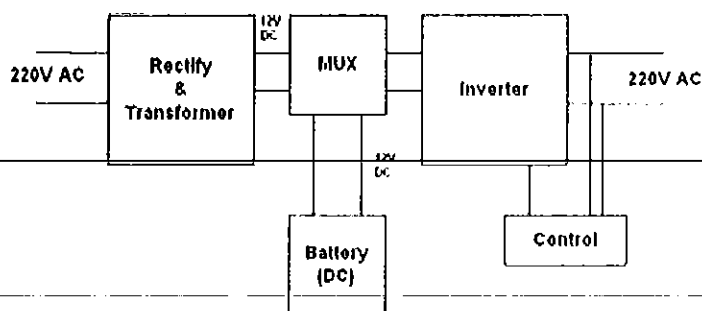


รูปที่ 2.38 AC/DC Converter

UPS (Uninterruptible Power Supply)

เนื่องจากในปัจจุบัน กระแสไฟฟ้าที่ใช้อยู่ไม่มีความแน่นอน และในอุปกรณ์ ที่ใช้ในธุรกิจที่สำคัญๆ จึงต้องการการป้องกันจาก ความผิดปกติของ กระแสไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดความเสียหาย ต่องานนั้นๆได้

UPS (Uninterruptible Power Supply) จึงเป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อ แก้ปัญหาเหล่านี้ อย่างเช่น ไฟเกิน, ไฟตก, ไฟดับ, คลื่นรบกวน โดยจะทำงานร่วมกับ แบตเตอรี่ที่จะจ่ายกระแสไฟฟ้าสำรองทันที ที่ไฟฟ้าเกิดดับ ซึ่งแบตเตอรี่นี้จะจ่ายไฟฟ้า ที่เพียงพอที่จะทำให้มีเวลา ในการรักษาข้อมูล และรักษาระบบ โดยมีหลักการทำงานดังรูป



รูปที่ 2.39 หลักการทำงานของ UPS

จากรูป กระแสไฟฟ้า 220 V AC จะจ่ายเข้าไปยังส่วน rectify และ transformer ในส่วนนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงจาก ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง แล้วลดระดับแรงดันไฟฟ้ามาให้เท่ากับแรงดันของแบตเตอรี่ โดยจะมี multiplexer ซึ่ง ที่สภาวะปกติ mux ตัวนี้ จะสวิตซ์ให้ไฟจาก rectify ผ่านออกไปยังอินเวอร์เตอร์ แต่ถ้ากระแสไฟฟ้าดับ mux จะทำ การสวิตซ์มาใช้ไฟจากแบตเตอรี่โดยทันที ต่อจากนั้น ไฟฟ้ากระแสตรงจะเข้าสู่อินเวอร์เตอร์โดยอินเวอร์เตอร์ก็จะเปลี่ยน ไฟกระแสตรงนั้นให้เป็นไฟกระแสสลับซึ่งปรับความถี่ได้โดยไฟกระแสสลับที่ออกมาจากอินเวอร์เตอร์ก็จะป้อนสู่เครื่อง ไฟฟ้าทั่วไปโดยที่ไฟกระแสสลับที่ได้ออกมาจะถูกนำไปป้อนกลับมาทำการเปรียบเทียบกับความถี่อ้างอิงค่าหนึ่งแล้วนำ ผลจากการเปรียบเทียบไปควบคุมการกำหนดความถี่ของอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ที่และถูกต้อง ตามที่เครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับต้องการ

2.13) Motor Control

มอเตอร์เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า ที่ใช้ในการแปลงพลังงานไฟฟ้า ไปเป็นพลังงานกล โดยนำพลังงานที่ได้ นี้ไปทำ การขับเคลื่อนเครื่องจักร อื่นๆต่อไป ความเร็วของมอเตอร์ สามารถกำหนดได้โดย

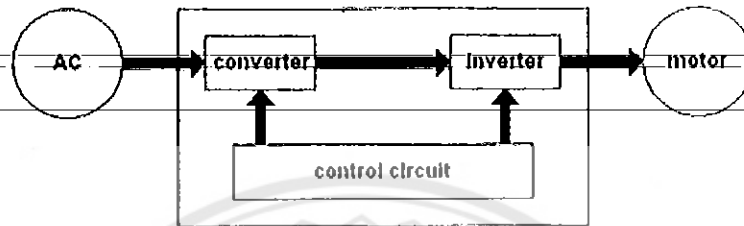
1. แรงบิดของโหลด
2. จำนวนขั้วของมอเตอร์
3. ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟที่ใช้กับมอเตอร์
4. แรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์

ความเร็วของมอเตอร์สามารถหาได้จากสูตร ดังต่อไปนี้

$$\text{ความเร็วรอบ } N = \{[120 * \text{ความถี่ } f (\text{Hz})] / \text{จำนวนขั้ว } P\} * (1-S) \quad (30)$$

โดยเทอม 1-S กำหนดโดยโหลด

จากสูตรข้างต้นจะพบว่า ถ้าความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ เปลี่ยนแปลงไปก็มีผลทำให้มอเตอร์ มีความเร็วเปลี่ยนแปลงได้ด้วย แต่เมื่อทำการเปลี่ยนความถี่ โดยให้แรงดันคงที่ จะมีผลทำให้เกิดฟลักส์ แม่เหล็กเพิ่มมากขึ้นจนอิ่มตัว ซึ่งอาจทำให้มอเตอร์ ร้อนจนเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นจึงต้องทำการ เปลี่ยน แรงดันควบคู่ไปกับความถี่ด้วย และการที่จะเปลี่ยนแปลง ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ สามารถทำได้โดย การใช้อินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีหลักในการทำงานดังรูป

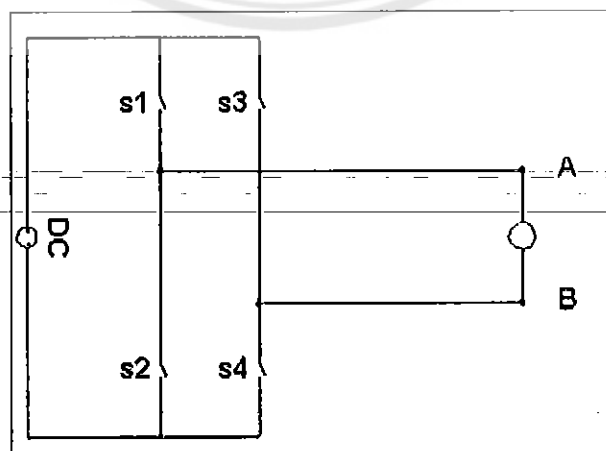


รูปที่ 2.40 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์

จากรูปข้างต้น แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ไปยังคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้า กระแสสลับให้เป็น ไฟฟ้ากระแสตรง แล้วนำไฟฟ้ากระแสตรง ที่ได้ต่อเป็นอินพุต เข้าไป ในวงจรอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแส ตรงนี้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ สามารถเลือกความถี่ได้ เพื่อไปควบคุมมอเตอร์ ให้มีความเร็วตามต้องการได้ หลักการทำงานของส่วน อินเวอร์เตอร์ และคอนเวอร์เตอร์ มีรายละเอียดดังนี้

ส่วนอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนไฟฟ้า กระแสตรงเป็นกระแสสลับ โดยจะนำไฟฟ้ากระแสตรงต่อ เข้ากับ สวิตช์ 4 ตัว และทำการเปิด-ปิด สวิตช์ทั้ง 4 เป็นจังหวะทำให้ เกิดไฟฟ้ากระแสสลับ ดังรูป

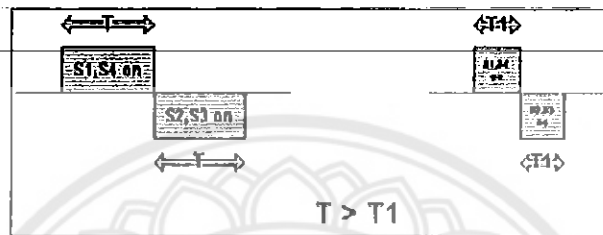


รูปที่ 2.41 หลักการเกิดไฟฟ้ากระแสสลับของอินเวอร์เตอร์

จากรูป

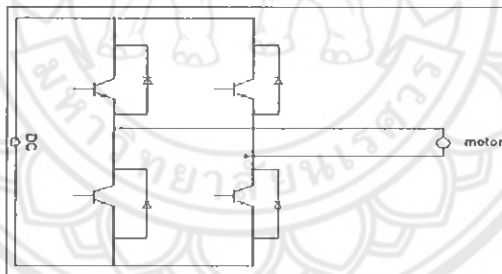
- เมื่อเปิดสวิตช์ S1 และ S4 ทำให้เกิดกระแสไหลในทิศทางจากจุด A ไปยังจุด B
- เมื่อเปิดสวิตช์ S2 และ S3 ทำให้เกิดกระแสไหลในทิศทางจากจุด B ไปยังจุด A

ดังนั้นถ้าเปิด-ปิดสวิตช์ S1 และ S4 สลับกับสวิตช์ S2 และ S3 จะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสสลับขึ้นนั่นเอง โดยถ้ามีการควบคุมเวลา ในการเปิด-ปิดสวิตช์ ที่ต่างกัน ก็จะได้ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่แตกต่างกันไป



รูปที่ 2.42 การเปิดปิดสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์

ในความเป็นจริงแล้ว อินเวอร์เตอร์จะใช้ทรานซิสเตอร์แทนสวิตช์ เนื่องจากทรานซิสเตอร์สามารถ เปิด-ปิด ได้ในความเร็วที่สูงกว่าสวิตช์ ดังรูป



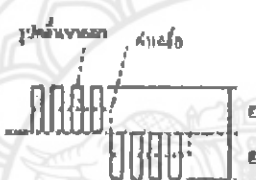

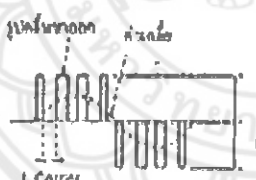



รูปที่ 2.43 การใช้ทรานซิสเตอร์แทนสวิตช์

การเปลี่ยนขนาดแรงดัน ของอินเวอร์เตอร์ตามความถี่ โดยวิธีการแปรรูปคลื่นของแรงดัน สามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

1. วิธีแปรขนาดแรงดันของไฟตรง (PAM: Pulse Amplitude Modulation)
2. วิธีแปรความกว้างของพัลส์ที่ใช้เปิด-ปิดทรานซิสเตอร์ (PWM: Pulse Width Modulation)
 - เป็น Square Wave
 - เป็น Sine Wave

โดยแต่ละวิธีจะทำให้เกิดผลต่อมอเตอร์ดังตาราง

(E : แร่งคันไฟตรง)			
วิธีการคุม	ความถี่ต่ำ (แรงต่ำ)	ความถี่สูง (แรงสูง)	จุดเด่น
วิธี PAM PULSE AMPLITUDE MODULATION			<ul style="list-style-type: none"> - เสียมอเตอร์เบา - ประสิทธิภาพดี - ความคุมขนาดแรง - ดีที่คอนเวอร์เตอร์ - ผลิตง่าย
วิธี PWM PULSE WIDTH MODULATION			<ul style="list-style-type: none"> - ส่วนดีแควอร์เตอร์สามารถควบคุมความถี่และแรงดันได้ทั้งหมด - ได้ยินเสียงความถี่สูงจากมอเตอร์
วิธี PWM ที่ใส่แรงดัน เป็นรูปซายน์			<ul style="list-style-type: none"> - เดินมอเตอร์ให้เรียบที่ความเร็วต่ำ - การบิดเบือนความถี่ต่ำมีขนาดเล็ก - ได้ยินเสียงความถี่สูงจากมอเตอร์

ตารางที่ 16 ตารางการแปลงสัญญาณของอินเวอร์เตอร์

วิธี PWM แบบ Sine Wave นั้นจะมีการเปิด-ปิดทรานซิสเตอร์หลายๆครั้งในหนึ่งไซเคิลและการเปิด-ปิดในแต่ละครั้งจะใช้เวลาไม่เท่ากัน จำนวนการเปิด-ปิดใน 1 วินาที เรียกว่าความถี่แคเรียร์ (Carrier Frequency) ซึ่งวิธี PWM แบบ Sine Wave มีรูปแบบควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์ 3 แบบ ดังตาราง

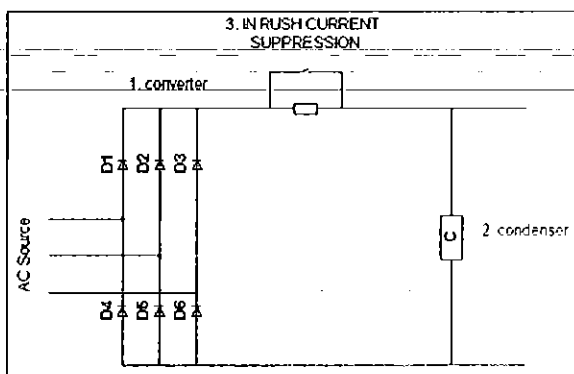
รูปแบบการควบคุม		ความถี่ต่ำ	ความถี่สูง	จุดเด่น
แบบซิงโครนัส (SYNCHRONOUS)	ความถี่แคโรเรียร์แปรตาม ความถี่โหลด			<ul style="list-style-type: none"> สามารถควบคุมฮาร์โมนิกได้ แรงดันขาออกสูงสุดเกือบเท่าแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ
แบบอะซิงโครนัส (ASYNCHRONOUS)	ความถี่แคโรเรียร์คงที่ ไม่สัมพันธ์กับความถี่โหลด			<ul style="list-style-type: none"> เสียงรบกวนจากมอเตอร์ จะเป็นเสียงเดียว ไม่น่ารำคาญ
แบบผสม	ย่านความถี่ต่ำเป็นอะซิงโครนัส และ ย่านความถี่สูงเป็นซิงโครนัส			<ul style="list-style-type: none"> สามารถควบคุมได้ดีทั้งย่านความถี่ต่ำตลอดจนถึงความถี่สูง

ตารางที่ 17 ตารางรูปแบบการควบคุม

ส่วนคอนเวอร์เตอร์

คอนเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ประกอบไปด้วย

1. ส่วนของคอนเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยกลุ่มของไดโอด
2. ส่วนของคอนเดนเซอร์ ทำหน้าที่กรองกระแส (ลด Ripple) โดยใช้ตัวเก็บประจุ
3. วงจรจำกัดกระแสอินรัช (In rush current suppression) ทำหน้าที่จำกัดกระแส ขณะที่มีการเปิดสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เป็นครั้งแรก ดังรูป



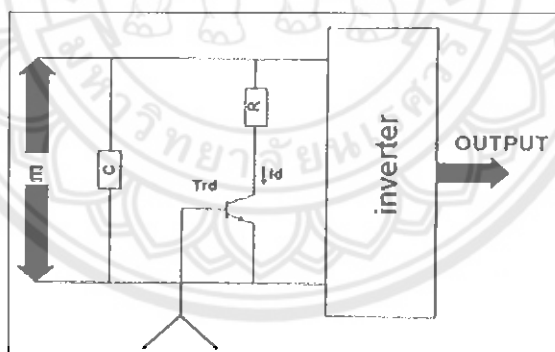
รูปที่ 2.44 วงจรจำกัดกระแสอินรัช

การควบคุมมอเตอร์

1. การสตาร์ท ทำได้โดยให้สัญญาณตั้งความถี่แก่อินเวอร์เตอร์ด้วยความถี่สตาร์ท มอเตอร์ก็จะผลิตแรงบิด จากนั้นอินเวอร์เตอร์จะค่อย ๆ เพิ่มความถี่ขึ้นไปจนกระทั่งแรงบิดของมอเตอร์สูงกว่าแรงบิดของ โหลด มอเตอร์จึงเริ่มหมุน

2. การเร่งความเร็วและการเดินเครื่องด้วยความเร็วคงที่ หลังจากสตาร์ทอินเวอร์เตอร์และมอเตอร์แล้ว ความถี่ขาออกจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จนถึงความถี่ที่ต้องการ ช่วงเวลาในการเพิ่มความถี่นี้คือเวลาการเร่งความเร็ว และเมื่อความถี่ขาออกเท่ากับความถี่ที่ต้องการ การเร่งความเร็วก็จบ อินเวอร์เตอร์จะเข้าสู่การทำงานในช่วงเวลาการเดินเครื่อง ด้วยความเร็วคงที่

3. การลดความเร็ว ทำได้โดยตั้งความถี่ให้ต่ำกว่าความถี่ขาออก อินเวอร์เตอร์จะลดความถี่ลงมาเรื่อย ๆ ตามช่วง เวลาการลดความเร็วที่ได้ตั้งไว้ ในขณะที่ลดความถี่ ความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีค่ามากกว่าความถี่ขาออกของอินเวอร์เตอร์ มอเตอร์จะทำงาน เหมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ผลิตไฟฟ้ากลับไปให้อินเวอร์เตอร์ (regeneration) ทำให้แรงดันไฟตรง (แรงดัน คร่อม คอนเดนเซอร์) มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นภายในอินเวอร์เตอร์จะมีวงจรที่ทำหน้าที่รับพลังงานที่เกิดจากการ regeneration ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการเบรคมอเตอร์ วงจรนี้เรียกว่า วงจรเบรคคืนพลังงาน ดังรูป



รูปที่ 2.45 การลดความเร็วของอินเวอร์เตอร์

พลังงานที่เกิดจากการ regeneration จะป้อนกลับมาที่ประตูที่คอนเดนเซอร์ C ทำให้แรงดัน E มีค่าสูงขึ้น ถ้าแรงดันสูงกว่าค่าที่กำหนด ทราซิสเตอร์ T ในวงจรเบรคจะทำงาน ทำให้มีกระแส I ไหลผ่านตัวต้านทานเบรค R ทำให้ตัวต้านทานร้อน เป็นการเผาผลาญพลังงานที่เกิดจากการ regeneration และพลังงานที่เก็บสะสมใน คอนเดนเซอร์ C ก็จะถูกคายออกมาด้วย ทำให้แรงดัน E มีค่าลดลง เมื่อลดลงต่ำกว่าค่าที่กำหนด ทราซิสเตอร์ T จะหยุดทำงาน กระแสเบรคก็จะหยุดไหลในช่วงการลดความเร็วจะทำงานในลักษณะนี้หลาย ๆ ครั้ง ถ้าพลังงานมีค่าน้อย (แรงบิดที่จำเป็นสำหรับการลดความเร็วมีขนาดเล็ก) อัตราการใช้งานวงจรเบรคก็จะต่ำ บางครั้งอาจจะไม่ทำงานเลยก็มี

อัตราการใช้งานวงจรเบรคนี้ ได้รับการออกแบบโดยการพิจารณาในแง่ของการระบายความร้อนไว้ที่ 2-3 % เท่านั้น ถ้ามีการใช้เบรคบ่อย หรือใช้เบรคนานเกินไป จะทำให้เกิดปัญหาการระบายความร้อนของตัวต้านทานและอาจทำให้ทรานซิสเตอร์เสื่อมได้

4. การหยุด อินเวอร์เตอร์จะลดความถี่ลงจนถึงระดับหนึ่ง และจะผลิตไฟตรงเข้าไปในมอเตอร์เพื่อทำงานเป็นเบรค จนมอเตอร์หยุด เรียกว่า การเบรคด้วยไฟตรง แนวคิดในการเลือกขนาดอินเวอร์เตอร์ ถ้าคิดว่าอินเวอร์เตอร์เหมือนกับแหล่งจ่ายไฟที่ใช้จ่ายพลังงานเพื่อขับมอเตอร์ ก็จะคิดว่ายังเลือกอินเวอร์เตอร์ ขนาดยิ่งใหญ่เท่าใดก็ยิ่งดี สามารถติดตั้งสวิทช์ ที่เอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์ เพื่อเปิดปิดจ่ายกระแส ให้มอเตอร์ได้ทันที เหมือนกับแหล่งจ่ายไฟ แต่แนวความคิดนี้ ไม่ถูกต้องเนื่องจาก ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง และอินเวอร์เตอร์มีขนาดใหญ่ เกินความจำเป็น

ในการเลือกขนาดอินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมกับมอเตอร์จะต้องคำนึงถึงข้อต่างๆต่อไปนี้

1. ความสามารถในการขับมอเตอร์ขณะเร่งความเร็วและความเร็วรอบคงที่ที่ต้องพิจารณาว่า อินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกระแสที่มอเตอร์ต้องการได้หรือไม่

