

แบบจำลองการโหม่งคลื่นในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์

HARMONICS MODELING AND SIMULATION ON DRIVE SYSTEM

โดย

นายพนัท จิตรอนงวิญ

นายบรรณพต โมศศิริ

นายปฐมพร คังไพบูลย์

ปริญญาโทนี้เป็นส่วนหนึ่งของกรศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

แบบจำลองฮาร์โมนิกส์บนระบบขับเคลื่อนมอเตอร์
HARMONICS MODELING AND SIMULATION ON DRIVE SYSTEM

โดย

| | |
|------------|-------------|
| นายณภัท | จิระจงเจริญ |
| นายบรรณพต | โมคศิริ |
| นายปฐมพงศ์ | ตั้งไพบูลย์ |

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

HARMONICS MODELING AND SIMULATION ON DRIVE SYSTEM

| | |
|-----------|-------------------|
| NAPAT | CHIRACHONGCHAROEN |
| BUNPOT | MOKSIRI |
| PATOMPONG | TANGPAIBOON |

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

2014

ปีการศึกษา 2557

แบบจำลองฮาร์โมนิกส์บนระบบขับเคลื่อนมอเตอร์
HARMONICS MODELING AND SIMULATION ON DRIVE SYSTEM

โดย

| | |
|-------------|-------------|
| นาย นภัท | จิระจงเจริญ |
| นาย บรรณพต | โมคศิริ |
| นาย ปฐมพงศ์ | ตั้งไพบูลย์ |

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.จงรักษ์ บุญเส็ง

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

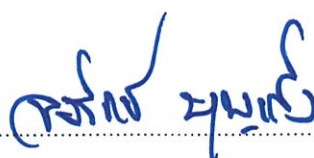
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง แบบจำลองฮาร์โมนิกส์บนระบบขับเคลื่อนมอเตอร์

ผู้จัดทำ

- | | |
|----------------|-------------|
| 1. นาย นภัท | จิระจงเจริญ |
| 2. นาย บรรณพต | โมคศิริ |
| 3. นาย ปฐมพงศ์ | ตั้งไพบุลย์ |



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ จงรัชต์ บุญเส็ง)

แบบจำลองการเกิดฮาร์โมนิกส์ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์

นาย นภัท จิระจงเจริญ

นาย บรรณพต โมคติริ

นาย ปฐมพงศ์ ตั้งไพบูลย์

รศ. จงรักษ์ บุญเส็ง อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้นำเสนอซอฟต์แวร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ทั้งกระแสตรง (DC Drive) และกระแสสลับ (AC Drive) ซึ่งสร้างปัญหาต่อระบบไฟฟ้ากำลัง อันทำให้ประสิทธิภาพการดำเนินงานของระบบลดลง โดยพัฒนาผ่านโปรแกรม Microsoft Visual Basic ด้วยการกรอกข้อมูลค่าพารามิเตอร์ต่างๆในระบบ นำมาประมวลผลและแสดงค่าดัชนีชี้วัดความผิดเพี้ยนของกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกส์ พร้อมทั้งกราฟรูปคลื่นและสเปกตรัมของทั้งกระแสและแรงดัน โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE 519-1992 นอกจากนี้ซอฟต์แวร์ยังสามารถคำนวณพารามิเตอร์ของ Passive filter ที่เหมาะสมเพื่อใช้กรองฮาร์โมนิกส์ออกจากระบบได้อีกด้วย ซึ่งโปรแกรมที่ผู้พัฒนาออกแบบ ต้องการให้เกิดความสะดวกในการใช้งาน เหมาะแก่ผู้ประกอบการและวิศวกรผู้ดูแลใช้เพื่อประกอบการวิเคราะห์พิจารณาการติดตั้งอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ในระบบไฟฟ้า เพื่อป้องกันปัญหาฮาร์โมนิกส์ที่จะส่งผลเสียหายในระบบไฟฟ้า

Harmonics Modeling and Simulation on Drive System

Napat Chirachongcharoen
Bunpot Moksiri
Patompong Tangpaiboon
Assoc.Prof.Chongrag Boonseng Advisor
Year 2014

ABSTRACT

This project introduces a way to analyze harmonics from AC and DC drives system which cause harmonics problems and reduce the efficiency of the system. By utilizing Microsoft Visual Basic to develop a program that can be use to calculated the essential factor and process those information to produce harmonic indexes parameters, waveform graphs and harmonic spectrums while compare them to the IEEE 519-1992 Standard. This program is designed to be easy to use that mainly for an entrepreneur or an engineer who is considering install motor drives to their system, which can prevent the future problem that will occur in the system.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณหลายท่านโดยเฉพาะอย่างยิ่งคณะผู้จัดทำขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์จรงค์ บัญเส็ง อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำแนะนำ ความรู้ประสบการณ์ รวมทั้งข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจทานแก้ไข จนปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ทั้งนี้ ขอขอบคุณ คุณนพสิทธิ์ เปรมพงศ์พลิน บริษัท เดลต้า อีเล็กทรอนิกส์(ประเทศไทย)จำกัด (มหาชน) ที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบซอฟต์แวร์

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอขอบคุณ บิดามารดา และครอบครัวซึ่งให้การสนับสนุนเป็นกำลังสำคัญเสมอมา อีกทั้งเพื่อนๆที่คอยให้ความช่วยเหลือทั้งในด้านอุปกรณ์ การเดินทางเพื่อไปดูงาน ในสถานที่ต่างๆในการทำปริญญาานิพนธ์ครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อ | I |
| ABSTRACT | II |
| กิตติกรรมประกาศ | III |
| สารบัญ | IV |
| สารบัญรูปภาพ | VII |
| สารบัญตาราง | X |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ | 1 |
| 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ | 2 |
| 1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ | 2 |
| 1.5 แผนการดำเนินการ | 2 |
| 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ | 4 |
| 2.1 ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Distortion) | 4 |
| 2.2 Harmonic Phase Sequences | 6 |
| 2.3 การประเมินค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ | 7 |
| 2.3.1 ดัชนีชี้วัดของฮาร์โมนิกส์ | 7 |
| 2.3.2 พิกัดความผิดเพี้ยนของกระแส | 8 |
| 2.3.3 ข้อจำกัดความผิดเพี้ยนของแรงดัน | 9 |
| 2.4 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์จากโหลดภาคอุตสาหกรรม | 9 |
| 2.4.1 Three-Phase Power Converters | 9 |
| 2.5 คุณลักษณะการตอบสนองของระบบ | 17 |
| 2.5.1 อิมพีแดนซ์ของระบบ | 17 |
| 2.5.2 อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ | 19 |
| 2.5.3 การเรโซแนนซ์แบบขนาน | 20 |
| 2.6 ผลกระทบจากฮาร์โมนิกส์ | 24 |
| 2.6.1 ผลกระทบต่อตัวเก็บประจุ | 24 |
| 2.6.2 ผลกระทบต่อมอเตอร์ | 25 |
| 2.7 ทฤษฎีการควบคุมฮาร์โมนิกส์ | 25 |
| 2.7.1 การลดกระแสฮาร์โมนิกส์จากโหลด | 25 |

| | | |
|----------------|---|----|
| 2.7.2 | การติดตั้งฟิลเตอร์ | 36 |
| 2.7.3 | การปรับปรุงผลตอบสนองต่อความถี่ระบบ | 26 |
| 2.8 | อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมฮาร์โมนิกส์ | 27 |
| 2.8.1 | In-line reactor or chokes | 27 |
| 2.8.2 | Passive Filters | 29 |
| บทที่ 3 | การออกแบบและพัฒนา | 32 |
| 3.1 | โปรแกรม Visual Studio 2010 | 32 |
| 3.2 | Flowchart อธิบายการทำงานของโปรแกรม | 34 |
| 3.3 | รูปภาพ โปรแกรมประกอบคำอธิบาย | 39 |
| 3.3.1 | ส่วนของหน้าต่างการรับข้อมูล | 39 |
| บทที่ 4 | การทดลองและผลการทดลอง | 57 |
| 4.1 | วิธีการใช้งานโปรแกรมจำลองคุณภาพทางไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ | 57 |
| 4.1.1 | การป้อนข้อมูลของระบบ | 57 |
| 4.1.2 | หน้าต่างแสดงผลการจำลอง | 57 |
| 4.1.3 | หน้าต่างการออกแบบ Specification ของ Passive Power Filter ที่เหมาะสม | 59 |
| 4.2 | ผลการจำลองระบบตัวอย่างโรงงานเคมีขนาดใหญ่ | 59 |
| 4.2.1 | การจำลองระบบอ้างอิงบนโปรแกรมที่พัฒนา | 60 |
| 4.2.2 | ผลการจำลองระบบอ้างอิงบนโปรแกรมที่พัฒนา | 61 |
| 4.3 | ผลการจำลองตัวอย่างโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน | 63 |
| 4.3.1 | การจำลองระบบอ้างอิงบนโปรแกรมที่พัฒนา | 64 |
| 4.3.2 | ผลการจำลองระบบอ้างอิงบนโปรแกรมที่พัฒนา | 65 |
| 4.4 | ผลการจำลองตัวอย่างโรงงานปูนซีเมนต์ | 67 |
| 4.4.1 | การจำลองระบบอ้างอิงกับโปรแกรมที่พัฒนา | 67 |
| 4.4.2 | ผลการจำลองระบบอ้างอิงบนโปรแกรมที่พัฒนา | 69 |
| 4.5 | ผลการจำลองตัวอย่างโรงงานสิ่งทอ | 71 |
| บทที่ 5 | ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ | 75 |
| 5.1 | สรุปผลการทดลอง | 75 |
| 5.2 | ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป | 77 |
| | เอกสารอ้างอิง | 78 |
| | ภาคผนวก | 79 |
| | ภาคผนวก ก บทความเชิงวิชาการ | 80 |
| | ภาคผนวก ข คุณสมบัติการเกิดฮาร์โมนิกส์จากเครื่องขับเคลื่อนมอเตอร์ | 91 |

| | |
|-----------------------------------|-----|
| ภาคผนวก ค ข้อมูลพิกัดตัวเก็บประจุ | 108 |
| ประวัติผู้เขียน | 116 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--|----------|
| 2.1 กระแสที่ผิดเพี้ยนเนื่องจากไทรสเตอร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น | 5 |
| 2.2 อนุกรมฟูเรียร์ของรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยน | 5 |
| 2.3 กระแสและฮาร์โมนิกส์สเปกตรัมของ Adjustable speed drive ชนิด CSI | 10 |
| 2.4 กระแสและฮาร์โมนิกส์สเปกตรัมของ PMW- drive ชนิด ASD | 10 |
| 2.5 รูปคลื่น 6 พัลส์ บริดจ์ (a) แรงดันเฟส ถึง นิวทรอล (b)-(d) กระแสเฟส ฝั่งเครื่องแปลงผัน (e) กระแสเฟสฝั่งระบบที่มีหม้อแปลงแบบ เดลต้า-เดลต้า | 11 |
| 2.6 (a) รูปคลื่น 6 พัลส์จากหม้อแปลง เดลต้า-สตาร์ (b) วงจรเครื่องแปรผันกำลังแบบ 12 พัลส์ | 12 13 |
| 2.7 (a) กระแสเฟสของเครื่องแปลงผันกำลังแบบ 12 พัลส์ (b) สเปกตรัมของเครื่องแปลงผันกำลังแบบ 12 พัลส์ | 14 |
| 2.8 Six-pulse DC ASD | 15 |
| 2.9 PMW ASD | 16 |
| 2.10 AC ASDs ขนาดใหญ่ | 16 |
| 2.11 ผลของความเร็วต่อกระแสฮาร์โมนิกส์ | 17 |
| 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์และความถี่ของระบบที่เป็นความเหนี่ยวนำ | 19 |
| 2.13 ระบบที่มีความเสี่ยงต่อการเกิด เรโซแนนซ์แบบขนาน | 21 |
| 2.14 ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ Shunt Capacitor Bank มีลักษณะ ขนานกับระบบ (a) รูปวงจรอย่างง่ายของระบบจำหน่าย (b) วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน เมื่อโหม่งผ่านตัวแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ | 22 |
| 2.15 Frequency Response ของระบบต่อ Capacitor Bank ขนาดต่างๆ | 23 |
| 2.16 กระแสตัวเก็บประจุผลจากเรโซแนนซ์อันดับ11ในระบบ | 24 |
| 2.17 เปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนกระแสจาก PMW drive ต่อขนาด line input choke | 27 |
| 2.18 โฉัศสามเฟสสำหรับ ASD | 28 |
| 2.19 ผลของโฉัศที่มีต่อกระแสฮาร์โมนิกส์ของ ASD | 28 |
| 2.20 Passive Filters แต่ละชนิด | 29 |
| 2.21 ฟิเตอร์สามเฟส (Courtesy of Northeast Power Systems) | 30 |

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.22 ฟิลเตอร์สำหรับภาคอุตสาหกรรม (Courtesy of Gilbert Electrical Systems) | 30 |
| 2.23 ฮาร์โมนิกส์ฟิลเตอร์อันดับ5และผลตอบสนองต่อระบบ | 31 |
| 3.1 Banner โปรแกรม Visual Studio | 32 |
| 3.2 หน้าต่าง Toolbox สำหรับพัฒนาโปรแกรม | 32 |
| 3.3 หน้าต่างโปรแกรมที่ใช้พัฒนา | 33 |
| 3.4 แผนผังการทำงานของระบบรับค่าของโปรแกรม | 34 |
| 3.5 (a) แผนผังการทำงานของส่วนคำนวณและจำลองของโปรแกรม | 35 |
| (b) แผนผังการทำงานของส่วนคำนวณและจำลองของโปรแกรม | 36 |
| 3.6 แผนผังการคำนวณพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์ | 37 |
| 3.7 รูปการกรอกค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงจำลอง | 39 |
| 3.8 หน้าต่างการค่าพารามิเตอร์ของภาระไฟฟ้าชนิดต่างๆ | 41 |
| 3.9 หน้าต่างแสดงผลค่า Spectrum ของระบบที่จำลอง | 53 |
| 3.10 หน้าต่างแสดงผลรูปคลื่นกระแสและแรงดัน | 54 |
| 3.11 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการออกแบบฟิลเตอร์ | 55 |
| 3.12 เปรียบเทียบก่อน-หลังติดตั้งฟิลเตอร์ | 55 |
| 4.1 หน้าต่างโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบระบบไฟฟ้า | 58 |
| 4.2 (a) หน้าต่างแสดงผลค่า Spectrum แรงดันและ กระแส ของระบบที่จำลอง | 58 |
| (b) หน้าต่างแสดงรูปคลื่น กระแสและแรงดัน พร้อมค่าพารามิเตอร์ของระบบที่จำลอง | 58 |
| 4.3 หน้าต่างRecommend Specification ของ Passive Power Filter | 59 |
| 4.4 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลอง | 59 |
| 4.5 การป้อนค่าจาก ระบบอ้างอิง บนโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น | 60 |
| 4.6 (a) ผลการจำลอง Spectrum | 61 |
| (b) ผลการจำลองรูปคลื่นแรงดันและ กระแส | 61 |
| 4.7 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน | 63 |
| 4.8 การป้อนค่าจากระบบอ้างอิงบนโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น | 64 |
| 4.9 (a) ผลการจำลอง Spectrum | 65 |
| (b) ผลการจำลองรูปคลื่นแรงดัน และกระแส | 65 |

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.10 One-Line diagram โรงงานปูนซีเมนต์ | 67 |
| 4.11 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าในโรงงานปูนซีเมนต์ | 68 |
| 4.12 (a) ผลการจำลอง Spectrum | 69 |
| (b) ผลการจำลองรูปคลื่นแรงดัน และกระแส | 70 |
| 4.13 One-Line diagram โรงงานสิ่งทอ | 71 |
| 4.14 กรอกพารามิเตอร์ของระบบลงโปรแกรมที่พัฒนา | 72 |
| 4.15 (a) ผลการจำลอง Spectrum | 73 |
| (b) ผลการจำลองรูปคลื่นแรงดัน และกระแส | 73 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 ซีตจำกัดกระแสฮาร์โมนิกส์สำหรับระบบจำหน่าย (แรงดัน 120 ถึง 69000 โวลต์) | 8 |
| 2.2 ซีตจำกัดกระแสฮาร์โมนิกส์สำหรับระบบจำหน่าย (แรงดัน 69001 ถึง 161000 โวลต์) | 8 |
| 2.3 ซีตจำกัดแรงดันเพี้ยน | 9 |
| 3.1 ตารางค่าพารามิเตอร์ของ AC Drive ชนิด 6 Pulse | 44 |
| 3.2 ตารางค่าพารามิเตอร์ของ DC Drive ชนิด 6 Pulse | 45 |
| 3.3 ตารางค่าพารามิเตอร์ของ DC Drive ชนิด 12 Pulse | 47 |
| 4.1 ตารางเปรียบเทียบผลการวัดจริงกับผลการจำลองผ่านโปรแกรม | 62 |
| 4.2 ตารางเปรียบเทียบผลการวัดจริงกับผลการจำลองผ่านโปรแกรม | 66 |
| 4.3 ตารางเปรียบเทียบผลการวัดจริงกับผลการจำลองผ่านโปรแกรม | 70 |
| 4.4 ตารางเปรียบเทียบผลการวัดจริงกับผลการจำลองผ่านโปรแกรม | 74 |
| 5.1 เปรียบเทียบผลการวัดจริงกับผลการจำลองผ่านโปรแกรมของโรงงานเคมีขนาดใหญ่ | 75 |
| 5.2 เปรียบเทียบผลการวัดจริงกับผลการจำลองผ่านโปรแกรมของ โรงงานไฟฟ้าพลังงานความร้อน | 76 |
| 5.3 เปรียบเทียบผลการวัดจริงกับผลการจำลองผ่านโปรแกรมของโรงงานปูนซีเมนต์ | 76 |
| 5.4 เปรียบเทียบผลการวัดจริงกับผลการจำลองผ่านโปรแกรมของโรงงานสิ่งทอ | 76 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน ฮาร์โมนิกส์ได้สร้างปัญหาให้กับระบบไฟฟ้าเป็นอย่างมาก ก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆภายในภาคอุตสาหกรรม ทำให้เกิดผลเสียในหลายๆด้าน โดยปัญหาฮาร์โมนิกส์เกิดจากโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Load) โดยกระแสฮาร์โมนิกส์จะไหลเข้าสู่ระบบของผู้ใช้ไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าข้างเคียง ซึ่งฮาร์โมนิกส์นี้จะส่งผลให้รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าในระบบเกิดความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ โดยที่ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ และขนาดของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งเมื่อกระแสฮาร์โมนิกส์ดังกล่าวไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้าจะส่งผลให้เกิดความเสียหายให้แก่อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ ทำให้การทำงานของระบบผิดพลาดได้

ซึ่งผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ที่มีต่อระบบไฟฟ้าคือ จะทำให้อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาดด้วยผลจากแรงดันและกระแสฮาร์โมนิกส์ ที่มีขนาดและรูปคลื่นผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ และยังส่งผลให้อุปกรณ์ในระบบมีอายุการใช้งานที่น้อยลงหรือเกิดการชำรุดเสียหายเนื่องจากค่า RMS ของแรงดันหรือกระแสมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากค่าฮาร์โมนิกส์ หรือมีการขยายของแรงดันและกระแสฮาร์โมนิกส์เนื่องจากการเกิดฮาร์โมนิกส์เรโซแนนซ์

ดังนั้น ฮาร์โมนิกส์ที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้าถือว่าเป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่สำคัญเรื่องหนึ่ง ซึ่งการวัดค่าฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้ามีจุดประสงค์เพื่อทำการตรวจสอบระดับความรุนแรงของฮาร์โมนิกส์ ณ จุดที่วัดว่าอยู่ในระดับใดและจะมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ามากน้อยเพียงใด ซึ่งจะพิจารณาระดับความรุนแรงโดยเปรียบเทียบข้อมูลที่วัดได้กับค่าที่ระบุไว้ในข้อกำหนดตามมาตรฐานของ IEEE 519-1992 เพื่อนำค่าที่ได้มาประเมินระดับความรุนแรงของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบว่าผ่านตามมาตรฐานที่กำหนดไว้หรือไม่

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการเกิดฮาร์โมนิกส์และการคำนวณฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ
2. เพื่อศึกษาออกแบบและพัฒนาโปรแกรมสำหรับคำนวณฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบ
3. เพื่อสามารถคาดการณ์ผลกระทบในการติดตั้งอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับโดยเทียบกับมาตรฐาน IEEE 519-1992
4. เพื่อสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบฟิลเตอร์ สำหรับปรับปรุงปัญหาฮาร์โมนิกส์
5. เพื่อส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

ปริญญาโทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ โดยทำการออกแบบโปรแกรมคำนวณการเกิดฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นขณะที่มีการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ ซึ่งใช้โปรแกรม Microsoft Visual Basic ในการออกแบบเพื่อคำนวณค่าฮาร์มอนิกส์ที่ส่งผลกระทบต่อระบบทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันและรูปคลื่นกระแสเพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์คุณภาพของระบบไฟฟ้าเทียบกับมาตรฐาน IEEE519-1992 และวิเคราะห์ออกแบบพารามิเตอร์สำหรับ Passive Filter ที่เหมาะสมเพื่อทำการกรองฮาร์มอนิกส์ในระบบต่อไป

1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

จัดทำโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณค่าความรุนแรงของฮาร์มอนิกส์ที่มีผลต่อระบบในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ โดยทำการเขียนโปรแกรมด้วย Microsoft Visual Basic โดยจัดทำเป็นโปรแกรมสำเร็จรูป ซึ่งสามารถกำหนดสเปคและจำนวนของตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับที่เชื่อมต่ออยู่กับระบบ ซึ่งสามารถทำให้ทราบค่าความรุนแรงของฮาร์มอนิกส์และทราบค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันและกระแสที่เกิดจากผลของฮาร์มอนิกส์ รวมถึงแสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดัน แล้วนำค่าของฮาร์มอนิกส์ที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE 519-1992 เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์คุณภาพของระบบไฟฟ้าที่ได้ทำการจำลองขึ้นมานั้นๆ

1.5 แผนการดำเนินการ

1. ศึกษาการทำงานของ DC Drive และ AC Drive ที่ส่งผลต่อการเกิดฮาร์มอนิกส์
2. ศึกษาวิธีการคำนวณปริมาณต่างๆ เช่น ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดันและกระแสที่เกิดฮาร์มอนิกส์
3. ศึกษาวิธีการเขียนโปรแกรม Microsoft Visual Basic เพื่อใช้ในการจำลองหาความผิดเพี้ยนของกระแสและแรงดันในระบบไฟฟ้า
4. พัฒนาโปรแกรมที่ใช้คำนวณฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าและพัฒนาโปรแกรม
5. นำผลจากการคำนวณที่ได้เปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE 519-1992 เพื่อตรวจสอบความรุนแรงของฮาร์มอนิกส์
6. เพิ่มความสามารถในการคำนวณพารามิเตอร์สำหรับฟิลเตอร์ที่เหมาะสม

ตารางที่ 1.1ก ตารางการดำเนินงาน

| ตารางการดำเนินงาน | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------|---|---------|---------|---------|---|---|---|---|---------|---------|---------|---------|---|---|---|--|
| การดำเนินการ | W | | | | W | | | | W | | | | W | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| ศึกษาเนื้อหาและขอบเขตของโครงการ | ←-----→ | | | | ←-----→ | | | | | | | | | | | | |
| สืบค้นข้อมูลเพื่อจัดทำโครงการ | | | ←-----→ | | | | | | | | | | | | | | |
| ศึกษาโปรแกรม Microsoft Visual Basic | ←-----→ | | | | ←-----→ | | | | | | | | | | | | |
| จัดทำโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณอาร์โมนิคส์ | | | | ←-----→ | | | | | | | | | | | | | |
| ตรวจสอบ และวัดผลการคำนวณที่ได้ | | | | | | | | | | | ←-----→ | | ←-----→ | | | | |
| ปรับปรุงแก้ไขโปรแกรม ให้ดีขึ้น | | | | | | | | | | ←-----→ | | ←-----→ | | | | | |
| จัดทำการนำเสนอโครงการ | | | | | | | | | | | | ←-----→ | | | | | |

←-----→ Plan

←-----→ Actual

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาวิจัยครั้งนี้ สำหรับผู้ใช้งานในภาคอุตสาหกรรมสามารถนำโปรแกรมที่พัฒนาทำการจำลองผลที่เกิดจากการติดตั้ง AC และ DC Drive ต่อระบบไฟฟ้าในโรงงานที่ต้องการคุณภาพไฟฟ้าที่สูงโดยสามารถใช้ได้ทั้งการออกแบบสร้างโรงงานใหม่ และการเพิ่มขนาดอุปกรณ์ใหม่ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนหากเกิดความเสียหายต่อกระบวนการทำงานของโรงงานอย่างมากโดยสามารถลดค่าใช้จ่ายในด้านลิขสิทธิ์ซอฟต์แวร์จากต่างประเทศ ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงมาก นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้เป็นประโยชน์ในภาคการศึกษา โดยสามารถจำลองได้ง่าย สะดวก ลดต้นทุนในการเดินทาง ทั้งยังลดอันตรายจากการลงพื้นที่ในเขตที่มีไฟฟ้าแรงสูงอีกด้วย

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

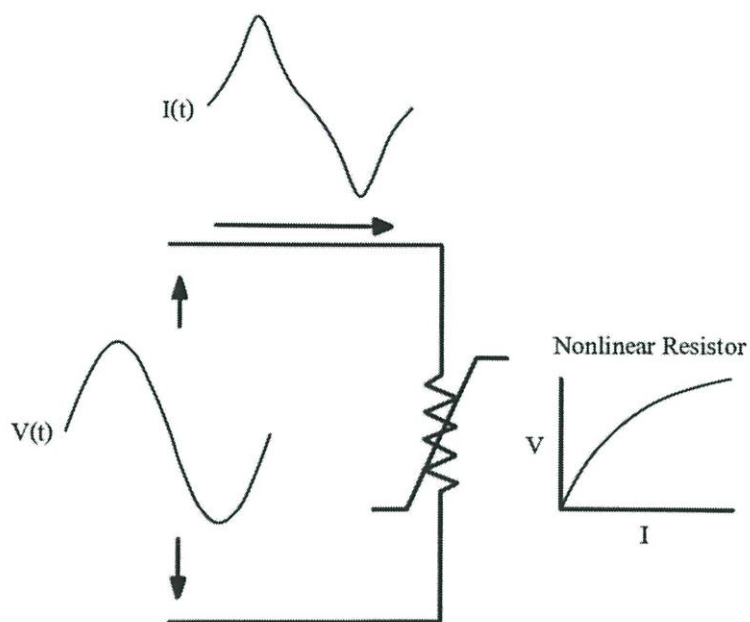
ในระบบไฟฟ้ากำลังผู้ผลิตกระแสไฟฟ้าต่างต้องการให้คลื่นสัญญาณไฟฟ้าที่ผลิตมีลักษณะเป็นคลื่นไซน์บริสุทธิ์ทั้งในคลื่นกระแสและแรงดันโดยสัดส่วนค่าแรงดันที่พบในระบบส่งจ่ายกระแสไฟฟ้ามีความผิดเพี้ยนน้อยกว่า 1.0% อย่างไรก็ตามยิ่งเมื่อคลื่นเดินทางเข้าใกล้โหลดมากเท่าใด ความผิดเพี้ยนจะยิ่งเพิ่มมากขึ้นเท่านั้น ในโหลดบางชนิดเช่น Electronic power converters สามารถทำให้คลื่นไซน์เกิดรอยบาก(notch) และผิดเพี้ยน(distort) ไปจากเดิมซึ่งความผิดเพี้ยนนี้จะน้อยครั้งที่เกิดแบบสุ่ม โดยส่วนใหญ่แล้วการเกิดความผิดเพี้ยนนี้จะเกิดขึ้นเป็นคาบเวลา หรือมีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐานดังนั้นคลื่นกระแสจึงมีลักษณะเหมือนกันในทุกคาบ ซึ่งสามารถอธิบายคลื่นที่ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนนี้โดยเรียกว่าฮาร์โมนิกส์ (Harmonics)

ปัญหาฮาร์โมนิกส์นอกจากจะเป็นปัญหาสำคัญที่เหล่าวิศวกรต้องเผชิญแล้วยังทำให้แบบแผนของระบบไฟฟ้าที่ใช้หลักการว่าคลื่นไฟฟ้าจะประกอบด้วยคลื่นที่มีแต่ความถี่มูลฐานเท่านั้นไม่สามารถนำมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในส่วนของโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้งาน Adjustable Speed Drives (ASD), เตาอาร์คไฟฟ้า, เตาหลอมแบบเหนี่ยวนำจำนวนมาก ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้มีการตอบสนองไวต่อการเกิดปัญหาฮาร์โมนิกส์มาก

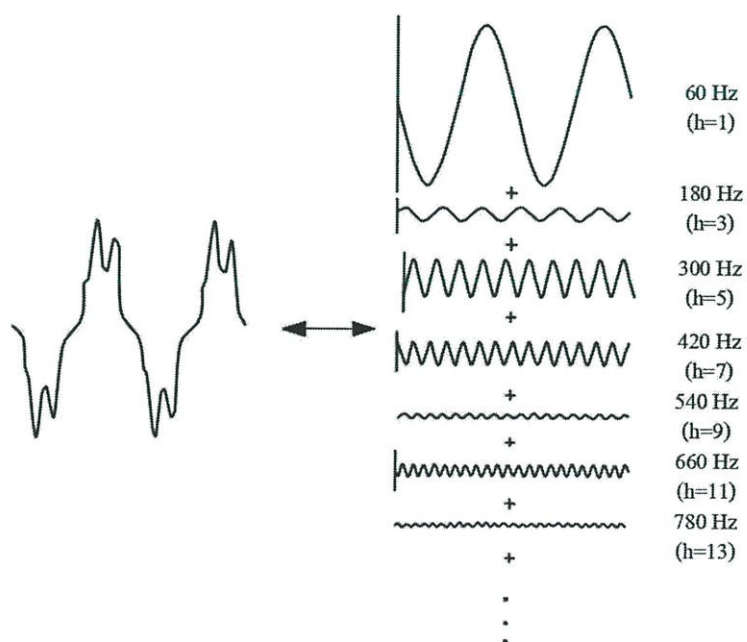
หากความต้องการในระบบไฟฟ้าสามารถควบคุมได้แล้วปัญหาฮาร์โมนิกส์จะลดน้อยลงเช่นกันแม้ว่าจะมีปัญหากับระบบโทรคมนาคม ปัญหาที่เกิดขึ้นกับความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังส่วนใหญ่เกิดเมื่อมีการต่อ คาปาซิแตนซ์(Capacitance) ในระบบไฟฟ้าทำให้เกิด เรโซแนนซ์(resonance) ที่ความถี่วิกฤตส่งผลให้ความผิดเพี้ยนมีมากกว่าปกติ ปัญหาที่พบนี้โดยส่วนมากจะเกิดในระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมเนื่องจากมีระดับความรุนแรงของการเกิดเรโซแนนซ์มากกว่า

2.1 ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Distortion)

ความผิดเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์มีสาเหตุมาจากอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นในระบบไฟฟ้า อุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นนี้จะทำให้คลื่นกระแสไม่ได้สัดส่วน เพื่อปรับค่าแรงดันให้ได้ตามต้องการ ในรูป 2.1 แสดงให้เห็นกรณีที่ใช้ไทรสเตอร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นปรับแรงดัน แสดงโดยกราฟระหว่างกระแสและแรงดัน จะพบว่าค่าแรงดันเป็นคลื่นไซน์สมบูรณ์แต่คลื่นกระแสที่ได้จะมีความผิดเพี้ยน การปรับปรุงคลื่นแรงดันเพียงเล็กน้อยจะทำให้คลื่นกระแสมีความผิดเพี้ยนไปประมาณ 2 เท่า ซึ่งนี่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 กระแสที่ผิดเพี้ยนเนื่องจากไทรสเตอร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 2.2 อนุกรมฟูรีเยร์ของรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยน

ในรูปที่ 2.2 แสดงคลื่นฮาร์โมนิกอันดับต่างๆ คลื่นกระแสที่ผิดเฟี้ยนแสดงได้โดยผลรวมของคลื่นความถี่ต่างๆ เมื่อคลื่นที่พิจารณาามีลักษณะเป็นคาบ เราสามารถแสดงคลื่นนี้เป็นผลรวมของคลื่นไซน์ที่มีความถี่มูลฐานกับคลื่นที่มีความถี่เป็นเท่าจำนวนเต็มของความถี่มูลฐาน โดยเรียกวิธีนี้ว่า Fourier series

ด้วยคุณสมบัติข้างต้น อนุกรมฟูเรียร์จึงเป็นวิธีทั่วไปที่ใช้วิเคราะห์ปัญหาฮาร์โมนิกส์ที่สามารถที่จะวิเคราะห์ระบบหนึ่งๆ ออกเป็นแต่ละฮาร์โมนิกส์ได้ เมื่อทั้งครึ่งลูกคลื่นด้านบวกและครึ่งด้านลบมีลักษณะเหมือนกัน อนุกรมฟูเรียร์จะมีเฉพาะฮาร์โมนิกส์เลขคี่เท่านั้น นอกจากนี้ การหารูปคลื่นไซน์ของฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับจากการตอบสนองของระบบ จะทำได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบกับ การหาจากรูปคลื่นโดยตรงซึ่งผลลัพธ์ที่คำนวณมาจากการตอบสนองของระบบที่ความถี่แต่ละลำดับ จะถูกนำมา รวมกันเพื่อสร้างความสัมพันธ์อนุกรมฟูเรียร์

ในขณะที่ฮาร์โมนิกส์อันดับสูงๆ (อันดับที่ 25-50) มักไม่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาฮาร์โมนิกส์ เนื่องจากฮาร์โมนิกส์เหล่านี้ไม่ทำอันตรายต่อระบบไฟฟ้าและเป็นเรื่องยากในการนำมาคำนวณ และวิเคราะห์ระบบที่ความถี่นั้นๆ ยกเว้นจะเกิดการเรโซแนนซ์ในช่วงความถี่นั้นพอดี

2.2 Harmonic Phase Sequences

วิศวกรไฟฟ้ามีวิธีในการใช้ symmetrical components เพื่อช่วยอธิบายพฤติกรรมของระบบไฟฟ้าสามเฟส ระบบไฟฟ้าสามเฟสจะถูกแปลงเป็น three single-phase system เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ด้วยวิธี symmetrical components สามารถใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบต่อกระแสฮาร์โมนิกส์ด้วยวิธีนี้ความไม่สมดุลใดๆของเฟสกระแสหรือแรงดันจะถูกแปลงเป็นรูปแบบสามเฟสสมดุล positive sequence เป็นค่าของไซน์สามเฟสทำมุมกัน 120° โดยมีทิศการหมุน A-B-C เช่น $(0^\circ, -120^\circ, 120^\circ)$ ค่า negative sequence มีค่าไซน์สามเฟสทำมุม 120° เช่นกันแต่จะมีทิศการหมุนตรงกันข้ามเช่น $(0^\circ, 120^\circ, -120^\circ)$ ส่วน zero - sequence มีเฟสเดียวกันทั้งหมดเช่น $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ ในระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุล Harmonic phase sequence สามารถอธิบายโดยการคูณอันดับฮาร์โมนิกส์กับเฟส positive sequence ปกติ ยกตัวอย่างกรณี ฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 2 เราจะได้ $2x (0^\circ, -120^\circ, -120^\circ)$ หรือ $(0^\circ, 120^\circ, -120^\circ)$ ในขณะที่ negative sequence เช่นฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 เราจะได้ว่า $3x (0^\circ, -120^\circ, -120^\circ)$ หรือ $(0, 0, 0)$ phase sequence ของแต่ละอันดับฮาร์โมนิกส์สามารถอธิบายได้ด้วยวิธีเดียวกัน คลื่นผิดเฟี้ยนในระบบไฟฟ้ากำลังจะมีองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์เลขคี่ดังนี้

- ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 1, 7, 13, . . . เป็น positive sequence
- ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 5, 11, 17, . . . เป็น negative sequence
- Triplen Harmonics อันดับที่ 3, 9, 15, . . . เป็น zero sequence

2.3 การประเมินค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์

การประเมินค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ทำได้หลายวิธีแตกต่างกันไป แต่มีสองหลักเกณฑ์ประเมินค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ตามมาตรฐาน IEEE 519-1992

2.3.1 ดัชนีชี้วัดของฮาร์โมนิกส์

ดัชนีชี้วัดฮาร์โมนิกส์ที่ได้รับความนิยมใช้มีอยู่ 2 แบบซึ่งต่างก็ใช้การวัดค่าความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นที่มีฮาร์โมนิกส์ซึ่งก็คือ Total Harmonic Distortion และ Total Demand Distortion ซึ่งต่างก็ใช้การวัดค่าจากรูปคลื่นของทั้งกระแสและแรงดัน ค่า THD คือค่าที่ใช้วัดค่าองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ในรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยน โดยการนำมาเทียบกับค่ามูลฐาน ซึ่งค่าดัชนีค่านี้นำมาใชชี้วัดได้ทั้งคลื่นกระแสและแรงดัน ดังสมการที่ 2.1

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} M_h^2}}{M_1} \quad (2.1)$$

โดยที่ค่า M_h คือค่าองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ ค่า RMS ของรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนนั้นคำนวณได้จาก รากกำลังสองของผลรวมขององค์ประกอบทั้งหมดรวมถึงค่ามูลฐานยกกำลังสอง ดังนั้นเราสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง RMS และ THD ได้ดังสมการ 2.2 นี้

$$\text{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} M_h^2} = M_1 \sqrt{1 + \text{THD}^2} \quad (2.2)$$

ค่าดัชนี THD เป็นค่าที่มีประโยชน์ในหลายๆด้านแต่ก็ยังคงมีข้อจำกัดในบางประการเช่น ค่า THD สามารถบ่งบอกถึงความร้อนที่จะเกิดจากแรงดันที่มีรูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนและตกคร่อมอยู่บนโหลด ความต้านทาน เช่นเดียวกับที่มันสามารถบ่งบอกค่าความสูญเสียเมื่อกระแสที่ผิดเพี้ยนวิ่งผ่านตัวนำแต่ค่า THD ไม่สามารถใช้อธิบายค่าความเครียดของแรงดันที่มีต่อตัวเก็บประจุ เนื่องจากเราต้องการค่าสูงสุดของแรงดันในรูปคลื่น ค่าดัชนี THD นิยมใช้ในการอธิบายแรงดันที่มีฮาร์โมนิกส์ ซึ่งแรงดันฮาร์โมนิกส์ส่วนใหญ่จะถูกอ้างอิงโดยแรงดันมูลฐานของรูปคลื่นเนื่องจากแรงดันมูลฐานจะแปรเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยดังนั้นแรงดัน THD จะเป็นค่าที่แน่นอน

2.3.2 พิกัดความผิดเพี้ยนของกระแส

คือการใช้ข้อจำกัดของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ถูกส่งเข้าไปในระบบไฟฟ้า โดยมีดัชนีที่ใช้กำหนดขีดจำกัดความผิดเพี้ยนคือ ความต้องการความเพี้ยนรวม (Total demand distortion: TDD) หมายถึงความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์มีค่าเปอร์เซ็นต์ของความถี่ของกระแสไหลสูงสุด (ในช่วงเวลา 15 ถึง 30 นาที) โดยขีดจำกัดความเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ระดับแรงดันต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 ค่าขีดจำกัดที่แสดงในตารางใช้กับระบบการทำงานในสภาวะปกติ (นานกว่า 1 ชั่วโมง) หากการทำงานที่มีคาบเวลาการทำงานน้อยกว่านี้ ขีดจำกัดความเพี้ยนของกระแสสามารถเพิ่มได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2.1 ขีดจำกัดกระแสฮาร์โมนิกส์สำหรับระบบจำหน่าย (แรงดัน 120 ถึง 69000 โวลต์)

| I_{sc}/I_L | กระแสฮาร์โมนิกส์สูงสุดเป็นเปอร์เซ็นต์ของ I_L ในแต่ละลำดับ | | | | | TDD |
|--------------|---|-------|-------|-------|-----|------|
| | <11 | 11-16 | 17-22 | 22-34 | >34 | |
| <20 | 4.0 | 2.0 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 5.0 |
| 20<50 | 7.0 | 3.5 | 2.7 | 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 | 2.7 | 1.4 | 20.0 |

ตารางที่ 2.2 ขีดจำกัดกระแสฮาร์โมนิกส์สำหรับระบบจำหน่าย (แรงดัน 69001 ถึง 161000 โวลต์)

| I_{sc}/I_L | กระแสฮาร์โมนิกส์สูงสุดเป็นเปอร์เซ็นต์ของ I_L ในแต่ละลำดับ | | | | | TDD |
|--------------|---|-------|-------|-------|------|------|
| | <11 | 11-16 | 17-22 | 22-34 | >34 | |
| <20 | 2.0 | 1.0 | 0.75 | 0.3 | 0.15 | 2.7 |
| 20<50 | 3.5 | 1.75 | 1.25 | 0.5 | 0.25 | 4.0 |
| 50<100 | 5.0 | 2.25 | 2.0 | 0.75 | 0.35 | 6.0 |
| 100<1000 | 6.0 | 2.75 | 2.7 | 1.0 | 0.5 | 7.5 |
| >1000 | 7.5 | 3.5 | 3.0 | 1.25 | 0.7 | 10.0 |

เมื่อ I_{sc} คือ กระแสลัดวงจรที่จุดเชื่อมต่อบนระบบไฟฟ้า (Point of common coupling: PCC) ระหว่างระบบของการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า และ I_L คือ ความต้องการของกระแสไหลสูงสุด (ส่วนประกอบ-ที่ความถี่มูลฐาน) ที่ PCC

2.3.3 ข้อจำกัดความผิดเพี้ยนของแรงดัน

คือการตรวจสอบกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ผู้ใช้ไฟฟ้าส่งเข้าระบบ เพื่อให้แน่ใจได้ว่ากระแสเหล่านี้จะไม่เป็นต้นเหตุทำให้แรงดันมีความผิดเพี้ยนสูงเกินขีดจำกัดตามที่ระบุไว้ในตารางที่ 2.3 ซึ่งค่าความผิดเพี้ยนมักจะต่ำพอสำหรับการทำงานของอุปกรณ์ได้อย่างถูกต้องและควรใช้กับระบบที่มีการทำงานในสภาวะปกติ (นานกว่า 1 ชั่วโมง) แต่หากการทำงานที่มีคาบเวลาน้อยกว่านี้ ขีดจำกัดของความผิดเพี้ยนของแรงดันสามารถเพิ่มได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2.3 ขีดจำกัดแรงดันเพี้ยน

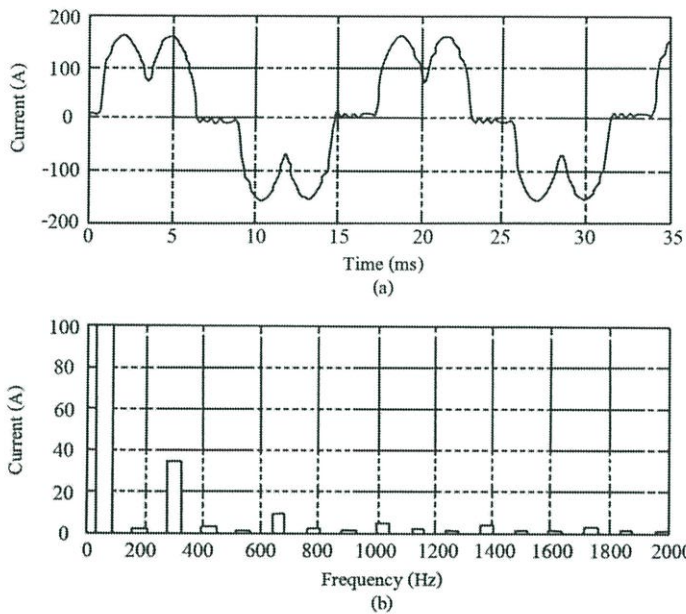
| ระดับแรงดันของบัสที่ PCC | ความเพี้ยนแรงดันในแต่ละลำดับของฮาร์โมนิกส์ (%) | ความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์โมนิกส์รวม : THD (%) |
|--------------------------|--|--|
| 69 KV และต่ำกว่า | 3.0 | 5.0 |
| 69.001 KV ถึง 161 KV | 1.5 | 2.5 |
| มากกว่า 161 KV | 1.0 | 1.5 |

