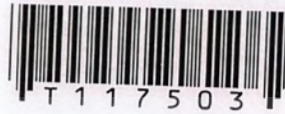


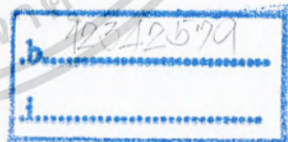
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

แนวทางปฏิบัติต่อฮาร์โมนิกส์รีโซแนนซ์เพื่อประยุกต์ใช้งาน
กับการต่อขานานของคาปาซิเตอร์

A Practical Harmonic Resonance Guideline for Shunt Capacitor Applications



เลขหมู่.....**117503**
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....**5 ต.ค. 2554**



ปฏิญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2553

แนวทางปฏิบัติต่อฮาร์โมนิกส์รีโซแนนซ์เพื่อประยุกต์ใช้งาน
กับการต่อขนานของคาปาซิเตอร์

A Practical Harmonic Resonance Guideline for Shunt Capacitor Applications



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.จงรักษ์ บุญเส็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ปริญญาโทปีการศึกษา 2553

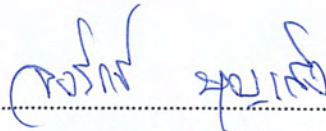
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง แนวทางปฏิบัติต่อฮาร์โมนิกส์รีโซแนนซ์เพื่อประยุกต์ใช้งานกับการต่อขนานของ
คาปาซิเตอร์

ผู้จัดทำ

- 
1. นายนายชาติอริยะ ประเสริฐสังข์
 2. นายเชิดศักดิ์ โชติช่วง
 3. นายโชคชัย ละครชัย
 4. นายไชยยานนท์ ตาอ้ายเทือก


(รศ.จรงค์ บุญเสียง)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวทางปฏิบัติต่อฮาร์โมนิกส์รีโซแนนซ์เพื่อประยุกต์ใช้งาน
กับการต่อขานของคาปาซิเตอร์

นายชาติอริยะ ประเสริฐสังข์
นายเชิดศักดิ์ โชติช่วง
นายโชคชัย ละครชัย
นายไชยยานนท์ ตาอ้ายเทือก
รศ.จรงค์ษ์ บุญเสียง อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2553

บทคัดย่อ

ปฏิญานินพนธ์นี้ นำเสนอการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเกิด ปัญหาและวิธีแก้ไขสัญญาณฮาร์โมนิกส์รีโซแนนซ์ ที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม โดยทำการศึกษาคูณสมบัติและขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการป้องกันชุดคาปาซิเตอร์จากสัญญาณฮาร์โมนิกส์ หรือที่เรียกว่า รีแอกเตอร์ เพื่อทำการออกแบบให้เหมาะสม และสามารถใช้งานได้จริงกับระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม ขั้นตอนการออกแบบได้ใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์วิซวลเบสิก ในการออกแบบรีแอกเตอร์ พร้อมกับจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ เพื่อสร้างต้นแบบของรีแอกเตอร์ขึ้นมา แล้วจะนำไปติดตั้งในวงจรตีจูนฟิลเตอร์ ซึ่งวงจรออกแบบมาเพื่อประยุกต์ใช้งานกับการต่อขานของชุดคาปาซิเตอร์ที่ใช้ปรับปรุงค่าค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบ โดยจะนำไปทดสอบและติดตามผลการทำงานพร้อมกับประสิทธิภาพของรีแอกเตอร์ รวมทั้งประเมินคุณภาพของกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป ก่อนและหลังการติดตั้งจริงในโรงงานอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Practical Harmonic Resonance Guideline for Shunt Capacitor Applications

Chartariya Prasertsung

Cherdsak Chotchuang

Chokchai Lakornchai

Chaiyanon Ta-aituek

Assoc.Prof.Chongrag Bunseng Advisor

2010

ABSTRACT

The thesis presents the thesis educates the occurrence, problem and the way corrects about Harmonic resonance in the industrial power system. By education property and size of equipment to protect capacitor banks form harmonic signal this is a reactor in power system a factory. The way in design reactor using Microsoft visual basic and simulation with Finite Element Method Magnetics (FEMM) to build a prototype. Then set up in detune filters circuit for harmonic filters to Practical for Shunt Capacitor Banks Applications adjust the value of power factor in power system. And induce test and follow up the work, efficiency and assess power quality at modify from before and real installation back in the industrial factory.

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อ | I |
| ABSTRACT | II |
| สารบัญรูป | VI |
| สารบัญตาราง | X |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ..... | 1 |
| 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในโครงการ | 1 |
| 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน | 2 |
| 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในโครงการ | 3 |
| 2.1 นิยามและความหมายของฮาร์โมนิกส์..... | 3 |
| 2.1.1 นิยามของฮาร์โมนิกส์ | 4 |
| 2.1.2 อุนุกรมฟูรีเย..... | 7 |
| 2.1.3 ศัฟท์และปริมาณต่างๆ..... | 7 |
| 2.1.4 ประเภทของฮาร์โมนิกส์..... | 8 |
| 2.1.5 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ | 9 |
| 2.1.6 ผลกระทบที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์ | 10 |
| 2.1.6.1 ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า..... | 10 |
| 2.2 ฮาร์โมนิกส์รีโซแนนซ์ | 12 |
| 2.2.1 การวิเคราะห์การเกิดรีโซแนนซ์ | 12 |
| 2.2.2 ผลกระทบที่เกิดจากสภาวะรีโซแนนซ์ | 17 |
| 2.3 ดีจูนฟิลเตอร์ | 18 |
| 2.3.1 ลักษณะของดีจูนฟิลเตอร์ | 18 |
| 2.3.2 โครงสร้างและหน้าที่ของตัวกรองฮาร์โมนิกส์แบบดีจูนฟิลเตอร์ | 18 |
| 2.3.3 การคำนวณหาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง | 19 |
| 2.4 ตัวเหนี่ยวนำ (Reactor)..... | 22 |
| 2.5 ตัวเก็บประจุ (Capacitor)..... | 23 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 3 การออกแบบรีแอคเตอร์และตีจูนฟิลเตอร์..... | 24 |
| 3.1 บทนำ | 24 |
| 3.2 โครงสร้างของรีแอคเตอร์..... | 24 |
| 3.2.1 โครงสร้างของวงจรแม่เหล็ก | 25 |
| 3.2.2 โครงสร้างของขดลวด..... | 27 |
| 3.3 การสูญเสียของรีแอคเตอร์..... | 30 |
| 3.3.1 การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss)..... | 30 |
| 3.3.2 การสูญเสียในขดลวด (Conductor loss)..... | 31 |
| 3.3.3 การสูญเสียในช่องอากาศ (Air-gap loss) | 31 |
| 3.4 การออกแบบรีแอคเตอร์..... | 32 |
| 3.4.1 การคำนวณการออกแบบรีแอคเตอร์ | 33 |
| 3.5 การออกแบบรีแอคเตอร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์..... | 38 |
| 3.5.1 การคำนวณการออกแบบรีแอคเตอร์ | |
| ด้วย Program Microsoft Visual Basic 2008 | 38 |
| 3.5.2 การจำลองการทำงานของรีแอคเตอร์ | |
| ด้วย Program Finite Element Method Magnetics (FEMM)..... | 45 |
| 3.5.3 การสร้างต้นแบบรีแอคเตอร์ | 48 |
| 3.6 การออกแบบวงจรตีจูนฟิลเตอร์..... | 50 |
| 3.6.1 ขั้นตอนการออกแบบวงจรตีจูนฟิลเตอร์ | 50 |
| 3.6.2 ส่วนประกอบของวงจรตีจูนฟิลเตอร์..... | 53 |
| 3.6.2.1 ตัวเหนี่ยวนำ (Reactor) | 53 |
| 3.6.2.2 ตัวเก็บประจุ (Capacitor) | 54 |
| 3.7 สรุป | 55 |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง..... | 56 |
| 4.1 กล่าวนำ | 56 |
| 4.2 การทดสอบรีแอคเตอร์..... | 56 |
| 4.3 การทดสอบวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ตีจูนฟิลเตอร์..... | 58 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|---|----|
| 4.3.1 การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้า ก่อนการติดตั้งวงจรตีจูนฟิลเตอร์ | 59 |
| 4.3.2 การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้า หลังการติดตั้งวงจรตีจูนฟิลเตอร์ โดยใช้รีแอคเตอร์ต้นแบบ..... | 63 |
| 4.3.3 การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้า หลังการติดตั้งวงจรตีจูนฟิลเตอร์ Nokian (Nokian Capacitor).... | 67 |
| 4.4 การเปรียบเทียบผลการติดตั้งวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ตีจูนฟิลเตอร์ | 71 |
| 4.4.1 การเปรียบเทียบวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ตีจูนฟิลเตอร์ก่อน และหลังการติดตั้ง โดยใช้รีแอคเตอร์ต้นแบบ | 71 |
| 4.4.2 การเปรียบเทียบวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ตีจูนฟิลเตอร์ก่อน และหลังการติดตั้งโดยใช้รีแอคเตอร์Nokian(Nokian Capacitor) . | 75 |
| 4.4.3 การเปรียบเทียบวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ตีจูนฟิลเตอร์ระหว่าง รีแอคเตอร์ต้นแบบ กับรีแอคเตอร์ Nokian (Nokian Capacitor).. | 79 |
| 4.5 สรุป | 83 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... | 84 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง..... | 84 |
| 5.1.1 ผลการทดสอบรีแอคเตอร์..... | 84 |
| 5.1.2 ผลการทดสอบวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ตีจูนฟิลเตอร์..... | 85 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป..... | 86 |
| ภาคผนวก | |
| กิตติกรรมประกาศ | |
| เอกสารอ้างอิง | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสแบบไซน์..... | 4 |
| 2.2 รูปคลื่นของแรงดันสามเหลี่ยม..... | 5 |
| 2.3 รูปคลื่นแบบยอดแบน..... | 5 |
| 2.4 รูปคลื่นแบบยอดแหลม..... | 6 |
| 2.5 ระบบไฟฟ้าและวงจรสมมูลที่เกิดจากรีโซแนนซ์แบบขนาน..... | 13 |
| 2.6 ค่าของ Z_h ที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่..... | 14 |
| 2.7 ระบบไฟฟ้าและวงจรสมมูลที่เกิดจากรีโซแนนซ์แบบอนุกรม..... | 15 |
| 2.8 ค่าของ Z_h ที่แปรเปลี่ยนตามความถี่..... | 16 |
| 2.9 สภาพการระเบิดของชุดคาปาซิเตอร์..... | 17 |
| 2.10 สภาพของอุปกรณ์ตัดต่อไฟฟ้า..... | 17 |
| 2.11 โครงสร้างของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์แบบดีจูนฟิลเตอร์..... | 19 |
| 2.12 วงจรสมมูลที่ความถี่ต่ำกว่า 189Hz..... | 20 |
| 2.13 วงจรสมมูลที่ความถี่สูงกว่า 189Hz..... | 20 |
| 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และ impedance (Z) ของการใส่รีแอคเตอร์ขนาด 7%..... | 21 |
| 2.15 การไหลของสัญญาณฮาร์โมนิกส์ในวงจรดีจูนฟิลเตอร์ 7%..... | 21 |
| 2.16 ตัวเหนี่ยวนำกำลัง..... | 22 |
| 2.17 ตัวเก็บประจุกำลัง..... | 23 |
| 3.1 รีแอคเตอร์ 3 เฟสแบบแกนร่วม..... | 24 |
| 3.2 โครงสร้างและDimension แกนเหล็กรีแอคเตอร์ 3 เฟสแบบแกนร่วม..... | 25 |
| 3.3 วงจรแม่เหล็กในแต่ละเฟสของรีแอคเตอร์..... | 26 |
| 3.4 แผ่นอลูมิเนียม (Aluminum Sheet)..... | 27 |
| 3.5 ภาพหน้าตัดด้านหน้าและด้านบนของขดลวด..... | 28 |
| 3.6 กราฟการสูญเสียในแกนเหล็ก..... | 30 |
| 3.7 แผนผังการออกแบบรีแอคเตอร์..... | 32 |
| 3.8 ลักษณะของโครงสร้างแกนเหล็กที่ใช้ในการออกแบบ..... | 33 |
| 3.9 หน้าต่างด้าน Input..... | 38 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|--|
| 3.10 | หน้าต่างปรับแต่งคุณสมบัติของแกนเหล็ก..... 39 |
| 3.11 | หน้าต่างปรับแต่งคุณสมบัติของตัวนำ 40 |
| 3.12 | หน้าต่างปรับแต่งคุณสมบัติของฉนวน..... 41 |
| 3.13 | หน้าต่างเอาต์พุตในส่วนของการแสดงผลข้อมูลอินพุต (1) 42 |
| 3.14 | หน้าต่างเอาต์พุตในส่วนของการแสดงผลข้อมูลอินพุต (2) 42 |
| 3.15 | หน้าต่างเอาต์พุตในส่วนของคุณสมบัติการออกแบบ 43 |
| 3.16 | หน้าต่างเอาต์พุตในส่วนของคุณสมบัติเทคนิค 43 |
| 3.17 | หน้าต่างโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM)..... 45 |
| 3.18 | การวิเคราะห์รีแอกเตอร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ 46 |
| 3.19 | ผลการ Simulation การทำงานของรีแอกเตอร์..... 46 |
| 3.20 | เส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กจากการจำลองในโปรแกรม FEMM 47 |
| 3.21 | ทิศทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กจากการจำลองในโปรแกรม FEMM 47 |
| 3.22 | ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจากการจำลองในโปรแกรม FEMM 48 |
| 3.23 | แบบรีแอกเตอร์ที่ได้จากการออกแบบ 49 |
| 3.24 | รีแอกเตอร์ที่สร้างขึ้นจริง..... 49 |
| 3.25 | Nokian Reactor 53 |
| 3.26 | Nokian Capacitor 54 |
| 3.27 | วงจรตีจูนฟิลเตอร์ที่ประกอบเสร็จ 55 |
| 4.1 | วงจรการทดสอบรีแอกเตอร์..... 56 |
| 4.2 | การทดสอบรีแอกเตอร์และการบันทึกผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ..... 57 |
| 4.3 | Single line diagram ของระบบไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ..... 59 |
| 4.4 | รูปคลื่น V, I ทั้ง 3 เฟส และค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบไฟฟ้า..... 59 |
| 4.5 | รูปคลื่น V ทั้ง 3 เฟส และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้า..... 60 |
| 4.6 | รูปคลื่น I ทั้ง 3 เฟส และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้า 60 |
| 4.7 | รูปคลื่น V, I ทั้ง A เฟส และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้า..... 61 |
| 4.8 | สเปคตรัม V, I ทั้ง 3 เฟสของระบบไฟฟ้า 61 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.9 Single line diagram ของระบบไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ..... | 63 |
| 4.10 รูปคลื่น V, I ทั้ง 3 เฟส และค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบไฟฟ้า..... | 63 |
| 4.11 รูปคลื่น V ทั้ง 3 เฟส และค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบไฟฟ้า..... | 64 |
| 4.12 รูปคลื่น I ทั้ง 3 เฟส และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้า..... | 64 |
| 4.13 รูปคลื่น V, I ทั้ง A เฟส และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้า..... | 65 |
| 4.14 สเปกตรัม V, I ทั้ง 3 เฟสของระบบไฟฟ้า | 65 |
| 4.15 Single line diagram ของระบบไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ..... | 67 |
| 4.16 รูปคลื่น V, I ทั้ง 3 เฟส และค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบไฟฟ้า..... | 67 |
| 4.17 รูปคลื่น V ทั้ง 3 เฟส และค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบไฟฟ้า..... | 68 |
| 4.18 รูปคลื่น I ทั้ง 3 เฟส และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้า..... | 68 |
| 4.19 รูปคลื่น V, I ทั้ง A เฟส และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้า..... | 69 |
| 4.20 สเปกตรัม V, I ทั้ง 3 เฟสของระบบไฟฟ้า | 69 |
| 4.21 รูปคลื่นแรงดัน ทั้ง 3 เฟสของระบบไฟฟ้า..... | 71 |
| 4.22 รูปคลื่นกระแส ทั้ง 3 เฟสของระบบไฟฟ้า..... | 72 |
| 4.23 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสเฟส A ของระบบไฟฟ้า..... | 72 |
| 4.24 สเปกตรัมของแรงดันก่อนและหลังการติดตั้งวงจรถีจูนฟิลเตอร์..... | 73 |
| 4.25 สเปกตรัมของกระแสก่อนและหลังการติดตั้งวงจรถีจูนฟิลเตอร์..... | 73 |
| 4.26 สเปกตรัมของแรงดันเฟส A ก่อนและหลังการติดตั้งวงจรถีจูนฟิลเตอร์..... | 74 |
| 4.27 สเปกตรัมของกระแสเฟส A ก่อนและหลังการติดตั้งวงจรถีจูนฟิลเตอร์..... | 74 |
| 4.28 รูปคลื่นแรงดัน ทั้ง 3 เฟสของระบบไฟฟ้า..... | 75 |
| 4.29 รูปคลื่นกระแส ทั้ง 3 เฟสของระบบไฟฟ้า..... | 76 |
| 4.30 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสเฟส A ของระบบไฟฟ้า..... | 76 |
| 4.31 สเปกตรัมของแรงดันก่อนและหลังการติดตั้งวงจรถีจูนฟิลเตอร์..... | 77 |
| 4.32 สเปกตรัมของกระแสก่อนและหลังการติดตั้งวงจรถีจูนฟิลเตอร์..... | 77 |
| 4.33 สเปกตรัมของแรงดันเฟส A ก่อนและหลังการติดตั้งวงจรถีจูนฟิลเตอร์..... | 78 |
| 4.34 สเปกตรัมของกระแสเฟส A ก่อนและหลังการติดตั้งวงจรถีจูนฟิลเตอร์..... | 78 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.35 รูปคลื่นแรงดัน ทั้ง 3 เฟสของระบบไฟฟ้า | 79 |
| 4.36 รูปคลื่นกระแส ทั้ง 3 เฟสของระบบไฟฟ้า..... | 80 |
| 4.37 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสเฟส A ของระบบไฟฟ้า..... | 80 |
| 4.38 สเปกตรัมของแรงดันระหว่างรีแอกเตอร์ต้นแบบ กับรีแอกเตอร์ของ Nokian.... | 81 |
| 4.39 สเปกตรัมของกระแสระหว่างรีแอกเตอร์ต้นแบบ กับรีแอกเตอร์ของ Nokian.... | 81 |
| 4.40 สเปกตรัมของแรงดันเฟส A ระหว่างรีแอกเตอร์ต้นแบบ กับรีแอกเตอร์ของ Nokian | 82 |
| 4.41 สเปกตรัมของกระแสเฟส A ระหว่างรีแอกเตอร์ต้นแบบ กับรีแอกเตอร์ของ Nokian | 82 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.1 ค่าที่ได้จากการออกแบบรีแอกเตอร์ขนาด 0.767mH | 37 |
| 4.1 ผลการทดสอบรีแอกเตอร์ Phase A..... | 57 |
| 4.2 ผลการทดสอบรีแอกเตอร์ Phase B..... | 57 |
| 4.3 ผลการทดสอบรีแอกเตอร์ Phase C..... | 58 |
| 4.4 สรุปผลการทดสอบรีแอกเตอร์ | 58 |
| 4.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้าก่อนการติดตั้งวงจรถีจูนฟิลเตอร์ | 62 |
| 4.6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้าหลังการติดตั้งวงจรถีจูนฟิลเตอร์ โดยใช้รีแอกเตอร์ต้นแบบ | 66 |
| 4.7 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้าหลังการติดตั้งวงจรถีจูนฟิลเตอร์ โดยใช้รีแอกเตอร์ Nokian (Nokian Capacitor) | 70 |
| 4.8 ผลการเปรียบเทียบการติดตั้งวงจรถีจูนฟิลเตอร์ | 75 |
| 4.9 ผลการเปรียบเทียบการติดตั้งวงจรถีจูนฟิลเตอร์ | 79 |
| 4.10 ผลการเปรียบเทียบการติดตั้งวงจรถีจูนฟิลเตอร์ | 83 |
| 4.11 ผลการเปรียบเทียบก่อนและหลังการติดตั้งวงจรถีจูนฟิลเตอร์ | 83 |
| 5.11 ผลการทดสอบรีแอกเตอร์..... | 84 |
| 5.2 ผลการทดสอบวงจรรองฮาร์โมนิกส์จีจูนฟิลเตอร์..... | 85 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง มาใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม อุปกรณ์เหล่านี้เป็นโหลดที่ไม่มีความเป็นเชิงเส้น (Non-linear Load) ก่อให้เกิดสัญญาณฮาร์มอนิกส์ขึ้นในระบบ เป็นปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่สำคัญ ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์และระบบไฟฟ้าเป็นอย่างมากอีกทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการป้องกันสัญญาณฮาร์มอนิกส์หรือรีแอคเตอร์ โดยส่วนมากจะเป็นเทคโนโลยีที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

ปริญญาณิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอวิธีการออกแบบรีแอคเตอร์ หรือตัวเหนี่ยวนำแบบแกนเหล็กสามเฟส (Three-phase reactors) โดยรีแอคเตอร์ที่ออกแบบได้จะนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรถัดจูนฟิลเตอร์ (Detune filters) ที่ติดตั้งในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชุดคาปาซิเตอร์ (Capacitor Banks) อันเนื่องมาจากการขยายสัญญาณของฮาร์มอนิกส์ ที่เกิดขึ้นในสภาวะรีโซแนนซ์ ปัญหาการเกิดรีโซแนนซ์มักจะเกิดที่ความถี่ระหว่าง 250 - 350 Hz ตรงกับฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5 และ 7 สอดคล้องกับฮาร์มอนิกส์ที่ผลิตโดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่าง ๆ และเกิดจากการขยายตัวของกระแสฮาร์มอนิกส์จากชุดคาปาซิเตอร์เอง ซึ่งรีแอคเตอร์ขนาด 7% จะให้ความถี่ที่ 189 Hz เห็นได้ว่าที่ความถี่ดังกล่าวไม่มีในระบบฮาร์มอนิกส์ ดังนั้นจึงไม่สามารถเกิดการรีโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้าได้เลย ส่งผลให้ชุดคาปาซิเตอร์ปลอดภัยสามารถอยู่ในระบบไฟฟ้าได้ และจ่ายค่ารีแอคทีฟเพาเวอร์ (kVAR) ได้ตามปกติ รวมทั้งสามารถลดกระแสกระชาก (inrush current) เมื่อมีการสวิตช์ของอุปกรณ์ได้ติดต่อ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการเกิดและผลกระทบของฮาร์มอนิกส์รีโซแนนซ์
2. เพื่อศึกษาและออกแบบวงจรถัดจูนฟิลเตอร์สัญญาณฮาร์มอนิกส์ ที่สามารถนำไปใช้ได้จริงกับระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม
3. เพื่อออกแบบรีแอคเตอร์
4. เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างรีแอคเตอร์ต้นแบบ สำหรับการประยุกต์ใช้งานจริงต่อไป

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดในโครงการ

โครงการนี้เป็นการเขียนโปรแกรมคำนวณการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ป้องกันกระแสฮาร์มอนิกส์หรือรีแอคเตอร์ รวมทั้งออกแบบวงจรถัดจูนฟิลเตอร์สัญญาณฮาร์มอนิกส์ โดยจะติดตั้งจริงในโรงงานอุตสาหกรรม และนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ด้านฮาร์มอนิกส์จากผลการติดตั้งมาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE 519-1992 และมาตรฐานการไฟฟ้าฝ่ายผลิต การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และการไฟฟ้านครหลวง

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาเกิด ปัญหา และวิธีการแก้ปัญหาของฮาร์โมนิกส์รีโซแนนซ์
2. ศึกษาหลักการทำงานของวงจรรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์
3. ศึกษาการออกแบบตัวเหนี่ยวนำแบบแกนเหล็กสามเฟส หรือรีแอคเตอร์
4. เขียนโปรแกรมคำนวณการออกแบบรีแอคเตอร์ ด้วยโปรแกรม Microsoft visual basic
5. ออกแบบรีแอคเตอร์
6. จำลองการทำงานของรีแอคเตอร์ โดยใช้โปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM)
7. สร้างและทดสอบรีแอคเตอร์ในห้องปฏิบัติการ
8. ออกแบบวงจรรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์ โดยใช้รีแอคเตอร์ที่สร้างขึ้น
9. ติดตั้งวงจรรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์ ในโรงงานอุตสาหกรรม
10. เก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการกรองฮาร์โมนิกส์ของวงจร์ดีจูนฟิลเตอร์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1. เรียนรู้และเข้าใจการเกิด ปัญหา และวิธีการแก้ปัญหาของฮาร์โมนิกส์รีโซแนนซ์
2. เรียนรู้และเข้าใจถึงหลักการทำงานของวงจรรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์
3. รีแอคเตอร์ที่สร้างขึ้น สามารถใช้งานได้จริงในโรงงานอุตสาหกรรม และลดต้นทุนในการนำเข้รีแอคเตอร์จากต่างประเทศ
4. อุปกรณ์และระบบไฟฟ้ามีเสถียรภาพส่งผลให้กระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ
5. เสริมสร้างศักยภาพทางเทคโนโลยีด้วยตัวเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในโครงการ

2.1 นิยามและความหมายของฮาร์โมนิกส์

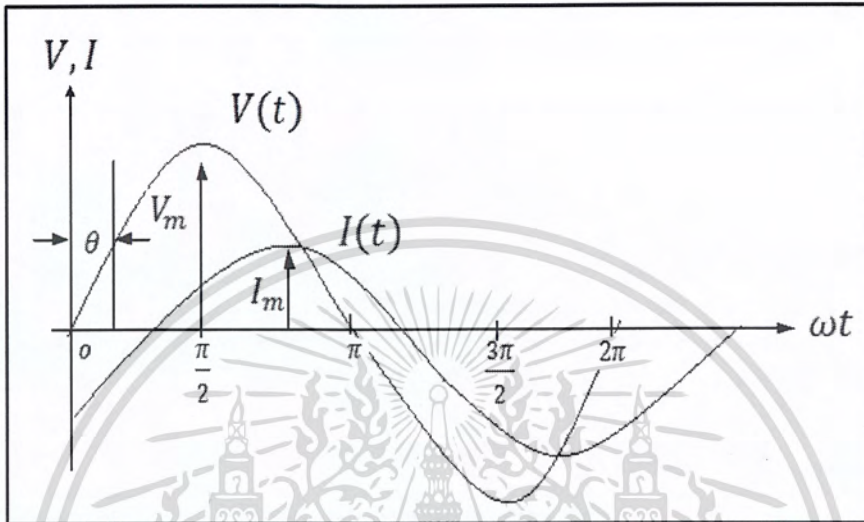
รายจ่ายที่เพิ่มขึ้นในเรื่องของพลังงานนั้น สาเหตุหนึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นจากการใช้งานอุปกรณ์ประเภทเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำให้เกิดมลภาวะของฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Pollution) ในระบบไฟฟ้า สิ่งสำคัญที่ทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ขึ้นนั้นมาจากการใช้งานอุปกรณ์ประเภทสวิตชิง โดยขณะนี้ฮาร์โมนิกส์ได้รับความสนใจกันอย่างกว้างขวาง เพราะ 60 - 70% ของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในปัจจุบันเป็นพลังงานที่ถูกใช้โดยอุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์

แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์นั้นมาจากหม้อแปลงไฟฟ้า, มอเตอร์, เรคตีไฟเออร์, และอุปกรณ์สวิตชิงต่างๆ โดยทั่วไปแล้วแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ และฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ไหลเข้าสู่ระบบมีน้อยมากในระบบขนาดเล็กแต่ปัญหาของฮาร์โมนิกส์ลำดับที่เกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่แล้วมาจากการที่อุตสาหกรรมขนาดใหญ่ยังใช้วิธีการในการกำจัดฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ยังไม่ได้ผลเท่าที่ควร ในปัจจุบันการที่เพิ่มขึ้นของอุปกรณ์ประเภท Non-Linear Load ในโรงงานอุตสาหกรรม และผู้ใช้ไฟขนาดใหญ่มากขึ้น ทำให้สถานการณ์ของฮาร์โมนิกส์แยลง จำนวนของฮาร์โมนิกส์ที่เพิ่มขึ้นนี้เองทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่ออยู่ในระบบได้

ฮาร์โมนิกส์จำนวนมากที่ไหลเข้าสู่ระบบจำหน่ายนั้น เกิดจากผู้ใช้ไฟในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นเรื่องธรรมดาที่โรงงานอุตสาหกรรมนั้นไม่ต้องการที่จะประสบปัญหาใดๆ ที่มาจากฮาร์โมนิกส์และเช่นเดียวกับผู้ใช้ไฟเองก็ไม่ต้องการให้มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น หรือมีสัญญาณรบกววนที่เป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากฮาร์โมนิกส์ อย่างไรก็ตามต้องตระหนักว่า พลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นจากฮาร์โมนิกส์นั้น ไม่ใช่เรื่องเล็กน้อยที่จะปล่อยปละละเลยได้

2.1.1 นิยามของฮาร์โมนิกส์

ไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบันนี้ โดยทั่วไปจะมีรูปคลื่นของแรงดันและกระแสเป็นรูปไซน์ (Sinusoidal Wave) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 รูปของแรงดันและคลื่นกระแสในรูปที่ 2.1 นี้ สามารถเขียนเป็นสมการแสดงขนาดที่แปรเปลี่ยนตามเวลาได้ดังนี้



รูปที่ 2.1 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสแบบไซน์

$$V(t) = V_m \sin(\omega t)$$

$$\text{หรือ } V(t) = V_m \sin(2\pi f t)$$

(2.1)

$$i(t) = I_m \sin(\omega t - \theta)$$

$$\text{หรือ } i(t) = I_m \sin(2\pi f t - \theta)$$

(2.2)