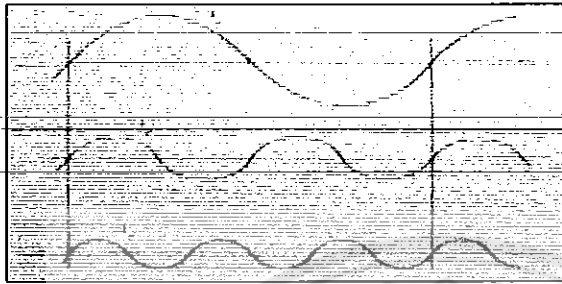
2. ความสามารถในการขับมอเตอร์ขณะลดความเร็ว ในขณะที่ลดความเร็วมอเตอร์จะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและคืนพลังงาน กลับไปให้อินเวอร์เตอร์ ดังนั้น อินเวอร์เตอร์ต้องมีความสามารถในการรับคืนและใช้พลังงานนี้ให้หมดไป

3. การเลือกขนาดอินเวอร์เตอร์ โดยดูจากขนาดและจำนวนมอเตอร์นั้น ให้เลือกอินเวอร์เตอร์ที่มีกระแสพิกัดมากกว่าผลรวมของกระแสมอเตอร์ทุกตัว

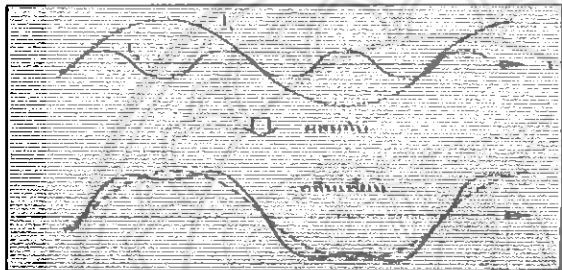
จุดเด่นของอินเวอร์เตอร์อีกอย่างหนึ่งคือสามารถขับมอเตอร์หลาย ๆ ตัวด้วยอินเวอร์เตอร์เพียงตัวเดียว แต่วิธีการ เดินเครื่องบางแบบอาจต้องเลือกขนาดอินเวอร์เตอร์ที่มีขนาดใหญ่มาก จึงไม่เป็นการประหยัดและเกิดการผิดพลาด ในการเลือกขนาดได้ง่ายด้วย อินเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดการควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์ ไม่สามารถขับมอเตอร์ ได้หลายตัวพร้อมกันจะต้องเปลี่ยนโหมดการควบคุมไปเป็นแบบแรงดันต่อความถี่เท่านั้นจึงจะขับมอเตอร์ได้หลายตัว

2.14) คลื่นฮาร์โมนิก

คลื่นฮาร์โมนิก หมายถึง คลื่นที่มีความถี่เป็นกี่เท่าของความถี่พื้นฐาน (ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ) เมื่อผสมคลื่นพื้นฐานกับคลื่นฮาร์โมนิกหลายๆความถี่เข้าด้วยกันจะได้คลื่นที่ผิดจากรูปไซน์ (Distorted wave) ดังแสดงในรูป



รูป 2.46 คลื่นพื้นฐานกับคลื่นฮาร์โมนิก



รูป 2.47 คลื่นที่ผิดจากรูปไซน์

โดยทั่วไปคลื่นฮาร์โมนิกจะมีตั้งแต่ความถี่ต่ำจนถึงความถี่สูง (kHz – MHz) แต่ระบบจ่ายไฟมักจะพิจารณาเฉพาะคลื่นฮาร์โมนิกอันดับไม่เกิน 40-50 (ต่ำกว่า 3kHz) ซึ่งผลของคลื่นฮาร์โมนิกนี้จะแตกต่างจากผลของฮาร์โมนิกความถี่สูง ยกตัวอย่างเช่น ผลกระทบของการแพร่คลื่นและสัญญาณรบกวนที่มีต่อเครื่องคอมพิวเตอร์ จะเป็นสัญญาณที่แตกต่างจากปัญหาคลื่นฮาร์โมนิกภายในระบบจ่ายไฟ ผลกระทบและการแก้ปัญหาจะแตกต่างกัน

$$i = i_0 + \sum_{n=1}^{\infty} i_n \cdot \sin(2\pi fnt + \varphi_n)$$

(31)

n คือ 1,2,3,.....

f คือ ความถี่พื้นฐาน

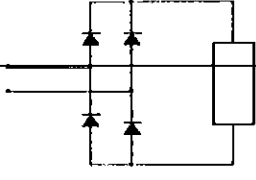
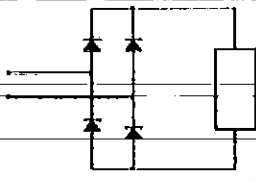
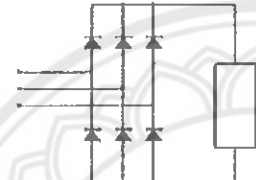
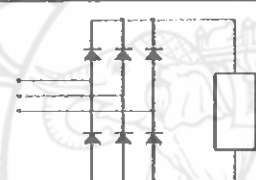
ตาราง 18 ข้อแตกต่างระหว่างคลื่นฮาร์โมนิกกับสัญญาณรบกวน

หัวข้อ	คลื่นฮาร์โมนิก	สัญญาณรบกวน
ความถี่	ต่ำกว่า 3 kHz (อันดับ 40-50)	ความถี่สูง (หลาย 10 kHz – MHz)
สภาพแวดล้อม	แพร่ทางสายไฟ	แพร่ทางอากาศ
การคำนวณหาปริมาณ	สามารถคำนวณ	คำนวณหาไม่ได้
ปริมาณที่เกิด	แปรผันโดยตรงกับโหลด	สัมพันธ์กับอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแส (ปริมาณมากถ้าเป็นสวิตซ์ซึ่งความถี่สูง)
การทนได้ของอุปกรณ์	มีการกำหนดมาตรฐานสำหรับ อุปกรณ์ต่าง ๆ อย่างชัดเจน	แตกต่างกันตามแต่ข้อกำหนดและผู้ผลิตแต่ละราย
การแก้ปัญหา	ติดตั้งรีแอกเตอร์	ตั้งระยะ (r) ห่างออกไป

วงจรรีคตีไฟเออร์ และการกำเนิดคลื่นฮาร์โมนิก

แหล่งกำเนิดคลื่นฮาร์โมนิก มักจะเป็นวงจรรีคตีไฟเออร์ และอุปกรณ์ที่มีการปรับกำลังไฟอื่นๆ สำหรับอินเวอร์เตอร์ภาคคอนเวอร์เตอร์ จะมีวงจรรีคตีไฟเออร์อยู่ภายใน จึงเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกที่สำคัญของอินเวอร์เตอร์

จากตารางจะเป็นว่า วงจรรีคตีไฟเออร์มีหลายชนิด อินเวอร์เตอร์ทั้งหลายมักจะใช้วงจรรีคตีไฟเออร์แบบบริดจ์ 3 เฟส อันดับของคลื่นฮาร์โมนิกที่ผลิตจากวงจร สามารถคำนวณได้จากสูตร $n = PK \pm 1$ (โดยที่ P = จำนวนพัลส์ และ K = 1,2,3,...) ดังนั้น จากตารางจะเป็นว่า วงจรรีคตีไฟเออร์แบบบริดจ์ 3 เฟสจะกำเนิดคลื่นฮาร์โมนิกอันดับ 5,7,11,13,... ขนาดของฮาร์โมนิกอันดับต่าง ๆ จะมีขนาด $1/n$ ดังนั้นขนาดจึงลดลงเรื่อยๆ เมื่ออันดับของคลื่นฮาร์โมนิกเพิ่มขึ้น อินเวอร์เตอร์ที่ใช้วงจรรีคตีไฟเออร์แบบบริดจ์เฟสเดียวจะกำเนิดคลื่นฮาร์โมนิกที่มีอันดับ $4K \pm 1$ (3,5,7,9,...)

ชื่อวงจร	วงจรที่เชื่อม	อันดับคลื่นฮาร์โมนิก	อัตราส่วนคลื่นฮาร์โมนิก
บริดจ์เฟสเดียว		$n = 4K \pm 1$ $K = 1, 2, \dots$	$Kn \times 1/n$
บริดจ์ผสมเฟสเดียว		$n = 2K \pm 1$ $K = 1, 2, \dots$	$Kn \times 1/n$
บริดจ์ 3 เฟส		$n = 6K \pm 1$ $K = 1, 2, \dots$	$Kn \times 1/n$
บริดจ์ผสม 3 เฟส		$n = 3K \pm 1$ $K = 1, 2, \dots$	$Kn \times 1/n$

ตารางที่ 19 อันดับฮาร์โมนิก

เส้นทางการไหลของกระแสฮาร์โมนิก

ระบบจ่ายไฟที่มีปัญหาเครื่องคลื่นฮาร์โมนิกนั้น แหล่งกำเนิดคลื่นฮาร์โมนิกจะอยู่ในระบบไฟที่ใดที่หนึ่ง ไม่ใช่อยู่ที่แหล่งจ่ายไฟเอง ตัวอย่างเช่นระบบไฟในรูป ส่วนคอนเวอร์เตอร์ในอินเวอร์เตอร์จะเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นฮาร์โมนิกหม้อแปลงซึ่งเป็นแหล่งจ่ายไฟและอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เช่น มอเตอร์และคอนเดนเซอร์ จะเป็นโหลดของแหล่งกำเนิดคลื่นฮาร์โมนิก

$$I_n \text{ (n : อันดับ } I_n = I_2 + I_3 + I_4 \dots)$$

ซึ่งกำเนิดจากอินเวอร์เตอร์จะไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง :

$$Z_L = R_L + jnX_L$$

(32)

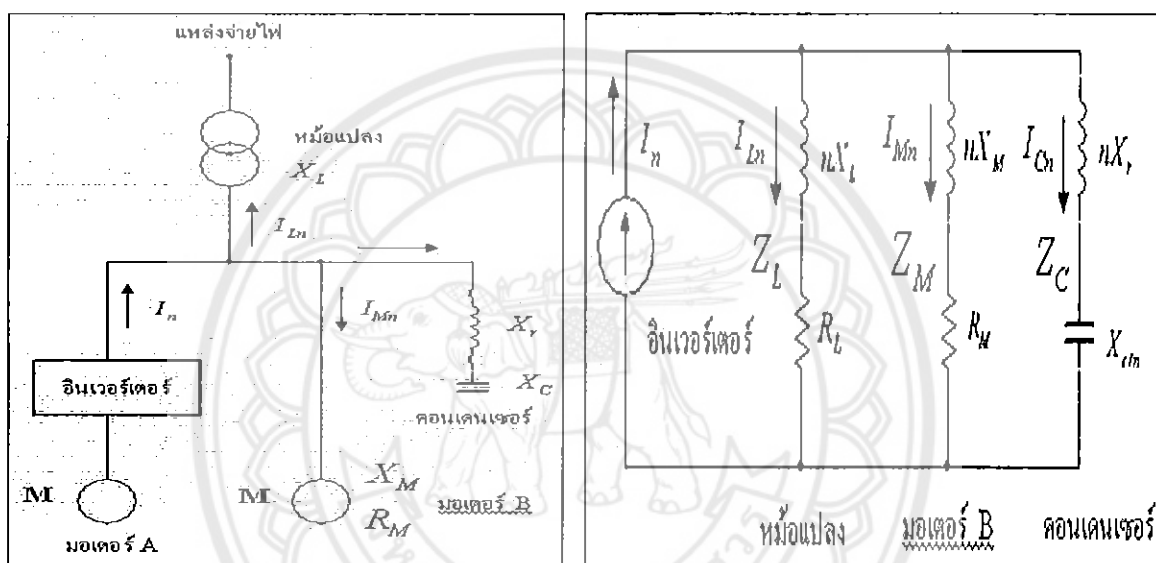
และไหลผ่าน อิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ B :

$$Z_M = R_M + jnX_M \quad (33)$$

และคอนเดนเซอร์ :

$$Z_C = jnX_r - jX_C/n \quad (34)$$

ซึ่งต่อขนานกับ อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง

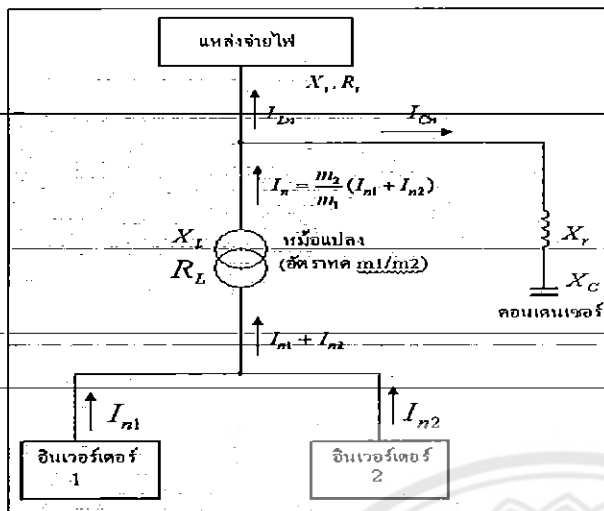


รูปที่ 2.48 ตัวอย่างระบบไฟฟ้า (1)

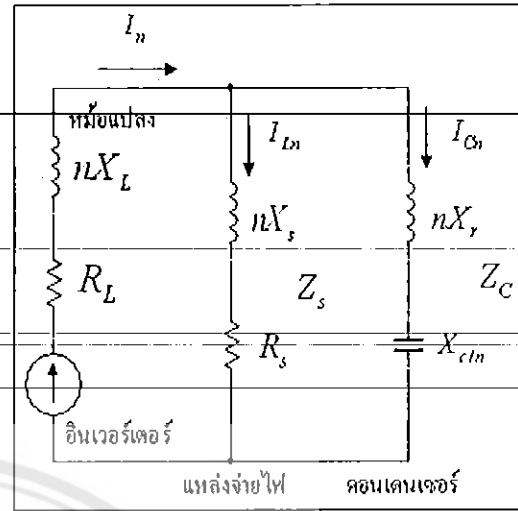
รูปที่ 2.49 วงจรสมมูลของคลื่นฮาร์โมนิก (1)

เป็นระบบไฟซึ่งมีวงจรด้านไฟแรงสูงอยู่ด้วย สำหรับอุปกรณ์ด้านไฟแรงต่ำ เช่น มอเตอร์ ไม่ได้เขียนไว้ในรูปปกติอิมพีแดนซ์ของโหลด (Z_M) จะมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง (Z_L) ดังนั้นคลื่นฮาร์โมนิกที่กำเนิดจากอินเวอร์เตอร์ ส่วนใหญ่จะไหลเข้าหม้อแปลงและอุปกรณ์ไฟฟ้าด้านแรงต่ำ-กระแสฮาร์โมนิก I_n ที่ไหลทางด้านไฟแรงสูง จะเท่ากับผลรวมของกระแสฮาร์โมนิก ด้านแรงต่ำ $I_{n1} + I_{n2}$ หาด้วยอัตราทดของหม้อแปลง

$$I_{Ln} = I_n * \frac{Z_C}{Z_s + Z_c}, I_{Cn} = I_n * \frac{Z_s}{Z_s + Z_c} \quad (35)$$



รูปที่ 2.50 ตัวอย่างระบบไฟฟ้า (2)



วงจรสมมูลของคลิ่นฮาร์โมนิก (2)

อิมพีแดนซ์ของโหลดเหนี่ยวนำ เช่น มอเตอร์ หม้อแปลง

$$\dot{Z} = R + n(j2\pi f_0 X) \tag{36}$$

อิมพีแดนซ์ของโหลดตัวเก็บประจุ เช่น คอนเดนเซอร์

$$\dot{Z} = -j \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{n} \times \left(-j \frac{1}{2\pi f_0 C} \right) \tag{37}$$

กระแสน้ำไหลง่ายที่อิมพีแดนซ์ขนาดเล็กและในกรณีที่เป็นโหลดตัวเก็บประจุ เช่น คอนเดนเซอร์ ปรับเพาเวอร์แฟกเตอร์อาจจะขยายคลิ่นฮาร์โมนิกให้มีขนาดได้ดังนี้
 สำหรับปัญหาเรื่องคลิ่นฮาร์โมนิก สามารถสรุปได้ดังนี้

1. แหล่งจ่ายไฟขนาดใหญ่จะมีอิมพีแดนซ์ต่ำทำให้ผลของคลิ่นฮาร์โมนิกที่มีต่ออุปกรณ์อื่นๆลดน้อยลง
2. โหลดเหนี่ยวนำจะมีอิมพีแดนซ์สำหรับคลิ่นฮาร์โมนิกสูง จึงไม่ต้องพิจารณาได้
3. ให้พิจารณาเฉพาะโหลดตัวเก็บประจุ เช่น คอนเดนเซอร์

ขนาดของคลื่นฮาร์โมนิกที่เกิดโดยอินเวอร์เตอร์

ขนาดอินเวอร์เตอร์	ต่ำกว่า 3.7 kW		สูงกว่า 5.5 kW		
	ไม่มี AC รีแอคเตอร์	มี AC รีแอคเตอร์	ไม่มี AC รีแอคเตอร์	มี AC รีแอคเตอร์	มี DC รีแอคเตอร์
พื้นฐาน	81	96	86.5	96	95.5
5	50	26	44.5	24	26
7	29	10	21	9.5	10.5
11	5.8	4	6.5	3.7	7.1
13	6	3.7	5.2	3.5	5.2

ตารางที่ 20 อัตราส่วนกระแสฮาร์โมนิก (%)

ชนิด	รุ่น FR-A200 / FR-F400 / FR-Z200 / FR-Z300			
	กำลังขาออก	ไม่มี AC รีแอคเตอร์	มี AC รีแอคเตอร์	มี DC รีแอคเตอร์
0.4		1.5	0.9	-
0.75		2.5	1.5	-
1.5		4.5	3.0	-
2.2		5.5	4.0	-
3.7		9.0	6.0	-
5.5		12	9.0	8.5
7.5		17	12	11
11		20	17	16
15		28	22	20
18.5		34.5	27.5	25.5
22		41	33	31
30		52	44	41
37		66	54	51
45		80	66	62
55		100	80	75

ตารางที่ 21 กำลังไฟฟ้าเข้าของอินเวอร์เตอร์

2.15) การคำนวณกระแสลัดวงจร

การเกิดสถานะลัดวงจรสามารถเกิดขึ้นได้ทุกจุดในระบบไฟฟ้า แต่ผู้ออกแบบจะคำนวณค่ากระแสลัดวงจรเฉพาะในจุดที่มีกระแสลัดวงจรอยู่เสมอๆ เท่านั้น ซึ่งได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า ในแผงกระจายโหลดหลัก MDB ในแผงกระจายโหลดรอง SDB แผงควบคุมวงจรรย่อย Load Center และที่จุดต่อโหลดเท่านั้น หรืออาจกล่าวได้ว่าผู้ออกแบบจะต้องคำนวณค่ากระแสลัดวงจรในทุกๆ จุดที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิดไว้นั้นเอง

การคำนวณกระแสลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้า

การคำนวณค่ากระแสลัดวงจรด้านแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$I_{SC}(Tr.) = \frac{I_{FL}(Tr.) \times 100\%}{\%Z_K} \times \frac{1}{1000} \quad (38)$$

เมื่อ

$I_{SC}(Tr.)$ คือ กระแสลัดวงจรที่ด้านแรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นกิโลแอมแปร์

$I_{FL}(Tr.)$ คือ กระแสโหลดเต็มพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าด้านแรงต่ำ เป็น Amps

$\%Z_K$ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลเตจของหม้อแปลงไฟฟ้า

ค่ากระแสโหลดเต็มพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถหาได้จากการคำนวณด้วยสมการ

$$I_{FL}(Tr.) = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times V_L} \quad (39)$$

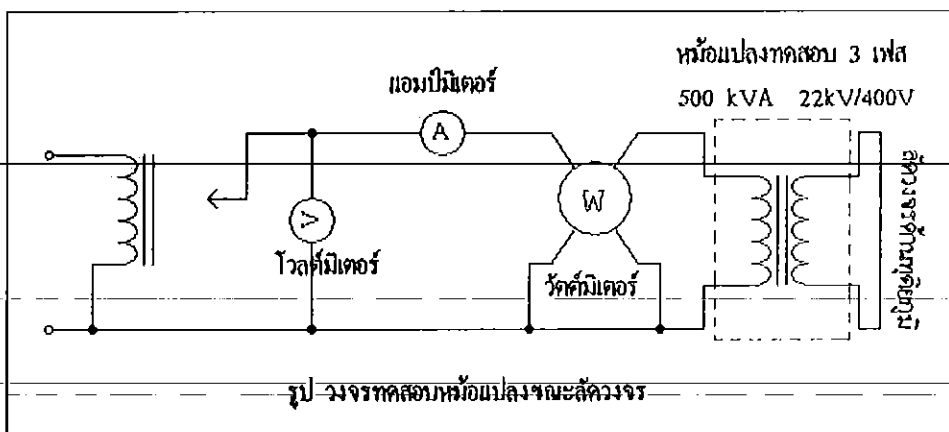
เมื่อ

kVA คือ ขนาดพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้า

V_L คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายด้านแรงต่ำของหม้อแปลงขณะไม่มีโหลดเป็นโวลต์