2.4 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์จากโหลดภาคอุตสาหกรรม

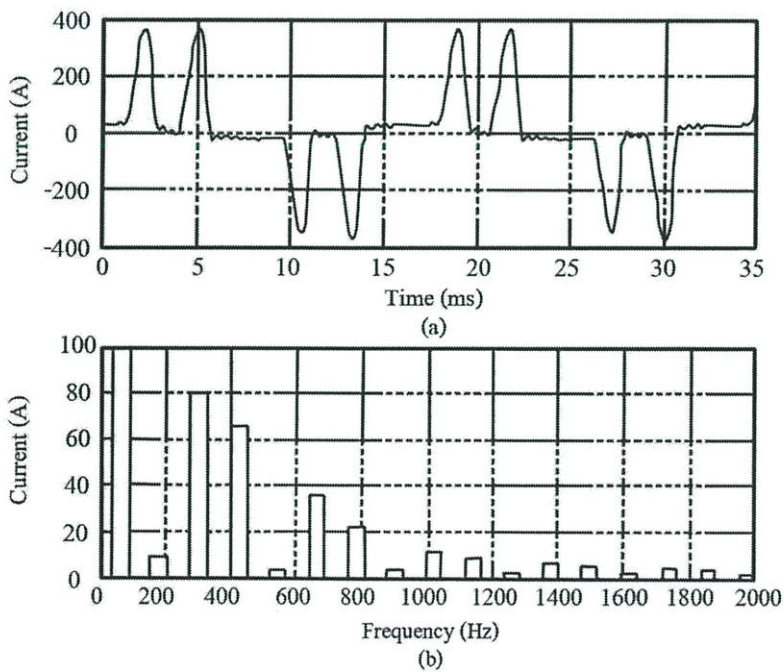
ในภาคส่วนอุตสาหกรรมสมัยใหม่มีการใช้อุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นอย่างแพร่หลาย ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ได้ทำให้เกิดกระแสฮาร์โมนิกส์เข้าสู่ระบบ เป็นสาเหตุเกิดความผิดเพี้ยนของแรงดันจึงปฏิเสธไม่ได้ว่า อุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้ตัวประกอบกำลังต่ำด้วย ในภาคอุตสาหกรรมจึงมีการใช้ Capacitor bank เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังให้ดีขึ้นแต่วิธีการนี้กลับเพิ่มความเสี่ยงในการเกิดเรโซแนนซ์ขึ้นด้วย เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นจะทำให้มอเตอร์และหม้อแปลงมีความร้อนสูงและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวในการตอบสนองทำงานผิดพลาดขึ้นได้

2.4.1 Three-Phase Power Converters

Three-Phase Power Converters แตกต่างกับ single-phase converters เนื่องจากมันไม่สร้างกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 ซึ่งถือว่าเป็นข้อได้เปรียบอย่างมากเพราะฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 เป็นองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ขนาดใหญ่ที่สุด อย่างไรก็ตามเอกลักษณ์เฉพาะของความถี่ยังสร้างปัญหาฮาร์โมนิกส์ให้ระบบอยู่ดังรูปที่ 2.3 กระแสจากแหล่งจ่าย ASD สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ในรูปที่ 2.3 ครอบคลุมทั้ง DC motor drive motor input, Voltage source inverter drives (เช่น ตัวขับเคลื่อนแบบ PWM) สามารถสร้างความผิดเพี้ยนได้ดังรูปที่ 2.4



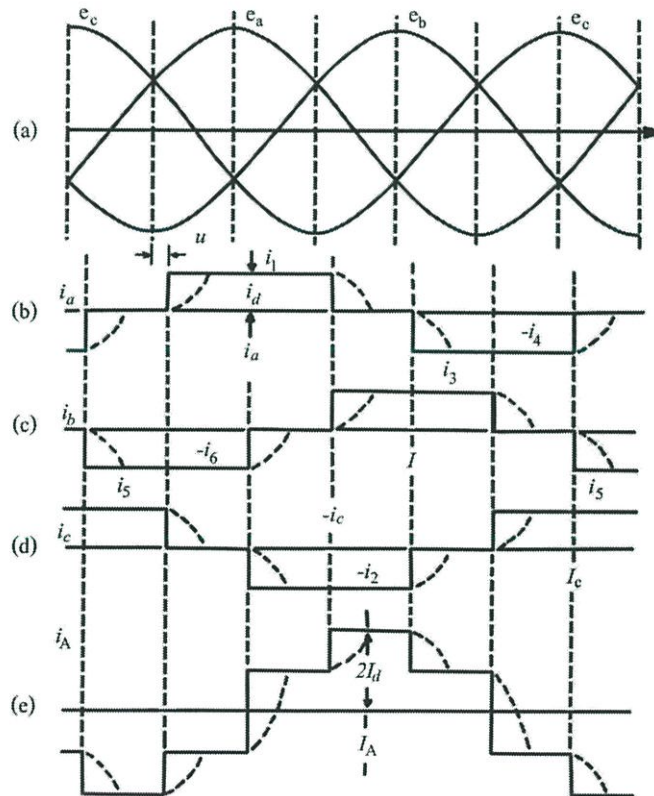
รูปที่ 2.3 กระแสและฮาร์โมนิกส์สเปกตรัมของ Adjustable speed drive ชนิด CSI



รูปที่ 2.4 กระแสและฮาร์โมนิกส์สเปกตรัมของ PMW- drive ชนิด ASD

ในด้านอินพุตของ PWM drive ถูกออกแบบให้เหมือนกับ switch-mode power supply ในคอมพิวเตอร์ ตัวเรียงกระแสจะส่งโดยตรงจาก AC bus ไปที่ตัวเก็บประจุขนาดใหญ่และตัวเหนี่ยวนำขนาดเล็กบน DC bus ตัวเก็บประจุจะถูกชาร์จในช่วงคลื่นพัลส์ที่สั้นมากๆ ทำให้เกิดกระแสที่ผิดเพี้ยนสูงลักษณะคล้ายหูกกระต่าย ในวงจรเรียงกระแสแบบ 6 พัลส์ กำหนดให้ค่ากระแสตรงแทนด้วย I_d สมการกระแสสลับของเฟส A แสดงได้ดังนี้

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\begin{aligned} &\cos(\omega t) - \frac{1}{5} \cos(5\omega t) + \frac{1}{7} \cos(7\omega t) \\ & - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) - \frac{1}{17} \cos(17\omega t) \\ & + \frac{1}{19} \cos(19\omega t) \dots \end{aligned} \right) \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.5 คลื่น 6 พัลส์ บริดจ์ (a) แรงดันเฟส ถึง นิวทรัล (b)-(d) กระแสเฟส ฝั่งเครื่องแปรผัน (e) กระแสเฟสฝั่งระบบที่มีหม้อแปลงแบบ เดลต้า-เดลต้า

กระแสสามเฟสดังรูป 2.5 (b), (c) และ (d) ตามลำดับ จากการสังเกตสมการ 2.3 เราพบว่า

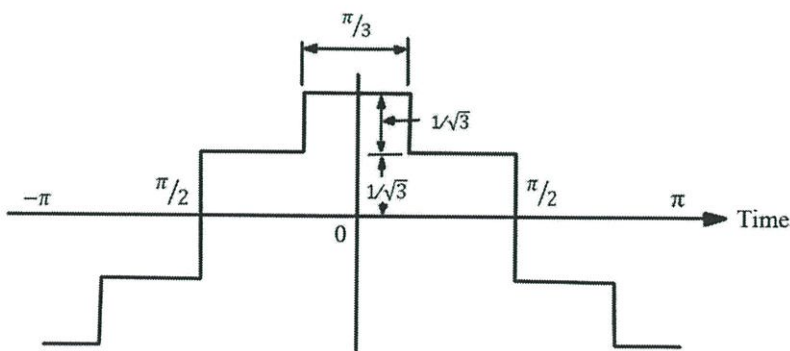
1. ไม่พบ triple harmonic
2. แสดงฮาร์โมนิกอันดับที่ $6k \pm 1$ เมื่อ k เป็นจำนวนเต็ม
3. สำหรับฮาร์โมนิกอันดับที่ $6k+1$ เป็น positive sequence และฮาร์โมนิกอันดับ $6k-1$ เป็น negative sequence
4. ขนาดกระแส RMS มูลฐานคำนวณได้จาก

$$I_1 = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi}\right) I_d = \left(\frac{\sqrt{6}}{\pi}\right) I_d \quad (2.4)$$

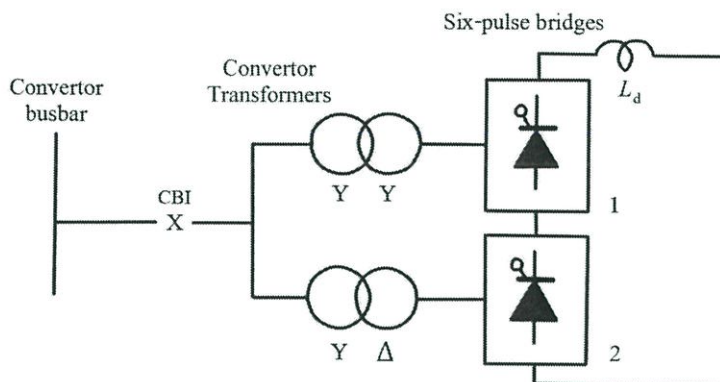
5. ขนาดกระแสของฮาร์โมนิกแต่ละอันดับ

$$I_n = \frac{I_1}{n} \quad (2.5)$$

องค์ประกอบของรูปคลื่น 12 พัลส์ประกอบด้วยกลุ่มของรูปคลื่น 6 พัลส์ 2 กลุ่มที่ถูกป้อนมาจากชุดหม้อแปลง 3 เฟสขนานกัน ซึ่งด้วยการที่ค่ามูลฐานของแรงดันของทั้ง 2 กลุ่มมีค่าเท่ากัน และมีมุมเคลื่อนจากกัน 30 องศาตามรูป 2.6 ยิ่งไปกว่านั้นการจะคงรูปแบบของรูปคลื่น 12 พัลส์ไว้กลุ่มของ 6 พัลส์ทั้ง 2 ต้องทำงานในมุมควบคุมเดียวกัน ทำให้กระแสมีค่าความถี่มูลฐานเดียวกันที่ทั้ง 2 ฝั่งของหม้อแปลง



รูปที่ 2.6(a) รูปคลื่น 6 พัลส์จากหม้อแปลง เดลต้า-สตาร์



รูปที่ 2.6(b) วงจรเครื่องแปรผันกำลังแบบ 12 พัลส์

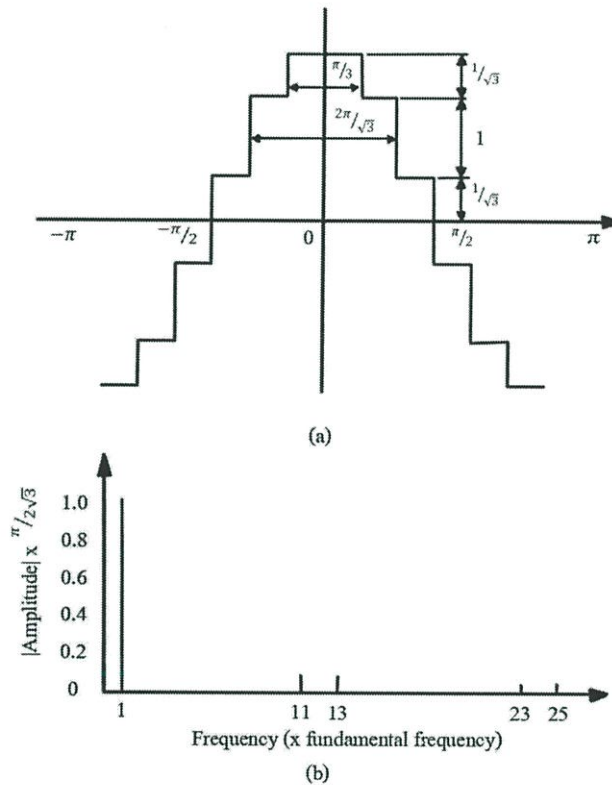
ผลลัพธ์คือ กระแสไฟ AC จะสามารถแสดงได้ด้วยผลรวมของอนุกรมฟูเรียร์ของ Star-Star สมการที่ 2.6 ดังนี้

$$(i_a)_{12} = 2 \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \right) i_d \left(\begin{array}{c} \cos(\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \\ \frac{1}{13} \cos(13\omega t) - \frac{1}{23} \cos(23\omega t) + \frac{1}{25} \cos(25\omega t) \dots \end{array} \right) \quad (2.6)$$

ซึ่งผลรวมอนุกรมนี้จะประกอบไปด้วยฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ $12k \pm 1$ โดยที่กระแสฮาร์โมนิกส์ของลำดับที่ $6k \pm 1$ โดยที่ค่า k เป็นค่าที่เคลื่อนที่หมุนไปตามหม้อแปลงแปรผันกระแสทั้ง 2 แต่ไม่ได้เคลื่อนที่ข้ามไปยังฝั่งของกระแสลับ รูปที่ 2.6(a) แสดงรูปคลื่นของ 12 พัลส์ตามแกนเวลาและรูปที่ 2.6(b) แสดงในแกนความถี่

ในส่วนที่แล้วได้มีการใช้หม้อแปลงสองตัวที่มีมุมต่างกัน 30 องศาซึ่งสร้างรูปคลื่น 12 พัลส์ ซึ่งถ้าหากหม้อแปลงมีการเคลื่อนองศาเฟสอย่างเหมาะสม จะสามารถสร้างรูปคลื่นที่มีจำนวนพัลส์ที่สูงขึ้นเช่นรูปคลื่น 24 พัลส์ สามารถสร้างโดยการเคลื่อนองศาเฟสของหม้อแปลง 15 องศา และ 48 พัลส์ หากมีการเคลื่อนองศาเฟสของหม้อแปลงไป 7.5 องศา อย่างไรก็ตามถึงแม้ทางทฤษฎีจะสามารถสร้างรูปคลื่นเหล่านี้ได้รูปคลื่นที่สูงกว่า 48 พัลส์ นั้นพบได้ยากมากเนื่องจากรูปคลื่นจะมีความซับซ้อนสูงเกินกว่า ซับพลาจะสามารับมือได้เช่นเดียวกับกรณีของ 12 พัลส์ การปรับมุมเคลื่อนจะเข้ามาเกี่ยวข้องเมื่อต้องการจำนวนพัลส์ที่สูงขึ้น ทำให้ต้องอาศัยค่าตัวประกอบที่เหมาะสมในการขนานกันของหม้อแปลง

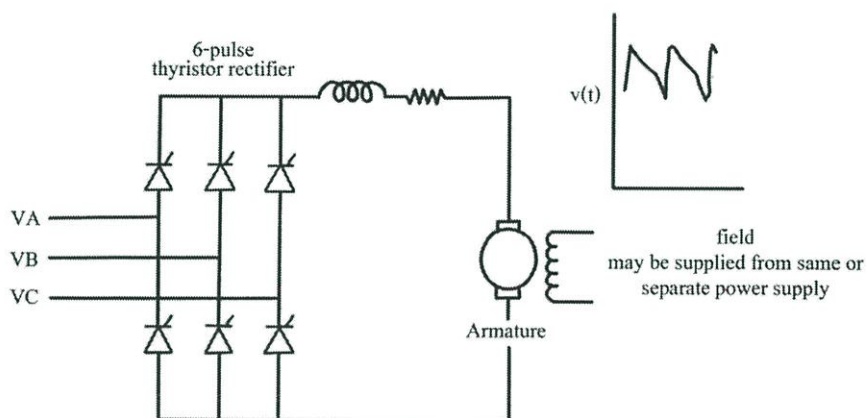
เพื่อให้ได้ค่าความถี่มูลฐานที่ต้องการของแรงดันทั้ง 2 ฟังตามทฤษฎีกระแสฮาร์โมนิกส์จะมีความสัมพันธ์กับจำนวนพัลส์ของรูปคลื่นกระแสตามความสัมพันธ์ $pk \pm 1$ และขนาดจะลดลงเป็นสัดส่วนกับลำดับของฮาร์โมนิกส์ ทำให้ค่าฮาร์โมนิกส์อันดับ ที่ 49 เป็นต้นไปจะมีขนาดเล็กมากและสามารถตัดทิ้งได้



รูปที่ 2.7 (a) กระแสเฟสของเครื่องแปรผันกำลังแบบ 12 พัลส์ (b) สเปกตรัมของเครื่องแปรผันกำลังแบบ 12 พัลส์

การเรียงกระแสเป็นขั้นตอนเดียวที่จำเป็นสำหรับ DC drive เมื่อเปรียบเทียบกับ AC drive แล้ว DC drive จะให้ช่วงกว้างของความเร็วและขนาดทอร์กช่วงสตาร์ทสูงกว่า อย่างไรก็ตามราคาและค่าซ่อมบำรุงมีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่า AC drive DC motor ส่วนใหญ่ใช้ six-pulse rectifier ดังรูปที่ 2.8 หากเป็นมอเตอร์ขนาดใหญ่จะเป็น 12-pulse rectifier ซึ่งจะช่วยลดช่วงเวลาทำงานของไทรสเตอร์และกระแสฮาร์โมนิกส์กระแสฮาร์โมนิกส์ขนาดใหญ่ที่สุดของ six-pulse drive คือฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 5 และ 7 เป็นปัญหาส่วนใหญ่ต่อการตอบสนองระบบ ในส่วนของ 12-pulse rectifier จะสามารถลดฮาร์โมนิกส์

ลำดับที่ 5 และ 7 ได้ประมาณ 90% ขึ้นกับความไม่สมดุลของระบบ ข้อเสียของ 12-pulse rectifier คือมีราคาแพงเกินไป

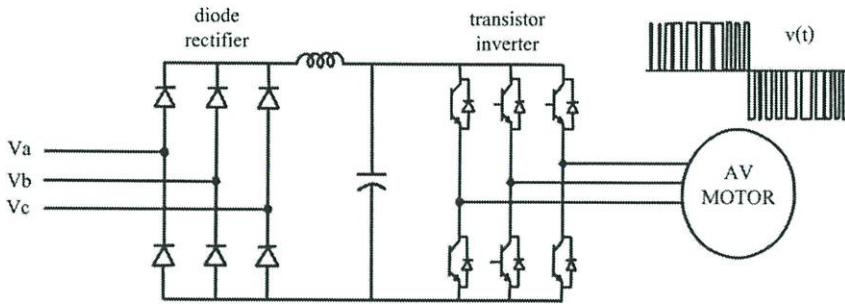


รูปที่ 2.8 วงจรอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงชนิด 6 พัลส์

ใน AC drive ด้านเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสถูกเปลี่ยนเป็นตัวควบคุมแรงดันโดยใช้ความถี่อินเวอร์เตอร์แบ่งเป็น Voltage source Inverters (VSIs) หรือ Current source Inverters (CSIs) กรณี VSI ต้องการแรงดันกระแสตรงคงที่ (มีรีปเปลน้อย) เพื่อจ่ายเข้าอินเวอร์เตอร์โดยการต่อตัวเก็บประจุหรือ LC filter ส่วน CSI ต้องการกระแสคงที่ด้านเข้าโดยการต่อตัวเหนี่ยวนำแบบอนุกรม

โดยปกติ AC drives จะนำมาใช้กับมอเตอร์กรงกระรอกมอเตอร์ชนิดนี้มีความทนทานราคาต่ำ ไม่ต้องการการบำรุงรักษามาก ส่วนในมอเตอร์ซิงโครนัสจะใช้เมื่อต้องการควบคุมความเร็วที่แม่นยำ AC drive ที่นิยมใช้เป็นระบบ VSI ด้วยเทคนิค PWM เพื่อสังเคราะห์คลื่นกระแสสลับคล้ายขบวนพัลส์กระแสตรงที่มีความกว้างต่างกันดังเช่นรูปที่ 2.9

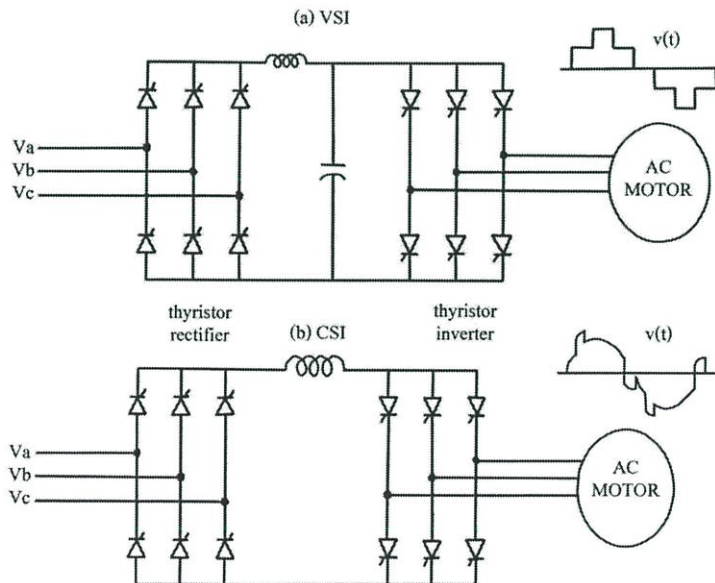
ตัวอินเวอร์เตอร์สามารถใช้ได้ทั้ง SCRs, GTO, ไทริสเตอร์ และ power transistors เพื่อสร้างพัลส์นี้ VSI PWM เป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงานดีที่สุดสำหรับไดรฟ์ที่ต้องการช่วงสปีดกว้างและมีขนาดอย่างน้อย 500 แรงม้า ประโยชน์อื่นของ PWM drive คือไม่ต้องการแปรแรงดันด้านออกของวงจรเรียงกระแสเพื่อควบคุมความเร็วมอเตอร์ สามารถแทนที่ไดโอดเรียงกระแสด้วยไทริสเตอร์และไม่ต้องการวงจรควบคุมไทริสเตอร์ไดรฟ์กำลังสูงจะใช้ SCRs และ อินเวอร์เตอร์แบบ 6-pulse ดังรูปที่ 2.10 หรือ 12-pulse DC drive ขนาดใหญ่



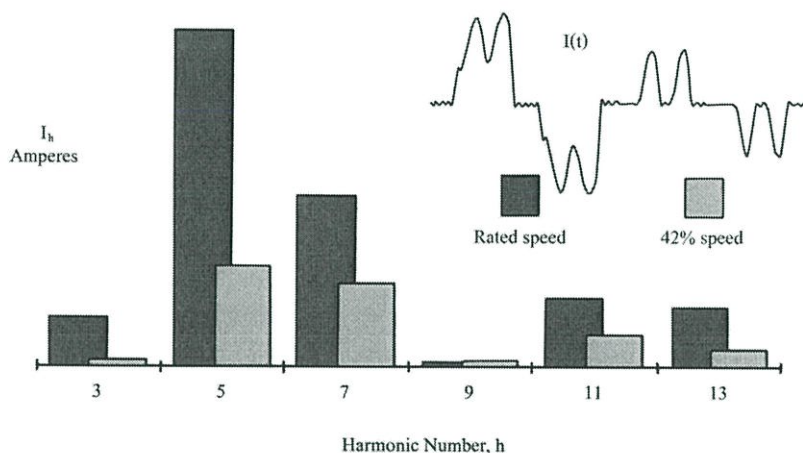
รูปที่ 2.9 วงจรอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ชนิด PWM

VSI drive ในรูป 2.10a มีข้อจำกัดกับกรณีที่ต้องการการเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบทันทีทันใด ส่วน CSI drives ในรูปที่ 2.10b มีความแม่นยำแต่ต้องการมอเตอร์ที่มีคุณสมบัติ leading power factor (เช่น ซิงโครนัสมอเตอร์หรืออินดักชันที่ต่อตัวเก็บประจุ) หรือเพิ่มวงจรความคุมไทรสเตอร์ ในกรณีอื่น CSI drive ต้องออกแบบเพื่อใช้กับมอเตอร์พิเศษ ไทรสเตอร์ใน CSI ต้องสามารถป้องกันกระแสกระชากซึ่งทำให้ไดรฟ์ชนิดนี้มีราคาสูง

ค่าความผิดพลาดจากกระแสฮาร์มอนิกใน ASDs มีค่าไม่คงที่เนื่องจากความเร็วและค่าทอร์กที่เปลี่ยนไป ในรูปที่ 2.11 แสดงการทำงานสองกรณีของ PWM ASD รูปคลื่นที่ความเร็ว 42% เทียบกับกรณีที่ไดรฟ์ทำงานที่พิกัดมีการฉีดกระแสฮาร์มอนิกสูง



รูปที่ 2.10 อุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับขนาดใหญ่



รูปที่ 2.11 ผลของความเร็วดต่อการกระจายฮาร์โมนิกส์

2.5 คุณลักษณะการตอบสนองของระบบ

ในระบบไฟฟ้ากำลัง การตอบสนองของระบบมีความสำคัญเทียบเท่ากับแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ ซึ่งความจริงแล้ว ระบบไฟฟ้ากำลังค่อนข้างจะทนทานต่อกระแสที่ถูกส่งมาโดยภาระทางไฟฟ้าที่สร้างฮาร์โมนิกส์ ซึ่งผลตอบสนองของระบบไฟฟ้ากำลังที่ความถี่แต่ละอันดับ จะสามารถนำมาอธิบายผลกระทบที่เกิดขึ้นจาก ภาระทางไฟฟ้าแบบไม่เป็นเชิงเส้น บนความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันมีตัวแปรสามค่าที่ส่งผลต่อคุณลักษณะการตอบสนองของระบบไฟฟ้า เช่น อิมพีแดนซ์รวมของระบบ, การมีอยู่ของ Capacitor Bank, จำนวนของภาระตัวต้านทานในระบบไฟฟ้า

2.5.1 อิมพีแดนซ์ของระบบ

ที่ค่าความถี่มูลฐานระบบจะเปรียบเสมือนความต้านทานเหนี่ยวนำ และบางครั้งถูกเรียกว่า Short-Circuit Reactance โดยที่ค่าความเก็บประจุจะถูกมองข้ามบนระบบสายส่งหรือในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งค่าที่ถูกใช้บ่อยๆในการคำนวณฮาร์โมนิกส์บนระบบไฟฟ้ากำลังคือค่า Short-Circuit Impedance ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$Z_{SC} = R_{SC} + jX_{SC} = \frac{kV^2}{MVA_{SC}} = \frac{kV \times 1000}{\sqrt{3}I_{SC}} \quad (2.7)$$

เมื่อ Z_{SC} = Short-Circuit Impedance

R_{SC} = Short-Circuit Resistance

X_{SC} = Short-Circuit Reactance

kV = Phase to Phase Voltage, kV

MVA_{SC} = Three Phase Short-Circuit, MVA

I_{SC} = Short-Circuit Current, A

Z_{SC} คือ ปริมาณในรูปของ Phasor ซึ่งประกอบไปด้วยทั้งค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ อย่างไรก็ตาม ถ้าข้อมูลของ Short-Circuit ไม่ได้ระบุข้อมูลของเฟสมาด้วยนั้นให้ประมาณว่าเป็นค่า Reactive ในส่วนของค่าความเหนี่ยวนำจะแปรเปลี่ยนตามความถี่แบบเป็นเชิงเส้นตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$X_h = hX_l \quad (2.8)$$

ในระบบไฟฟ้ากำลัง ค่าความต้านทานมักจะส่งผลมากต่อการศึกษาลักษณะจาก ฮาร์โมนิกส์ สำหรับสายส่ง สายเคเบิล ค่าความต้านทานจะแปรเปลี่ยนตามค่าประมาณของรากกำลังสองของความถี่ Skin Effect เมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้น ข้อยกเว้นเพียงอย่างเดียวคือหม้อแปลง เนื่องจากผลของการกระจายของความสูญเสียจากกระแสไหลวน โดยที่ค่าความต้านทานปรากฏของหม้อแปลงขนาดใหญ่จะแปรผันตามอย่างเป็นสัดส่วนกับความถี่ ซึ่งนี่เป็นประโยชน์อย่างมากต่อการเข้าสู่สมมูลของการเรโซแนนซ์ ซึ่งจะนำมาอธิบายในส่วนถัดไป

ในหม้อแปลงที่มีขนาดเล็กลงมา ที่ขนาดเล็กกว่า 100 kVA ความต้านทานของขดลวดจะมีค่ามากเมื่อเทียบกับ อิมพีแดนซ์ส่วนอื่นๆจนกลบทับผลของการกระจายของกระแสไหลวน และมีผลเพียงเล็กน้อยต่อความต้านทานรวมจนกระทั่งความถี่ขึ้นสูงถึง 500 Hz ซึ่งหม้อแปลงขนาดเล็กเหล่านี้ อาจจะมีอัตราส่วน X/R เท่ากับ 1.0 หรือ 2.0 ที่ความถี่มูลฐาน ในขณะที่หม้อแปลงของสถานีย่อยที่ขนาดใหญ่ขึ้นมักจะมีอัตราส่วนประมาณ 20 ถึง 30 ดังนั้นถ้าที่บัสที่กำลังศึกษาใช้ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงในการคำนวณเนื่องจาก ค่าอิมพีแดนซ์ของสายมีค่าน้อยมากแบบจำลองอิมพีแดนซ์รวมของระบบจะต้องใช้การพิจารณาอย่างรอบคอบ

ที่ค่าแรงดันทั่วไป เช่นในระบบไฟฟ้าของอุตสาหกรรมค่าความเหนี่ยวนำรวมของระบบ มักจะถูกแทนด้วยค่า อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง โดยการประมาณที่เหมาะสมของ X_{SC} มักจะใช้ค่าของอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงตามสมการดังนี้

$$X_{SC} \approx X_{tx} \quad (2.9)$$

ซึ่งการประมาณค่านี้ค่อนข้างมีความแม่นยำถึง 90% ของอิมพีแดนซ์รวมของระบบ ซึ่งก็เพียงพอสำหรับระบบที่จะมีหรือไม่มีกระแสของฮาร์โมนิกส์ โดยอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงในหน่วย โอห์มสามารถพิจารณาได้จากเปอร์เซ็นต์ของอิมพีแดนซ์ Z_{tx} ที่พบได้บนเนมเพลท เป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

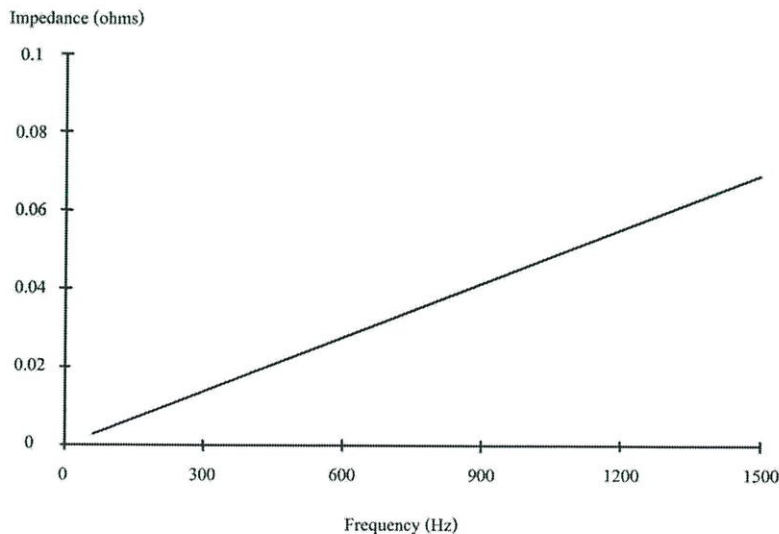
$$X_{tx} = \left(\frac{kV^2}{MVA_{3\phi}} \right) \times Z_{tx} (\%) \quad (2.10)$$

โดย MVA 3 Phase คือค่า พิกัด kVA ของหม้อแปลง ทำให้สามารถสมมติได้ว่าอิมพีแดนซ์มีค่าเป็นความเหนี่ยวนำขนาดใหญ่เช่น หม้อแปลง 1500 kVA 6% โดยอิมพีแดนซ์รวมบนระบบ 480V สามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$X_{tx} = \left(\frac{kV^2}{MVA_{3\phi}} \right) \times Z_{tx} (\%) = \left(\frac{0.480^2}{1.5} \right) \times 0.06 = 0.0092 \quad (2.11)$$

เมื่อนำความสัมพันธ์นี้มาเขียนเทียบกับความถี่ สำหรับระบบที่เป็นความเหนี่ยวนำ (ไม่มีตัวเก็บประจุในระบบ) โดยที่กำลังไฟฟ้าจริงจะมีพฤติกรรมที่ค่อนข้างแปลก ถึงอย่างไรก็ตามกราฟนี้ไม่ได้มีการนำค่าตัวเก็บประจุมาพิจารณา จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้คำนวณด้านฮาร์โมนิกส์

2.5.2 อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์และความถี่ของระบบที่เป็นความเหนี่ยวนำ

ตัวเก็บประจุแบบขนานในฝั่งผู้บริโภคเพื่อปรับปรุงคุณภาพทางไฟฟ้าหรือบนระบบสายส่งสำหรับการควบคุมแรงดันจะทำให้อิมพีแดนซ์ของระบบเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของระบบ ซึ่งตัวเก็บประจุไม่ได้สร้างฮาร์โมนิกส์ แต่ฮาร์โมนิกส์สามารถส่งผลอย่างรุนแรงแก่ตัวต้านทานเหล่านี้ ในขณะที่ความเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับการลดลงของความเก็บประจุตามความสัมพันธ์

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.12)$$

C คือ ค่าความนำประจุในหน่วยฟารัด ซึ่งค่านี้มักจะไม่ไ้ระบุมาให้สำหรับตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งมักจะระบุมาเป็น kVAR หรือ MVAR ที่แรงดันที่กำหนด ซึ่งวงจรสมมูลของ Line to Neutral ของค่าความเก็บประจุที่ความถี่มูลฐาน สำหรับ Capacitor Bank สามารถพิจารณาได้จาก

$$X_C = \frac{kV^2}{Mvar} \quad (2.13)$$

2.5.3 การเรโซแนนซ์แบบขนาน

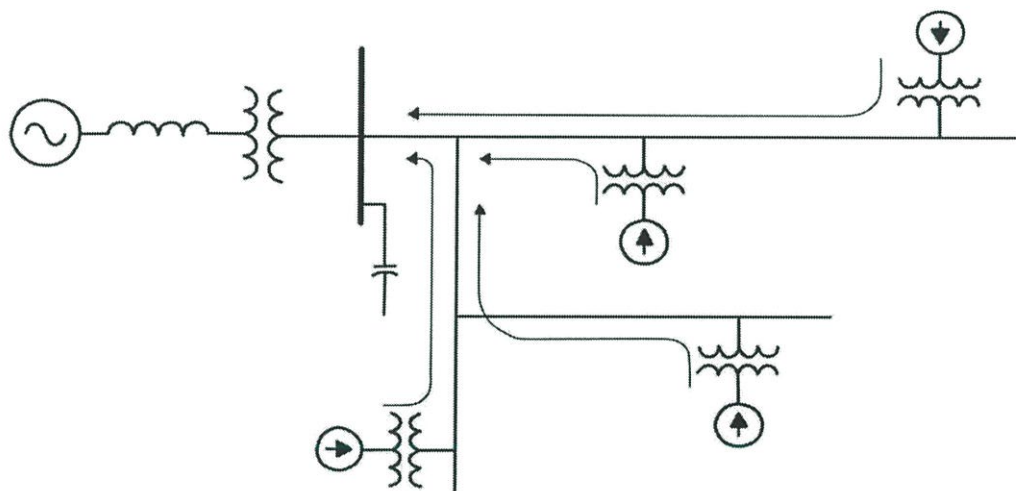
วงจรทั้งหมดต้องประกอบไปด้วยค่าความเก็บประจุและค่าความเหนี่ยวนำ มีค่าความถี่ธรรมชาติมากกว่าหนึ่งค่า ซึ่งเมื่อความถี่เหล่านี้ถูกกระตุ้นโดยโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะทำให้กระแสและแรงดันที่ค่าความถี่นั้นๆพุ่งสูง ซึ่งนี่ถือเป็นต้นเหตุของปัญหาทางฮาร์โมนิกส์บนระบบไฟฟ้ากำลัง

ในทางปฏิบัติการพบการเพิ่มขึ้นของความผิดเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์จากการกระตุ้นของตัวเก็บประจุถือเป็นเรื่องผิดปกติ ซึ่งเหตุการณ์แบบนี้มักจะระบุได้ว่าเป็นปัญหาการเกิดการเรโซแนนซ์แบบขนานจากค่าความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่ถูกสร้างขึ้นโดยโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น รูปที่ 2.13 แสดงระบบจ่ายกำลังซึ่งมีการเกิดสภาวะการเรโซแนนซ์แบบขนาน ซึ่งจากมุมมองของแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ตัว Shunt Capacitor จะถูกมองว่าขนานกับระบบที่เป็นความเหนี่ยวนำที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ ยิ่งไปกว่านั้นระบบถูกสมมติให้มีแหล่งจ่ายแรงดันที่ความถี่มูลฐานเพียงค่าเดียว ระบบจึงมีแหล่งจ่ายแรงดันที่อยู่ในสภาวะลัดวงจร การเกิดการเรโซแนนซ์แบบขนานเกิดขึ้นเมื่อ ค่า X_C และค่าอิมพีแดนซ์ของระบบมีการหักล้างกันเองที่ความถี่ค่านี้เรียกว่า ความถี่เรโซแนนซ์แบบขนาน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{eq}C} - \frac{R^2}{4L_{eq}^2}} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{eq}C}} \quad (2.14)$$

โดยที่ค่า R = ผลรวมความต้านทานของแหล่งจ่ายและหม้อแปลงสมมูล
 L_{eq} = ค่าความเหนี่ยวนำรวมระหว่างแหล่งจ่ายและหม้อแปลง
 C = คือความเก็บประจุของ Capacitor Bank
 ที่ความถี่เรโซแนนซ์ อิมพีแดนซ์ปรากฏของผลรวมขนานของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ถูกมองโดยแหล่งจ่ายกระแสฮาร์โมนิกส์จะมีค่ามาก

$$Z_p = \frac{X_C(X_{Leq}+R)}{X_C+X_{Leq}+R} = \frac{X_C(X_{Leq}+R)}{R} \approx \frac{X_C^2}{R} = QX_{Leq} = QX_c \quad (2.15)$$



รูปที่ 2.13 ระบบที่มีความเสี่ยงต่อการเกิด เรโซแนนซ์แบบขนาน

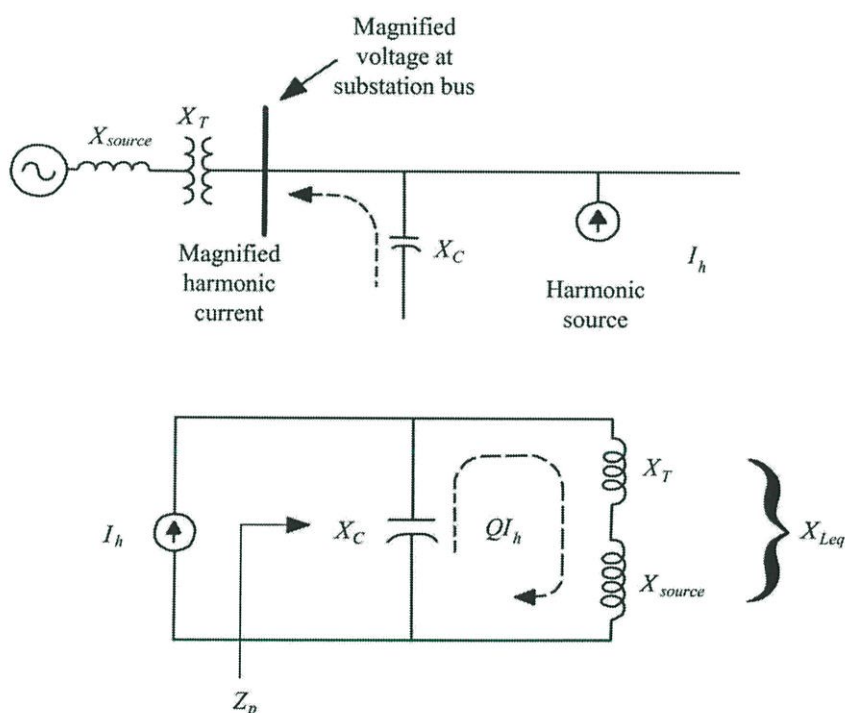
โดยที่ค่า $Q = XL/R = X_C/R$ โดยที่ $R \ll X_{Leq}$

Q คือค่าตัวประกอบคุณภาพของวงจรเรโซแนนซ์ ที่จะเป็นตัวกำหนดความคมของความถี่เรโซแนนซ์ ค่า Q จะแปรตามตำแหน่งที่พิจารณาในระบบไฟฟ้ามีค่าตั้งแต่ 5 บนวงจร Feeder ในระบบสายส่ง หรือสูงกว่า 30 บน Secondary Bus ของหม้อแปลง Step-Down ขนาดใหญ่หากพิจารณาพฤติกรรมของกระแสในช่วงที่มีการเกิดการเรโซแนนซ์แบบขนาน กระแสไหลผ่าน Capacitor Bank หรือในระบบไฟฟ้ากำลังเป็น $I_{resonance}$ จะสามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$I_{\text{resonance}} = \frac{V_p}{X_C} = \frac{QX_C I_h}{X_C} = QI_h \quad (2.16a)$$

$$I_{\text{resonance}} = \frac{V_p}{X_{Leq}} = \frac{QX_{Leq} I_h}{X_{Leq}} = QI_h \quad (2.16b)$$

จากสมการที่ 2.16 (a) และ (b) แสดงให้เห็นถึงกระแสไหลใน Capacitor Bank และในระบบไฟฟ้ากำลัง จะถูกขยายด้วยตัวประกอบ Q ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะส่งผลให้ Capacitor Bank ล้มเหลวจนอาจถึงขั้นเกิดการระเบิด พิวส์ขาด หรือทำให้หม้อแปลงเกิดความร้อนสูง



รูปที่ 2.14 ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ Shunt Capacitor Bank มีลักษณะ ขนานกับระบบ (a) รูปวงจรรายง่ายของระบบจำหน่าย (b) วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน เมื่อมองผ่านตัวแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์

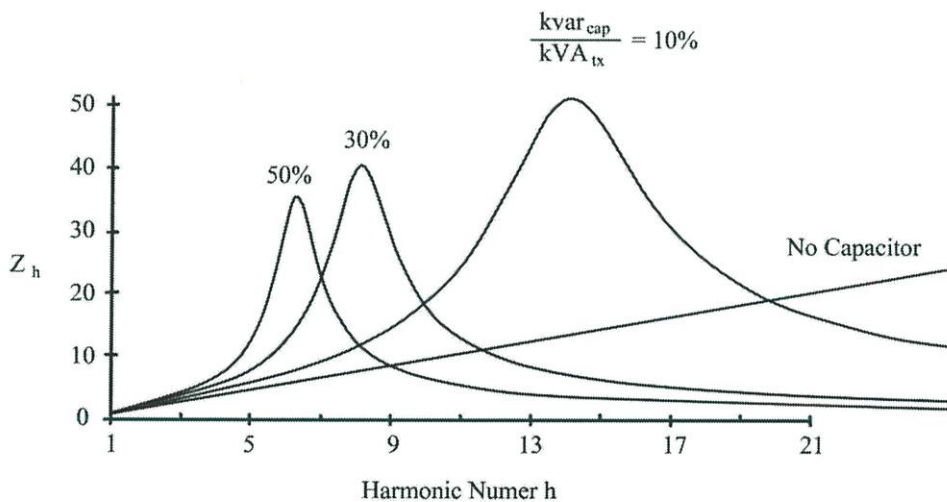
การเพิ่มขึ้นของกระแสและแรงดันนี้สามารถพิจารณาได้จากขนาดของตัว Shunt Capacitor ที่ติดตั้งตามรูปที่ 2.14 ซึ่งได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดต่างๆของตัวเก็บประจุกับหม้อแปลงและเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ทำการติดตั้งตัวเก็บประจุและได้แสดงวิธีการคำนวณความถี่เร-

โซแนนซ์ การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังปกติแล้วจะไม่ได้กำหนดค่า L และ C มาให้โดยตรง เราจึงทำการคำนวณฮาร์โมนิกส์เรโซแนนซ์ โดยอาศัยค่าอิมพีแดนซ์บนความถี่มูลฐานและพิกัดตามความสัมพันธ์