เมื่อ $V(t)$ คือ ขนาดของแรงดัน ณ เวลา t ใดๆ

V_m คือ ขนาดสูงสุดหรือของค่ายอดของแรงดัน

$i(t)$ คือ ขนาดของกระแส ณ เวลา t ใดๆ

I_m คือ ขนาดสูงสุดหรือของค่ายอดของกระแส

f คือ ความถี่ของแรงดันและกระแส

θ คือ ขนาดของมุมที่กระแสตามหลัง

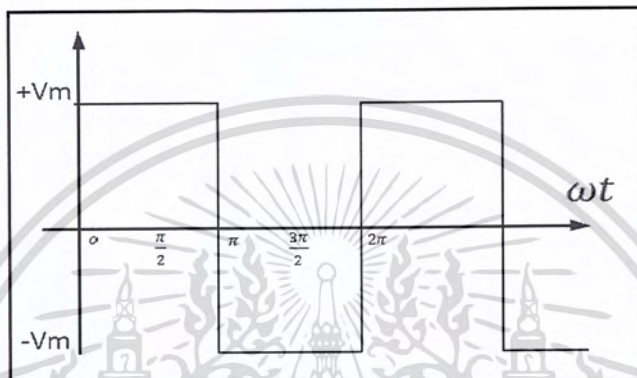
t คือ เวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ รูปคลื่นของแรงดันและกระแสจะไม่จำเป็นต้องเป็นไซน์ เช่น อาจจะเป็นรูปสามเหลี่ยม (Square Wave) ดังรูปที่ 2.2 รูปคลื่นของแรงดันในรูปที่ 2.2 สามารถเขียนเป็นสมการแสดงขนาดที่แปรเปลี่ยนตามเวลาได้ดังนี้

$$V(t) = \frac{4}{\pi} V_m [\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \dots]$$

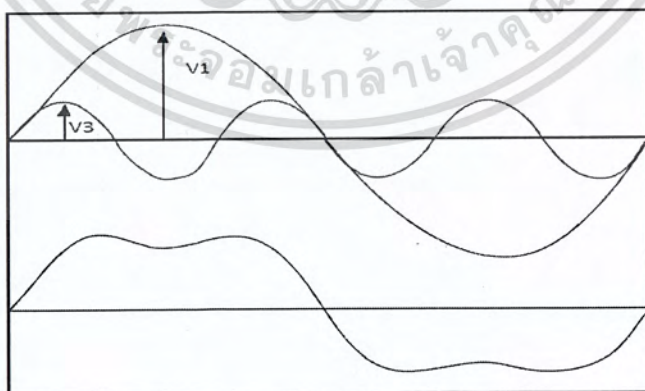
$$\text{หรือ } V(t) = \frac{4}{\pi} V_m \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\omega t) \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.2 รูปคลื่นของแรงดันสามเหลี่ยม

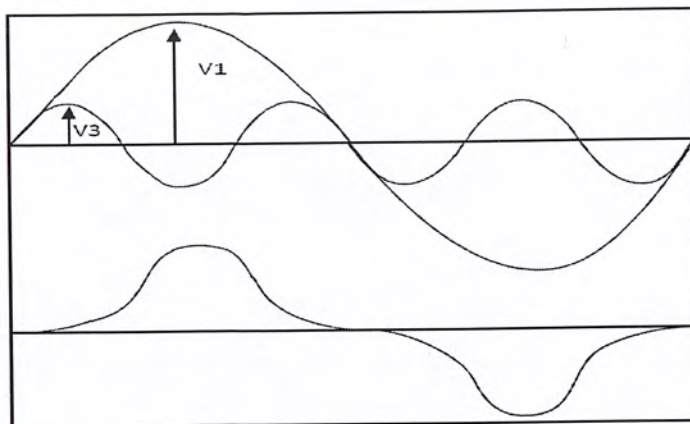
จากรูปที่ 2.2 สมการที่ 2.3 จะพบว่าแรงดันที่มีรูปคลื่นแบบสี่เหลี่ยม จะประกอบไปด้วยรูปคลื่นไซน์ ที่มีขนาดและความถี่ต่างๆ จำนวนมาก

เพื่อแสดงให้เห็นว่ารูปคลื่นแบบไซน์ที่มีขนาดและความถี่ต่างกัน เมื่อนำมารวมกันจะเกิดเป็นรูปคลื่นแบบต่างๆ ได้ สามารถแสดงเป็นตัวอย่างได้ดังนี้



รูปที่ 2.3 รูปคลื่นแบบยอดแบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 รูปคลื่นแบบยอดแหลม

ในรูปที่ 2.3 นี้เป็นรูปคลื่นแบบยอดแบนเกิดจากรูปคลื่นแบบไซน์จำนวน 2 ชุดที่มีความถี่ 3 เท่ารวมตัวกันคือ

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

ส่วนในรูปที่ 2.4 เป็นรูปคลื่นแบบยอดแหลมเกิดจากรูปคลื่นแบบไซน์จำนวน 2 ชุดที่มีความถี่ 3 เท่าเหมือนรูปที่ 2.3 มารวมกัน แต่มุมเฟสต่างจากรูปที่ 2.3 คือ

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

จากรูปคลื่นต่างๆ ที่กล่าวมาเราสามารถสรุปได้ว่าไม่ว่ารูปคลื่นเหล่านั้นจะมีรูปร่างเป็นอย่างไร เช่น แบบไซน์แบบไซน์ที่มีขนาดและความถี่ต่างๆ จำนวนมากมารวมกัน

รูปคลื่น $V_m \sin(\omega t)$ ในสมการที่ 2.1 หรือ $\frac{4}{\pi} V_m \sin(\omega t)$ ในสมการที่ 2.3 หรือ $V_1 \sin(\omega t)$ ในสมการที่ 2.4 และ 2.5 เราเรียกว่าเป็นความถี่หลักมูล (Fundamental Wave) ส่วนรูปอื่นๆ ที่มีความถี่ต่างไปจากรูปคลื่นความถี่ต่างไปจากรูปคลื่นความถี่หลักมูลเป็นจำนวนเท่า โดยที่ $n = 2, 3, 4, \dots$ เช่น $\frac{4}{3\pi} V_m \sin(3\omega t)$ ในสมการที่ 2.3 หรือ $V_3 \sin(3\omega t)$ ในสมการที่ 2.4 และ 2.5 ที่มีความถี่เป็นสามเท่าของของความถี่หลักมูล เราเรียกว่าเป็นรูปคลื่นฮาร์โมนิกส์ โดยมีลำดับฮาร์โมนิกส์เป็น 3

ดังนั้นฮาร์โมนิกส์ก็คือขนาดของแรงดันหรือกระแสที่มีความถี่ที่แตกต่างไปจากความถี่หลักมูลซึ่งเป็นส่วนประกอบของแรงดันหรือกระแสดังกล่าว สำหรับระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทยความถี่หลักมูลคือ 50 Hz ความถี่ของแรงดันฮาร์โมนิกส์หรือกระแสฮาร์โมนิกส์ซึ่งเป็น 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, ...

2.1.2 ออนุกรมฟูรีเยร์

การที่จะอธิบายว่ารูปคลื่นใดๆ มีฮาร์โมนิกส์ลำดับที่เท่าไรปนอยู่บ้าง และฮาร์โมนิกส์แต่ละลำดับนั้นมีปริมาณหรือขนาดมากน้อยแค่ไหน สามารถอธิบายได้โดยใช้ออนุกรมฟูรีเยร์

$$V(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right)] \quad (2.6)$$

เมื่อ $V(t)$ คือ ฟังก์ชันของรูปคลื่นรายคาบใดๆ

a_0 คือ ค่าเฉลี่ยของ $V(t)$

n คือ เลขจำนวนเต็มบวกใดๆ (ลำดับฮาร์โมนิกส์)

a_n และ b_n คือ สัมประสิทธิ์ของออนุกรมฟูรีเยร์

T คือ คาบเวลาของลูกคลื่น

$$V(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [c_n \cos(n(2\pi f t - \phi_n))] \quad (2.7)$$

เมื่อ

f คือ ความถี่

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

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

2.1.3 ศัพท์และปริมาณต่างๆ

เพื่อสามารถเรียนรู้และเข้าใจเรื่องฮาร์โมนิกส์ได้อย่างต่อเนื่องทันในตอนแรก ตอนเริ่มต้นด้วยการทำความเข้าใจกับศัพท์และปริมาณต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับฮาร์โมนิกส์ก่อน

- Distortion Factor: DF
- Harmonic Factor: HF
- Total Harmonic Content: THC
- Total Harmonic Distortion: THD

ทั้ง DF, HF, THC หรือ THD ต่างก็ใช้ระบุปริมาณของฮาร์โมนิกส์ลำดับที่มีอยู่ทั้งหมด โดยเปรียบเทียบกับค่า RMS ของค่าความถี่หลักมูล หรือเปรียบเทียบกับค่า RMS ของปริมาณทั้งหมดทั้งนี้แล้วแต่มาตรฐานต่างๆ จะกำหนดนิยามไว้จากมาตรฐาน IEEE 519-1992 ได้

$$DF_v = HF_v = THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad (2.8)$$

$$DF_i = HF_i = THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 ประเภทของฮาร์โมนิกส์

ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่เกิดขึ้นอยู่ในกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าอาจแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ เพื่อความสะดวกในการกล่าวถึงดังต่อไปนี้

- Harmonic
- Interharmonic
- Characteristic Harmonic
- Noncharacteristic Harmonic
- Triple Harmonic

Harmonic หมายถึง ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใดๆ ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล เช่น รูปคลื่นสี่เหลี่ยมในรูป 2.2 จะมีฮาร์โมนิกส์ป็นอยู่จำนวนมาก ตั้งแต่ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2, 3, 4... หรือรูปคลื่นในรูปที่ 2.3 และในรูปที่ 2.4 จะมีเฉพาะฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3 ป็นอยู่เท่านั้น

Interharmonic หมายถึง ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใดๆ ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล Interharmonic นี้ส่วนมากจะพบในกระแสของเตาหลอมแบบอาร์ค (arc furnace) เนื่องจากในระหว่างหลอมเหล็ก โดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้นการหลอม กระแสแบบอาร์คจะยังไม่เสถียร ทำให้คาบของกระแสไม่แน่นอน กล่าวคือ ความถี่ 50 Hz 1 คาบ ใช้เวลา 20 มิลลิวินาทีทุกคาบ ทำให้ Interharmonic ขึ้น นอกจากนี้จะพบ Interharmonic ในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการควบคุมการทำงานแบบ Integral Cycle Control หรือ Burst firing

Characteristic Harmonic คือ ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ถูกสร้างโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้า (แปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงหรือสลับกัน โดยใช้สารกึ่งตัวนำ เช่น Transister, SCR เป็นตัวสวิตซ์ตัดต่อกระแส) ในสภาวะการทำงานตามปกติ ลำดับของ Characteristic Harmonic สามารถหาได้จาก

$$n = \pm kp$$

เมื่อ n คือ ลำดับของฮาร์โมนิกส์

k คือ เลขจำนวนเต็มบวกใดๆ

p คือ จำนวนพัลส์ (Pulse Number) ของเครื่องแปลงผันไฟฟ้า

Non-characteristic Harmonic คือ ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ถูกสร้างโดยเครื่องแปลงผันไฟฟ้าที่ไม่เป็นไปตามสมการ $n = \pm kp$ เช่นเครื่องแปลงผันไฟฟ้าชนิด 12 พัลส์ ควรมีเฉพาะ Non-characteristic Harmonic ที่มีลำดับ 11, 13, 23, 25, 35, 37 ดังนั้น ถ้ามีฮาร์โมนิกส์ลำดับที่มีลำดับเป็น 5, 7, 17, 19 ป็นมาด้วย ฮาร์โมนิกส์เหล่านี้ถือว่าเป็น Non-characteristic Harmonic

Triple Harmonic คือ ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่มีลำดับถูกหารด้วย 3 ลงตัว ได้แก่ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 3, 6, 9... ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มที่มีลำดับ (sequence) เป็นศูนย์ในกรณีที่เป็นระบบ 3 เฟส 4 สาย ฮาร์โมนิกส์กลุ่มนี้จะรวมตัวกันไหลอยู่ในสายนิวตรอล ทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบไฟฟ้าได้ เช่น สายนิวตรอลร้อน ฉนวนเสียหายเกิดลัดวงจร เป็นต้น

2.1.5 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์

แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้ามีด้วยกันหลายอย่าง ทั้งจากอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภท Static power converter ที่เริ่มนำมาใช้กันแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม และเนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทต่างๆที่มี ใช้กันมานานแล้ว กล่าวคือได้รวบรวมสรุปแหล่งที่มาทั้งหมดที่เป็นตัวกำเนิดฮาร์โมนิกส์ว่ามีมากน้อยเพียงใด ที่จะมีผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบไฟฟ้าหรืออุปกรณ์หรือไม่

แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์สามารถแยกออกได้หลายประเภท ดังนี้

ก. โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น

- เรกติไฟเออร์ (rectifier)
- เรกติไฟเออร์แบบมีการควบคุม (controlled rectifier)
- คอนเวอร์เตอร์แบบมีความถี่ (static frequency converter)
- รีแอกเตอร์แบบอิ่มตัว (saturablereactor)
- เตาหลอมแบบอาร์ค (arc furnace)
- เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบอาร์ค

ข. แหล่งกำเนิดเฟสแบบไม่สมดุล (phase unbalance sources)

- โหลดแบบเชิงเส้นเฟสเดียว (single phase linear load)
- โหลดแบบไม่เชิงเส้นเฟสเดียว (single phase unlinear load)
- หม้อแปลงเคลด้าเปิด (open delta transformer)
- ระบบจำหน่ายแบบวางนอนและไม่มีการสลับสาย (untransposed flat configuration of conductors)

ค. กระแสกระตุ้น (exciting currents)

- กรณีปกติ (normal condition)
- กรณีกระตุ้นมากเกินไป (overexciting condition)
- รีโซแนนซ์กับแกนเหล็ก (ferroresonance)

ง. แหล่งกำเนิดอื่นๆ

- สวิตชิงเสิร์จ
- กระแสตรงในวงจรกระแสสลับ
- ฟอลต์
- ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6 ผลกระทบที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์

2.1.6.1 ผลกระทบของฮาร์โมนิกส์ต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า

ฮาร์โมนิกส์สามารถทำให้เกิดผลกระทบต่างๆ ที่ไม่ต้องการได้ในระบบ ไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น ทำให้เกิดสัญญาณรบกวน ทำให้เกิดความเสียหายแก่ข้อมูล ทำให้เกิดแรงดันเกินพิกัด ทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ทำงานผิดพลาด ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเกิดความร้อนและไม่สามารถทำงานได้ตามปกติและ อาจเกิดความเสียหายขึ้นได้ ผลของสัญญาณฮาร์โมนิกส์ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนในระบบโทรศัพท์และสายส่งสัญญาณต่าง และยังทำให้รีเลย์และมิเตอร์ทำงานผิดพลาดอีกด้วย องค์ประกอบฮาร์โมนิกส์มีลักษณะที่เหมือนกับสัญญาณพหุในระบบ สิ่งที่ได้รับผลกระทบจากฮาร์โมนิกส์มากที่สุดก็คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ความเสียหายของข้อมูลทางคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ฮาร์โมนิกส์ยังสามารถให้ความร้อนเพิ่มขึ้นในหม้อแปลงและคาปาซิเตอร์ ส่งผลให้อายุการใช้งานที่สั้นลงหรืออาจเกิดความเสียหายเกิดขึ้น เงื่อนไขต่างๆ และรายละเอียดของการทำงานของอุปกรณ์ในขณะที่มีฮาร์โมนิกส์นั้น สามารถดูได้จากมาตรฐาน ANSI/IEEE Std 18-1980 และ IEEE Std C57.110 ตามลำดับ ความร้อนและการสั่นสะเทือนของโรเตอร์ของมอเตอร์นั้น ก็มีสาเหตุมาจากฮาร์โมนิกส์ และยังส่งผลให้มอเตอร์นั้นเกิดความร้อนเกิดขึ้น และทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลง

โดยทั่วไปแล้วปริมาณฮาร์โมนิกส์รวมทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ (Total Harmonic Distortion: THD) ในโรงงานอุตสาหกรรมต้องไม่เกิน 5% ตามมาตรฐาน IEEE เรื่อง Harmonic Control in Electrical Power System Std. 519-1992 และฮาร์โมนิกส์นั้นไม่ได้ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ยังทำให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับมีประสิทธิภาพลดลง ทำให้ต้องเพิ่มการบำรุงรักษามากขึ้น เป็นการทำให้ต้นทุนสูงขึ้น ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่ม และเพิ่มความสูญเสียในหม้อแปลงและคาปาซิเตอร์ซึ่งจะกล่าวถึงผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าที่พบกันมากในอุปกรณ์หลักๆ ดังนี้

สกินเอฟเฟค (Skin Effect)

การเกิดฮาร์โมนิกส์ทำให้เกิดสกินเอฟเฟคในสายตัวนำทำให้ค่าความต้านทานของสายเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นที่ความถี่ปกติ 50-60 Hz สกินเอฟเฟคไม่มีปัญหาเท่าใดนัก สกินเอฟเฟคเกิดขึ้นเนื่องจากความเหนี่ยวนำของสาย (Self-Inductance) ไม่สม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของสาย กระแสไหลทางด้านนอกของสายมาก มีกระแสไหลผ่านตัวนำได้น้อยเพราะค่าความต้านทานของสายเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากความถี่ที่เพิ่มขึ้น

มอเตอร์ (Motor)

สายตัวนำที่มีวัสดุสนามแม่เหล็ก (Magnetic Material) เข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ในมอเตอร์หรือแม้กระทั่งท่อโลหะร้อยสายทำให้ผลของเนื้อสกินเอฟเฟคมีมากขึ้น เช่น โรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะแสดงผลอย่างรุนแรงเนื่องจากปัญหาดังกล่าว ความต้านทานภายในโรเตอร์มีค่าต่างกันขณะหมุนอยู่ขณะเริ่มสตาร์ท ทั้งนี้เนื่องจากสกินเอฟเฟคที่มีค่าต่างกันอันเกิดจากความถี่ในโรเตอร์ที่ไม่เหมือนกัน

กรณีที่แหล่งจ่ายไฟป้อนแรงดันไฟฟ้าแบบไม่สมมาตรสามเฟส (Unsymmetrical Three Phase Voltage) ให้กับมอเตอร์จะเกิดกระแสเกินเกินกว่าที่ออกแบบไว้และเกิดความถี่ขึ้นในโรเตอร์ 60 -118 Hz ความต้านทานของโรเตอร์ที่ความถี่สูงนี้เนื่องจากสกินเอฟเฟคมีค่าสูงกว่าที่ล๊อกลงของโรเตอร์ บางทีอาจถึง 5-6 เท่าของความถี่ปกติ ความไม่สมดุลของเฟสเพียงเล็กน้อยทำให้เกิดความสูญเสียในโรเตอร์เพิ่มขึ้น

หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

สกินเอฟเฟคทำให้เกิดความร้อนมากเกินไป นอกจากนี้การเบี่ยงเบนของคลื่นสัญญาณทำให้ความสูญเสียในแกนเหล็กมากขึ้นด้วยเนื่องจากความถี่ฮาร์โมนิกที่สูงกว่าความถี่ปกติ ผลของความเบี่ยงเบนของคลื่นสัญญาณในหม้อแปลงไฟฟ้ามีมากกว่าในสายตัวนำขนาดใหญ่แต่มีผลน้อยกว่าในมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ไฟฟ้ากระแสตรงในระบบถือว่าเป็นความเบี่ยงเบนของคลื่นชนิดหนึ่งที่ได้รับการพิจารณาน้อย ถ้าหากมีส่วนหนึ่งของกระแสตรงไหลในหม้อแปลงไฟฟ้า ก็อาจทำให้เกิดความร้อนมากเกินไปในหม้อแปลงไฟฟ้าได้ เพราะไฟฟ้ากระแสตรงทำให้เกิดการอิ่มตัวในแกนเหล็ก

สวิตช์เกียร์และเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Switch Gear and Circuit Breaker)

ความสูญเสียในสวิตช์เกียร์เนื่องจากความเบี่ยงเบนของคลื่นสัญญาณเหมือนกันในสายตัวนำ นอกจากนี้อุปกรณ์ใดๆ ที่มีค่าความเหนี่ยวนำเป็นสำคัญจะมีความสูญเสียเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจาก Proximity Effect หม้อแปลงกระแสจะมีความสูญเสียเพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องจากความเหนี่ยวนำใดๆ ที่มีอยู่ภายในหม้อแปลงกระแสจะมีผลต่อ Burden ของหม้อแปลงกระแสที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์และทำให้ความสูญเสียในแกนเหล็กเพิ่มขึ้น

เซอร์กิตเบรกเกอร์ที่มีขดลวดทรูปอยู่ภายในตัวมันเองก็มีปัญหาขึ้นนอกเหนือจากปัญหาสกินเอฟเฟคและ Proximity Effect ซึ่งทำให้เกิดความร้อนที่มากเกินไปในอุปกรณ์ที่นำกระแสหลัก ความร้อนมากเกินไปที่เกิดขึ้นทำให้อุณหภูมิรอบตัวภายใน เซอร์กิตเบรกเกอร์สูงขึ้นและทำให้การตั้งค่าการทรูปผิดไป อุปกรณ์การทรูปภายใน เซอร์กิตเบรกเกอร์จะไวต่อคลื่นประเภทฮาร์โมนิกส์ เพราะประสิทธิภาพของการส่งไปยังอุปกรณ์การทรูปเพิ่มขึ้นตามความถี่ แม้มาตรฐานใดๆ จะไม่มีการใช้หรือตั้งขึ้นมาสำหรับกรณีนี้ แต่พบว่าการทรูปของเซอร์กิตเบรกเกอร์อันเนื่องจากการเกิดฮาร์โมนิกส์นั้นร้อนมาก

ตัวเก็บประจุ (Capacitor)

ความสูญเสียภายในคาปาซิเตอร์ ความสูญเสียไดโอดเล็กตริกขนาดหนึ่งวัตต์ต่อ KVA ที่ความถี่ปกติมันจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนกับความถี่ที่เพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วคงที่ ส่วนความสูญเสียอันเนื่องมาจากความต้านทานภายในของคาปาซิเตอร์ที่มีค่าไม่สูงมากนัก รวมแล้วความสูญเสียทั้งหมดภายในคาปาซิเตอร์เนื่องจากฮาร์โมนิกส์มีค่าน้อยเมื่อเปรียบกับ KVA ของของตัวมันเอง แต่ถ้ามองในอีกด้านหนึ่งของคาปาซิเตอร์ที่มีขนาดเล็กๆ ต่อ KVA ของมัน ความสูญเสียอาจทำให้อุณหภูมิภายในคาปาซิเตอร์เพิ่มขึ้นและอายุการใช้งานที่สั้นลง

2.2 ฮาร์โมนิกส์รีโซแนนซ์ (Harmonic Resonance)

ฮาร์โมนิกส์รีโซแนนซ์ (Harmonic Resonance) คือผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้าปรากฏการณ์รีโซแนนซ์เกิดขึ้นได้จากสองสภาวะคือสภาวะรีโซแนนซ์แบบขนานและสภาวะรีโซแนนซ์แบบอนุกรม

รีโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance) เกิดจากสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่ผลิตโดยอุปกรณ์ที่มีวงจรรอเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยถ้ามีกระแสฮาร์โมนิกส์ไหลในวงจรรจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ของสัญญาณฮาร์โมนิกส์นั้นมากเป็นอนันต์เข้าสู่ Inductive และ Capacitive ส่งผลให้เกิดความผิดปกติทางด้านแรงดันไฟฟ้า นอกจากนี้ยังเกิดกระแสไฟฟ้าไหลวนอยู่ในระบบและคาปาซิเตอร์ในปริมาณหลายเท่าของกระแสฮาร์โมนิกส์ ส่งผลเสียหายต่อคาปาซิเตอร์และระบบไฟฟ้าเป็นอย่างมาก

รีโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series Resonance) เป็นการรวมกันของอุปกรณ์ชนิด Inductive และ Capacitive ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากปรากฏการณ์รีโซแนนซ์แบบขนาน ซึ่งจะเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีหม้อแปลงไฟฟ้ามากกว่า 1 ชุดโดยจะมีระบบใดระบบหนึ่งที่เกิดผลกระทบจากสัญญาณฮาร์โมนิกส์โดยตรง และระบบนั้นจะส่งผลต่อระบบข้างเคียง โดยกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ไหลออกมาทางด้านแรงดันสูงของหม้อแปลงไฟฟ้าของระบบที่มีสัญญาณฮาร์โมนิกส์ จะวิ่งเข้าสู่ระบบที่มีชุดคาปาซิเตอร์ต่ออยู่ ซึ่งชุดคาปาซิเตอร์นั้นจะเป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดการขยายตัวของกระแสซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้หม้อแปลงไฟฟ้าและคาปาซิเตอร์เกิดความเสียหายได้

2.2.1 การวิเคราะห์การเกิดรีโซแนนซ์

การคำนวณหาความถี่ที่ทำให้เกิดการรีโซแนนซ์ (n) ของระบบไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของ short circuit impedance (X_{SC}) ของบริเวณที่ตั้งหม้อแปลงไฟฟ้ากับค่าอิมพีแดนซ์ของคาปาซิเตอร์ (X_C) ดังสมการที่ 2.10

$$n = \sqrt{\frac{X_C}{X_{SC}}} = \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{MVA_C}} = \sqrt{\frac{(100 \times kVA)_T}{kVA_T \times Z_T}} \quad (2.10)$$

เมื่อ n คือ ความถี่ที่ทำให้เกิดการรีโซแนนซ์

X_C คือ Capacitor impedance

X_{SC} คือ Short circuit impedance

VA_C คือ Capacitor Banks Rating

VA_{SC} คือ Short Circuit Capacity

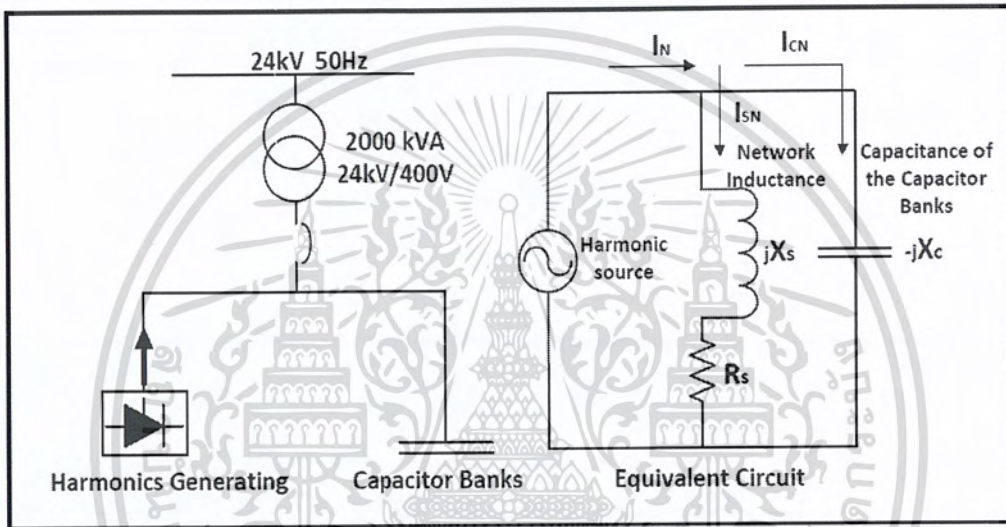
VA_T คือ Transformer Rating

Z_T คือ Transformer Impedance

สมการที่ 2.10 เป็นความสัมพันธ์เบื้องต้นที่ผู้วิเคราะห์การเกิดรีโซแนนซ์จะต้องตรวจสอบเป็นอันดับแรกการเกิดปัญหาการรีโซแนนซ์มักจะเกิดที่ความถี่ในระหว่าง 250-350 Hz ซึ่งตรงกับ n ที่ 5 และ 7 ซึ่งสอดคล้องกับฮาร์โมนิกส์ที่ผลิตโดยวงจรควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์และจะก่อให้เกิดการรีโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่า

$$I_N = I_{CN} + I_{SN} \quad (2.11)$$

$$I_{CN} = \frac{R_S + jX_S}{R_S + (jX_S - jX_C)} I_N \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.5 ระบบไฟฟ้าและวงจรสมมูลที่เกิดจากรีโซแนนซ์แบบขนาน

$$I_{SN} = \frac{-jX_C}{R_S + (jX_S - jX_C)} I_N \quad (2.13)$$

เมื่อ $R_S = R_{NETWORK} + R_{TRANSFORMER}$

$X_S = X_{NETWORK} + X_{TRANSFORMER}$

ที่ความถี่รีโซแนนซ์ค่า $jX_S = jX_C$ สมการที่ 2.12 – 2.13 จะเหลือ

$$I_{CN} = \frac{R_S + jX_S}{R_S} I_N \quad (2.14)$$

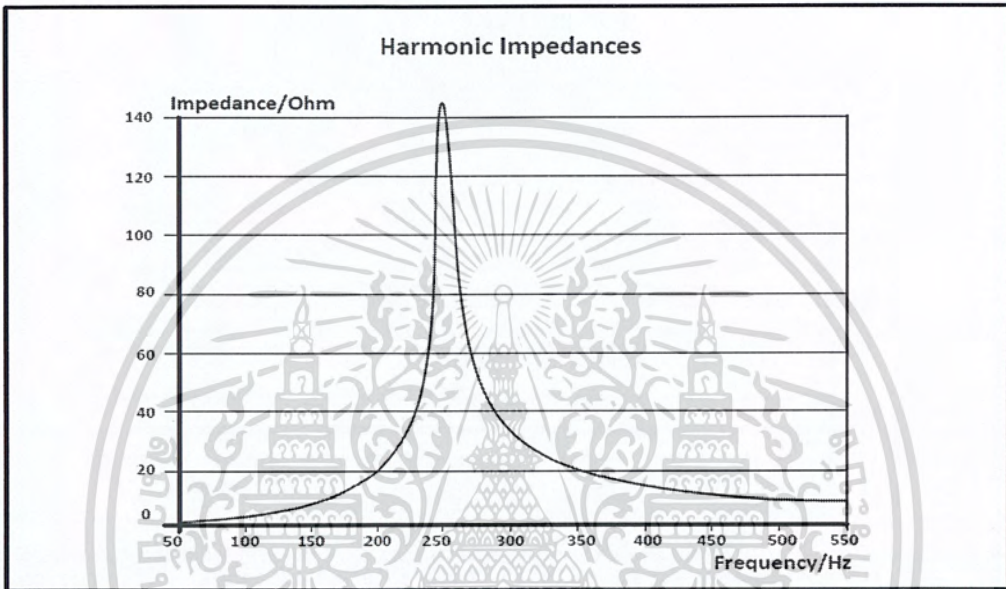
$$I_{SN} = \frac{-jX_C}{R_S} I_N \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่รีโซแนนซ์ค่า $jX_S = jX_C$ สมการที่ 2.13 - 2.14 ถ้าค่าของ $X_S = X_C > R_S$ ประมาณ 10-15 เท่า มีผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน X_S, X_C ถูกขยายเพิ่มขึ้นเป็นเป็น 10-15 เท่าของกระแสฮาร์โมนิกที่ความถี่รีโซแนนซ์ และถ้า $R_S \rightarrow 0$

$$I_{CN} = \frac{jX_S}{jX_S - jX_C} I_N \quad (2.16)$$

$$I_{SN} = \frac{-jX_C}{jX_S - jX_C} I_N \quad (2.17)$$



รูปที่ 2.6 ค่าของ Z_h ที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่

ที่ความถี่รีโซแนนซ์ กระแสฮาร์โมนิกส์มองเห็นค่าอิมพีแดนซ์ของระบบรวม หาได้จากสมการที่ 2.18 ถือว่าความต้านทานในระบบน้อยมากดังนี้