สำหรับพื้นที่จ่ายไฟของการไฟฟ้านครหลวงใช้ค่า 416 โวลต์ และสำหรับพื้นที่จ่ายไฟของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้ค่า 400 โวลต์

ค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลเตจของหม้อแปลงไฟฟ้า ($\%Z_K$) สามารถหาได้จากบริษัทผู้ผลิตซึ่งจะทำการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าในห้องทดลอง ลักษณะการทดสอบจะทำการทดสอบด้วยวิธีทดสอบขณะลัดวงจร (Short Circuit Test) ดังรูป



รูปที่ 2.51 วงจรทดสอบหม้อแปลงขณะลัดวงจร

จากรูป บริษัทผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำการทดสอบโดยการลัดวงจรด้านแรงต่ำแล้วทำการปรับแรงดันป้อนให้หม้อแปลงไฟฟ้าทางด้านแรงสูงจนกระทั่งอ่านค่ากระแสจากแอมป์มิเตอร์ได้ถึงค่าพิกัด ที่สถานะนี้นอกจากจะสามารถหาค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลต์เตจของหม้อแปลงไฟฟ้าได้แล้วยังสามารถหาค่าของความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า (Load Losses) ได้จากค่าวัตต์มิเตอร์ที่ต่อไว้ในวงจรอีกด้วย สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลต์เตจของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถหาได้จาก

$$\%Z_K = \frac{V(meter)}{V(rated)} \times 100 \tag{40}$$

สำหรับมาตรฐานค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในประเทศไทย ตามมาตรฐาน IEC จะเป็นดังตารางนี้

พิกัดหม้อแปลงไฟฟ้า (kVA)	R (%)	X (%)	Z _K (%)
250	1.30	3.78	4
315	1.24	3.80	4
400	1.15	3.83	4
500	1.02	3.85	4
630	1.03	3.86	4
800	1.38	5.84	6
1,000	1.35	5.85	6
1,250	1.31	5.85	6
1,600	1.24	5.87	6
2,000	1.01	5.88	6

ตารางที่ 22 มาตรฐานค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์โวลต์เตจของหม้อแปลงไฟฟ้า

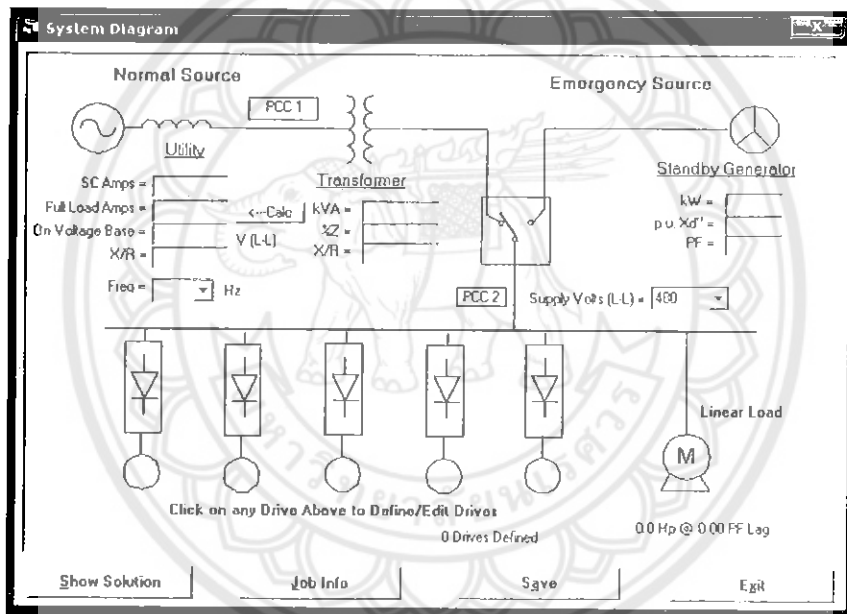
บทที่ 3

การออกแบบ

3.1] การออกแบบตัวโครงสร้างที่จะทำการ simulate

ในการทดสอบดังกล่าวนี้เราจะใช้โปรแกรม HarmCalc Manager ในการทดสอบหาค่าของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการขับเคลื่อนมอเตอร์ AC หลายตัวเพื่อมาวิเคราะห์การเกิดในอันดับต่างๆ ของฮาร์มอนิกกับการขับเคลื่อนในแต่ละแบบ

3.2] มารู้จักกับ HarmCalc Manager software



รูปที่ 3.1) หน้าต่างตัวโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์

* Normal Source Utility

SC Amps คือ ค่าประสิทธิภาพของแหล่งจ่ายไฟ (Short circuit amps for source)

$$SCAmps = \frac{MVA_{Source}}{\sqrt{3} \times Voltage(base)} \quad (3.1)$$

Full load Amps คือ ค่ากระแสสูงสุดในสภาวะที่ใช้เต็มโหลด

$$I_{FL}(Tr.) = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times V_L} \quad (3.2)$$

On voltage base คือ โวลต์เตจที่ได้จากการ short circuit test ของหม้อแปลง

$$On.voltage_{BASE} = (\% Z_K \times V_{Rate}) \quad (3.3)$$

* Transformer

kVA คือ ค่าพิกัดกำลังของหม้อแปลงที่ใช้คิดจากขนาดโหลดรวมของทั้งวงจร

$$\text{ขนาดโหลดรวมของทั้งวงจร} = \frac{hp * 746}{PF} [VA] \quad (3.4)$$

เมื่อ 1 HP = 746 W

สำหรับค่าของ %Z และ X/R จะนำขนาดของหม้อแปลงไปเปิดในตาราง

Transformer Ratings

Suggested ratings are based on IEEE 242 practices, typical data listed for %Z and X/R ratings.

Impedance Data for Three-Phase Transformers with Primaries of up to 15kV and Secondaries of 600V or less.

3 Phase KVA Rating	Suggested X/R Ratio for Calculation	Normal Range of Percent Impedance (see notes)
112.5	3.0	1.6 - <u>2 min</u> - 6.2
150.0	3.5	1.5 - <u>2 min</u> - 6.4
225.0	4.0	2.0 - <u>2 min</u> - 6.6
300.0	4.5	2.1 - <u>4.5 min</u> - 6.0
500.0	5.0	3.2 - <u>4.5 min</u> - 6.1
750.0	6.0	3.2 - <u>5.75 - 6.75 min</u> - 6.8
1000.0	7.0	3.2 - <u>5.75 - 6.75 min</u> - 8.0
1500.0	7.0	3.5 - <u>5.75 - 6.75 min</u> - 6.8
2000.0	8.0	3.5 - <u>5.75 - 6.75 min</u> - 6.8
2500.0	9.0	3.5 - <u>5.75 - 6.75 min</u> - 6.8

Notes:

- Underlined values are from ANSI C57.12.10-1977, ANSI C57.12.22-1980 and NEMA 210-1976.
- Network transformers (with three position switches) have 5.0%Z for 300-1000KVA, 7%Z for 1500-2500KVA, (with 2 position switches) 4.0%Z for 500-750KVA. See ANSI C57.12-40-1982.
- Three phase banks with three single phase transformers may have values as low as 1.2%.

ตารางที่ 3.1 Transformer Rating

* Emergency Source

Generator Subtransient Reactance				
Suggested ratings are based on "Power System Stability: Synchronous Machines", Kimbark, Dover D-486-51884-4				
<i>Typical Constants of Three-Phase Synchronous Machines.</i>				
	Turbo-Generator (solid rotor)	Water-Wheel Generator (with dampers)	Synchronous Condensers	Synchronous Motors (general purpose)
	<i>reactances in per-unit</i>			
X_d	0.95 – 1.45 (avg = 1.10)	0.60 – 1.45 (avg = 1.15)	1.50 – 2.20 (avg = 1.80)	0.80 – 1.50 (avg = 1.20)
X_d''	0.07 – 0.17 (avg = 0.12)	0.13 – 0.35 (avg = 0.24)	0.18 – 0.38 (avg = 0.25)	0.20 – 0.40 (avg = 0.30)

ตารางที่ 3.2 ตารางรีแอกแตนซ์ของเจนเนอเรเตอร์

* Load

ซึ่งในตัวโปรแกรมนี้เองจะมีการจับมอเตอร์อยู่ 2 แบบด้วยกันก็คือ

- 1) การจับมอเตอร์โดยตรง (linear load) ซึ่งเราจะสามารถปรับค่า พารามิเตอร์ได้
- 2) การจับมอเตอร์โดยมี อุปกรณ์ทางพาวเวอร์อิเล็กทรอนิกส์

มาเป็นตัวช่วยในการควบคุมความเร็วรอบ ทอร์ค ในที่นี้จะเป็นอินเวอร์เตอร์ ภายในตัวโปรแกรมจะมี ชนิดในการจับมอเตอร์ (Drive Type) ให้เราเลือกใช้และชนิดของการจับมอเตอร์จะให้หลักการจับแบบ PWM (pulse width modulated) ทั้งหมด มีดังนี้

2.1) ATV56 (VT) units are variable torque rated to 100 HP 460 V

[6 pulse]

2.2) ATV56 (LN) units are variable torque with low noise configuration to 75HP460 V

2.3) ATV58 (CT) units are constant torque rated to 100 HP 460 V

[6 pulse]

2.4) ATV58 (VT) units are variable torque rated to 100 HP 460 V

2.5) ATV66 (VT) units are variable torque rated to 400 HP 460 V [6,12,18 pulse]

2.6) ATV66 (CT) units are constant torque rated to 350 HP 460 V

2.7) ATV66 (LN) units are variable torque with low noise configuration to 75 HP460V

2.8) VSD17 units rated to 50 HP 460 V [6 pulse]

2.9) VSD57 (VT) units rated to 200 HP 460 V [6 pulse]

2.10) VSD57 (CT) units rated to 150 HP 460 V [6 pulse]

(CT) หมายถึง การขับมอเตอร์ที่มีค่า ทอร์คคงที่

(VT) หมายถึง การขับมอเตอร์ที่มีค่าปรับเปลี่ยนค่า ทอร์ค

ATV56,58,66 และ VSD17,57 เป็นอุปกรณ์สำหรับควบคุมความเร็วของมอเตอร์ซึ่งแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่ไม่เหมือนกัน

3.3] การตั้งค่าวิธีการขับโหลด

* Define Drive Configuration

Drive Type: ชนิดในการขับมอเตอร์

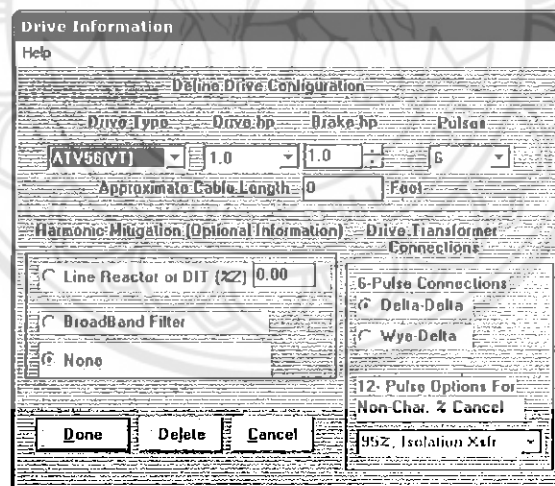
Drive hp: อัตราการขับเคลื่อนมอเตอร์ 3 เฟส ในหน่วยของแรงม้า

ถ้าเป็นแหล่งจ่ายไฟ 400 V จะใช้หน่วยของ kW

Brake hp: แรงม้าขาออก จะขึ้นอยู่กับโหลดเครื่องจักร

Pulses: รูปคลื่นในการขับมอเตอร์ จะมี [6,12,18 Pulse] ขึ้นอยู่กับการขับ มอเตอร์แต่ละชนิด

Approximate Cable Length: ความยาวของสายป้อนระหว่างบัดกับตัวขับมี หน่วยเป็น ฟุต



รูปที่ 3.2) หน้าต่างการตั้งค่าในการขับมอเตอร์

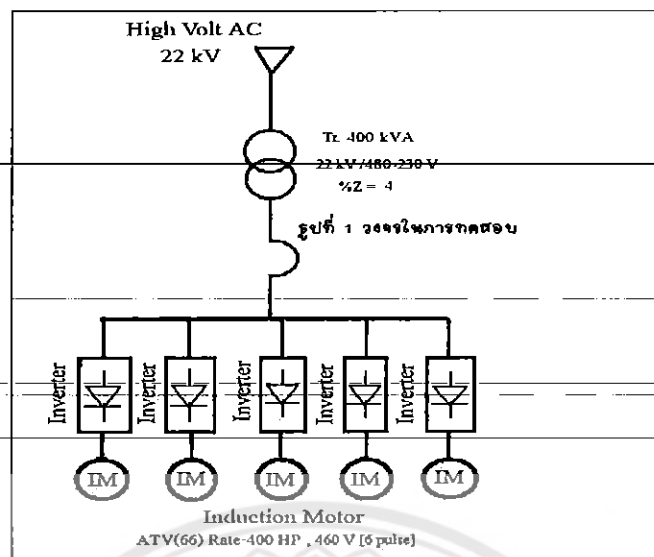
*Harmonic Mitigation: การทำให้ฮาร์โมนิกลดลง

Line Reactor or DIT (%Z): ค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลง

Broad Band Filter: ตัวกรองสัญญาณ

*Drive Transformer Connections: ลักษณะการต่อของหม้อแปลง

Delta-Delta and Wye – Delta



รูปที่ 3.3) วงจรที่เราจะทำการทดสอบ

3.4] การคำนวณ

ขั้นตอนที่ 1) คำนวณโหลดเพื่อหาพิกัดหม้อแปลงจากสมการที่ 3.4 จะได้ว่า

$$\frac{400HP \times 746}{0.8} = 373kVA \approx 400kVA$$

ขั้นตอนที่ 2) คำนวณหาค่าของโวลต์ที่ได้จากการทดสอบหม้อแปลง (Short circuit test) จากสมการที่ 3.3

$$\frac{V_{meter}}{22kV} \times 100 = 4\% \rightarrow V_{meter} = 880V$$

(Short circuit test) หมายถึงการลัดวงจร ในหนังสือการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 3) คำนวณหาค่า Sort circuit Source โดยการคิดที่ $X/R = 4\%$ จะได้ว่า

$$\frac{35MVA}{\sqrt{3} \times 880} = 22,963Amps$$

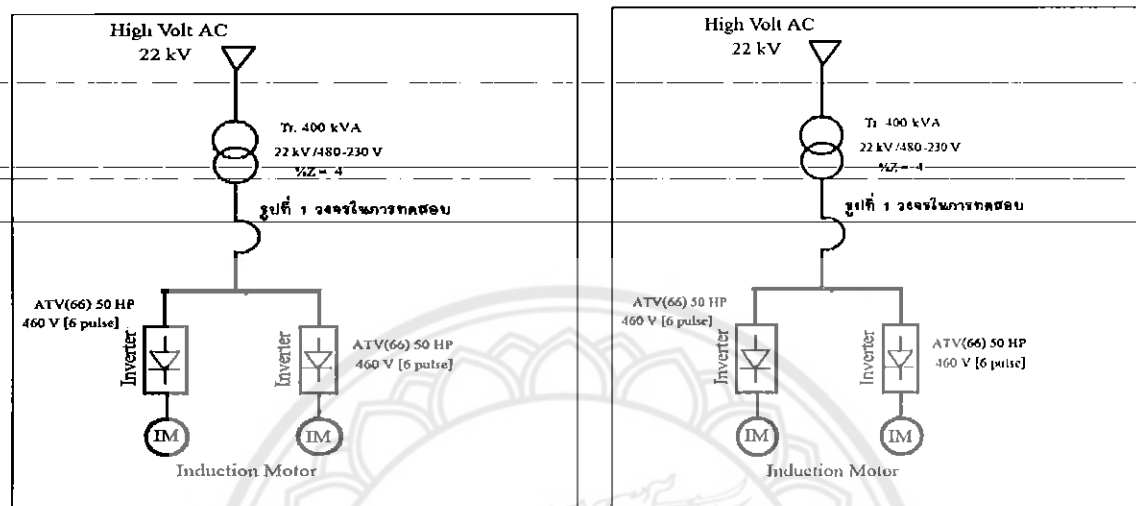
ขั้นตอนที่ 4) ทำการคำนวณหาค่าของกระแส Full load ของหม้อแปลงจากสมการที่ 3.2

$$\frac{400kVA}{\sqrt{3} \times 880V} = 262.43Amps$$

ขั้นตอนที่ 5) นำค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่คำนวณได้มาใส่ในตัวโปรแกรม

ขั้นตอนที่ 6) ทำการ Simulation ค่าของตัวควบคุมมอเตอร์ชนิด ATV58 (VT) กับ

VSD57(VT)



Inverter แบบ VSD57 (VT)

Inverter แบบ ATV58 (VT)

กรณีที่ 1) Drive 2 ตัว 100 HP

กรณีที่ 2) Drive 2 ตัว ตัวละ 50 HP

รูปที่ 3.4 วงจรที่จะทำการทดสอบในกรณีที่ 1 และ 2

ขั้นตอนที่ 7) ในการทดสอบจะมีอยู่ด้วยกัน 2 กรณีคือ

1. ทดสอบว่าเมื่อมีการ Drive motor ด้วย อินเวอร์เตอร์ 2 ชนิด จะมีการสร้างฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบอย่างไร? พร้อมทั้งทดสอบว่า แล้วถ้าเกิดมีการเพิ่มจำนวน อินเวอร์เตอร์ในแต่ละชนิดในการ Drive ณ. ที่ภาระโหลดเท่าเดิม ผลของฮาร์มอนิกจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร?

2. ทดสอบขนาดของโหลดจะมีผลต่อกระแสอย่างไร และฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะเป็นอย่างไร โดยการทดสอบ Drive motor ในสภาวะ No load , 25 % ,50 % ,75 % และ Full load

ขั้นตอนที่ 8) ทำการทดสอบแล้วนำค่าที่ได้จากการ Simulate มาพร้อมกราฟใน Matlab แล้วเขียนโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์การเกิดของฮาร์มอนิกในแต่ละอันดับ แล้วนำผลมาเปรียบเทียบกับตาราง

ขั้นตอนที่ 9) ทำการสรุปผลที่ได้ทั้งหมด

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่จำเป็น

* พิกัดสูงสุด:	35MVA
* แรงดันในระบบ:	880 V , 50 Hz
* กระแสลัดวงจร:	22,963 A
* พิกัดโหลดของหม้อแปลง:	400-kVA , Z= 4%
* แรงดันขาออก:	480 V
* กระแสสูงสุด:	262.43A

รายละเอียดเกี่ยวกับอินเวอร์เตอร์

* รุ่นอินเวอร์เตอร์:	ATV58(VT), VSD57(VT), ATV66(VT)
* พิกัดอินเวอร์เตอร์ :	6 pulse
* ความยาวสายส่งไปยังโหลด :	30 feet
* ชนิดหม้อแปลงที่ต่อกับอินเวอร์เตอร์ :	Wye-Delta
* ความเฉื่อย :	ไม่มี

การทดสอบ

- 1) เพื่อทดสอบความแตกต่างของตัวควบคุมความเร็วของมอเตอร์ 2 ชนิด โดยการทดสอบจะเลือกใช้ตัวควบคุมมอเตอร์อยู่ 2 ชนิดคือ

- VSD57(VT) คือ ตัวควบคุมมอเตอร์เป็นยี่ห้อของ VSD ที่จะใช้ตัวไมโครคอล

โทรลเลอร์ (16 บิต) เป็นตัวเสริมเข้ามาช่วยในการควบคุม และมี Rectifier เป็นตัว ไดโอด

พร้อมตัว กรองสัญญาณ สำหรับ Inverter จะใช้ตัว IGBT พร้อมฟังก์ชันมากมายให้เลือกใช้

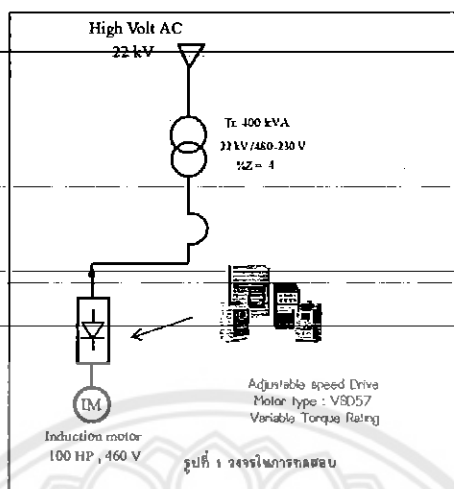
ซึ่งรุ่นนี้จะใช้ควบคุมมอเตอร์ตั้งแต่ 1 HP – 200 HP , 460 V , [6 Pulse] เป็นแบบ Variable