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_{SC}}} = \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{Mvar_{cap}}} \approx \sqrt{\frac{kVA_{tx} \times 100}{kvar_{cap} \times Z_{tx} (\%)}} \quad (2.17)$$

h_r = ฮาร์โมนิกส์เรโซแนนซ์

X_C = ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ



รูปที่ 2.15 Frequency Response ของระบบต่อ Capacitor Bank ขนาดต่างๆ

X_C = System Short-Circuit Reactance

MVA_{sc} = System Short-Circuit MVA

MVA_{cap} = MVAR พิกัด ของ Capacitor Bank

kVA_{tx} = kVA พิกัดของหม้อแปลง Step-Down

Z_{tx} = อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง Step-Down

$kVAR_{cap}$ = kVAR พิกัดของ Capacitor Bank

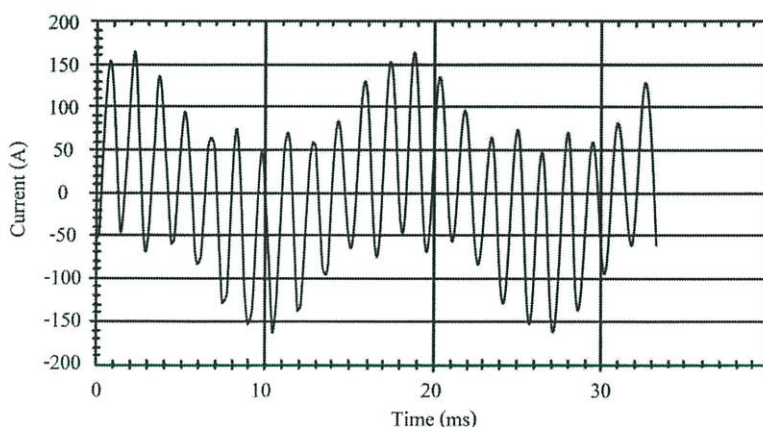
2.6 ผลกระทบจากฮาร์โมนิกส์

กระแสฮาร์โมนิกส์ที่ถูกสร้างขึ้นจากโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นนั้น จะถูกส่งกลับไปยังระบบไฟฟ้า ซึ่งกระแสเหล่านี้ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์มากมายในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยเฉพาะตัวเก็บประจุ หม้อแปลง และมอเตอร์ ทำให้เกิดการสูญเสียทางไฟฟ้ามากขึ้น ความร้อนสูงขึ้นและการเกิดการโอเวอร์โหลด นอกจากนี้กระแสฮาร์โมนิกส์ยังไปรบกวนสายสัญญาณโทรศัพท์ ทำให้เกิดความผิดพลาดในระบบการวัดของไฟฟ้ากำลัง

2.6.1 ผลกระทบต่อตัวเก็บประจุ

ปัญหาจากฮาร์โมนิกส์ส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ Capacitor Bank เป็นอันดับแรก เนื่องจากตัวเก็บประจุได้รับแรงดันฮาร์โมนิกส์จากการเกิดเรโซแนนซ์ซึ่งมีค่าสูง กระแสที่ไหลในตัวเก็บประจุจึงมีค่าสูง จากรูปที่ 2.16 แสดงให้เห็นถึงรูปคลื่นกระแสของ Capacitor Bank ที่เกิดการเรโซแนนซ์ที่ความถี่อันดับที่ 11 ในระบบไฟฟ้าจะเห็นกระแสฮาร์โมนิกส์ได้อย่างเด่นชัด ทำให้ได้รูปคลื่นที่มีฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 11 ซึ่งมีค่าสูญเสียยิ่งกว่าอันดับมูลฐาน ซึ่งรูปคลื่นกระแสเช่นนี้แสดงให้เห็นระบบที่มีการเรโซแนนซ์และมี Capacitor Bank อยู่ในระบบในสถานการณ์เรโซแนนซ์เช่นนี้ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของกระแสจะสูงกว่าค่าพิกัดกระแสที่ตัวเก็บประจุสามารถรับได้ "IEEE Standard for Shunt Power Capacitor" (IEEE Standard 18-1992) ได้ระบุเกี่ยวกับพิกัดต่อเนื่อง ของตัวเก็บประจุไว้ดังนี้

- 135% ของ KVAR ที่ระบุไว้บนเนมเพลท
- 110% ของ พิกัดค่าเฉลี่ยกำลังสอง ของแรงดัน (รวมถึงฮาร์โมนิกส์แต่ไม่นับ Transients)
- 180% ของ พิกัดค่าเฉลี่ยกำลังสอง ของกระแส (รวมถึงค่ากระแสมูลฐานและค่ากระแสฮาร์โมนิกส์)
- 120% ของ ค่าสูงสุดของแรงดัน (รวมถึงแรงดันฮาร์โมนิกส์)



รูปที่ 2.16 กระแสตัวเก็บประจุผลจากเรโซแนนซ์อันดับ11ในระบบ

2.6.2 ผลกระทบต่อมอเตอร์

มอเตอร์ได้รับผลกระทบค่อนข้างมากจากแรงดันฮาร์โมนิกส์ โดยแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่ชั่วของมอเตอร์จะกลายเป็นเส้นแรงแม่เหล็กไหลในมอเตอร์ ซึ่งเส้นแรงจากฮาร์โมนิกส์เหล่านี้ไม่ได้ส่งผลมากมายต่อแรงบิดของมอเตอร์ แต่ส่งผลกระทบต่อในการหมุนของโรเตอร์ซึ่งไม่เท่ากับความถี่เชิงโครนัส หรือกล่าวได้ว่าเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสความถี่สูงไหลในโรเตอร์ ผลที่เกิดขึ้นกับโรเตอร์นั้นค่อนข้างคล้ายกันกับกระแส Negative Sequence ที่ความถี่มูลฐาน ทำให้เกิดความสูญเสียเพิ่มขึ้น ลดประสิทธิภาพลงและทำให้มอเตอร์ร้อน สั่น และส่งเสียงแหลมออกมาเป็นตัวบ่งบอกว่ามีแรงดันฮาร์โมนิกส์

ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์มอเตอร์สามารถแทนด้วย Blocked Rotor Reactance วางพาดระหว่างสายและที่ส่งผลต่อมอเตอร์เป็นพิเศษคือค่าที่แรงดันฮาร์โมนิกส์อันดับต่ำที่มีค่าสูงกว่าค่าความต้านทานของมอเตอร์ ปกติแล้วไม่มีความจำเป็นที่จะลดระดับของมอเตอร์ลง ถ้าความผิดเพี้ยนของแรงดันยังคงอยู่ในขอบเขตของมาตรฐาน IEEE Standard 519-1992 ที่กำหนดไว้ที่ 5% ของค่า THD และ 3% ของค่าฮาร์โมนิกส์แต่ละลำดับ ความร้อนจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อ ความผิดเพี้ยนของแรงดันมากขึ้นถึง 8 หรือ 10% หรือสูงกว่านั้น ซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของมอเตอร์

2.7 ทฤษฎีการควบคุมฮาร์โมนิกส์

ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์จะปรากฏได้จากบางส่วนของในระบบไฟฟ้ากำลัง ปัญหาฮาร์โมนิกส์มีสาเหตุหลักๆมาจาก

1. แหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์มีปริมาณมาก
2. ตัวนำที่มีกระแสไหลมีความยาวเกินไป ทำให้เกิดแรงดันสูงผิดเพี้ยนหรือคลื่นรบกวนในโทรศัพท์
3. ผลจากการขยายระบบไฟฟ้ากำลังระบบหนึ่งหรือมากกว่า ทำให้ฮาร์โมนิกส์มากขึ้นเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้

เมื่อเกิดปัญหาตัวเลือกพื้นฐานในการแก้ปัญหาคือ

1. ลดกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ถูกสร้างขึ้นจากโหลด
2. ติดตั้งฟิลเตอร์ เพื่อดึงกระแสฮาร์โมนิกส์ออกจากระบบ ป้องกันกระแสไหลเข้าระบบ หรือไหลออกจากพื้นที่หนึ่งๆ
3. ปรับปรุงผลตอบสนองต่อความถี่ของระบบด้วยฟิลเตอร์ ตัวเหนี่ยวนำ หรือตัวเก็บประจุ

2.7.1 การลดกระแสฮาร์โมนิกส์จากโหลด

ในการลดกระแสฮาร์โมนิกส์จากโหลดมักจะทำได้เพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจจะทำให้การทำงานของอุปกรณ์เกิดความผิดพลาดได้ง่าย ขณะหม้อแปลงที่ทำงานในช่วง Over excitation

สามารถกลับมาทำงานในช่วงปกติได้โดยลดระดับแรงดันลงสู่ช่วงปกติอุปกรณ์อาร์คและอิเล็กทรอนิกส์คอนเวอร์เตอร์ส่วนใหญ่จะถูกจำกัดคุณลักษณะจากการออกแบบ

PWM drive จะชาร์จตัวเก็บประจุของ DC bus โดยตรงจากสายตัวนำการติดตั้ง line reactor หรือหม้อแปลงอนุกรมจะช่วยลดฮาร์โมนิกส์ ลักษณะการต่อหม้อแปลงสามารถใช้ลดฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้าสามเฟสได้ Phase-shift ครึ่งหนึ่งของ 6-pulse power convertor ในโหลดโรงไฟฟ้าประมาณ 30 องศา สามารถประมาณผลของ 12-pulse โหลดด้วยฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 และ 7 ที่ลดลงไป การต่อหม้อแปลงแบบเดลต้า สามารถป้องกัน zero sequence harmonics (หรือ triplen) จากสายตัวนำได้ การใช้หม้อแปลงแบบซิกแซกและการต่อลงดินสามารถเปลี่ยนทิศทางของ triplen harmonic จากสายส่งได้

2.7.2 การติดตั้งฟิลเตอร์

การต่อฟิลเตอร์แบบจะได้ผลเมื่อค่ากระแสแลตต์วงจรฮาร์โมนิกส์อยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดความผิดพลาดของกระแส ซึ่งจะสามารถตัดกระแสที่ออกจากระบบ วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความได้เปรียบด้านเศรษฐศาสตร์และสามารถปรับปรุงตัวประกอบกำลังเหมือนการกำจัดกระแสฮาร์โมนิกส์อีกด้วย ส่วนการติดตั้งฟิลเตอร์แบบอนุกรมเพื่อป้องกันกระแสฮาร์โมนิกส์นั้นไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากปัญหาวัสดุฉนวนที่มีราคาแพง และแรงดันโหลดมีความผิดพลาดสูง อีกจุดหนึ่งคือจุดกราวด์ของตัวเก็บประจุที่ต่อแบบ Grounded-wye ต้องป้องกันการไหลของ triplen harmonic

2.7.3 การปรับปรุงผลตอบแทนต่อความถี่ระบบ

1. ติดตั้งฟิลเตอร์ขนาน ไม่เพียงแต่แยกปัญหากระแสฮาร์โมนิกส์ออกจากระบบ แต่ยังเปลี่ยนแปลงผลตอบแทนของระบบได้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย
2. ติดตั้งรีแอคเตอร์เพื่อปรับปรุงระบบ แต่อาจมีเกิดแรงดันระหว่างรีแอคแตนซ์ของระบบและตัวเก็บประจุสำหรับปรับปรุงตัวประกอบกำลัง รีแอคเตอร์ต้องติดตั้งระหว่างตัวเก็บประจุและแหล่งจ่ายไฟฟ้าของระบบ อีกวิธีหนึ่งคือการวางรีแอคเตอร์อนุกรมกับตัวเก็บประจุเพื่อเปลี่ยนค่าแรงดันของระบบ ยกเว้นเมื่อเป็นการติดตั้งตัวเก็บประจุสำหรับฟิลเตอร์
3. เปลี่ยนขนาดตัวเก็บประจุซึ่งเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดสำหรับทั้งภาคผู้อยู่อาศัยและภาคอุตสาหกรรม
4. ย้ายตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุไปยังตำแหน่งที่มีค่า short-circuit impedance แตกต่างจากเดิม หรือที่มีค่าสูญเสียสูงกว่าวิธีนี้เหมาะสำหรับภาคครัวเรือนกรณีเกิดสัญญาณรบกวนโทรศัพท์ ซึ่งไม่นำมาใช้ในภาคส่วนอุตสาหกรรมเนื่องจากตัวเก็บประจุไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ไกลพอจะสร้างผลกระทบได้

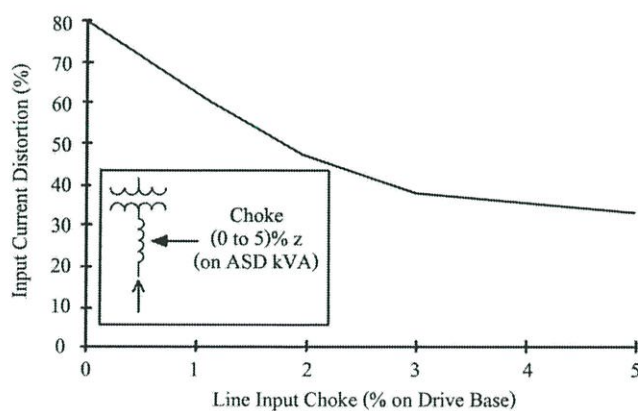
5. ถอนการติดตั้งตัวเก็บประจุ ยอมรับกับค่าความสูญเสียที่มากขึ้น แรงดันตกและค่าตัวประกอบกำลังที่ต่ำ เมื่อประเมินแล้วว่าไม่มีความคุ้มค่าหากปรับปรุง

2.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมฮาร์โมนิกส์

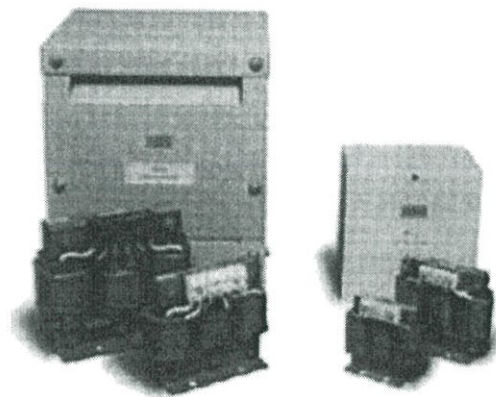
เมื่อนึกถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์เรามักจะนึกถึงอุปกรณ์พื้นฐาน เช่น Capacitor bank, line-reactor จนไปถึงอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนเช่น Active filter ในหัวข้อที่แล้วได้พูดถึงการแก้ปัญหา เช่น การเพิ่ม การลดขนาด หรือการย้ายตำแหน่งตัวเก็บประจุแบบขนานซึ่งจะช่วยปรับปรุงผลตอบสนองต่อความถี่ที่ไม่พึงประสงค์ และปรับปรุงความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ให้ยอมรับได้ เช่น ในรีแอคเตอร์ที่ช่วยแก้ปัญหาเรโซแนนซ์

2.8.1 In-line reactor or chokes

วิธีควบคุมความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ถูกสร้างขึ้นโดย ASD ร่วมกับรีแอคเตอร์ หรือโช๊คโดยติดตั้งด้านอินพุตของไดรฟ์ตัวเหนี่ยวนำจะช่วยให้ชะลอในขณะที่ตัวเก็บประจุบน DC bus สามารถชาร์จและดึงกระแสช่วงหนึ่งของเวลาผลที่ตามมาคือกระแสจะมีขนาดต่ำกว่าพิกัดและมีปริมาณฮาร์โมนิกส์ต่ำในขณะที่กำลังส่งผ่านพลังงาน 3% โช๊คสามารถลดความผิดเพี้ยนในกระแสฮาร์โมนิกส์ได้ประมาณ 80-40% ดังรูปที่ 2.17 แต่การลดฮาร์โมนิกส์ของโช๊คมีข้อจำกัด เมื่อขนาดของโช๊คมีมากกว่า 3% ขนาดของโช๊คสามารถคำนวณได้จากพิกัด kVA ของไดรฟ์ในรูปที่ 2.18 แสดง โช๊คที่ใช้กับ 480-V ASD

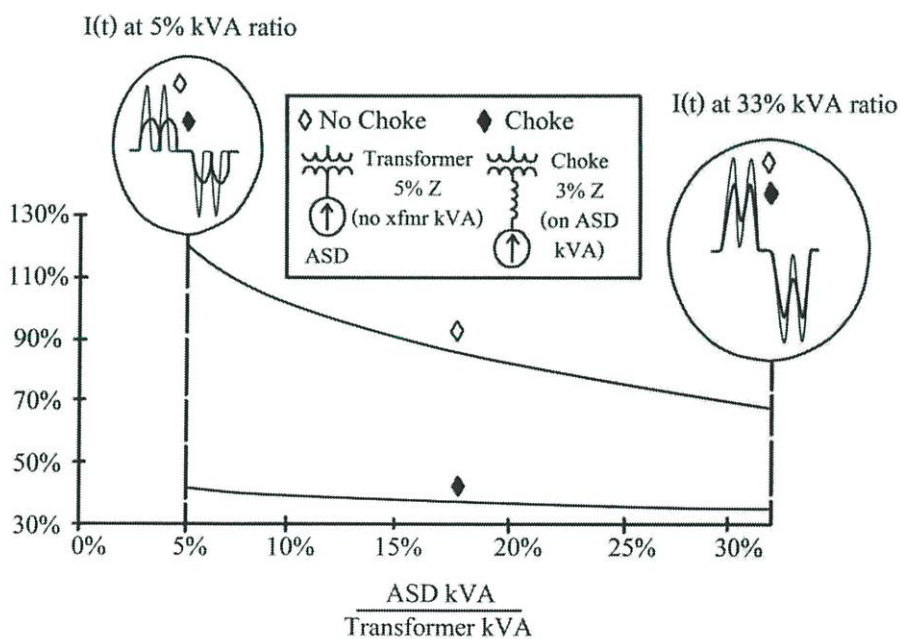


รูปที่ 2.17 เปอร์เซนต์ความผิดเพี้ยนกระแสจาก PMW drive ต่อขนาด line input choke



รูปที่ 2.18 โช้คสามเฟสสำหรับอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์

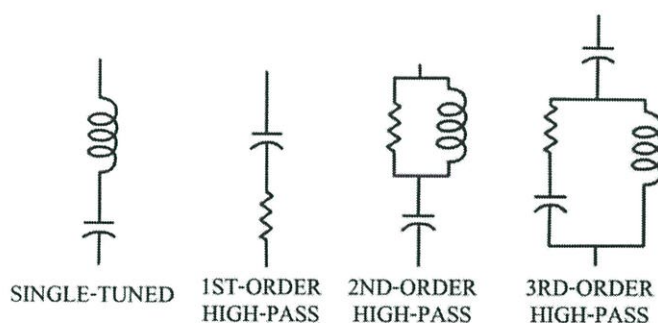
ในรูปที่ 2.19 แสดงการเปรียบเทียบผลของ 3% โช้คในการลดกระแสฮาร์มอนิกส์ กับกรณีที่ไม่ติดตั้งโช้คต่อขนาดของ ASD ผลของลูกคลื่นที่จุดปลายของแต่ละกรณีพบว่าในกรณีที่ไม่มีการติดตั้งโช้คความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์จะมีขนาดใหญ่กว่าอย่างชัดเจนผลของการติดตั้งโช้คทำให้ค่า THDi ลดลงจาก 80-120% เหลือเพียง 40%



รูปที่ 2.19 ผลของโช้คที่มีต่อกระแสฮาร์มอนิกส์ของ ASD

2.8.2 Passive Filters

Passive Filter มีโครงสร้างประกอบด้วย ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน โดยสามารถปรับเพื่อควบคุมฮาร์โมนิกส์ได้ ซึ่งมีใช้อย่างแพร่หลายและมีราคาไม่แพงเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ชนิดอื่นที่ใช้ในการกำจัดฮาร์โมนิกส์ อย่างไรก็ตาม Passive Filter มีข้อเสียที่อาจจะเป็นอันตรายต่อระบบไฟฟ้ากำลัง จึงเป็นสิ่งสำคัญที่เราต้องตรวจสอบทุกความเป็นไปได้ที่จะเกิดอันตรายเมื่อเราออกแบบ Passive Filter ถูกใช้ในการกำจัดกระแสฮาร์โมนิกส์ออกจากระบบหรือป้องกันการไหลของกระแสฮาร์โมนิกส์จากส่วนหนึ่งของระบบไปยังอีกส่วนหนึ่งโดยปรับอุปกรณ์ให้สร้างเรโซแนนซ์ในความถี่ที่ถูกเลือกไว้ ในรูปที่ 2.20 แสดงฟิลเตอร์แต่ละชนิด



รูปที่ 2.20 Passive Filters แต่ละชนิด

เป็นชนิดที่พบได้มากที่สุดที่สุดใน Passive Filter โดยมีความเหมาะสมทั้งทางเศรษฐศาสตร์ และมีประสิทธิภาพเพียงพอฟิลเตอร์ชนิดนี้จะแสดงคุณลักษณะค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ ต่อกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เลือกไว้โดยเฉพาะและติดตั้งแบบขนานกับระบบไฟฟ้าดังนั้นกระแสฮาร์โมนิกส์จะถูกเบี่ยงเบนจากทางเดินกระแสปกติให้ไหลผ่านฟิลเตอร์แทน นอกจากนี้ฟิลเตอร์ยังสามารถปรับปรุงตัวประกอบกำลังที่เกิดความผิดเพี้ยนจากฮาร์โมนิกส์ได้อีกด้วย ในรูป 2.21 แสดงตัวอย่างการออกแบบฟิลเตอร์สำหรับแรงดันปานกลาง โดยมีรีแอคเตอร์แกนเหล็กอยู่ด้านบนบนตัวเก็บประจุ ในรูปที่ 2.22 แสดงฟิลเตอร์ที่ออกแบบสำหรับภาคอุตสาหกรรม ลำดับฮาร์โมนิกส์ที่เกิดรอยบากสัมพันธ์กับค่ารีแอคแตนซ์ที่ความถี่มูลฐานดังสมการ

$$h_{\text{notch}} = \sqrt{\frac{X_c}{3X_F}} \quad (2.18)$$

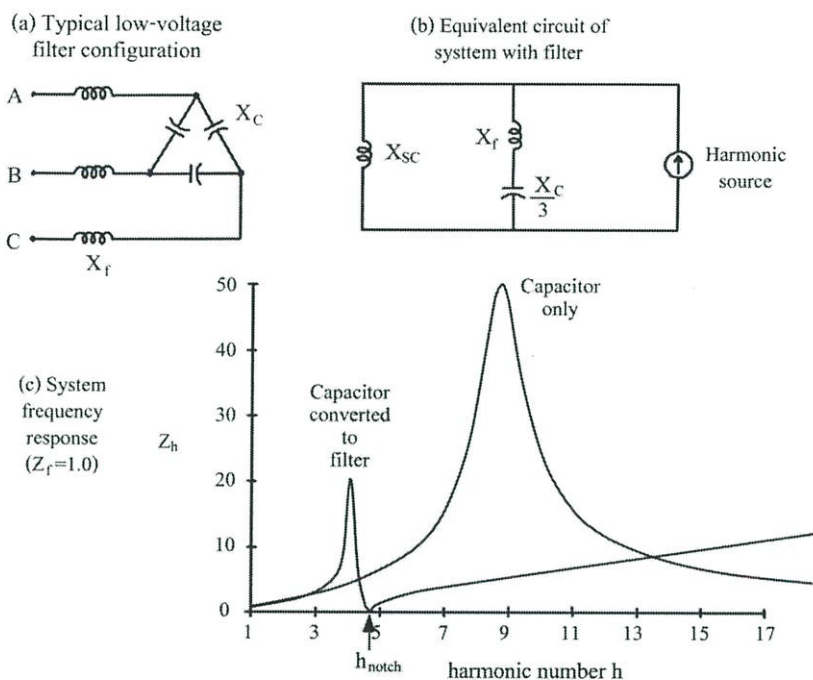
เมื่อ X_c คือค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุ



รูปที่ 2.21 ฟิวเจอร์สามเฟส



รูปที่ 2.22 ฟิวเจอร์สำหรับภาคอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.23 ฮาร์โมนิกฟิลเตอร์อันดับ 5 และผลตอบสนองต่อระบบ

ผลกระทบที่สำคัญของฟิลเตอร์ชนิดนี้คือการสร้างเรโซแนนซ์แบบขนานที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่รอยบาก(รูป 2.23c) ความถี่เรโซแนนซ์นี้ต้องถูกป้องกันจากฮาร์โมนิกที่สำคัญใดๆที่เกิดจากโหลดเพื่อระวังปัญหาเรโซแนนซ์จากการติดตั้งฟิลเตอร์ ควรเริ่มกรองฮาร์โมนิกในอันดับต่ำที่สุดที่พบในระบบ เช่น ในการติดตั้งฮาร์โมนิกฟิลเตอร์อันดับ 7 จำเป็นต้องติดตั้งฟิลเตอร์อันดับ 5 ด้วย เรโซแนนซ์แบบขนานใหญ่จากการติดตั้งฟิลเตอร์อันดับที่ 7 เพียงตัวเดียวจะใกล้เคียงอันดับ 5 มากเกินไปอาจเป็นอันตรายได้

Passive Filter ควรติดตั้งบนบัสที่สามารถคาดค่า Short-circuit reactance ได้ในขณะที่ค่าความถี่รอยบากมีค่าคงที่ ค่าเรโซแนนซ์แบบขนานจะแปรตามอิมพีแดนซ์ระบบเช่น ความถี่เรโซแนนซ์แบบขนานในกรณี standby generation จะมีค่าต่ำเมื่อมีการต่อกับผู้ใช้งาน

บทที่ 3

การออกแบบและพัฒนา

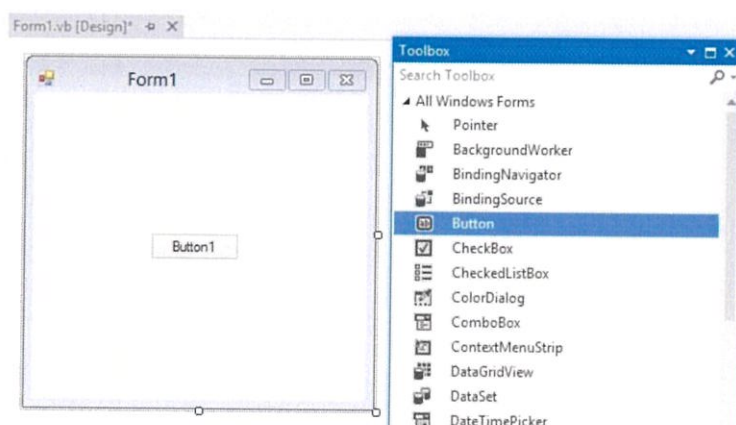
3.1 โปรแกรม Visual Studio 2010



รูปที่ 3.1 Banner โปรแกรม Visual Studio

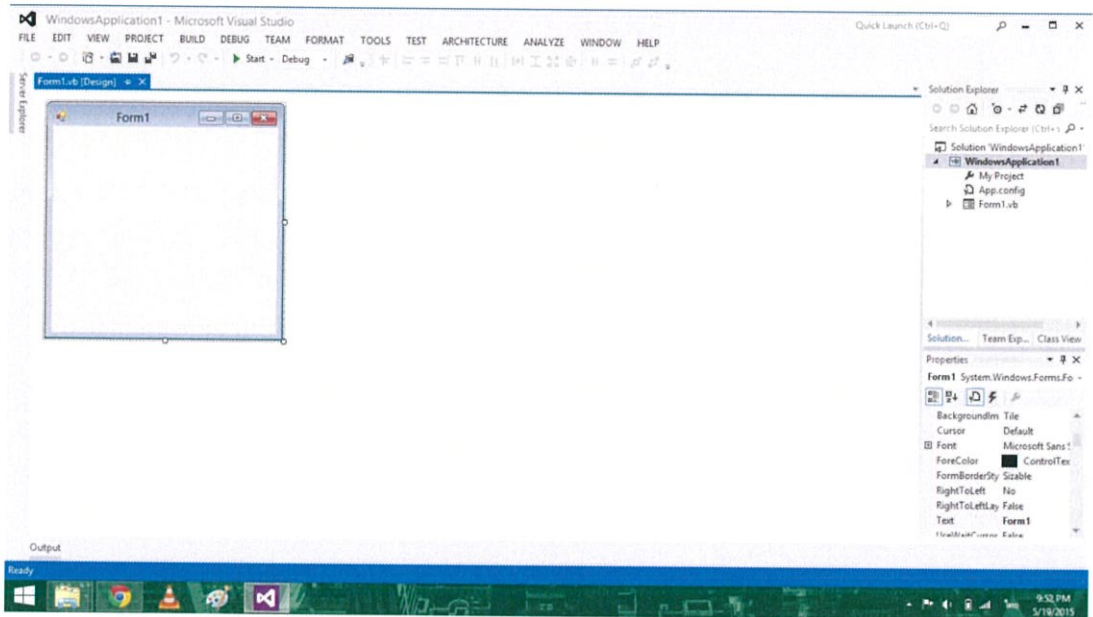
Visual Basic เป็นโปรแกรมที่พัฒนามาจากภาษา basic ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ทำให้ นักพัฒนาสามารถสร้างโปรแกรมเบื้องต้นด้วยตนเอง แม้จะไม่ได้เป็นโปรแกรมเมอร์ก็ตาม ตัวโปรแกรมมี จุดเด่นที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. มีโครงสร้างภาษาที่ใกล้เคียงภาษามนุษย์



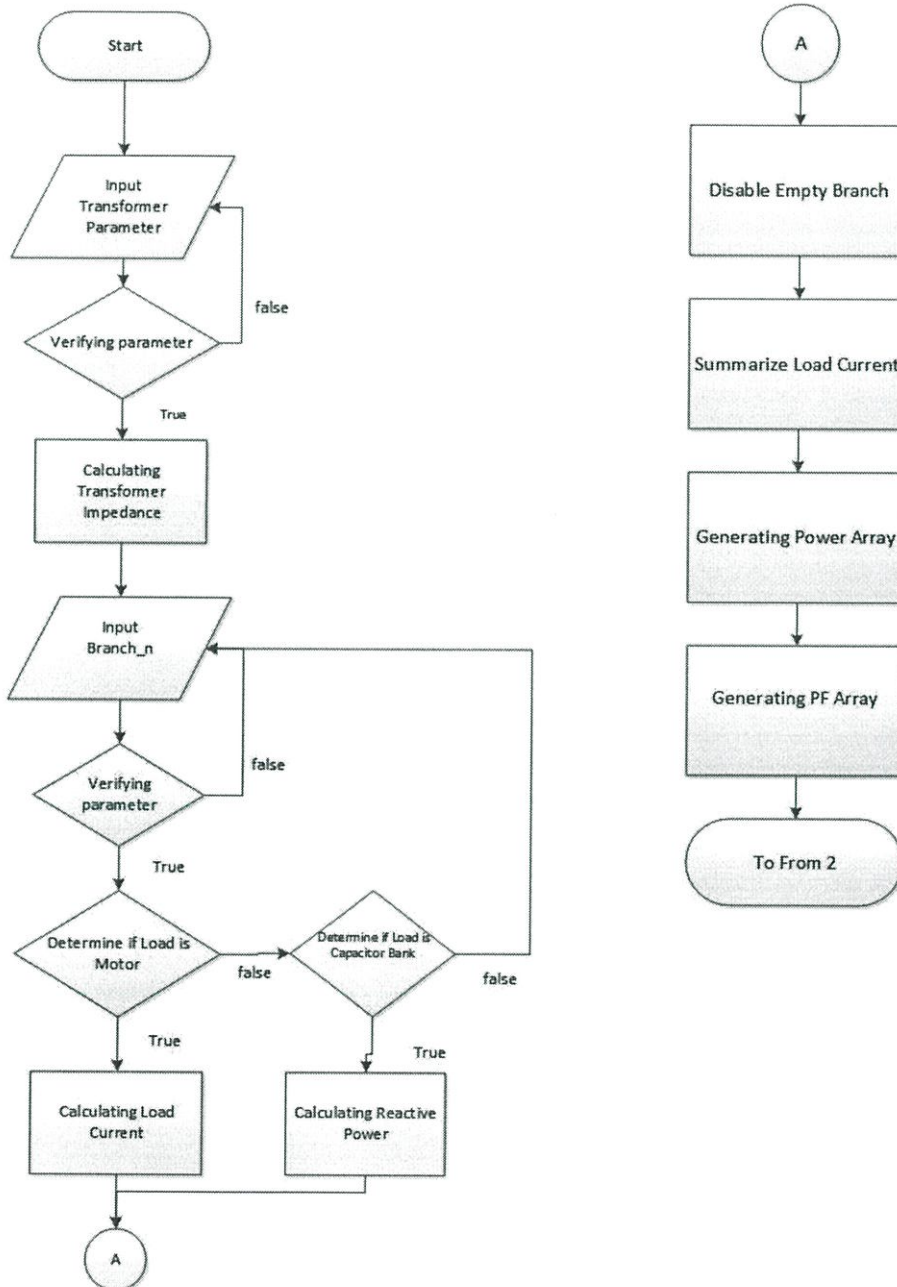
รูปที่ 3.2 หน้าต่าง Toolbox สำหรับพัฒนาโปรแกรม

2. รวมเครื่องมือที่ใช้พัฒนา Application ได้อย่างสะดวกรวดเร็วดังรูปที่ 3.2
3. สามารถ compile โปรแกรมเพื่อแสดงผลได้ทันที
4. สามารถพัฒนา Application ได้หลายแบบ เช่น โปรแกรมด้านธุรกิจสื่อการเรียนการสอน เกมส์ มัลติมีเดีย จัดการฐานข้อมูล อินเทอร์เน็ต และ Web Application เป็นต้น
5. จัดการหน่วยความจำได้มีประสิทธิภาพ

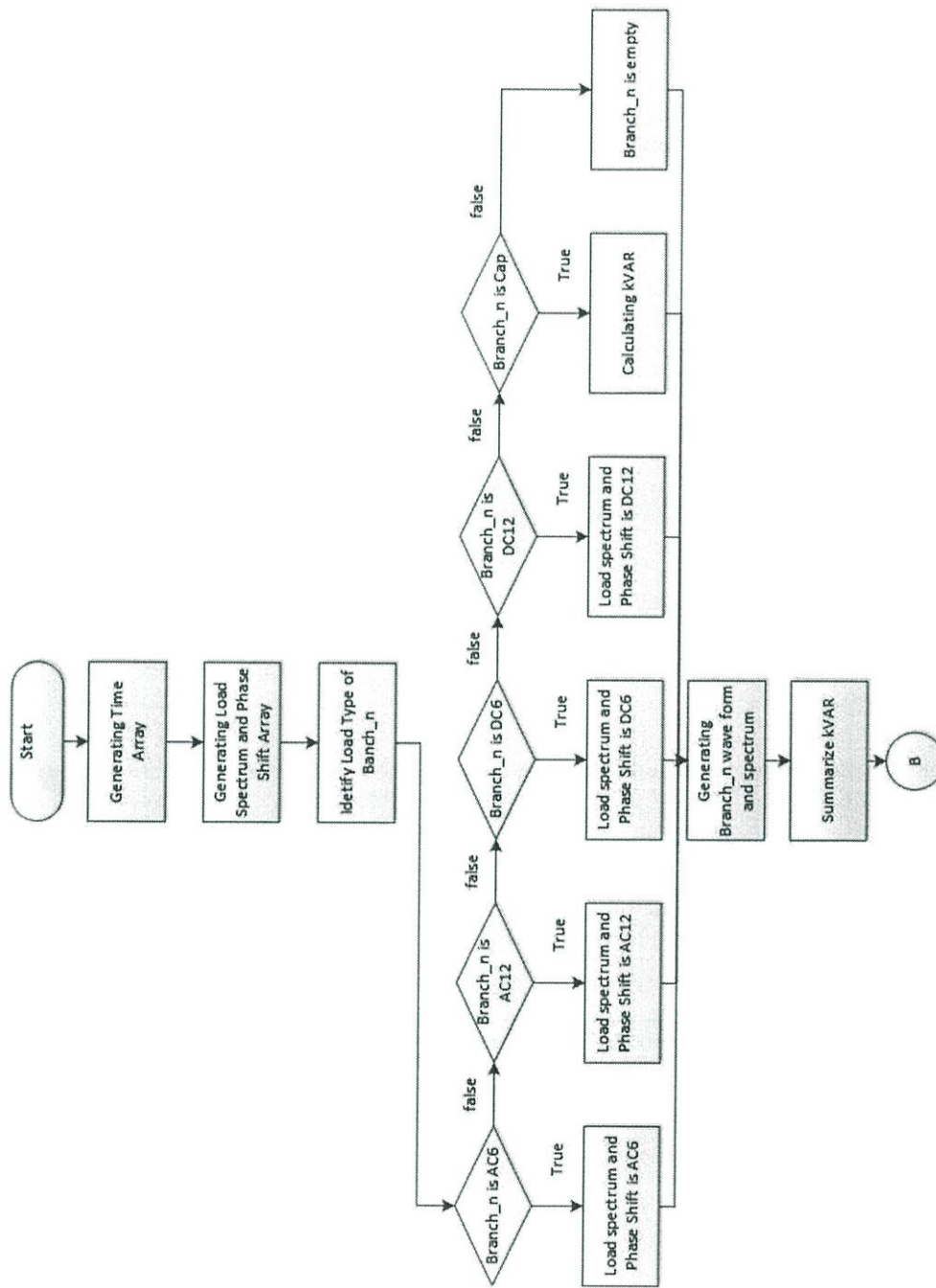


รูปที่ 3.3 หน้าต่างโปรแกรมที่ใช้พัฒนา

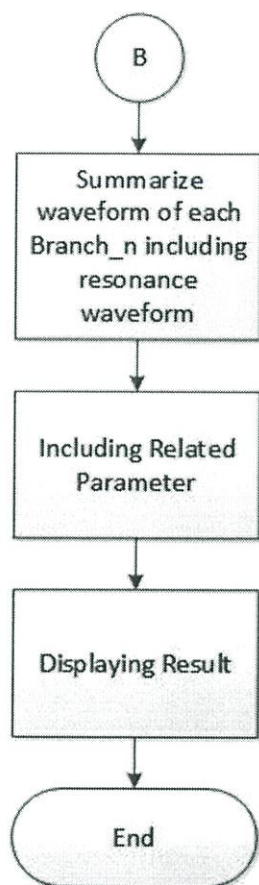
3.2 Flowchart อธิบายการทำงานของโปรแกรม



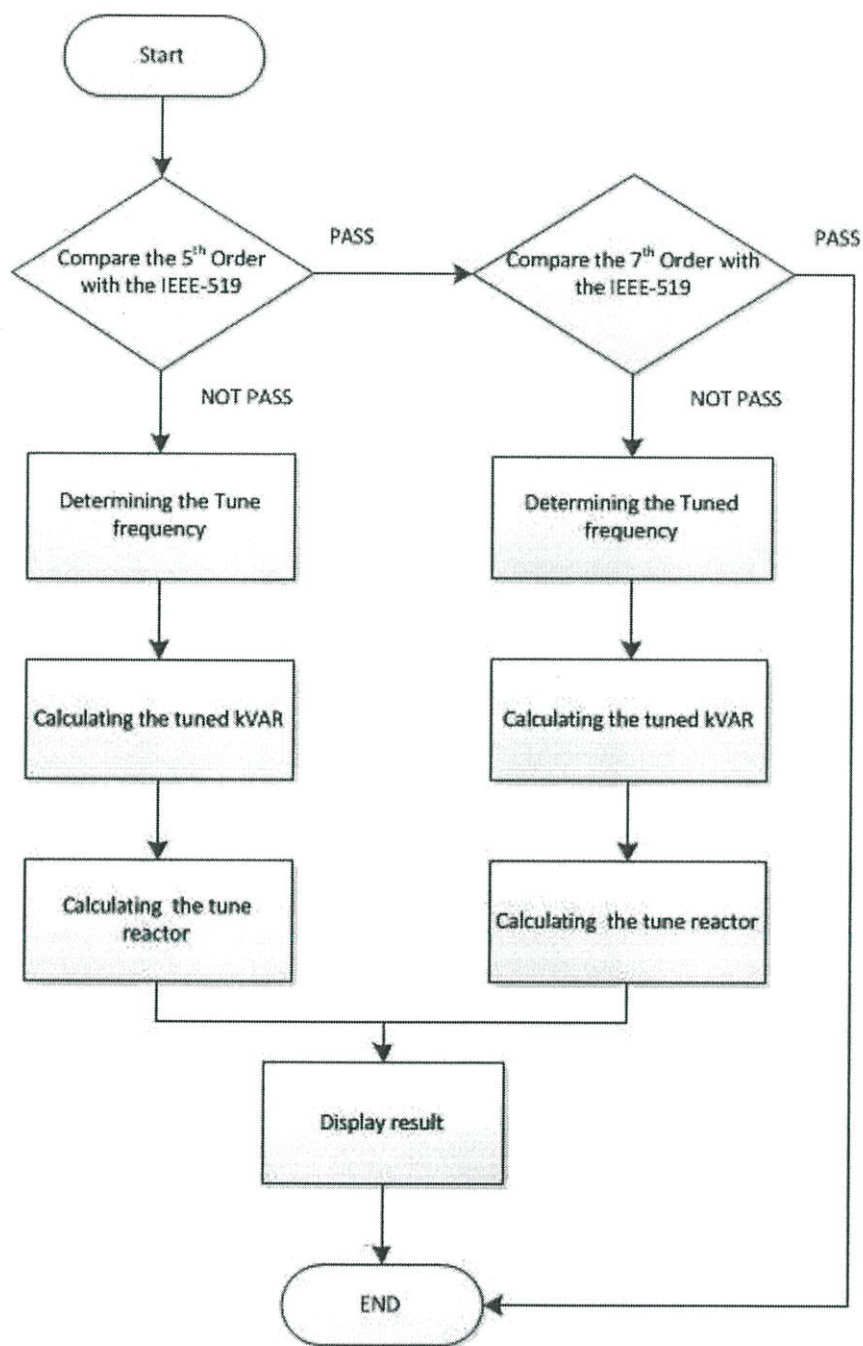
รูปที่ 3.4 แผนผังการทำงานของระบบรับค่าของโปรแกรม



รูปที่ 3.5(a) แผนผังการทำงานของส่วนคำนวณและจำลองของโปรแกรม



รูปที่ 3.5(b) แผนผังการทำงานของส่วนคำนวณและจำลองของโปรแกรม



รูปที่ 3.6 แผนผังการคำนวณพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์

อธิบายการทำงานของ Flowchart ได้ดังนี้

form 1

1. เริ่มการทำงานของโปรแกรมโดยการป้อนค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลง พิกัดกำลัง(S), แรงดันทุติยภูมิ(V) และ เปอร์เซนต์อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง(%Z)
2. ตรวจสอบเงื่อนไขว่าได้ทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญครบแล้วหรือไม่ หากยังไม่ครบจะทำการกรอกข้อมูลใหม่
3. โปรแกรมทำการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเพิ่มโหลดฟีดเดอร์ตาม One-line diagram โดยระบุชนิดของโหลดเป็นมอเตอร์หรือตัวเก็บประจุโดยการคลิกที่แถบ Combo Box แล้วเลือกชนิดของภาระทางไฟฟ้าที่ต้องการซึ่งประกอบไปด้วย
 - Linear Load
 - AC Drive ชนิด 6 Pulse
 - AC Drive ชนิด 12 Pulse
 - DC Drive ชนิด 6 Pulse
 - DC Drive ชนิด 12 Pulse
 - Capacitor Bank
4. หากโหลดเป็นมอเตอร์โปรแกรมจะทำการคำนวณค่ากระแสโหลด หากโหลดเป็นคาปาซิเตอร์จะทำการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ(Q)
5. โปรแกรมจะกำจัดฟีดเดอร์ที่ไม่ใช้งานออกไป แล้วคำนวณกระแสโหลดทั้งหมดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความผิดพลาดในส่วนต่อไป

form 2

1. สร้างอาร์เรย์ช่วงเวลาที่ใช้ในการสร้างกราฟโหลดสเปคตรัม และ เฟสซิฟอาร์เรย์
2. ระบุโหลดในแต่ละฟีดเดอร์ โดยแบ่งเป็นโหลด Linear Load DC Drive 6-pulse, DC Drive 12-pulse, AC Drive 6-pluse, AC Drive 12-pluseและ Capacitor Bank
3. นำข้อมูลของทุกฟีดเดอร์ สร้าง waveform และ spectrum สรุปค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ(Q)
4. สรุป waveform รวมทุกฟีดเดอร์และรีโซแนนซ์ waveform
5. นำค่าพารามิเตอร์มาคำนวณ

form 3

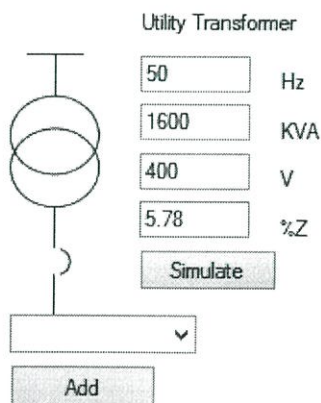
1. โปรแกรมทำการเปรียบเทียบฮาร์โมนิกส์อันดับต่างๆกับมาตรฐาน IEEE 519-1992
2. หากค่าที่ได้ผ่านมาตรฐานIEEE จะจบการทำงานของโปรแกรม หากไม่ผ่านโปรแกรมจะพิจารณาความถี่ที่ต้องการกรองฮาร์โมนิกส์
3. คำนวณกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (Q) ที่ต้องการชดเชย
4. คำนวณพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์
5. แสดงผลบนหน้าจอของโปรแกรม