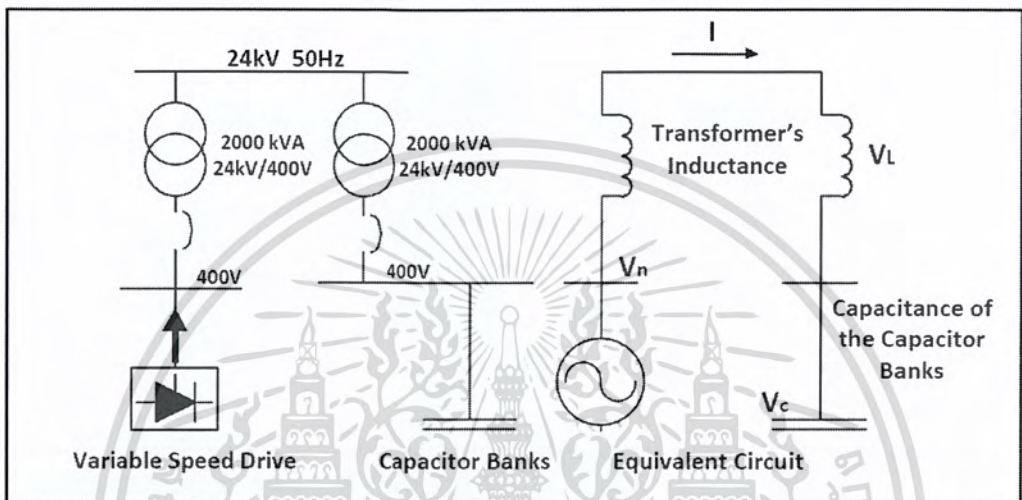
$$Z = \frac{-j\omega L}{1 - \omega^2 LC} \quad (2.18)$$

ที่ความถี่รีโซแนนซ์จะได้ $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ แทนค่าในสมการที่ 2.18

$$Z \rightarrow \infty \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.19 ถ้ามีกระแสฮาร์โมนิกส์ไหลในวงจรมีผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ของฮาร์โมนิกส์นั้นมากเป็นอนันต์ (Infinite) ณ บริเวณบัสในตำแหน่งที่มีภาระไฟฟ้าต่ออยู่และเกิดกระแสไฟฟ้าไหลมากเป็นอนันต์เข้าสู่ L และ C ส่งผลให้เกิดความผิดเพี้ยนทางด้านแรงดัน โดยกระแสไฟฟ้าจะถูกขยายถ้าค่าของคาปาซิเตอร์มากพอจะมีผลให้เกิด การขยายของกระแสฮาร์โมนิกส์ไหลออกทาง ด้านแรงดันสูงของหม้อแปลงเข้าสู่ระบบไฟฟ้าแรงสูงและอาจจะไหลผ่านลงมาหาคาปาซิเตอร์แรงต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าอีกตัวหนึ่งถ้าค่า L แล C สอดคล้องกัน เรียกว่าการรีโซแนนซ์แบบอนุกรม (series resonance) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ระบบไฟฟ้าและวงจรสมมูลที่เกิดจากรีโซแนนซ์แบบอนุกรม

$$V_n = V_L + V_C \tag{2.20}$$

$$V_L = V_n \frac{jX_L}{jX_L - jX_C} \tag{2.21}$$

$$V_C = V_n \frac{-jX_C}{jX_L - jX_C} \tag{2.22}$$

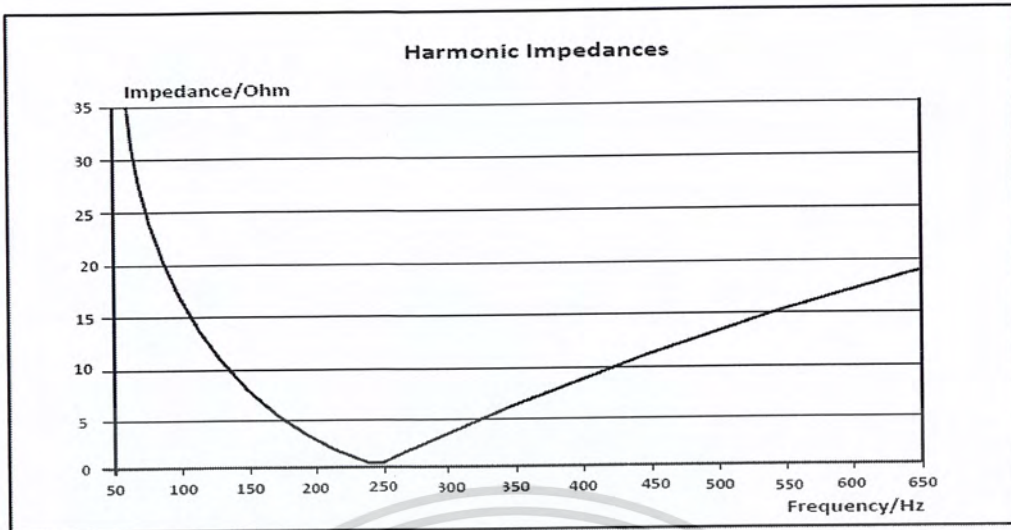
ที่ความถี่รีโซแนนซ์ กระแสฮาร์โมนิกส์มองเห็นค่าอิมพีแดนซ์ของระบบรวมหาได้จากสมการที่ 2.23 ถือว่าความต้านทานในระบบน้อยมากดังนี้

$$Z = \frac{1 - j\omega^2 LC}{j\omega C} \tag{2.23}$$

ที่ความถี่รีโซแนนซ์จะได้ $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ แทนค่าในสมการที่ 2.23 จะได้

$$Z \rightarrow \infty \tag{2.24}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ค่าของ Z_h ที่แปรเปลี่ยนตามความถี่

การเกิดรีโซแนนซ์แบบอนุกรมมรผลทำให้อิมพีแดนซ์มีค่าน้อยมากกระแสฮาร์โมนิกส์จะไหลเข้าสู่ฉนวน แรงดันไฟฟ้าตกคร่อม L และ C เข้าสู่ฉนวนด้วย มีผลทางปฏิบัติให้แรงดันฮาร์โมนิกส์ ณ บัสที่ต่อกับคาปาซิเตอร์จะสูงขึ้นประมาณ 6-20 เท่า มีผลทำให้เกิด Dielectric Losses และ Partial Discharge กับฉนวนของคาปาซิเตอร์ ในกรณีที่มีการใส่วงจรกรองฮาร์โมนิกส์ สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ในสมการที่ 2.23 ได้ และที่ความถี่รีโซแนนซ์ $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ แทนค่าในสมการที่ 2.23 ได้ อิมพีแดนซ์ของวงจรกรองฮาร์โมนิกส์มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ แต่ที่ความถี่มูลฐาน ω_0 สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ได้ดังสมการที่ 2.25

$$Z_0 = \frac{1 - \frac{\omega_0^2}{\omega_1^2}}{j\omega C} \cong \frac{1}{j\omega C} \quad (2.25)$$

หาค่าอิมพีแดนซ์ของระบบหลังมีการติดตั้งวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ และหาความถี่ที่ทำให้เกิด Parallel Resonance Peak (ω_2) และ Cross-Over Point (ω_3) ดังสมการที่ 2.26 - 2.28

$$Z = \frac{1 - \omega^2 L_F L_F}{1 - \omega^2 (L_F - L_S)} j\omega L_S \quad (2.26)$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{C_F (L_F - L_S)}} \quad (2.27)$$

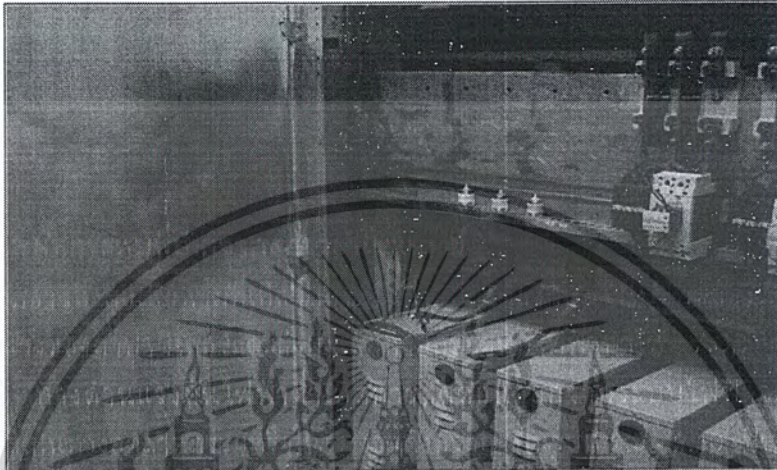
$$\omega_3 = \frac{1}{\sqrt{L_F C_F + \frac{1}{2} L_S C_F}} \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

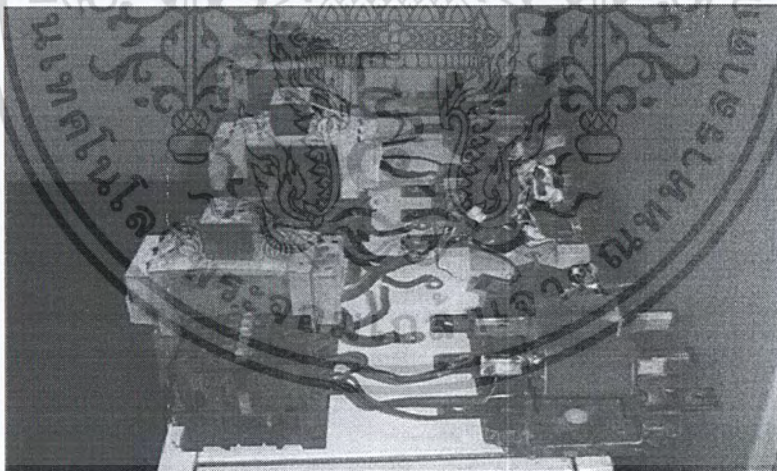
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.2.2 ผลกระทบที่เกิดจากสภาวะรีโซแนนซ์

เมื่อกว่าถึงผลเสียหายที่เกิดขึ้นและมีส่วนเกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิกส์ต้องนึกถึงการเกิดระเบิดที่รุนแรงของคาปาซิเตอร์และส่งผลเสียหายกับระบบไฟฟ้าทำให้ ACB (air circuit breaker) ทางด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำเกิดการตัดตอนออกจากระบบไฟฟ้าจะกระทบต่อขบวนการผลิตในทางอุตสาหกรรมหรือในโรงงานดังตัวอย่างในรูปที่ 2.9 - 2.10 เป็นการระเบิดที่รุนแรงมาก



รูปที่ 2.9 สภาพการระเบิดของชุดคาปาซิเตอร์ [3]



รูปที่ 2.10 สภาพของอุปกรณ์ตัดต่อไฟฟ้า [3]

2.3 ดิจูนฟิลเตอร์ (Detuned Filter)

เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สามารถแก้ไขปัญหาฮาร์โมนิกส์ ในระบบไฟฟ้าที่มีปริมาณฮาร์โมนิกส์อยู่ในระดับหนึ่ง แต่ยังไม่เกิดปัญหาฮาร์โมนิกส์ เมื่อมีการติดตั้งคาปาซิเตอร์เข้าไปเพื่อปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ จะทำให้เกิดปัญหาฮาร์โมนิกส์เรโซแนนซ์ ซึ่งมีความถี่เรโซแนนซ์ตรงกับฮาร์โมนิกส์ที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้า จะทำให้เกิดเกิดการขยายของปริมาณฮาร์โมนิกส์สูงขึ้นอย่างมาก จนทำให้เกิดความเสียหายในระบบไฟฟ้า

ในปัจจุบัน นิยมนำชุดดิจูนฟิลเตอร์ (Detuned filter) มาใช้งานแทน capacitor bank ซึ่งชุดดังกล่าวจะประกอบไปด้วย capacitor unit และ reactor หลายตัว ประกอบกัน ซึ่ง reactor จะทำหน้าที่กันไม่ให้กระแสไฟฟ้าฮาร์โมนิกส์ความถี่สูงไหลเข้าตัว Capacitor โดยจะใช้หลักการทางไฟฟ้า คือ เพิ่มความต้านทานให้สูงขึ้นเมื่อความถี่ของไฟฟ้าสูงขึ้นเนื่องจากความต้านทานของขดลวดหรือ Reactor นี้จะสูงขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้นดังนั้นความต้านทานรวมของชุดดิจูนฟิลเตอร์จะสูงขึ้นเมื่อความถี่ของไฟฟ้าสูงขึ้น ส่งผลทำให้กระแสฮาร์โมนิกส์ที่มีความถี่สูงไหลเข้าสู่ capacitor bank น้อยลง

2.3.1 ลักษณะของดิจูนฟิลเตอร์

ดิจูนฟิลเตอร์ คือ การนำรีแอคเตอร์ที่มีค่ารีแอคแตนซ์ (X_L) ประมาณ 6% หรือ 7% ของค่ารีแอคแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ (X_C) โดยเรียกว่าดิจูนฟิลเตอร์แบบ 6% หรือ 7% ทำให้เกิดวงจรรีโซแนนซ์แบบขนานที่ความถี่ต่ำกว่า 250Hz โดยมีค่าขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ของระบบด้วยการทำงานของดิจูนฟิลเตอร์จะเหมือนกับคาปาซิเตอร์เบงค์ทุกประการ โดยมีหน้าที่หลักในการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ เสริมด้วยความสามารถพิเศษในการแก้ปัญหาฮาร์โมนิกส์เรโซแนนซ์

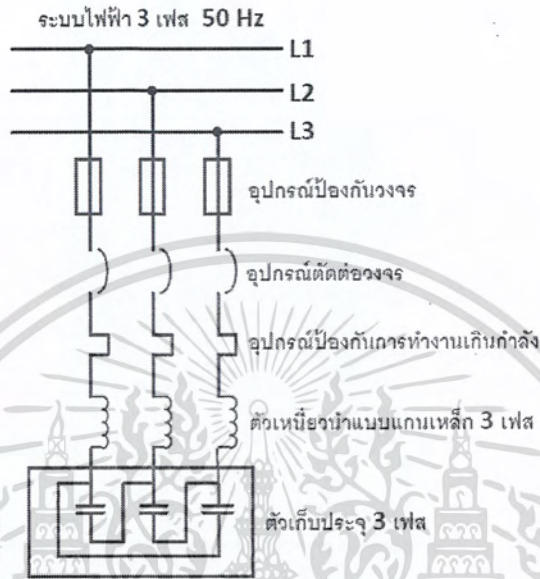
อย่างไรก็ตามคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในดิจูนฟิลเตอร์ จะออกแบบมาพิเศษให้สามารถทนแรงดันได้สูงขึ้นเนื่องจากการมีรีแอคเตอร์ต่อแบบอนุกรมอยู่ และการต้องทนต่อปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ฟิลเตอร์ช่วยกรองมาบางส่วน ทั้งนี้ดิจูนฟิลเตอร์ไม่สามารถใช้งานได้ในระบบที่มีฮาร์โมนิกส์ต่ำกว่าอันดับที่ 5 ดิจูนฟิลเตอร์ได้รับการออกแบบมาเป็นโมดูลมาตรฐานที่สามารถนำมาประกอบใช้งานเพื่อปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ในระบบไฟฟ้า และแก้ปัญหาฮาร์โมนิกส์เรโซแนนซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

2.3.2 โครงสร้างและหน้าที่ของตัวกรองฮาร์โมนิกส์แบบดิจูนฟิลเตอร์

โครงสร้างของตัวกรองฮาร์โมนิกส์จะประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งมีส่วนประกอบคือ

1. ตัวเหนี่ยวนำแบบแกนเหล็ก ซึ่งถูกออกแบบมาให้ร่วมกับตัวเก็บประจุโดยเฉพาะมีความเป็นเชิงเส้นเป็นอย่างดี สนามแม่เหล็กไม่อิ่มตัวขณะใช้งานปกติ ทำหน้าที่กรองกระแสฮาร์โมนิกส์และทนต่อกระแสที่ไหลผ่านตัวมันเองได้
2. ตัวเก็บประจุหรือคาร์ปาซิเตอร์ที่พิกัดแรงดันต่าง ๆ

3. อุปกรณ์ตัดต่อวงจร ใช้ตัดต่อวงจรตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์
4. อุปกรณ์ป้องกันวงจร ใช้ป้องกันการลัดวงจรของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์
5. อุปกรณ์ป้องกันการทำงานเกินพิกัดของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไหลผ่านตัวกรองเกินพิกัดที่กำหนดไว้



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์แบบดีจูนฟิลเตอร์

โดยตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์แบบดีจูนฟิลเตอร์ มีหน้าที่หลักที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1. กรองกระแส และแรงดันฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้า ให้ได้มาตรฐานที่กำหนด
2. จ่ายกำลังชดเชยรีแอกทีฟที่ความถี่หลักมูลให้กับระบบไฟฟ้า เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ

รีแอกทีฟที่ระบบไฟฟ้าต้องการ

2.3.3 การคำนวณหาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

เมื่อใส่รีแอกเตอร์ขนาด 7% สามารถหาความถี่ที่สอดคล้องกับคาปาซิเตอร์ในระบบได้

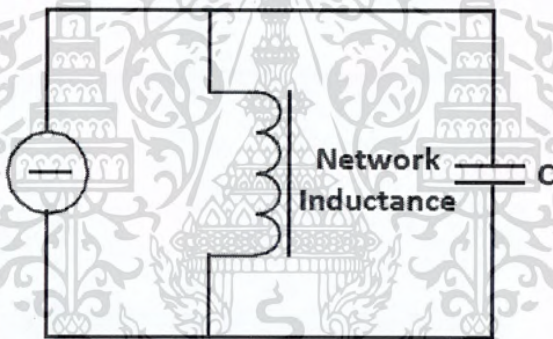
ตามสมการ

$$f_s = f_n \sqrt{\frac{x_c}{x_l}} \quad (2.29)$$

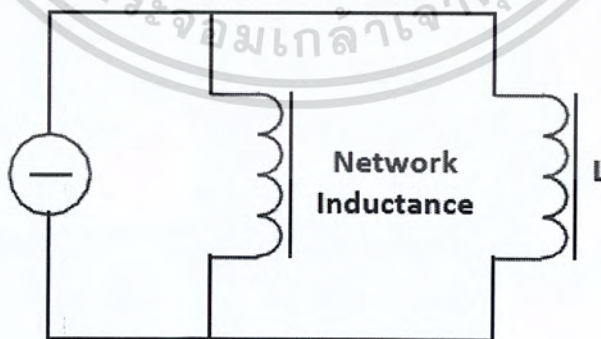
- เมื่อ f_s คือ ความถี่รีโซแนนซ์ระหว่างรีแอคเตอร์ที่ใส่เข้าไปในระบบกับคาปาซิเตอร์
 f_n คือ ความถี่มูลฐานมีค่า 50 Hz
 X_c คือ Reactance of capacitor
 X_L คือ Reactance of reactor

จากสมการแทนค่า $X_c = 100$; $X_L = 7$ จะได้ความถี่ 189 Hz และถ้าเป็นรีแอคเตอร์ขนาด 6% จะได้ความถี่ 204 Hz จะเห็นได้ว่า 189 Hz และ 204 Hz ในระบบฮาร์โมนิกส์ไม่มีความถี่นี้ดังนั้นการรีโซแนนซ์ที่ความถี่ดังกล่าวจึงไม่เกิดขึ้นทำให้คาปาซิเตอร์ปลอดภัยสามารถอยู่ในระบบไฟฟ้าได้

ดังนั้นการใส่รีแอคเตอร์ขนาด 7% ถ้านำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และ impedance (Z) จะมีจุดที่ค่า Z ต่ำสุดที่ความถี่ 189 Hz ถ้าต่ำกว่า 189 Hz ค่า $Z_c > Z_L$ ระบบจะแสดงคุณสมบัติเป็น C วงจรสมมูลดังในรูปที่ 2.12 และที่ถี่ความถี่สูงกว่า 189 Hz ค่า $Z_c < Z_L$ ระบบจะแสดงคุณสมบัติเป็น L วงจรสมมูลดังในรูปที่ 2.13 และเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ในรูปที่ 2.14

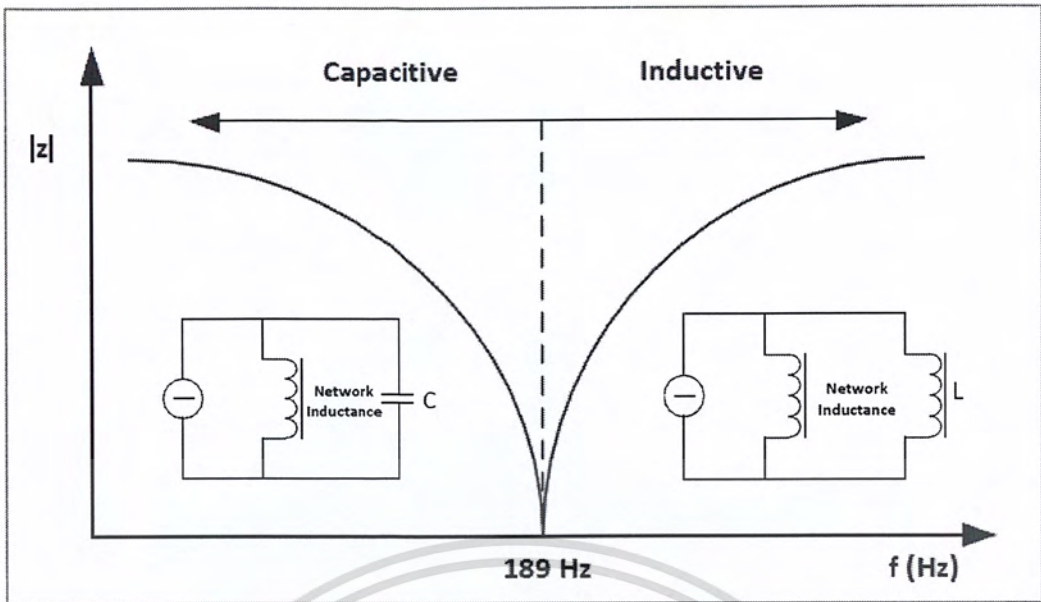


รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลที่ความถี่ต่ำกว่า 189 Hz



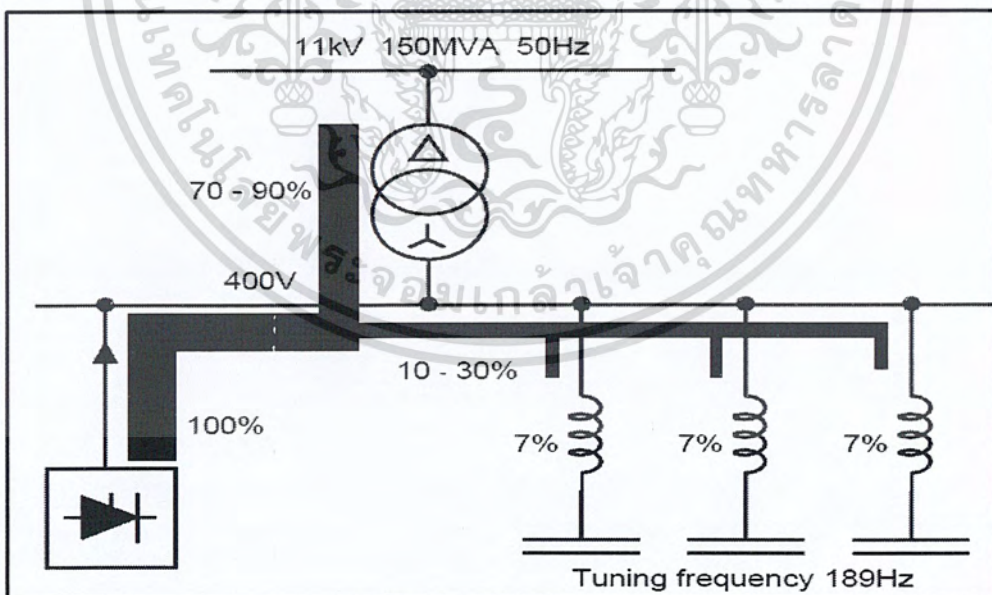
รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลที่ความถี่สูงกว่า 189 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และ impedance (Z) ของการใส่รีแอคเตอร์ขนาด 7%

การใช้วงจร Detune filter มีความสามารถในการลดทอนฮาร์โมนิกส์ ดังแสดงใน รูปที่ 2.15 ถ้ามีกระแสฮาร์โมนิกส์ 100 % ปริมาณที่จะเข้าวงจร Detune filter มีปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์ 10- 30 % เท่านั้นแต่ปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์ 70 - 90 % จะไปรบกวนหม้อแปลงและระบบไฟฟ้า



รูปที่ 2.15 การไหลของสัญญาณฮาร์โมนิกส์ในวงจรดีจูนฟิลเตอร์ 7%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ตัวเหนี่ยวนำ (Reactor)

ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ที่มีองค์ประกอบเดียว คือ ขดลวดทองแดงพันอยู่บนแกนซึ่งแกนของขดลวดนั้นมีอยู่ 2 แบบ คือ แกนเหล็ก และแกนอากาศ แกนทั้ง 2 แบบ คือ แบบแกนเหล็ก และแบบแกนอากาศ แกนทั้ง 2 แบบนี้จะทำให้ตัวเหนี่ยวนำมีคุณสมบัติการทำงานแตกต่างกัน ตัวเหนี่ยวนำแบบแกนเหล็กสามารถเกิดการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสที่ไหลผ่านตัวมันได้ แต่ตัวเหนี่ยวนำแบบแกนอากาศจะไม่เกิดการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็ก การอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กของตัวเหนี่ยวนำนั้น จะเป็นข้อจำกัดในการทำงานของตัวเหนี่ยวนำด้วย คุณสมบัติอีกประการของตัวเหนี่ยวนำ คือสามารถรับกำลังงานรีแอกทีฟที่เป็นส่วนเกินในระบบไฟฟ้าให้ไหลผ่านตัวมันได้ เพื่อไม่ให้แรงดันในระบบเกินค่าพิกัดจึงถูกนำมาใช้ในการเพิ่มเสถียรภาพให้ระบบไฟฟ้า รูปที่ 2.16 แสดงตัวเหนี่ยวนำแบบแกนเหล็ก 3 เฟส (Three Phase Reactor)



รูปที่ 2.16 ตัวเหนี่ยวนำกำลัง [11]

2.5 ตัวเก็บประจุ (Capacitor)

ตัวเก็บประจุกำลังจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบต่างๆ ที่มีความซับซ้อนขึ้นกว่าตัวเก็บประจุโดยทั่วไป เพราะให้เกิดความปลอดภัยในการทำงานที่แรงดันสูง โดยเฉพาะวัสดุไดอิเล็กตริกจะมีขนาดบางมากและต้องทนต่อความเครียดทางไฟฟ้าสูงได้ ตัวเก็บประจุกำลังมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ สามารถจ่ายกำลังงานรีแอคทีฟให้กับระบบไฟฟ้าได้ รูปที่ 2.17 แสดงรูปตัวเก็บประจุกำลังที่ใช้ในการปรับค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor Correction Capacitor)

ในปัจจุบันการผลิตตัวเก็บประจุกำลัง ได้มีการผลิตให้มีประสิทธิภาพดีกว่าในอดีตมาก จึงทำให้ตัวเก็บประจุกำลังมีคุณภาพดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการพัฒนาและการปรับปรุงวัสดุไดอิเล็กตริกให้มีคุณภาพดีขึ้น รวมถึงเทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการผลิตจึงทำให้ตัวเก็บประจุกำลังมีคุณภาพที่ดี และมีขนาดที่เพิ่มขึ้นกว่าในอดีต ซึ่งเป็นผลให้ตัวเก็บประจุกำลังมีราคาต่อกิโลวาร์ (Cost per kVAR) ต่ำและมีความเหมาะสมในการทำงานมากขึ้นด้วย



รูปที่ 2.17 ตัวเก็บประจุกำลัง [10]