Torque Rate

- ATV58(VT) เป็นตัวควบคุมมอเตอร์อีกยี่ห้อหนึ่งซึ่งมีชื่อเต็มว่า Altivar ที่มีการใช้ไมโครคอลโทรลเลอร์ เป็นตัวเสริมในการควบคุมพร้อมฟังก์ชันเช่นเดียวกัน แต่สำหรับรุ่นนี้จะใช้ควบคุมมอเตอร์ตั้งแต่ 1 HP – 100 HP , 460 V , [6 Pulse] เป็นแบบ Variable

Torque เช่นกัน ซึ่งคุณสมบัติจะขึ้นอยู่กับผู้ผลิตแต่ละยี่ห้อ

กรณีศึกษาที่ 1: Drive 100 HP 1 ตัว ชนิด VSD57(VT)



รูปที่ 4.1 : วงจรที่ทำการทดสอบคิดที่ 25 % ของโหลดทั้งระบบของ VSD57

ค่าที่ได้จากการ Simulation จาก Hamcele software

พารามิเตอร์ที่ได้จากการ Simulate	ผลจากการทดสอบ	พารามิเตอร์ที่ได้จากการ Simulate	ผลจากการทดสอบ
Short Circuit Ratio at PCC1 (Isc/II)	87.5	Per Phase Inductance	94.284 uH
Rated Load Current as PCC1	262 A	RMS AC Line Current	118.69 A
Line-Line Drive Voltage	479.4 V	THDv at PCC1	0.92%
Transformer Turns Ratio	1.83	THDv at PCC2)	4.16%
Per Phase Resistance	7.954 mOhms	TDDi at PCC1)	12.96%

ตารางที่ 4.1 : ผลของการ Simulate ของ VSD57 (VT)

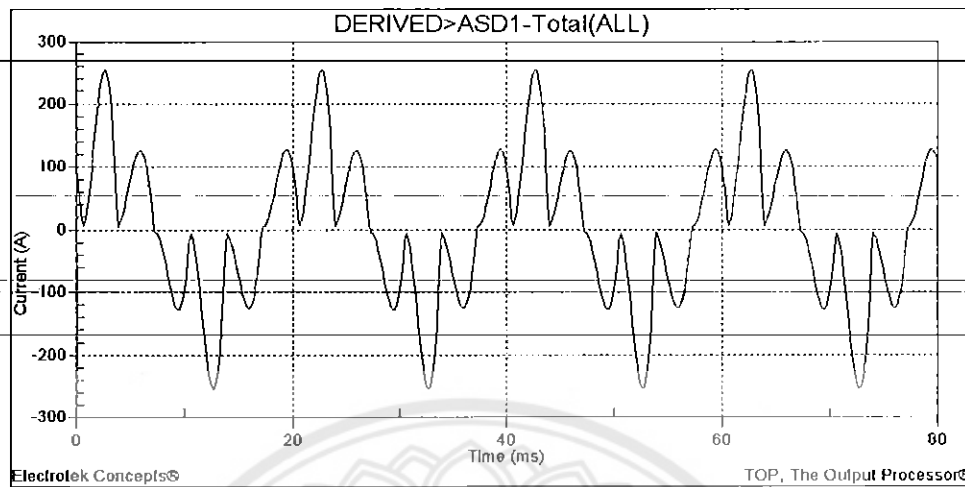
PCC1 คือ จุดเชื่อมต่อระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้า

PCC2 คือ จุดเชื่อมต่อระหว่างชุดหม้อแปลงกับอินเวอร์เตอร์

Harmonic Number	Frequency (Hz)	Voltage Distortion (%) 1	Voltage Distortion (%) 2	Current Distortion (%)	Harmonic Current (Amps)
1	50				101
2	100	0.00%	0.00%	0.00%	0.01
3	150	0.01%	0.03%	0.16%	0.78
4	200	0.00%	0.00%	0.00%	0
5	250	0.62%	2.81%	10.89%	52.39
6	300	0.00%	0.00%	0.00%	0
7	350	0.53%	2.37%	6.57%	31.62
8	400	0.00%	0.00%	0.00%	0
9	450	0.00%	0.02%	0.04%	0.18
10	500	0.00%	0.00%	0.00%	0
11	550	0.20%	0.89%	1.57%	7.57
12	600	0.00%	0.00%	0.00%	0
13	650	0.23%	1.02%	1.53%	7.36
14	700	0.00%	0.00%	0.00%	0
15	750	0.00%	0.02%	0.02%	0.12
16	800	0.00%	0.00%	0.00%	0
17	850	0.13%	0.57%	0.65%	3.12
18	900	0.00%	0.00%	0.00%	0

ตารางที่ 4.2: ขนาดของฮาร์โมนิกอันดับต่างๆ ของ VSD57(VT)

กราฟสัญญาณกระแสของการ DriveVSD57(VT)

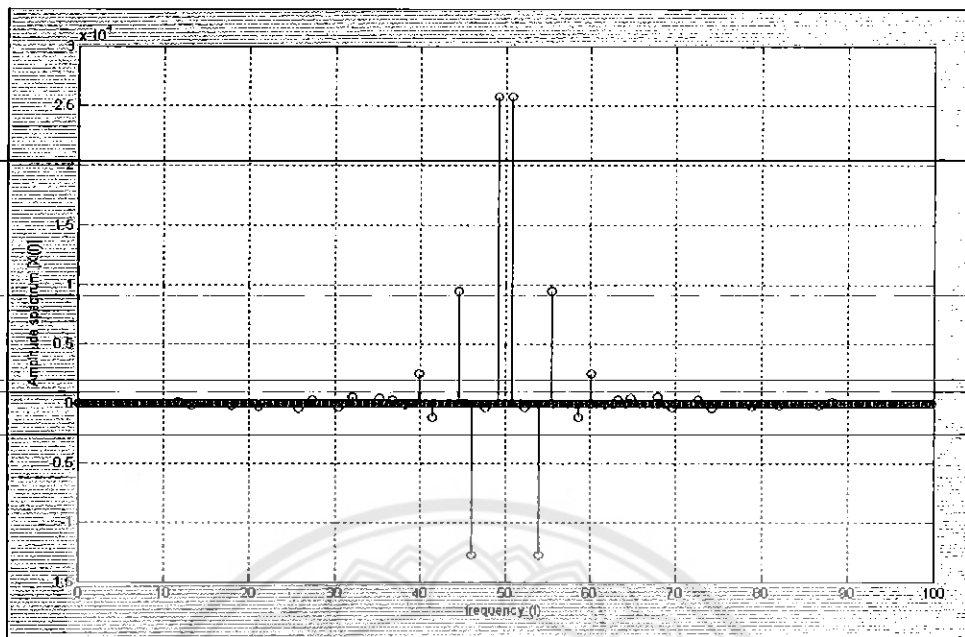


รูปที่ 4.2 กระแสของ VSD57 ณ จุด PCC2

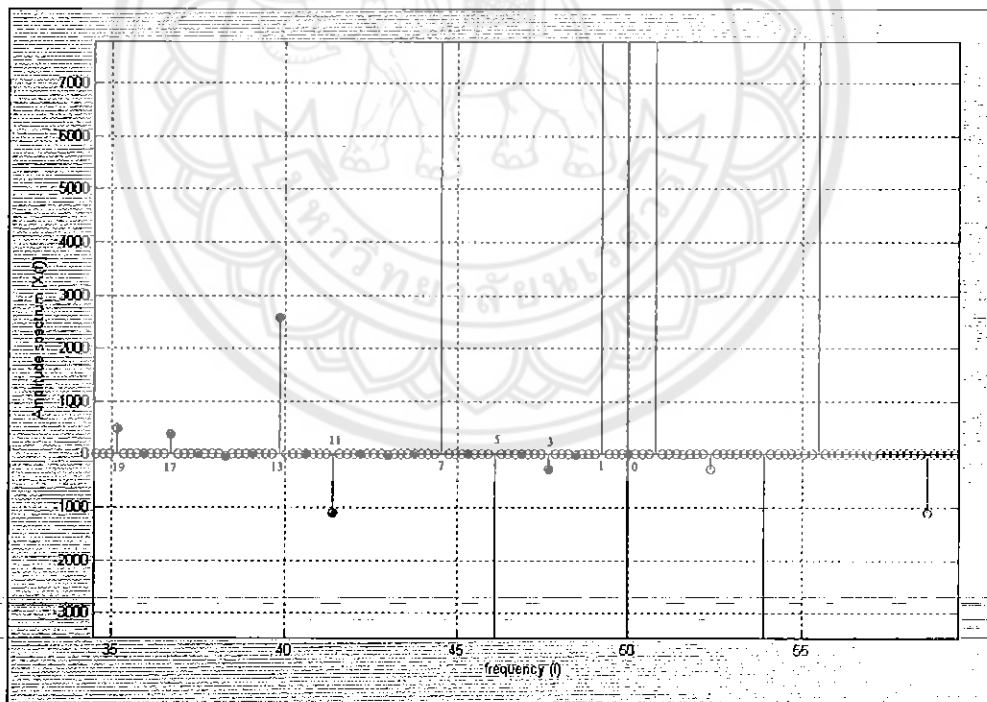
จากข้อมูลที่ได้มาจากโปรแกรมจะเป็นค่าที่บอกขนาดของฮาร์มอนิกอันดับที่ต่างๆ โดยการใช้วิธีการของ ฟูเรียร์ แปลงจากสัญญาณทางเวลาเป็นความถี่ซึ่งมีค่าเป็นค่าบวกทั้งหมดแต่สำหรับฮาร์มอนิกนั้นจะมีทั้งฮาร์มอนิกด้านบวกและฮาร์มอนิกด้านลบดังนั้นเราจึงทำการนำ ค่าของกราฟกระแสในการ Drive ครั้งนี้มาแปลงให้อยู่ในรูปของ เมตริกซ์ เพื่อจะนำไป Plot ใน โปรแกรม Math lab เพื่อดูการเกิดของฮาร์มอนิกอันดับที่ต่างๆ ของกระแสนี้โดยใช้ Code Math lab ดังนี้

Code Math lab

```
A = VSD1;           % data of Graph
fs = 100;           % sampling rate
Ts = 1/fs;          % sampling period
Tmax = 0.5;         % signal duration
t = [0:Ts:Tmax];    % time vector
X1 = fft(A);
L=length(X1);
f = ((0:L-1)/L)*fs;
stem (f,fftshift(X1));
ylabel('Amplitude spectrum [X(f)]');xlabel('frequency (f)');
grid on;
```



รูปที่ 4.3 ภาพสเปกตรัมของกราฟกระแสที่ได้ Math lab



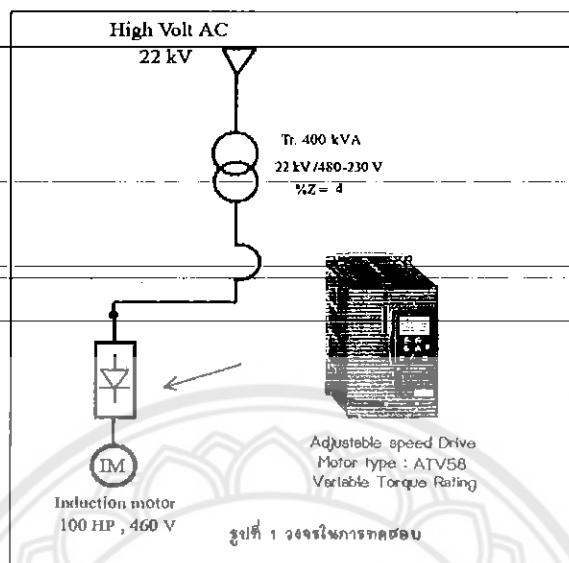
รูปที่ 4.4 เป็นภาพขยายของการใช้ Math lab

จากรูปของสเปคตรัมที่ได้จากการ Simulation จาก Math lab เมื่อนำมาเทียบกับตารางฮาร์มอนิกที่ได้จาก Software Hamcalc จะเห็นว่า ฮาร์มอนิกอันดับที่ 3, 5, 11 จะเป็นฮาร์มอนิกทางด้านลบ ส่วนฮาร์มอนิกอันดับที่ 1, 7, 13, 17, 19 จะเป็นฮาร์มอนิกด้านบวก เมื่อนำไป plot กราฟฮาร์มอนิกใหม่จะได้



รูปที่ 4.5 : ขนาดของฮาร์มอนิกอันดับที่ต่างๆ ที่ได้จากสัญญาณกระแสของ VSD57(VT)

กรณีศึกษาที่ 2: Drive 100 HP 1 ตัว ชนิด ATV58(VT)



รูปที่ 4.6 วงจรที่ทำการทดสอบคิดที่ 25 % ของโหลดทั้งระบบของ ATV58

ค่าที่ได้จากการ Simulation จาก Hamcalc software

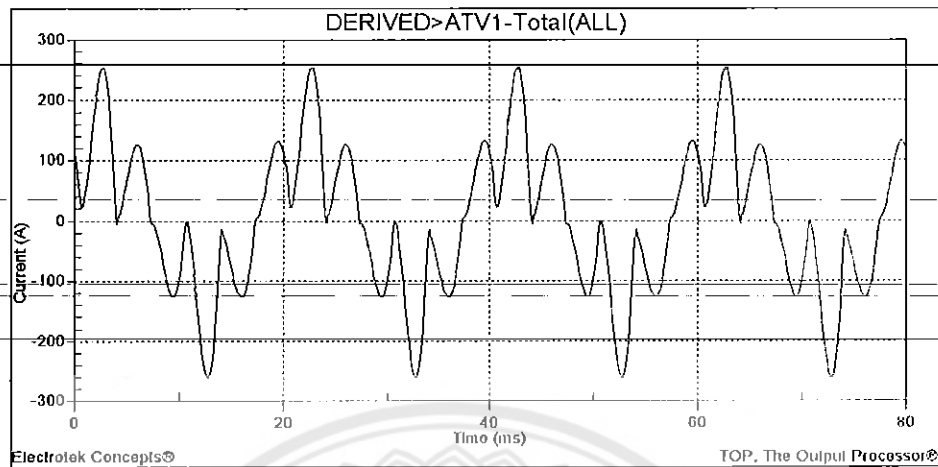
พารามิเตอร์ที่ได้จากการ Simulate	ผลจากการทดสอบ	พารามิเตอร์ที่ได้จากการ Simulate	ผลจากการทดสอบ
Short Circuit Ratio at PCC1 (Isc/Il)	87.5	Per Phase Inductance	94.284 uH
Rated Load Current as PCC1	262 A	RMS AC Line Current	121.53 A
Line-Line Drive Voltage	479.4 V	THDv at PCC1	0.91%
Transformer Turns Ratio	1.83	THDv at PCC2)	4.11%
Per Phase Resistance	7.954 mOhms	TDDi. at PCC1)	13.00%

ตารางที่ 4.3 : ผลของการ Simulate ของ ATV58(VT)

Harmonic Number	Frequency (Hz)	Voltage Distortion (%) 1	Voltage Distortion (%) 2	Current Distortion (%)	Harmonic Current (Amps)
1	50				104.21
2	100	0.02%	0.10%	0.98%	4.71
3	150	0.01%	0.03%	0.17%	0.83
4	200	0.03%	0.15%	0.72%	3.47
5	250	0.63%	2.83%	10.97%	52.8
6	300	0.00%	0.02%	0.07%	0.34
7	350	0.52%	2.32%	6.44%	30.97
8	400	0.01%	0.03%	0.07%	0.34
9	450	0.00%	0.01%	0.02%	0.09
10	500	0.01%	0.03%	0.06%	0.31
11	550	0.19%	0.84%	1.48%	7.11
12	600	0.00%	0.02%	0.03%	0.16
13	650	0.22%	0.98%	1.46%	7.02
14	700	0.01%	0.03%	0.04%	0.17
15	750	0.01%	0.03%	0.04%	0.21
16	800	0.01%	0.02%	0.03%	0.15
17	850	0.12%	0.55%	0.63%	3.02
18	900	0.00%	0.01%	0.01%	0.07

ตารางที่ 4.4: ขนาดของฮาร์โมนิกอันดับต่างๆ ของ ATV58(VT)

กราฟกระแสของการ Drive ATV58(VT)



รูปที่ 4.7 กระแสของ AVT58 ณ จุด PCC2

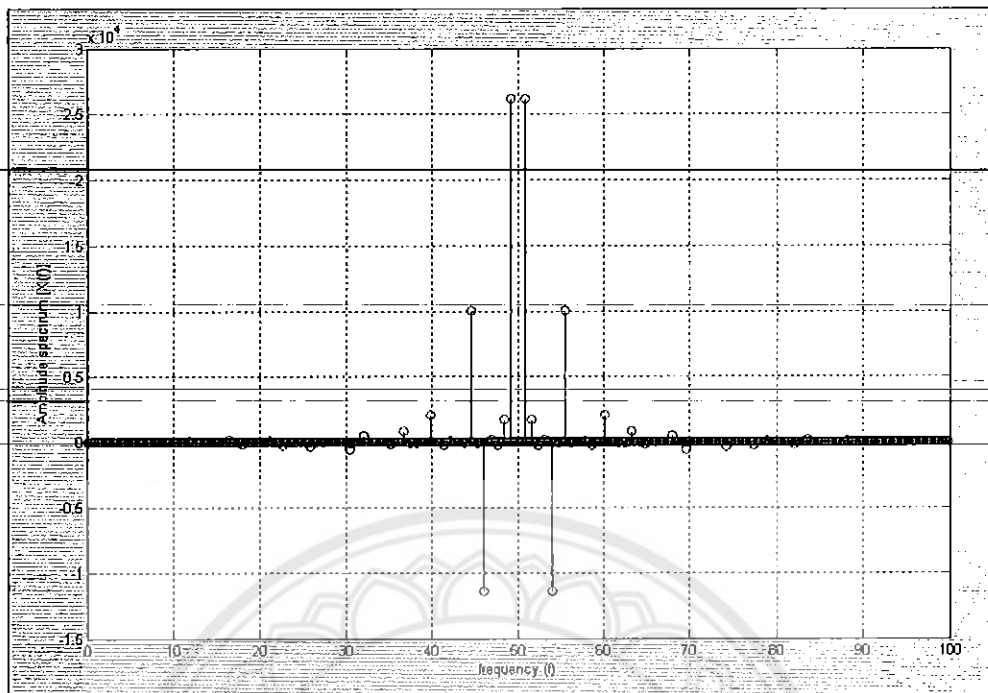
จากข้อมูลที่ได้มาจากโปรแกรมจะเป็นค่าที่บอกขนาดของฮาร์มอนิกอันดับที่ต่างๆ โดยการใช้วิธีการของ ฟูเรียร์ แปลงจากสัญญาณทางเวลามาเป็นความถี่ซึ่งมีค่าเป็นค่าบวกทั้งหมดแต่สำหรับฮาร์มอนิกนั้นจะมีทั้งฮาร์มอนิกด้านบวกและฮาร์มอนิกด้านลบดังนั้นเราจึงทำการนำ ค่าของกราฟกระแสในการ Drive ครั้งนี้มาแปลงให้อยู่ในรูปของ เมตริกซ์ เพื่อจะนำไป Plot ใน โปรแกรม Math lab เพื่อดูการเกิดของฮาร์มอนิกอันดับที่ต่างๆ ของกระแสนี้โดยใช้ Code Math lab ดังนี้

Code Math lab

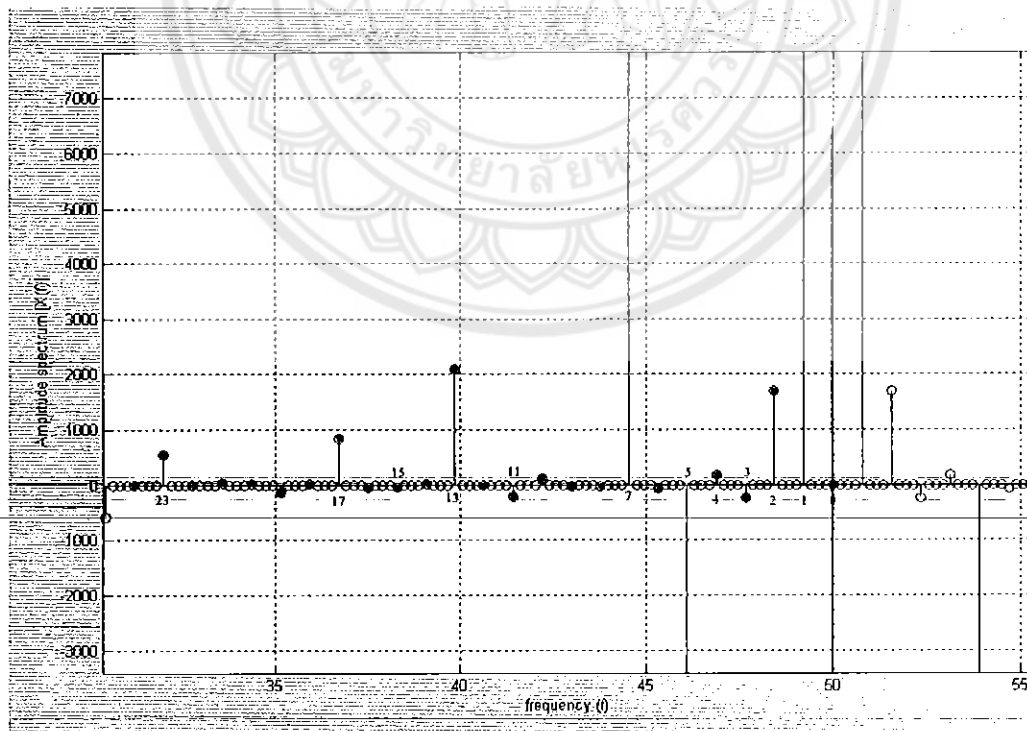
```
A = AVT1;           % data of Graph
fs = 100;           % sampling rate
Ts = 1/fs;          % sampling period
Tmax = 0.5;         % signal duration
t = [0:Ts:Tmax];   % time vector

X1=fft(A);

L = length(X1);
f = ((0:L-1)/L)*fs;
stem (f,fftshift(X1));
ylabel('Amplitude spectrum [X(f)]');xlabel('frequency (f)');
grid on;
```