3.3 รูปภาพ โปรแกรมประกอบคำอธิบาย

3.3.1 ส่วนของหน้าต่างการรับข้อมูล

Form 1

1. เริ่มการทำงานของโปรแกรมโดยการป้อนค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงพิกัดกำลัง(S), แรงดันทุติยภูมิ(V) และเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง(%Z)



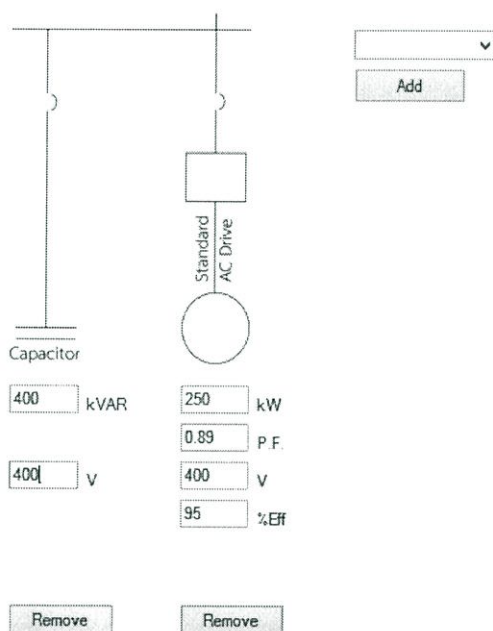
รูปที่ 3.7 การกรอกค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงจำลอง

2. ตรวจสอบเงื่อนไขว่าได้ทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญครบแล้วหรือไม่ หากยังไม่ครบจะทำการกรอกข้อมูลใหม่
3. โปรแกรมจะทำการการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง

| | |
|---|--|
| 1 | $G_Freq = Val(TR_Freq.Text)$ |
| 2 | $G_TR_V = Val(TR_V.Text)$ |
| 3 | $G_TR_Z = (((Val(TR_V.Text) / 1000) ^ 2) * (Val(TR_Z.Text) / 100)) / (Val(TR_KVA.Text) / 1000)$ |
| 4 | $G_TR_PerZ = Val(TR_Z.Text)$ |
| 5 | $G_TR_KVA = Val(TR_KVA.Text)$ |

โดยค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้นั้นถูกเก็บไว้ในตัวแปรสาธารณะเพื่อเรียกใช้ต่อไปโดย

- G_Freq ความถี่ของระบบ (Hz)
 - G_TR_V แรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้า (V)
 - G_TR_Z Short circuit Impedance ของหม้อแปลง (ohm)
 - G_TR_PerZ เปอร์เซ็นต์ Impedance ของหม้อแปลง (%)
 - G_TR_KVA พิกัดกำลังของหม้อแปลงไฟฟ้า (kVA)
4. เพิ่มโหลดฟีดเดอร์ตาม one-line diagram โดยระบุชนิดของโหลดเป็นมอเตอร์หรือคาปาซิเตอร์ โดยการคลิกที่แถบ Combo Box แล้วเลือกชนิดของภาระทางไฟฟ้าที่ต้องการซึ่งประกอบไปด้วย
- Linear Load
 - AC Drive ชนิด 6 Pulse
 - AC Drive ชนิด 12 Pulse
 - DC Drive ชนิด 6 Pulse
 - DC Drive ชนิด 12 Pulse
 - Capacitor Bank



รูปที่ 3.8 หน้าต่างการค่าพารามิเตอร์ของภาระไฟฟ้าชนิดต่างๆ

5. หากโหลดเป็นมอเตอร์โปรแกรมจะทำการคำนวณค่ากระแสโหลด หากโหลดเป็นคาปาซิเตอร์ จะทำการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q)

| | |
|----|---|
| 1 | $G_KVAR_1 = Val(KVAR_1.Text) * (-1 / 3)$ |
| 2 | $G_KVAR_2 = Val(KVAR_2.Text) * (-1 / 3)$ |
| 3 | $G_KVAR_3 = Val(KVAR_3.Text) * (-1 / 3)$ |
| 4 | $G_KVAR_4 = Val(KVAR_4.Text) * (-1 / 3)$ |
| 5 | $G_KVAR_5 = Val(KVAR_5.Text) * (-1 / 3)$ |
| 6 | $G_KVAR_6 = Val(KVAR_6.Text) * (-1 / 3)$ |
| 7 | $G_KVAR_7 = Val(KVAR_7.Text) * (-1 / 3)$ |
| 8 | $G_KVAR_8 = Val(KVAR_8.Text) * (-1 / 3)$ |
| 9 | $G_KVAR_9 = Val(KVAR_9.Text) * (-1 / 3)$ |
| 10 | $G_POW(0) = Val(POW_1.Text)$ |
| 11 | $G_POW(1) = Val(POW_2.Text)$ |
| 12 | $G_POW(2) = Val(POW_3.Text)$ |
| 13 | $G_POW(3) = Val(POW_4.Text)$ |
| 14 | $G_POW(4) = Val(POW_5.Text)$ |
| 15 | $G_POW(5) = Val(POW_6.Text)$ |
| 16 | $G_POW(6) = Val(POW_7.Text)$ |

| | |
|----|---|
| 17 | $G_POW(7) = Val(POW_8.Text)$ |
| 18 | $G_POW(8) = Val(POW_9.Text)$ |
| 19 | $G_PF(0) = Val(PF_1.Text)$ |
| 20 | $G_PF(1) = Val(PF_2.Text)$ |
| 21 | $G_PF(2) = Val(PF_3.Text)$ |
| 22 | $G_PF(3) = Val(PF_4.Text)$ |
| 23 | $G_PF(4) = Val(PF_5.Text)$ |
| 24 | $G_PF(5) = Val(PF_6.Text)$ |
| 25 | $G_PF(6) = Val(PF_7.Text)$ |
| 26 | $G_PF(7) = Val(PF_8.Text)$ |
| 27 | $G_PF(8) = Val(PF_9.Text)$ |
| 28 | $I_{Load_1} = (Val(POW_1.Text) / 3.0) * 1000.0 / ((Val(V_1.Text) / Math.Sqrt(3.0)) * Val(PF_1.Text))$ |
| 29 | $I_{Load_2} = (Val(POW_2.Text) / 3.0) * 1000.0 / ((Val(V_2.Text) / Math.Sqrt(3.0)) * Val(PF_2.Text))$ |
| 30 | $I_{Load_3} = (Val(POW_3.Text) / 3.0) * 1000.0 / ((Val(V_3.Text) / Math.Sqrt(3.0)) * Val(PF_3.Text))$ |
| 31 | $I_{Load_4} = (Val(POW_4.Text) / 3.0) * 1000.0 / ((Val(V_4.Text) / Math.Sqrt(3.0)) * Val(PF_4.Text))$ |
| 32 | $I_{Load_5} = (Val(POW_5.Text) / 3.0) * 1000.0 / ((Val(V_5.Text) / Math.Sqrt(3.0)) * Val(PF_5.Text))$ |
| 33 | $I_{Load_6} = (Val(POW_6.Text) / 3.0) * 1000.0 / ((Val(V_6.Text) / Math.Sqrt(3.0)) * Val(PF_6.Text))$ |
| 34 | $I_{Load_7} = (Val(POW_7.Text) / 3.0) * 1000.0 / ((Val(V_7.Text) / Math.Sqrt(3.0)) * Val(PF_7.Text))$ |
| 35 | $I_{Load_8} = (Val(POW_8.Text) / 3.0) * 1000.0 / ((Val(V_8.Text) / Math.Sqrt(3.0)) * Val(PF_8.Text))$ |
| 36 | $I_{Load_9} = (Val(POW_9.Text) / 3.0) * 1000.0 / ((Val(V_9.Text) / Math.Sqrt(3.0)) * Val(PF_9.Text))$ |
| 37 | $G_I_SUM(0) = I_{Load_1}$ |
| 38 | $G_I_SUM(1) = I_{Load_2}$ |
| 39 | $G_I_SUM(2) = I_{Load_3}$ |
| 40 | $G_I_SUM(3) = I_{Load_4}$ |
| 41 | $G_I_SUM(4) = I_{Load_5}$ |
| 42 | $G_I_SUM(5) = I_{Load_6}$ |

| | |
|----|---------------------------|
| 43 | $G_I_SUM(6) = ILoad_7$ |
| 44 | $G_I_SUM(7) = ILoad_8$ |
| 45 | $G_I_SUM(8) = ILoad_9$ |

โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ผู้ใช้กรอกมา คำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าเสมือน ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และคำนวณค่ากระแสโหลด นอกจากนี้ยังต้องมีส่วนของคำสั่งที่ทำหน้าที่เช็คความจรมีการกรอกค่าครบถ้วนหรือไม่ จากนั้นจึงทำการจัดเก็บไว้ในตัวแปรสาธารณะเพื่อรอเรียกใช้ต่อไป โดย

- G_KVAR_n เก็บค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน
- G_POW_n เก็บค่ากำลังไฟฟ้าจริง
- G_PF_n เก็บค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า
- G_I_SUM เก็บค่ากระแสของโหลดแต่ละวงจร

6. โปรแกรมจะกำจัดฟีดเดอร์ที่ไม่ใช้งานออกไป แล้วคำนวณกระแสโหลดทั้งหมดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความผิดพลาดในส่วนต่อไป

| | |
|----|----------------------|
| 1 | If Branch_1 = 0 Then |
| 2 | G_I_SUM(0) = 0 |
| 3 | End If |
| 4 | If Branch_2 = 0 Then |
| 5 | G_I_SUM(1) = 0 |
| 6 | End If |
| 7 | If Branch_3 = 0 Then |
| 8 | G_I_SUM(2) = 0 |
| 9 | End If |
| 10 | If Branch_4 = 0 Then |
| 11 | G_I_SUM(3) = 0 |
| 12 | End If |
| 13 | If Branch_5 = 0 Then |
| 14 | G_I_SUM(4) = 0 |
| 15 | End If |
| 16 | If Branch_6 = 0 Then |
| 17 | G_I_SUM(5) = 0 |
| 18 | End If |

| | |
|----|----------------------|
| 19 | If Branch_7 = 0 Then |
| 20 | G_I_SUM(6) = 0 |
| 21 | End If |
| 22 | If Branch_8 = 0 Then |
| 23 | G_I_SUM(7) = 0 |
| 24 | End If |
| 25 | If Branch_9 = 0 Then |
| 26 | G_I_SUM(8) = 0 |
| 27 | End If |

Form 2

- สร้าง Parameter Array ต่างๆที่เกี่ยวข้องในการคำนวณ ได้แก่
 - AC Drive ชนิด 6 Pulse

ตารางที่ 3.1 ตารางค่าพารามิเตอร์ของ AC Drive ชนิด 6 Pulse

| Summary Information | | | | | | Recorded Information | | |
|---------------------|----------|-------|-----------|---------|---------|----------------------|---------|------------|
| | | | | Voltage | Current | | | |
| Frequency | 60.0 | | RMS | 473 | 31.7 | | | V RMS |
| Power | | | Peak | 652 | 59.3 | | | A RMS |
| KW | 13.3 | | DC Offset | -2 | -0.4 | | | V Peak |
| KVA | 15.0 | | Crest | 1.38 | 1.87 | | | A Peak |
| KVAR | 2.8 | | THD Rms | 3.8 | 44.3 | | | V THD-F% |
| Peak KW | 38.8 | | THD Fund | 3.8 | 49.4 | | | A THD-F% |
| Phase | 12° lead | | HRMS | 18 | 14.0 | | | K Watts |
| Total PF | 0.89 | | KFactor | | 7.9 | | | KVAR |
| DPF | 0.98 | | | | | | | TPF |
| | | | | | | | | DPF |
| | | | | | | | | Frequency |
| Harmonic Distortion | | | | | | | | |
| | Freq. | V Max | %V RMS | V Phase | I Max | % I RMS | I Phase | Power (KW) |
| DC | 0.0 | 2 | 0.4 | 0 | 0.4 | 1.2 | 0 | 0.0 |
| 1 | 60.0 | 473 | 100.3 | -12 | 28.4 | 90.6 | 0 | 13.1 |
| 2 | 119.9 | 0 | 0.1 | -154 | 0.4 | 1.3 | 65 | 0.0 |
| 3 | 179.9 | 1 | 0.2 | -75 | 1.9 | 6.0 | 158 | 0.0 |
| 4 | 239.8 | 0 | 0.0 | -11 | 0.1 | 0.4 | -125 | 0.0 |
| 5 | 299.8 | 18 | 3.8 | 154 | 12.1 | 38.7 | -158 | 0.1 |
| 6 | 359.8 | 0 | 0.0 | 172 | 0.1 | 0.2 | 89 | 0.0 |
| 7 | 419.7 | 1 | 0.2 | -141 | 6.1 | 19.6 | 9 | 0.0 |
| 8 | 479.7 | 0 | 0.0 | 72 | 0.1 | 0.2 | -84 | 0.0 |
| 9 | 539.7 | 0 | 0.0 | -41 | 0.2 | 0.5 | -11 | 0.0 |
| 10 | 599.6 | 0 | 0.0 | -146 | 0.1 | 0.2 | 47 | 0.0 |

| | Freq. | V Max | %V RMS | V Phase | I Max | % I RMS | I Phase | Power (KW) |
|----|--------|-------|--------|---------|-------|---------|---------|------------|
| 11 | 659.6 | 2 | 0.3 | 59 | 2.2 | 7.1 | 133 | 0.0 |
| 12 | 719.5 | 0 | 0.0 | 46 | 0.0 | 0.0 | -95 | 0.0 |
| 13 | 799.5 | 1 | 0.2 | 120 | 1.2 | 3.9 | -106 | 0.0 |
| 14 | 839.5 | 0 | 0.0 | 5 | 0.0 | 0.1 | 150 | 0.0 |
| 15 | 899.4 | 0 | 0.0 | 164 | 0.1 | 0.2 | -128 | 0.0 |
| 16 | 959.4 | 0 | 0.0 | 42 | 0.0 | 0.0 | -165 | 0.0 |
| 17 | 1019.3 | 1 | 0.2 | -38 | 1.0 | 3.1 | 27 | 0.0 |
| 18 | 1079.3 | 0 | 0.0 | 39 | 0.0 | 0.0 | -32 | 0.0 |
| 19 | 1139.3 | 1 | 0.1 | -1 | 0.5 | 1.7 | 131 | 0.0 |
| 20 | 1199.2 | 0 | 0.0 | 92 | 0.0 | 0.1 | 44 | 0.0 |
| 21 | 1259.3 | 0 | 0.0 | 53 | 0.1 | 0.2 | 46 | 0.0 |
| 22 | 1319.2 | 0 | 0.0 | 17 | 0.0 | 0.1 | -176 | 0.0 |
| 23 | 1379.1 | 1 | 0.1 | -143 | 0.5 | 1.7 | -83 | 0.0 |
| 24 | 1439.1 | 0 | 0.0 | 41 | 0.0 | 0.0 | 81 | 0.0 |
| 25 | 1499.0 | 1 | 0.1 | -120 | 0.3 | 0.9 | 7 | 0.0 |
| 26 | 1559.0 | 0 | 0.0 | 134 | 0.0 | 0.1 | -54 | 0.0 |
| 27 | 1619.0 | 0 | 0.0 | -144 | 0.1 | 0.2 | -37 | 0.0 |
| 28 | 1678.9 | 0 | 0.0 | 155 | 0.0 | 0.0 | -70 | 0.0 |
| 29 | 1738.9 | 1 | 0.1 | 89 | 0.4 | 1.1 | 169 | 0.0 |
| 30 | 1798.8 | 0 | 0.0 | 113 | 0.0 | 0.0 | 59 | 0.0 |
| 31 | 1858.8 | 0 | 0.1 | 136 | 0.2 | 0.7 | -119 | 0.0 |

- DC Drive ชนิด 6 Pulse

ตารางที่ 3.2 ตารางค่าพารามิเตอร์ของ DC Drive ชนิด 6 Pulse

| Readings - 09/22/94 16:12:57 | | | | | | |
|------------------------------|---------|-------|-----------|---------|----------------------|-----------|
| Summary Information | | | | | Recorded Information | |
| | | | | Voltage | Current | |
| Frequency | 60.0 | | RMS | 484 | 47.3 | V RMS |
| Power | | | Peak | 695 | 65.9 | A RMS |
| KW | 16.8 | | DC Offset | -2 | -0.3 | V Peak |
| KVA | 22.9 | | Crest | 1.44 | 1.39 | A Peak |
| KVAR | 14.4 | | THD Rms | 2.6 | 25.9 | V THD-F% |
| Peak KW | 46.8 | | THD Fund | 2.6 | 26.9 | A THD-F% |
| Phase | 41° lag | | HRMS | 12 | 12.2 | K Watts |
| Total PF | 0.74 | | KFactor | | 5.1 | KVAR |
| DPF | 0.76 | | | | | TPF |
| | | | | | | DPF |
| | | | | | | Frequency |
| Harmonic Distortion | | | | | | |
| | Freq. | V Max | %V RMS | V Phase | I Max | % I RMS |
| DC | 0.0 | 2 | 0.3 | 0 | 0.3 | 0.6 |
| 1 | 60.0 | 484 | 100.3 | 41 | 45.5 | 96.9 |
| 2 | 119.9 | 0 | 0.1 | 65 | 0.7 | 1.5 |

| | Freq. | V Max | %V RMS | V Phase | I Max | % I RMS |
|----|--------|-------|--------|---------|-------|---------|
| 3 | 179.9 | 1 | 0.1 | 56 | 2.0 | 4.2 |
| 4 | 239.8 | 0 | 0.0 | -105 | 0.1 | 0.1 |
| 5 | 299.8 | 11 | 2.4 | 130 | 10.6 | 22.5 |
| 6 | 359.8 | 0 | 0.0 | -95 | 0.1 | 0.2 |
| 7 | 419.7 | 2 | 0.5 | 49 | 3.1 | 6.5 |
| 8 | 479.7 | 0 | 0.0 | -39 | 0.1 | 0.3 |
| 9 | 539.7 | 0 | 0.0 | 142 | 0.4 | 0.8 |
| 11 | 659.6 | 2 | 0.5 | -90 | 3.3 | 7.0 |
| 12 | 719.5 | 0 | 0.0 | -13 | 0.2 | 0.3 |
| 13 | 799.5 | 2 | 0.3 | -138 | 2.1 | 4.5 |
| 14 | 839.5 | 0 | 0.0 | 23 | 0.1 | 0.1 |
| 15 | 899.4 | 0 | 0.1 | -98 | 0.4 | 0.8 |
| 16 | 959.4 | 0 | 0.0 | 84 | 0.0 | 0.1 |
| 17 | 1019.3 | 1 | 0.3 | 108 | 1.7 | 3.6 |
| 18 | 1079.3 | 0 | 0.0 | 94 | 0.1 | 0.1 |
| 19 | 1139.3 | 1 | 0.3 | 39 | 1.4 | 3.0 |
| 20 | 1199.2 | 0 | 0.0 | -49 | 0.0 | 0.1 |
| 21 | 1259.3 | 0 | 0.0 | 70 | 0.3 | 0.7 |
| 22 | 1319.2 | 0 | 0.0 | 0 | 0.1 | 0.2 |
| 23 | 1379.1 | 1 | 0.3 | -84 | 1.1 | 2.3 |
| 24 | 1439.1 | 0 | 0.0 | -40 | 0.1 | 0.2 |
| 25 | 1499.0 | 1 | 0.3 | -146 | 1.0 | 2.2 |
| 26 | 1559.0 | 0 | 0.0 | -47 | 0.1 | 0.1 |
| 27 | 1619.0 | 0 | 0.0 | -136 | 0.3 | 0.6 |
| 28 | 1678.9 | 0 | 0.0 | 41 | 0.0 | 0.1 |
| 29 | 1738.9 | 1 | 0.2 | 86 | 0.7 | 1.4 |
| 30 | 1798.8 | 0 | 0.0 | 96 | 0.0 | 0.1 |
| 31 | 1858.8 | 1 | 0.2 | 34 | 0.7 | 1.5 |

- DC Drive ชนิด 12 Pulse

ตารางที่ 3.3 ตารางค่าพารามิเตอร์ของ DC Drive ชนิด 12 Pulse

| Readings - 08/25/94 11:40:17 | | | | | | |
|------------------------------|---------|-------|-----------|---------|----------------------|-----------|
| Summary Information | | | | | Recorded Information | |
| | | | | Voltage | Current | |
| Frequency | 60.0 | | RMS | 487 | 44.7 | V RMS |
| Power | | | Peak | 699 | 65.1 | A RMS |
| KW | 17.8 | | DC Offset | -2 | -0.3 | V Peak |
| KVA | 21.8 | | Crest | 1.43 | 1.46 | A Peak |
| KVAR | 12.0 | | THD Rms | 2.6 | 13.5 | V THD-F% |
| Peak KW | 45.1 | | THD Fund | 2.6 | 13.6 | A THD-F% |
| Phase | 34° lag | | HRMS | 13 | 6.0 | K Watts |
| Total PF | 0.82 | | KFactor | | 3.5 | KVAR |
| DPF | 0.83 | | | | | TPF |
| | | | | | | DPF |
| | | | | | | Frequency |
| Harmonic Distortion | | | | | | |
| | Freq. | V Max | %V RMS | V Phase | I Max | % I RMS |
| DC | 0.0 | 2 | 0.4 | 0 | 0.3 | 0.7 |
| 1 | 60.0 | 487 | 100.3 | 34 | 44.3 | 99.8 |
| 2 | 119.9 | 1 | 0.1 | -107 | 0.1 | 0.1 |
| 3 | 179.9 | 1 | 0.2 | 70 | 1.8 | 4.1 |
| 4 | 239.8 | 0 | 0.1 | -75 | 0.1 | 0.1 |
| 5 | 299.8 | 12 | 2.4 | 86 | 1.3 | 2.9 |
| 6 | 359.8 | 0 | 0.0 | 67 | 0.0 | 0.0 |
| 7 | 419.7 | 1 | 0.3 | 15 | 1.4 | 3.2 |
| 8 | 479.7 | 0 | 0.0 | 138 | 0.0 | 0.1 |
| 9 | 539.7 | 0 | 0.0 | -140 | 0.4 | 0.9 |
| 10 | 599.6 | 0 | 0.0 | 165 | 0.1 | 0.1 |
| 11 | 659.6 | 3 | 0.7 | 105 | 4.9 | 11.1 |
| 12 | 719.5 | 0 | 0.0 | -97 | 0.1 | 0.2 |
| 13 | 779.5 | 2 | 0.3 | -3 | 1.5 | 3.3 |
| 14 | 839.5 | 0 | 0.0 | -59 | 0.0 | 0.1 |
| 15 | 899.4 | 0 | 0.0 | -25 | 0.1 | 0.2 |
| 16 | 959.4 | 0 | 0.0 | 141 | 0.0 | 0.1 |
| 17 | 1019.3 | 1 | 0.1 | -57 | 0.5 | 1.2 |
| 18 | 1079.3 | 0 | 0.0 | -158 | 0.0 | 0.0 |
| 19 | 1139.3 | 0 | 0.1 | 12 | 0.4 | 0.8 |
| 20 | 1199.2 | 0 | 0.0 | 171 | 0.0 | 0.0 |
| 21 | 1259.3 | 0 | 0.0 | 8 | 0.1 | 0.3 |
| 22 | 1319.2 | 0 | 0.0 | 26 | 0.0 | 0.1 |
| 23 | 1379.1 | 2 | 0.3 | -84 | 1.4 | 3.0 |
| 24 | 1439.1 | 0 | 0.0 | -10 | 0.1 | 0.2 |
| 25 | 1499.0 | 1 | 0.3 | -146 | 0.8 | 1.8 |
| 26 | 1559.0 | 0 | 0.0 | 169 | 0.0 | 0.1 |
| 27 | 1619.0 | 0 | 0.0 | -65 | 0.0 | 0.0 |
| 28 | 1678.9 | 0 | 0.0 | -128 | 0.0 | 0.1 |
| 29 | 1738.9 | 0 | 0.1 | 157 | 0.2 | 0.4 |

| | Freq. | V Max | %V RMS | V Phase | I Max | % I RMS |
|----|--------|-------|--------|---------|-------|---------|
| 30 | 1798.8 | 0 | 0.0 | -94 | 0.0 | 0.0 |
| 31 | 1858.8 | 0 | 0.1 | -115 | 0.1 | 0.3 |

2. ทำการเช็ควงจรย่อยแต่ละวงจร ว่าเป็นโหลดประเภทใด เพื่อที่จะนำมาคำนวณตามประเภทของ โหลดนั้นๆ

| | |
|----|--|
| 1 | 'Branch 1 |
| 2 | If G_Branch_1 = 1 Then |
| 3 | For Flag_3 = 0 To 49 |
| 4 | I_1(Flag_3) = AC6(Flag_3) * G_ILoad_1 |
| 5 | Next |
| 6 | Flag_3 = 0 |
| 7 | For Flag_7 = 0 To 19 |
| 8 | For Flag_7 = 0 To 49 |
| 9 | Wave_1(Flag_3) = Wave_1(Flag_3) + (I_1(Flag_7) |
| 10 | * Math.Sin((2 * 3.141592654 * (Flag_7 + 1) * G_Freq * Time_X(Flag_3)) + PS_AC6(Flag_7))) |
| 11 | Wave_1_2(Flag_3) = Wave_1_2(Flag_3) + (I_1(Flag_7) * Math.Sin((2 * 3.141592654 * (Flag_7 + 1) * G_Freq * Time_X(Flag_3)) + PS_AC6(Flag_7) + (2.094395102 * (Flag_7 + 1)))) |
| 12 | Wave_1_3(Flag_3) = Wave_1_3(Flag_3) + (I_1(Flag_7) * Math.Sin((2 * 3.141592654 * (Flag_7 + 1) * G_Freq * Time_X(Flag_3)) + PS_AC6(Flag_7) + (4.188790205 * (Flag_7 + 1)))) |
| 13 | Next |
| 14 | Flag_7 = 0 |
| 15 | Next |
| 16 | Flag_3 = 0 |
| 17 | G_KVAR(0) = ((G_TR_V * G_ILoad_1 * Math.Sin(Math.Acos(G_PF(0)))) / 1000) / Math.Sqrt(3) |
| 18 | Elseif G_Branch_1 = 2 Then |
| 19 | For Flag_6 = 0 To 49 |
| 20 | I_1(Flag_6) = AC12(Flag_6) * G_ILoad_1 |
| 21 | Next |

| | |
|----|---|
| 20 | Flag_6 = 0 |
| 21 | For Flag_6 = 0 To 19 |
| 22 | For Flag_7 = 0 To 49 |
| 23 | Wave_1(Flag_6) = Wave_1(Flag_6) + (I_1(Flag_7) * Math.Sin((2 * 3.141592654 * (Flag_7 + 1) * G_Freq * Time_X(Flag_6)) + PS_AC12(Flag_7))) |
| 24 | Wave_1_2(Flag_6) = Wave_1_2(Flag_6) + (I_1(Flag_7) * Math.Sin((2 * 3.141592654 * (Flag_7 + 1) * G_Freq * Time_X(Flag_6)) + PS_AC12(Flag_7) + (2.094395102 * (Flag_7 + 1)))) |
| 25 | Wave_1_3(Flag_6) = Wave_1_3(Flag_6) + (I_1(Flag_7) * Math.Sin((2 * 3.141592654 * (Flag_7 + 1) * G_Freq * Time_X(Flag_6)) + PS_AC12(Flag_7) + (4.188790205 * (Flag_7 + 1)))) |
| 26 | Next |
| 27 | Flag_7 = 0 |
| 28 | Next |
| 29 | Flag_6 = 0 |
| 30 | G_KVAR(0) = ((G_TR_V * G_ILoad_1 * Math.Sin(Math.Acos(G_PF(0)))) / 1000) / Math.Sqrt(3) |
| | Elseif G_Branch_1 = 3 Then |
| 31 | For Flag_4 = 0 To 49 |
| 32 | I_1(Flag_4) = DC6(Flag_4) * G_ILoad_1 |
| 33 | Next |
| 34 | Flag_4 = 0 |
| 35 | For Flag_4 = 0 To 19 |
| 36 | For Flag_7 = 0 To 49 |
| 37 | Wave_1(Flag_4) = Wave_1(Flag_4) + (I_1(Flag_7) * Math.Sin((2 * 3.141592654 * (Flag_7 + 1) * G_Freq * Time_X(Flag_4)) + PS_DC6(Flag_7))) |
| 38 | Wave_1_2(Flag_4) = Wave_1_2(Flag_4) + (I_1(Flag_7) * Math.Sin((2 * 3.141592654 * (Flag_7 + 1) * G_Freq * Time_X(Flag_4)) + PS_DC6(Flag_7) + (2.094395102 * (Flag_7 + 1)))) |
| 39 | |

| | |
|----|--|
| 40 | Wave_1_3(Flag_4) = Wave_1_3(Flag_4) + (I_1(Flag_7) * Math.Sin((2 * 3.141592654 * (Flag_7 + 1) * G_Freq * Time_X(Flag_4)) + PS_DC6(Flag_7) + (4.188790205 * (Flag_7 + 1)))) |
| 41 | Next |
| 42 | Flag_7 = 0 |
| 43 | Next |
| 44 | Flag_4 = 0 G_KVAR(0) = ((G_TR_V * G_ILoad_1 * Math.Sin(Math.Acos(G_PF(0)))) / 1000) / Math.Sqrt(3) |
| 45 | Elseif G_Branch_1 = 4 Then |
| 46 | For Flag_5 = 0 To 49 |
| 47 | I_1(Flag_5) = DC12(Flag_5) * G_ILoad_1 |
| 48 | Next |
| 49 | Flag_5 = 0 |
| 50 | For Flag_5 = 0 To 19 |
| 51 | For Flag_7 = 0 To 49 Wave_1(Flag_5) = Wave_1(Flag_5) + (I_1(Flag_7) * Math.Sin((2 * 3.141592654 * (Flag_7 + 1) * G_Freq * Time_X(Flag_5)) + PS_DC12(Flag_7))) |
| 52 | Wave_1_2(Flag_5) = Wave_1_2(Flag_5) + (I_1(Flag_7) * Math.Sin((2 * 3.141592654 * (Flag_7 + 1) * G_Freq * Time_X(Flag_5)) + PS_DC12(Flag_7) + (2.094395102 * (Flag_7 + 1)))) |
| 53 | Wave_1_3(Flag_5) = Wave_1_3(Flag_5) + (I_1(Flag_7) * Math.Sin((2 * 3.141592654 * (Flag_7 + 1) * G_Freq * Time_X(Flag_5)) + PS_DC12(Flag_7) + (4.188790205 * (Flag_7 + 1)))) |
| 54 | Next |
| 55 | Flag_7 = 0 |
| 56 | Next |
| 57 | Flag_5 = 0 |
| 58 | G_KVAR(0) = ((G_TR_V * G_ILoad_1 * Math.Sin(Math.Acos(G_PF(0)))) / 1000) / Math.Sqrt(3) |
| 59 | Elseif G_Branch_1 = 5 Then |
| 60 | |

| | |
|----|-------------------------------------|
| 61 | $G_KVAR(0) = G_KVAR_1$ End If |
|----|-------------------------------------|

โดยการคำนวณจะแบ่งออกเป็น 5 ประเภทตามประเภทของโหลด ได้แก่

- AC Drive (6 Pulse) โดยการรับค่า กระแสจาก Form 1 และเลือกใช้ Parameter Array ของ AC Drive (6 Pulse) มาคำนวณ และสร้างรูปคลื่น Waveform และ Spectrum
 - AC Drive (12 Pulse) โดยการรับค่า กระแสจาก Form 1 และเลือกใช้ Parameter Array ของ AC Drive (12 Pulse) มาคำนวณ และสร้างรูปคลื่น Waveform และ Spectrum
 - DC Drive (6 Pulse) โดยการรับค่า กระแสจาก Form 1 และเลือกใช้ Parameter Array ของ AC Drive (6 Pulse) มาคำนวณ และสร้างรูปคลื่น Waveform และ Spectrum
 - DC Drive (12 Pulse) โดยการรับค่า กระแสจาก Form 1 และเลือกใช้ Parameter Array ของ AC Drive (12 Pulse) มาคำนวณ และสร้างรูปคลื่น Waveform และ Spectrum
 - Capacitor Bank โดยการรับค่า kVAR และพิกัดแรงดัน และคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ก่อนรับค่าเก็บไว้ในตัวแปรสาธารณะเพื่อนำไปใช้แสดงผลต่อไป
3. พิจารณากรณีการเกิดสภาวะ Resonance ของระบบ โดยการคำนวณจาก พารามิเตอร์ของระบบ

| | |
|---|--|
| 1 | 'Wave_RESO Generation |
| 2 | HR = Math.Sqrt((G_TR_KVA * 100) / (G_TR_PerZ * Math.Abs(KVAR_SUM_CAP * 3))) |
| 3 | If (HR = 1 / 0) Then |
| 4 | HR = 49 |
| 5 | End If |
| 6 | If (HR > Math.Round(HR)) Then |
| 7 | HR_1 = Math.Round(HR) |
| 8 | HR_2 = Math.Round(HR) + 1 |
| 9 | Elseif (HR < Math.Round(HR)) Then |

| | |
|----|---|
| 10 | HR_1 = Math.Round(HR) - 1 |
| 11 | HR_2 = Math.Round(HR) |
| 12 | Elseif (HR = Math.Round(HR)) Then |
| 13 | HR_1 = HR |
| 14 | HR_2 = 0 |
| 15 | End If |
| 16 | HR_1 = HR_1 - 1 |
| 17 | HR_2 = HR_2 - 1 |
| 18 | HR = HR - 1 |
| 19 | If (HR_1 > 49) Then |
| 20 | HR_1 = 49 |
| 21 | Elseif (HR_1 < 0) Then |
| 22 | HR_1 = 49 |
| 23 | End If |
| 24 | If (HR_2 > 49) Then |
| 25 | HR_2 = 49 |
| 26 | Elseif (HR_2 < 0) Then |
| 27 | HR_2 = 49 |
| 28 | End If |
| 29 | Q_RESO = 3 |
| 30 | I_RESO = I_SUM(HR_1) * ((Q_RESO * (HR_2 - HR)) - 1) |
| 31 | I_RESO_2 = I_SUM(HR_2) * ((Q_RESO * (HR - HR_1)) - 1) |
| 32 | I_SUM(HR_1) = I_SUM(HR_1) * (Q_RESO * (HR_2 - HR)) |
| 33 | I_SUM(HR_2) = I_SUM(HR_2) * (Q_RESO * (HR - HR_1)) |
| 34 | For Flag_5 = 0 To 19 |
| 35 | Wave_RESO(Flag_5) = (I_RESO * Math.Sin((2 * 3.141592654 * (HR_1) * G_Freq * Time_X(Flag_5)))) + (I_RESO_2 * Math.Sin((2 * 3.141592654 * (HR_2) * G_Freq * Time_X(Flag_5)))) |
| 36 | Wave_RESO_2(Flag_5) = (I_RESO * Math.Sin((2 * 3.141592654 * (HR_1) * G_Freq * Time_X(Flag_5)) + (2.094395102 * (HR_1)))) + (I_RESO_2 * Math.Sin((2 * 3.141592654 * (HR_2) * G_Freq * Time_X(Flag_5)) + (2.094395102 * (HR_2)))) |
| 37 | |

| | |
|----|---|
| 38 | Wave_RESO_3(Flag_5) = (I_RESO * Math.Sin((2 * 3.141592654 * (HR_1) * G_Freq * Time_X(Flag_5)) + (4.188790205 * (HR_1)))) + (I_RESO_2 * Math.Sin((2 * 3.141592654 * (HR_2) * G_Freq * Time_X(Flag_5)) + (4.188790205 * (HR_2)))) |
| 39 | Next Flag_5 = 0 |

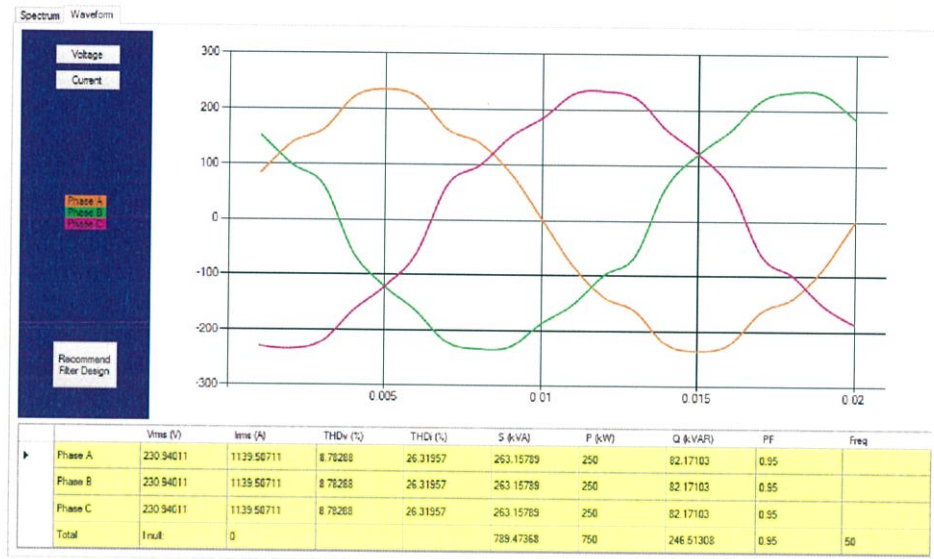
โดยคำนวณหาความถี่ Resonance ของระบบและคำนวณหาอัตราขยายของกระแส Resonance พร้อมสร้าง Waveform เพื่อนำมาบวกกับ Waveform ของระบบในภายหลัง โดยหากอันดับ Resonance ตกลงในช่วงระหว่างที่เลขอันดับไม่ลงตัว จะต้องทำการเทียบบัญญัติไตรยางและสร้าง Waveform 2 รูปเพื่อนำมารวมกันเป็น Waveform Resonance ก่อนนำไปบวกเข้ากับ Waveform หลัก

4. แสดงผลค่าที่คำนวณได้



รูปที่ 3.9 หน้าต่างแสดงผลค่า Spectrum ของระบบที่จำลอง

แสดงค่า Current(A) และ Voltage (V) และแสดงค่าในรูป เปรอร์เซ็นต์ พร้อมเทียบกับมาตรฐาน IEEE 519-1992 และแสดงผลออกมาในรูปของ Pass หรือ Not Pass พร้อมวาดกราฟ Spectrum ของกระแส และแรงดัน



รูปที่ 3.10 หน้าต่างแสดงผลรูปคลื่นกระแสและแรงดัน

โดยการนำค่า Array ของ Waveform ทั้ง 3 เฟสของกระแสและแรงดัน มาวาด เทียบกับเวลา 0 ms ถึง 20 ms พร้อมแสดงค่าพารามิเตอร์ทั้ง 9 ตัว

Form 3

1. เมื่อทำการกดปุ่ม Recommended Filter Design ที่ form 2 โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของฟิลเตอร์ที่เหมาะสม เพื่อทำการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า ในกรณีที่ค่าฮาร์โมนิกส์มีค่าเกินมาตรฐานดังรูป 3.11
2. เมื่อกดปุ่ม install ในหน้าต่างแสดงค่าพารามิเตอร์ฟิลเตอร์ที่เหมาะสม โปรแกรมจะคำนวณเพื่อจำลองผลการติดตั้งฮาร์โมนิกส์ฟิลเตอร์และแสดงสเปคตรัมเปรียบเทียบดังรูปที่ 3.12

Passive Filter Design

Recommended Passive Filter Specification

| | | | | | |
|----------------------|---|------|----------------------|---|------|
| Tuned Frequency | <input type="text" value="235"/> | Hz | Tuned Frequency | <input type="text" value="336"/> | Hz |
| Tuned Harmonic Order | <input type="text" value="4.7"/> | th | Tuned Harmonic Order | <input type="text" value="6.72"/> | th |
| Number of Step | <input type="text" value="2"/> | | Number of Step | <input type="text" value="1"/> | |
| Capacitor | <input type="text" value="350"/> | kVAR | Capacitor | <input type="text" value="250"/> | kVAR |
| Reactance | <input type="text" value="0.06587283423579"/> | mH | Reactance | <input type="text" value="0.09222196793011"/> | mH |

รูปที่ 3.11 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการออกแบบฟิลเตอร์



รูปที่ 3.12 เปรียบเทียบก่อนและหลังติดตั้งฟิลเตอร์

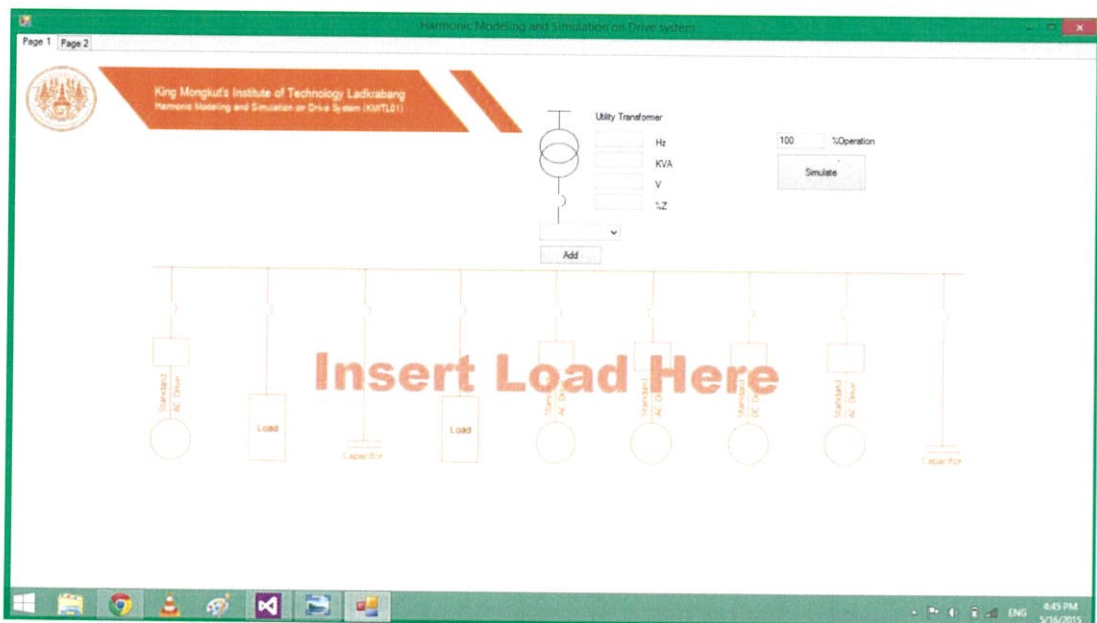
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

การออกแบบโปรแกรมจำลองการเกิดฮาร์โมนิกส์บนระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เช่นนี้ คุณสมบัติ และพารามิเตอร์ของตัวขับเคลื่อนมอเตอร์มีความสำคัญมาก เนื่องจากอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์แต่ละตัวอาจจะมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้ค่าหลังการจำลองอาจมีความคลาดเคลื่อนจากค่าความเป็นจริง ทั้งนี้ พารามิเตอร์ของอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ใช้เป็นตัวอ้างอิงในการจำลองของโปรแกรมนี้อ้างอิงมาจากอุปกรณ์จริงที่ใช้กันโดยทั่วไปในตลาด ดังที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 3

โดยโปรแกรมนี้อาจมีจุดประสงค์ให้ผู้ใช้สามารถทำนายคุณภาพทางไฟฟ้าของระบบก่อนทำการติดตั้งอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยหวังให้มีความใกล้เคียงมากที่สุดเพื่อให้ผู้ใช้สามารถตัดสินใจต่อไปได้อย่างถูกต้อง

4.1 วิธีการใช้งานโปรแกรมจำลองคุณภาพทางไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์



รูปที่ 4.1 หน้าต่างโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบระบบไฟฟ้า

4.1.1 การป้อนข้อมูลของระบบ

หน้าต่างโปรแกรมที่ใช้ในการป้อนข้อมูลของระบบ ดังรูปที่ 4.1

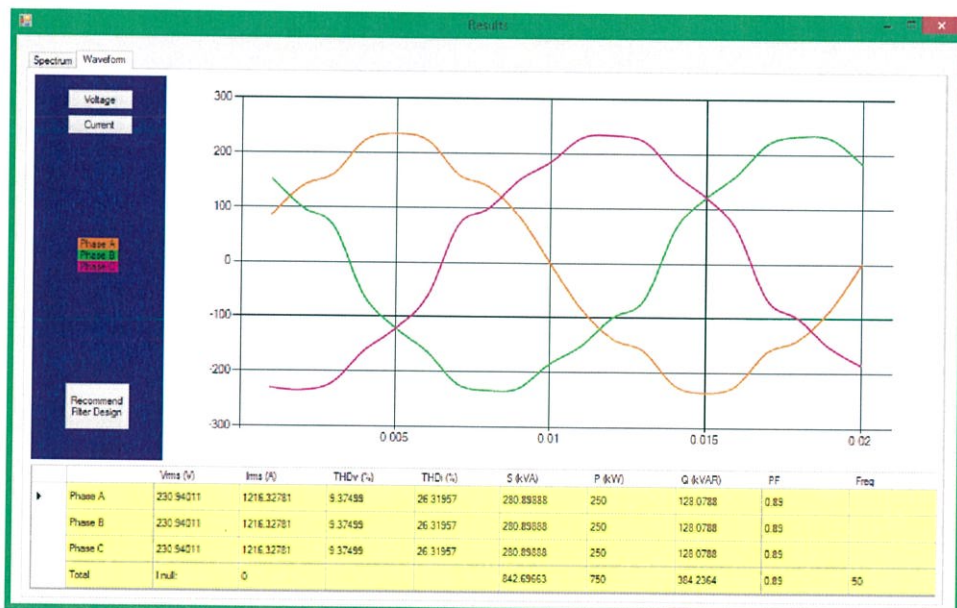
1. ป้อนค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต้องการใช้ในการจำลองโดยจำเป็นต้องป้อนค่าความถี่ (Hz), พิกัดกำลัง (kVA), พิกัดแรงดัน (V) และค่าเปอร์เซ็นต์ Short Circuit Impedance (%) อย่างครบถ้วน
2. คลิกเลือกชนิดของภาระไฟฟ้าใน Combo Box ก่อนคลิกปุ่ม Add และทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ของภาระไฟฟ้าชนิดนั้นๆตามที่ได้เลือกไว้ข้างต้น โดยภาระทางไฟฟ้าที่สามารถเลือกได้มีตั้งแต่ อุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ชนิด AC Drive (6 Pulse), AC Drive (12 Pulse), DC Drive (6 Pulse), DC Drive (12 pulse) และ Capacitor Bank
 - หากเลือกใช้ภาระทางไฟฟ้าเป็นชนิดอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าแล้ว พารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องป้อนให้โปรแกรมหลังจากนั้นจะเป็นค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้านั้นๆ
 - หากเลือกใช้ภาระทางไฟฟ้าเป็นชนิด Capacitor Bank พารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องป้อนให้โปรแกรมหลังจากนั้นจะเป็นค่า พิกัดของ Capacitor Bank นั้นๆ
3. โดยสามารถเลือกเพิ่มภาระทางไฟฟ้าให้กับระบบได้สูงสุดถึง 20 วงจร
4. หลังจากเลือกภาระโหลดที่ต้องการใช้เป็นแบบในการจำลองแล้วคลิกปุ่ม Simulate เพื่อแสดงผลการวิเคราะห์คุณภาพทางไฟฟ้าของระบบที่ใช้ในการอ้างอิงที่ผู้ใช้ได้ทำการออกแบบ

4.1.2 หน้าต่างแสดงผลการจำลอง

1. ในรูปที่ 4.2(a) จะเป็นการแสดงค่า Spectrum แรงดันและกระแสของระบบ โดยจะแสดงผลตั้งแต่ Spectrum อันดับมูลฐานไปจนถึงอันดับที่ 50 ในรูปของเปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับมูลฐานและเป็นค่า โวลต์หรือแอมแปร์ พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE 519-1992 โดยจะแสดงผลออกมาในรูปของ Pass หรือ Not Pass ของแต่ละอันดับ
2. นอกจากนี้ ในรูปที่ 4.2(a) จะมีการแสดง Spectrum ออกมาเป็นกราฟและแสดงค่า %THD_vหรือ %THD_iพร้อมเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE 519-1992 โดยจะแสดงผลออกมาในรูปของ Pass หรือ Not Pass
3. ในรูปที่ 4.2(b) จะเป็นการแสดงค่าพารามิเตอร์ของระบบที่จำลองพร้อมรูปคลื่นกระแสและแรงดัน ในแบบ 3 เฟส โดยสามารถเลือกสลับระหว่างแรงดันหรือกระแสได้โดยการคลิกปุ่ม Voltage หรือ Current ในแถบด้านซ้าย
4. นอกจากนี้ ในรูปที่ 4.2(b) จะมีฟังก์ชันในการออกแบบ Passive Power Filter ที่เหมาะสมกับระบบที่ผู้ใช้ได้จำลอง โดยการคลิกปุ่ม Recommend Filter Design ที่แถบด้านขวาเพื่อสั่งใช้งานฟังก์ชันการออกแบบ Passive Filter



รูปที่ 4.2(a) หน้าต่างแสดงผลค่า Spectrum แรงดันและกระแสของระบบที่จำลอง



รูปที่ 4.2(b) หน้าต่างแสดงรูปคลื่นแรงดันพร้อมค่าพารามิเตอร์ของระบบที่จำลอง

4.1.3 หน้าต่างการออกแบบ Specification ของ Passive Power Filter ที่เหมาะสม

The screenshot shows a software window titled "Passive Filter Design" with a green border. Inside, there is a section titled "Recommended Passive Filter Specification". It contains two columns of input fields for various parameters, each with a unit label to its right. The values entered in the fields are as follows:

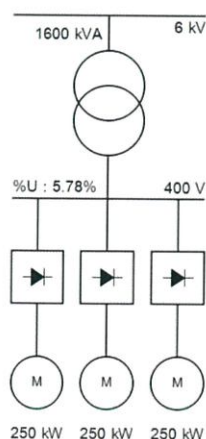
| Parameter | Value | Unit |
|----------------------|------------------|------|
| Tuned Frequency | 235 | Hz |
| Tuned Harmonic Order | 4.7 | th |
| Number of Step | 1 | |
| Capacitor | 400 | kVAR |
| Reactance | 0.05763872995632 | mH |

Below the input fields, there is an "Install" button. The right side of the window shows the same parameters but with default values of 0.