บทที่ 3

การออกแบบรีแอกเตอร์และดีจูนฟิลเตอร์

3.1 บทนำ

รีแอกเตอร์ (Reactor) หรือตัวเหนี่ยวนำ คืออุปกรณ์ตัวหนึ่งในวงจรดีจูนฟิลเตอร์ ทำหน้าที่กรองสัญญาณฮาร์โมนิกส์ โดยที่การออกแบบจะมีใช้หลักการของวงจรมแม่เหล็ก ซึ่งจะมีเรื่องของความต้านทานแม่เหล็กมาเกี่ยวข้องในการออกแบบด้วย นอกจากนั้นแล้วต้องเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ในการออกแบบก็สำคัญเช่นกัน เช่น ลวด แกนเหล็ก ฉนวน ล้วนแล้วแต่มีผลต่อรีแอกเตอร์ทั้งสิ้น ในอุตสาหกรรมโดยรูปร่างลักษณะโดยทั่วไปรีแอกเตอร์ประกอบด้วยแกนเหล็ก 3 เฟส ชนิดแกนร่วม ขดลวด 3 ชุด ซึ่งเหตุผลของการออกแบบรีแอกเตอร์แบบ 3 เฟส เนื่องจากต้องการประหยัดค่าใช้จ่ายและพื้นที่ในการติดตั้ง สิ่งที่ต้องคำนึงในการออกแบบรีแอกเตอร์ในงานปรับปรุงคุณภาพของกำลังไฟฟ้าคือ การอิมตัวและการสูญเสียในแกนเหล็กอันเนื่องมาจากกระแสฮาร์โมนิกส์ ทั้งนี้ก็เพื่อประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพของระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม ในบทนี้ได้กล่าวถึงโครงสร้างของรีแอกเตอร์ชนิด 3 เฟสแบบแกนร่วม อธิบายเกี่ยวกับลักษณะของการจัดวางเหล็ก ชนิดของเหล็ก โครงสร้างของขดลวด เนื้อหาจะเกี่ยวกับลักษณะของขดลวด ความหนาของขดลวด ความยาวของขดลวด การหาค่าความต้านทานของขดลวด การสูญเสียของรีแอกเตอร์ ส่วนเรื่องของการออกแบบก็จะมีตัวอย่างในการออกแบบเพื่อสร้างต้นแบบรีแอกเตอร์เพื่อนำไปติดตั้งในโรงงาน เนื้อหาในที่สุดท้ายจะอธิบายการพัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้ในการออกแบบและการจำลองรีแอกเตอร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเนื้อหาทั้งหมดล้วนแล้วแต่มีความสำคัญที่จะนำไปพัฒนาและสร้างต้นแบบจริงต่อไป

3.2 โครงสร้างของรีแอกเตอร์

รีแอกเตอร์ประกอบด้วยแกนเหล็กแบบ 3 เฟส และขดลวด 3 ชุด โดยโครงสร้างแกนเหล็กเป็นแบบ 1,1 มาประกอบกันเป็น 3 แกน หรือเรียกว่าแกนเหล็กชนิดแกนร่วม แต่ละแกนจะประกอบด้วยช่องอากาศ 2 ช่อง (PolyGap™ core structure) คือ มีช่องอากาศด้านบนและช่องอากาศด้านล่าง

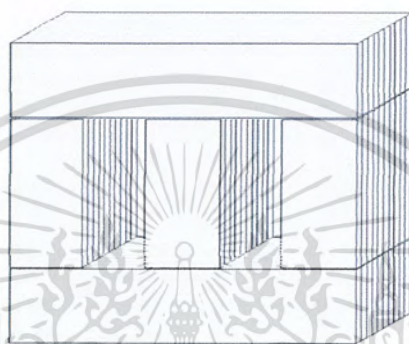


รูปที่ 3.1 รีแอกเตอร์ 3 เฟสแบบแกนร่วม [11]

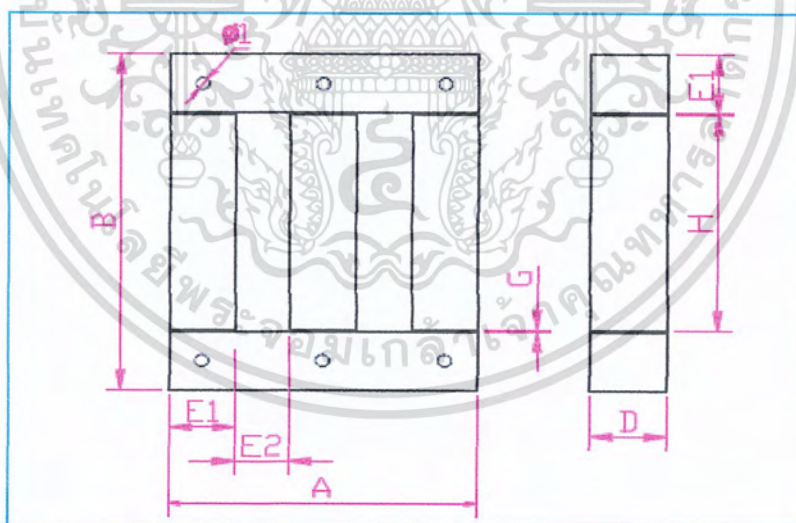
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 โครงสร้างของวงจรมแม่เหล็ก

โครงสร้างของแกนเหล็กในงานวิจัยนี้จะใช้แกนเหล็ก 3 เฟสชนิดแกนร่วมโดยลักษณะเหล็กจะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมยาวประกบกันเป็น 3 แกน สามารถแบ่งลักษณะของแกนเหล็กออกเป็น 2 รูปแบบ คือ 1.เหล็กแวนอน มี 2 ส่วนคือส่วนบนและส่วนล่าง เป็นฐานของรีแอกเตอร์และเป็นตัวรับน้ำหนักโครงสร้างของรีแอกเตอร์ ซึ่งระยะเหล็กแกนนอนต้องมีความเหมาะสมเพราะต้องระยะของพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กและช่องขดลวดเกี่ยวข้องกับ 2.เหล็กแนวตั้ง จะมีอยู่ 3 ส่วนแต่ละส่วนจะเกี่ยวข้องกับขดลวดของรีแอกเตอร์ โครงสร้างแกนเหล็กของรีแอกเตอร์สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.2



(ก) โครงสร้างแกนเหล็กรีแอกเตอร์ 3 เฟสชนิดแกนร่วม



(ข) Dimension รีแอกเตอร์ 3 เฟสแบบแกนร่วม

รูปที่ 3.2 โครงสร้างและ Dimension แกนเหล็กรีแอกเตอร์ 3 เฟสแบบแกนร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของแกนเหล็กดังรูปที่ 3.2 สามารถอธิบายได้ดังนี้

$E1$ คือ ความกว้างของเหล็กซึ่งจะเป็นตัวกำหนดพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก ทั้งเหล็กแนวตั้งและเหล็กแนวนอนจะมีค่าเท่ากัน

$E2$ คือ ระยะความกว้างช่องขดลวด โดยที่ระยะนี้จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับความหนาของขดลวดซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

H คือ ความสูงขดแกนเหล็กแนวตั้ง ซึ่งระยะนี้จะมีผลต่อค่าความหนาของแผ่นตัวนำซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

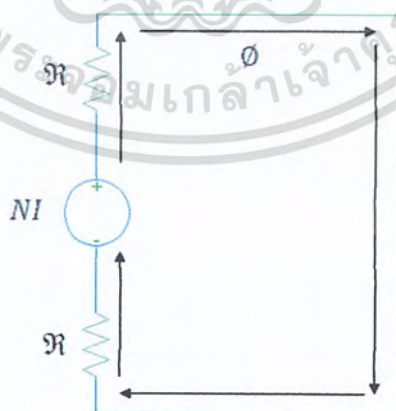
A คือ ระยะความกว้างของรีแอคเตอร์ โดยรวมผลจากระยะความกว้างของช่องขดลวดกับความกว้างของแกนเหล็กแนวตั้งทั้ง 3 เฟส

B คือ ระยะความสูงของรีแอคเตอร์ โดยจะรวมจากระยะความกว้างของเหล็กแนวนอนบนและล่างกับความสูงของเหล็กแนวแกนตั้ง

D คือ ความหนาของรีแอคเตอร์ ซึ่งเกิดจากการนำเหล็กแผ่นมาเรียงซ้อนกันจะมีผลต่อพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก

G คือ ระยะช่องอากาศ มีหน้าที่เก็บพลังงานสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความเหนี่ยวนำในรีแอคเตอร์

จากตัวอย่างนี้ก็จะเห็นได้ว่าแกนเหล็กรีแอคเตอร์ 3 เฟสแบบแกนร่วมไม่อาจจะกำหนดรูปลักษณะเฉพาะเจาะจงได้ ในทางปฏิบัติแล้วจะต้องมีการสั่งตัดแกนเหล็กเป็นพิเศษจากโรงงานจากการจัดวางแกนเหล็กเป็นลักษณะแกนร่วมทำให้แต่ละแกนแต่ละเฟสจะประกอบด้วยช่องอากาศ 2 ช่อง หรือเรียกลักษณะการจัดวางแกนเหล็กนี้ว่า PolyGap™ core structure คือ มีช่องอากาศด้านบนและช่องอากาศด้านล่างในแต่ละเฟส ซึ่งจะสามารถช่วยลดปัญหาการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กได้ ค่าความต้านทานของแม่เหล็ก (Reluctance) เกิดจากช่องอากาศและแกนเหล็ก แต่แกนเหล็กมีค่าความต้านทานของแม่เหล็กน้อยมาก จึงไม่นำมาคำนวณ สามารถเขียนวงจรแม่เหล็กรีแอคเตอร์ 3 เฟสแบบแกนร่วมได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรแม่เหล็กในแต่ละเฟสของรีแอคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 โครงสร้างของขดลวด

ขดลวดของรีแอกเตอร์จะเป็นขดขดลวดติดตั้งอยู่กับแกนเหล็กทั้ง 3 เฟส การเลือกใช้ขนาดตัวนำขึ้นอยู่กับพิกัดกระแส ความเหนียวนำ และความสูญเสียที่เกิดขึ้น เนื่องจากในการวิจัยนี้จะต้องสร้างรีแอกเตอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม เพราะฉะนั้นคุณสมบัติของขดลวดจึงจำเป็นต้องสามารถรองรับกระแสได้มาก เพราะการติดตั้งรีแอกเตอร์ในโรงงานอุตสาหกรรมจะต้องตั้งกับตัวเก็บประจุ (Capacitor) ที่มีขนาดใหญ่จึงทำให้ต้องใช้กระแสไฟฟ้ามาก เพราะฉะนั้นแล้วคุณสมบัติของตัวนำต้องมีน้ำหนักเบา มีพื้นที่หน้าตัดที่มีขนาดใหญ่ งานวิจัยจึงเลือกใช้ขดลวดที่มีลักษณะเป็นแผ่น (Sheet) ทั้งนี้เพื่อให้ขดลวดมีพื้นที่หน้าตัดมากขึ้น เมื่อพื้นที่หน้าตัดมากขึ้นก็จะทำให้ขดลวดสามารถรองรับกระแสได้มากขึ้น



รูปที่ 3.4 แผ่นอลูมิเนียม (Aluminum Sheet)

นอกจากตัวนำแล้วโครงสร้างของขดลวดจำเป็นมีฉนวนพันรอบขดลวดด้วย เนื่องจากแผ่นตัวนำส่วนใหญ่ไม่มีการเคลือบ จึงจำเป็นต้องมีฉนวนพันที่สามารถป้องกันการลัดวงจรรอบแต่เมื่อขดลวดมีอุณหภูมิสูง ก็อาจทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพได้

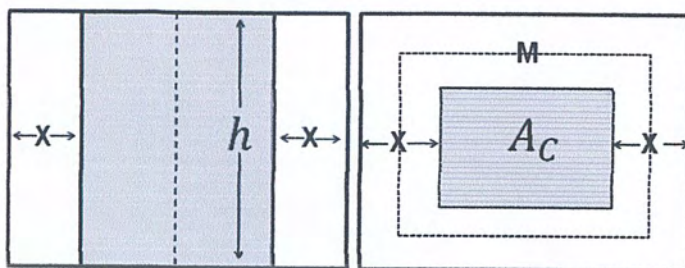
การคำนวณหาขนาดของขดลวดตัวนำเป็นที่สำคัญมาในการออกแบบ เพราะขนาดของขดลวดจะส่งผลพิกัดกระแส ความสูญเสีย และน้ำหนักของรีแอกเตอร์ ชั้นแรกต้องหาขนาดความหนาของแผ่นตัวนำ (k_1) จะขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำ (A_{con}) ความสูงของเหล็กแนวตั้ง (H) ความหนาของฉนวน ดังนี้

$$k_1 = \frac{A_{con}}{H} \quad \text{mm.} \quad (3.1)$$

- เมื่อ k_1 คือ ความหนาของแผ่นตัวนำ (mm.)
 A_{con} คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำ (mm.²)
 H คือ ความสูงของเหล็กแนวตั้ง (mm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าความหนาของแผ่นตัวนำจะขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ และความสูงของเหล็กแฉก โดยที่พื้นที่หน้าตัดของตัวนำจะต้องกำหนดมาจากมาตรฐานตารางข้อมูลของลวดตัวนำ



รูปที่ 3.5 ภาพหน้าตัดด้านหน้าและด้านบนของขดลวด

ความกว้างของขดลวด (x) ก็จะสามารถหาได้จากสมการที่ 3.2

$$x = \frac{(k_1 + k_2) \times N}{F_w} \quad (3.2)$$

- เมื่อ x คือ ความกว้างของขดลวด (mm.)
 k_1 คือ ความหนาของแผ่นตัวนำ (mm.)
 k_2 คือ ความหนาของฉนวน (mm.)
 N คือ จำนวนรอบของขดลวด
 F_w คือ ตัวประกอบการปรับ มีค่า 0.45 – 0.8

จากสมการที่ 3.2 ความกว้างของขดลวดจะขึ้นอยู่กับ ความหนาของแผ่นตัวนำ (k_1) ความหนาของฉนวน (k_2) ค่าความกว้างของขดลวดสองเท่าจะต้องมีค่าน้อยกว่าค่าระยะช่องของขดลวดดังสมการที่ 3.3

$$2x \leq E2 \quad (3.3)$$

จากสมการที่ 3.3 สามารถอธิบายได้คือ ระยะช่องขดลวดเป็นพื้นที่ว่างที่ใช้สำหรับวางขดลวด 2 ขด ถ้าหากว่าความกว้างของขดลวดมากกว่าระยะช่องขดลวดแล้วจะทำให้ไม่สามารถวางขดลวดในแกนเหล็ก เพราะฉะนั้นแล้วควรมีการเผื่อระยะความกว้างดังกล่าวโดยการใส่ตัวประกอบการปรับ

หลังจากที่เราสามารถหาความกว้างของขดลวดได้อย่างเหมาะสมแล้วต่อไปเราก็จะคำนวณหาความยาวของแผ่นตัวนำดังสมการที่ 3.4

$$l = M \times N \quad (3.4)$$

เมื่อ l คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ (m.)

M คือ ความยาวเฉลี่ยต่อรอบ (m.)

N คือ จำนวนรอบของขดลวด

จากสมการที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าความยาวของแผ่นตัวนำจะขึ้นอยู่กับความยาวเฉลี่ยต่อรอบ (M) ซึ่งสามารถหาได้จากผลรวมความระยะเฉลี่ยในแต่ละด้านดังรูปที่ 3.5

หลังจากที่เราสามารถหาขนาดได้แล้วก็จะสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานของไฟฟ้าของขดลวดดังสมการที่ 3.5 ได้ซึ่งค่าความต้านทานจะส่งผลต่อความสูญเสียของรีแอกเตอร์ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

$$R = \rho \frac{l}{A_{con}} \quad (3.5)$$

เมื่อ R คือ ความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นตัวนำ (Ω)

ρ คือ สภาพการต้านทานของตัวนำ ($\Omega.m$)

l คือ ความยาวของแผ่นตัวนำ

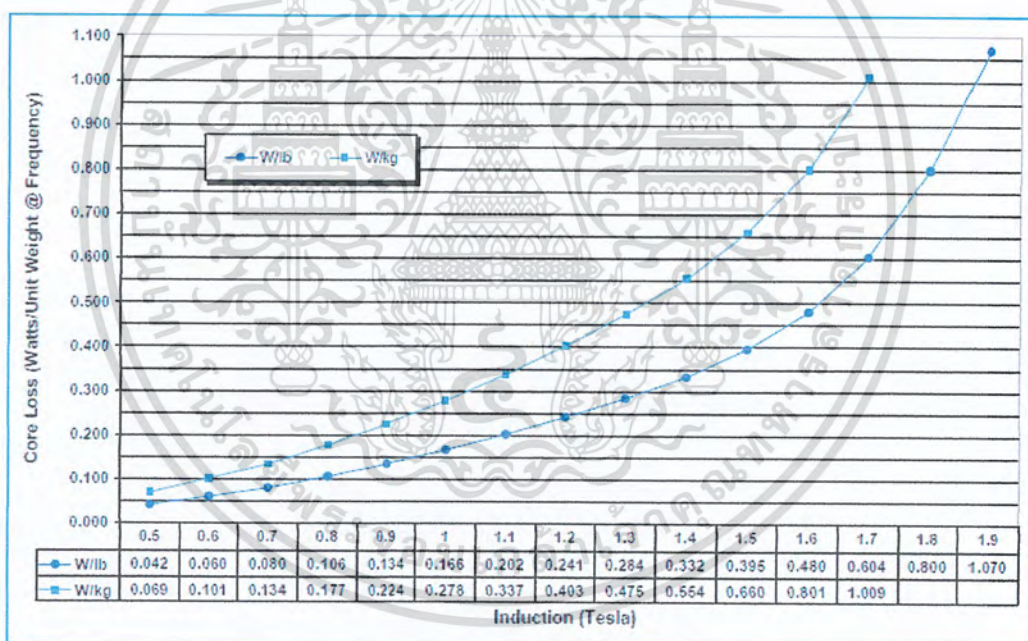
A_{con} คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำ

3.3 การสูญเสียของรีแอกเตอร์

กำลังการสูญเสียในรีแอกเตอร์แบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนหลัก ซึ่งประกอบด้วย การสูญเสีย (loss) ของรีแอกเตอร์มีอยู่ 3 ชนิด คือการสูญเสียในแกนเหล็ก (P_c) การการสูญเสียในขดลวด (P_l) และการสูญเสียในช่องอากาศ (P_g)

3.3.1 การสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss)

การสูญเสียในแกนเหล็กประกอบด้วย การสูญเสียที่เกิดจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loss) และกระแสไหลวน (Eddy current loss) ซึ่งการสูญเสียแบบฮิสเทอรีซิสเกิดจากการที่แกนเหล็กได้รับแรงเคลื่อนแม่เหล็กจะสร้างเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นตามลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อลดระดับแรงเคลื่อนแม่เหล็กลง เส้นแรงแม่เหล็กที่สร้างขึ้นไม่ลดลงตามแนวทางเดิมแต่จะเหลือตกค้างอยู่ภายในแกนเหล็กค่าหนึ่ง โดยปริมาณจะขึ้นอยู่กับความถี่ของระบบไฟฟ้าและคุณลักษณะของสารที่ใช้ทำแกนเหล็ก ส่วนการสูญเสียแบบกระแสไหลวนเกิดจากผลที่มีการเหนี่ยวนำภายในแกนเหล็กที่วางอยู่ในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก โดยมีแกนเหล็กเป็นตัวนำ ซึ่งการสูญเสียทั้งสองนี้จะถูกรวมไว้ในกราฟการสูญเสียในแกนเหล็กจากผู้ผลิตดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 กราฟการสูญเสียในแกนเหล็ก [3]

จากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าการสูญเสียในแกนเหล็กจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของแกนเหล็ก ค่าความหนาแน่นของนามแม่เหล็ก (B)

สารแม่เหล็กที่ใช้ทำแกนเหล็กจะเลือกใช้สารที่มีส่วนผสมของซิลิกอนสูงและพยายามทำให้มีคุณสมบัติการสูญเสียในแกนเหล็กน้อยที่สุดโดยการทำให้มีคุณสมบัติในการซึมซาบ

แม่เหล็กสูง การกำหนดคุณสมบัติของสารแม่เหล็กแต่ละชนิดเพื่อการออกแบบคำนวณ จำเป็นต้องอาศัยเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรค่าต่างๆ เช่นความหนาของแผ่นเหล็ก ความถี่ ชนิดของสารและแนวของการรีดแผ่นเหล็ก เป็นต้น

3.3.2 การสูญเสียในขดลวด (Conductor loss)

กำลังการสูญเสียในขดลวดเป็นค่าสูญเสียที่เกิดจากความร้อนในขดลวดของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าซึ่งสามารถคำนวณได้จากกระแสที่ไหลผ่านขดลวดและความต้านทานของขดลวดนั้นปริมาณกระแสที่ไหลผ่านจะขึ้นอยู่กับพิกัดใช้งานที่กำหนด การหาค่ากำลังสูญเสียในขดลวดแผ่นตัวนำจะพิจารณาได้ดังสมการที่ 3.6

$$P_{con} = 3(I^2 R) \quad (3.6)$$

เมื่อ P_{con} คือ การสูญเสียของแผ่นตัวนำ (W)

I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านแผ่นตัวนำ (A)

R คือ ความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นตัวนำ (Ω)

3.3.3 การสูญเสียในช่องอากาศ (Air-gap loss)

เมื่อความยาวช่องอากาศมีค่ามากขึ้น เส้นแรงแม่เหล็กที่เคลื่อนผ่านช่องอากาศก็จะเกิดการโค้งตัวมากขึ้นตามด้วยเช่นกัน เส้นแรงแม่เหล็กโค้งตัวบางส่วนจะเคลื่อนตัวเข้าไปในแกนเหล็กในลักษณะตั้งฉากและสร้างกระแสไหลวนเพิ่มขึ้นในแกนเหล็ก นอกจากนั้นการเคลื่อนตัวเข้าไปในแกนเหล็กของเส้นแรงแม่เหล็กโค้งตัวอยากเกิดรูปร่างของแกนเหล็ก หรือลักษณะของขดลวดที่วางอยู่ใกล้ชิดกับแกนเหล็กมาก ซึ่งจากลักษณะดังกล่าวจะทำให้เกิดกำลังสูญเสียเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นกำลังสูญเสียในช่องอากาศมักจะขึ้นอยู่กับเส้นแรงแม่เหล็กโค้งตัวเป็นหลัก ซึ่งสามารถพิจารณาจากสมการดังต่อไปนี้

$$P_g = 3(K_i D G f B^2) \quad (3.7)$$

เมื่อ P_g คือ การสูญเสียของช่องอากาศ (W)

K_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์กำลังสูญเสียในช่องอากาศมีค่าเท่ากับ 0.155

D คือ ความหนาของโครงสร้างแกนเหล็ก (cm.)

G คือ ระยะช่องอากาศ (cm.)

f คือ ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า (Hz)

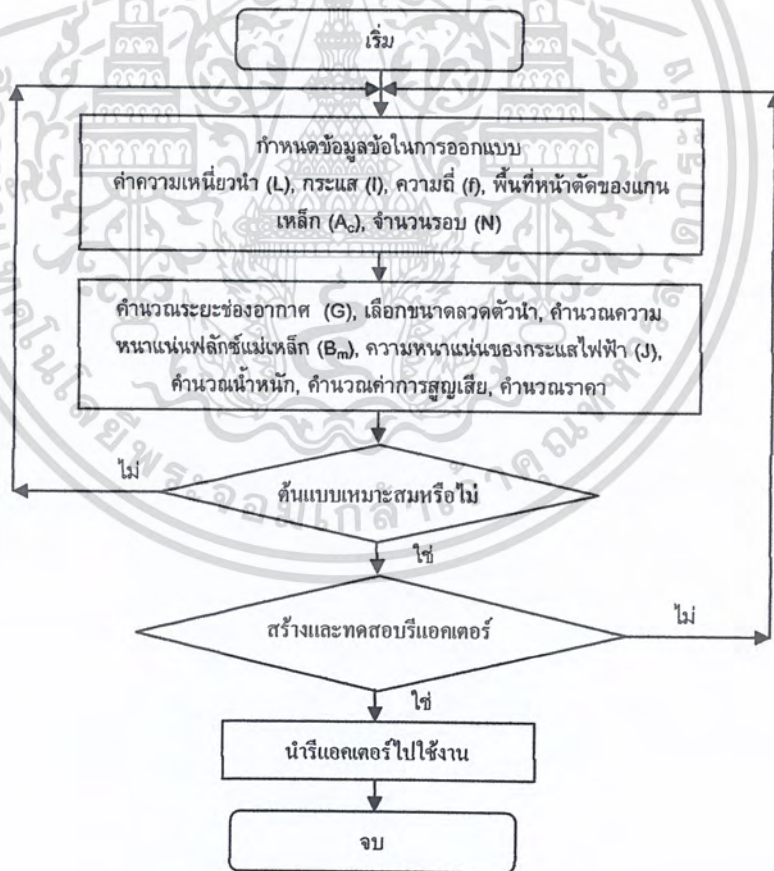
B คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (T)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบรีแอคเตอร์

การออกแบบรีแอคเตอร์ให้ได้หนึ่งค่านั้นสามารถออกแบบได้หลายต้นแบบ แต่ละต้นแบบก็จะมีลักษณะเฉพาะแตกต่างกันไป เช่น ค่าความสูญเสีย น้ำหนัก ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) เป็นต้น เพราะฉะนั้นเราจึงต้องมีการกำหนดขอบเขตที่ชัดเจนของการออกแบบ เพื่อที่จะสามารถสร้างต้นแบบได้อย่างเหมาะสม และตรงกับจุดประสงค์ของงานที่ต้องการนำไปติดตั้ง การออกแบบรีแอคเตอร์ในงานวิจัยนี้จึงมีวิธีการในการออกแบบตามแผนผังดังรูปที่ 3.7 จากแผนผังจะเห็นได้ว่าขั้นแรกเราต้องกำหนดข้อมูลของการออกแบบ ค่าความเหนียวนำ (L) พิกัดกระแส (I) ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก จำนวนรอบของขดลวด หลังจากที่กำหนดขอบเขตการออกแบบแล้ว จึงนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ไปคำนวณหา ระยะช่องอากาศ (G) ค่าการสูญเสีย น้ำหนัก และความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B)

การออกแบบนั้นสามารถออกแบบได้หลายต้นแบบการคำนวณอาจจะทำให้เสียเวลาหรืออาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการคำนวณได้ การพัฒนาโปรแกรมก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะทำให้สะดวกรวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งหลักการในการออกแบบนี้จะถูกพัฒนาเป็นโปรแกรมออกแบบซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

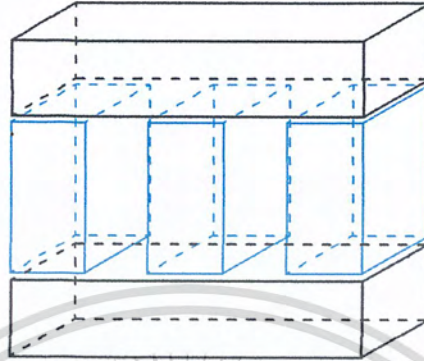


รูปที่ 3.7 แผนผังการออกแบบรีแอคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 การคำนวณการออกแบบรีแอกเตอร์

การออกแบบรีแอกเตอร์ที่ใช้สำหรับวงจรจลิตอนฟิลเตอร์ 7% ขนาด 50 kVar, 400 V, 100 A, 50 Hz, 0.767 mH



รูปที่ 3.8 ลักษณะของโครงสร้างแกนเหล็กที่ใช้ในการออกแบบ

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพิกัดและขอบเขตการออกแบบ สามารถกำหนดพิกัดได้ดังนี้

ความเหนี่ยวนำ (L) = 0.767 mH

พิกัดกระแส (I) = 100 A

ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (B) ไม่เกิน 1.7 T

ระยะช่องอากาศ (G) ไม่เกิน 1.5 mm.

ค่าการสูญเสียรวมไม่เกิน 170 W

น้ำหนักรวมไม่เกิน 30 kg

ขั้นตอนที่ 2 เลือกอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบ

แกนเหล็กเลือกใช้เหล็กซิลิกอนชนิด M-4 ขนาด $E_1 = 6$ cm, $E_2 = 5$ cm, $H = 12$ cm

โครงสร้างของแกนเหล็กแสดงในรูปที่ 3.8

ตัวนำเลือกใช้แผ่นอลูมิเนียม (Aluminum sheet)

ฉนวนเลือกใช้แผ่นกระดาษฉนวน Polyester film หนา 0.35 mm.