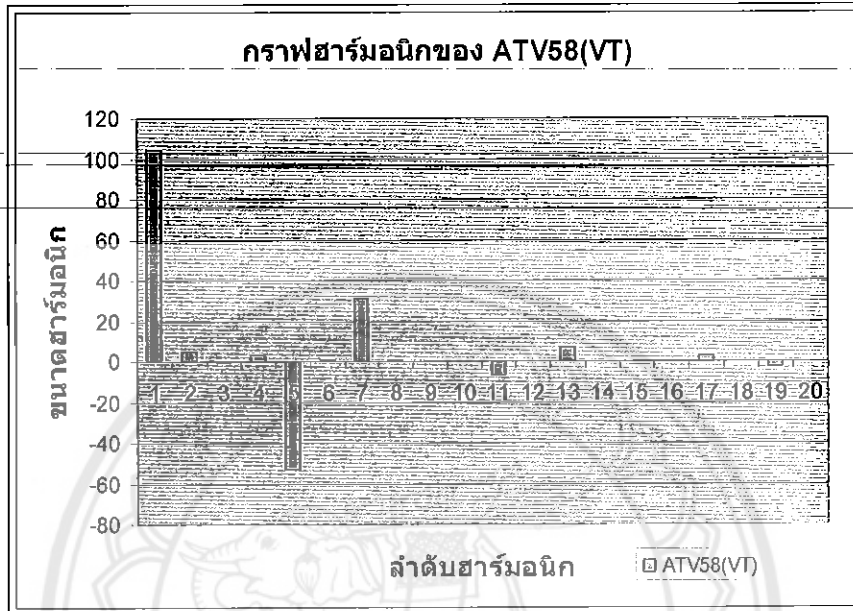


รูปที่ 4.8 ภาพสเปกตรัมของกราฟกระแสที่ได้ Math lab ของ AVT58

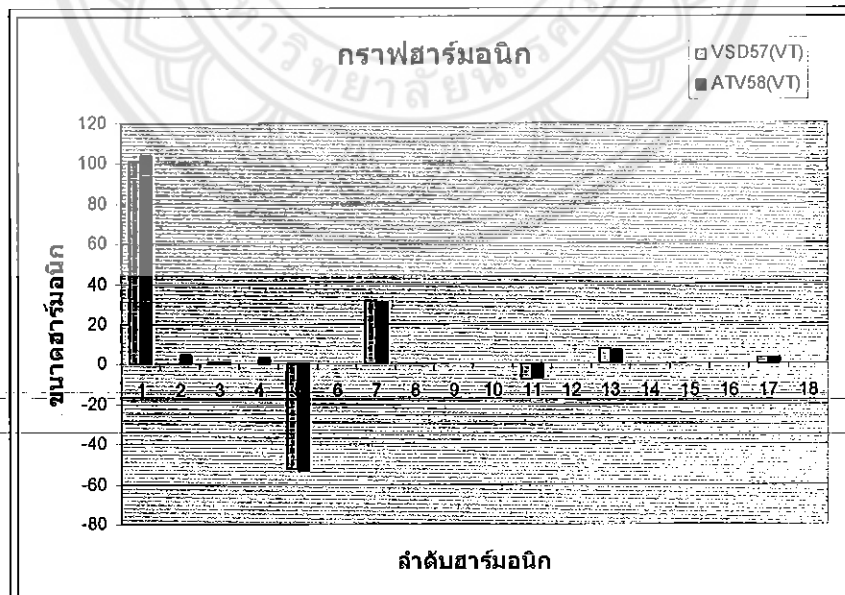


รูปที่ 4.9 เป็นภาพขยายของการใช้ Math lab ของ AVT58

จากรูปของสเปกตรัมที่ได้จากการ Simulation จาก Math lab เมื่อนำมาเทียบกับตารางฮาร์มอนิกที่ได้จาก Software Hamcalc จะเห็นว่า ฮาร์มอนิกอันดับที่ 3, 5, 11, 19 จะเป็นฮาร์มอนิกทางด้านลบ ส่วนฮาร์มอนิกอันดับที่ 1, 2, 4, 7, 13, 17, 23 จะเป็นฮาร์มอนิกด้านบวก เมื่อนำไปพรีดิกกราฟฮาร์มอนิกใหม่จะได้



รูปที่ 4.10 ขนาดของฮาร์มอนิกอันดับที่ต่างๆ ที่ได้จากสัญญาณกระแสของ ATV58(VT)

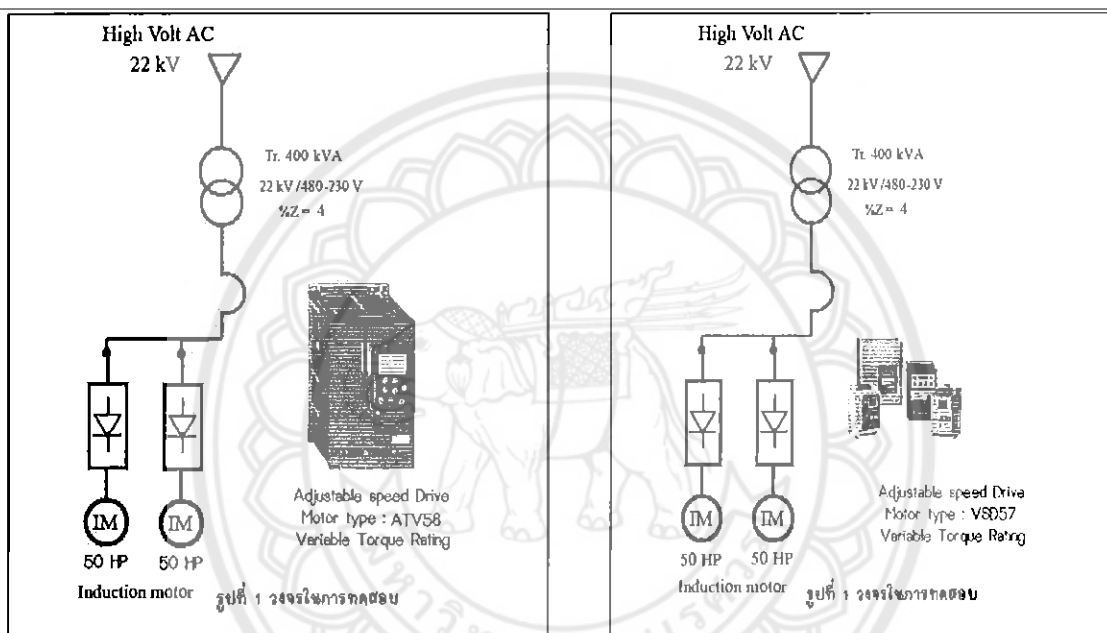


รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบระหว่าง VSD57 กับ ATV58

จากการทดสอบจะสรุปได้ว่าระหว่าง VSD57 กับ ATV58 เมื่อนำมา Drive motor ที่โหลดขนาดเท่ากันจะเห็นได้ชัดว่า ATV58 จะมีการฉีดฮาร์มอนิกอันดับคู่ คือ 2 และ 4 ออกสู่ระบบ แต่สำหรับฮาร์มอนิกอันดับอื่นๆ จะมีค่าใกล้เคียง

2) แล้วถ้าเกิดมีการเพิ่มจำนวนตัว Drive motor เพิ่มขึ้นแต่ใช้ค่าโหลดของทั้งระบบเท่าเดิมจะมีผลต่อสัญญาณกระแสและลำดับฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นอย่างไร ?

โดยการทำการทดสอบแบบเดิมเพียงแต่มีการเพิ่มจำนวนตัว Drive motor เข้าไปแล้วเปลี่ยนมอเตอร์เป็น 50-HP เพื่อให้ได้ 25% ของโหลดทั้งระบบ



ชนิด ATV58(VT)

ชนิด VSD57(VT)

รูปที่ 4.12 วงจรสมมูลที่จะใช้ในการวิเคราะห์

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรม

พารามิเตอร์ที่ได้จากการ Simulate	ผลจากการทดสอบ	ผลจากการทดสอบ
	VSD57(VT)	ATV58(VT)
Short Circuit Ratio at PCC1 (Isc/I1)	87.5	87.5
Rated Load Current as PCC1	262 A	262 A
Line-Line Drive Voltage	479.4 V	479.4
Transformer Turns Ratio	1.83	1.83
Per Phase Resistance	7.954 mOhms	7.954 mOhms
Per Phase Inductance	94.284 uH	94.284 uH
RMS AC Line Current	120.64 A	120.18 A
THDv at PCC1	0.93%	0.9%

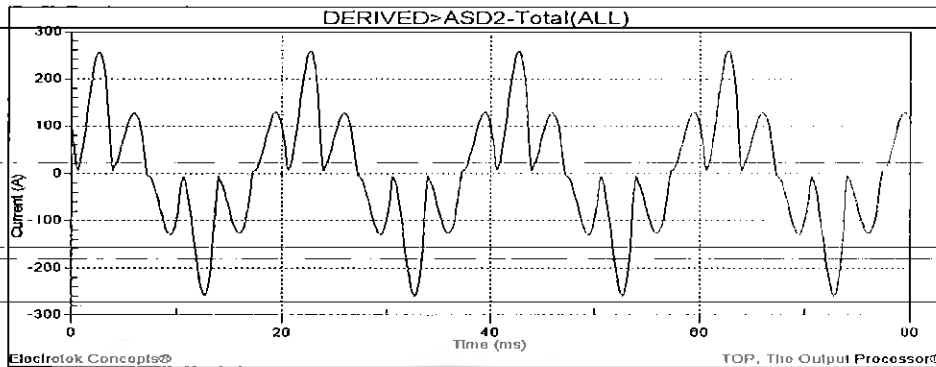
THDv at PCC2)	4.22%	4.07%
TDDi at PCC1)	13.11%	12.88%

ตารางที่ 4.5: ค่าพารามิเตอร์เปรียบเทียบของ VSD57 และ ATV58

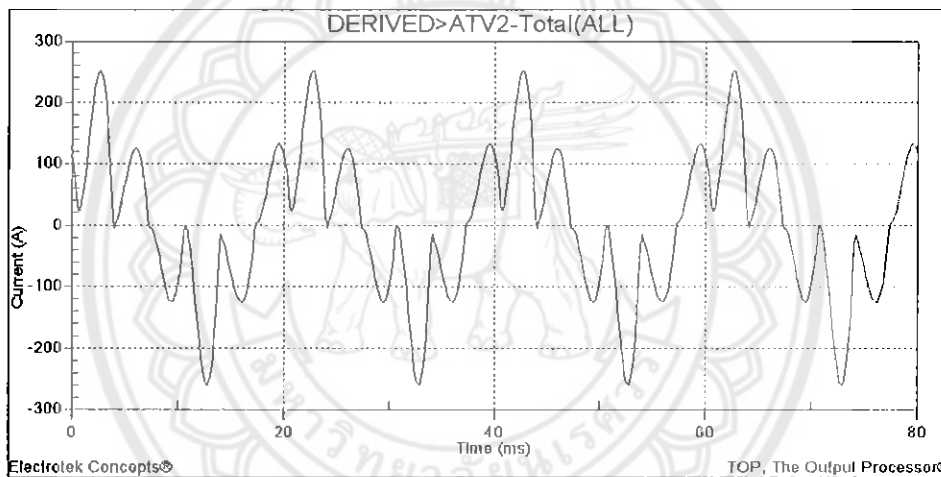
Harmonic	Frequency	Harmonic Current	
Number	(Hz)	VSD57(VT)	ATV58(VT)
1	50	102.82	102.96
2	100	0	5.13
3	150	0.74	0.83
4	200	0	3.77
5	250	-53.08	-52.26
6	300	0	0.35
7	350	31.83	30.74
8	400	0	0.37
9	450	0.19	0.09
10	500	0	0.33
11	550	-7.8	-7.02
12	600	0	0.16
13	650	7.5	6.96
14	700	0	0.18
15	750	0.12	0.21
16	800	0	0.16
17	850	3.21	2.99
18	900	0	0.07
19	950	3.29	-2.92
20	1000	0	0.07

ตารางที่ 4.6: ขนาดของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ของ ATV58 และ VSD57

ลักษณะของกราฟที่ได้จากการทดสอบ



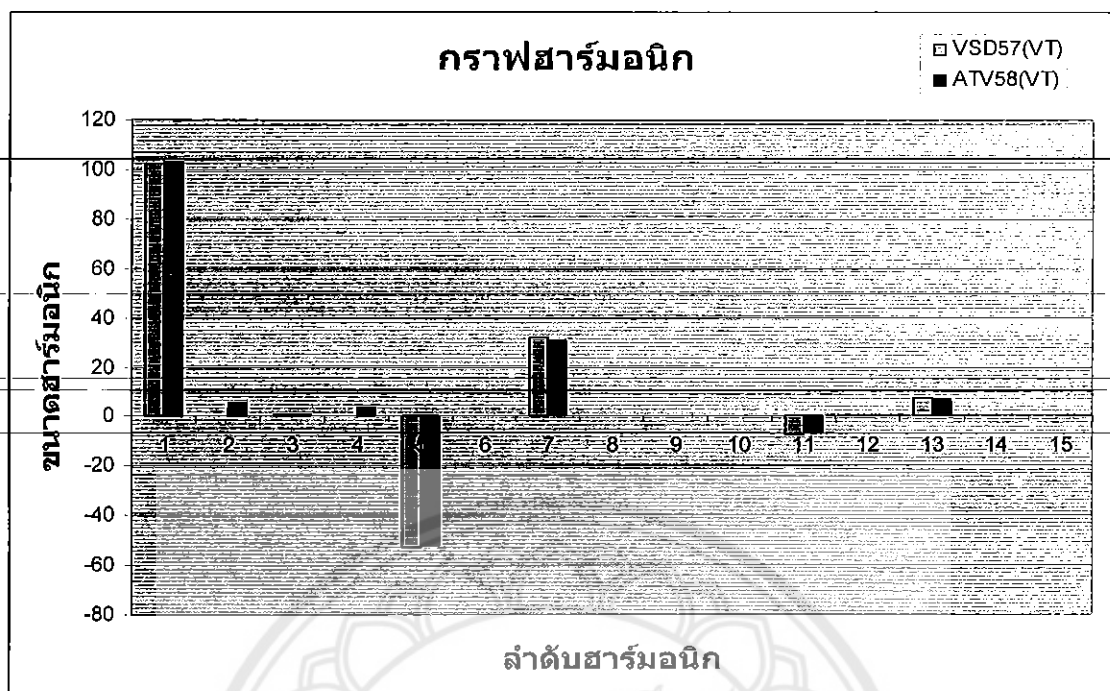
รูปที่ 4.13 กราฟกระแสของ VSD57(VT)



รูปที่ 4.14 กราฟกระแสของ ATV58(VT)

นำค่าจากสัญญาณกระแสทั้งสองไปทำการ plot โดยใช้โปรแกรม Math lab เพื่อหาฮาร์มอนิก ด้านลบและด้านบวกของสัญญาณกระแส จะได้ค่าจากรูปของสเปกตรัมที่ได้จากการ Simulation จาก Math lab เมื่อนำมาเทียบกับตารางฮาร์มอนิกที่ได้จาก Software Hamcalc จะเห็นว่า ฮาร์มอนิกที่เกิดจาก VSD57(VT) อันดับที่ 3, 5, 11 จะเป็นฮาร์มอนิกทางด้านลบ ส่วนฮาร์มอนิกอันดับที่ 1, 7, 13, 17, 19 จะเป็นฮาร์มอนิกด้านบวก สำหรับของ ATV58(VT) อันดับที่ 3, 5, 11, 19 จะเป็นฮาร์มอนิกทางด้านลบ ส่วนฮาร์มอนิกอันดับที่ 1, 2, 4, 7, 13, 17, 23 จะเป็นฮาร์มอนิกด้านบวก

ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้จะใกล้เคียงกับการทดสอบที่ใช้ตัว Drive motor 1 ตัว จะแตกต่างกันก็เพียงเล็กน้อยเท่านั้นเองซึ่งในทางวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ถือว่าไม่มีผล ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า จำนวนตัว Drive ไม่มีผลต่อกระแสและลำดับฮาร์มอนิก เมื่อ Drive ที่โหลดเท่ากัน



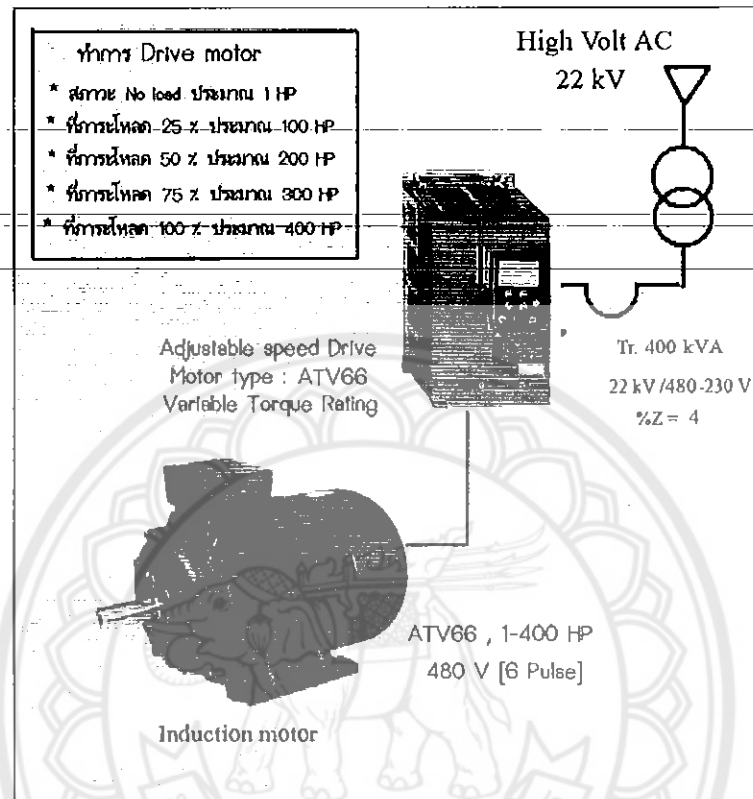
รูปที่ 4.15 การเกิดฮาร์มอนิกของ VSD57 กับ ATV58

จากการทดสอบจะสรุปได้ว่าระหว่าง VSD57 กับ ATV58 เมื่อนำมา Drive motor ที่โหลดขนาดเท่ากันจะเห็นได้ชัดว่า ATV58 จะมีการฉีดฮาร์มอนิกอันดับคู่ คือ 2 และ 4 ออกสู่ระบบ แต่สำหรับฮาร์มอนิกอันดับอื่นๆ จะมีค่าใกล้เคียง

กรณีที่มีการเพิ่มตัวขับเคลื่อนแต่ภาระโหลดเท่าเดิมจะส่งผลให้กระแส Fundamental มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนฮาร์มอนิกอันดับอื่นๆ ก็เช่นกัน

ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 และ 4 ที่ถูกฉีดมาไม่มีผลอะไรมาต่อระบบเลย เมื่อเทียบกับ กระแส fundamental ที่มีค่าสูงเมื่อนำมารวมกับฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 และ 4 แล้วก็ทำให้สัญญาณกระแสเพิ่มขึ้นไปเล็กน้อย สำหรับในทางไฟฟ้าแรงสูง ถือว่าไม่มีผลต่อระบบ แต่ในทางกลับกัน ถ้าเกิดมีค่าสูง ก็จะเป็นตัวที่เข้าไปทำระบบผิดเพิ่มขึ้นไป ยกตัวอย่างเช่น ทำให้กระแสไหลในสายนิวตรอล สูงกว่าพิกัดของสาย เกิดความร้อนสูงเกินในหม้อแปลง เซอร์คิตเบรกเกอร์ทำงานผิดพลาด ฯลฯ

3) ทดสอบว่า ขนาดของภาระโหลดจะส่งผลต่อกระแสอินพุต และฮาร์มอนิกอย่างไร ?