รูปที่ 4.3 หน้าต่างRecommend Specification ของ Passive Power Filter

4.2 ผลการจำลองระบบตัวอย่างโรงงานเคมีขนาดใหญ่ (Plant A)

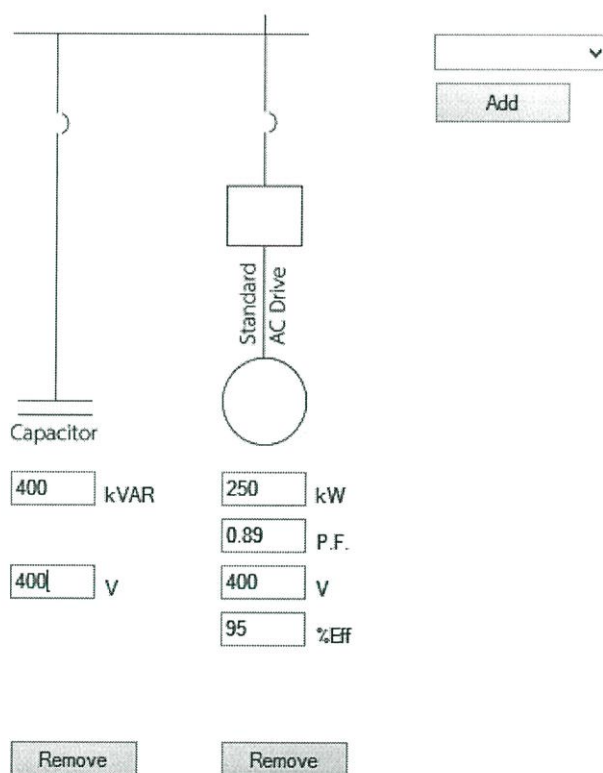
ระบบที่ใช้ในการจำลองเป็นระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับตาม Paper ของ “Department of Electrical Engineering, University “POLITEHNICA” of Timisoara” โดยมีชื่อหัวข้อเรื่อง “Investigation of the Harmonic Distortion Generated by Adjustable Speed Drives” โดยใน บทความฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์ค่าคุณภาพไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แห่งหนึ่ง และนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองผ่าน Software 2 ตัวได้แก่ “Pspice” และ “DRIVESIZE” โดยนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่มาจากกรวัด



รูปที่ 4.4 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลอง (Plant A)

ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองประกอบไปด้วยหม้อแปลงขนาด 1600 kVA 6/0.4 kV และมีเปอร์เซ็นต์ Short Circuit Impedance 5.78% นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ 3 ตัวชนิดกระแสสลับ 6-Pulse ซึ่งทำหน้าที่ขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับขนาดแต่ละ 250 kW มีตัวประกอบกำลังไฟฟ้า 0.95

4.2.1 การจำลองระบบอ้างอิงบนโปรแกรมที่พัฒนา



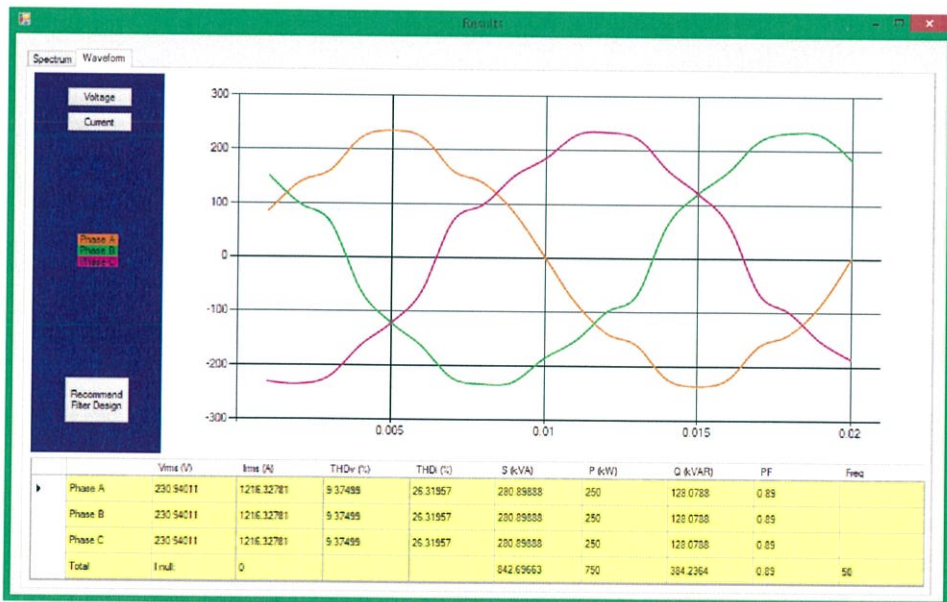
รูปที่ 4.5 การป้อนค่าจากระบบอ้างอิงบนโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

1. ทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของหม้อแปลงขนาด 1600 kVA 400 V มีค่าเปอร์เซ็นต์ Impedance 5.78% โดยสมมติให้ระบบเป็นชนิด 50 Hz
2. ทำการป้อนข้อมูลของโหลดของระบบที่ใช้อ้างอิง โดยประกอบไปด้วยอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับชนิด 6 Pulse ป้อนแก่มอเตอร์ขนาด 250 kW 400 V มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า 0.95 จำนวน 3 ชุด
3. เริ่มทำการจำลองผล

4.2.2 ผลการจำลองระบบอ้างอิงบนโปรแกรมที่พัฒนา



รูปที่ 4.6(a) ผลการจำลอง Spectrum(Plant A)



รูปที่ 4.6(b) ผลการจำลองรูปคลื่นแรงดัน (Plant A)

จากผลการจำลองพบว่าระบบมีคุณภาพทางไฟฟ้าต่ำ กล่าวคือมีค่า %THDi 26.32 ซึ่งสูงกว่ามาตรฐาน IEEE 519-1992 กำหนดและมีค่า %THDv 9.37 ซึ่งก็สูงกว่ามาตรฐาน IEEE 519-1992 เช่นกัน

โดยสามารถเปรียบเทียบกับค่าที่จำลองโดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น เทียบกับค่าที่ได้จากการวัด ซึ่งอ้างอิงตาม Paper ของ “ Department of Electrical Engineering, University “POLITEHNICA” of Timisoara” หัวข้อเรื่อง “ Investigation of the Harmonic Distortion Generated by Adjustable Speed Drives” ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบผลการวัดจริงกับผลการจำลองผ่านโปรแกรมโรงงาน Plant A

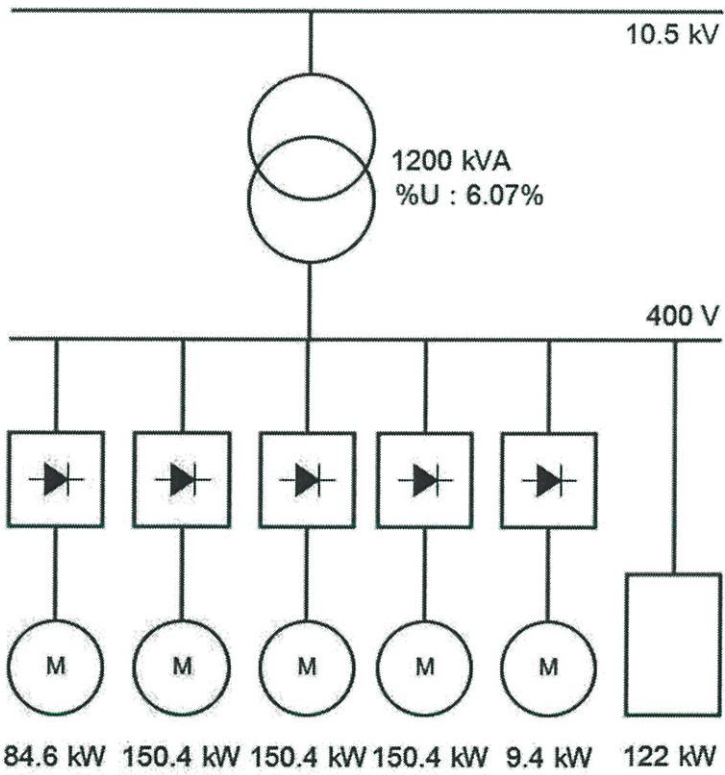
| Quantity | Results | | | |
|---------------------------------|---------|-------|-----------|---------|
| | Meas. | SPICE | DRIVESIZE | KMITL01 |
| %THDi | 24.3% | 27.9% | 28.9% | 26.32% |
| %THDv | 7.8% | 8.0% | 11.3% | 8.78% |
| I ₅ /I ₁ | 23.1% | 26.5% | 26.6% | 23.1% |
| I ₇ /I ₁ | 6.1% | 6.3% | 8.8% | 6.1% |
| I ₁₁ /I ₁ | 2.7% | 4.5% | 5.3% | 7.1% |
| I ₁₃ /I ₁ | 1.5% | 3.0% | 3.3% | 3.9% |
| V ₅ /V ₁ | 6.3% | 6.5% | 8.6% | 5.7% |
| V ₇ /V ₁ | 2.2% | 2.2% | 4.0% | 2.1% |
| V ₁₁ /V ₁ | 2.2% | 2.5% | 3.7% | 3.8% |
| V ₁₃ /V ₁ | 1.8% | 1.9% | 2.8% | 0.14% |
| PF | 0.95 | 0.98 | 0.94 | 0.95 |

จะเห็นว่าค่าที่วัดและค่าที่ได้จากการจำลองบนโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นค่อนข้างใกล้เคียงกันพอสมควร ทั้งนี้ทั้งนั้น ความแม่นยำในการจำลองจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งถ้าหาก ระบบที่ใช้อ้างอิงมีค่าพารามิเตอร์ของตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ใกล้เคียงกับค่าที่โปรแกรมใช้อ้างอิง ค่าที่ได้ก็就会有ความแม่นยำสูง

4.3 ผลการจำลองตัวอย่างโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน(Plant B)

ระบบที่ใช้ในการจำลองเป็นระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับตาม Paper ของ “Aldborg University, Denmark; Danfoss Drives A/S, Denmark” โดยมีหัวข้อเรื่อง “Predicting Harmonics by Simulations. A Case Study for High Power Adjustable Speed Drive”

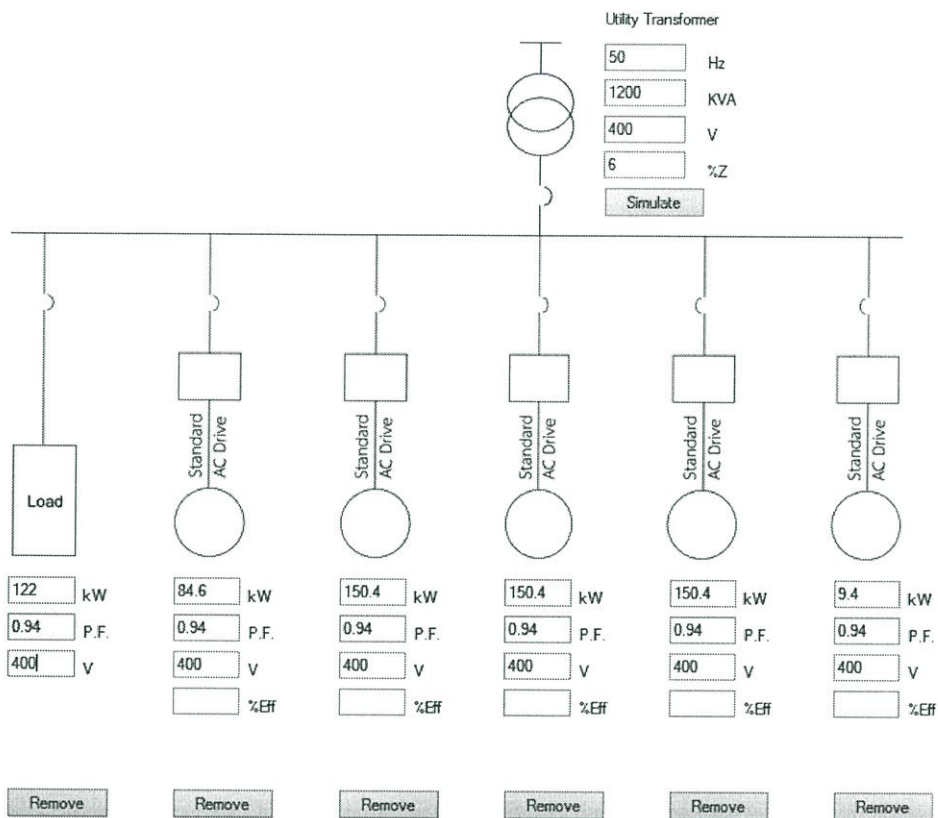
โดยใน Paper ฉบับนี้ได้ศึกษาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนแห่งหนึ่ง โดยได้ทำการวัดค่า พารามิเตอร์ต่างๆ และนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่พยากรณ์จากโปรแกรม PSpice และ MCT31



รูปที่ 4.7 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน(Plant B)

ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองประกอบไปด้วย หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 1200 kVA 10.5/0.4 kV และมีเปอร์เซ็นต์ Short Circuit Impedance 6% นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วย อุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ 5 ตัว และโหลดอื่นๆอีก 122 kW

4.3.1 การจำลองระบบอ้างอิงบนโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น



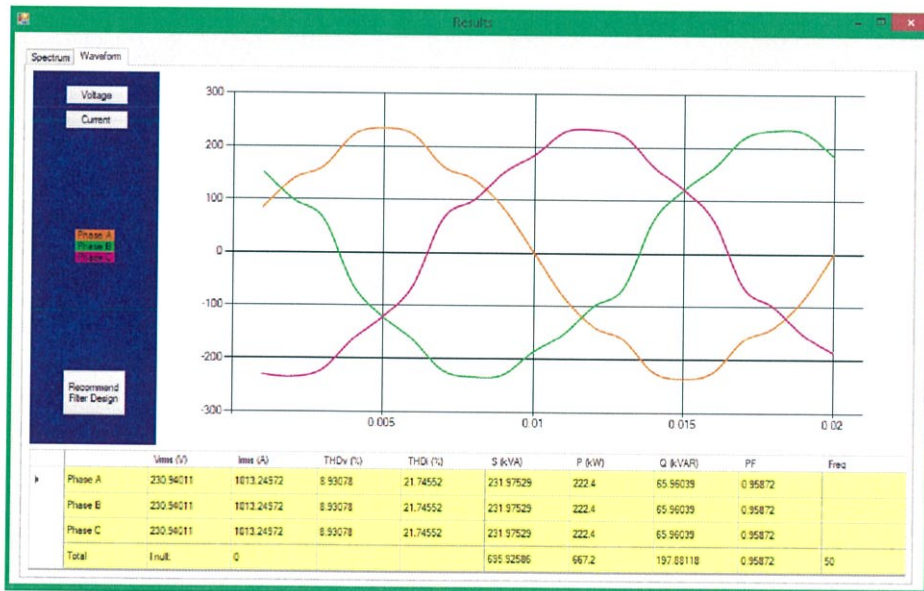
รูปที่ 4.8 การป้อนค่าจากระบบอ้างอิงบนโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

1. ทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของหม้อแปลงขนาด 1200 kVA 400 V มีค่าเปอร์เซ็นต์ Impedance 6% โดยสมมติให้ระบบเป็นชนิด 50 Hz
2. ทำการป้อนข้อมูลของโหลดของระบบที่ใช้อ้างอิง โดยประกอบไปด้วยอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับชนิด 6 Pulse ป้อนแก่มอเตอร์ขนาด 84.6, 150.4, 150.4, 150.4, 9.4 kW 400 V มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า 0.94จำนวน 5ชุดและมีโหลดอื่น ๆ ขนาด 122 kW
3. เริ่มทำการจำลองผล

4.3.2 ผลการจำลองระบบอ้างอิงบนโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 4.9(a) ผลการจำลอง Spectrum (Plant B)



รูปที่ 4.9(b) ผลการจำลองรูปคลื่นแรงดัน (Plant B)

จากผลการจำลองพบว่าระบบมีคุณภาพทางไฟฟ้าต่ำ กล่าวคือมีค่า %THDi 21.75% ซึ่งสูงกว่ามาตรฐาน IEEE 519-1992 กำหนดและมีค่า %THDv 8.93% ซึ่งก็สูงกว่ามาตรฐาน IEEE 519-1992 เช่นกัน

โดยสามารถเปรียบเทียบกับค่าที่จำลองไดโนโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น เทียบกับค่าที่ได้จากการวัด ซึ่งอ้างอิงตาม Paper ของ “Aldborg University, Denmark; Danfoss Drives A/S, Denmark” โดยมีหัวข้อเรื่อง “Predicting Harmonics by Simulations. A Case Study for High Power Adjustable Speed Drive” ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบผลการวัดจริงกับผลการจำลองผ่านโปรแกรม

| Quantity | Results | | |
|--------------|---------|--------|---------|
| | Meas. | PSPICE | KMITL01 |
| %THDi | 19.5% | 22.0% | 21.75% |
| %THDv | 9.2% | 8.6% | 8.93% |
| I_5/I_1 | 17.5% | 20.0% | 19.1% |
| I_7/I_1 | 5.9% | 6.1% | 5.0% |
| I_{11}/I_1 | 4.3% | 5.0% | 5.8% |
| I_{13}/I_1 | 3.2% | 3.2% | 3.2% |
| V_5/V_1 | 6.2% | 5.3% | 5.8% |
| V_7/V_1 | 3.0% | 2.9% | 2.1% |
| V_{11}/V_1 | 3.2% | 2.9% | 3.9% |
| V_{13}/V_1 | 2.3% | 2.3% | 2.5% |
| PF | 0.94 | 0.98 | 0.94 |

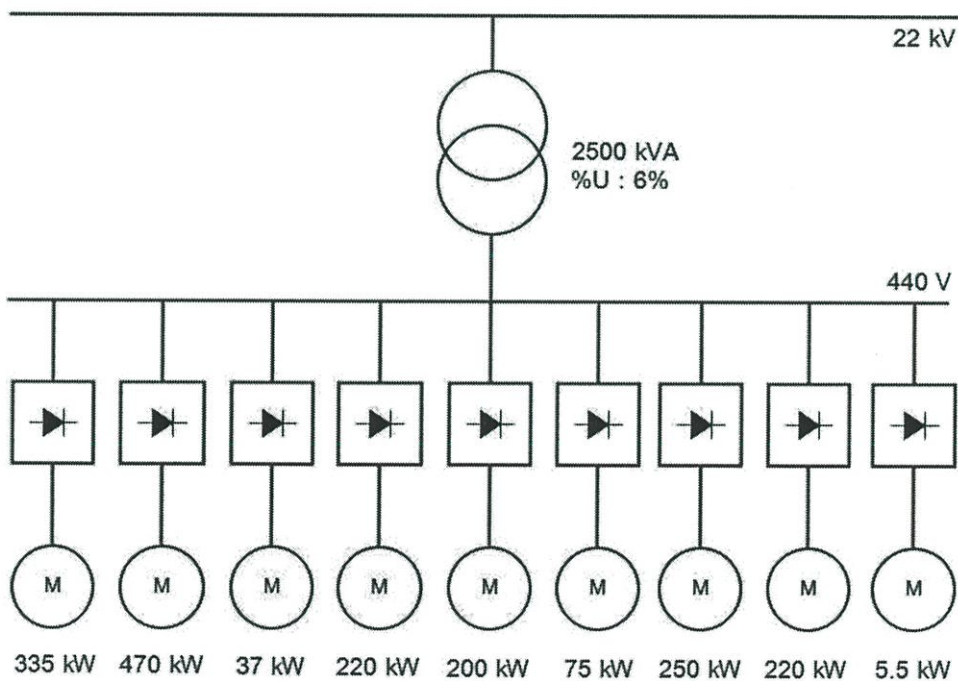
จะเห็นว่าค่าที่วัดและค่าที่ได้จากการจำลองบนโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นค่อนข้างใกล้เคียงกันพอสมควร ทั้งนี้ทั้งนั้น ความแม่นยำในการจำลองจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งถ้าหาก ระบบที่ใช้อ้างอิงมีค่าพารามิเตอร์ของตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ใกล้เคียงกับค่าที่โปรแกรมใช้อ้างอิง ค่าที่ได้ก็จะมีค่าความแม่นยำสูง

4.4 ผลการจำลองตัวอย่างโรงงานปูนซีเมนต์(Plant C)

ระบบที่ใช้จำลองนำมาจากค่าที่วัดได้จริงจากโรงงานปูนซีเมนต์ โดยโรงงานแห่งนี้รับไฟฟ้าแรงดันปานกลางระดับ 22 kV ผ่านหม้อแปลง 2500 kVA 22/0.4 kV โดยโหลดของโรงงานประกอบไปด้วยโหลด DC Drive ขนาด 470 kW 1ตัว, 335 kW 1ตัว, 250 kW 1ตัว, 220kW 2ตัว, 200kW 1ตัว, 75kW 1ตัว, 37kW 1ตัว, 5.5kW 1ตัว จะมีค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏเท่ากับ 3021kVA กำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับ 1812.5kW, PF 0.66แสดงในรูปที่ 4.10

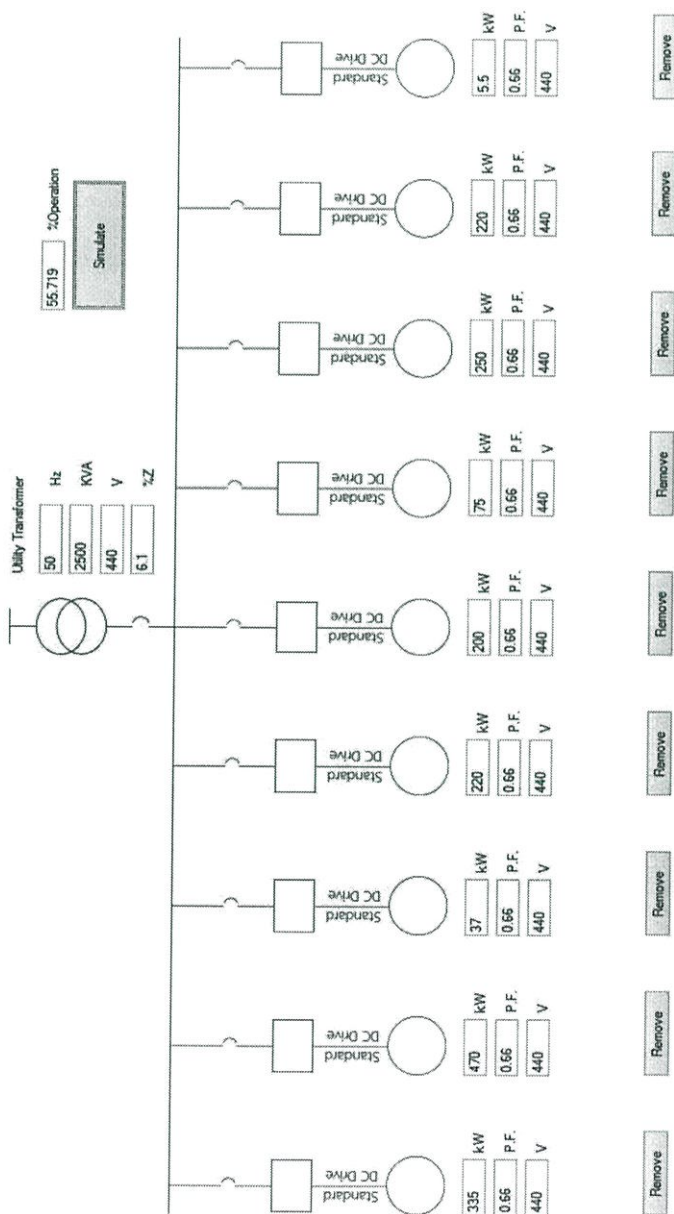
4.4.1 การจำลองระบบอ้างอิงกับโปรแกรมที่พัฒนา

แต่เนื่องจากการวัดค่าจริงจากโรงงาน ไม่สามารถวัดค่าที่ระดับโหลดเต็มพิกัด ซึ่งระดับโหลดกำลังดำเนินการ ที่วัดได้มีกำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับ 1009.891kW แสดงว่าโรงงานปูนซีเมนต์แห่งนี้กำลังดำเนินการที่ 55.72% ของระดับโหลดเต็มพิกัด



รูปที่ 4.10 One-line diagram โรงงานปูนซีเมนต์ (Plant C)

จากนั้นทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบและโหลด โดยสามารถป้อนที่ค่า



พิกัดโหลดแต่ละตัวได้ทันที เนื่องจากโรงงานปูนซีเมนต์มีการดำเนินงานที่ระดับโหลด 55.72% จึงต้องปรับระดับการโหลดในโปรแกรมที่ช่อง %Operation ดังรูปที่ 4.11 โปรแกรมจึงจะสามารถแสดงค่าได้แม่นยำขึ้น

รูปที่ 4.11 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าในโรงงานปูนซีเมนต์

1. ป้อนพารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 2500kVA 22/0.44 kV %Impedance 6% และมีความถี่ระบบเป็น 50 Hz
2. ทำการป้อนข้อมูลมอเตอร์ระบบขนาด 470 335 250 220 200 75 37 และ 5.5 kW โดยมีค่าตัวประกอบกำลัง 0.66
3. เริ่มทำการจำลองผล

4.4.2 ผลการจำลองบนโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 4.12(a) ผลการจำลองสเปกตรัม(Plant C)



รูปที่ 4.12(b) ผลการจำลองรูปคลื่นกระแส (Plant C)

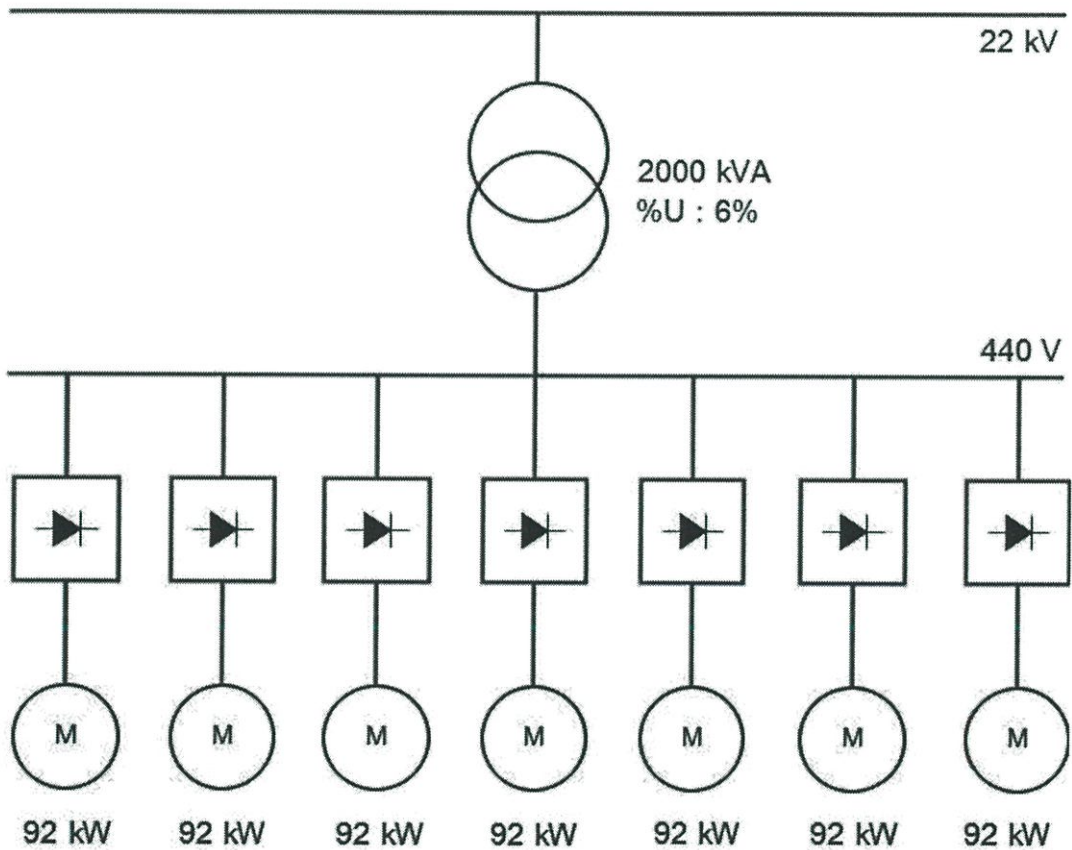
ผลการจำลองพบว่าระบบมีค่า THDv เท่ากับ 19.39% และค่า THDi เท่ากับ 29.12% กล่าวได้ว่าระบบมีคุณภาพไฟฟ้าต่ำ เมื่อเทียบกับมาตรฐาน IEEE519-1992 โดยสามารถเปรียบเทียบค่าที่จำลองและค่าที่วัดได้จริงจากตาราง 4.3

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าที่วัดได้จริงและค่าจำลองจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

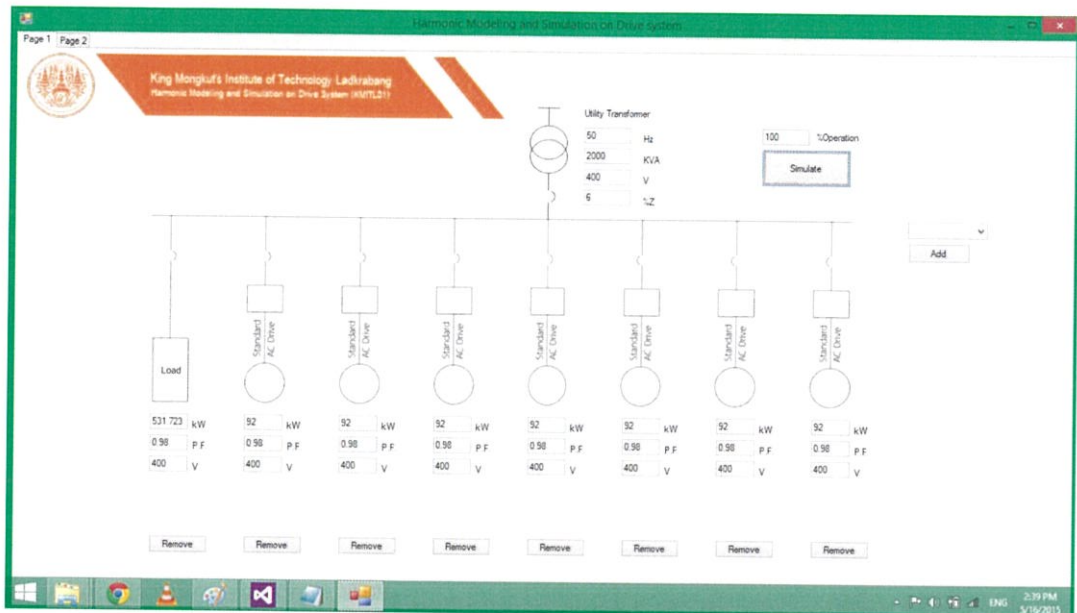
| Quantity | Results | |
|----------|---------|---------|
| | Meas. | KMITL01 |
| %THDi | 35% | 31.41% |
| %THDv | 17.13% | 17.13% |

4.5 ผลการจำลองตัวอย่างโรงงานสิ่งทอ (Plant D)

ระบบที่ใช้จำลองนี้ นำมาจากการวัดจริงจากโรงงานสิ่งทอ โดยโรงงานแห่งนี้มีการรับไฟฟ้าระดับแรงดันปานกลาง 22kV ผ่านหม้อแปลงขนาด 2000kVA 22/0.4 kV โดยมีโหลดชนิด DC Drive 12-pulse ขนาด 92kW 7ตัว และ linear-load ขนาด 531.723kW ดังแสดงใน one-line diagram



รูปที่ 4.13 one-line diagram โรงงานสิ่งทอ(Plant D)



รูปที่ 4.14 กรอกพารามิเตอร์ของระบบลงโปรแกรมที่พัฒนา

จากนั้นจึงทำการกรอกค่าพารามิเตอร์ของระบบต่างๆ ดังรูปที่ 4.14 โดย

1. ป้อนพารามิเตอร์หม้อแปลงขนาด 2000kVA 22/0.4 kV %Impedance 6% ที่ระดับความถี่ 50 Hz
2. ทำการป้อนโหลดชนิด AC Drive 12-pulse ขนาด 92kW 7ตัวและ โหลดชนิด linear-load ขนาด 531.723kW
3. เริ่มทำการจำลองผล



รูปที่ 4.15(a) ผลการจำลองสเปคตรัม(Plant D)



รูปที่ 4.15(b) ผลการจำลองรูปคลื่นแรงดันและกระแส(Plant D)

ผลการจำลองพบว่าระบบมีค่า THDv เท่ากับ 7.45% และค่า THDi เท่ากับ 5.45% พบว่าเมื่อเทียบกับมาตรฐาน IEEE519-1992 ค่า THDv มีค่าสูงกว่ามาตรฐาน โดยสามารถเปรียบเทียบค่าที่จำลองและค่าที่วัดได้จริงจากตาราง 4.4

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าที่วัดได้จริงและค่าจำลองจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

| Quantity | Results | |
|----------|---------|---------|
| | Meas. | KMITL01 |
| %THDi | 7.8% | 7.45% |
| %THDv | 5.44% | 5.45% |

บทที่ 5 ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

5.1 สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ผู้พัฒนาได้ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ปัญหาฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ โดยโปรแกรมจะทำการรับค่าพารามิเตอร์ของระบบ ชนิดและพิกัดของโหลดต่างๆ แล้วจึงจำลองค่าฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจากโหลด DC และ AC Drive พร้อมทั้งแสดงกราฟรูปคลื่นที่ประกอบไปด้วยฮาร์โมนิกส์และสเปกตรัมของกระแสและแรงดันที่มีความผิดเพี้ยน

จากการจำลองโดยใช้ข้อมูลจากการวัดจริงพบว่า ค่าที่จำลองได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง นอกจากนี้โปรแกรมยังสามารถทำการเปรียบเทียบค่าฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับที่จำลองได้กับมาตรฐาน IEEE 519-1992 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าภาคอุตสาหกรรม ซึ่งหากค่าที่ได้เกินค่ามาตรฐานโปรแกรมสามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ของฮาร์โมนิกส์พาสซีฟ ฟิลเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อแก้ไขปัญหาค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ พร้อมทั้งแสดงสเปกตรัมเปรียบเทียบปริมาณฮาร์โมนิกส์ก่อนและหลังการติดตั้งเพื่อเปรียบเทียบได้อีกด้วย

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบผลการวัดจริงกับผลจำลองผ่านโปรแกรมของโรงงานเคมีขนาดใหญ่(Plant A)

| Quality | Result | | | |
|--------------|--------|--------|-----------|---------|
| | Meas. | PSPICE | DRIVESIZE | KMITL01 |
| %THDi | 24.3% | 27.9% | 28.9% | 26.32% |
| %THDv | 7.8% | 8.0% | 11.3% | 8.78% |
| I_5/I_1 | 23.1% | 26.5% | 26.6% | 23.1% |
| I_7/I_1 | 6.1% | 6.3% | 8.8% | 6.1% |
| I_{11}/I_1 | 2.1% | 4.5% | 5.3% | 7.1% |
| I_{13}/I_1 | 1.5% | 3.0% | 3.3% | 3.9% |
| V_5/V_1 | 6.3% | 6.5% | 8.6% | 5.7% |
| V_7/V_1 | 2.2% | 2.2% | 4.0% | 2.1% |
| V_{11}/V_1 | 2.2% | 2.5% | 2.7% | 3.8% |
| V_{13}/V_1 | 1.8% | 1.9% | 2.8% | 0.14% |
| PF | 0.95 | 0.98 | 0.94 | 0.95 |

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบผลวัดจริงกับผลจำลองผ่านโปรแกรมของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน(Plant B)

| Quality | Result | | |
|---------------------------------|--------|--------|---------|
| | Meas. | PSPICE | KMITL01 |
| %THDi | 19.5% | 22.0% | 21.75% |
| %THDv | 9.2% | 8.6% | 8.93% |
| I ₅ /I ₁ | 17.5% | 20.0% | 19.1% |
| I ₇ /I ₁ | 5.9% | 6.1% | 5.0% |
| I ₁₁ /I ₁ | 4.3% | 5.0% | 5.8% |
| I ₁₃ /I ₁ | 3.2% | 3.2% | 3.2% |
| V ₅ /V ₁ | 6.2% | 5.3% | 5.8% |
| V ₇ /V ₁ | 3.0% | 2.9% | 2.1% |
| V ₁₁ /V ₁ | 3.2% | 2.9% | 3.9% |
| V ₁₃ /V ₁ | 2.3% | 2.3% | 2.5% |
| PF | 0.94 | 0.98 | 0.94 |

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบผลการวัดจริงกับผลการจำลองผ่านโปรแกรมของโรงงานปูนซีเมนต์

| Quality | Result | |
|---------|--------|---------|
| | Meas. | KMITL01 |
| %THDi | 35.0% | 31.41% |
| %THDv | 17.13% | 17.13% |

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบผลการวัดจริงกับผลการจำลองผ่านโปรแกรมของโรงงานสิ่งทอ

| Quality | Result | |
|---------|--------|---------|
| | Meas. | KMITL01 |
| %THDi | 7.8% | 7.45% |
| %THDv | 5.44% | 5.45% |

จากตารางเปรียบเทียบผลการวัดจริงกับผลการจำลองผ่านโปรแกรมของกรณีศึกษาทั้ง 4 กรณี พบว่าโปรแกรม KMITL01 ที่ได้ออกแบบสามารถวัดค่าได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดจริง ถึงแม้ว่าจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากพารามิเตอร์ที่ป้อนเข้าไปในโปรแกรม

5.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

การใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังที่ประกอบไปด้วย อุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องมาป้อนในโปรแกรมสำหรับคำนวณค่าออกมา เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายจากปัญหาฮาร์โมนิกส์ที่อาจจะเกิดขึ้น โดยผลที่ได้จากโปรแกรมกับการวัดค่าจริงอาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์แต่ละตัวอาจจะมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งเพียงพอที่จะสามารถนำค่าไปวิเคราะห์

โดยโปรแกรมที่ได้ทำการออกแบบขึ้นมาแล้วยังมีบางส่วนที่ยังไม่สมบูรณ์ ต้องถูกนำไปพัฒนาต่อเพื่อให้โปรแกรมมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เช่น การหาพิกัดของอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ที่เหมาะสมกับหม้อแปลง, สามารถบันทึกค่าการจำลองเพื่อนำมาใช้จำลองครั้งต่อไป, สามารถจำลองระบบที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เช่น 115kV/22kV เพื่อให้ครอบคลุมโรงงานขนาดใหญ่, สามารถแสดงผลจำลองกราฟกระแสและแรงดันก่อนการติดตั้งฟิลเตอร์ เพิ่มชนิดของโหลดที่สามารถนำมาจำลองในโปรแกรมให้ได้หลากหลายขึ้น เช่น UPS, Arcing Device และทำให้โปรแกรมแสดงค่าได้ใกล้เคียงกับค่าที่ทำการวัดจริงมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEEE Standards Board, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System., IEEE Std. 519-1992, New York , 1993.
- [2] N. Muntean, A. Hedes, S. Scridon, "Investigation of the Harmonic Distortion Generated by Adjustable Speed Drives", WSEAS International Conference, 2006, pp. 70-75.
- [3] L. Asiminoaei, S. Hansen, F. Blaabjerg "Predicting Harmonic by Simulation. A case study for high power ASDs", **Electrical Power Quality and Utilization**, Vol. 11, No.1, 2006, 65-75
- [4] จงรักษ์ บุญเส็ง, เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิชาคุณภาพไฟฟ้า รหัสวิชา 01026422 ปีการศึกษา 2557
- [5] R.C.Dugan, M.McGranaghan, S.Santoso, H.Beaty, **Electrical Power Systems Quality**, 3rd Ed., New York, McGraw-Hill, 2012.
- [6] J.Arrillaga, N.R.Watson, **Power System Harmonics**, 2ndEd.,Chichester, John Wiley & Sons, 2003.
- [7] ศุภี บรรจงจิตร, **หลักการและเทคนิคการออกแบบระบบไฟฟ้า**, กรุงเทพฯ, สนพ.ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2556.
- [8] Don Alley, **MEC Product Specification**, mceinc.com, 1996, pp. 17-29-17-40.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
บทความทางวิชาการ

แบบจำลองฮาร์โมนิกส์บนระบบขับเคลื่อนมอเตอร์

Harmonic Modelling and Simulation on Drive System

นภัท จิระจงเจริญ บรรณพต โมคติริ และ ปฐมพงศ์ ตั้งไพบูลย์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยคลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์. 02-739-8000 E-mail: Senrisasinate@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอแนวทางในการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง (DC Drive) และกระแสสลับ (AC Drive) ซึ่งสร้างปัญหาต่อระบบไฟฟ้ากำลัง อันทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบลดลง โดยการคำนวณผ่านโปรแกรมที่พัฒนาโดย Microsoft Visual Basic จากการกรอกข้อมูลต่างๆ ในระบบ นำมาประมวลผล และแสดงค่าดัชนีชี้วัดความผิดเพี้ยนของกระแส (THDi) และแรงดันฮาร์โมนิกส์ (THDv) พร้อมทั้งกราฟรูปคลื่นและสเปกตรัมของทั้งกระแสและแรงดัน โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE 519-1992 ซึ่งโปรแกรมที่สร้างขึ้น ผู้พัฒนามีความต้องการออกแบบให้เกิดความสะดวกในการใช้งานเหมาะแก่ผู้ประกอบการและวิศวกรผู้ดูแลระบบไฟฟ้าใช้เพื่อประกอบการวิเคราะห์พิจารณาการติดตั้งอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ในระบบไฟฟ้า เพื่อป้องกันปัญหาฮาร์โมนิกส์ที่ก่อให้เกิดผลเสียหายในระบบไฟฟ้า

คำสำคัญ: คุณภาพกำลังไฟฟ้า, ฮาร์โมนิกส์, ฮาร์โมนิกส์โซแนนซ์,

วงจรกรองแบบพาสซีฟ, อุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์

Abstract

This paper introduces a way to analyze harmonics from AC and DC drives system which cause harmonics problems and reduce the efficiency of the system. By utilizing Microsoft Visual Basic to develop a program that can be use to calculated the essential factor and process those information to produce harmonic indexes parameters, waveform graphs and harmonic spectrums while compare them to the IEEE 519-1992 Standard. This program is designed to be easy to use that mainly for an entrepreneur or an engineer who is considering install motor drives to their system, which can prevent the future problem that will occur in the system.