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาความหนาของรีแอกเตอร์ (D)

$$D = \frac{A_c}{E_1} = \frac{36}{6} = 6 \text{ cm.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณหาความหนาของแผ่นตัวนำ

$$k_1 = \frac{A_{con}}{H} = \frac{45}{100} = 0.45 \text{ mm.}$$

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณหาความหนาของขดลวด

$$\begin{aligned} x &= \frac{(k_1 + k_2) \times N}{F_w} \\ &= \frac{(0.45 + 0.35) \times 18}{0.8} = 18 \text{ mm.} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาความยาวของแผ่นตัวนำ

คำนวณหาความยาวเฉลี่ยต่อรอบ ดังรูปที่ 3.5

$$\begin{aligned} M &= 2(E_1 + x) + 2(D + x) \\ &= 2(6 + 1.8) + 2(6 + 1.8) = 31.2 \text{ cm.} \end{aligned}$$

หลังจากที่ได้ความยาวเฉลี่ยต่อรอบแล้ว เราก็จะสามารถหาความยาวของแผ่นตัวนำได้
ดังสมการที่ 3.4

$$\begin{aligned} l &= M \times N \\ &= 31.2 \times 18 = 516.6 \text{ cm.} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณหาความหนาแน่นของกระแส (J)

$$J = \frac{I}{A_{con}} = \frac{100}{45} = 2.22 \text{ A/cm}^2$$

พื้นที่หน้าตัดของแผ่นตัวนำหาได้จากมาตรฐานการเลือกใช้ลวดตัวนำ โดยเลือกค่าที่เหมาะสมในตารางลวด ซึ่งจะเลือกใช้ขนาดของพื้นที่หน้าตัด 45 mm

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณหาระยะช่องอากาศ (G)

จากรูปที่ 3.3 เราสามารถหาระยะช่องอากาศการคำนวณจากสมการวงจรมแม่เหล็ก

$$G = \frac{N^2 \mu_0 A_c s \cdot f 10^2}{2L} \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ G คือ ระยะช่องอากาศ (mm.)
 N คือ จำนวนรอบขดลวด
 μ_0 คือ ค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$
 A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก (cm.²)
 $s.f$ คือ อัตราส่วนปริมาตรเหล็กจริงต่อปริมาตรเมื่อเหล็กซ้อนกัน
 L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ (mH)

$$G = \frac{18^2 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 36 \times 0.95}{2 \times 0.767} \approx 0.91 \text{ mm.}$$

ขั้นตอนที่ 9 คำนวณหาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

จากรูปที่ 3.3 เราสามารถหาความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กได้จากการคำนวณจากสมการวงจรมแม่เหล็ก ดังสมการ 3.9

$$B = \frac{NI\mu_0 s.f}{2G} \quad (3.9)$$

- เมื่อ B คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (T)
 N คือ จำนวนรอบขดลวด
 μ_0 คือ ค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็กของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7} \frac{wb}{At.m}$
 I คือ กระแสฟัด (A)
 $s.f$ คือ อัตราส่วนปริมาตรเหล็กจริงต่อปริมาตรเมื่อเหล็กซ้อนกัน
 G คือ ระยะช่องอากาศ (mm.)

$$B = \frac{18 \times 100 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 0.95}{2 \times 0.91 \times 10^{-3}} \approx 1.2 \text{ T}$$

ขั้นตอนที่ 10 คำนวณหาน้ำหนักของแกนเหล็ก

น้ำหนักของแกนเหล็กสามารถหาได้จาก นำปริมาตรโครงสร้างของแกนเหล็กนำไปคูณกับความหนาแน่นของเหล็ก M-4 ก็จะสามารถหาน้ำหนักของแกนเหล็ก (W_{core}) ได้

$$\begin{aligned} W_{core} &= [3(E_1 \times D \times H) + 2(E_1 \times A \times D)] \times \rho_{M-4} \\ &= [3(6 \times 6 \times 12) + 2(28 \times 6 \times 6)] \times 7.65 \\ &= 25336.8 \text{ g} \approx 25.37 \text{ kg} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 11 คำนวณหาน้ำหนักของขดลวด

น้ำหนักของขดลวดสามารถหาได้จาก นำปริมาตรของขดลวดทั้งหมดคูณกับความหนาแน่นของอลูมิเนียม ก็จะสามารถหาน้ำหนักของขดลวด (W_{con}) ได้

$$\begin{aligned} W_{con} &= A_{con} \times l \times \rho_{Al} \\ &= 0.45 \times 0.01 \times 516.6 \times 2.7 \\ &= 627.67 \text{ g} \end{aligned}$$

เนื่องจากแกนเหล็กของโครงสร้างมีจำนวน 3 ขด เพราะฉะนั้นน้ำหนักรวมจะเท่ากับ $3 \times 627.67 = 1883 \text{ g} \approx 1.88 \text{ kg}$

ขั้นตอนที่ 12 คำนวณหาการสูญเสียของแกนเหล็ก

จากคุณสมบัติของแกนเหล็ก M-4 เมื่อความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเท่ากับ 1.2 T ค่าการสูญเสียต่อกิโลกรัมเท่ากับ 0.414 W/kg (ภาคผนวก ก) ดังนั้นการสูญเสียของแกนเหล็กของรีแอกเตอร์เท่ากับ

$$P_{core} = 0.414 \times 25.37 = 10.50 \text{ W}$$

ขั้นตอนที่ 13 คำนวณหาการสูญเสียของขดลวด

เมื่อความยาวของลวดเท่ากับ 5.17 m พื้นที่หน้าตัดของขดลวดเท่ากับ $45 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ สภาพการต้านทานของอลูมิเนียมเท่ากับ $2.82 \times 10^{-8} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ สามารถหาความต้านทานทางไฟฟ้าของขดลวดดังสมการที่ 3.5

$$\begin{aligned} R &= \rho \frac{l}{A_{con}} \\ &= 2.82 \times 10^{-8} \times \frac{5.17}{45 \times 10^{-3}} = 3.24 \times 10^{-3} \text{ } \Omega \end{aligned}$$

หาค่ากำลังสูญเสียในขดลวดสามารถหาได้ดังสมการที่ 3.6

$$P_{con} = 3 \times 100^2 \times 3.24 \times 10^{-3} = 97.2 \text{ W}$$

ขั้นตอนที่ 14 คำนวณหาการสูญเสียของช่องอากาศ

หาค่ากำลังสูญเสียของช่องอากาศได้ดังสมการที่ 3.7

$$P_g = 3 \times 0.155 \times 6 \times 0.91 \times 10^{-1} \times 50 \times 1.2^2$$

$$= 1.82 \text{ W}$$

ขั้นตอนที่ 15 ตรวจสอบความเหมาะสมของการออกแบบ

ตรวจสอบระยะช่องขดลวดเป็นพื้นวางที่ใช้สำหรับวางขดลวด 2 ขด ถ้าหากว่าความกว้างของขดลวดมากกว่าระยะช่องขดลวดแล้วจะทำให้ไม่สามารถวางขดลวดในแกนเหล็กสามารถตรวจสอบได้ดังสมการที่ 3.3

$$2 \times 18 \leq 50$$

จากการตรวจสอบพบว่าระยะช่องขดลวดมีระยะที่สามารถนำขดลวดมาวางบนแกนเหล็กได้ จึงสามารถเขียนสรุปการคำนวณได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าที่ได้จากการออกแบบรีแอคเตอร์ขนาด 0.767 mH

| คุณลักษณะ | ค่าการออกแบบ |
|------------------------------|--------------|
| Current (A) | 100 |
| Frequency (Hz) | 50 |
| Flux density (T) | 1.2 |
| Current density (A/cm^2) | 2.22 |
| Gap (mm.) | 0.91 |
| Core weight (kg) | 25.37 |
| Aluminium weight (kg) | 1.88 |
| Total weight (W) | 27.25 |
| Core loss (W) | 10.50 |
| Aluminium loss (W) | 97.2 |
| Air-gap loss (W) | 1.82 |
| Total loss (W) | 109.52 |

จากตารางที่ 3.1 พบว่าค่าที่ได้จากการออกตรงกับเงื่อนไขในการออกแบบในขั้นตอนที่ 1 กล่าวคือ ค่าพิกัดและขอบเขตของการออกแบบตรงตามเป้าหมายที่วางไว้

เพราะฉะนั้นจึงสรุปได้ว่า การออกแบบรีแอคเตอร์นี้มีความเหมาะสมตรงตามขอบเขตและพิกัดที่วางไว้ สามารถนำไปสร้างเป็นต้นแบบรีแอคเตอร์ได้

3.5 การออกแบบรีแอกเตอร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การพัฒนาโปรแกรมเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบรีแอกเตอร์ก็เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านการออกแบบ จากการคำนวณจะเห็นได้ว่าการออกแบบรีแอกเตอร์นั้นมีความยุ่งยากซับซ้อนมาก เนื่องจากการสร้างรีแอกเตอร์หนึ่งค่านั้นสามารถสร้างได้หลายต้นแบบแต่ละต้นแบบก็จะคุณสมบัติเฉพาะต่างกัน เช่น การสูญเสีย น้ำหนัก ราคา เป็นต้น โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นก็ต้องมีคุณสมบัติที่สามารถคำนวณให้ได้ถูกต้องรวดเร็ว เพื่อที่จะหาต้นแบบที่เหมาะสมที่สุดในการตอบสนองใช้งาน

3.5.1 การคำนวณการออกแบบรีแอกเตอร์ด้วย Program Microsoft Visual Basic 2008

งานวิจัยนี้พัฒนาโปรแกรมออกแบบรีแอกเตอร์โดยใช้ Program Microsoft Visual Basic 2008 โดยโปรแกรมออกแบบรีแอกเตอร์แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1.ด้านอินพุต มีหน้าที่รับค่าข้อมูลที่ต้องการออกแบบรวมทั้งการปรับแต่งค่าคุณสมบัติของวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบ 2.ด้านเอาต์พุต มีหน้าที่แสดงผลข้อมูลการออกแบบและข้อมูลด้านเทคนิคของต้นแบบรีแอกเตอร์



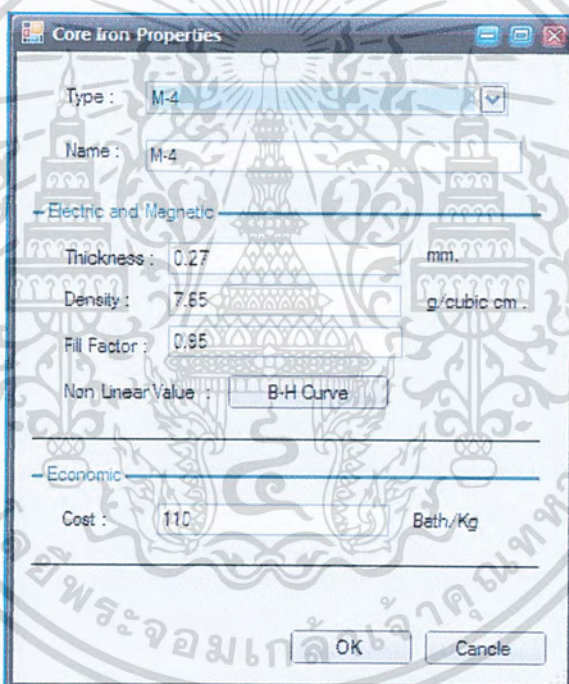
รูปที่ 3.9 หน้าต่างด้าน Input

ด้านอินพุตดังรูปที่ 3.9 จะเป็นในส่วนของหน้าต่างที่ใช้รับค่าข้อมูล ซึ่งจะกำหนดขอบเขตของการคำนวณ ซึ่งรายละเอียดของการแสดงผลมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Name คือ ชื่อของรีแอกเตอร์
- Flux Density คือ พิกัดของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก
- Current คือ พิกัดกระแส
- Frame Type คือ ประเภทของโครงสร้างของแกนเหล็กที่ใช้ในการออกแบบ
- Core Iron คือ ชนิดของแกนเหล็ก
- Conductor คือ ชนิดของตัวนำ
- Insulator คือ ชนิดของฉนวน

ในส่วนต่อไปก็คือการปรับแต่งวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบ ซึ่งจะอยู่ในหน้าต่าง อินพุตซึ่งจะเป็นการปรับแต่งคุณลักษณะของวัสดุอุปกรณ์ให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะมีการปรับแต่งอยู่ 3 หน้าต่างคือ 1.คุณสมบัติของแกนเหล็ก (Core Iron Properties), 2.คุณสมบัติของตัวนำ (Conductor Properties), 3.คุณสมบัติของฉนวน (Insulator Properties)

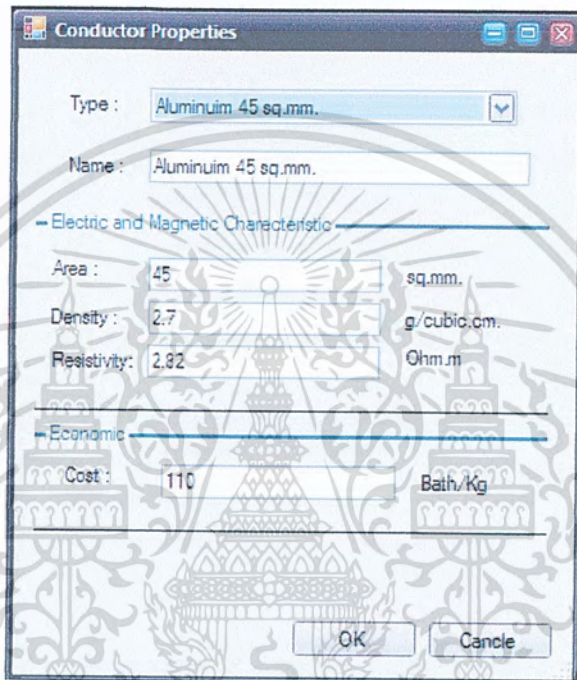


รูปที่ 3.10 หน้าต่างปรับแต่งคุณสมบัติของแกนเหล็ก

จากรูปที่ 3.10 เป็นส่วนของหน้าต่างการปรับแต่งคุณสมบัติของแกนเหล็ก มีหน้าที่รับข้อมูลคุณสมบัติของแกนเหล็กโดยที่โปรแกรมจะมีค่าที่ตั้งไว้อยู่แล้วแต่ว่าผู้ผลิตเหล็กอาจมีกรรมวิธีในการผลิตที่แตกต่างกัน เพราะฉะนั้นค่าคุณสมบัติของแกนเหล็กอาจเปลี่ยนแปลงได้ จึงควรปรับแต่งค่าให้เหมาะสมก่อนการออกแบบในส่วนของการแสดงผลในหน้าต่างนี้มีรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Type คือ ประเภทของเหล็ก
- Name คือ ชื่อของแกนเหล็ก
- Thickness คือ ความหนาของแผ่นเหล็ก
- Density คือ ความหนาแน่นเชิงมวลของเหล็ก
- Fill Factor คือ ตัวประกอบการประกอบเหล็ก หรือค่า s.f.
- Non Linear Value คือ ค่าที่ไม่เป็นเชิงเส้นของแกนเหล็ก คือค่า B-H Curve
- Cost คือ ราคาต่อน้ำหนักของเหล็ก

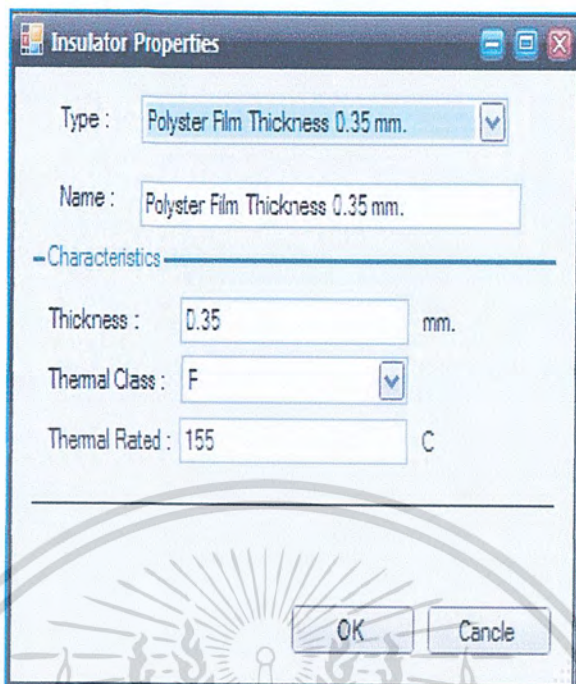


รูปที่ 3.11 หน้าต่างปรับแต่งคุณสมบัติของตัวนำ

จากรูปที่ 3.11 เป็นส่วนของหน้าต่างการปรับแต่งคุณสมบัติของตัวนำ มีหน้าที่รับข้อมูลคุณสมบัติของตัวนำโดยที่โปรแกรมจะมีค่าที่ตั้งไว้อยู่แล้วแต่ถ้าผู้ผลิตตัวนำอาจมีกรรมวิธีในการผลิตที่แตกต่างกัน เพราะฉะนั้นค่าคุณสมบัติของตัวนำอาจเปลี่ยนแปลงได้ จึงควรปรับแต่งค่าให้เหมาะสมก่อนการออกแบบในส่วนของการแสดงผลในหน้าต่างนี้มีรายละเอียดดังนี้

- Type คือ ประเภทของตัวนำ
- Name คือ ชื่อของตัวนำ
- Area คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ
- Resistivity คือ สภาพการต้านทานของตัวนำ
- Cost คือ ราคาต่อน้ำหนักของตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

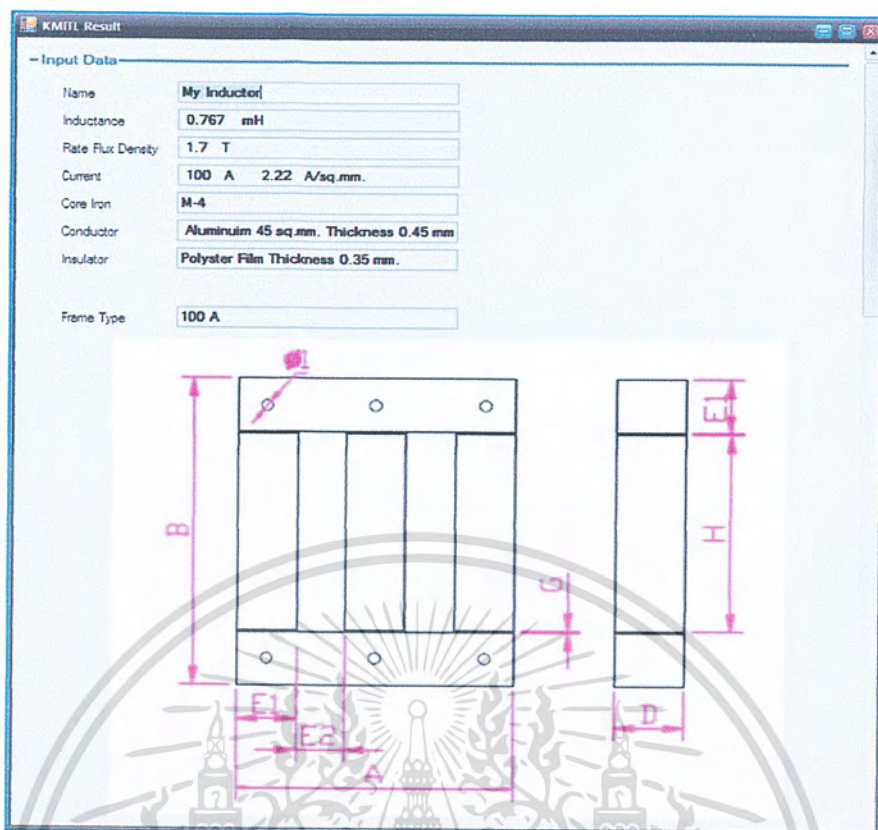


รูปที่ 3.12 หน้าต่างปรับแต่งคุณสมบัติของฉนวน

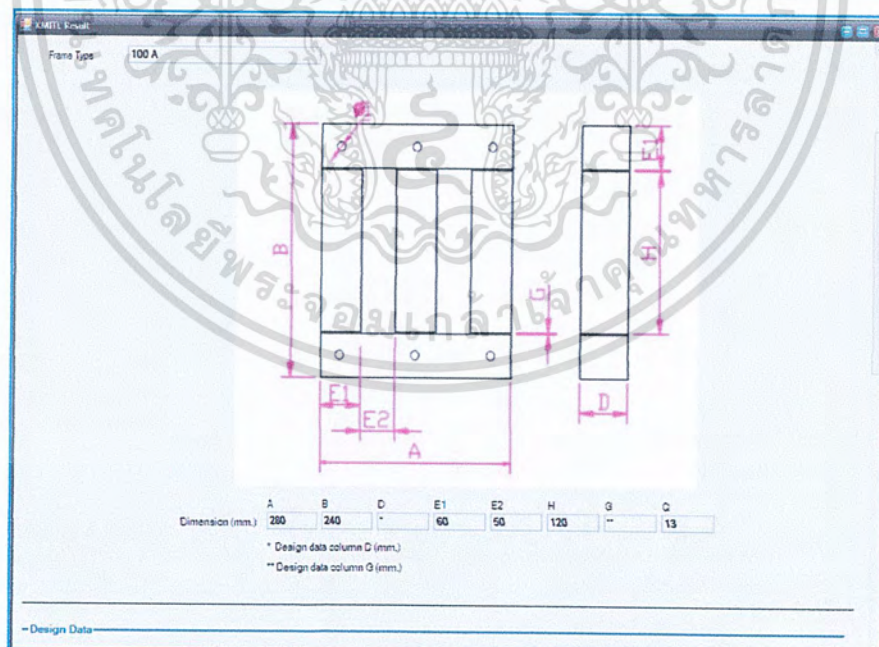
จากรูปที่ 3.12 เป็นส่วนของหน้าต่างการปรับแต่งคุณสมบัติของฉนวน มีหน้าที่รับข้อมูลคุณสมบัติของตัวนำโดยที่โปรแกรมจะมีค่าที่ตั้งไว้อยู่แล้ว ในส่วนของการแสดงผลในหน้าต่างนี้มีรายละเอียดดังนี้

- Type คือ ประเภทของฉนวน
- Name คือ ชื่อของฉนวน
- Thickness คือ ความหนาของฉนวน
- Thermal Class คือ ระดับชั้นทางความร้อนของฉนวน
- Thermal Rated คือ อุณหภูมิสูงสุดของฉนวน

ในส่วนต่อไปก็คือด้านเอาท์พุทจะแสดงผลการคำนวณจากข้อมูลที่รับค่าจากหน้าต่างอินพุท ซึ่งโปรแกรมจะคำนวณค่าความเหมาะสมข้อมูลตามที่เราได้มีการตั้งขอบเขตไว้ จะมีการแสดงผลอยู่ 3 ส่วน คือ 1. ส่วนค่าของอินพุท จะแสดงผลค่าทั้งหมดที่รับมาจากหน้าต่างอินพุท 2. ข้อมูลการออกแบบ คือ ข้อมูลการออกแบบซึ่งจะมีค่าคุณสมบัติที่สำคัญของรีแอกเตอร์ 3. ข้อมูลด้านเทคนิค คือ ข้อมูลด้านเทคนิคการออกแบบรีแอกเตอร์โดยจะเน้นในเรื่องวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบเป็นสำคัญ



รูปที่ 3.13 หน้าต่างเอาท์พุทในส่วนของการแสดงผลข้อมูลอินพุต (1)



รูปที่ 3.14 หน้าต่างเอาท์พุทในส่วนของการแสดงผลข้อมูลอินพุต (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| No | D(mm.) | N(turn) | G(mm.) | B(T) | Core Loss (W) | Conductor Loss (W) | Total Loss (W) |
|----|--------|---------|--------|------|---------------|--------------------|----------------|
| 1 | 32.4 | 24 | 0.87 | 1.6 | 11.31 | 103.96 | 115.27 |
| 2 | 32.4 | 25 | 0.95 | 1.6 | 11.31 | 109.13 | 120.45 |
| 3 | 35.1 | 23 | 0.87 | 1.6 | 12.26 | 101.18 | 113.44 |
| 4 | 35.1 | 24 | 0.94 | 1.5 | 10.15 | 106.39 | 116.55 |
| 5 | 37.8 | 21 | 0.78 | 1.6 | 13.2 | 93.09 | 106.29 |
| 6 | 37.8 | 22 | 0.85 | 1.5 | 10.93 | 98.27 | 109.21 |
| 7 | 37.8 | 23 | 0.93 | 1.5 | 10.93 | 103.52 | 114.45 |
| 8 | 40.5 | 20 | 0.76 | 1.6 | 14.14 | 90.01 | 104.16 |
| 9 | 40.5 | 21 | 0.83 | 1.5 | 11.72 | 95.23 | 106.94 |
| 10 | 40.5 | 22 | 0.92 | 1.4 | 9.89 | 100.5 | 110.39 |
| 11 | 43.2 | 18 | 0.65 | 1.6 | 15.09 | 81.62 | 96.71 |
| 12 | 43.2 | 19 | 0.73 | 1.6 | 15.09 | 86.8 | 101.89 |
| 13 | 43.2 | 20 | 0.81 | 1.5 | 12.5 | 92.04 | 104.54 |
| 14 | 43.2 | 21 | 0.89 | 1.4 | 10.54 | 97.36 | 107.9 |
| 15 | 43.2 | 22 | 0.98 | 1.3 | 8.94 | 102.74 | 111.68 |
| 16 | 45.9 | 17 | 0.62 | 1.6 | 16.03 | 78.24 | 94.27 |
| 17 | 45.9 | 18 | 0.69 | 1.5 | 13.28 | 83.45 | 96.73 |

รูปที่ 3.15 หน้าต่างเอ้าท์พุทในส่วนของข้อมูลด้านการออกแบบ

| No | Laminate | Conductor (WxLxD Cm.) | Core Weight (Kg) | Conductor Weight (Kg) | Total Weight (Kg) | Core Cost (B) | Conductor Cost (B) | Total Cost (B) |
|----|----------|-----------------------|------------------|-----------------------|-------------------|---------------|--------------------|----------------|
| 1 | 120 | 10x552.96x0.45 | 13.68 | 0.67 | 14.35 | 1505.01 | 80.62 | 1585.63 |
| 2 | 120 | 10x580.5x0.45 | 13.68 | 0.71 | 14.39 | 1505.01 | 84.64 | 1589.64 |
| 3 | 130 | 10x538.2x0.45 | 14.82 | 0.65 | 15.48 | 1630.42 | 78.47 | 1708.89 |
| 4 | 130 | 10x595.92x0.45 | 14.82 | 0.69 | 15.51 | 1630.42 | 82.51 | 1712.93 |
| 5 | 140 | 10x495.18x0.45 | 15.96 | 0.6 | 16.56 | 1755.84 | 72.2 | 1828.04 |
| 6 | 140 | 10x522.72x0.45 | 15.96 | 0.64 | 16.6 | 1755.84 | 76.21 | 1832.05 |
| 7 | 140 | 10x550.82x0.45 | 15.96 | 0.67 | 16.63 | 1755.84 | 80.28 | 1836.12 |
| 8 | 150 | 10x478.8x0.45 | 17.1 | 0.58 | 17.68 | 1881.26 | 68.81 | 1951.07 |
| 9 | 150 | 10x506.52x0.45 | 17.1 | 0.62 | 17.72 | 1881.26 | 73.85 | 1955.11 |
| 10 | 150 | 10x534.6x0.45 | 17.1 | 0.65 | 17.75 | 1881.26 | 77.94 | 1959.2 |
| 11 | 160 | 10x434.16x0.45 | 18.24 | 0.53 | 18.77 | 2006.67 | 63.3 | 2069.98 |
| 12 | 160 | 10x461.7x0.45 | 18.24 | 0.56 | 18.8 | 2006.67 | 67.32 | 2073.99 |
| 13 | 160 | 10x489.6x0.45 | 18.24 | 0.59 | 18.84 | 2006.67 | 71.38 | 2078.06 |
| 14 | 160 | 10x517.86x0.45 | 18.24 | 0.63 | 18.87 | 2006.67 | 75.5 | 2082.18 |
| 15 | 160 | 10x546.48x0.45 | 18.24 | 0.66 | 18.91 | 2006.67 | 79.68 | 2086.35 |
| 16 | 170 | 10x416.16x0.45 | 19.38 | 0.51 | 19.89 | 2132.09 | 60.68 | 2192.77 |
| 17 | 170 | 10x443.88x0.45 | 19.38 | 0.54 | 19.92 | 2132.09 | 64.72 | 2196.81 |

รูปที่ 3.16 หน้าต่างเอ้าท์พุทในส่วนของข้อมูลด้านเทคนิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14 จะเป็นข้อมูลการแสดงผลข้อมูลจากหน้าต่างอินพุตทั้งหมด ได้แก่

- Name คือ ชื่อของรีแอกเตอร์
- Inductance คือ ค่าความเหนี่ยวนำ
- Rated Flux Density คือ พิกัดความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก
- Current คือ พิกัดกระแส
- Core Iron คือ ข้อมูลของแกนเหล็ก
- Conductor คือ ข้อมูลของตัวนำ
- Insulator คือ ข้อมูลฉนวน
- Frame Type คือ ประเภทของโครงสร้างของแกนเหล็กที่ใช้ในการออกแบบ
- Dimension คือ ข้อมูลขนาดของโครงสร้างของแกนเหล็ก

จากรูปที่ 3.15 จะเป็นข้อมูลการแสดงผลการออกแบบทั้งหมด ข้อมูลที่จะแสดงผลในส่วนนี้ก็ได้แก่ ขนาดของ (D), จำนวนรอบ (N), ระยะช่องอากาศ (G), การสูญเสียของแกนเหล็ก (P_{Core}), การสูญเสียของขดลวด (P_{Con}), การสูญเสียรวม (P_{Total})

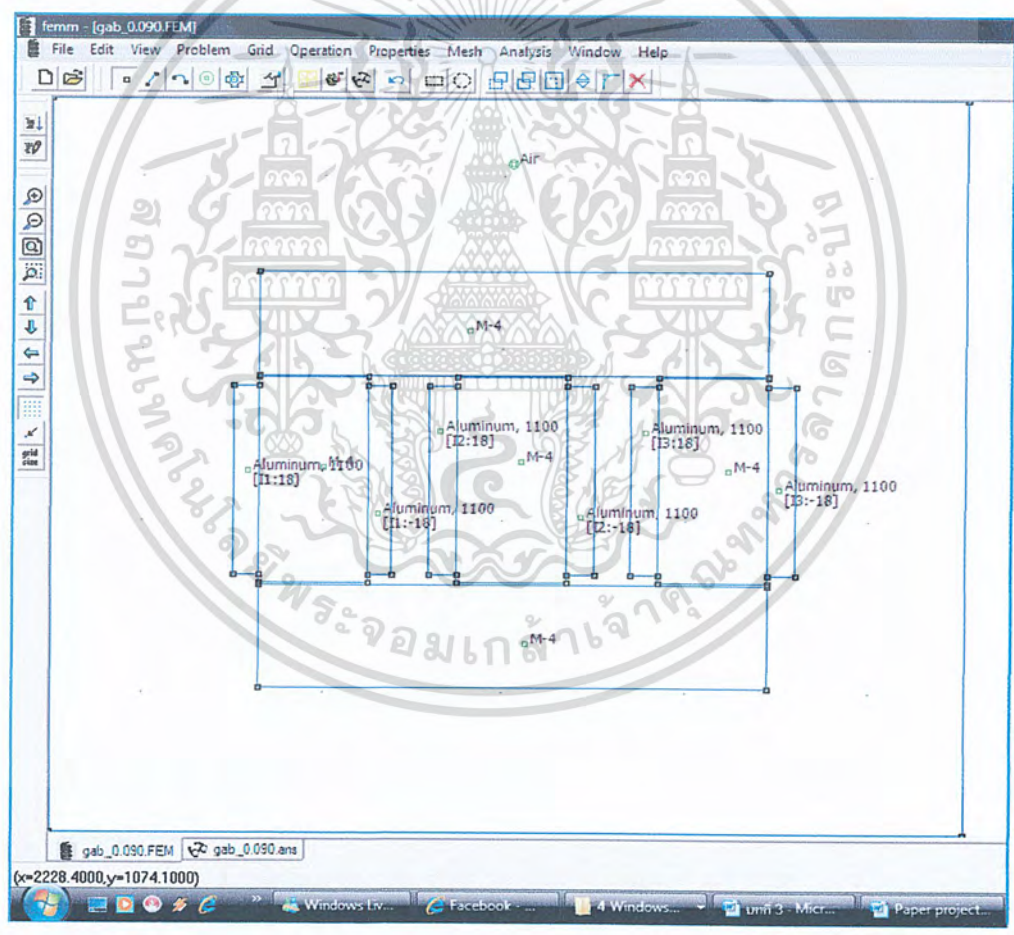
จากรูปที่ 3.16 เป็นข้อมูลด้านเทคนิคการออกแบบรีแอกเตอร์ ข้อมูลการแสดงผลในส่วนนี้ก็ได้แก่ จำนวนแผ่นเหล็ก (Laminate), ขนาดของตัวนำ (Conductor $W \times L \times D$), น้ำหนักของแกนเหล็ก (Core Weight), น้ำหนักของตัวนำ (Conductor Weight), น้ำหนักรวม (Total Weight), ราคาของแกนเหล็ก (Core Cost), ราคาของขดลวด (Conductor Cost), ราคารวม (Total Cost)