รูปที่ 4.16 วงจรที่จะใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณกระแส และฮาร์มอนิก

ในการทดสอบนี้ต้องการจะทราบ ว่า ขนาดของภาระโหลดจะส่งผลต่อกระแสอินพุต และฮาร์มอนิกอย่างไร โดยการทดสอบ Drive motor ด้วยอินเวอร์เตอร์ AVT66 ซึ่งสามารถ Drive motor ตั้งแต่ 1 HP – 400 HP (Variable Torque), 460 V, [6, 12, 18 pulse]

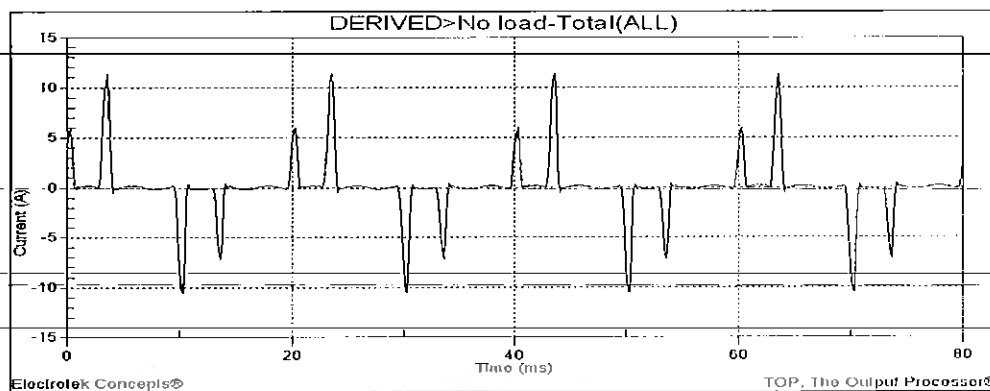
เพื่อให้เห็นความแตกต่างชัดเจนเราจะทำการ Variable ค่าโหลดขึ้น จาก ค่าโหลดน้อยๆ, 25%, 50%, 75%, Full load พร้อมทั้งวิเคราะห์การเกิดฮาร์มอนิกด้านลบด้านบวกของแต่ละวงจร โดยใช้

โปรแกรม Math lab

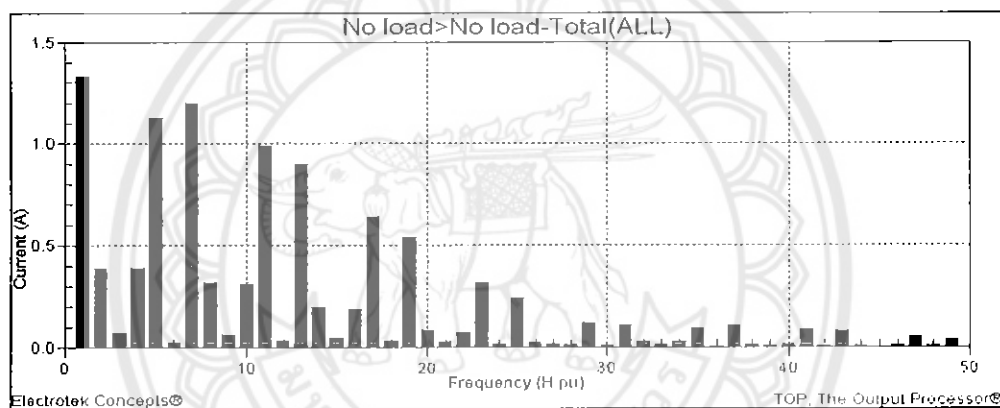
ตารางที่ 4.7: ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Harmcelc

Harmonic Number	Frequency (Hz)	Harmonic Current (Amps) No load	Harmonic Current (Amps) 25 %	Harmonic Current (Amps) 50%	Harmonic Current (Amps) 75%	Harmonic Current (Amps) Full load
1	50	1.33	102.41	204.6	300.42	399.25
2	100	-0.39	0.01	0	0	0
3	150	-0.07	-0.84	-1.13	-1.6	-2.02
4	200	-0.39	0	0	0	0
5	250	1.13	53.06	76.79	88.15	92.79
6	300	-0.02	0	0	0	0
7	350	1.2	-31.96	-30.59	-29.42	-33.98
8	400	-0.32	0	0	0	0
9	450	-0.06	0.18	0.38	0.56	-0.66
10	500	-0.31	0	0	0	0
11	550	0.99	-7.64	13.45	13.22	13.84
12	600	0.03	0	0	0	0
13	650	0.9	7.43	-7.61	-10.54	13.01
14	700	-0.2	0	0	0	0
15	750	-0.05	-0.11	0.26	0.31	-0.33
16	800	-0.19	0	0	0	0
17	850	0.64	-3.16	-4.79	5.53	7.09
18	900	0.03	0	0	0	0
19	950	-0.54	-3.24	3.9	-5.11	5.06
20	1000	-0.08	0	0	0	0

กราฟกระแสของการ Drive motor ในสถานะโหลดต่ำ ๆ



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงกระแสในสถานะโหลดต่ำ ๆ



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงขนาดของฮาร์มอนิกในสถานะโหลดต่ำ ๆ

เขียนโปรแกรม Math lab

```
A = NOLOAD1; % data of Graph
```

```
fs = 100; % sampling rate
```

```
Ts = 1/fs; % sampling period
```

```
Tmax = 0.5; % signal duration
```

```
t = [0:Ts:Tmax]; % time vector
```

```
X1 = fft(A);
```

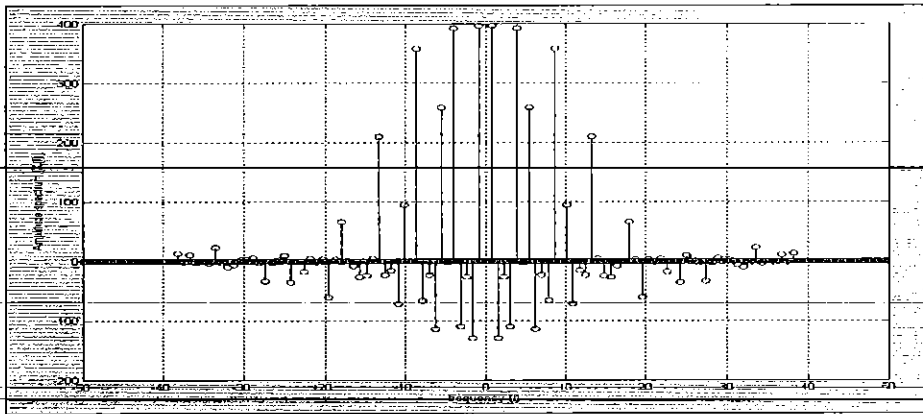
```
L = length(X1);
```

```
f = ((0:L-1)/L)*fs;
```

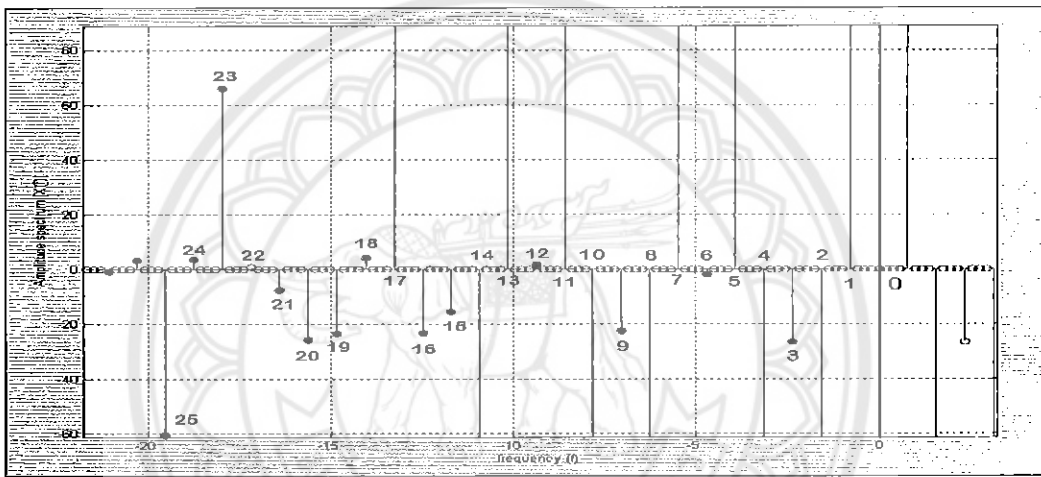
```
stem (f,fftshift(X1));
```

```
ylabel('Amplitude spectrum [X(f)]');xlabel('frequency (f)');
```

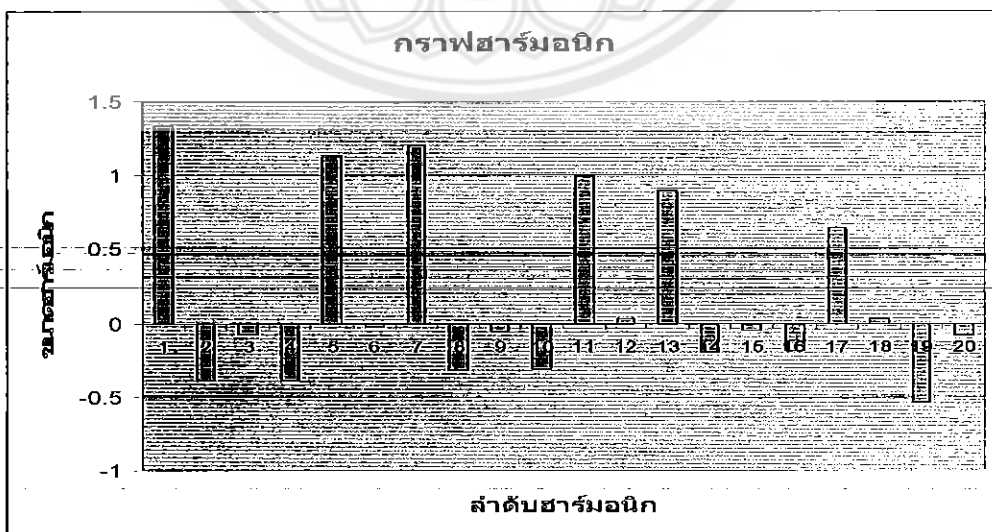
```
grid on;
```



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงสเปกตรัมในสภาวะโหลดต่ำๆ

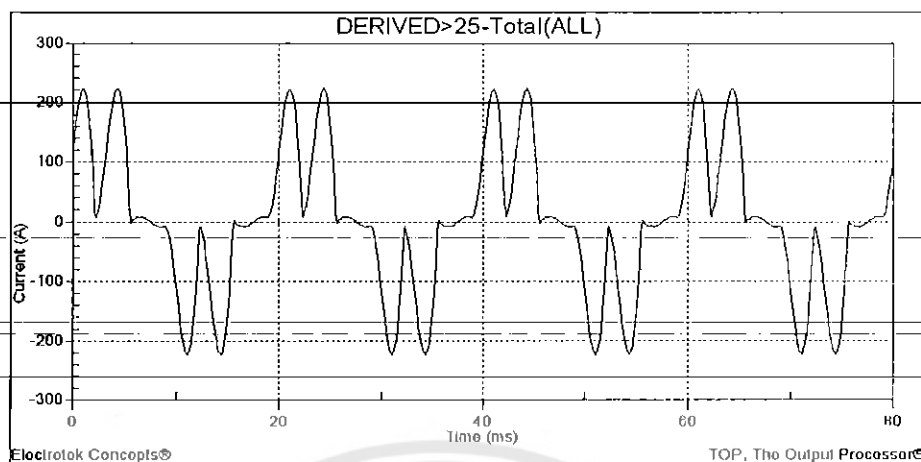


รูปที่ 4.20 กราฟขยายแสดงสเปกตรัมในสภาวะโหลดต่ำๆ

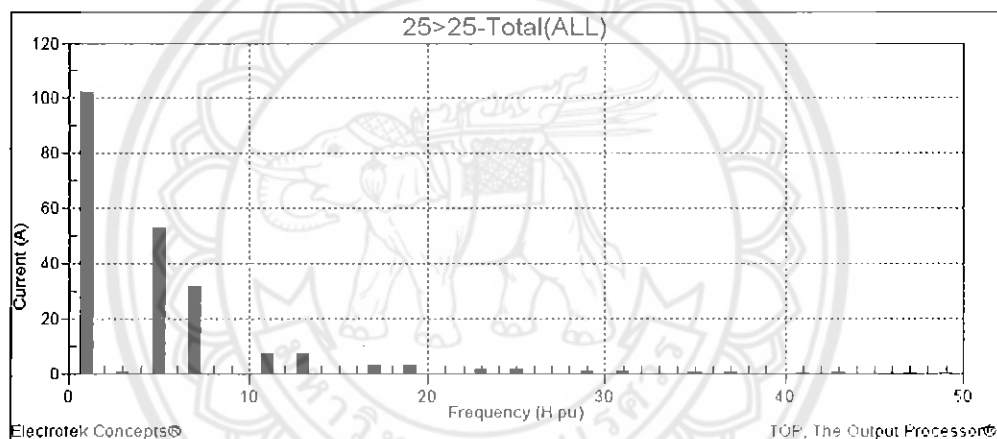


รูปที่ 4.21 กราฟขยายแสดงขนาดในสภาวะโหลดต่ำๆเมื่อนำไปเทียบกับสเปกตรัม

กราฟกระแสของการ Drive motor ในสถานะโหลด 25 %



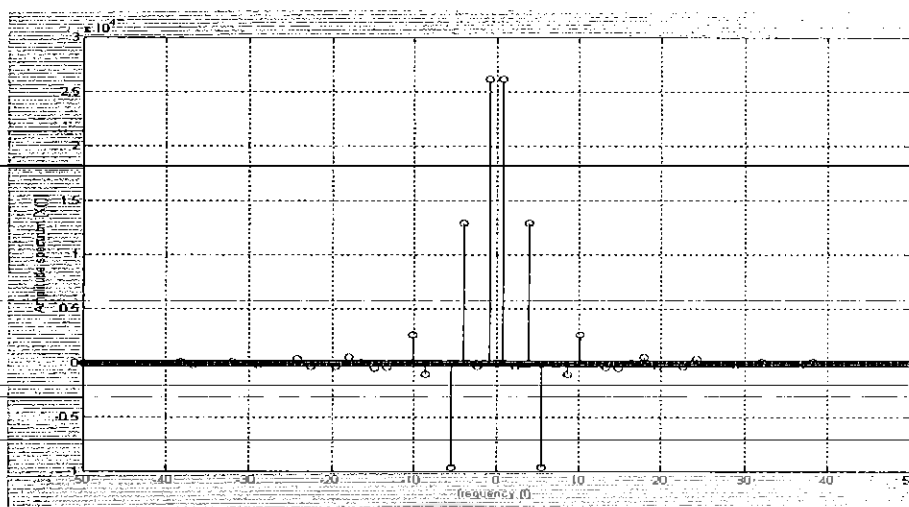
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงกระแสในสถานะ โหลด 25 เปอร์เซ็นต์



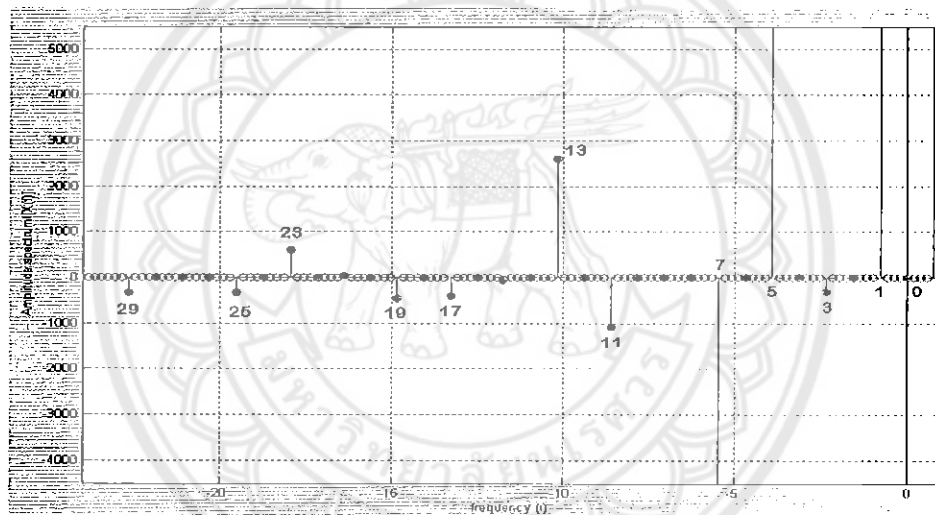
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงขนาดของฮาร์มอนิกในสถานะ โหลด 25 เปอร์เซ็นต์

เขียนโปรแกรม Math lab

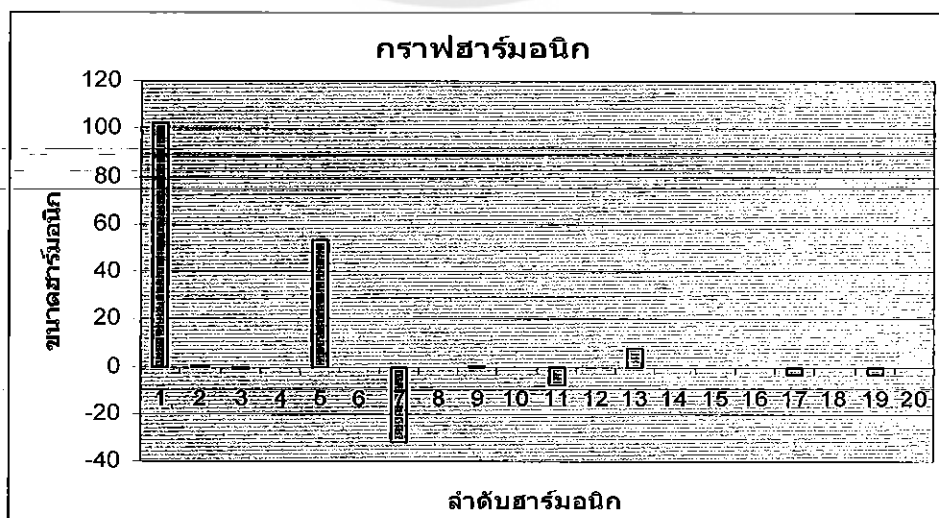
```
A = A25;           % data of Graph
fs = 100;          % sampling rate
Ts = 1/fs;         % sampling period
Tmax = 0.5;        % -signal duration
t = [0:Ts:Tmax];  % time vector
X1 = fft(A);
L = length(X1);
f = ((0:L-1)/L)*fs;
stem (f,fftshift(X1));
ylabel('Amplitude spectrum [X(f)]');xlabel('frequency (f)');
grid on;
```



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงสเปกตรัมในสภาวะ โหลด 25 เปอร์เซ็นต์

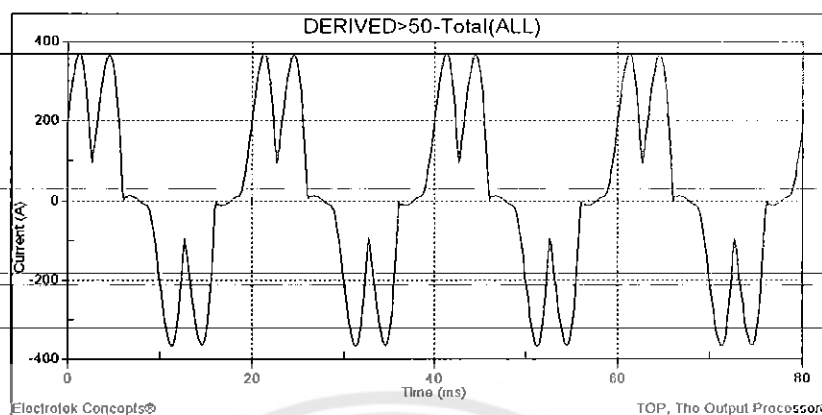


รูปที่ 4.25 กราฟขยายแสดงสเปกตรัมในสภาวะ 25 เปอร์เซ็นต์

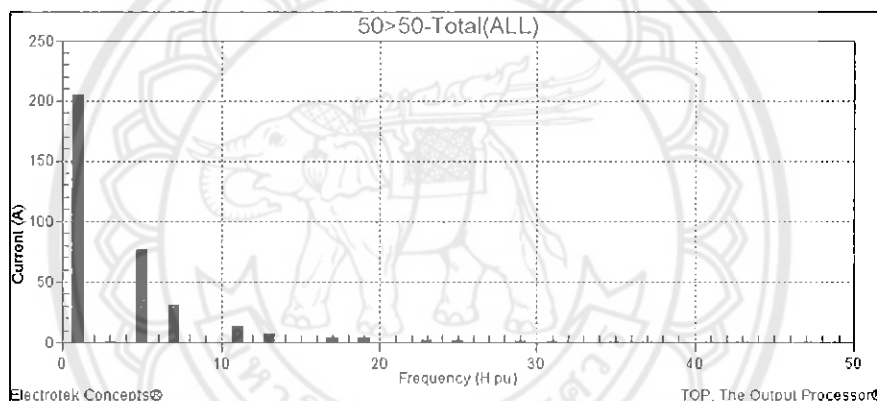


รูปที่ 4.26 กราฟขยายแสดงขนาดเมื่อนำไปเทียบกับสเปกตรัม 25 เปอร์เซ็นต์

กราฟกระแสของการ Drive motor ในสถานะโหลด 50 %



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงกระแสในสถานะ โหลด 50 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงขนาดของฮาร์มอนิกในสถานะ 50 เปอร์เซ็นต์