Keywords: Power quality, Harmonics, Harmonic resonance, Passive Filter, Drive

1. บทนำ

ในปัจจุบันฮาร์โมนิกส์ได้สร้างปัญหาให้กับระบบไฟฟ้าเป็นอย่างมากก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆภายในภาคอุตสาหกรรมทำให้เกิดผลเสียในหลายด้าน โดยปัญหาฮาร์โมนิกส์เกิด

จากโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Load) กระแสฮาร์โมนิกส์จะไหลเข้าสู่ระบบของผู้ใช้ไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าข้างเคียงซึ่งฮาร์โมนิกส์นี้ส่งผลกระทบต่อคลื่นของแรงดันไฟฟ้าในระบบเกิดความผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ปกติและเกิดความเสียหายให้แก่อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ ทำให้การทำงานของระบบผิดพลาดได้

ดังนั้น ฮาร์โมนิกส์ที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้าถือว่าเป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่สำคัญเรื่องหนึ่ง ซึ่งการวัดค่าฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้ามีจุดประสงค์เพื่อทำการตรวจสอบระดับความรุนแรงของฮาร์โมนิกส์ ณ จุดที่วัดว่าอยู่ในระดับใด และจะมีผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ามากน้อยเพียงใด ซึ่งจะพิจารณาระดับความรุนแรงโดยเปรียบเทียบข้อมูลที่วัดได้กับค่าที่ระบุไว้ในข้อกำหนดตามมาตรฐานของ IEEE 519-1992 เพื่อนำค่าที่ได้มาประเมินระดับความรุนแรงของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบว่าผ่านตามมาตรฐานที่กำหนดไว้หรือไม่เพื่อทำการแก้ไขต่อไป

2. มาตรฐาน IEEE 519-1992

2.1 มาตรฐานพิกัดความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ IEEE 519-1992

ตามที่ได้ระบุไว้ในมาตรฐาน IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic control in Electrical Power Systems [1] ได้แสดงค่าพิกัดความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2

ตารางที่ 1 พิกัดความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกส์

| Bus voltage at PCC, V_N (kV) | Individual Voltage Harmonic Distortion (%) | Total Voltage Distortion, THD _v |
|-----------------------------------|--|---|
| $V_N \leq 69$ kV | 3.0 | 5.0 |
| $69 < V_N \leq 161$ kV | 1.5 | 2.5 |
| $V_N > 161$ kV | 1.0 | 1.5 |

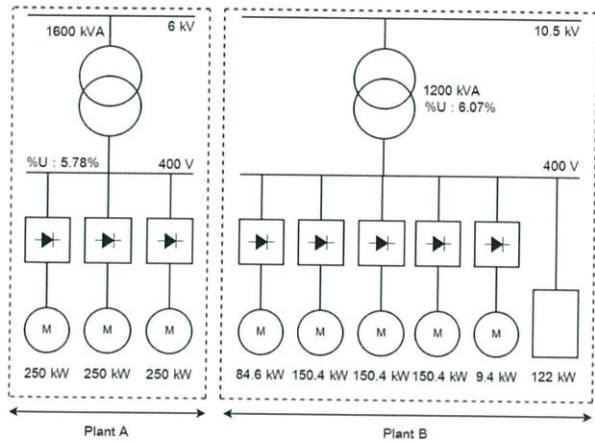
ตารางที่ 2 พิกัดความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกส์

| I_{sc}/I_L | Individual Harmonic Order(Odd Harmonics) | | | | | TDD |
|--------------|--|-------|-------|-------|-----|------|
| | <11 | 11-16 | 17-22 | 22-34 | >34 | |
| <20 | 4.0 | 2.5 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 5.0 |
| 20<50 | 7.0 | 3.5 | 2.7 | 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 | 2.7 | 1.4 | 20.0 |

3. การทดลองระบบตัวอย่าง

3.1 กรณีตัวอย่างการจำลองระบบไฟฟ้าในโรงงาน Plant A

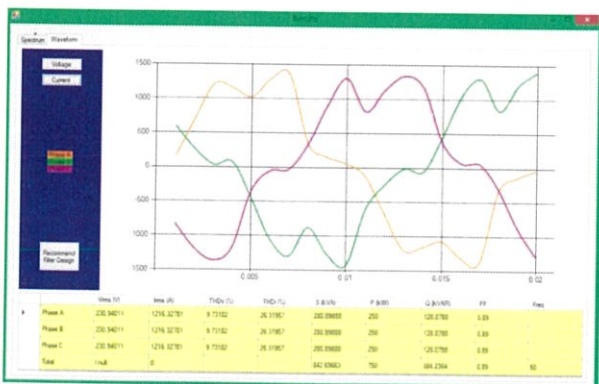
ระบบที่ใช้ในการจำลองเป็นระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสสลับตามข้อมูลจากบทความชื่อ Investigation of the Harmonic Distortion Generated by Adjustable Speed Drives [2] ซึ่งมีการวัดค่าความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์จากโรงงาน A โดยมีแบบไดอะแกรมดังในรูปที่ 1 (ซ้าย)



รูปที่ 1 ผังระบบไฟฟ้า Plant A (ซ้าย) และ Plant B (ขวา)

จากรูปที่ 1(ซ้าย) ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าประกอบไปด้วย หม้อแปลงขนาด 1600 kVA, 6/0.4 kV %Short Circuit Impedance 5.78 เปอร์เซ็นต์ในด้านของโหลดที่ติดตั้งในโรงงานประกอบด้วย อุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ชนิด AC Drive 6-pulse3 ตัว ซึ่งทำหน้าที่ขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับ ขนาดตัวละ 250 kW มีตัวประกอบกำลังไฟฟ้า(PF) 0.95

จากผลการจำลอง พบว่าระบบไฟฟ้า Plant A มีคุณภาพทางไฟฟ้าต่ำ กล่าวคือมีค่า %THDi ที่ 26.32%และมีค่า %THDv ที่ 9.37%เทียบกับค่าที่วัดได้จริง%THDi ที่ 24.30%และมีค่า %THDv ที่ 7.80%ซึ่งสูงกว่ามาตรฐาน IEEE 519-1992 เช่นกัน ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2



รูปที่ 2 กราฟคลื่นกระแสจากโรงงาน Plant A

โดยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่จำลองโดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดจริงรวมถึงโปรแกรมใช้จำลองอื่นๆสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าที่วัดจริงกับผลการจำลองโรงงาน Plant A

| Quantity | Results | |
|---------------------------------|---------|---------|
| | Meas. | KMITL01 |
| %THDi | 24.3% | 26.32% |
| %THDv | 7.8% | 8.78% |
| I ₅ /I ₁ | 23.1% | 23.1% |
| I ₇ /I ₁ | 6.1% | 6.1% |
| I ₁₁ /I ₁ | 2.7% | 7.1% |
| I ₁₃ /I ₁ | 1.5% | 3.9% |
| V ₅ /V ₁ | 6.3% | 5.7% |
| V ₇ /V ₁ | 2.2% | 2.1% |
| V ₁₁ /V ₁ | 2.2% | 3.8% |
| V ₁₃ /V ₁ | 1.8% | 0.14% |
| PF | 0.95 | 0.95 |

3.2 กรณีตัวอย่างการจำลองระบบไฟฟ้าในโรงงาน Plant B

ระบบไฟฟ้าโรงงาน Plant B ที่นำมาใช้ในการจำลองนี้ได้ อ้างอิงจากบทความวิจัยหัวข้อ Predicting Harmonic by Simulation. A case study for high power ASDs [3]

โดยแสดงผังไดอะแกรมระบบไฟฟ้าดังรูปที่ 1 (ขวา) ภายในระบบประกอบไปด้วย หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 1200 kVA 10.5/0.4 kV และมี %Short Circuit Impedance 6เปอร์เซ็นต์ด้านของโหลดในโรงงาน Plant B ประกอบไปด้วยมอเตอร์และอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ชนิด AC Drive 6-pulse จำนวน 5 ตัว และ โหลดชนิด linear-load อีก 122 kW



รูปที่ 3 กราฟคลื่นกระแสจากโรงงาน Plant B

จากผลการจำลองในรูปที่ 3 ระบบไฟฟ้าใน Plant B มีคุณภาพทางไฟฟ้าต่ำ กล่าวคือมีค่า %THDi ที่ 21.75%และมีค่า %THDv ที่ 8.93%เทียบกับค่าที่วัดได้จริง%THDi ที่ 19.50%และมีค่า %THDv ที่ 9.20%ซึ่ง

โดยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่จำลอง โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น เทียบกับค่าที่ได้จากการวัดจริงสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบผลการวัดจริงกับผลการจำลอง Plant B

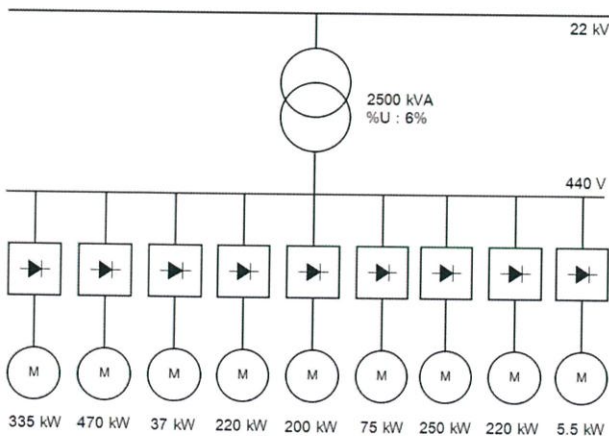
| Quantity | Results | |
|--------------|---------|---------|
| | Meas. | KMITL01 |
| %THDi | 19.5% | 21.75% |
| I_5/I_1 | 17.5% | 19.1% |
| I_7/I_1 | 5.9% | 5.0% |
| I_{11}/I_1 | 4.3% | 5.8% |
| I_{13}/I_1 | 3.2% | 3.2% |
| V_5/V_1 | 6.2% | 5.8% |
| V_7/V_1 | 3.0% | 2.1% |
| V_{11}/V_1 | 3.2% | 3.9% |
| V_{13}/V_1 | 2.3% | 2.5% |
| PF | 0.94 | 0.94 |

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบค่าที่วัดจริงกับผลการจำลอง Plant C

| Quantity | Results | |
|----------|---------|---------|
| | Meas. | KMITL01 |
| %THDi | 35% | 31.41% |
| %THDv | 17.13% | 17.13% |

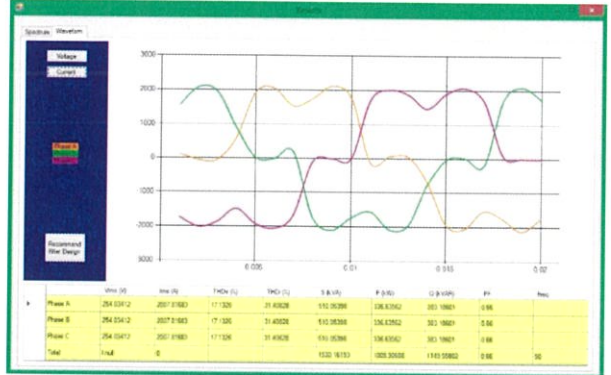
3.3 กรณีตัวอย่างการจำลองระบบไฟฟ้าในโรงงาน Plant C

ระบบโรงงานแห่งนี้มีการรับไฟฟ้าแรงดันปานกลางขนาด 22 kV ผ่านหม้อแปลง 2500 kVA 22/0.4 kV %Impedance 6 เปอร์เซ็นต์โดยโหลดของโรงงานประกอบไปด้วยโหลด DC Drive 6-pulse ขนาด 470 kW 1ตัว, 335 kW 1ตัว, 250 kW 1ตัว, 220kW 2ตัว, 200kW 1ตัว, 75kW 1ตัว, 37kW 1ตัว, 5.5kW 1ตัว จะมีค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏรวมที่จุด PCC เท่ากับ 3021kVA กำลังไฟฟ้าจริงเท่ากับ 1812.5kW และ PF 0.66 ดังในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผังระบบไฟฟ้าภายใน Plant C

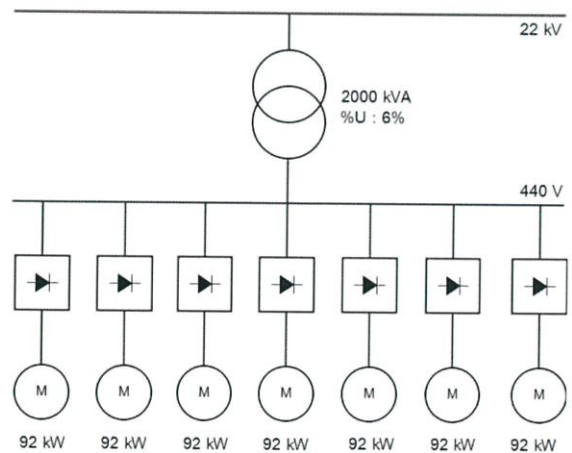
จากผลการจำลอง ผ่าน โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นพบว่าระบบไฟฟ้า Plant C มีคุณภาพทางไฟฟ้าต่ำ กล่าวคือมีค่า %THDi ที่ 31.41% และมีค่า %THDv ที่ 17.13% เทียบกับค่าที่ได้จากการวัดจริงพบว่า มี %THDi ที่ 35.0% และมีค่า %THDv ที่ 17.13% ซึ่งสูงกว่ามาตรฐาน IEEE 519-1992 เช่นกัน ทั้งกระแสและแรงดัน



รูปที่ 5 กราฟแสดงรูปคลื่นกระแสจากโรงงาน Plant C

3.4 กรณีตัวอย่างการจำลองระบบไฟฟ้าในโรงงาน Plant D

ภายในระบบไฟฟ้าโรงงาน Plant D แห่งนี้มีการรับไฟฟ้าระดับแรงดันปานกลางขนาด 22 kV ผ่านหม้อแปลงขนาด 2000 kVA 22/0.44 kV % Impedance 6 เปอร์เซ็นต์ภายในมีการติดตั้งมอเตอร์และอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ชนิด AC Drive 12-pulse ขนาด 92 kW จำนวน 7 ตัว มีค่าตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.98 ดังรูปที่ 5



รูปที่ 6 ผังระบบไฟฟ้าภายใน Plant D

จากผลการจำลอง ผ่าน โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นพบว่าระบบไฟฟ้า Plant D มีคุณภาพทางไฟฟ้าต่ำ กล่าวคือมีค่า %THDi ที่ 7.45% และมีค่า %THDv ที่ 5.45% เทียบกับค่าที่ได้จากการวัดจริงพบว่า มี %THDi ที่ 7.8% และมีค่า %THDv ที่ 5.44% ซึ่งสูงกว่ามาตรฐาน IEEE 519-1992 ที่กำหนดไว้



รูปที่ 7 กราฟแสดงรูปคลื่นกระแสจากโรงงาน Plant D

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบค่าที่วัดจริงกับผลการจำลอง Plant D

| Quantity | Results | |
|----------|---------|---------|
| | Meas. | KMITL01 |
| %THDi | 7.8% | 7.45% |
| %THDv | 5.44% | 5.45% |

จากตารางจะเห็นว่า ค่าที่วัดจริงและค่าที่ได้จากการจำลองบนโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมีความใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ทั้งนั้น ความแม่นยำในการจำลองจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ที่แตกต่างกันไปในแต่ละตามชนิดและผู้ผลิต ซึ่งถ้าหากระบบที่ใช้อ้างอิง มีค่าพารามิเตอร์ของตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ใกล้เคียงกับค่าที่โปรแกรมใช้อ้างอิงจะมีความแม่นยำสูง ซึ่งจะมีการพัฒนาในขั้นต่อไป เพื่อเพิ่มความแม่นยำของโปรแกรม

4. สรุป

ในบทความนี้ได้ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ปัญหาฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ โดยโปรแกรมสามารถจำลองค่าฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจากโหลด DC และ AC Drive กราฟรูปคลื่นที่มีความผิดเพี้ยนและสเปกตรัมของกระแสและแรงดันที่มีความผิดเพี้ยน ค่าที่จำลองได้พบว่ามีความใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง พร้อมทั้งทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE 519-1992 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้า

5. ข้อเสนอแนะ

ในการใช้โปรแกรมเพื่อทำการจำลองการเกิดฮาร์โมนิกส์จากอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ เพื่อไม่ให้เกิดความคลาดเคลื่อนของค่าที่เกิดขึ้นจริงมากเกินไป ควรกรอกพารามิเตอร์ให้ครบที่พิกัดของอุปกรณ์และรวมทั้งค่าของโหลดที่เป็นเชิงเส้นเพื่อให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด ทั้งนี้ค่าที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยเนื่องจากความแตกต่างของอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ในแต่ละแบรนด์ โดยอาจมีการเพิ่มพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์หลายๆชนิด เพื่อให้การคำนวณเป็นไปได้

แม่นยำมากยิ่งขึ้น รวมถึงมีการเพิ่มชนิดประเภทของโหลดที่ผู้ใช้สามารถเลือกนำไปประกอบการจำลอง เพื่อให้มีความใกล้เคียงกับระบบที่ต้องการศึกษา

และอาจมีการปรับปรุงในส่วนของการรับค่าโดยตรงผ่านอุปกรณ์วัด เพื่อความสะดวกของผู้ใช้ที่มีระบบอยู่ก่อนและต้องการพิจารณาค่าพารามิเตอร์และพารามิเตอร์ระบบในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] IEEE Standards Board, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System..IEEE Std. 519-1992, New York , 1993.
- [2] N. Muntean, A. Hedes, S. Scridon, "Investigation of the Harmonic Distortion Generated by Adjustable Speed Drives", **WSEAS International Conference**, 2006, pp. 70-75.
- [3] L. Asiminoaci, S. Hansen, F. Blaabjerg "Predicting Harmonic by Simulation. A case study for high power ASDs". **Electrical Power Quality and Utilization**, Vol. 11, No.1, 2006, 65-75
- [4] จงรัชฎ์ บุญเส็ง, เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิชาคุณภาพไฟฟ้า รหัสวิชา 01026422 ปีการศึกษา 2557
- [5] R.C. Dugan, M. McGranaghan, S. Santoso, H. Beaty. **Electrical Power Systems Quality**. 3rd Ed., New York, McGraw-Hill, 2012.



นายณัท จิระจงเจริญ

เกิดเมื่อ 26 มิถุนายน 2536

คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง



นายบรรณพด โมคศิริ

เกิดเมื่อ 20 กรกฎาคม 2535

คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง



นายปฐมพงษ์ ตั้งไพญญ์

เกิดเมื่อ 20 กรกฎาคม 2535

คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง

Investigation of the Harmonic Distortion Generated by Adjustable Speed Drives

NICOLAE MUNTEAN¹

ALEXANDRU HEDEŞ¹

SEVER SCRIDON²

¹Department of Electrical Engineering, University "POLITEHNICA" of Timișoara

²BEE SPEED AUTOMATIZARI Ltd.

Bd. V. Parvan, No. 2, 300223 – Timișoara

ROMANIA

<http://www.et.upt.ro>

Abstract: - The paper presents a theoretical analysis and an experimental investigation of the harmonic distortion regime produced by high-power AC adjustable speed drives in an industrial electrical network, on a large chemical plant platform. There are investigated the voltage and current harmonic, both in the primary-side and in the secondary-side of the MV/LV power transformer. Simulation results, using both specialized and commercial softwares, are presented and compared with experimental results.

Key-Words:- Power Quality, Harmonic Distortion, Adjustable Speed Drives, Variable Frequency Drives

1. Introduction

The industrial AC Adjustable Speed Drives (ASD), incorporating power electronics have known lately a very dynamic increase due to the positive effects, like: energy savings, process optimization, smooth machine operation, maintenance facilities, etc. Because of its performance, ASD represents today a standard element in all automated process plants.

At the same time, ASD became a significant non-linear load component for power distribution system, responsible for a serious harmonic pollution of the supply system, [1]. In the last years, major efforts have been focussed on harmonic assessment and reduction techniques, as an important aspect of power quality management, [2 - 10].

In [2] is given an assessment of the harmonics found in an electrical distribution system, with a sample of the different waveforms recorded during the survey of several non-linear loads, also including ASD's.

An ASD evaluation test is presented in [3], where are outlined the main concerns when using ASD's in a plant, including harmonics injected into the power system.

A general purpose three-phase harmonic equivalent ASD model is developed and experimentally verified in [4] for analysing harmonic propagation in balanced and unbalanced three-phase power systems with ASD's.

In [5] is proposed a method for determination of line current distortions of VSI-fed ASD (VSI - voltage-source inverter) under consideration of actual drive loading, including the influence of AC

reactance and DC-link capacitance. In this manner, a more detailed description of the harmonic distortion in the line currents of VSI-fed drives is achieved in order to improve the accuracy of harmonic analysis.

In [6] are presented some results obtained by calculation and analysis of higher harmonics of voltage and current resulting from installation of large medium voltage variable frequency drives (VFD) in a gas industrial facility. A harmonic study analysis is done and the results are compared to the requirements according to the European Standard EN 50160 or the IEEE Standard 519.

Performance evaluation tests of 6-pulse, 12-pulse, and 18-pulse drives, compared to the performance of a 6-pulse drive fed by a matrix harmonic filter are presented in [7] and [8] respectively. The main conclusion is that the matrix harmonic filter provides superior harmonic performance.

Finally, in [9] is given the theory of operation of various passive harmonic mitigation techniques, such as: line reactors, tuned harmonic trap filters, 12-pulse and 18-pulse rectification, matrix harmonic filters, and are demonstrated their typical real life performances.

In the present paper, an experimental study of the harmonic distortion produced by ASD's in an industrial supply network, of a large chemical, plant is presented. The experimental results are compared with those derived by simulation with an ASD manufacturer specialized software DRIVESIZE[®], [13], and the well-known PSpice simulation software. There are also presented the associated waveforms of line voltages and currents.

2. Theoretical background

The theoretical study of the harmonic distorted state, associated with non-sinusoidal waveforms of voltage and/or current is usually based on Fourier analysis, [1,2]. In this respect, a periodic non-sinusoidal voltage and a periodic non-sinusoidal current can be expressed as the sum of a DC component, and sine waves with a fundamental frequency ω :

$$\begin{aligned} v(t) &= V_0 + \sum_{h=1}^{\infty} V_{mh} \sin(h \cdot \omega \cdot t + \alpha_h) \\ i(t) &= I_0 + \sum_{h=1}^{\infty} I_{mh} \sin(h \cdot \omega \cdot t + \alpha_h - \varphi_h) \end{aligned} \quad (1)$$

In order to describe quantitatively the distorting state, various definitions of powers, and/or criteria for the quality of electric power have been proposed, [11,12]. In power terms, the distorting state is characterized by the presence of a so-called "distortion power", D , as defined by the following general relationships, where S represents the apparent power, P - the active power and Q - the reactive power respectively:

$$S = V \cdot I = \sqrt{\left(V_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} V_h^2 \right) \cdot \left(I_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \right)} \quad (2)$$

$$P = V_0 \cdot I_0 + \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \cos \varphi_h \quad (3)$$

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \sin \varphi_h \quad (4)$$

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (5)$$

The distortion is characterized by various factors, the most important among them being the "total harmonic distortion", THD, defined as follows, for voltage and current respectively:

$$THD_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{V_h^2}{V_1^2}} \quad THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{I_h^2}{I_1^2}} \quad (6)$$

It can also be defined a "total harmonic factor", THF, relative to the total r.m.s. value of the voltage (V) and of the current (I), as follows:

$$THF_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{V_h^2}{V^2}} \quad THF_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{I_h^2}{I^2}} \quad (7)$$

The above definitions (6) and (7) include the interharmonics as well.

The input power factor can be defined as follows:

$$PF = \frac{P}{S} \quad (8)$$

In the above relationships, V_1 , I_1 represent the fundamental r.m.s. line voltage and line current, $\cos \varphi$ - the displacement power factor, and φ_h - the phase-shift between the instantaneous voltage harmonic (V_h) and the instantaneous current harmonic (I_h).

A non-linear current-distorting load, connected to an electric supply network, at a *Point of Common Coupling* (PCC), produces a voltage distortion, due to the voltage drop across the source (line) shortcircuit impedance, $\underline{Z}_s = R_s + j\omega L_s$, Fig. 1, [1]:

$$\underline{V}_h = \underline{Z}_s \cdot \underline{I}_h = (R_s + j\omega L_s) \cdot \underline{I}_h \quad (9)$$

In such a manner, the linear loads connected in PCC, are "overcharged" with a distortion (harmonic) active power, resulted from the harmonic currents injected into the line by the distorting load.

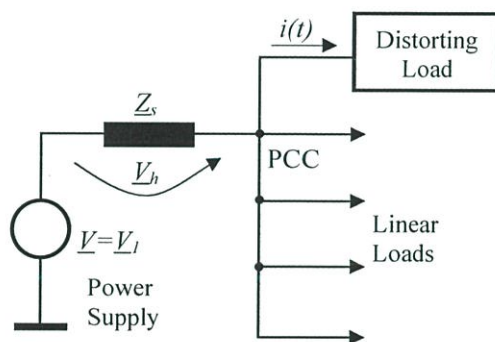


Fig. 1. The mechanism of line voltage distortion.

3. System configuration

The configuration of the power system under investigation is presented in Fig. 2. The dedicated step-down transformer T1, supplies three ASD's, each frequency converter unit being rated at 320kVA/0,4kV. Every ASD is designed to drive, with adjustable speed, a cooling tower fan, with an asynchronous three-phase motor rated at 250kW. The frequency converter has a network interface built with a three-phase half-controlled bridge rectifier (6-pulse rectifier), with a DC-filter capacitor; the rectifier is connected to the mains via a three-phase inductor (AC line reactor). The transformer T1 is in D/y₀ connection, with short circuit impedance $z_{sc}=5,78\%$.

Theoretically, in this case, the input current harmonics can be described as a function of pulse number, p , as follows, [7]:

$$h = (n \cdot p \pm 1); \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad p = 6 \quad (10)$$

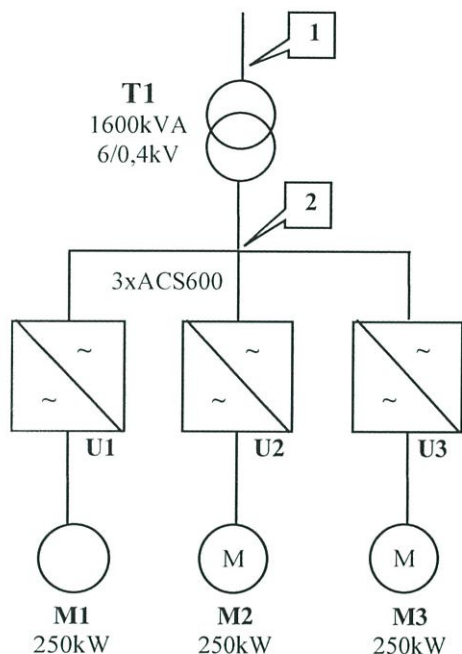


Fig. 2. The power system configuration.

The *harmonic level*, defined as the ratio between the r.m.s. of harmonic component and the r.m.s. of its fundamental, is dependent – in this configuration – on the rectifier input current and the inductance of the input filter, respectively. In this respect, it is

useful to define the *per-unit-voltage impedance*, as follows (neglecting the resistive component):

$$z = \sqrt{3} \frac{2\pi \cdot f \cdot L \cdot I_1}{V} \cdot 100 [\%] \quad (11)$$

where:

L – the total input inductance (line + transformer + filter);

f – the frequency of the line voltage ;

V – the line phase-to-phase voltage;

I_1 – the r.m.s. of fundamental input current.

For the investigated power system, presented in Fig. 2, two measurement sets have been performed both at the medium-voltage side (point “1”), and the low-voltage side (point “2”) respectively. Every ASD unit was set at 90% of the rated load. The experimental results have been compared with the simulated ones. The simulations have been performed using both PSpice and DRIVESIZE simulation tools.

4. Simulated and experimental results

The results are illustrated as follows:

a) The measuring point 2 (LV side): the experimental voltage and current waveforms, are presented in Fig.3; the simulated harmonic spectra of input voltage and current are presented in Fig. 4, and in Fig. 5 respectively; the experimental harmonic spectra are presented in Fig. 6.

b) The measuring point 1 (MV side): the experimental voltage and current waveforms, are presented in Fig.7; the experimental input voltage and current harmonic spectra are given in Fig. 8.

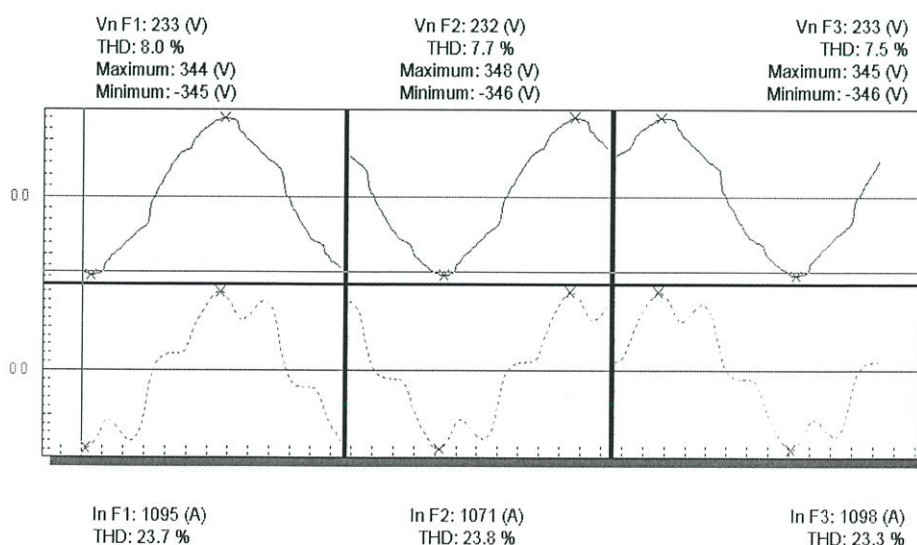
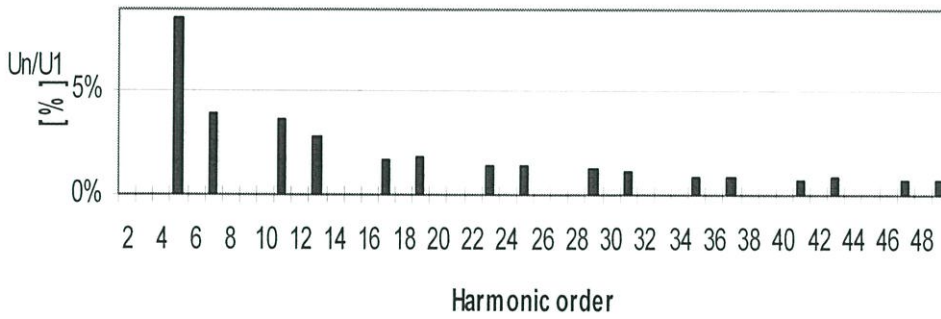
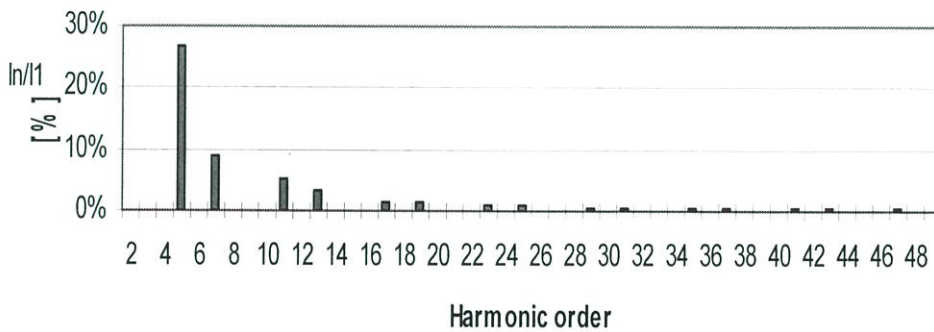


Fig. 3. Recorded waveforms – low-voltage side (point 2).

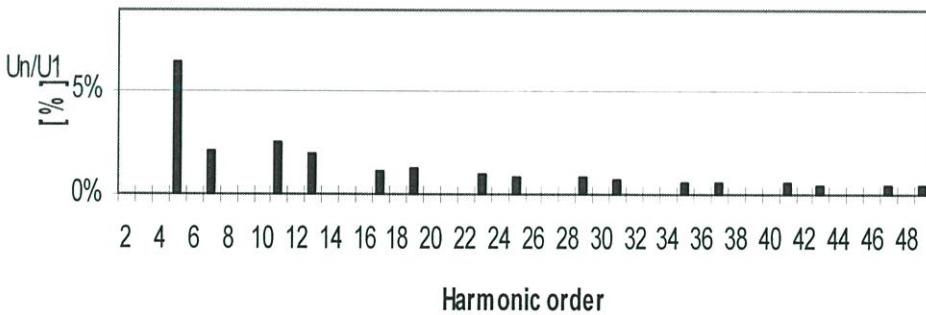


a). Voltage harmonic spectrum

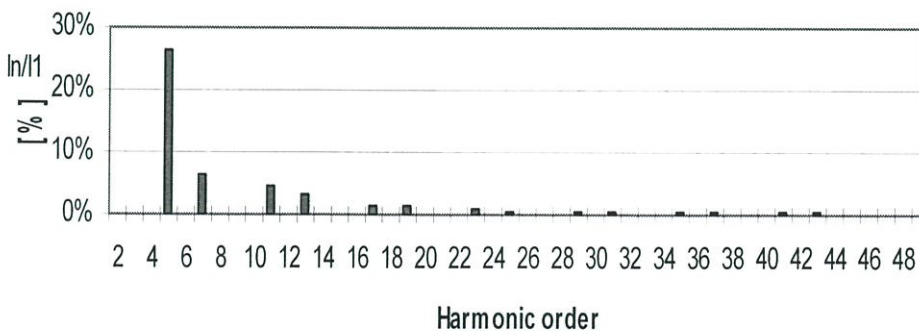


b). Current harmonic spectrum

Fig. 4. The DRIVESIZE simulated input voltage and current harmonic spectra – measuring point 2.



a). Voltage harmonic spectrum



b). Current harmonic spectrum

Fig. 5. The PSpice simulated input voltage and current harmonic spectra – measuring point 2.

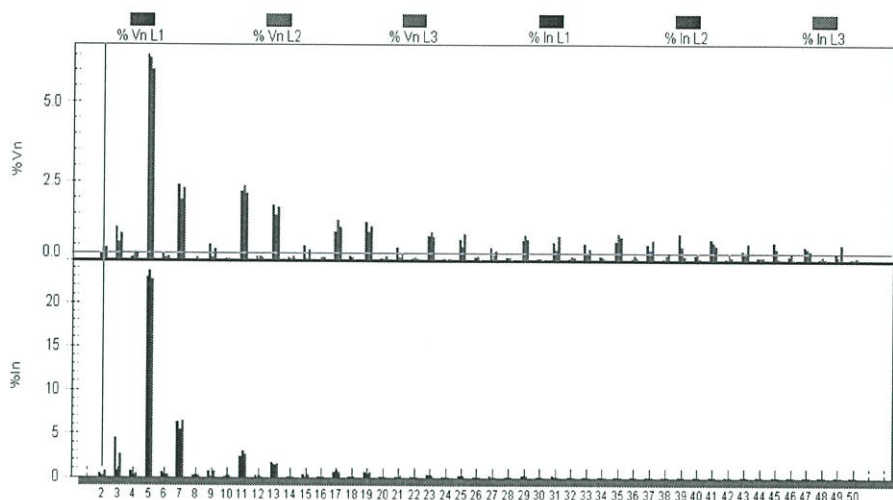


Fig. 6. The experimental input voltage and current harmonic spectra – measuring point 2.

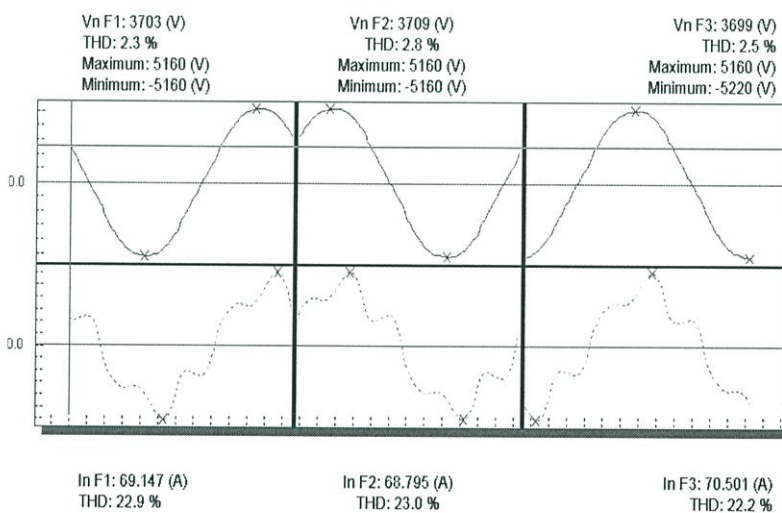


Fig. 7. Recorded waveforms – medium-voltage side (point 1).

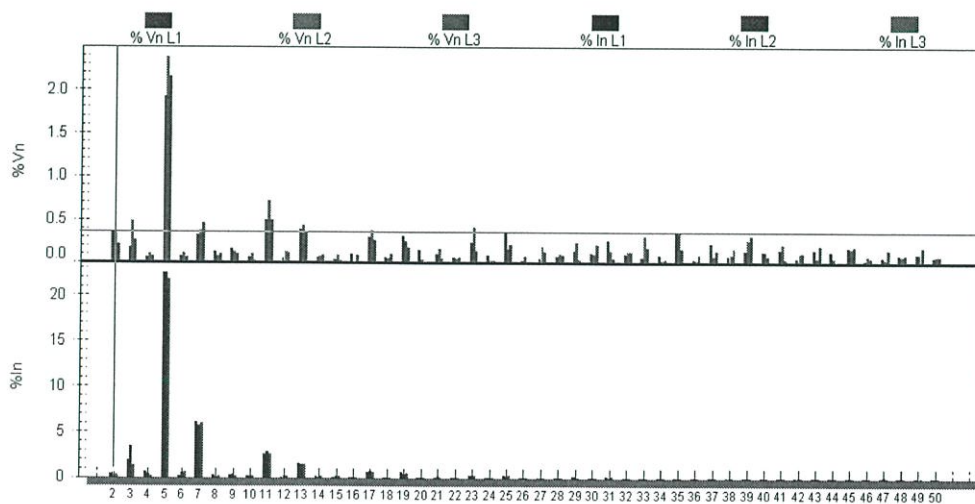


Fig. 8. The experimental input voltage and current harmonic spectra – measuring point 1.

In Table 1 and in Table 2 are synthetically presented the simulated and experimental results, for the LV side and the MV side of the power transformer T1.

Table 1

| Quantity | Results (measurement point no. 2) | | |
|---------------------------------|-----------------------------------|-------|-----------|
| | meas. | SPICE | DRIVESIZE |
| THD _i | 24.3% | 27.9% | 28.9% |
| THD _v | 7.8% | 8.0% | 11.3% |
| I ₅ /I ₁ | 23.1% | 26.5% | 26.6% |
| I ₇ /I ₁ | 6.1% | 6.3% | 8.8% |
| I ₁₁ /I ₁ | 2.7% | 4.5% | 5.3% |
| I ₁₃ /I ₁ | 1.5% | 3.0% | 3.3% |
| V ₅ /V ₁ | 6.3% | 6.5% | 8.6% |
| V ₇ /V ₁ | 2.2% | 2.2% | 4.0% |
| V ₁₁ /V ₁ | 2.2% | 2.5% | 3.7% |
| V ₁₃ /V ₁ | 1.8% | 1.9% | 2.8% |
| cos φ ₁ | 0.98 | 0.98 | 0.98 |
| PF | 0.95 | - | 0.94 |

Table 2

| Quantity | Results (measurement point no. 1) | | |
|---------------------------------|-----------------------------------|-------|-----------|
| | meas. | SPICE | DRIVESIZE |
| THD _i | 23.3% | 27.5% | 28.9% |
| THD _v | 2.5% | 2.6% | 2.6% |
| I ₅ /I ₁ | 22.2% | 26.0% | 26.6% |
| I ₇ /I ₁ | 6.0% | 7.0% | 8.8% |
| I ₁₁ /I ₁ | 2.7% | 4.3% | 5.3% |
| I ₁₃ /I ₁ | 1.5% | 3.0% | 3.3% |
| V ₅ /V ₁ | 2.1% | 2.0% | 2.0% |
| V ₇ /V ₁ | 0.4% | 6.0% | 0.9% |
| V ₁₁ /V ₁ | 0.6% | 7.0% | 0.9% |
| V ₁₃ /V ₁ | 0.4% | 5.0% | 0.7% |
| cos φ ₁ | 0.96 | 0.97 | 0.98 |
| PF | 0.93 | - | 0.942 |

5. Conclusion

The main conclusions that can be inferred from the above investigations, are:

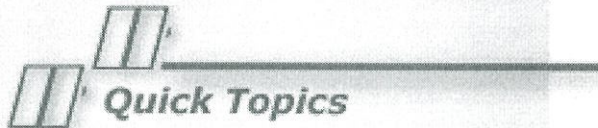
- The ASD represents a current distortion load for the electric supply network (THD_i >> THD_v);
- There are no significant differences between the MV and the LV side current harmonic levels, inclusive the both THD_i;
- The voltage distortion is higher at the LV side of the power transformer T1;
- The fifth-order current harmonic is dominant in the input current harmonic spectrum;
- There is a fairly agreement between the simulated and the measured corresponding results.