ผลจากการออกแบบในโปรแกรมก็จะแสดงผลค่าที่การออกแบบเหมือนกับการคำนวณในหัวข้อที่ 3.3.1 ทุกประการโปรแกรมนี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการออกแบบรีแอกเตอร์ได้ จะเห็นได้ว่าข้อดีของการใช้โปรแกรมการออกแบบคือ การคำนวณมีประสิทธิภาพสูง ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบก็จะอยู่ในขอบเขตที่เรากำหนดไว้ ตัวอย่างเช่น ถ้าหากว่าข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงก็จะสามารถปรับแต่งได้อย่างง่ายโดยวิธีการก็คือเข้าหน้าต่างปรับแต่งคุณสมบัติอุปกรณ์การออกแบบหรือถ้าจะนำไปสร้างเป็นต้นแบบจริง ๆ อาจจะต้องคำนึงในด้านเศรษฐศาสตร์ เราก็สามารถเข้าไปดูได้ในหน้าต่างเอาท์พุตในส่วนของข้อมูลด้านเทคนิค โปรแกรมก็จะแสดงผลราคาของแกนเหล็ก ราคาของขดลวด ราคารวม เป็นต้น การสร้างรีแอกเตอร์อาจมีปัจจัยอีกหลายอย่างเกี่ยวข้อง เราก็สามารถนำข้อมูลจากโปรแกรมมาประกอบการพิจารณาเพื่อนำไปสร้างเป็นต้นแบบรีแอกเตอร์ที่สมบูรณ์ต่อไป

3.5.2 การจำลองการทำงานของรีแอกเตอร์ด้วย Program Finite Element Method Magnetics (FEMM)

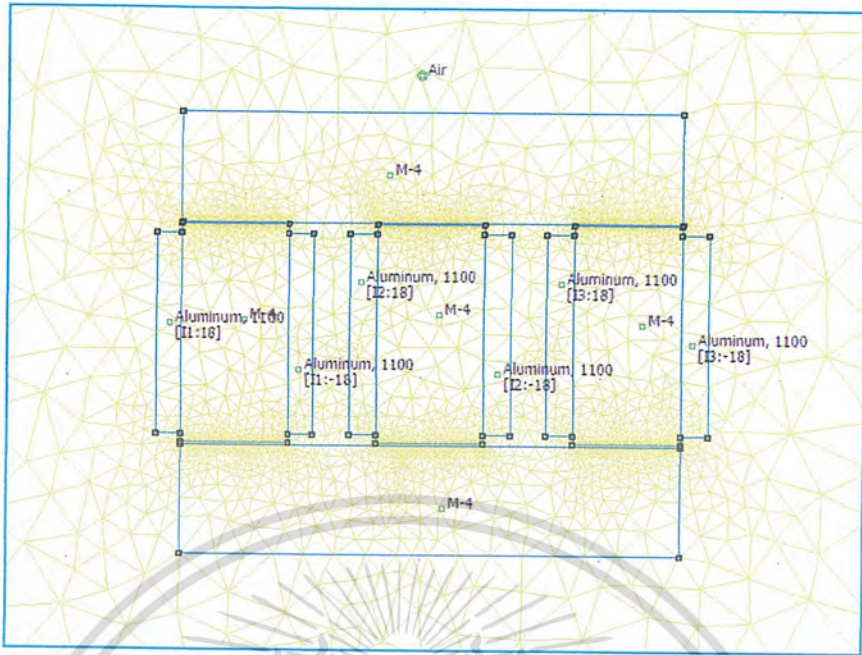
การจำลองการทำงานของรีแอกเตอร์เป็นสิ่งที่เป็นมาก่อนที่จำนำไปสร้างต้นแบบ เนื่องจากการคำนวณเป็นเพียงทฤษฎีจึงไม่สามารถรู้ได้ว่าลักษณะค่าตัวแปรต่างจะมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่อย่างไรในสถานการณ์การทำงานจริง การจำลองเปรียบกับที่เราได้สร้างต้นแบบแล้วนำไปใช้จริง ๆ ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากเพราะว่ารีแอกเตอร์มีงบประมาณการก่อสร้างค่อนข้างสูงถ้าหากออกแบบได้ตามทฤษฎีแต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถนำไปใช้ได้ ก็จะเป็นการเสียเวลา งบประมาณเป็นอย่างมาก การจำลองจึงถือว่าไปขั้นตอนที่สำคัญอีกขั้นตอนหนึ่ง

งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM) ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวิธีแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบ 2 มิติโดยโปรแกรมสามารถแสดงผลค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (B) ทิศทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็ก และสามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำ (L) ของรีแอกเตอร์ได้

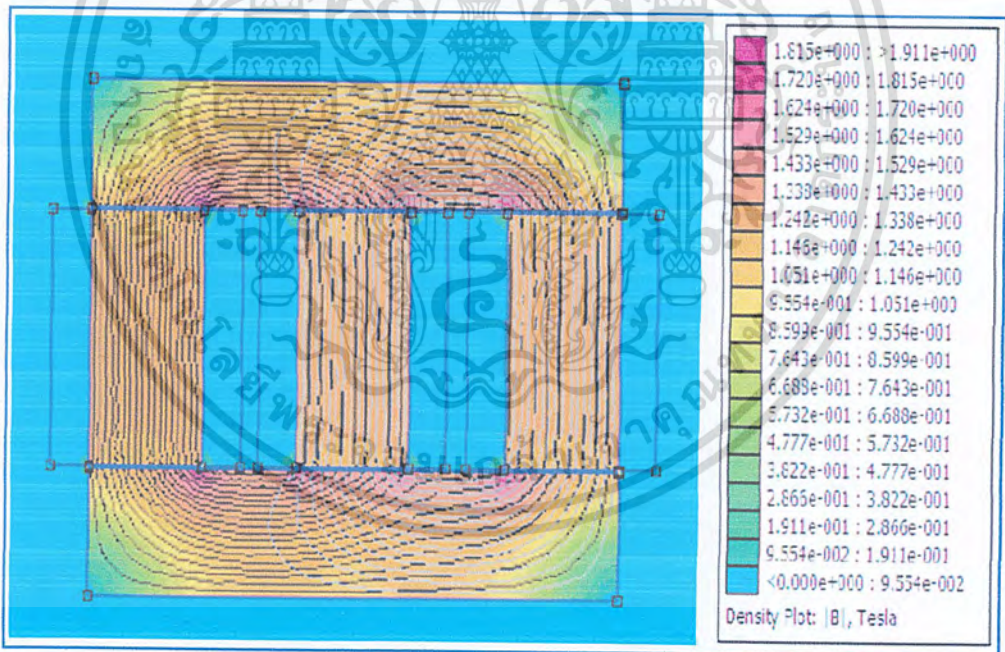


รูปที่ 3.17 หน้าต่างโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 การวิเคราะห์รีแอกเตอร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

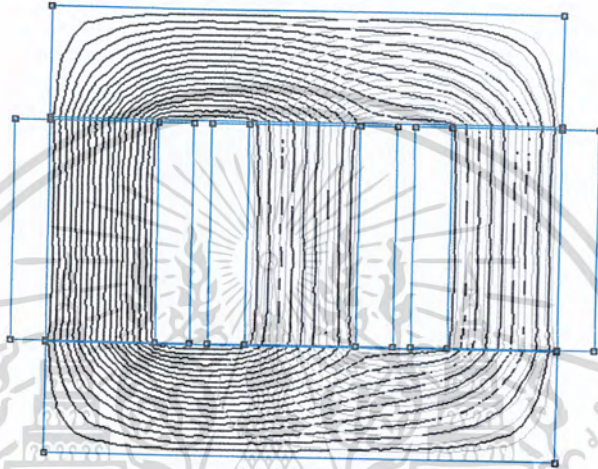


รูปที่ 3.19 ผลการ Simulation การทำงานของรีแอกเตอร์

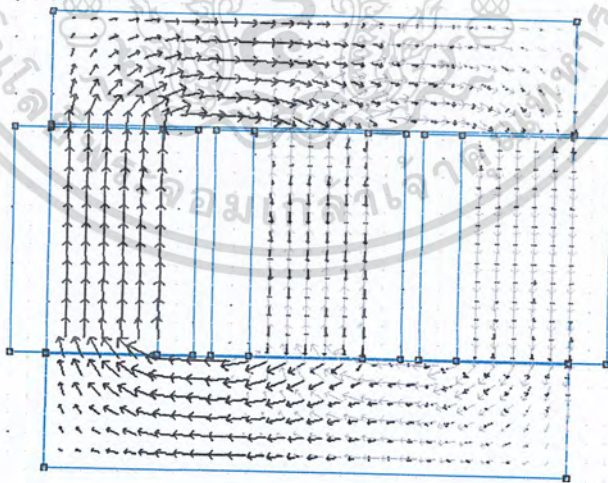
ผลจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ในโปรแกรม Finite Element Method Magnetics การจำลองการทำงานที่เกิดขึ้นจริงภายในรีแอกเตอร์ได้เห็นผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นในหัวข้อนี้ได้นำต้นแบบที่ได้จากการคำนวณในหัวข้อที่ 3.4.1 มาทำการจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างเช่น การไหลของเส้นแรงแม่เหล็กในรีแอกเตอร์ดังรูปที่ 3.19 จะเห็นได้ว่ามีเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นภายในแกนเหล็ก ซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำของขดลวดทั้ง 3 ขดของรีแอกเตอร์ จะเห็นได้ว่าเหล็กแนวตั้งจะมีเส้นแรงแม่เหล็กไหลเป็นจำนวนมาก จึงวิเคราะห์ได้ว่าเหล็กในส่วนนี้สามารถมีโอกาสอิ่มตัวได้ง่ายกว่าเหล็กตั้งแนวนอน เพราะฉะนั้นการสร้างจริงก็ควรจะมีการเพิ่มพื้นที่ตัดของแกนเหล็ก ส่วนเหล็กในแนวนอนมีเส้นแรงแม่เหล็กไหลน้อยจึงไม่มีปัญหา ส่วนในช่องอากาศมีการโค้งตัวน้อยมากทั้งนี้ก็เนื่องมาจากรีแอกเตอร์นี้ได้มีการออกแบบที่ให้มีระยะช่องอากาศ (G) มีค่าน้อย จึงเป็นการลดการสูญเสียที่เกิดจากช่องอากาศได้



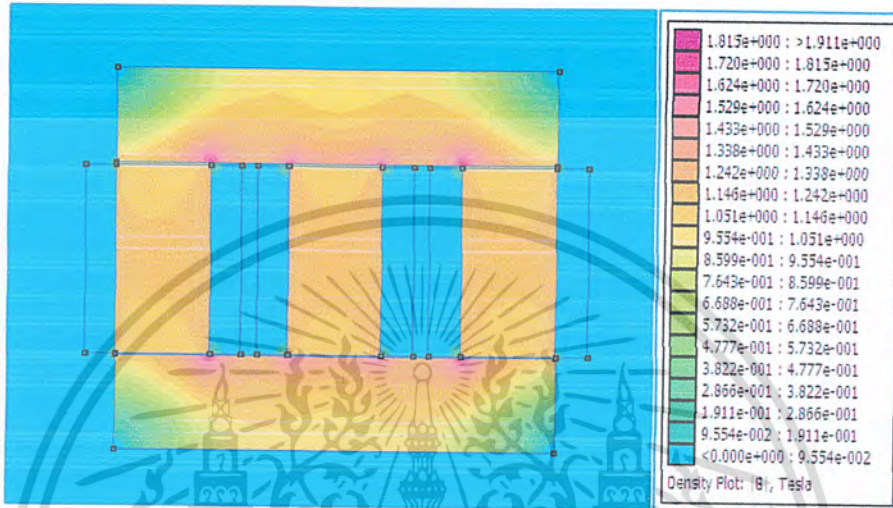
รูปที่ 3.20 เส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กจากการจำลองในโปรแกรม FEMM



รูปที่ 3.21 ทิศทางการไหลของเส้นแรงแม่เหล็กจากการจำลองในโปรแกรม FEMM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.20 - 3.21 จะเห็นขนาดและทิศทางของสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก พบว่าภายในแกนที่ 2 ที่อยู่ตรงกลางซึ่งส่วนมากจะให้เฟส B พบว่าทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กจะมีโอกาสที่จะไหลเข้าแกนเหล็กตรงเฟส B มากที่สุดซึ่งนั่นทำให้ค่าการเหนี่ยวนำในเฟส B อาจมีค่ามากกว่าเฟสอื่นๆ ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วรีแอคเตอร์โดยทั่วไปเฟส B จะมีค่าการเหนี่ยวนำมากกว่าเฟสอื่นเล็กน้อย



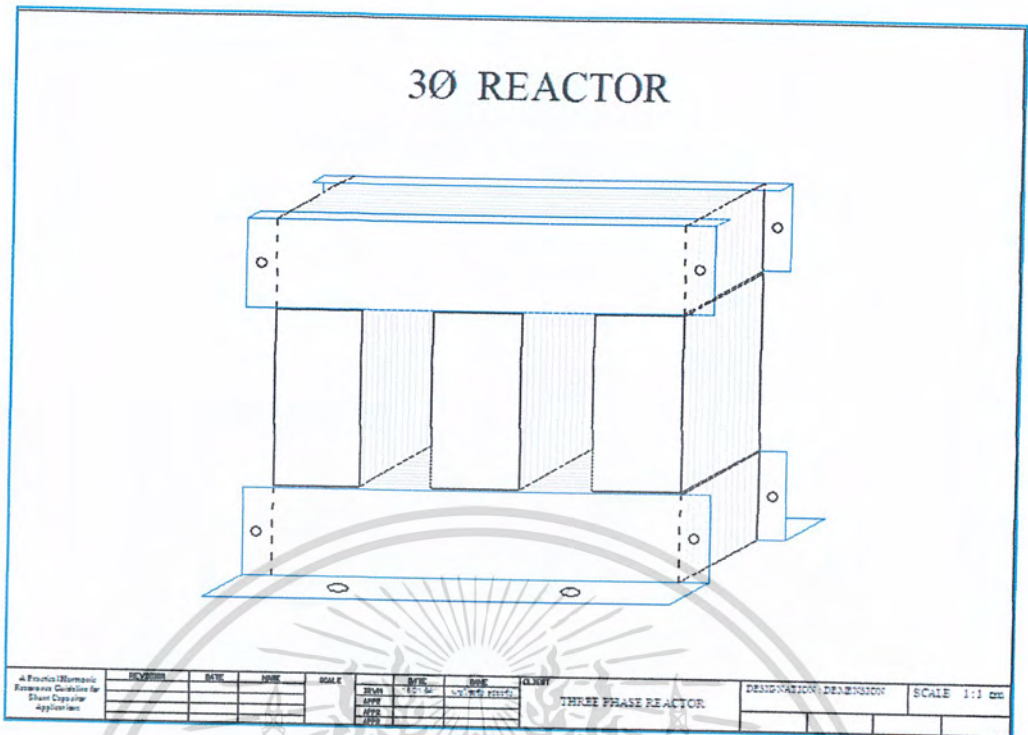
รูปที่ 3.22 ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กจากการจำลองในโปรแกรม FEMM

จากรูปที่ 3.22 จะเห็นได้ว่ามีความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กในแกนเหล็กซึ่งมีค่าที่แตกต่างกันไป แต่ก็ถือว่ารีแอคเตอร์นี้มีความสมบูรณ์เพราะจะเห็นว่าค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กโดยส่วนใหญ่จะมีค่าไม่เกินค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด (B_m) ที่จะทำให้เกิดการอิ่มตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก จากการจำลองทั้งหมดจึงสรุปได้ว่าการออกแบบรีแอคเตอร์นี้มีความสมบูรณ์ค่าสามารถนำไปสร้างเป็นต้นแบบรีแอคเตอร์จริงได้

3.5.3 การสร้างต้นแบบรีแอคเตอร์

ในขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการออกแบบรีแอคเตอร์ ซึ่งถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุด การสร้างรีแอคเตอร์ต้องนำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณทั้งหมดรวมทั้งข้อมูลที่ได้จากการจำลองมาพิจารณา เพื่อหาวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างถึงแม้ว่ารีแอคเตอร์ที่สร้างขึ้นไม่สามารถทำให้ค่าตรงตามทฤษฎีอย่างที่ต้องการก็ตาม ส่วนขั้นตอนการสร้างรีแอคเตอร์จะอธิบายรายละเอียดในภาคผนวก ค.

หลังจากได้ต้นแบบของรีแอคเตอร์ จากการคำนวณการออกแบบและการจำลองด้วยการทำงานด้วย Program Finite Element Method Magnetics (FEMM) สามารถนำมาเขียนแบบด้วยโปรแกรม AutoCAD เพื่อทำการสร้างรีแอคเตอร์ ดังรูป



รูปที่ 3.23 แบบรีแอกเตอร์ที่ได้จากการออกแบบ



รูปที่ 3.24 รีแอกเตอร์ที่สร้างขึ้นจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การออกแบบวงจรจูนฟิลเตอร์

ในการออกแบบวงจรกรองฮาร์โมนิกส์แบบดีจูน 7% นั้นจำเป็นต้องมีข้อมูลและหลักการคำนวณที่ถูกต้อง เพื่อที่จะได้ทำการออกแบบวงจรที่จะนำมาแก้ไขปัญหาฮาร์โมนิกส์ได้ถูกต้องและไม่ก่อให้เกิดปัญหาเพิ่มเติมให้กับระบบไฟฟ้าที่ต้องการแก้ไขต่อไป

3.6.1 ขั้นตอนการออกแบบวงจรจูนฟิลเตอร์

1. กำหนดค่าพิคตแรงดันและค่าความถี่หลักมูลฐานของระบบไฟฟ้าที่จะทำการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกว่ามีขนาดเท่าใด
2. กำหนดค่ากำลังงานไฟฟาร์แอคทีฟ ($Q_{\text{compensate}}$) ที่ระบบต้องการ และตรวจสอบว่าค่ากำลังไฟฟาร์แอคทีฟในระบบว่าค่าเท่าใด (ได้จากการวัด) จากนั้นหาค่า $Q_{\text{ชดเชย}}$ จากสมการที่ 3.10 และสมการที่ 3.11

$$Q_{\text{ชดเชย}} = Q_{\text{compensate}} - Q_{\text{ที่มีในระบบ}} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{compensate}} &= Q_{\text{total load}} \\ &= \sqrt{3}VI \sin \theta \\ &= kW(\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \end{aligned} \quad (3.11)$$

เมื่อ kW คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริงในระบบ

θ_1 คือ มุมของตัวประกอบกำลังเดิม

θ_2 คือ มุมของตัวประกอบกำลังใหม่

3. นำค่า $Q_{\text{ชดเชย}}$ มาพิจารณาหาจำนวนของชุดกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ โดยพิจารณาจากข้อมูลของกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับที่เกิดขึ้นในระบบ และค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ n ที่เกิดขึ้นในระบบหาได้จากสมการที่ 3.12

$$I_{hn} = \%THDi_n \times I_{\text{Fundamental}} \quad (3.12)$$

เมื่อ I_{hn} คือ กระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ n

$\%THDi_n$ คือ เปอร์เซนต์กระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ n

$I_{\text{Fundamental}}$ คือ ค่าการใช้งานปกติ

4. หาขนาดพิกัดของตัวเก็บประจุได้ดังนี้

$$V_n = V_c - V_L \quad (3.13)$$

$$P = \frac{Q_c}{Q_L} \times 100\% \quad (3.14)$$

$$V_n = V_c \left(1 - \frac{P}{100}\right) \quad (3.15)$$

$$V_c = \frac{V_n}{1 - \frac{P}{100}} \quad (3.16)$$

$$Q_c = \frac{V_c^2}{X_c} \quad (3.17)$$

$$Q_L = \frac{V_L^2}{L} \quad (3.18)$$

$$Q_{c1} = \frac{V_{n1}^2}{X_c}; X_L = 0 \quad (3.19)$$

$$Q_{c2} = \frac{V_{n2}^2}{X_c - X_L} \quad (3.20)$$

$$\frac{Q_{c2}}{Q_{c1}} = \left(\frac{V_{c2}^2}{V_{c1}^2}\right) \times \frac{1}{1 - \frac{P}{100}} \quad (3.21)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f_n X_c} \quad (3.22)$$

เมื่อต่อตัวเก็บประจุแบบสตาร์

$$C = \frac{Q_c}{2\pi f_n V_n^2} \quad (3.23)$$

เมื่อต่อตัวเก็บประจุแบบเดลต้า

$$C = \frac{Q_c}{6\pi f_n V_n^2} \quad (3.24)$$

- เมื่อ V_n คือ พิกัดแรงดันของระบบ
 V_c คือ แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ
 V_L คือ แรงดันตกคร่อมรีแอคเตอร์
 P คือ เปอร์เซนต์ของรีแอคเตอร์ต่อตัวเก็บประจุ
 Q_c คือ กำลังงานไฟฟ้ารีแอคทีฟของตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Q_L คือ กำลังงานไฟฟ้ารีแอกทีฟของรีแอกเตอร์

Q_{c1} คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของตัวเก็บประจุตัวที่ 1

Q_{c2} คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของตัวเก็บประจุตัวที่ 2

X_C คือ ค่า Reactance ของตัวเก็บประจุ

X_L คือ ค่า Reactance ของรีแอกเตอร์

C คือ พิกัดของตัวเก็บประจุ

จากสมการที่ 3.16 ถ้าในระบบมีฮาร์โมนิกส์โอกาสที่เกิดการขยายตัวของ %THD, ทำให้มีแรงดันตกคร่อมที่มีรีแอกเตอร์มากถึง 30 - 60 V ส่งผลให้มีแรงดันตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุ โดยใช้เป็น 130% ของแรงดันระบบ ดังสมการที่ 3.25

$$V_c = 1.3 \times V_n \quad (3.25)$$

5. หาขนาดพิกัดกระแสที่ไหลผ่านรีแอกเตอร์ ได้จากสมการที่ 3.26 และ สมการที่ 3.27

$$I_{Ln} = \sqrt{I_c^2 + I_{hn}^2} \quad (3.26)$$

$$I_c = \frac{Q_c}{\sqrt{3}V_n} \quad (3.27)$$

6. หาขนาดพิกัดของรีแอกเตอร์ โดยกำหนดให้ค่า Reactance ของรีแอกเตอร์มีค่าเป็น 7% ของค่า Reactance ของตัวเก็บประจุ ดังสมการที่ 3.28

$$X_L = \frac{7}{100} X_c \quad (3.28)$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f_n} \quad (3.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 ส่วนประกอบของวงจรดีจูนฟิลเตอร์

เมื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในขั้นตอนการออกแบบวงจรดีจูนฟิลเตอร์แล้ว สามารถกำหนดพิกัด และคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบของวงจรดีจูนฟิลเตอร์ได้ โดยส่วนประกอบที่สำคัญของวงจรดีจูนฟิลเตอร์ มีดังนี้

3.6.2.1 ตัวเหนี่ยวนำ (Reactor)

ในที่นี้จะใช้รีแอกเตอร์ที่สร้างขึ้นเอง และรีแอกเตอร์ของ Nokain Capacitor เพื่อใช้ในการประกอบวงจรดีจูนฟิลเตอร์ โดยรีแอกเตอร์มีพิกัดและคุณสมบัติดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.25 Nokian Reactor [10]

Technical Data

| | |
|---------------------------|--|
| Type: | Three Phase Reactor Dry type design |
| Power: | 50 KVAR |
| Rated Voltage: | 400 V |
| Frequency: | 50 Hz or 60 Hz |
| Filtering factor: | $p = 0.07$ (7%), $f_r = 189$ Hz |
| Tolerance L: | 3% |
| Linearity (95% LN): | 1.8·IN |
| Max. Permanent overload: | 1.17·IN |
| Insulation level: | > 4 kV |
| Degree of protection: | IP00 |
| Max. Ambient temperature: | 40°C |
| Thermal class: | F |
| Standards: | IEC 61558, IEC 60289 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2.2 ตัวเก็บประจุ (Capacitor)

ในที่นี้จะใช้ตัวเก็บประจุของ Nokain Capacitor เพื่อใช้ในการประกอบวงจรดีจูนฟิลเตอร์ โดยตัวเก็บประจุ มีพิกัดและคุณสมบัติดังต่อไปนี้



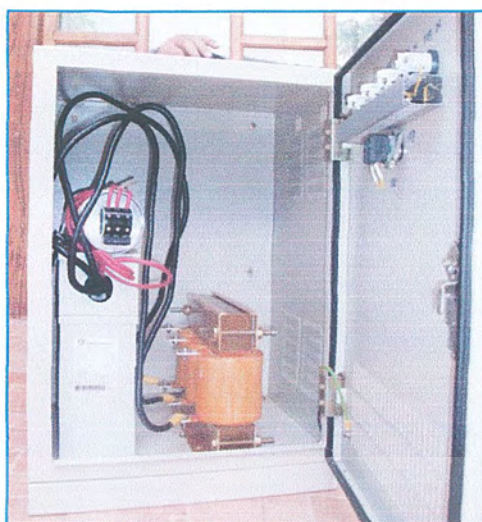
NOKIAN CAPACITORS

รูปที่ 3.26 Nokian Capacitor [10]

Technical Data

| | |
|--------------------------|--|
| Type: | L2-series Self-healing Dry type design Patented internally protected elements Steel enclosure |
| Power: | 80 KVAR |
| Voltage: | 525 V |
| Frequency: | 50 Hz or 60 Hz |
| Degree of protection: | IP 42 or IP00 |
| Insulation level: | 4 kV rms/12 kV crest |
| Losses: | < 0.4 W/kvar |
| Continuous overvoltage: | 1.1 x UN |
| Continuous over current: | 1.3 x IN |
| Temperature Category: | -40°C min. -40°C, max +50°C Highest mean over any period of: - 24 hr +40°C - 1 year +30°C Other conditions, Contact manufacturer. |
| Standards: | IEC 60831-1 (1996/2002), IEC 60831-2 (1995) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 วงจรดีจูนฟิลเตอร์ที่ประกอบเสร็จ

3.7 สรุป

จากการออกแบบและทำการสร้างรีแอกเตอร์ต้นแบบ เพื่อนำมาประกอบเป็นวงจรดีจูนฟิลเตอร์ เมื่อทำการคำนวณจากสมการทั้งหมด วงจรดีจูนฟิลเตอร์จะมีพิกัดของอุปกรณ์คือ รีแอกเตอร์ขนาด 7% ค่าความเหนี่ยวนำ 0.767 mH พิกัดกระแส 75 A และตัวคาปาซิเตอร์ Reactive power เท่ากับ 80 kVAR พิกัดแรงดัน 525 V โดยดีจูนฟิลเตอร์ที่ประกอบเสร็จ จะนำไปติดตั้งเข้ากับระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อทดสอบประสิทธิภาพ และประเมินคุณภาพของกำลังไฟฟ้าต่อไป

บทที่ 4

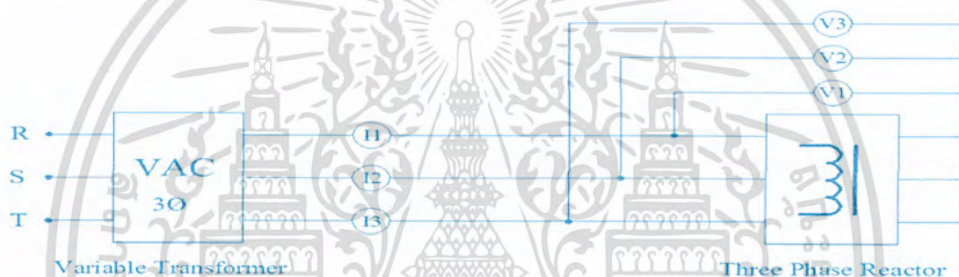
ผลการทดลอง

4.1 กล่าวนำ

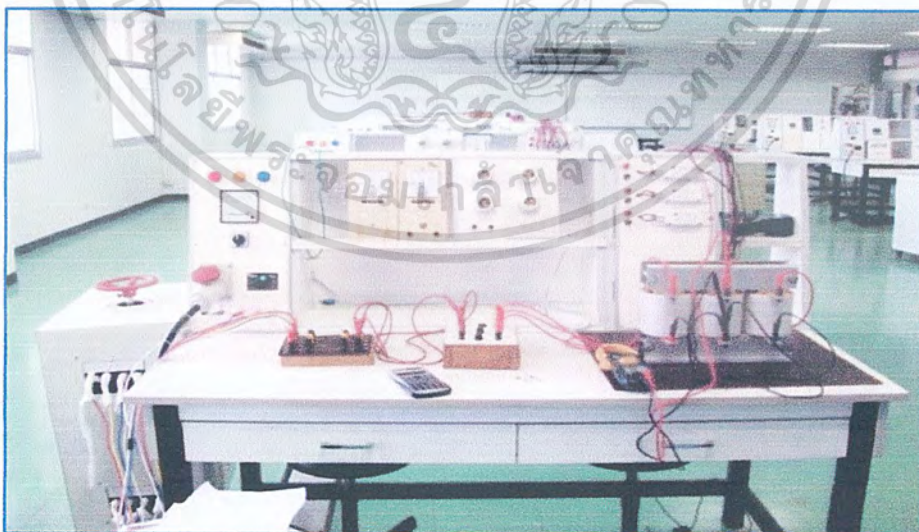
ในบทนี้การทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นการทดสอบรีแอกเตอร์ในห้องปฏิบัติการ และส่วนที่เป็นการทดสอบวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์ที่ติดตั้งจริงในโรงงานอุตสาหกรรม สุดท้ายจะเป็นการเปรียบเทียบผลการติดตั้งวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์ ระหว่างดีจูนฟิลเตอร์ที่ใช้รีแอกเตอร์ต้นแบบกับดีจูนฟิลเตอร์ที่ใช้รีแอกเตอร์ Nokian (Nokian Capacitor)