เขียนโปรแกรม Math lab

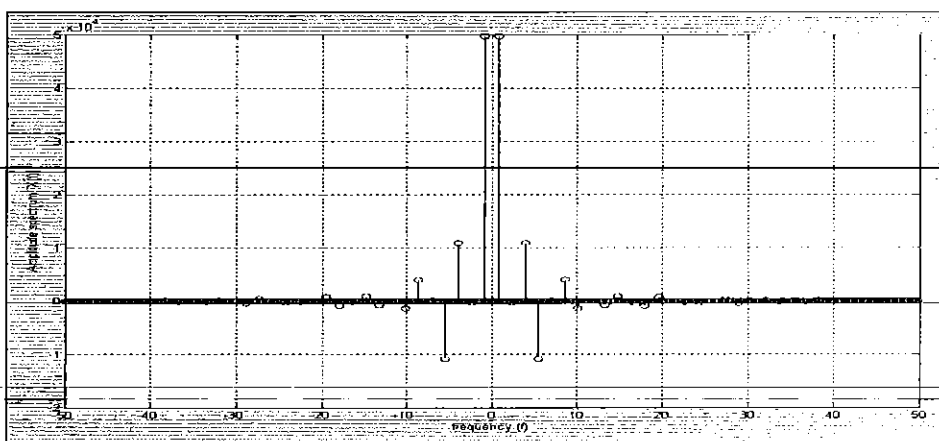
```

A = A50;           % data of Graph
fs = 100;          % sampling rate
Ts = 1/fs;         % sampling period
Tmax = 0.5;        % signal duration

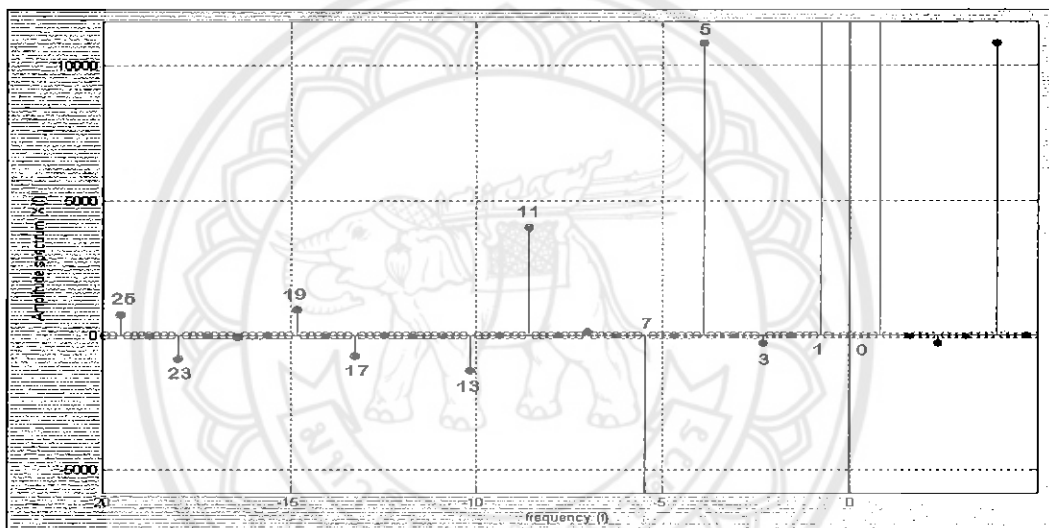
t = [0:Ts:Tmax];   % time vector

X1 = fft(A);
L = length(X1);
f = ((0:L-1)/L)*fs;
stem (f,fftshift(X1));
ylabel('Amplitude spectrum [X(f)]');xlabel('frequency (f)');
grid on;

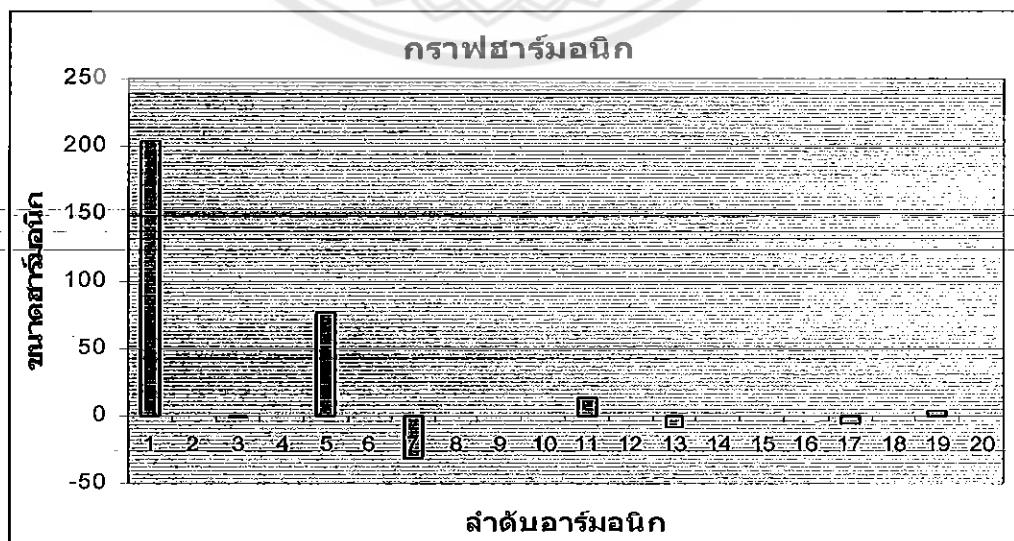
```



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงสเปกตรัมในสถานะ โหลด 50 เปอร์เซ็นต์

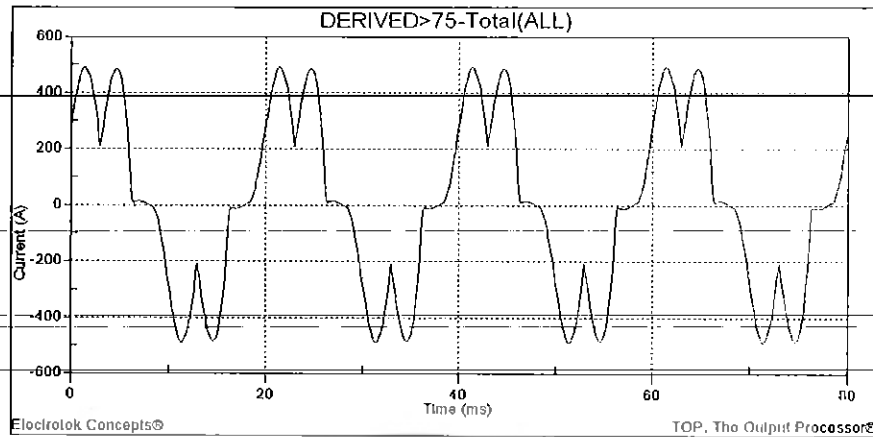


รูปที่ 4.30 กราฟขยายแสดงสเปกตรัมในสถานะ โหลด 150 เปอร์เซ็นต์

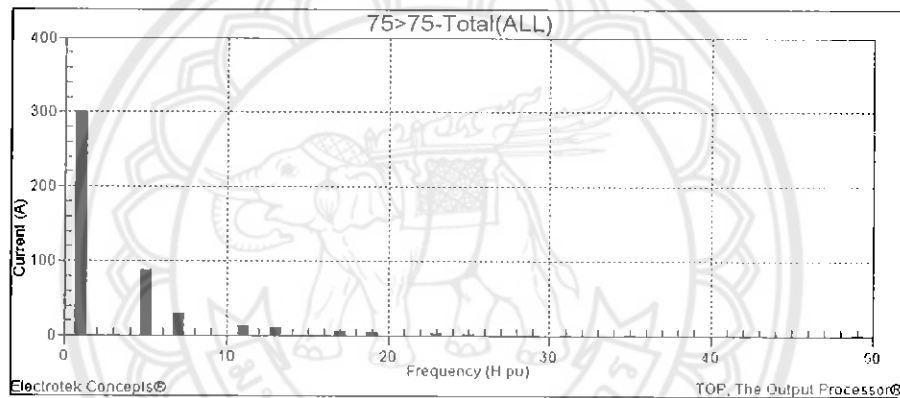


รูปที่ 4.31 กราฟขยายแสดงขนาดเมื่อนำไปเทียบกับสเปกตรัม โหลด 50 เปอร์เซ็นต์

กราฟกระแสของการ Drive motor ในสถานะโหลด 75 %



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงกระแสในสถานะโหลด 75 เปอร์เซ็นต์



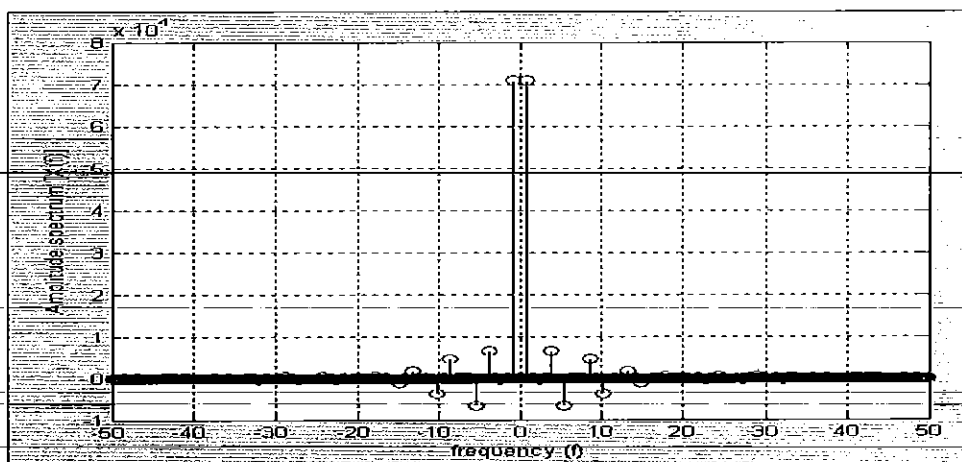
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงขนาดของฮาร์มอนิกในสถานะโหลด 75 เปอร์เซ็นต์

เขียนโปรแกรม Math lab

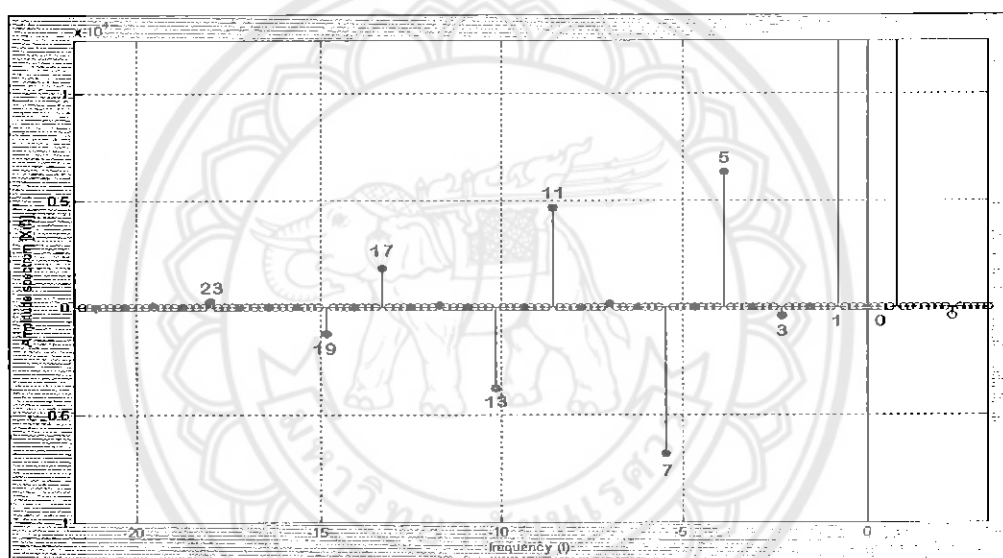
```
A = A75;           % data of Graph
fs = 100;          % sampling rate
Ts = 1/fs;         % sampling period
Tmax = 0.5;        % signal duration
t = [0:Ts:Tmax];   % time vector

X1 = fft(A);
L = length(X1);
f = ((0:L-1)/L)*fs;
stem (f,fftshift(X1));

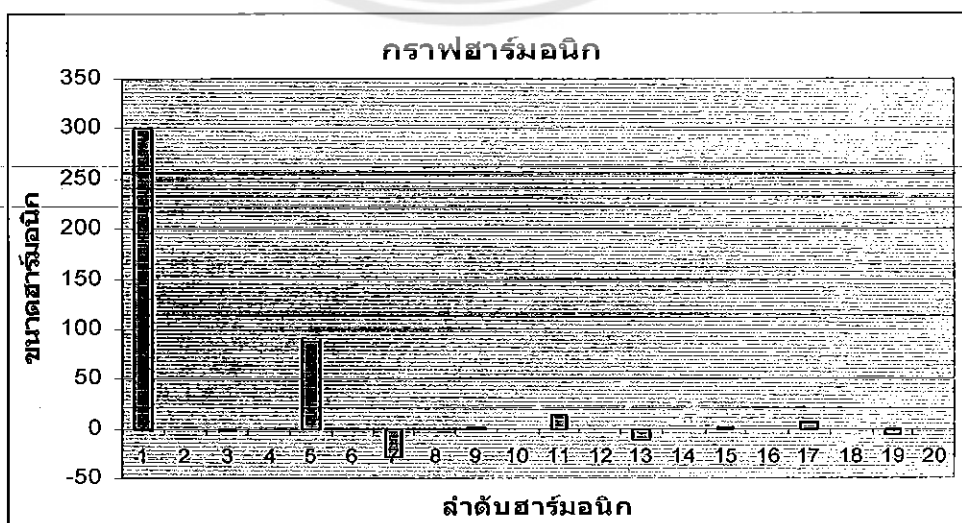
ylabel('Amplitude spectrum [X(f)]');xlabel('frequency (f)');
grid on;
```

รูปที่ 4.34 กราฟแสดงสเปกตรัมในสภาวะโหลด 75 เปอร์เซ็นต์

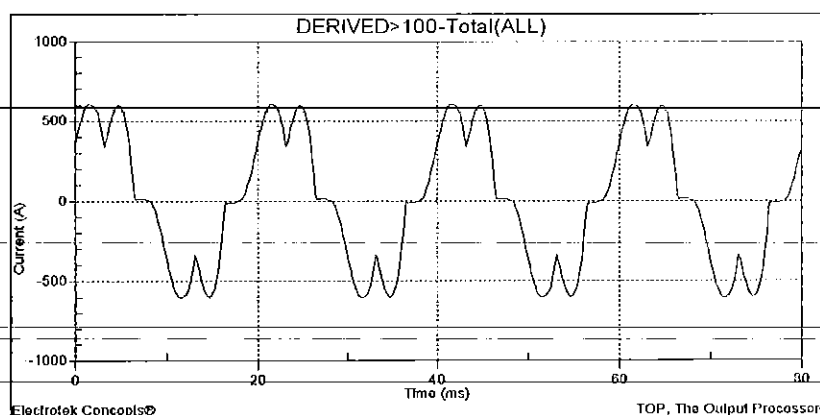


รูปที่ 4.35 กราฟขยายแสดงสเปกตรัมในสภาวะโหลด 75 เปอร์เซ็นต์

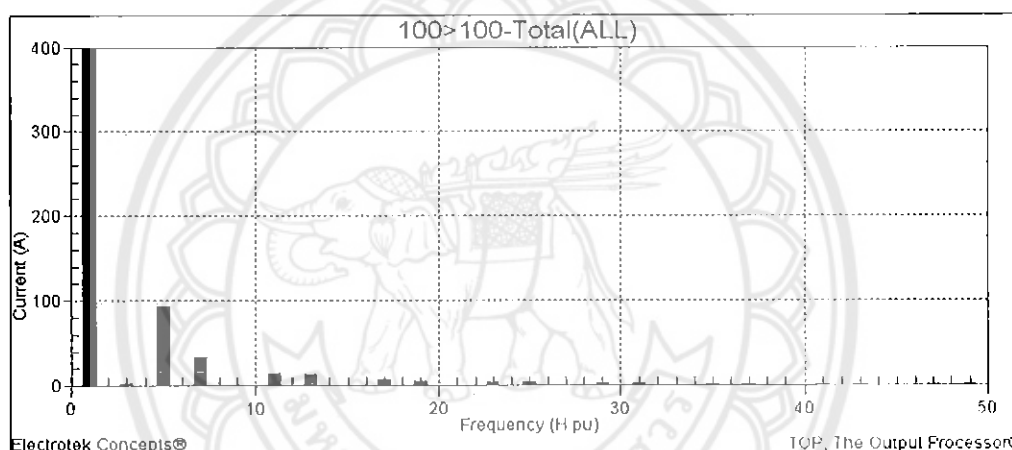


รูปที่ 4.36 กราฟขยายแสดงขนาดเมื่อนำไปเทียบกับสเปกตรัมโหลด 75 เปอร์เซ็นต์

กราฟกระแสของการ Drive motor ในสถานะโหลด 100 %



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงกระแสในสถานะ โหลด 100 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.38 กราฟแสดงขนาดของฮาร์มอนิกในสถานะ โหลด 100 เปอร์เซ็นต์

เขียนโปรแกรม Math lab

```
A = A100;           % data of Graph
fs = 100;           % sampling rate
Ts = 1/fs;          % sampling period
Tmax = 0.5;         % signal duration
t = [0:Ts:Tmax];   % time vector
```

```
X1 = fft(A);
```

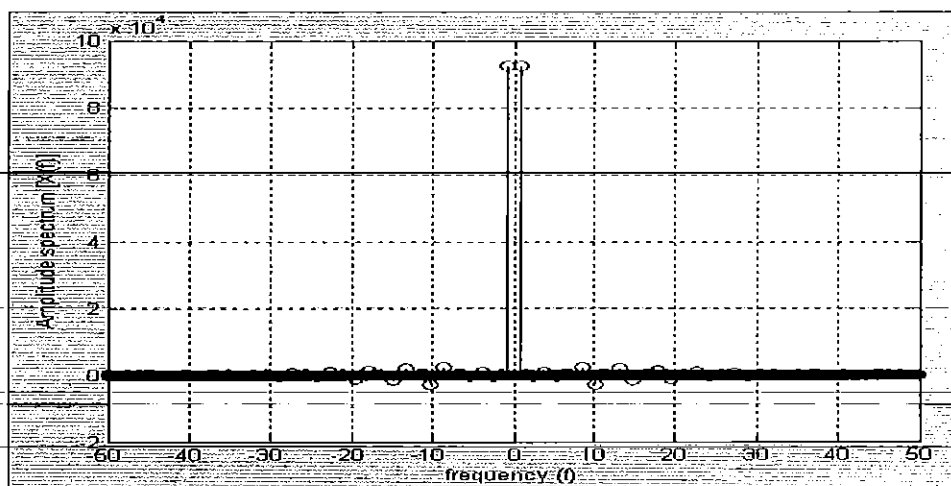
```
L = length(X1);
```

```
f = ((0:L-1)/L)*fs;
```

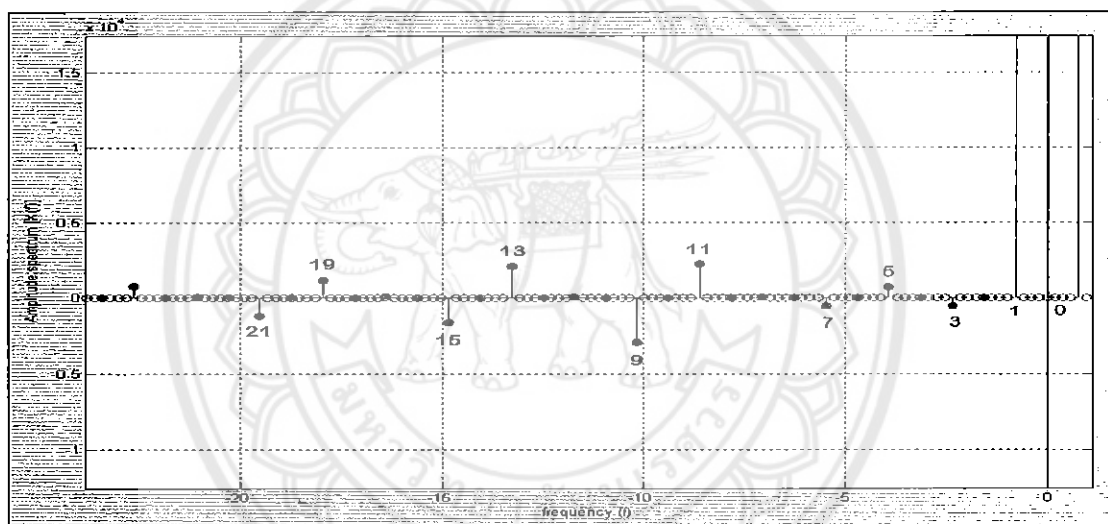
```
stem (f,fftshift(X1));
```

```
ylabel('Amplitude spectrum [X(f)]');xlabel('frequency (f)');
```