References:

- [1] N. Mohan, T. M. Undeland *Power Electronics. Converters, Applications and Design*, John Wiley & Sons Inc., New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1995.
- [2] L. M. Tolbert, H. D. Hollis, P. S. Hale Jr., Survey of Harmonics Measurements in Electrical Distribution Systems, *IEEE IAS Annual Meeting*, Oct. 6-10, 1996, San Diego, CA, pp. 2333-2339.
- [3] E. G. Strangas, V. E. Wagner, T. D. Unruh, Variable Speed Drives Evaluation Test, *IEEE Industry Applications Magazine*, Jan./Feb. 1998, pp. 53-57.
- [4] W. Xu, H. W. Dommel, M. B. Hughes, G. W., K. Chang, L. Tan, Modelling of Adjustable Speed Drives for Power System Harmonic Analysis, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 14, No. 2, April 1999, pp. 595-602.
- [5] M. Grötzbach, R. Redmann, Line Current Harmonics of VSI-Fed Adjustable-Speed Drives, *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 36, No. 2, March/April 2000, pp. 683-690.
- [6] D. Ban, Z. Maljković, M. Puzak, Harmonic Study Analysis in Gas Industrial Facilities Employing Large Variable Frequency Drives, *EPE-PEMC 2002*, Dubrovnik-Cavtat, P.1-P7.
- [7] K. M. Hink, Harmonic Mitigation of 12-Pulse Drives with Unbalanced Input Line Voltages, MTE Corporation, www.mte.com.
- [8] K. M. Hink, 18-Pulse Drives and Voltage Unbalance, MTE Corporation, www.mte.com.
- [9] *** Performance of Harmonic Mitigation Alternatives, MTE Corporation, www.mte.com.
- [10] *** Guide to Harmonics with AC Drives, *Technical Guide No. 6*, 3AFE 64292714, ABB Oy, 2002.
- [11] * * * Practical Definitions for Powers in Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion", IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations: Effects on Meter Performance and Definitions of Power, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 11, No. 1, Jan. 1996, pp. 79-87.
- [12] Hyosung K., Blaabjerg F., Bak-Jensen Brigitte, Unified Definition of Powers in Single-Phase Systems and Three-Phase Systems, *Proceedings of EPE 2001*, Graz, CD-ROM Version.
- [13] ABB, *DRIVESIZE*, www.abb.com.

ภาคผนวก ข

คุณสมบัติการเกิดฮาร์โมนิกส์จากเครื่องขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ใช้อ้างอิง



Quick Topics

- General
- In This Section
- Drive System Considerations
- MG vs. Static Drive
- AC Motor Controls
- Harmonic Analysis
- AC Static Drive/RFI
- Modernization



Technical Publications

In This Section

Over time, several “universal” issues affecting elevator installation and/or modernization have repeatedly been of concern. This section contains technical “white” papers addressing several of these issues, including:

- Drive System Considerations
- Motor Generator vs. Static Drives: A look at when it might be appropriate to stay with motor generator drives rather than switching to static drives.
- AC Motor Controls for Elevators: A review of pertinent issues regarding proper application and installation of AC motors and drives.
- Harmonic Analysis and Comparison: A discussion of harmonic analysis and comparison of DC and AC static drives.
- AC Inverter Drives & RFI: A review of the generation of electrical noise and effects of RFI in AC static drives.
- Modernization Performance Charts



Drive System Considerations

This introductory information is a preface to the separate white papers in this section, providing information about why they were written, including:

- Purpose
- Overview
- Communication is Vital
- Drive Technology

Purpose

This Technical Publication discusses drive system considerations for selection of elevator drives and possible side effects associated with static drives.

Motion Control Engineering manufactures elevator control systems using motor generator and DC-SCR or AC static drives. MCE's experience as a control system supplier suggests the need to improve industry understanding regarding the application of elevator control drive systems.

Overview

Many modernization projects use static drives successfully (either DC-SCR or AC inverter type). On the other hand, a few projects have presented significant difficulties from which much can be learned.

As an elevator control system supplier, MCE has become aware of problems that result from the use of static drives. These situations underscore the need to share experiences and maintain an open dialogue between elevator control suppliers, consultants, contractors and other interested parties.

Communication is Vital

Sometimes, neither consultants, contractors nor control suppliers alone recognize a potential problem. Communication is vital to the successful installation of static drives and it is, of course, preferable to address as many issues as possible up front. Mutual recognition of potential issues is the key to a successful project. This is particularly true for modernization.

Occasionally, a problem comes as a total surprise. The result is chaos -- especially for the end user, who cannot understand how knowledgeable elevator industry people could have failed to foresee the difficulty. Some specification writers have attempted to address issues in advance by specifying that, "The contractor and/or control supplier shall be responsible for everything that may occur as the result of the application of static drives." This is not a reasonable solution.

To best serve the customer and the industry, it is necessary to establish a continuous dialogue. There are issues that can be recognized up front and potential difficulties prevented. Consultants, contractors and control suppliers working as a team can research, evaluate and resolve issues.

Drive System Considerations

An example of an issue not properly identified and adequately addressed is the case where elevators were converted to DC-SCR static drives. During the completion stages of the project it was discovered that the existing building power supply was inadequate. What can an owner or, for that matter, a supplier do when they have no prior knowledge of this type of job specific condition?

The contractor, consultants and others directly familiar with a project should recognize the need for power system evaluation. Everyone involved with a modernization project should remember that existing elevators frequently do not run at contract speed. Further, static drives may affect AC power distribution systems differently than original DC or AC elevator controls.

Drive Technology

Modern drive technology includes motor generator drives using static field control, DC-SCR static drives and AC static drives. These state-of-the-art drives raise additional issues for consideration.

Old relay technology had little or no effect on the AC line. This equipment generated little or no noise, and operated well with emergency power generators.

Static drives present issues for new construction and retrofitting (modernization) of existing systems. Static drives are preferred, in most cases, over motor generator drives. For new construction, the static drive option can be evaluated and used as the basis for design of the elevator machine room and the AC power distribution system. For modernization projects, it is important to recognize the potential for damaging effects from static drives, including:

- Degraded performance of emergency power generators
- Additional heating and induction motor power losses
- Audible noise
- Interference with sensitive medical equipment
- Interference with computers
- Interference with radio and television equipment

Noise is generated as a result of static drive switching and the way these devices draw current from the AC line. Static drives use switching devices, including SCRs, transistors, and IGBTs, that switch very rapidly, producing Radio Frequency Interference (RFI). Static drives also produce current distortion (harmonic distortion) on the AC line.

Types of noise include:

- Audible Noise - Airborne
- Physical Noise - Structure conducted
- Electrical Noise - Radiated or conducted
 - Radiated Noise from wires connected to a drive becomes an issue when the magnitude creates RFI that interferes with radio receivers and other devices.
 - Conducted Noise transmitted from the drive through electrical conductors can result in harmonic distortion, line notching, and other disturbances.

While static drives have some unfriendly characteristics, their overall performance makes them highly desirable. When the implications are understood, static drives frequently provide the best total solution for elevator control.




Conclusion

The MCE Technical Publication series is intended to be an informative catalyst for ongoing dialogue and sharing of information between consultants, elevator contractors, owners and other interested parties. MCE Technical Publications are available on our website at www.mceinc.com.

Don Alley, Chief Engineer
MCE R&D Staff
January 1996

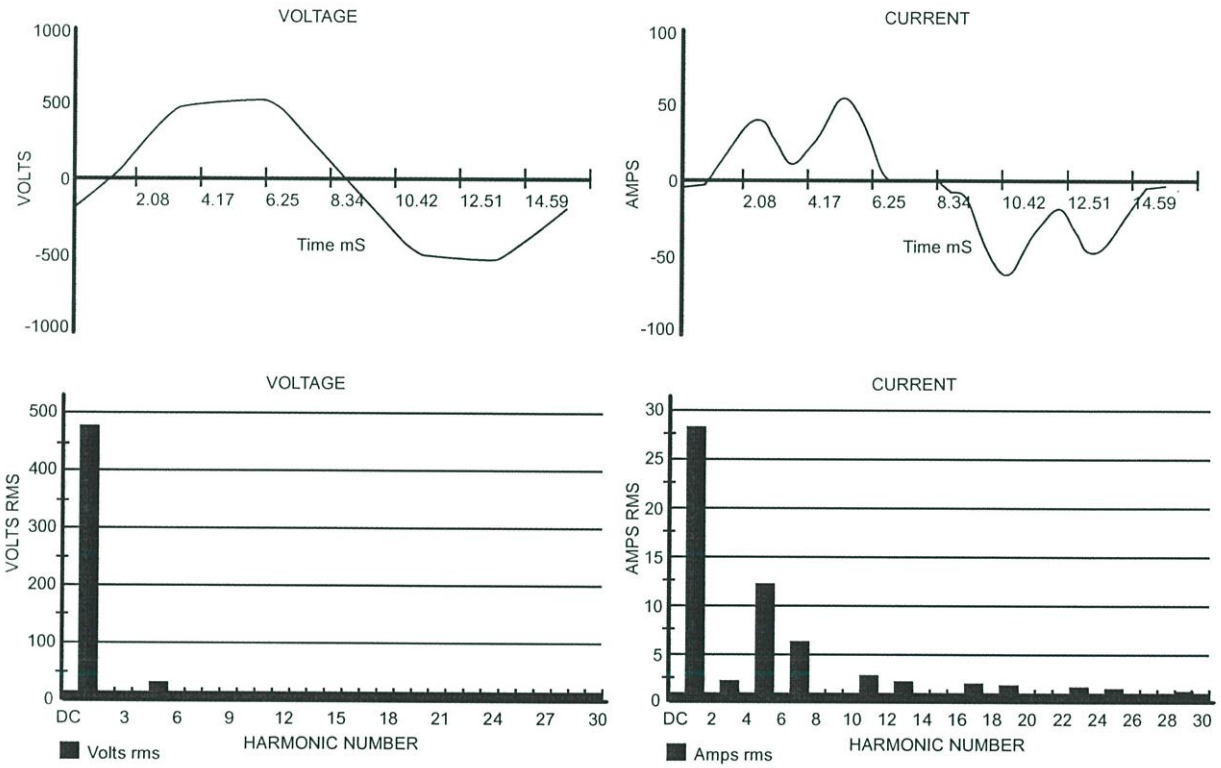
Note

 It is MCE's philosophy to share information with interested parties. To this end MCE grants unlimited reproduction rights, with proper attribution, to NAVTP and/or NAEC to further engineering and technical excellence within the elevator industry.

Yaskawa Flux Vector VFAC Drive

MCE test tower data; 350 fpm, 20 HP AC motor, full load up acceleration. Ideal voltage and current should be illustrated as perfect sine waves. Fifth and seventh current harmonics are severe. The voltage waveform peaks are “flattened” unlike either SCR drive.

Figure 17.4 Yaskawa Flux Vector VFAC Drive





Yaskawa Flux Vector VFAC Drive

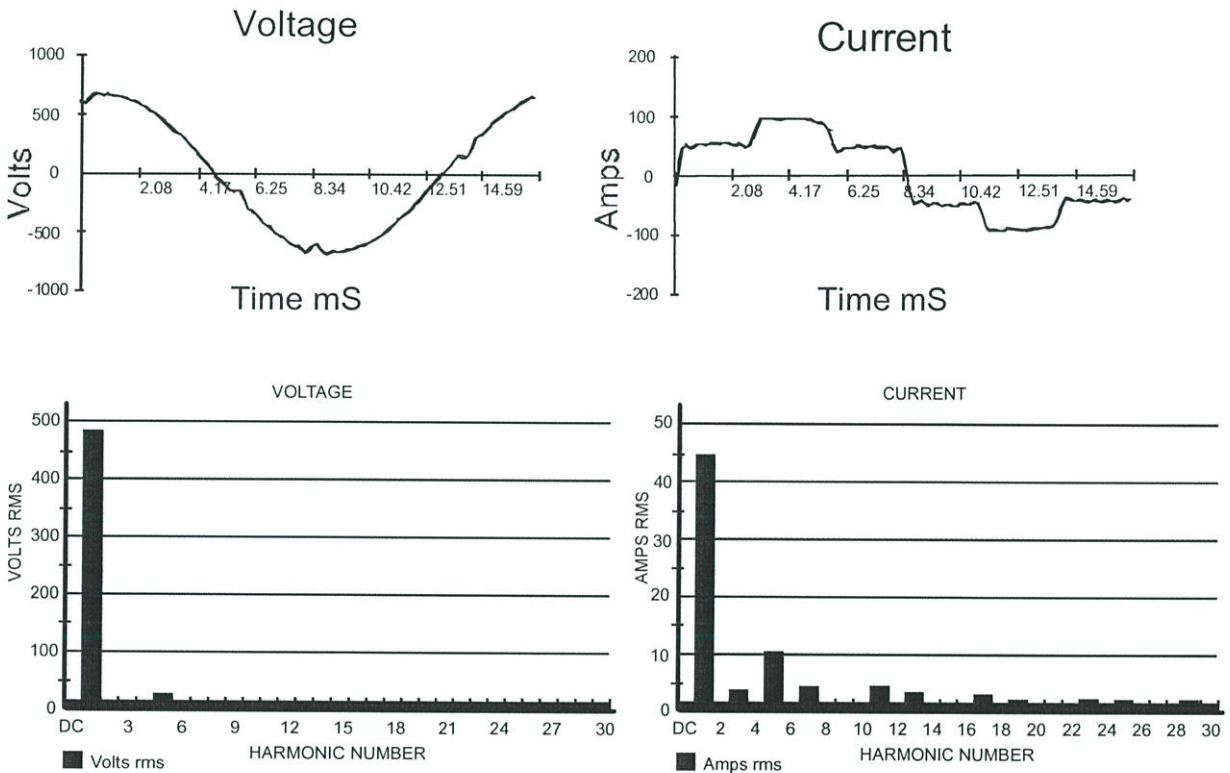
MCE test tower data; 350 fpm, 20HP AC motor, full load up acceleration. Data is considered to be typical for most VFAC drives. RMS Current Total Harmonic Distortion (THD Rms) or 44.3%. Current magnitude (Imag) of the largest harmonic (fifth) as a percentage of the 60 Hz fundamental, or 12.1 amps/28.4 amps = 42.6%.

| Readings - 11/02/94 08:43:50 | | | | | | | | |
|------------------------------|----------|-------|-----------|---------|-------|----------------------|---------|------------|
| Summary Information | | | | | | Recorded Information | | |
| | | | Voltage | Current | | | | |
| Frequency | 60.0 | | RMS | 473 | 31.7 | V RMS | | |
| Power | | | Peak | 652 | 59.3 | A RMS | | |
| KW | 13.3 | | DC Offset | -2 | -0.4 | V Peak | | |
| KVA | 15.0 | | Crest | 1.38 | 1.87 | A Peak | | |
| KVAR | 2.8 | | THD Rms | 3.8 | 44.3 | V THD-F% | | |
| Peak KW | 38.8 | | THD Fund | 3.8 | 49.4 | A THD-F% | | |
| Phase | 12° lead | | HRMS | 18 | 14.0 | K Watts | | |
| Total PF | 0.89 | | KFactor | | 7.9 | KVAR | | |
| DPF | 0.98 | | | | | TPF | | |
| | | | | | | DPF | | |
| | | | | | | Frequency | | |
| Harmonic Distortion | | | | | | | | |
| | Freq. | V Mag | %V RMS | V Phase | I Mag | % I RMS | I Phase | Power (KW) |
| DC | 0.0 | 2 | 0.4 | 0 | 0.4 | 1.2 | 0 | 0.0 |
| 1 | 60.0 | 473 | 100.3 | -12 | 28.4 | 90.6 | 0 | 13.1 |
| 2 | 119.9 | 0 | 0.1 | -154 | 0.4 | 1.3 | 65 | 0.0 |
| 3 | 179.9 | 1 | 0.2 | -75 | 1.9 | 6.0 | 158 | 0.0 |
| 4 | 239.8 | 0 | 0.0 | -11 | 0.1 | 0.4 | -125 | 0.0 |
| 5 | 299.8 | 18 | 3.8 | 154 | 12.1 | 38.7 | -158 | 0.1 |
| 6 | 359.8 | 0 | 0.0 | 172 | 0.1 | 0.2 | 89 | 0.0 |
| 7 | 419.7 | 1 | 0.2 | -141 | 6.1 | 19.6 | 9 | 0.0 |
| 8 | 479.7 | 0 | 0.0 | 72 | 0.1 | 0.2 | -84 | 0.0 |
| 9 | 539.7 | 0 | 0.0 | -41 | 0.2 | 0.5 | -11 | 0.0 |
| 10 | 599.6 | 0 | 0.0 | -146 | 0.1 | 0.2 | 47 | 0.0 |
| 11 | 659.6 | 2 | 0.3 | 59 | 2.2 | 7.1 | 133 | 0.0 |
| 12 | 719.5 | 0 | 0.0 | 46 | 0.0 | 0.0 | -95 | 0.0 |
| 13 | 799.5 | 1 | 0.2 | 120 | 1.2 | 3.9 | -106 | 0.0 |
| 14 | 839.5 | 0 | 0.0 | 5 | 0.0 | 0.1 | 150 | 0.0 |
| 15 | 899.4 | 0 | 0.0 | 164 | 0.1 | 0.2 | -128 | 0.0 |
| 16 | 959.4 | 0 | 0.0 | 42 | 0.0 | 0.0 | -165 | 0.0 |
| 17 | 1019.3 | 1 | 0.2 | -38 | 1.0 | 3.1 | 27 | 0.0 |
| 18 | 1079.3 | 0 | 0.0 | 39 | 0.0 | 0.0 | -32 | 0.0 |
| 19 | 1139.3 | 1 | 0.1 | -1 | 0.5 | 1.7 | 131 | 0.0 |
| 20 | 1199.2 | 0 | 0.0 | 92 | 0.0 | 0.1 | 44 | 0.0 |
| 21 | 1259.3 | 0 | 0.0 | 53 | 0.1 | 0.2 | 46 | 0.0 |
| 22 | 1319.2 | 0 | 0.0 | 17 | 0.0 | 0.1 | -176 | 0.0 |
| 23 | 1379.1 | 1 | 0.1 | -143 | 0.5 | 1.7 | -83 | 0.0 |
| 24 | 1439.1 | 0 | 0.0 | 41 | 0.0 | 0.0 | 81 | 0.0 |
| 25 | 1499.0 | 1 | 0.1 | -120 | 0.3 | 0.9 | 7 | 0.0 |
| 26 | 1559.0 | 0 | 0.0 | 134 | 0.0 | 0.1 | -54 | 0.0 |
| 27 | 1619.0 | 0 | 0.0 | -144 | 0.1 | 0.2 | -37 | 0.0 |
| 28 | 1678.9 | 0 | 0.0 | 155 | 0.0 | 0.0 | -70 | 0.0 |
| 29 | 1738.9 | 1 | 0.1 | 89 | 0.4 | 1.1 | 169 | 0.0 |
| 30 | 1798.8 | 0 | 0.0 | 113 | 0.0 | 0.0 | 59 | 0.0 |
| 31 | 1858.8 | 0 | 0.1 | 136 | 0.2 | 0.7 | -119 | 0.0 |

Conventional 6-Pulse DC SCR Drive

Data taken from MCE test tower; 350 fpm, 20 HP DC motor, full load up acceleration. Ideal voltage and current should be illustrated as perfect sine waves. Note that the largest current harmonics are the fifth and seventh. This data is typical and would be identical for a 6-pulse SCR drive of any manufacturer.

Figure 17.5 Conventional 6-Pulse DC SCR Drive





Conventional 6-Pulse DC SCR Drive

Data from MCE test tower, 350 fpm, 20HP DC motor, full load up acceleration. Note particularly the RMS Current Total Harmonic Distortion (THD RMS of 25.9%). Also note the current magnitude (Imag) of the largest (fifth) as a percentage of the 60 Hz fundamental, or 10.6 amps/45.5 amps = 23.3%.

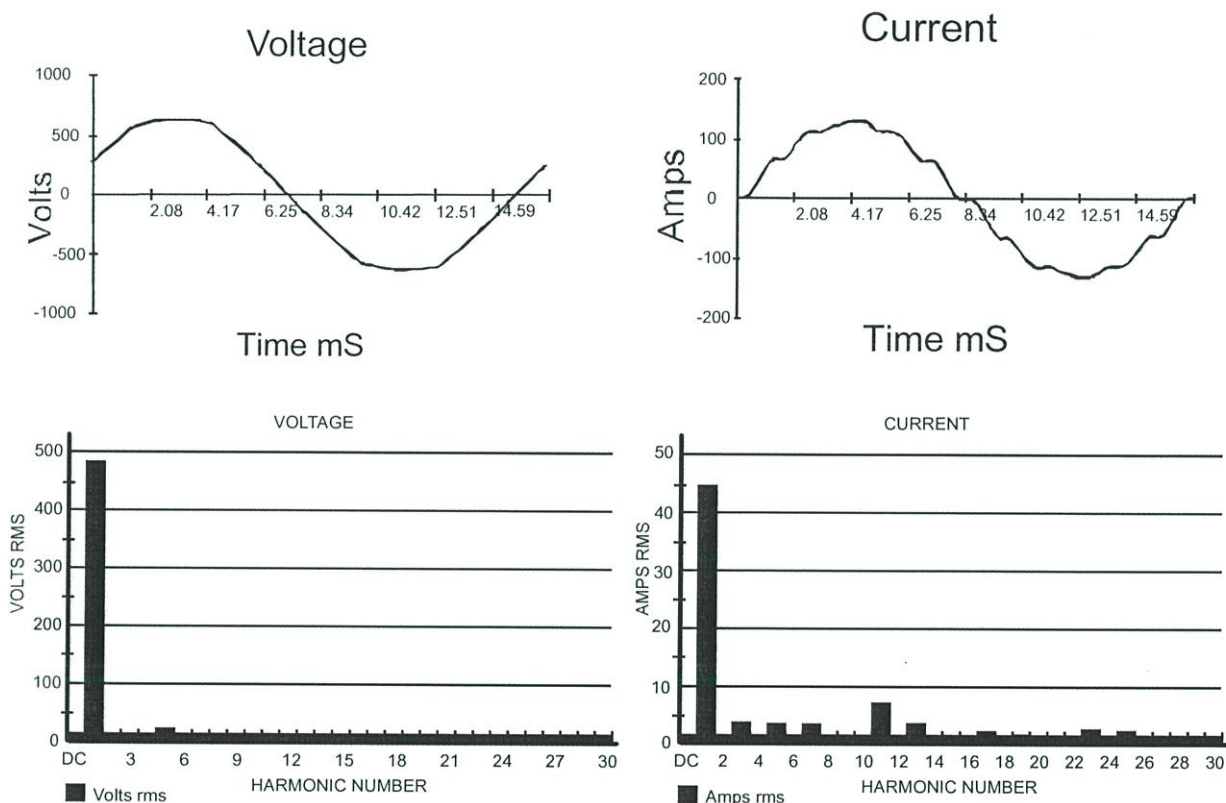
| Readings - 09/22/94 16:12:57 | | | | | |
|------------------------------|---------|-----------|---------|---------|----------------------|
| Summary Information | | | | | Recorded Information |
| | | | Voltage | Current | |
| Frequency | 60.0 | RMS | 484 | 47.3 | V RMS |
| Power | | Peak | 695 | 65.9 | A RMS |
| KW | 16.8 | DC Offset | -2 | -0.3 | V Peak |
| KVA | 22.9 | Crest | 1.44 | 1.39 | A Peak |
| KVAR | 14.4 | THD Rms | 2.6 | 25.9 | V THD-F% |
| Peak KW | 46.8 | THD Fund | 2.6 | 26.9 | A THD-F% |
| Phase | 41° lag | HRMS | 12 | 12.2 | K Watts |
| Total PF | 0.74 | KFactor | | 5.1 | KVAR |
| DPF | 0.76 | | | | TPF |
| | | | | | DPF |
| | | | | | Frequency |

| Harmonic Distortion | | | | | | |
|---------------------|--------|-------|--------|---------|-------|---------|
| | Freq. | V Mag | %V RMS | V Phase | I Mag | % I RMS |
| DC | 0.0 | 2 | 0.3 | 0 | 0.3 | 0.6 |
| 1 | 60.0 | 484 | 100.3 | 41 | 45.5 | 96.9 |
| 2 | 119.9 | 0 | 0.1 | 65 | 0.7 | 1.5 |
| 3 | 179.9 | 1 | 0.1 | 56 | 2.0 | 4.2 |
| 4 | 239.8 | 0 | 0.0 | -105 | 0.1 | 0.1 |
| 5 | 299.8 | 11 | 2.4 | 130 | 10.6 | 22.5 |
| 6 | 359.8 | 0 | 0.0 | -95 | 0.1 | 0.2 |
| 7 | 419.7 | 2 | 0.5 | 49 | 3.1 | 6.5 |
| 8 | 479.7 | 0 | 0.0 | -39 | 0.1 | 0.3 |
| 9 | 539.7 | 0 | 0.0 | 142 | 0.4 | 0.8 |
| 10 | 599.6 | 0 | 0.0 | 30 | 0.1 | 0.3 |
| 11 | 659.6 | 2 | 0.5 | -90 | 3.3 | 7.0 |
| 12 | 719.5 | 0 | 0.0 | -13 | 0.2 | 0.3 |
| 13 | 799.5 | 2 | 0.3 | -138 | 2.1 | 4.5 |
| 14 | 839.5 | 0 | 0.0 | 23 | 0.1 | 0.1 |
| 15 | 899.4 | 0 | 0.1 | -98 | 0.4 | 0.8 |
| 16 | 959.4 | 0 | 0.0 | 84 | 0.0 | 0.1 |
| 17 | 1019.3 | 1 | 0.3 | 108 | 1.7 | 3.6 |
| 18 | 1079.3 | 0 | 0.0 | 94 | 0.1 | 0.1 |
| 19 | 1139.3 | 1 | 0.3 | 39 | 1.4 | 3.0 |
| 20 | 1199.2 | 0 | 0.0 | -49 | 0.0 | 0.1 |
| 21 | 1259.3 | 0 | 0.0 | 70 | 0.3 | 0.7 |
| 22 | 1319.2 | 0 | 0.0 | 0 | 0.1 | 0.2 |
| 23 | 1379.1 | 1 | 0.3 | -84 | 1.1 | 2.3 |
| 24 | 1439.1 | 0 | 0.0 | -40 | 0.1 | 0.2 |
| 25 | 1499.0 | 1 | 0.3 | -146 | 1.0 | 2.2 |
| 26 | 1559.0 | 0 | 0.0 | -47 | 0.1 | 0.1 |
| 27 | 1619.0 | 0 | 0.0 | -136 | 0.3 | 0.6 |
| 28 | 1678.9 | 0 | 0.0 | 41 | 0.0 | 0.1 |
| 29 | 1738.9 | 1 | 0.2 | 86 | 0.7 | 1.4 |
| 30 | 1798.8 | 0 | 0.0 | 96 | 0.0 | 0.1 |
| 31 | 1858.8 | 1 | 0.2 | 34 | 0.7 | 1.5 |

12-Pulse SCR Drive (MCE System 12)

Data taken from MCE test tower; 350 fpm, 20 HP DC motor, full load up acceleration. Ideal voltage and current should be illustrated as perfect sine waves. Note that the largest current harmonics are the eleventh and thirteenth.

Figure 17.6 MCE 12-Pulse SCR Drive





12-Pulse DC SCR Drive (MCE SYSTEM 12)

Data taken from MCE test tower, 350 fpm, 20 HP DC motor, full load up acceleration. Note particularly the RMS Current Total Harmonic Distortion (THD RMS of 13.5%. Also note the current magnitude (Imag) of the largest (eleventh) as a percentage of the 60 Hz fundamental, or 4.9 amps/45.3 amps = 11.1%.

| Readings - 08/25/94 11:40:17 | | | | | |
|------------------------------|---------|-----------|---------|---------|----------------------|
| Summary Information | | | | | Recorded Information |
| | | | Voltage | Current | |
| Frequency | 60.0 | RMS | 487 | 44.7 | V RMS |
| Power | | Peak | 699 | 65.1 | A RMS |
| KW | 17.8 | DC Offset | -2 | -0.3 | V Peak |
| KVA | 21.8 | Crest | 1.43 | 1.46 | A Peak |
| KVAR | 12.0 | THD Rms | 2.6 | 13.5 | V THD-F% |
| Peak KW | 45.1 | THD Fund | 2.6 | 13.6 | A THD-F% |
| Phase | 34° lag | HRMS | 13 | 6.0 | K Watts |
| Total PF | 0.82 | KFactor | | 3.5 | KVAR |
| DPF | 0.83 | | | | TPF |
| | | | | | DPF |
| | | | | | Frequency |

| Harmonic Distortion | | | | | | |
|---------------------|-----------|-------|--------|---------|-------|---------|
| | Frequency | V Mag | %V RMS | V Phase | I Mag | % I RMS |
| DC | 0.0 | 2 | 0.4 | 0 | 0.3 | 0.7 |
| 1 | 60.0 | 487 | 100.3 | 34 | 44.3 | 99.8 |
| 2 | 119.9 | 1 | 0.1 | -107 | 0.1 | 0.1 |
| 3 | 179.9 | 1 | 0.2 | 70 | 1.8 | 4.1 |
| 4 | 239.8 | 0 | 0.1 | -75 | 0.1 | 0.1 |
| 5 | 299.8 | 12 | 2.4 | 86 | 1.3 | 2.9 |
| 6 | 359.8 | 0 | 0.0 | 67 | 0.0 | 0.0 |
| 7 | 419.7 | 1 | 0.3 | 15 | 1.4 | 3.2 |
| 8 | 479.7 | 0 | 0.0 | 138 | 0.0 | 0.1 |
| 9 | 539.7 | 0 | 0.0 | -140 | 0.4 | 0.9 |
| 10 | 599.6 | 0 | 0.0 | 165 | 0.1 | 0.1 |
| 11 | 659.6 | 3 | 0.7 | 105 | 4.9 | 11.1 |
| 12 | 719.5 | 0 | 0.0 | -97 | 0.1 | 0.2 |
| 13 | 799.5 | 2 | 0.3 | -3 | 1.5 | 3.3 |
| 14 | 839.5 | 0 | 0.0 | -59 | 0.0 | 0.1 |
| 15 | 899.4 | 0 | 0.0 | -25 | 0.1 | 0.2 |
| 16 | 959.4 | 0 | 0.0 | 141 | 0.0 | 0.1 |
| 17 | 1019.3 | 1 | 0.1 | -57 | 0.5 | 1.2 |
| 18 | 1079.3 | 0 | 0.0 | -158 | 0.0 | 0.0 |
| 19 | 1139.3 | 0 | 0.1 | 12 | 0.4 | 0.8 |
| 20 | 1199.2 | 0 | 0.0 | 171 | 0.0 | 0.0 |
| 21 | 1259.3 | 0 | 0.0 | 8 | 0.1 | 0.3 |
| 22 | 1319.2 | 0 | 0.0 | 26 | 0.0 | 0.1 |
| 23 | 1379.1 | 2 | 0.3 | -84 | 1.4 | 3.0 |
| 24 | 1439.1 | 0 | 0.0 | -10 | 0.1 | 0.2 |
| 25 | 1499.0 | 1 | 0.3 | -146 | 0.8 | 1.8 |
| 26 | 1559.0 | 0 | 0.0 | 169 | 0.0 | 0.1 |
| 27 | 1619.0 | 0 | 0.0 | -65 | 0.0 | 0.0 |
| 28 | 1678.9 | 0 | 0.0 | -128 | 0.0 | 0.1 |
| 29 | 1738.9 | 0 | 0.1 | 157 | 0.2 | 0.4 |
| 30 | 1798.8 | 0 | 0.0 | -94 | 0.0 | 0.0 |
| 31 | 1858.8 | 0 | 0.1 | -115 | 0.1 | 0.3 |

Supplemental Job Site Analysis

Purpose

Supplemental jobsite analysis was undertaken to compare the results of the Test Tower study with actual jobsite measurements. The general discussions of the Test Tower Research are applicable to this supplemental study.

Tested Drives

Two types of static drives were evaluated at the jobsite. They are the Magnatek 6-pulse DC SCR drive and MCE's **SYSTEM 12** using 12-pulse DC SCR drive. The job sites are as follows:

1. 1) International Towers Building -- 700 fpm; 2500 lb capacity; Magnatek 6-pulse drive; General Dynamics ED machine; 35.4 HP; 115 amp/260 volt armature; 480 AC line voltage.
2. 2) Plaza Building -- 500 fpm; 3000 lb capacity; MCE **SYSTEM 12**; Otis 131HT machine; 32 HP; 177 amp/150 volt armature; 480 AC line voltage.

Testing Methodology

The gearless elevators were tested using a Fluke Model 41 Power Harmonics Analyzer for all measurements and computations. Data was taken from the primary side of the isolation transformers and downloaded to a printer. It was decided to measure worst-case conditions for the drives, which in the absence of test weights, is during empty car acceleration in the down direction.

Evaluating the Data

Conventional 6-Pulse DC SCR Drive - International Towers Building

The voltage waveform doesn't provide much information because it is very close to a sine wave. This is confirmed by measured Voltage Total Harmonic Distortion of 4.1% (THD Rms under the Voltage column). Note that voltage harmonics are insignificant on the bar graphs.

For a 6-pulse DC SCR drive, the main harmonics are five, seven, eleven, thirteen and so forth. Looking at the data table it is important to note that Current Total Harmonic Distortion is 26.9% (THD Rms under the Current column). The current magnitude (Imag) column shows the largest harmonic (fifth) as a percentage of the 60 Hz fundamental, or $13.7 \text{ amps} / 64.7 \text{ amps} = 21.2\%$.

12-Pulse DC SCR Drive - Plaza Building

As expected, the 12-pulse voltage waveform doesn't reveal any more information than the 6-Pulse voltage waveform because it also closely approximates a sine wave. The Voltage Total Harmonic Distortion confirms this, measured at only 2.5% lower than that of the



6-pulse DC SCR drive.

The SYSTEM 12 current waveform more closely resembles that of an ideal sine wave than the waveform for the 6-pulse DC SCR. When the current harmonics are examined, one can see they are greatly reduced in comparison to the 6-pulse drive. The significant harmonics for the 12-pulse drive are 11, 13, 23, 25 and so forth.

Finally, checking the data table, the Current Total Harmonic Distortion is **only 6.5%** (THD Rms under the Current column). This represents meaningful improvement over the 6-pulse DC SCR drive. The current magnitude (Imag) column shows the largest harmonic (11th) as a percentage of the 60 Hz fundamental, or $4.7 \text{ amps}/93.3 \text{ amps} = 5.0\%$.

The Plaza Building SYSTEM 12 drive offers a factor of four improvement in Total Harmonic Distortion when compared to the International Towers Building 6-pulse DC SCR drive.

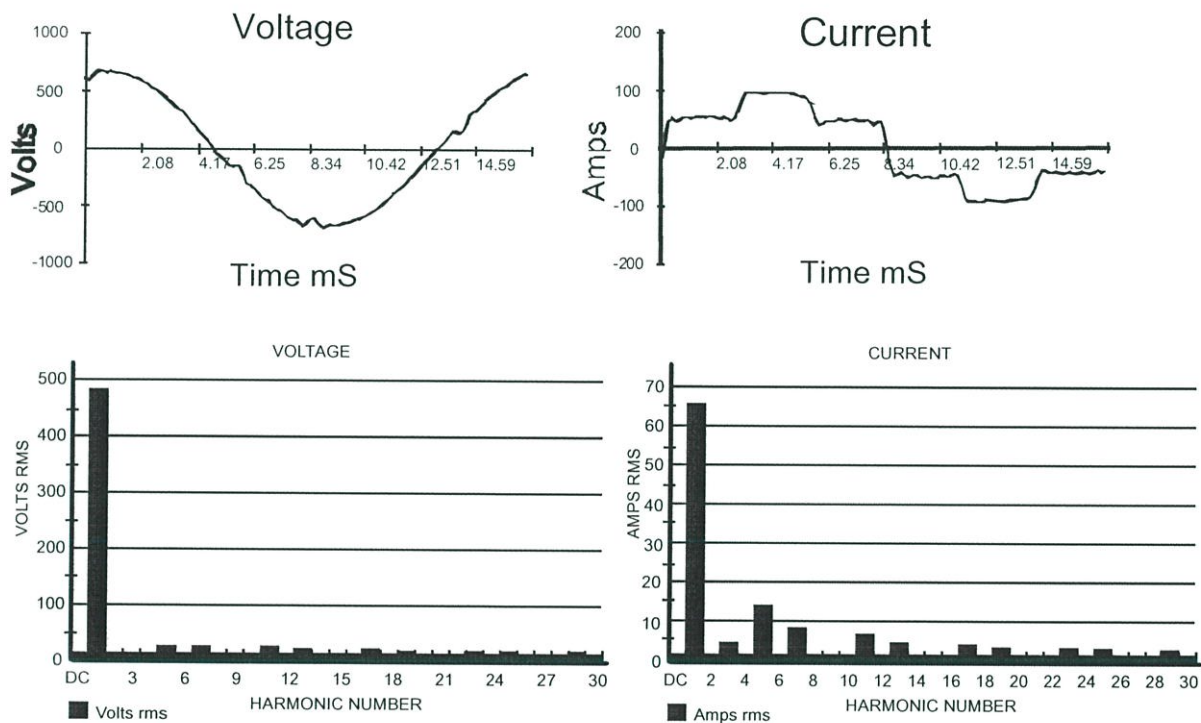
Conclusion

The supplemental analysis further validates the hypotheses of the Test Tower Research in that a 12-pulse SCR drive produces substantially less harmonic distortion than other static drives typically used. It must be noted that levels of Harmonic Distortion will vary from installation to installation as the result of job-specific variables (current drawn, car direction and loading, line stiffness, other static drives sharing the line, baseline distortion).

Conventional 6-Pulse DC SCR Drive

Data taken from International Tower Building; 700 fpm, 5.4 HP DC motor, empty car down acceleration. Ideal voltage and current should be illustrated as perfect sine waves. Note that the largest current harmonics are the fifth and seventh. This data is typical and would be identical for any 6-pulse SCR drive of any manufacturer.

Figure 17.7 Conventional 6-Pulse DC SCR Drive





Conventional 6-Pulse DC SCR Drive

Data taken from International Tower Building – 700 fpm, 35.4 HP DC motor, empty car down acceleration. Note particularly the RMS Current Total Harmonic Distortion (THD RMS of 26.9%. Also note the current magnitude (Imag) of the largest (fifth) as a percentage of the 60 Hz fundamental, or 13.7/64.7 amps = 21.2%.

Readings - 11/03/95 15:59:14

| Summary Information | | | | | Recorded Information | |
|---------------------|---------|-----------|---------|---------|----------------------|-----------|
| | | | Voltage | Current | | |
| Frequency | 60.0 | RMS | 484 | 67.2 | | V RMS |
| Power | | Peak | 692 | 97.9 | | A RMS |
| KW | 7.1 | DC Offset | -1 | -0.3 | | V Peak |
| KVA | 32.5 | Crest | 1.43 | 1.46 | | A Peak |
| KVAR | 30.5 | THD Rms | 4.1 | 26.9 | | V THD-F% |
| Peak KW | 39.4 | THD Fund | 4.1 | 27.9 | | A THD-F% |
| Phase | 77° lag | HRMS | 20 | 18.1 | | K Watts |
| Total PF | 0.22 | KFactor | | 7.5 | | KVAR |
| DPF | 0.22 | | | | | TPF |
| | | | | | | DPF |
| | | | | | | Frequency |

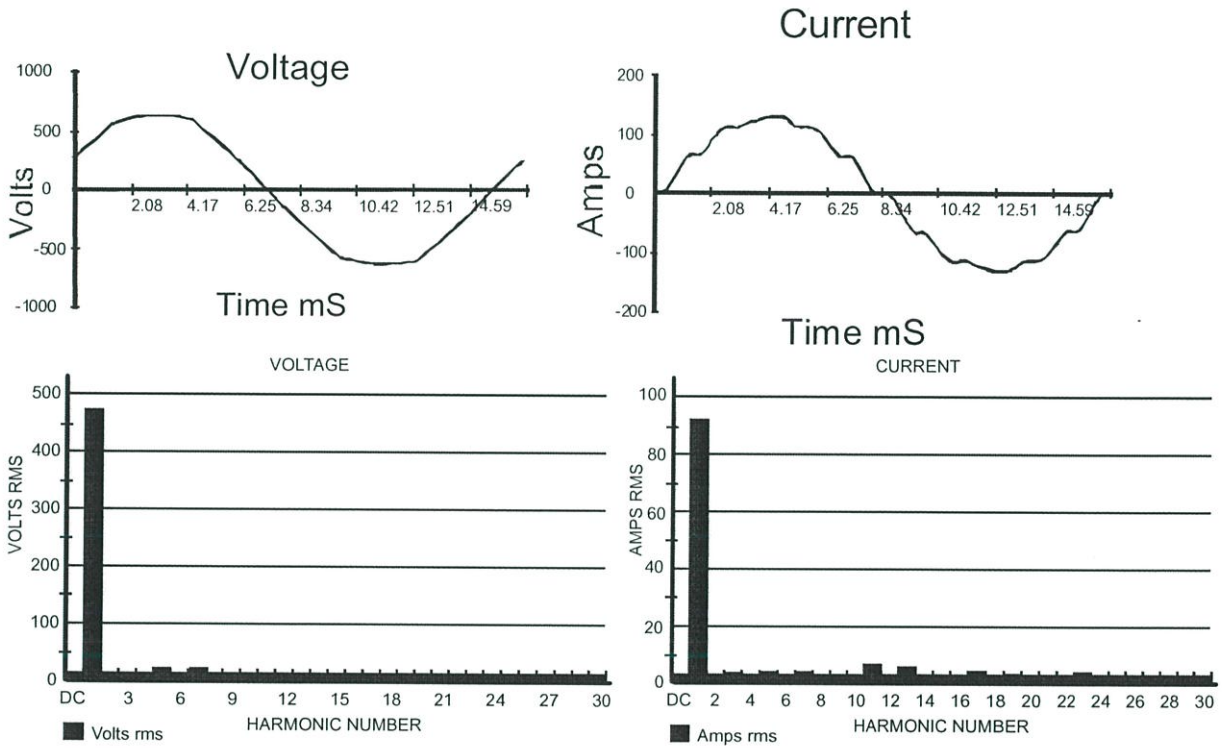
Harmonic Distortion

| | Freq. | V Mag | %V RMS | V Phase | I Mag | % I RMS | I Phase | Power (KW) |
|----|--------|-------|--------|---------|-------|---------|---------|------------|
| DC | 0.0 | 1 | 0.3 | 0 | 0.3 | 0.5 | 0 | 0.0 |
| 1 | 60.0 | 484 | 100.2 | 77 | 64.7 | 96.7 | 0 | 6.8 |
| 2 | 119.9 | 0 | 0.1 | -68 | 0.3 | 0.5 | 94 | 0.0 |
| 3 | 179.9 | 1 | 0.2 | -127 | 1.4 | 2.1 | -51 | 0.0 |
| 4 | 239.8 | 0 | 0.0 | -27 | 0.2 | 0.3 | 46 | 0.0 |
| 5 | 299.8 | 10 | 2.0 | -175 | 13.7 | 20.5 | -11 | -0.1 |
| 6 | 359.8 | 1 | 0.1 | -37 | 0.1 | 0.1 | 98 | 0.0 |
| 7 | 419.7 | 7 | 1.4 | -94 | 7.5 | 11.2 | -14 | 0.0 |
| 8 | 479.7 | 0 | 0.0 | -31 | 0.2 | 0.3 | 82 | 0.0 |
| 9 | 539.7 | 1 | 0.2 | 101 | 0.4 | 0.6 | -164 | 0.0 |
| 10 | 599.6 | 0 | 0.0 | -15 | 0.2 | 0.3 | 49 | 0.0 |
| 11 | 659.6 | 7 | 1.4 | -147 | 5.6 | 8.3 | -21 | 0.0 |
| 12 | 719.5 | 0 | 0.0 | -56 | 0.1 | 0.1 | 56 | 0.0 |
| 13 | 799.5 | 5 | 1.1 | -104 | 4.1 | 6.1 | -32 | 0.0 |
| 14 | 839.5 | 0 | 0.0 | -61 | 0.2 | 0.3 | 70 | 0.0 |
| 15 | 899.4 | 1 | 0.1 | 0 | 0.2 | 0.3 | 110 | 0.0 |
| 16 | 959.4 | 0 | 0.1 | -46 | 0.2 | 0.3 | 39 | 0.0 |
| 17 | 1019.3 | 7 | 1.4 | -164 | 3.4 | 5.1 | -38 | 0.0 |
| 18 | 1079.3 | 0 | 0.0 | -63 | 0.1 | 0.1 | 29 | 0.0 |
| 19 | 1139.3 | 5 | 1.0 | -108 | 2.6 | 3.8 | -42 | 0.0 |
| 20 | 1199.2 | 0 | 0.1 | -51 | 0.2 | 0.3 | 60 | 0.0 |
| 21 | 1259.3 | 0 | 0.1 | -108 | 0.1 | 0.1 | -12 | 0.0 |
| 22 | 1319.2 | 0 | 0.1 | -58 | 0.2 | 0.3 | 15 | 0.0 |
| 23 | 1379.1 | 6 | 1.2 | 179 | 2.3 | 3.4 | -53 | 0.0 |
| 24 | 1439.1 | 0 | 0.1 | -59 | 0.1 | 0.1 | 37 | 0.0 |
| 25 | 1499.0 | 5 | 1.1 | -117 | 2.0 | 2.9 | -53 | 0.0 |
| 26 | 1559.0 | 0 | 0.1 | -77 | 0.2 | 0.3 | 37 | 0.0 |
| 27 | 1619.0 | 0 | 0.1 | 150 | 0.1 | 0.1 | -116 | 0.0 |
| 28 | 1678.9 | 0 | 0.1 | -71 | 0.2 | 0.3 | 0 | 0.0 |
| 29 | 1738.9 | 5 | 1.0 | 169 | 1.6 | 2.4 | -64 | 0.0 |
| 30 | 1798.8 | 0 | 0.1 | -87 | 0.1 | 0.1 | -2 | 0.0 |
| 31 | 1858.8 | 5 | 1.0 | -136 | 1.6 | 2.4 | -71 | 0.0 |

12-Pulse SCR Drive (MCE System 12)

Data taken from the Plaza Building; 500 fpm, 32 HP DC motor, empty car down acceleration. Ideal voltage and current should be illustrated as perfect sine waves. Note that the largest current harmonics are the eleventh and thirteenth.