4.2 การทดสอบรีแอกเตอร์

การทดสอบรีแอกเตอร์เป็นกาทดสอบด้วยวิธี Short circuit test เพื่อหาค่าความเหนี่ยวนำ และพิกัดกระแสของรีแอกเตอร์



รูปที่ 4.1 วงจรการทดสอบรีแอกเตอร์



(ก) ทดสอบทดสอบรีแอกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) บันทึกผลการทดสอบ

รูปที่ 4.2 การทดสอบรีแอกเตอร์และการบันทึกผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบรีแอกเตอร์ Phase A

| I (A) | V (V) | P (W) | Q (VAR) | S (VA) | PF |
|-------|-------|-------|---------|--------|------|
| 10.26 | 3.0 | 0 | 30 | 30 | 0 |
| 19.81 | 5.4 | 12 | 108 | 108 | 0.11 |
| 26.58 | 7.8 | 24 | 228 | 234 | 0.10 |
| 39.12 | 10.2 | 42 | 396 | 396 | 0.11 |
| 49.44 | 12.7 | 66 | 624 | 630 | 0.10 |
| 58.38 | 15.0 | 90 | 870 | 876 | 0.10 |
| 69.01 | 17.6 | 126 | 1206 | 1212 | 0.10 |
| 79.51 | 20.0 | 168 | 1578 | 1590 | 0.11 |

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบรีแอกเตอร์ Phase B

| I (A) | V (V) | P (W) | Q (VAR) | S (VA) | PF |
|-------|-------|-------|---------|--------|------|
| 10.31 | 3.0 | 0 | 30 | 30 | 0 |
| 14.82 | 5.4 | 10 | 110 | 108 | 0.09 |
| 24.34 | 7.8 | 30 | 230 | 234 | 0.12 |
| 38.39 | 10.1 | 50 | 380 | 396 | 0.12 |
| 48.63 | 12.6 | 80 | 610 | 630 | 0.13 |
| 57.25 | 14.7 | 110 | 840 | 876 | 0.12 |
| 67.38 | 17.3 | 150 | 1160 | 1212 | 0.13 |
| 77.12 | 19.7 | 190 | 1510 | 1590 | 0.13 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบรีแอคเตอร์ Phase C

| I (A) | V (V) | P (W) | Q (VAR) | S (VA) | PF |
|-------|-------|-------|---------|--------|------|
| 10.37 | 3.0 | 0 | 31 | 31 | 0 |
| 20.51 | 5.3 | 1 | 108 | 109 | 0.10 |
| 30.54 | 7.7 | 24 | 234 | 235 | 0.10 |
| 40.04 | 10.0 | 40 | 398 | 400 | 0.10 |
| 50.45 | 12.0 | 67 | 602 | 605 | 0.11 |
| 60.43 | 14.7 | 89 | 884 | 888 | 0.10 |
| 68.27 | 17.2 | 129 | 1167 | 1117 | 0.11 |
| 78.52 | 19.7 | 170 | 1537 | 1547 | 0.11 |

ตารางที่ 4.4 สรุปผลการทดสอบรีแอคเตอร์

| Phase | V (V) | I (A) | L (mH) | Error (%) |
|--------|-------|-------|--------|-----------|
| A | 20.0 | 79.51 | 0.801 | 2.43 |
| B | 19.7 | 77.12 | 0.813 | 3.96 |
| C | 19.7 | 78.52 | 0.799 | 2.17 |
| เฉลี่ย | 19.8 | 78.38 | 0.804 | 2.81 |

จากผลการทดสอบพบว่ารีแอคเตอร์สามารถรับกระแสที่พิกัดได้คือ 75 แอมแปร์ และค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) เฉลี่ยแล้วเท่ากับ 0.804 mH ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าความเหนี่ยวนำอยู่ในช่วงของมาตรฐานที่กำหนดไว้คือ -3% ถึง +3%

4.3 การทดสอบวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์

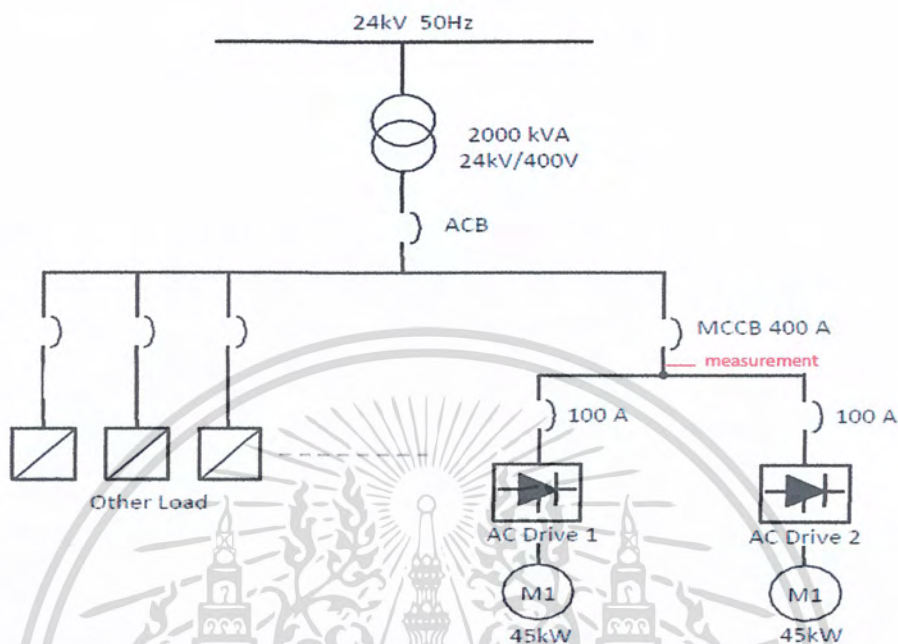
การทดสอบวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์ เป็นการทดสอบจากการนำไปติดตั้งจริงในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งระบบไฟฟ้าที่ทดสอบมี AC Drive หรือ Inverter ขนาด 45 kW 2 ตัว ขับโหลดระบบระบายอากาศภายในโรงงาน

โดยการทดสอบจะแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ

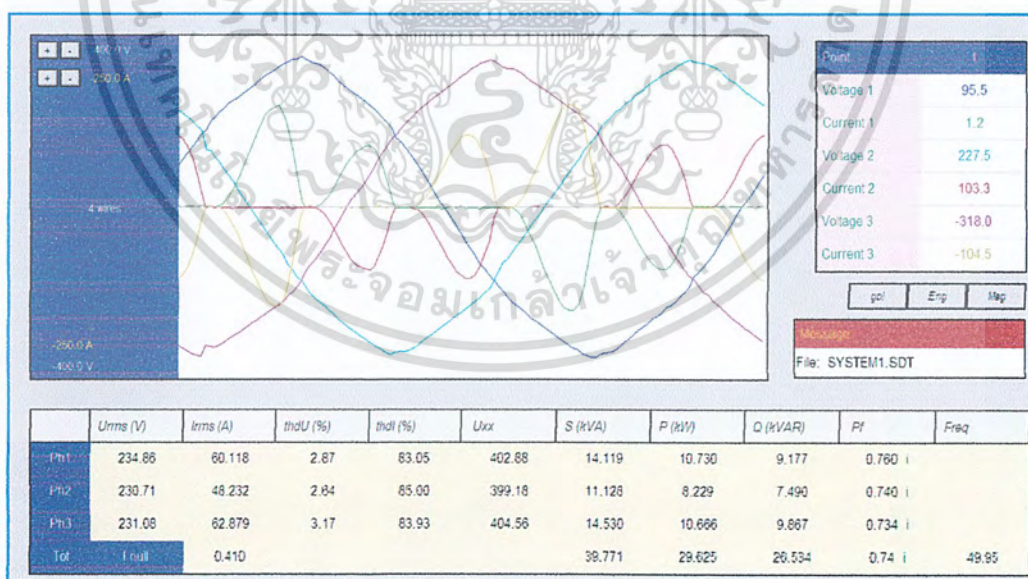
1. การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้าก่อนการติดตั้งวงจรดีจูนฟิลเตอร์
2. การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้าหลังการติดตั้งวงจรดีจูนฟิลเตอร์ โดยใช้รีแอคเตอร์ต้นแบบ
3. การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้าหลังการติดตั้งวงจรดีจูนฟิลเตอร์ โดยใช้รีแอคเตอร์ Nokian (Nokian Capacitor)

4.3.1 การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้าก่อนการติดตั้งวงจรอิเล็กทรอนิกส์

โดยทำการวัดที่จุด measurement ตามรูปที่ 4.3

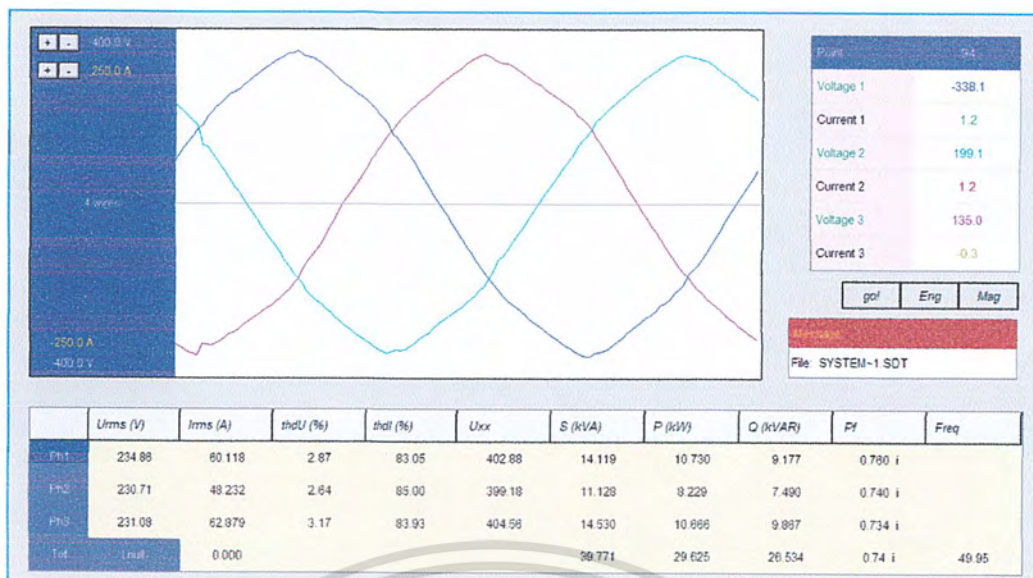


รูปที่ 4.3 Single line diagram ของระบบไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ

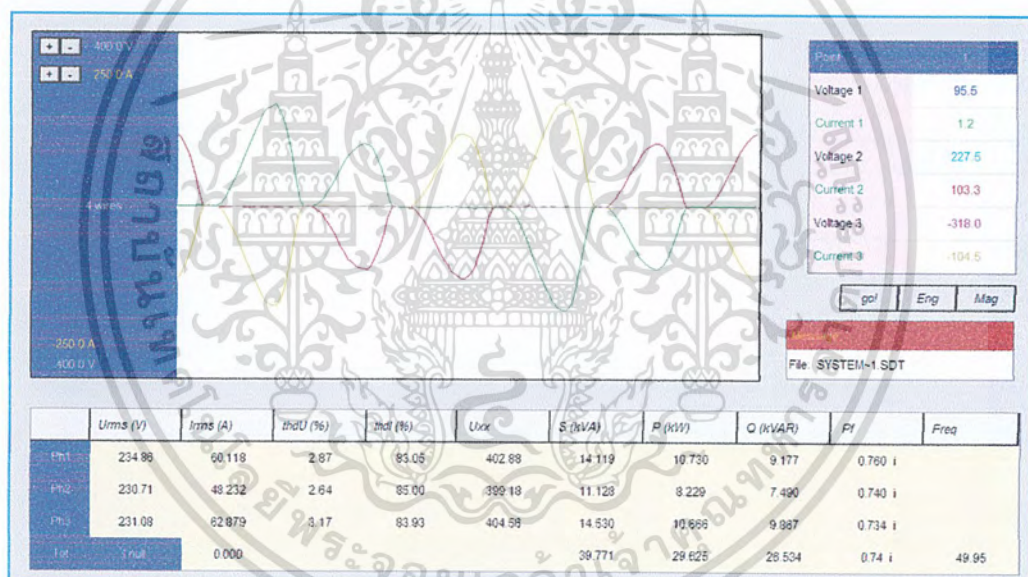


รูปที่ 4.4 รูปคลื่น V, I ทั้ง 3 เฟส และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

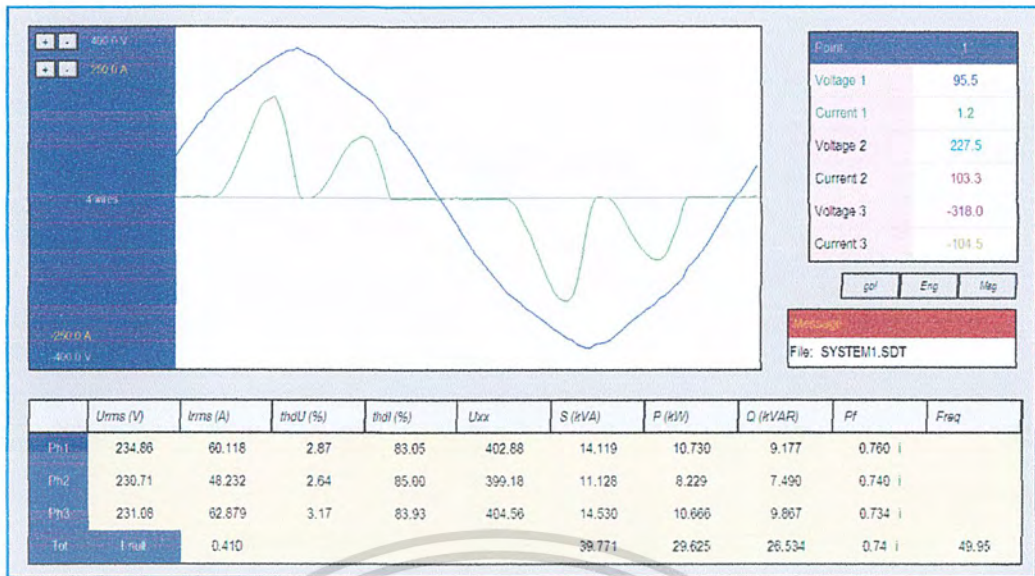


รูปที่ 4.5 รูปคลื่น v ทั้ง 3 เฟส และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้า

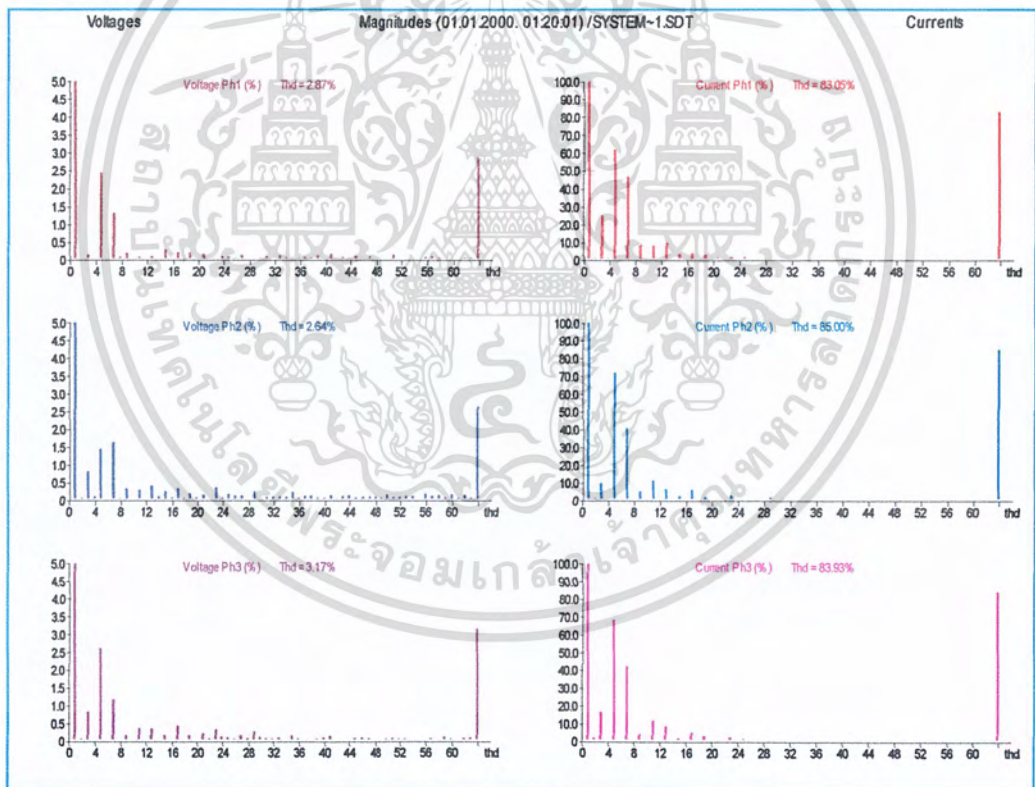


รูปที่ 4.6 รูปคลื่น / ทั้ง 3 เฟส และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 รูปคลื่น v, I เฟส A และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้า



รูปที่ 4.8 สเปกตรัม v, I ทั้ง 3 เฟสของระบบไฟฟ้า

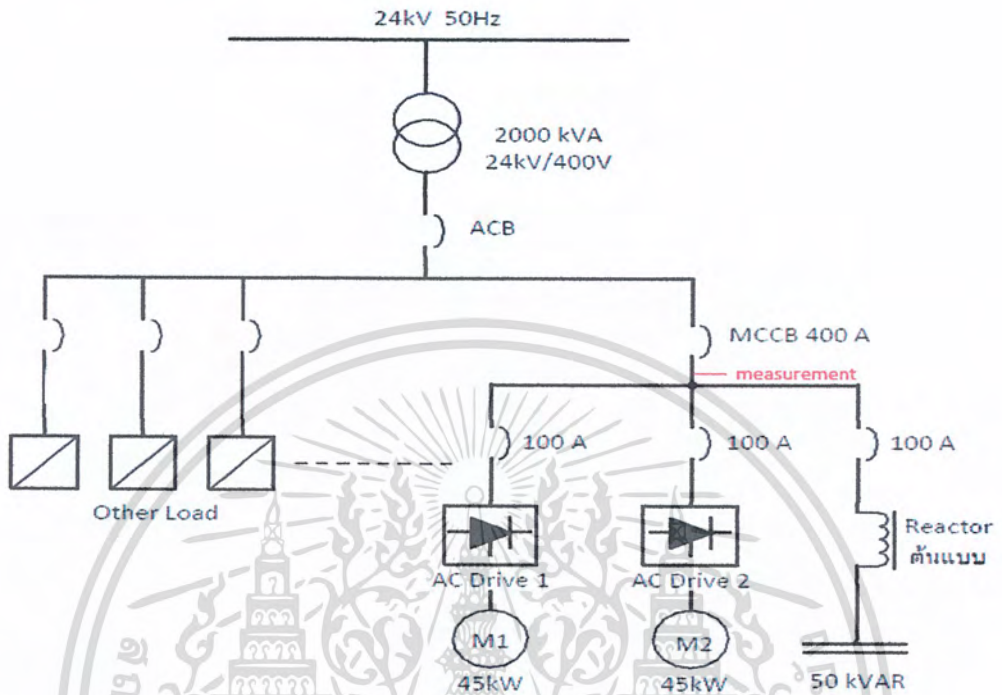
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้าก่อนการติดตั้งวงจรถิฐุนฟิลเตอร์

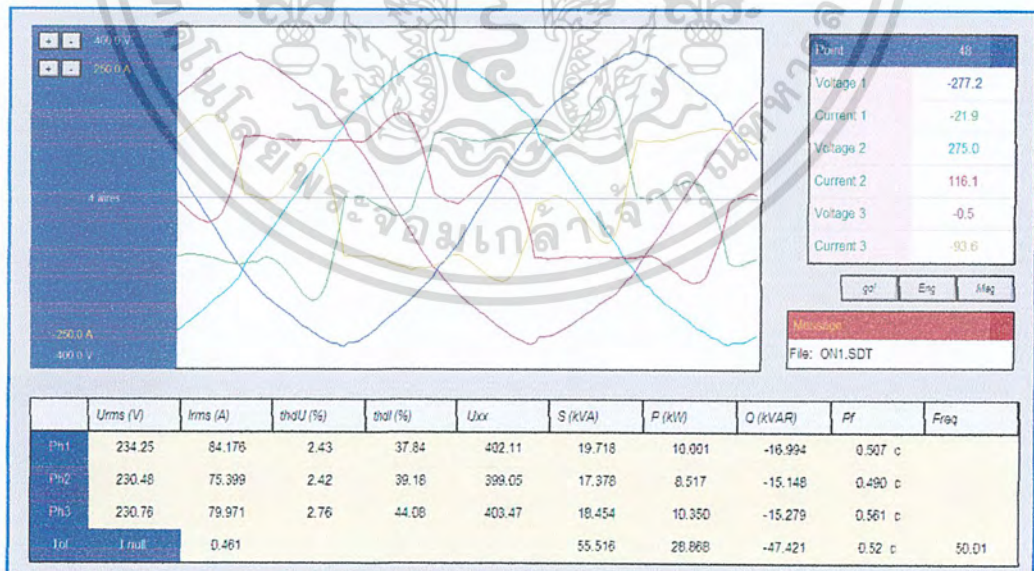
| Order | U1(%) | U1 (V) | I1 (%) | I1 (A) | U2(%) | U2 (V) | I2 (%) | I2 (A) | U3(%) | U3 (V) | I3 (%) | I3 (A) |
|-------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| 1 | 0.02 | 0.04 | 0.43 | 0.20 | 0.02 | 0.04 | 0.01 | 0 | 0.07 | 0.15 | 0.47 | 0.23 |
| 2 | 100.0 | 234.8 | 100.0 | 46.3 | 100.0 | 230.6 | 100 | 36.75 | 100.0 | 230.9 | 100.0 | 48.16 |
| 3 | 0.05 | 0.11 | 1.36 | 0.63 | 0.07 | 0.17 | 1.45 | 0.53 | 0.07 | 0.17 | 2.11 | 1.02 |
| 4 | 0.15 | 0.35 | 25.01 | 11.57 | 0.82 | 1.90 | 9.99 | 3.67 | 0.83 | 1.92 | 16.72 | 8.05 |
| 5 | 0.03 | 0.07 | 1.37 | 0.63 | 0.11 | 0.26 | 0.32 | 0.12 | 0.05 | 0.12 | 1.22 | 0.59 |
| 6 | 2.43 | 5.70 | 61.73 | 28.55 | 1.45 | 3.34 | 71.99 | 26.46 | 2.61 | 6.02 | 68.47 | 32.97 |
| 7 | 0.04 | 0.10 | 1.16 | 0.54 | 0.05 | 0.11 | 0.56 | 0.21 | 0.05 | 0.12 | 0.97 | 0.47 |
| 8 | 1.32 | 3.09 | 46.55 | 21.53 | 1.64 | 3.78 | 40.76 | 14.98 | 1.17 | 2.71 | 42.23 | 20.34 |
| 9 | 0.09 | 0.20 | 0.73 | 0.34 | 0.07 | 0.16 | 0.50 | 0.18 | 0.06 | 0.13 | 0.35 | 0.17 |
| 10 | 0.20 | 0.47 | 8.67 | 4.01 | 0.34 | 0.79 | 5.45 | 2.00 | 0.17 | 0.39 | 4.46 | 2.15 |
| 11 | 0.02 | 0.05 | 0.36 | 0.17 | 0.04 | 0.09 | 0.20 | 0.07 | 0.02 | 0.05 | 0.34 | 0.16 |
| 12 | 0.09 | 0.20 | 8.25 | 3.81 | 0.3 | 0.69 | 11.41 | 4.19 | 0.37 | 0.86 | 11.76 | 5.66 |
| 13 | 0.03 | 0.07 | 0.35 | 0.16 | 0.01 | 0.02 | 0.46 | 0.17 | 0.05 | 0.13 | 0.24 | 0.12 |
| 14 | 0.11 | 0.25 | 9.71 | 4.49 | 0.43 | 0.98 | 6.6 | 2.42 | 0.36 | 0.83 | 8.64 | 4.16 |
| 15 | 0.03 | 0.08 | 0.26 | 0.12 | 0.12 | 0.28 | 0.09 | 0.03 | 0.04 | 0.09 | 0.39 | 0.19 |
| 16 | 0.29 | 0.69 | 3.36 | 1.55 | 0.26 | 0.59 | 2.66 | 0.98 | 0.17 | 0.40 | 1.87 | 0.90 |
| 17 | 0.04 | 0.08 | 0.47 | 0.22 | 0.09 | 0.2 | 0.37 | 0.14 | 0.01 | 0.02 | 0.23 | 0.11 |
| 18 | 0.22 | 0.51 | 3.91 | 1.81 | 0.34 | 0.78 | 6.19 | 2.28 | 0.44 | 1.02 | 5.01 | 2.41 |
| 19 | 0.02 | 0.04 | 0.28 | 0.13 | 0.07 | 0.17 | 0.31 | 0.12 | 0.05 | 0.12 | 0.10 | 0.05 |
| 20 | 0.20 | 0.48 | 3.24 | 1.50 | 0.21 | 0.49 | 2.18 | 0.80 | 0.18 | 0.41 | 3.22 | 1.55 |
| 21 | 0.04 | 0.10 | 0.18 | 0.08 | 0.09 | 0.21 | 0.29 | 0.11 | 0.06 | 0.14 | 0.17 | 0.08 |
| 22 | 0.16 | 0.39 | 1.47 | 0.68 | 0.17 | 0.38 | 1.24 | 0.45 | 0.23 | 0.53 | 0.30 | 0.14 |
| 23 | 0.06 | 0.15 | 0.18 | 0.08 | 0.06 | 0.14 | 0.14 | 0.05 | 0.09 | 0.20 | 0.40 | 0.19 |
| 24 | 0.04 | 0.10 | 1.79 | 0.83 | 0.38 | 0.87 | 3.01 | 1.11 | 0.33 | 0.77 | 2.47 | 1.19 |
| 25 | 0.11 | 0.26 | 0.14 | 0.06 | 0.08 | 0.18 | 0.30 | 0.11 | 0.14 | 0.32 | 0.15 | 0.07 |
| THD | 2.87 | 0 | 83.05 | 0 | 2.64 | 0 | 85.00 | 0 | 3.17 | 0 | 83.93 | 0 |

จากผลการทดสอบ ระบบไฟฟ้าก่อนการติดตั้งวงจรถิฐุนฟิลเตอร์ จะมีฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 กับ 7 และ %THD_v = 2.87%, 2.64%, 3.17% กับ %THD_i = 83.05%, 85.00%, 83.93% ในเฟส A, B และ C ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ามีฮาร์โมนิกส์อยู่ในระบบไฟฟ้าค่อนข้างสูง เนื่องด้วยการผลิตสัญญาณฮาร์โมนิกส์ส่วนใหญ่ มาจาก Inverter ขนาด 45 kW 2 ตัว ที่อยู่ในระบบไฟฟ้า

4.3.2 การวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าหลังการติดตั้งวงจรตัวจูนฟิลเตอร์ โดยใช้รีแอกเตอร์ต้นแบบ
โดยทำการวัดที่จุด measurement ตามรูปที่ 4.9

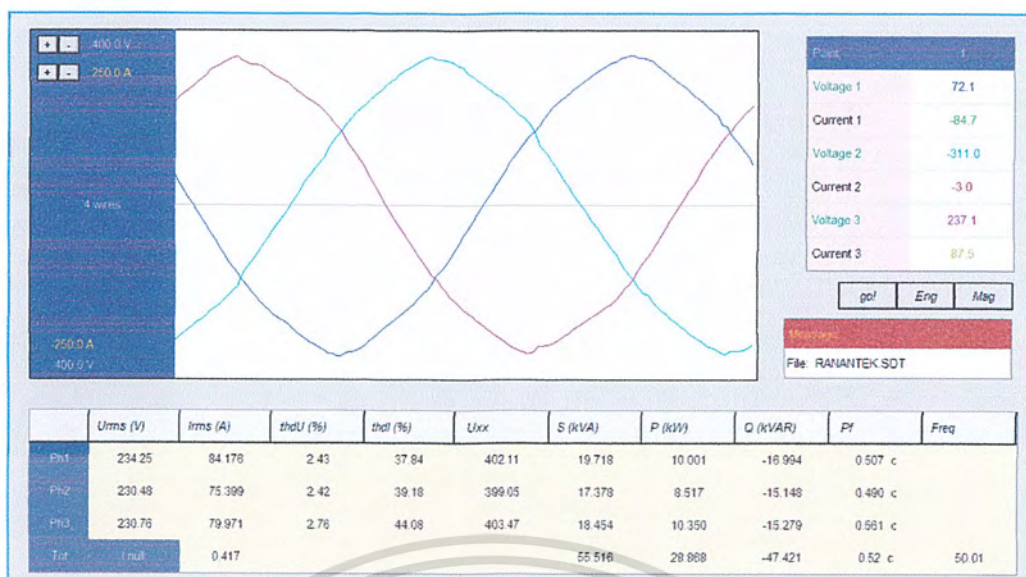


รูปที่ 4.9 Single line diagram ของระบบไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ