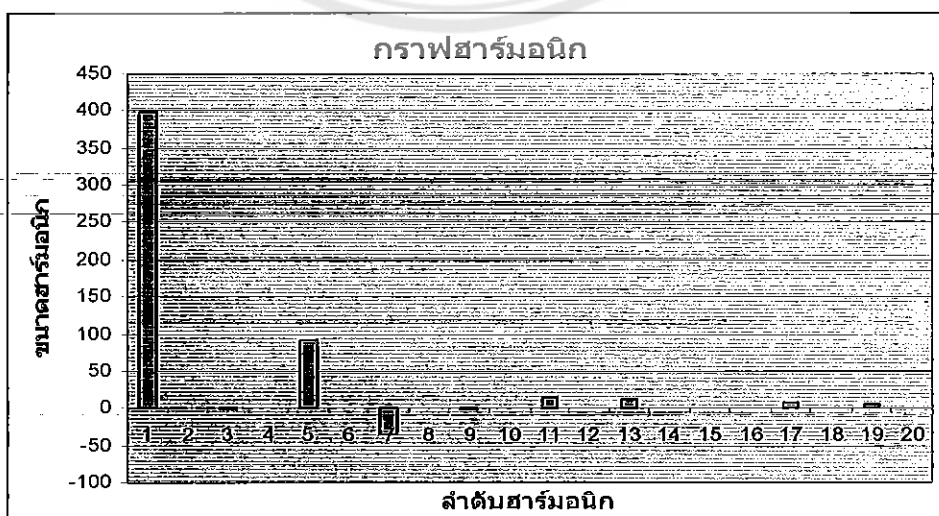
```
grid on;
```



รูปที่ 4.39 กราฟแสดงสเปกตรัมในสถานะ โหลด 100 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.40 กราฟขยายแสดงสเปกตรัมในสถานะ โหลด 100 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.41 กราฟขยายแสดงขนาดเมื่อนำไปเทียบกับสเปกตรัม โหลด 100 เปอร์เซ็นต์

สรุปผลการทดลอง

จากกราฟสัญญาณกระแสจะเห็นได้ชัดว่าที่สถานะโหลดต่ำๆ นั้น สัญญาณของกระแสจะมีความ

เพี้ยนมาก ซึ่งเมื่อนำสัญญาณที่ได้ไปวิเคราะห์ในโปรแกรม Math lab เพื่อแปลงจากแกนเวลาไปเป็น

แกนความถี่ จะเห็นสเปกตรัมได้ชัดเจนเลยว่าฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดทั้งอันดับคู่และคี่ เมื่อนำมารวม

กับ กระแส Fundamental แล้วจึงทำให้กราฟสัญญาณกระแสนั้นมีความผิดเพี้ยนมาก

อีกสาเหตุหนึ่งก็เนื่องมาจาก ที่โหลดต่ำๆ นั้น กระแสที่ Drive motor นั้นก็จะมีค่าต่ำไปด้วยแล้ว

ก็ส่งผลให้กระแสที่ได้นั้นมีความไม่ต่อเนื่องกัน ซึ่งเป็นผลมาจากค่าอินดักแตนซ์ของระบบมีค่าน้อยแต่

เมื่อมีการเพิ่มภาระ โหลดขึ้นเรื่อยๆ จะเห็นได้ชัดเลยว่า สัญญาณกราฟกระแสจะมีความเป็นสัญญาณ

ไซน์มากยิ่งขึ้น ดังสังเกตได้จากสเปกตรัมจะเปลี่ยนแปลงไปตามโหลดยิ่ง โหลดมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ ฮาร์มอ

นิกก็จะลดลง



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

สรุปผลการทดลอง

1) ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากตัว Drive motor ทั้งสองชนิด ในสภาวะที่โหลด 25 % ของระบบ จะมีข้อแตกต่างกันตรงที่

* ตัว Drive motor ชนิด VSD57(VT) จะมีการฉีดฮาร์มอนิกอันดับที่ 3, 5, 11 จะเป็นฮาร์มอนิกลบ และอาร์มอนิกอันดับที่ 1, 7, 13, 17, 19 เป็นฮาร์มอนิกบวกออกสู่ระบบ

* ตัว Drive motor ชนิด ATV58(VT) จะมีการฉีดฮาร์มอนิกอันดับ 3, 5, 11 เป็นฮาร์มอนิกลบเหมือนกับ VSD แต่สำหรับฮาร์มอนิกบวก ATV จะมีฮาร์มอนิกอันดับที่ 2 และ 4 เพิ่มขึ้นในระบบ ซึ่งปกติแล้วฮาร์มอนิกที่จะเกิดจะเป็นอันดับเลขคี่

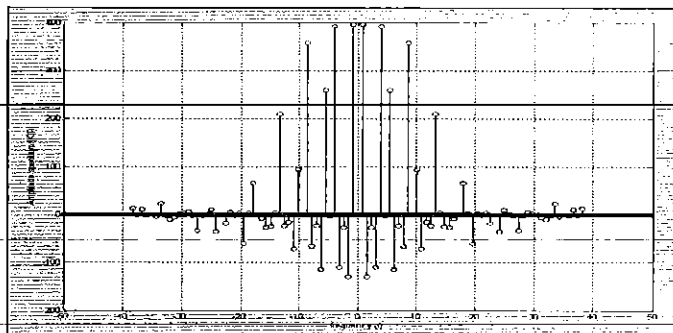
2) จำนวนของตัว Drive motor ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปกราฟสัญญาณของกระแสเท่าใดนัก ในสภาวะที่โหลดมีค่าเท่าเดิม เพราะจากการทดสอบแล้ว อันดับฮาร์มอนิกที่เกิดจะคล้ายกับการ Drive เพียง ตัวเดียว ที่เกิดตรงอันดับเดียวกัน สำหรับฮาร์มอนิกลบและบวก ก็เกิดเหมือนกัน จะต่างกันก็ตรงที่ขนาดของฮาร์มอนิกที่มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แต่ในทางปฏิบัติแล้วถือว่าไม่มีผลต่อระบบ

3) สำหรับขนาดของโหลดนั้นจะมีผลโดยตรงต่อกราฟสัญญาณกระแส และฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดมาก ซึ่งจะกล่าวได้ว่า

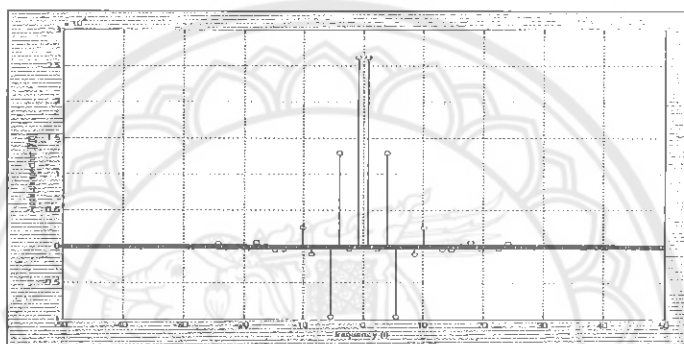
* ที่สภาวะโหลดต่ำๆนั้น กระแสจะมีความต่อเนื่องต่ำ หรือก็คือ กระแสที่เกิดขึ้นไม่ต่อเนื่องกัน อันเป็นผลมาจากค่าของอินดักแตนซ์ของระบบมีค่าที่ต่ำ เพราะคุณสมบัติของอินดักแตนซ์ก็คือจะทำให้กระแสไม่มีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด จึงจะทำให้รูปคลื่นกระแสมีความต่อเนื่องและเข้าใกล้รูปคลื่นไซน์มากยิ่งขึ้น รวมไปถึงกระแสโหลดมีค่าต่ำด้วย

* แต่พอมีการเพิ่มโหลดให้สูงขึ้นจะทำให้ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าที่ลดลงเมื่อเทียบกับกระแส fundamental แต่สำหรับฮาร์มอนิกที่เกิดด้านลบ และด้านบวกนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอด ซึ่งแต่ละกรณีจะไม่เกิดเหมือนกันแต่ สำหรับขนาดของฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยลงเรื่อยๆ อันเนื่องมาจากค่าอินดักแตนซ์ของระบบมีค่าเพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง รวมไปถึงความต่อเนื่องของกระแสก็จะมีค่าต่อเนื่องกันมากขึ้นจึงส่งผลให้ฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังดูได้จากกราฟดังต่อไปนี้

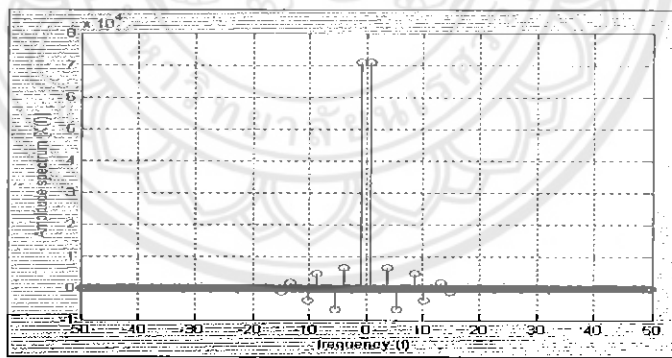
กราฟแสดงผลต่างของฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในATV66(VT)แต่ละกรณี



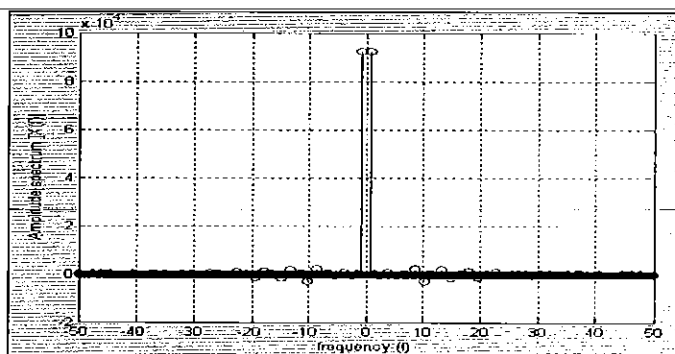
รูปที่ 4.42 กราฟขยายแสดงสเปกตรัมที่สภาวะ โหลด ต่ำๆ



รูปที่ 4.43 กราฟขยายแสดงสเปกตรัมที่สภาวะ โหลด 25 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.44 กราฟขยายแสดงสเปกตรัมที่สภาวะ โหลด 75 เปอร์เซ็นต์

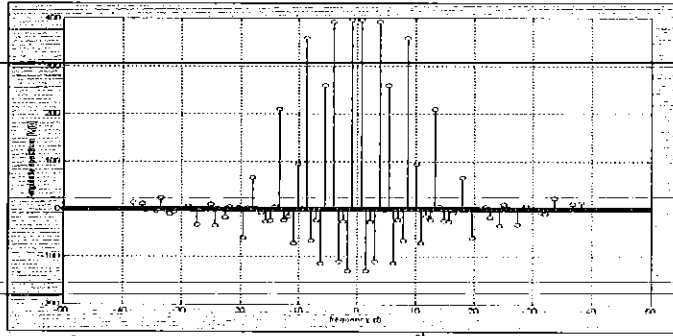


รูปที่ 4.45 กราฟขยายแสดงสเปกตรัมที่สภาวะ Full load

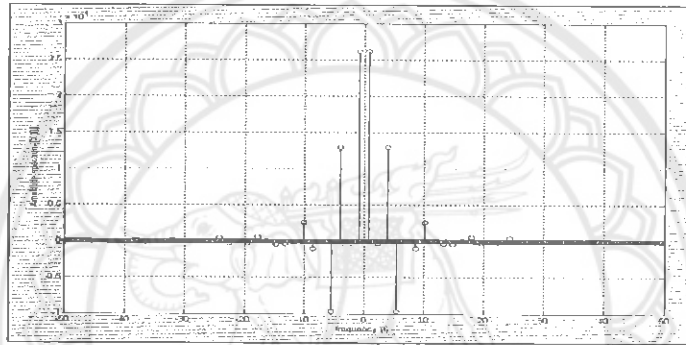


ภาคผนวก

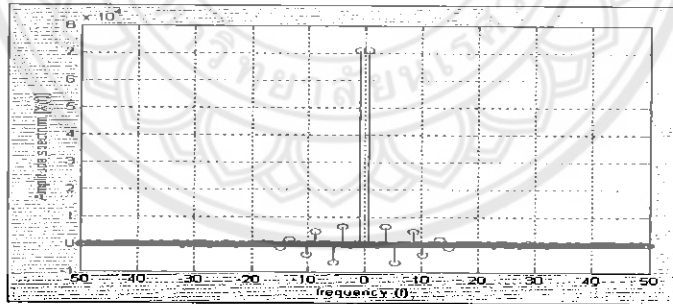
กราฟแสดงผลต่างของฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในATV66(VT)แต่ละกรณี



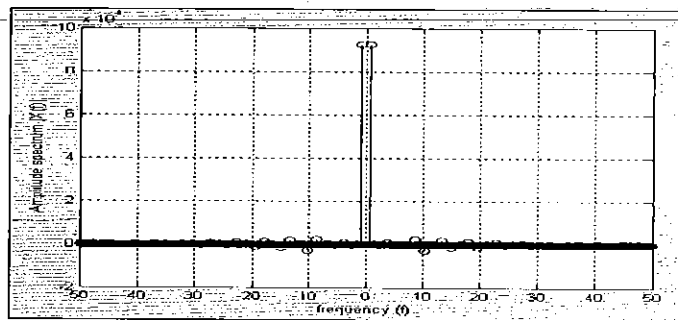
รูปที่ 4.42 กราฟขยายแสดงสเปกตรัมที่สถานะ โหลด ต่ำๆ



รูปที่ 4.43 กราฟขยายแสดงสเปกตรัมที่สถานะ โหลด 25 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.44 กราฟขยายแสดงสเปกตรัมที่สถานะ โหลด 75 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.45 กราฟขยายแสดงสเปกตรัมที่สถานะ Full load

ค่าที่ได้จากการ Simulation จาก Hamcalc software

พารามิเตอร์ที่ได้จากการ Simulate	ผลจากการทดสอบ	พารามิเตอร์ที่ได้จากการ Simulate	ผลจากการทดสอบ
Short Circuit Ratio at PCC1 (Isc/II)	87.5	Per Phase Inductance	94.284 uH
Rated Load Current as PCC1	262 A	RMS AC Line Current	118.69 A
Line-Line Drive Voltage	479.4 V	THDv at PCC1	0.92%
Transformer Turns Ratio	1.83	THDv at PCC2)	4.16%
Per Phase Resistance	7.954 mOhms	TDDi at PCC1)	12.96%

ตารางที่ 4.1 : ผลของการ Simulate ของ VSD57(VT)

ค่าที่ได้จากการ Simulation จาก Hamcalc software

พารามิเตอร์ที่ได้จากการ Simulate	ผลจากการทดสอบ	พารามิเตอร์ที่ได้จากการ Simulate	ผลจากการทดสอบ
Short Circuit Ratio at PCC1 (Isc/II)	87.5	Per Phase Inductance	94.284 uH
Rated Load Current as PCC1	262 A	RMS AC Line Current	121.53 A
Line-Line Drive Voltage	479.4 V	THDv at PCC1	0.91%
Transformer Turns Ratio	1.83	THDv at PCC2)	4.11%
Per Phase Resistance	7.954 mOhms	TDDi at PCC1)	13.00%

ตารางที่ 4.3 : ผลของการ Simulate ของ ATV58(VT)

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรม

พารามิเตอร์ที่ได้จากการ Simulate	ผลจากการทดสอบ VSD57(VT)	ผลจากการทดสอบ ATV58(VT)
Short Circuit Ratio at PCC1 (Isc/Il)	87.5	87.5
Rated Load Current as PCC1	262 A	262 A
Line-Line Drive Voltage	479.4 V	479.4
Transformer Turns Ratio	1.83	1.83
Per Phase Resistance	7.954 mOhms	7.954 mOhms
Per Phase Inductance	94.284 uH	94.284 uH
RMS AC Line Current	120.64 A	120.18 A
THDv at PCC1	0.93%	0.9%
THDv at PCC2)	4.22%	4.07%
TDDi at PCC1)	13.11%	12.88%

ตารางที่ 4.5: ค่าพารามิเตอร์เปรียบเทียบของ VSD57 และ ATV58

Code Math lab VSD1

```
A = VSD1; % data of Graph
fs = 100; % sampling rate
Ts = 1/fs; % sampling period
Tmax = 0.5; % signal duration
t = [0:Ts:Tmax]; % time vector
X1 = fft(A);
L = length(X1);
f = ((0:L-1)/L)*fs;
stem(f,fftshift(X1));
ylabel('Amplitude spectrum [X(f)]');xlabel('frequency (f)');
grid on;
```

ถ้าต้องการตั้งชื่อรุ่นไหนชนิดใดให้เปลี่ยนตรงตัวแปร A

บรรณานุกรม

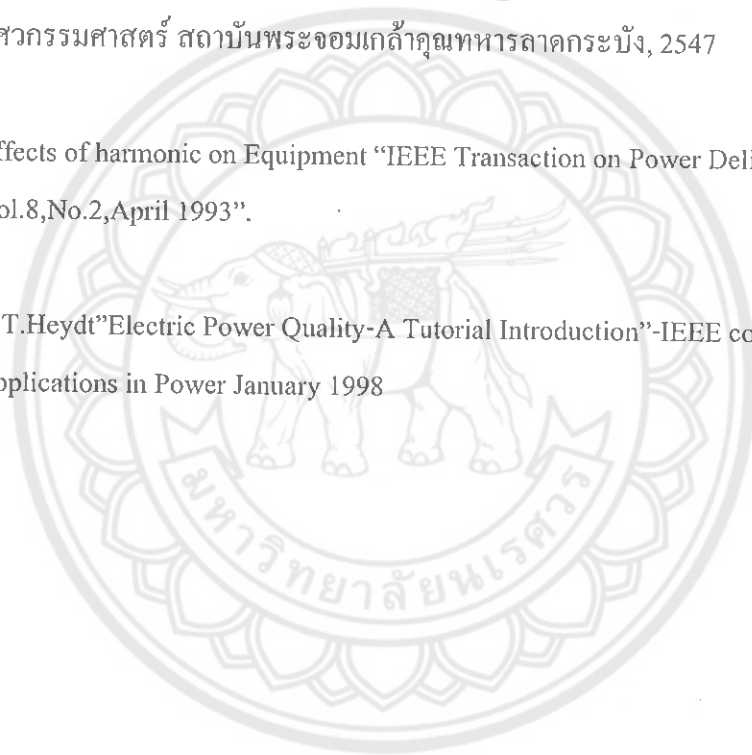
ไฟฟ้าอุตสาหกรรม: เรื่อนำรู้สำหรับวิศวกร.บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน),
กรุงเทพฯ 10260, 2549

ดิญนกร วุฒิสถิตฤถกิจ Matlab การประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมไฟฟ้า, สำนักงาน
พิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330, 2547

รศ.ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน / วุฒิปด ชาราชีรเศรษฐ์ , อิเล็กทรอนิกส์กำลัง คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547

Effects of harmonic on Equipment “IEEE Transaction on Power Delivery ,
Vol.8,No.2, April 1993”.

G.T.Heydt”Electric Power Quality-A Tutorial Introduction”-IEEE computer
Applications in Power January 1998



ประวัติผู้ดำเนินงาน



ชื่อ นามมนตรี มหาพรหม รหัสสมัคร 46380162

สัญชาติ ไทย เชื้อชาติ ไทย ศาสนา พุทธ

วัน/เดือน/ปี (ที่เกิด) 22 กุมภาพันธ์ 2527

ที่อยู่ 15 หมู่ 6 ต.เกาะช้าง อ.แม่สาย จ.เชียงราย 57130

สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา: โรงเรียนบ้านป่าแดง

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยม: โรงเรียนจุฬารัตนราชวิทยาลัย

สำเร็จการศึกษาระดับอุดมศึกษา: มหาวิทยาลัยนเรศวร

คณะ: วิศวกรรมศาสตร์, สาขา: วิศวกรรมไฟฟ้า