Figure 17.8 12-Pulse SCR Drive (MCE System 12)





12-Pulse DC SCR Drive (MCE System 12)

Data taken from Plaza Building, 500 fpm, 32 HP DC motor, empty car down acceleration. Note particularly the RMS Current Total Harmonic Distortion (THD RMS of 13.5%. Also note the current magnitude (Imag) of the largest (eleventh) as a percentage of the 60 Hz fundamental, or 4.7 amps/93.5 amps = 5.0%.

Readings - 11/06/95 15:31:22

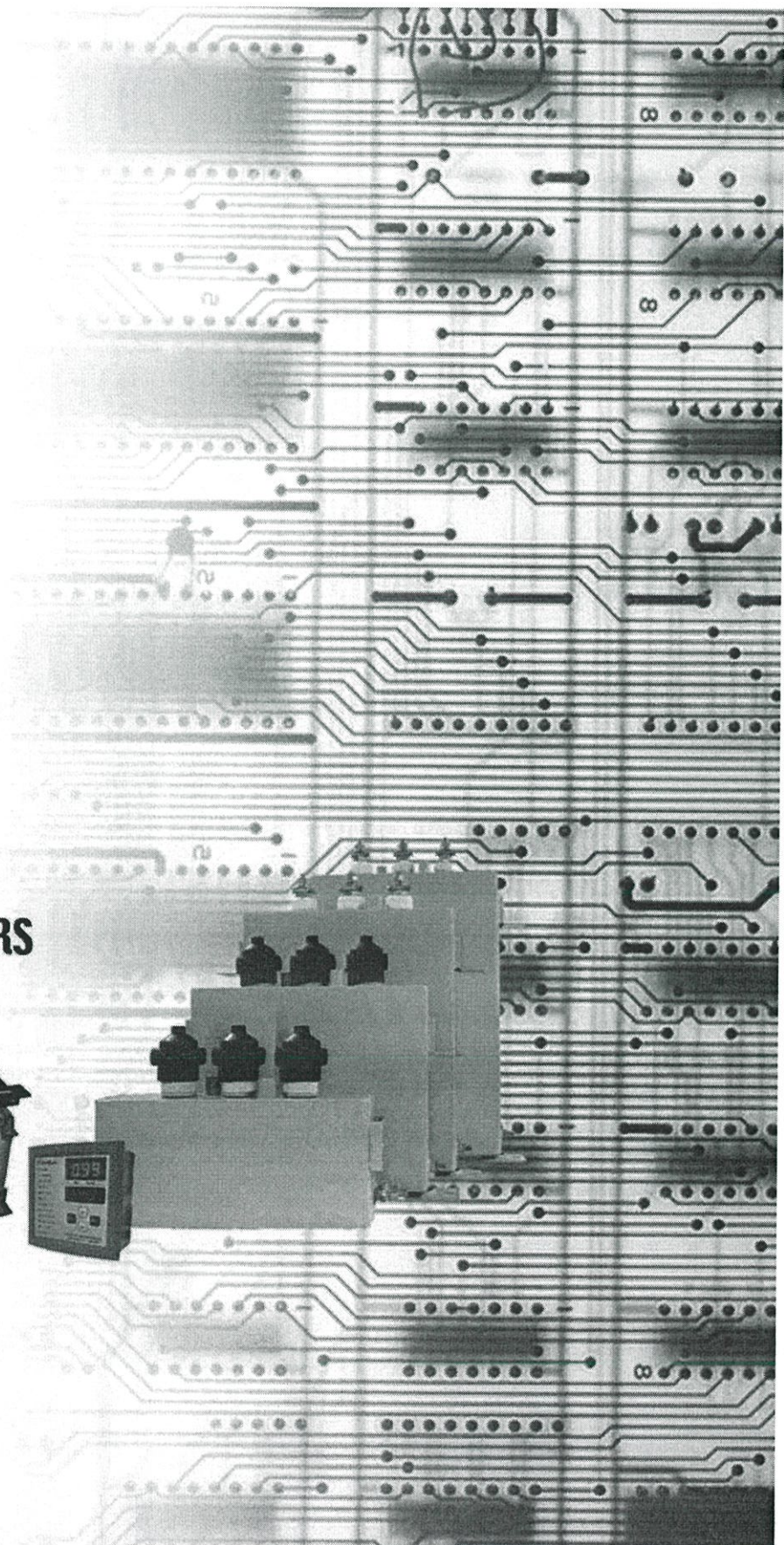
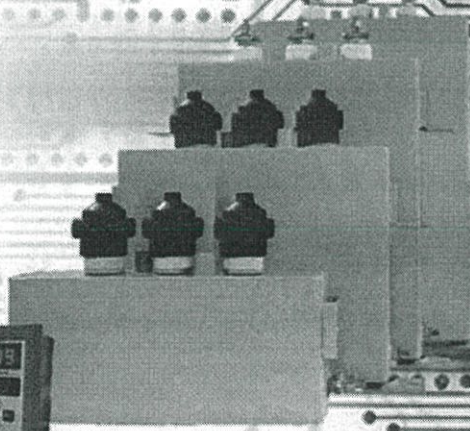
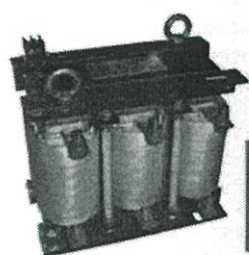
| Summary Information | | | | | Recorded Information | |
|---------------------|---------|-----------|---------|---------|----------------------|--|
| | | | Voltage | Current | | |
| Frequency | 60.0 | RMS | 469 | 93.7 | V RMS | |
| Power | | Peak | 645 | 135.3 | A RMS | |
| KW | 39 | DC Offset | -2 | -0.4 | V Peak | |
| KVA | 44 | Crest | 1.38 | 1.44 | A Peak | |
| KVAR | 20 | THD Rms | 2.5 | 6.5 | V THD-F% | |
| Peak KW | 85 | THD Fund | 2.5 | 6.6 | A THD-F% | |
| Phase | 27° lag | HRMS | 12 | 6.1 | K Watts | |
| Total PF | 0.89 | KFactor | | 1.6 | KVAR | |
| DPF | 0.89 | | | | TPF | |
| | | | | | DPF | |
| | | | | | Frequency | |

Harmonic Distortion

| | Freq. | V Mag | %V RMS | V Phase | I Mag | % I RMS | I Phs | Power (KW) |
|----|--------|-------|--------|---------|-------|---------|-------|------------|
| DC | 0.0 | 2 | 0.3 | 0 | 0.4 | 0.4 | 0 | 0.0 |
| 1 | 60.0 | 469 | 100.3 | 27 | 93.5 | 100.1 | 0 | 6.8 |
| 2 | 119.9 | 0 | 0.1 | -115 | 0.2 | 0.2 | 143 | 0.0 |
| 3 | 179.9 | 1 | 0.3 | 122 | 0.5 | 0.5 | -167 | 0.0 |
| 4 | 239.8 | 0 | 0.1 | -41 | 0.1 | 0.2 | 77 | 0.0 |
| 5 | 299.8 | 8 | 1.7 | -37 | 1.0 | 1.1 | -160 | -0.1 |
| 6 | 359.8 | 0 | 0.0 | 18 | 0.0 | 0.0 | 32 | 0.0 |
| 7 | 419.7 | 7 | 1.6 | -168 | 1.0 | 1.1 | 137 | 0.0 |
| 8 | 479.7 | 0 | 0.0 | 124 | 0.1 | 0.2 | -91 | 0.0 |
| 9 | 539.7 | 1 | 0.1 | -18 | 0.1 | 0.1 | 59 | 0.0 |
| 10 | 599.6 | 0 | 0.0 | 158 | 0.2 | 0.2 | -148 | 0.0 |
| 11 | 659.6 | 3 | 0.6 | 131 | 4.7 | 5.0 | 171 | 0.0 |
| 12 | 719.5 | 0 | 0.0 | -112 | 0.1 | 0.1 | 124 | 0.0 |
| 13 | 799.5 | 2 | 0.4 | 17 | 3.5 | 3.7 | 179 | 0.0 |
| 14 | 839.5 | 0 | 0.0 | -79 | 0.1 | 0.1 | 42 | 0.0 |
| 15 | 899.4 | 0 | 0.1 | 102 | 0.1 | 0.2 | 84 | 0.0 |
| 16 | 959.4 | 0 | 0.0 | -5 | 0.1 | 0.1 | -69 | 0.0 |
| 17 | 1019.3 | 2 | 0.4 | -46 | 0.3 | 0.4 | -60 | 0.0 |
| 18 | 1079.3 | 0 | 0.0 | 89 | 0.0 | 0.0 | -169 | 0.0 |
| 19 | 1139.3 | 1 | 0.2 | 128 | 0.2 | 0.2 | 4 | 0.0 |
| 20 | 1199.2 | 0 | 0.0 | 107 | 0.0 | 0.0 | -138 | 0.0 |
| 21 | 1259.3 | 0 | 0.1 | -101 | 0.1 | 0.1 | 153 | 0.0 |
| 22 | 1319.2 | 0 | 0.0 | -46 | 0.0 | 0.0 | 136 | 0.0 |
| 23 | 1379.1 | 1 | 0.3 | 98 | 0.7 | 0.7 | -179 | 0.0 |
| 24 | 1439.1 | 0 | 0.0 | -146 | 0.0 | 0.0 | 84 | 0.0 |
| 25 | 1499.0 | 1 | 0.2 | -84 | 0.4 | 0.4 | 97 | 0.0 |
| 26 | 1559.0 | 0 | 0.0 | -79 | 0.1 | 0.1 | -55 | 0.0 |
| 27 | 1619.0 | 0 | 0.1 | 32 | 0.0 | 0.0 | -51 | 0.0 |
| 28 | 1678.9 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0.0 | -97 | 0.0 |
| 29 | 1738.9 | 1 | 0.2 | -120 | 0.3 | 0.3 | -19 | 0.0 |
| 30 | 1798.8 | 0 | 0.0 | -165 | 0.0 | 0.0 | -158 | 0.0 |
| 31 | 1858.8 | 1 | 0.1 | 51 | 0.1 | 0.1 | -33 | 0.0 |

ภาคผนวก ค
ข้อมูลพิกัดตัวเก็บประจุที่ใช้อ้างอิง

CAPACITORS



LOW VOLTAGE POWER CAPACITOR

มาตรฐานการรับรอง

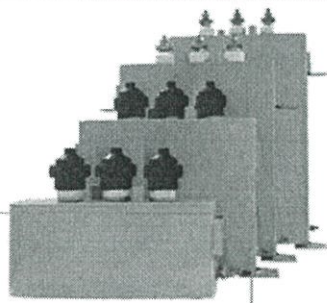
Capacitor ได้ถูกผลิตขึ้นและได้ทำการทดสอบ เพื่อให้เหมาะสมตามมาตรฐาน ล่าสุดของ IEC Publication NO 831 และ JIS C4901

ลักษณะการใช้งาน

การติดตั้ง : ทั้ง Indoor และ Outdoor สำหรับ RG-2
 อุณหภูมิที่ทนเหมาะสม : -25° ถึง +50°C
 ระดับความสูง : ไม่เกิน 2,000 เมตร (เหนือระดับน้ำทะเล)

Type and Rating

Type : RG-2
 Rated Voltage : 230, 400, 415, 440V (rms)
 และสำหรับค่า Voltage อื่น ก็สามารถใช้ได้โดยการสั่งเป็นพิเศษ
 Rated output in kvar : ดูตาราง
 Rated output in kvar : 50 Hz
 Phase and connection : 3 Phase and Delta สำหรับ Phase เดียวก็ทานการไว้รวมได้ โดยต้องสั่งเป็นพิเศษ



การออกแบบและการผลิต

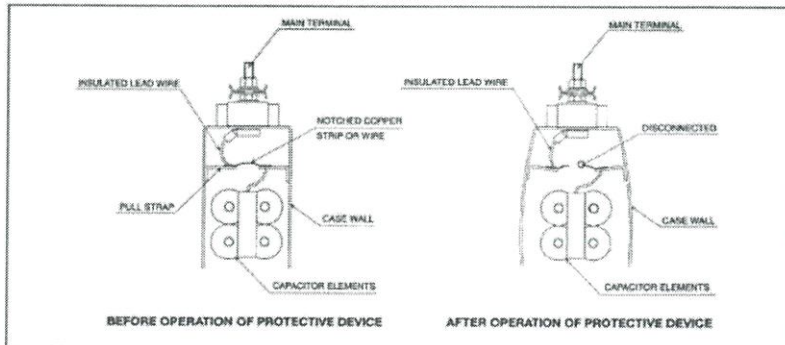
- 1 Capacitor RG-2 นี้ ได้ถูกผลิตขึ้นด้วยกระบวนการพิเศษ ด้วยการผลิตด้วยเม็ดโพลีโพรพิลีน (Polypropylene) และนำไปชุบด้วย non-PCB oil ซึ่งได้ทำการพิสูจน์แล้วว่าจะไม่ก่อให้เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อม
- 2 Capacitor นี้ได้ถูกออกแบบเพื่อให้ง่ายต่อการบำรุงรักษาการวางโมดูลขณะแนวตั้งโดยที่โถ้ส่วนเปลือกโลหะ (bushing) อยู่ด้านบน
- 3 ภาชนะที่ให้บริการ Capacitor นี้เป็นภาชนะที่เคลือบด้วยยางพอลิยูเรเทน (Poly-urethane) ซึ่งเป็นยางที่ทนและจะไม่ถูกทำให้อ่อนได้โดยง่ายและลงด้วยสี Munsell color notation 5Y7.1 เพื่อที่จะช่วยในการยึดอายุการใช้งานได้

อุปกรณ์ป้องกันที่อยู่ภายใน INTERNAL PROTECTIVE DEVICE

TYPR RG-2 (OIL)

- กระบวนการทำงานของอุปกรณ์ตัดกระแสเมื่อที่วัดการรั่วถึงความดันที่เกิดขึ้น (Operation Principle of Internal Pressure Sensitive Disconnecter)

ความดันที่เพิ่มขึ้นภายใน capacitor นั้น เกิดขึ้นจากรวมความร้อนในตัวและของ capacitor ซึ่งความดันที่เพิ่มขึ้นนี้จะทำให้ผนังของ capacitor (case wall) ไม่ทนของอก ทำให้สายไฟที่อยู่ข้างในขาดออกเป็น 2 ส่วน ดังภาพ และด้วยเหตุนี้ capacitor ก็จะถูกตัดกระแสไฟที่ออกจากแหล่งพลังงานโดยสิ้นเชิง เพื่อป้องกันความเสียหายของเครื่องจักร และอันตรายที่อาจจะทำให้เกิดไฟไหม้ได้



บริษัทขอสงวนสิทธิ์ในการเปลี่ยนแปลงราคาสินค้าโดยมิต้องแจ้งให้ทราบล่วงหน้า
 Price are not included VAT and Price are subjected to change without notice.

ลักษณะพิเศษเฉพาะ

1. สามารถทนทานต่อการทำงานในกรณีที่แรงดันกระแสไฟฟ้าเกินได้ในช่วงเวลาที่กำหนดไว้ ดังนี้

MAXIMUM PERMISSIBLE VOLTAGES VS DURATION

| Voltage factor (X rated voltage) | Maximum duration |
|----------------------------------|--|
| 1.10 | นานที่สุด 8 ชม. ต่อทุกๆ 24 ชม. |
| 1.15 | นานที่สุด 30 นาที ต่อทุกๆ 24 ชม. |
| 1.20 | นานที่สุด 5 นาที x มากที่สุด 2 ครั้ง / เดือน |
| 1.30 | นานที่สุด 1 นาที x มากที่สุด 2 ครั้ง / เดือน |

2. สามารถทำงานต่อเนื่องที่กระแสไฟฟ้าที่ไม่เกินกว่า 1.3 ครั้ง ตามกระแสที่กำหนด สำหรับ capacitor ที่มีปริมาณความจุไฟฟ้าอยู่ในสภาพที่ถืออยู่ ปริมาณกระแสมากที่สุดที่ยอมให้ผ่านไปได้ ก็จะสามารถเพิ่มขึ้นได้อยู่กับอัตราความจุไฟฟ้าได้

3. Capacitor ทุกตัวต้องได้รับการทดสอบดังต่อไปนี้ เพื่อให้ได้ตามมาตรฐาน

- การทดสอบความทนทานต่อวัสดุที่ไม่เป็นสื่อไฟฟ้า , Dielectric withstand test capacitor จะต้องผ่านการทดสอบความทนทานตามแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดไว้ดังนี้

(1) ระหว่างชั้นปลายสายไฟ : 2.01 ครั้ง ตามที่แรงดันที่กำหนดเป็นเวลา 2-5 วินาที

(2) ระหว่างชั้นปลายสายไฟที่เชื่อมต่อกัน และภาชนะที่บรรจุ : 3,000 Volt rms. เป็นเวลา 10 วินาที

- ปริมาณความจุไฟฟ้า (ด้านออก) ; Capacitance (output) capacitor จะต้องมีความจุไฟฟ้าอยู่ในระหว่าง +15% และ -5% ของค่าที่กำหนดเมื่อวัดจากเครื่องวัดไฟฟ้า LCR ที่อุณหภูมิปกติภายในห้อง สำหรับปริมาณความจุไฟฟ้าด้านออกนั้นจะต้องคำนวณโดยยึดค่าปริมาณความจุไฟฟ้าเป็นพื้นฐาน

- ความผิดพลาดของตัวเก็บประจุไฟฟ้า , Capacitor losses ความผิดพลาดของตัวเก็บประจุไฟฟ้ารวมไปถึงความผิดพลาดของตัวฉนวนป้องกันนํ้าไหลออกของประจุไฟฟ้า จะต้องไม่เกินกว่า 2 watt/kvar เมื่อวัดจาก Schering Bridge ตามแรงดันที่กำหนด

- ทดสอบรอยรั่ว ; Sealing test เมื่ออุณหภูมิความร้อนสูงขึ้นถึง 70°C และคงที่เป็นเวลานานกว่า 2 ชม. capacitor จะต้องปล่อยให้อากาศภายนอกไหลเข้ามาถ่ายเทได้

รูปแบบการรักษาความปลอดภัย

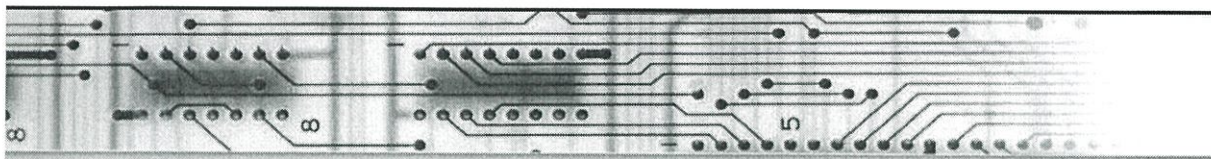
1. อุปกรณ์โดยประจุ (Discharge device) : ตัว capacitor นี้ได้ถูกติดตั้งตัวฉนวน ป้องกันการไหลออกของประจุไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์นี้เป็นอุปกรณ์ที่อยู่ภายในตัว capacitor (internal discharge resistor) อุปกรณ์ตัวนี้จะเป็นตัวช่วยลดแรงดันไฟฟ้า ในส่วนที่ยังตกค้างอยู่ โดยจะทำการลดจากค่าสูงสุด จนเหลือเพียง 75V. หรือ น้อยกว่าภายในเวลาไม่เกิน 3 นาที หลังจากในตัว capacitor นี้ ได้ถูกตัดกระแสไฟฟ้าออกจากแหล่งจ่ายพลังงาน

2. อุปกรณ์ป้องกัน (Protective device) : นอกจากในตัว capacitor นี้ยังได้ถูก ติดตั้งอุปกรณ์เปิด-เบรกวงจรไฟฟ้า ที่ไวต่อการรับรู้ความดันกระแสไฟฟ้า (pressure sensitive interrupter) เช่นในกรณีที่เกิดการก๊วงานผิดพลาด อุปกรณ์นี้ ก็สามารถรับรู้ถึงความดันกระแสไฟฟ้า ที่เพิ่มขึ้นภายในตัว capacitor และ จะทำการหยุดการเชื่อมต่อของระบบการทำงานภายใน จากนั้นก็จะทำการตัดกระแสไฟฟ้าในตัว capacitor ออกจากวงจรไฟฟ้า ก่อนที่จะเกิดความเสียหาย

การรับประกัน

- ทางบริษัทฯ จะขอรับประกันคุณภาพสินค้าเป็นเวลา 1 ปี นับจากวันที่ติดตั้ง

- ทางบริษัทจะทำการซ่อมหรือเปลี่ยน capacitor ที่ถูกส่งคืนให้กับโรงงาน ซึ่งทางบริษัทจะต้องทำการตรวจสอบอย่างละเอียดว่าความบกพร่องนั้นเกิดจากสาเหตุใด



DISTRIBUTOR FOR ELECTRIC EQUIPMENT OF SHIZUKI ELECTRIC CO., INC.

มาตรฐานการรับรอง

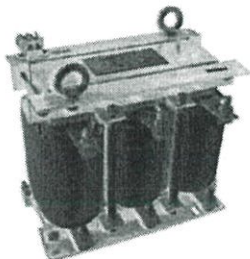
Reactor นี้ได้ถูกออกแบบผลิตขึ้นมา และได้รับการทดสอบเพื่อให้ได้ตามมาตรฐานล่าสุดของ IEC289

Type and Rating

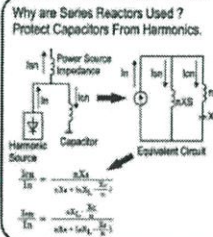
Type : LR-L1
 Circuit voltage : 400-480V
 Rated frequency : 50Hz
 Number of Phase : 3 phase
 Insulation class : H (อุณหภูมิเพิ่มขึ้นได้
 ถึง 125°C ระดับการป้องกันกระแสไฟฟ้า)
 Reactance (การต้านไฟฟ้า) : 6%

ลักษณะการใช้งาน

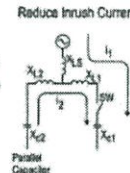
การติดตั้ง : Indoor & Outdoor
 อุณหภูมิที่งนเหมาะสม : -50 ถึง +40°C
 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ : ไม่เกิน 85%
 ระดับความสูง : ไม่เกิน 1,000 เมตร เหนือ
 ระดับน้ำทะเล



Why are Series Reactors Used ?
 Protect Capacitors From Harmonics.



Reduce Inrush Current



Inrush Current From Power Source

- Capacitors with no reactor
About 30-100times rated current
- Capacitors with a 6% reactor
About 58times rated current

Inrush Current from Energized parallel capacitor

- Capacitors with no reactor
About 200-400times rated current
- Capacitors with a 6% reactor
About 5-8times rated current

APPEARANCE AND DIMENSIONS

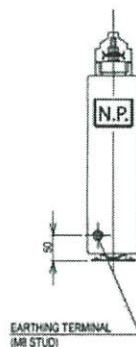
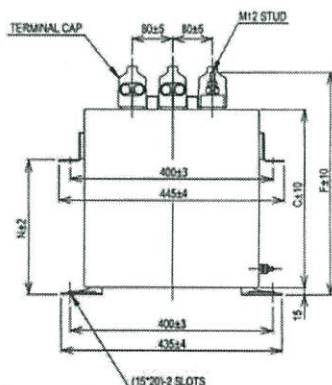
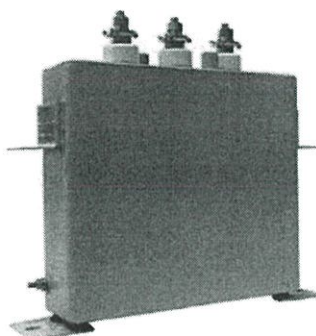
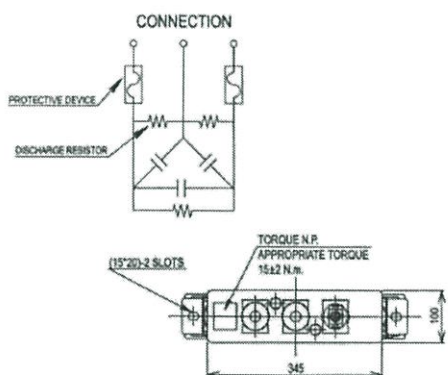
ลักษณะพิเศษเฉพาะ

- ประสิทธิภาพความทนทาน : -5% ถึง +10%
- การทดสอบความทนทานต่อแรงดันไฟฟ้า : ระหว่างขั้วปลายสายไฟที่เชื่อมต่อกัน กับแกนและระหว่างขั้วปลายสายไฟ 3,000 volt ในเวลา 1 นาที
- ปริมาณกระแสมากที่สุดที่ยอมให้ผ่านไปได้ ควรจะมีประมาณ 110% ของกระแสที่กำหนด และสำหรับ capacitor ที่บรรจุ 5th harmonic จะต้องไม่เกิน 10 % จากค่ามาตรฐาน
- ระยะเวลาที่สั้นที่สุดที่ยอมให้กระแสผ่านไปได้ ควรจะมีประมาณ 25 ครั้ง ของกระแสที่กำหนดเป็นเวลา 2 วินาที
- ปริมาณอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ได้จะต้องไม่เกิน 125°C ในกรณีที่อุณหภูมิมีตัว 110% ของกระแส และความถี่ที่กำหนด

บริษัท ขอสงวนสิทธิ์ในการเปลี่ยนแปลงราคาสินค้าโดยมิต้องแจ้งให้ทราบล่วงหน้า
 Price are not included VAT and Price are subjected to change without notice.

TYPE RG-2 (INDOOR & OUTDOOR USE)

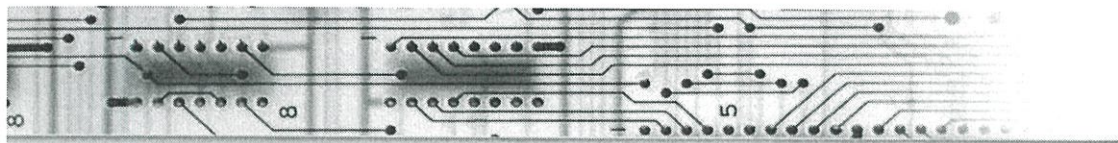
- Rated Voltage : 200, 210, 220, 230, 240, 400, 415, 440, 525 volts.
- Capacitor Rated Voltages with L= 6%, L=13% SR are also available.



RATING & DIMENSIONS (mm.)

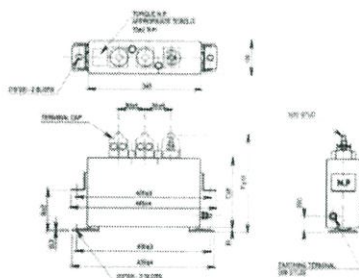
| NO. | CODE | VOLTAGE | RATED | | DIMENSION (mm.) | | | GROSS MASS | NO. | CODE | VOLTAGE | RATED | | DIMENSION (mm.) | | | GROSS MASS |
|-----|--------------|---------|----------|---------|-----------------|-----|-----|------------|--------------|--------------|---------|----------|---------|-----------------|-----|------|------------|
| | | | CAP. | CURRENT | C | F | N | | | | | CAP. | CURRENT | C | F | N | |
| 1 | RG223020D1ET | 230 V | 20 kvar | 50.2A | 250 | 350 | 185 | 15kg | 1 | RG241520D1ET | 415 V | 20 kvar | 27.8A | 180 | 290 | 75 | 11kg |
| 2 | RG223025D1ET | | 25 kvar | 62.8A | 250 | 350 | 165 | 15kg | 2 | RG241525D1ET | | 25 kvar | 34.8A | 210 | 310 | 125 | 13kg |
| 3 | RG223030D1ET | | 30 kvar | 75.3A | 290 | 390 | 205 | 17kg | 3 | RG241530D1ET | | 30 kvar | 41.7A | 210 | 310 | 125 | 13kg |
| 4 | RG223040D1ET | | 40 kvar | 100A | 420 | 520 | 335 | 23kg | 4 | RG241540D1ET | | 40 kvar | 55.6A | 250 | 350 | 165 | 15kg |
| 5 | RG223050D1ET | | 50 kvar | 126A | 510 | 610 | 425 | 27kg | 5 | RG241550D1ET | | 50 kvar | 69.6A | 290 | 390 | 205 | 17kg |
| 1 | RG240020D1ET | 400 V | 20 kvar | 28.2A | 180 | 280 | 75 | 11kg | 6 | RG241575D1ET | | 75 kvar | 104A | 420 | 520 | 335 | 23kg |
| 2 | RG240025D1ET | | 25 kvar | 36.1A | 210 | 310 | 125 | 13kg | 7 | RG241510E1ET | | 100 kvar | 136A | 510 | 610 | 425 | 27kg |
| 3 | RG240030D1ET | | 30 kvar | 43.9A | 210 | 310 | 125 | 13kg | 1 | RG244020D1ET | 440 V | 20 kvar | 28.2A | 180 | 280 | 75 | 11kg |
| 4 | RG240040D1ET | | 40 kvar | 57.7A | 250 | 350 | 185 | 15kg | 2 | RG244025D1ET | | 25 kvar | 32.8A | 210 | 310 | 125 | 13kg |
| 5 | RG240050D1ET | | 50 kvar | 72.6A | 290 | 390 | 205 | 17kg | 3 | RG244030D1ET | | 30 kvar | 41.7A | 210 | 310 | 125 | 13kg |
| 6 | RG240075D1ET | | 75 kvar | 108A | 420 | 520 | 335 | 23kg | 4 | RG244040D1ET | | 40 kvar | 52.5A | 250 | 350 | 185 | 15kg |
| 7 | RG240010E1ET | | 100 kvar | 144A | 510 | 610 | 425 | 27kg | 5 | RG244050D1ET | | 50 kvar | 65.6A | 290 | 390 | 205 | 17kg |
| | | | | | | | | 6 | RG244075D1ET | 75 kvar | | 98.4A | 420 | 520 | 335 | 23kg | |
| | | | | | | | | 7 | RG244010E1ET | 100 kvar | | 131A | 510 | 610 | 425 | 27kg | |

บิตที่แสดงในตารางนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงราคาสินค้าโดยมิต้องแจ้งให้ทราบล่วงหน้า
 Price are not included VAT and Price are subjected to change without notice.



Capacitor

- มาตรฐานตามข้อกำหนด IEC 60280-1000 และ JIS C 4901-2000
- ใช้งานได้ทั้งระบบแรงดันสูงและแรงดันต่ำ
- มาตรฐานการป้องกันความชื้นตาม IEC 60280-1000
- มาตรฐานการป้องกันฝุ่นตาม IEC 60280-1000
- มาตรฐานการป้องกันเสียงรบกวนตาม IEC 60280-1000
- มาตรฐานการป้องกันอุณหภูมิสูงตาม IEC 60280-1000
- มาตรฐานการป้องกันอุณหภูมิสูงตาม IEC 60280-1000



LT Capacitor Type RG-2 (Indoor & Outdoor use)

| Code | Rated | | ราคา / หน่วย |
|--------------|------------|------------|--------------|
| | Voltage(V) | Cap.(kvar) | |
| RG223005D1ET | 230 | 5 | 11,600 |
| RG223010D1ET | | 10 | 12,800 |
| RG223015D1ET | | 15 | 14,000 |
| RG223020D1ET | | 20 | 14,500 |
| RG223025D1ET | | 25 | 16,500 |
| RG223030D1ET | | 30 | 19,500 |
| RG223040D1ET | 400 | 40 | 22,500 |
| RG223050D1ET | | 50 | 25,500 |
| RG240005D1ET | | 5 | 8,500 |
| RG240010D1ET | | 10 | 9,500 |
| RG240015D1ET | | 15 | 9,900 |
| RG240020D1ET | | 20 | 10,500 |
| RG240025D1ET | 400 | 25 | 11,000 |
| RG240030D1ET | | 30 | 12,300 |
| RG240040D1ET | | 40 | 13,300 |
| RG240050D1ET | | 50 | 14,500 |
| RG240075D1ET | 400 | 75 | 23,000 |
| RG240010E1ET | | 100 | 25,500 |

หมายเหตุ: ราคาตามใบเสนอราคาเป็นราคาสุทธิ ไม่รวมค่าขนส่ง

Reactor

- ผลิตตามมาตรฐาน IEC 60280-1000 และ JIS C 4901-2000
- ใช้งานได้ทั้งระบบแรงดันสูงและแรงดันต่ำ
- มาตรฐานการป้องกันความชื้นตาม IEC 60280-1000
- มาตรฐานการป้องกันฝุ่นตาม IEC 60280-1000
- มาตรฐานการป้องกันเสียงรบกวนตาม IEC 60280-1000
- มาตรฐานการป้องกันอุณหภูมิสูงตาม IEC 60280-1000
- มาตรฐานการป้องกันอุณหภูมิสูงตาม IEC 60280-1000



Series Reactor Type LRB-3 (Dry Type Indoor use)

| Code | L% | Circuit Voltage(V) | Output (kvar) | Cap.* (kvar) | Cap.* Voltage(V) | Reactor (kvar) | ราคา / หน่วย | |
|---------------|-----|--------------------|---------------|--------------|------------------|----------------|--------------|--------|
| LRB2385025N26 | 8% | 230 | 25 | 25.6 | 1.60 | 16,500 | | |
| LRB2385030N26 | | | 30 | 31.9 | 1.91 | 18,500 | | |
| LRB2385040N26 | | | 40 | 42.6 | 2.55 | 22,500 | | |
| LRB2385050N26 | | | 50 | 53.2 | 3.19 | 23,500 | | |
| LRB4085025N26 | | | 400 | 400 | 25 | 28.8 | 1.60 | 16,500 |
| LRB4085030N26 | | | | | 30 | 31.9 | 1.91 | 18,500 |
| LRB4085040N26 | 40 | 46.8 | | | 2.55 | 22,500 | | |
| LRB4085050N26 | 50 | 53.2 | | | 3.19 | 23,500 | | |
| LRB4085075N26 | 75 | 70.8 | | | 4.70 | 29,500 | | |
| LRB4085100N26 | 100 | 106.4 | | | 6.38 | 35,000 | | |
| LRB2385025N13 | 13% | 230 | 25 | 28.7 | 3.74 | 23,500 | | |
| LRB2385030N13 | | | 30 | 34.3 | 4.48 | 27,500 | | |
| LRB2385040N13 | | | 40 | 48.0 | 5.98 | 29,500 | | |
| LRB2385050N13 | | | 50 | 57.8 | 7.47 | 35,000 | | |
| LRB4085025N13 | | | 400 | 400 | 25 | 28.7 | 3.74 | 23,500 |
| LRB4085030N13 | | | | | 30 | 34.3 | 4.48 | 27,500 |
| LRB4085040N13 | 40 | 48.0 | | | 5.98 | 29,500 | | |
| LRB4085050N13 | 50 | 57.5 | | | 7.47 | 35,000 | | |
| LRB4085075N13 | 75 | 85.2 | | | 11.20 | 43,000 | | |
| LRB4085100N13 | 100 | 115.0 | | | 14.90 | 50,000 | | |

หมายเหตุ: * ราคาตามใบเสนอราคาเป็นราคาสุทธิ ไม่รวมค่าขนส่ง
* ราคาตามใบเสนอราคาเป็นราคาสุทธิ ไม่รวมค่าขนส่ง
* ราคาตามใบเสนอราคาเป็นราคาสุทธิ ไม่รวมค่าขนส่ง

Power Factor Controller

- มาตรฐานตามข้อกำหนด IEC 60280-1000 และ JIS C 4901-2000
- ใช้งานได้ทั้งระบบแรงดันสูงและแรงดันต่ำ
- มาตรฐานการป้องกันความชื้นตาม IEC 60280-1000
- มาตรฐานการป้องกันฝุ่นตาม IEC 60280-1000
- มาตรฐานการป้องกันเสียงรบกวนตาม IEC 60280-1000
- มาตรฐานการป้องกันอุณหภูมิสูงตาม IEC 60280-1000
- มาตรฐานการป้องกันอุณหภูมิสูงตาม IEC 60280-1000



| Code | Price |
|-------------------|--------|
| MS-4Q (4 Steps) | 18,200 |
| MS-8Q (8 Steps) | 20,300 |
| MS-12Q (12 Steps) | 23,500 |



SELECTION OF CAPACITOR OUTPUT (kvar)

Multiplier (k_{θ}) to calculate capacitor output

| P.F. before $\cos\theta 1$ corrected | P.F. after corrected ($\cos\theta 2$) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1.00 | 0.99 | 0.98 | 0.97 | 0.96 | 0.95 | 0.94 | 0.93 | 0.92 | 0.91 | 0.90 | 0.85 | 0.80 | 0.75 | 0.70 | 0.65 | 0.60 | 0.55 | 0.50 | 0.45 |
| 0.40 | 2.29 | 2.15 | 2.09 | 2.04 | 2.00 | 1.96 | 1.93 | 1.90 | 1.87 | 1.84 | 1.81 | 1.67 | 1.54 | 1.41 | 1.27 | 1.12 | 0.96 | 0.77 | 0.56 | 0.31 |
| 0.45 | 1.99 | 1.84 | 1.78 | 1.73 | 1.69 | 1.68 | 1.62 | 1.59 | 1.56 | 1.53 | 1.50 | 1.37 | 1.24 | 1.10 | 0.97 | 0.82 | 0.65 | 0.47 | 0.25 | |
| 0.50 | 1.73 | 1.59 | 1.53 | 1.48 | 1.44 | 1.40 | 1.37 | 1.34 | 1.31 | 1.28 | 1.25 | 1.11 | 0.98 | 0.85 | 0.71 | 0.56 | 0.40 | 0.21 | | |
| 0.55 | 1.52 | 1.38 | 1.32 | 1.27 | 1.23 | 1.19 | 1.16 | 1.12 | 1.09 | 1.06 | 1.04 | 0.90 | 0.77 | 0.64 | 0.50 | 0.35 | 0.19 | | | |
| 0.60 | 1.33 | 1.19 | 1.13 | 1.08 | 1.04 | 1.00 | 0.97 | 0.94 | 0.91 | 0.88 | 0.85 | 0.71 | 0.58 | 0.45 | 0.31 | 0.16 | | | | |
| 0.65 | 1.17 | 1.03 | 0.97 | 0.92 | 0.88 | 0.84 | 0.81 | 0.77 | 0.74 | 0.71 | 0.69 | 0.55 | 0.42 | 0.29 | 0.15 | | | | | |
| 0.70 | 1.02 | 0.88 | 0.82 | 0.77 | 0.73 | 0.69 | 0.66 | 0.63 | 0.59 | 0.56 | 0.54 | 0.40 | 0.27 | 0.14 | | | | | | |
| 0.75 | 0.88 | 0.74 | 0.68 | 0.63 | 0.59 | 0.55 | 0.52 | 0.49 | 0.46 | 0.43 | 0.40 | 0.26 | 0.13 | | | | | | | |
| 0.80 | 0.75 | 0.61 | 0.55 | 0.50 | 0.46 | 0.42 | 0.39 | 0.36 | 0.32 | 0.29 | 0.27 | 0.13 | | | | | | | | |
| 0.85 | 0.62 | 0.48 | 0.42 | 0.37 | 0.33 | 0.29 | 0.26 | 0.23 | 0.19 | 0.16 | 0.14 | | | | | | | | | |
| 0.90 | 0.48 | 0.34 | 0.28 | 0.23 | 0.19 | 0.16 | 0.12 | 0.089 | 0.058 | 0.028 | | | | | | | | | | |
| 0.91 | 0.46 | 0.31 | 0.25 | 0.21 | 0.16 | 0.13 | 0.093 | 0.061 | 0.030 | | | | | | | | | | | |
| 0.92 | 0.43 | 0.28 | 0.22 | 0.18 | 0.13 | 0.097 | 0.063 | 0.031 | | | | | | | | | | | | |
| 0.93 | 0.40 | 0.25 | 0.19 | 0.14 | 0.10 | 0.066 | 0.032 | | | | | | | | | | | | | |
| 0.94 | 0.36 | 0.22 | 0.16 | 0.11 | 0.071 | 0.034 | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.95 | 0.33 | 0.19 | 0.13 | 0.078 | 0.037 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.96 | 0.29 | 0.15 | 0.089 | 0.041 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.97 | 0.25 | 0.11 | 0.048 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.98 | 0.20 | 0.06 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.99 | 0.14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Calculation of capacitor output

Capacitor output = Load capacity (kW) X k_{θ}
 k_{θ} is given in the table.

Example :

For a 500kW load.

k_{θ} to improve from $\cos\theta 1 = 0.65$ to $\cos\theta 2$
 $= 0.95$ is 0.84

Capacitor output = 500 X 0.84
 $= 420$ kvar

ประวัติผู้เขียน



นายณภัท จิระจงเจริญ

- เกิดวันที่ 26 มิถุนายน พ.ศ. 2536 สถานที่เกิด จังหวัด กรุงเทพมหานคร
- จบการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนประภามนตรี 2 ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ



นายบรรณพต โมคศิริ

- เกิดวันที่ 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2535 สถานที่เกิด จังหวัด กรุงเทพมหานคร
- จบการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนเทพศิรินทร์ร่วมเกล้า ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ



นายปฐมพงศ์ ตั้งไพบูลย์

- เกิดวันที่ 20 มิถุนายน พ.ศ. 2535 สถานที่เกิด จังหวัด กรุงเทพมหานคร
- จบการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนสามัคคีวิทยาคม ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