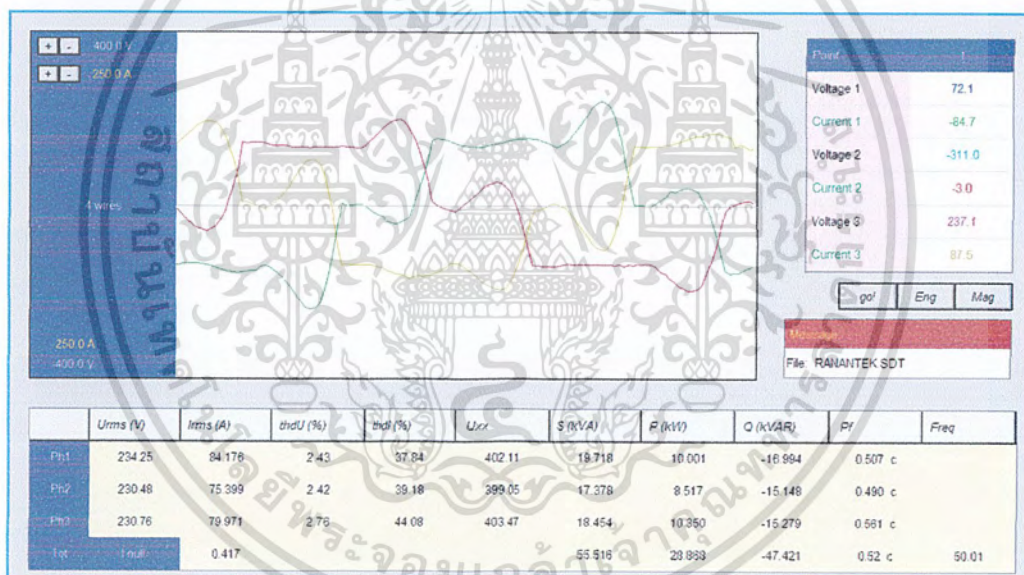


รูปที่ 4.10 รูปคลื่น V, I ทั้ง 3 เฟส และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 รูปคลื่น v ทั้ง 3 เฟส และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้า

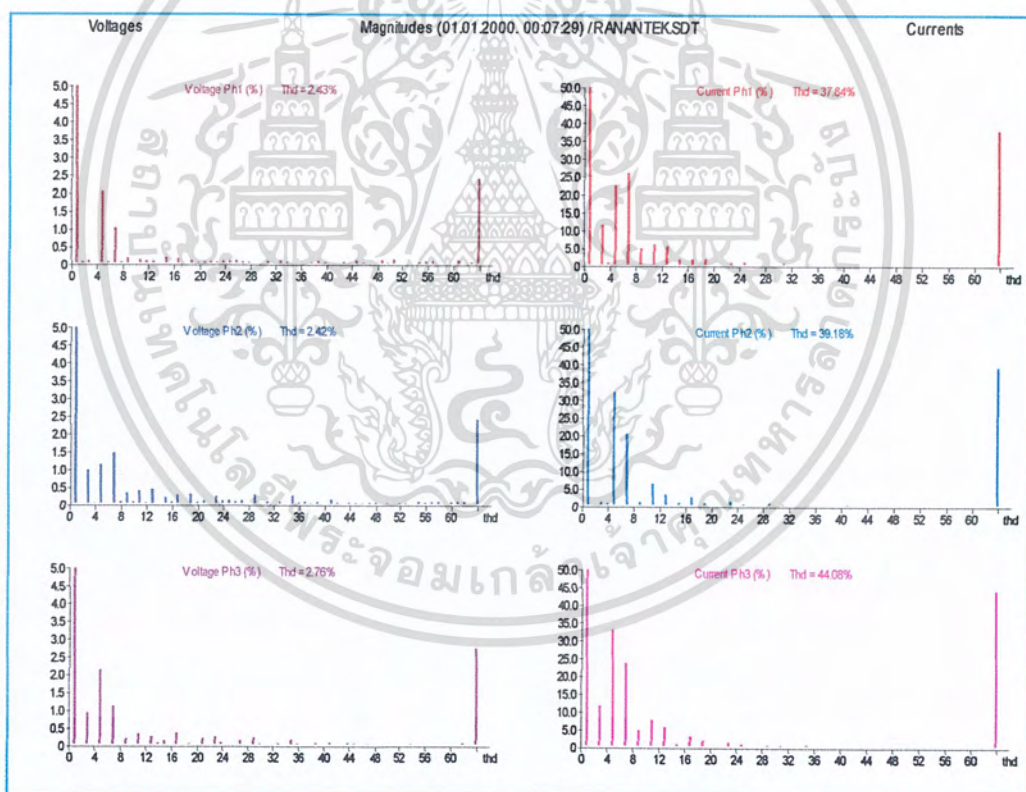


รูปที่ 4.12 รูปคลื่น i ทั้ง 3 เฟส และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 รูปคลื่น v, / เฟส A และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้า



รูปที่ 4.14 สเปกตรัม v, / ทั้ง 3 เฟสของระบบไฟฟ้า

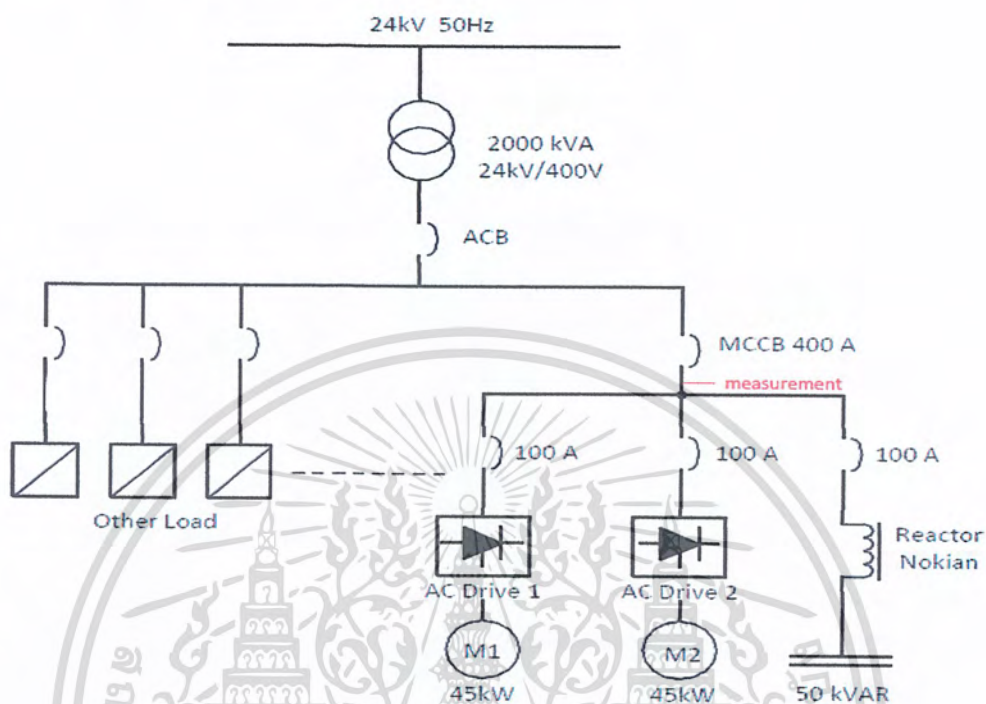
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้าหลังการติดตั้งวงจรถิฐุนฟิลเตอร์
โดยใช้รีแอคเตอร์ต้นแบบ

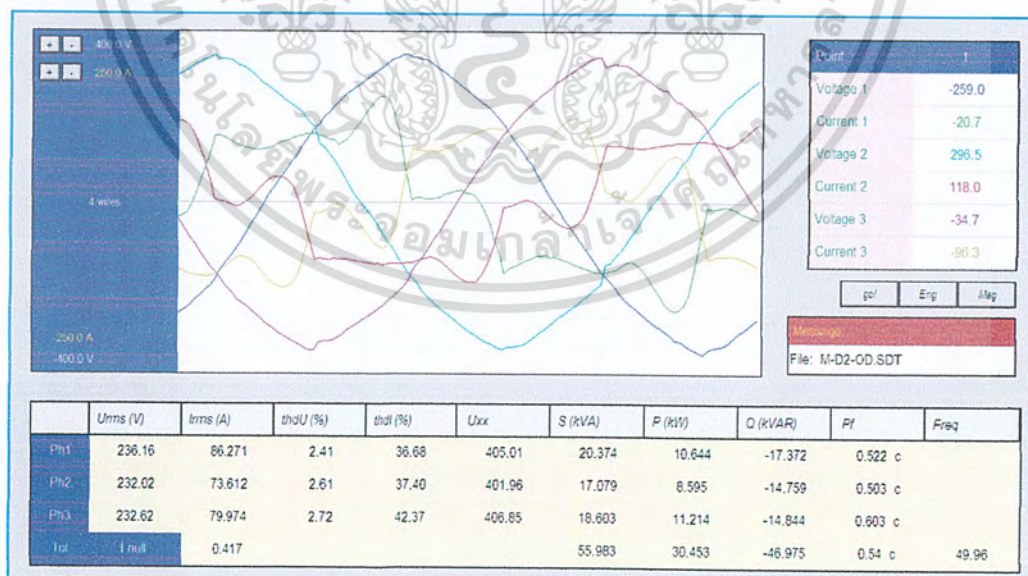
| Order | U1 (%) | U1 (V) | I1 (%) | I1 (A) | U2 (%) | U2 (V) | I2 (%) | I2 (A) | U3 (%) | U3 (V) | I3 (%) | I3 (A) |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 0.06 | 0.14 | 0.17 | 0.13 | 0.03 | 0.07 | 0.08 | 0.06 | 0.01 | 0.01 | 0.24 | 0.18 |
| 2 | 100.0 | 234.2 | 100.0 | 78.7 | 100.0 | 230.4 | 100.0 | 70.20 | 100.0 | 230.7 | 100.0 | 73.18 |
| 3 | 0.08 | 0.20 | 0.20 | 0.16 | 0.05 | 0.13 | 0.04 | 0.03 | 0.04 | 0.08 | 0.55 | 0.40 |
| 4 | 0.11 | 0.27 | 11.64 | 9.16 | 1.00 | 2.30 | 1.32 | 0.92 | 0.94 | 2.17 | 11.86 | 8.68 |
| 5 | 0.05 | 0.11 | 0.99 | 0.78 | 0.07 | 0.16 | 0.96 | 0.68 | 0.03 | 0.08 | 0.44 | 0.32 |
| 6 | 2.06 | 4.82 | 22.54 | 17.74 | 1.15 | 2.65 | 32.2 | 22.61 | 2.14 | 4.95 | 33.05 | 24.19 |
| 7 | 0.09 | 0.22 | 0.40 | 0.31 | 0.05 | 0.13 | 0.43 | 0.30 | 0.04 | 0.09 | 0.35 | 0.25 |
| 8 | 1.05 | 2.45 | 25.96 | 20.43 | 1.48 | 3.41 | 20.46 | 14.36 | 1.13 | 2.61 | 23.73 | 17.37 |
| 9 | 0.08 | 0.19 | 0.46 | 0.36 | 0.10 | 0.24 | 0.35 | 0.25 | 0.06 | 0.13 | 0.20 | 0.15 |
| 10 | 0.19 | 0.44 | 5.15 | 4.05 | 0.35 | 0.81 | 1.38 | 0.97 | 0.22 | 0.51 | 4.93 | 3.61 |
| 11 | 0.04 | 0.09 | 0.30 | 0.23 | 0.10 | 0.22 | 0.04 | 0.03 | 0.04 | 0.10 | 0.09 | 0.06 |
| 12 | 0.15 | 0.36 | 6.09 | 4.80 | 0.42 | 0.98 | 6.52 | 4.58 | 0.35 | 0.81 | 7.83 | 5.73 |
| 13 | 0.12 | 0.28 | 0.17 | 0.13 | 0.07 | 0.16 | 0.24 | 0.17 | 0.06 | 0.14 | 0.41 | 0.3 |
| 14 | 0.10 | 0.24 | 5.59 | 4.40 | 0.45 | 1.03 | 3.46 | 2.43 | 0.27 | 0.63 | 5.80 | 4.24 |
| 15 | 0.03 | 0.08 | 0.29 | 0.23 | 0.04 | 0.10 | 0.12 | 0.08 | 0.09 | 0.21 | 0.28 | 0.21 |
| 16 | 0.22 | 0.50 | 1.82 | 1.44 | 0.22 | 0.51 | 1.16 | 0.81 | 0.16 | 0.38 | 1.02 | 0.75 |
| 17 | 0.05 | 0.11 | 0.24 | 0.19 | 0.10 | 0.23 | 0.22 | 0.15 | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.05 |
| 18 | 0.18 | 0.42 | 1.99 | 1.57 | 0.29 | 0.68 | 2.76 | 1.94 | 0.37 | 0.86 | 3.28 | 2.40 |
| 19 | 0.04 | 0.11 | 0.07 | 0.05 | 0.03 | 0.08 | 0.06 | 0.04 | 0.01 | 0.03 | 0.37 | 0.27 |
| 20 | 0.12 | 0.29 | 1.95 | 1.53 | 0.33 | 0.75 | 1.05 | 0.74 | 0.08 | 0.19 | 2.18 | 1.60 |
| 21 | 0.07 | 0.16 | 0.05 | 0.04 | 0.09 | 0.21 | 0.13 | 0.09 | 0.02 | 0.06 | 0.24 | 0.18 |
| 22 | 0.09 | 0.22 | 0.62 | 0.49 | 0.13 | 0.30 | 0.54 | 0.38 | 0.23 | 0.52 | 0.29 | 0.21 |
| 23 | 0.1 | 0.22 | 0.08 | 0.06 | 0.03 | 0.07 | 0.14 | 0.10 | 0.05 | 0.12 | 0.07 | 0.05 |
| 24 | 0.08 | 0.19 | 1.07 | 0.84 | 0.26 | 0.60 | 1.62 | 1.14 | 0.28 | 0.63 | 1.57 | 1.15 |
| 25 | 0.11 | 0.25 | 0.11 | 0.08 | 0.14 | 0.32 | 0.15 | 0.10 | 0.11 | 0.25 | 0.29 | 0.21 |
| THD | 2.43 | 0 | 37.84 | 0 | 2.42 | 0 | 39.18 | 0 | 2.76 | 0 | 44.08 | 0 |

จากผลการทดสอบ ระบบไฟฟ้าหลังการติดตั้งวงจรถิฐุนฟิลเตอร์ ที่ใช้รีแอคเตอร์ต้นแบบ มี %THD_v = 2.43%, 2.42%, 2.76% กับ %THD_i = 37.84%, 39.18%, 44.08% ในเฟส A, B และ C ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าวงจรถิฐุนฟิลเตอร์ที่ใช้รีแอคเตอร์ต้นแบบ จะทำให้รูปคลื่นกระแสและแรงดันเป็นรูปไซน์มากขึ้น และสามารถลดทอนกระแสฮาร์โมนิกส์ได้เกินกึ่งหนึ่งของกระแสฮาร์โมนิกส์ทั้งหมดที่อยู่ในระบบ โดยพิจารณาจาก %THD_i ในเฟส A ซึ่งกระแสฮาร์โมนิกส์จะลดลงมาจาก 83.05% เหลือ 37.84% แสดงให้เห็นว่าวงจรถิฐุนฟิลเตอร์ที่ใช้รีแอคเตอร์ต้นแบบสามารถใช้งานได้จริงกับระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม

4.3.3 การวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าหลังการติดตั้งวงจรรีจูน
ฟิลเตอร์ โดยใช้รีแอคเตอร์ Nokian (Nokian Capacitor)
โดยทำการวัดที่จุด measurement ตามรูปที่ 4.15

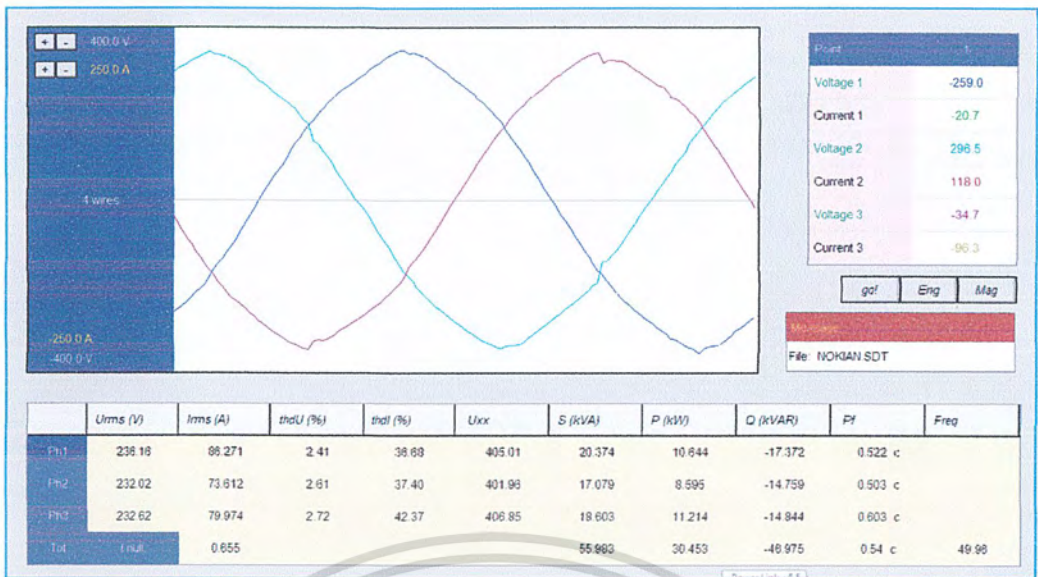


รูปที่ 4.15 Single line diagram ของระบบไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบ

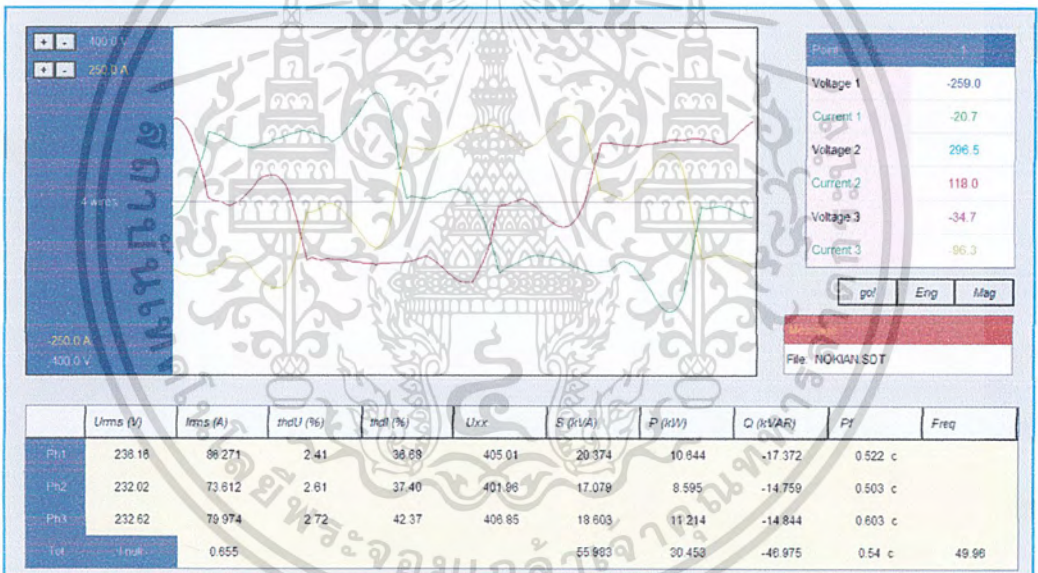


รูปที่ 4.16 รูปคลื่น v, i ทั้ง 3 เฟส และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

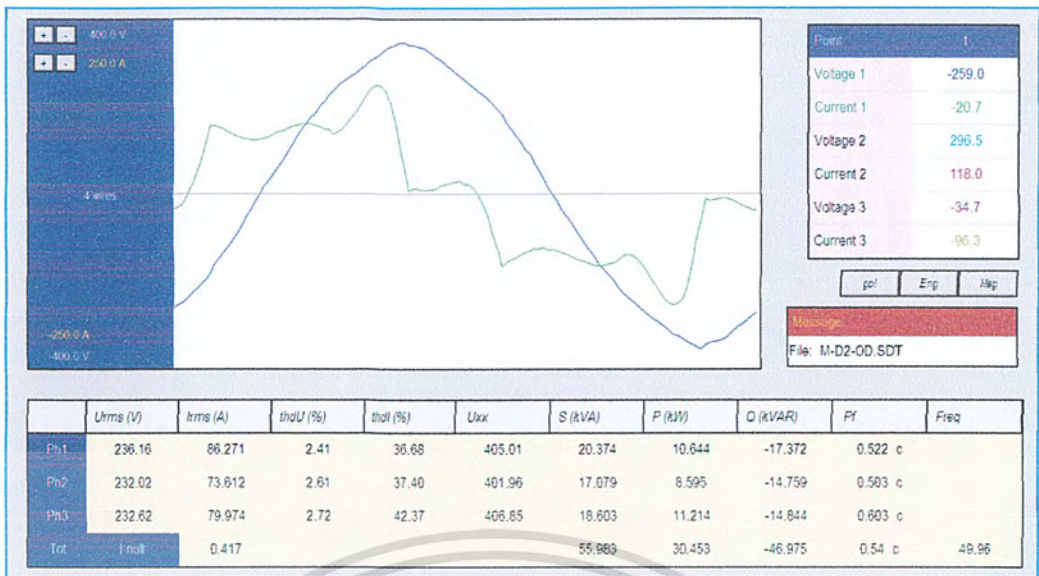


รูปที่ 4.17 รูปคลื่น V ทั้ง 3 เฟส และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้า

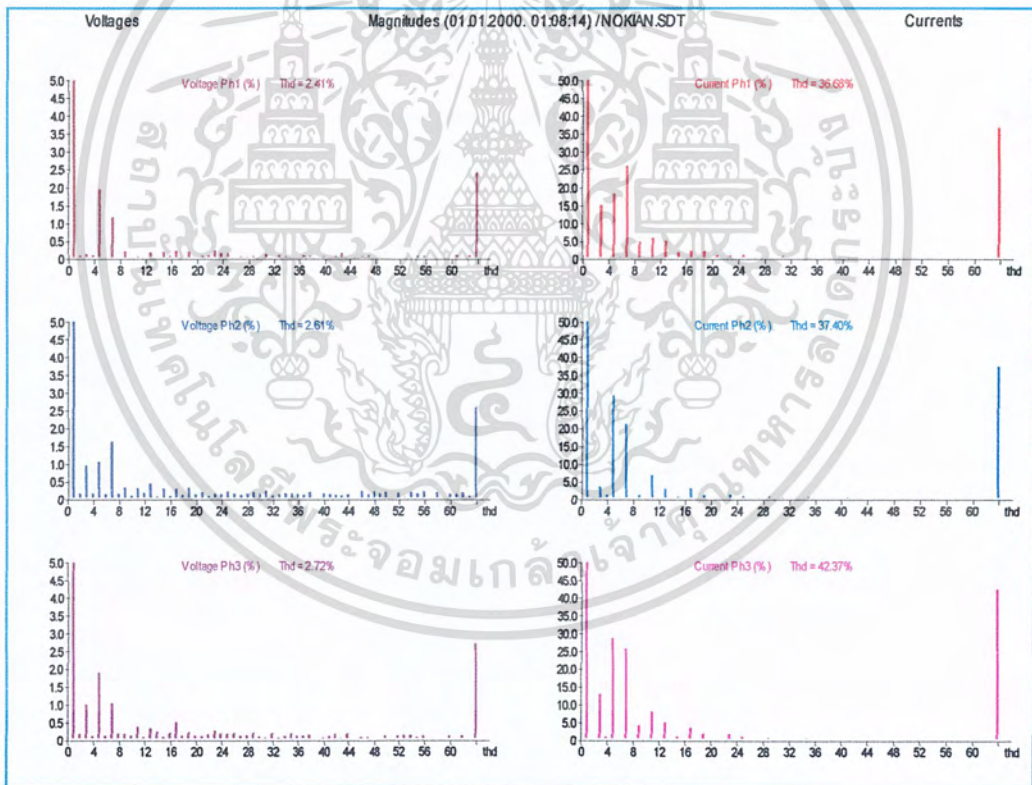


รูปที่ 4.18 รูปคลื่น / ทั้ง 3 เฟส และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 รูปคลื่น V, I เฟส A และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้า



รูปที่ 4.20 สเปกตรัม V, I ทั้ง 3 เฟสของระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้าหลังการติดตั้งวงจรตีจูนฟิลเตอร์
โดยใช้รีแอคเตอร์ Nokian (Nokian Capacitor)

| Order | U1(%) | U1 (V) | I1 (%) | I1 (A) | U2(%) | U2 (V) | I2 (%) | I2 (A) | U3(%) | U3 (V) | I3 (%) | I3 (A) |
|-------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| 1 | 0.04 | 0.10 | 0.56 | 0.45 | 0.02 | 0.04 | 0.29 | 0.20 | 0.02 | 0.05 | 0.26 | 0.19 |
| 2 | 100.0 | 236.1 | 100.0 | 80.99 | 100.0 | 231.9 | 100.0 | 68.95 | 100.0 | 232.5 | 100.0 | 73.64 |
| 3 | 0.10 | 0.23 | 0.63 | 0.51 | 0.17 | 0.39 | 0.62 | 0.42 | 0.18 | 0.41 | 0.62 | 0.46 |
| 4 | 0.15 | 0.35 | 15.15 | 12.27 | 0.95 | 2.21 | 3.69 | 2.55 | 1.01 | 2.34 | 13.06 | 9.62 |
| 5 | 0.11 | 0.26 | 0.37 | 0.3 | 0.17 | 0.41 | 1.41 | 0.97 | 0.12 | 0.28 | 1.04 | 0.77 |
| 6 | 1.96 | 4.63 | 18.36 | 14.87 | 1.06 | 2.47 | 29.14 | 20.09 | 1.90 | 4.42 | 28.68 | 21.12 |
| 7 | 0.05 | 0.11 | 0.66 | 0.53 | 0.16 | 0.36 | 0.27 | 0.19 | 0.13 | 0.30 | 0.41 | 0.30 |
| 8 | 1.17 | 2.76 | 25.89 | 20.97 | 1.63 | 3.77 | 21.3 | 14.68 | 1.05 | 2.43 | 25.76 | 18.97 |
| 9 | 0.05 | 0.11 | 0.32 | 0.26 | 0.16 | 0.38 | 0.34 | 0.23 | 0.20 | 0.46 | 0.14 | 0.10 |
| 10 | 0.22 | 0.51 | 4.88 | 3.95 | 0.34 | 0.79 | 1.27 | 0.87 | 0.19 | 0.44 | 4.22 | 3.11 |
| 11 | 0.06 | 0.14 | 0.15 | 0.12 | 0.11 | 0.26 | 0.04 | 0.03 | 0.13 | 0.30 | 0.10 | 0.07 |
| 12 | 0.07 | 0.17 | 5.93 | 4.80 | 0.33 | 0.76 | 6.95 | 4.79 | 0.39 | 0.91 | 8.10 | 5.97 |
| 13 | 0.01 | 0.03 | 0.21 | 0.17 | 0.19 | 0.44 | 0.14 | 0.10 | 0.09 | 0.21 | 0.18 | 0.13 |
| 14 | 0.18 | 0.43 | 5.17 | 4.19 | 0.45 | 1.05 | 3.05 | 2.10 | 0.35 | 0.80 | 5.13 | 3.78 |
| 15 | 0.04 | 0.08 | 0.02 | 0.02 | 0.09 | 0.20 | 0.03 | 0.02 | 0.26 | 0.59 | 0.07 | 0.05 |
| 16 | 0.19 | 0.45 | 1.85 | 1.50 | 0.32 | 0.74 | 0.83 | 0.57 | 0.10 | 0.23 | 1.12 | 0.83 |
| 17 | 0.08 | 0.19 | 0.09 | 0.08 | 0.10 | 0.24 | 0.14 | 0.10 | 0.22 | 0.50 | 0.10 | 0.07 |
| 18 | 0.23 | 0.55 | 2.36 | 1.91 | 0.30 | 0.70 | 3.23 | 2.23 | 0.51 | 1.19 | 3.64 | 2.68 |
| 19 | 0.03 | 0.07 | 0.09 | 0.08 | 0.13 | 0.30 | 0.11 | 0.08 | 0.13 | 0.30 | 0.06 | 0.05 |
| 20 | 0.21 | 0.48 | 2.27 | 1.84 | 0.33 | 0.77 | 1.36 | 0.94 | 0.23 | 0.54 | 1.97 | 1.45 |
| 21 | 0.06 | 0.14 | 0.26 | 0.21 | 0.15 | 0.35 | 0.12 | 0.08 | 0.13 | 0.31 | 0.10 | 0.08 |
| 22 | 0.09 | 0.20 | 1.000 | 0.81 | 0.21 | 0.49 | 0.40 | 0.28 | 0.11 | 0.27 | 0.47 | 0.34 |
| 23 | 0.10 | 0.24 | 0.16 | 0.13 | 0.10 | 0.24 | 0.04 | 0.02 | 0.16 | 0.37 | 0.02 | 0.01 |
| 24 | 0.24 | 0.56 | 0.98 | 0.79 | 0.16 | 0.37 | 1.46 | 1.01 | 0.27 | 0.62 | 1.77 | 1.31 |
| 25 | 0.17 | 0.39 | 0.14 | 0.11 | 0.15 | 0.35 | 0.03 | 0.02 | 0.20 | 0.47 | 0.09 | 0.07 |
| THD | 2.41 | 0 | 36.68 | 0 | 2.61 | 0 | 37.40 | 0 | 2.72 | 0 | 42.37 | 0 |

จากผลการทดสอบ ระบบไฟฟ้าหลังการติดตั้งวงจรตีจูนฟิลเตอร์ ที่ใช้รีแอคเตอร์ Nokian (Nokian Capacitor) มี %THD_v = 2.41%, 2.61%, 2.72% กับ %THD_i = 36.68%, 37.40%, 42.37% ในเฟส A, B และ C ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าวงจรตีจูนฟิลเตอร์ที่ใช้รีแอคเตอร์ Nokian จะทำให้รูปคลื่นกระแสและแรงดันเป็นรูปไซน์มากขึ้น และสามารถลดทอนกระแสฮาร์โมนิกส์ได้เกินกึ่งหนึ่งของกระแสฮาร์โมนิกส์ทั้งหมดที่อยู่ในระบบ โดยพิจารณาจาก %THD_i ในเฟส A ซึ่งกระแสฮาร์โมนิกส์จะลดลงมาจาก 83.05% เหลือ 36.68%

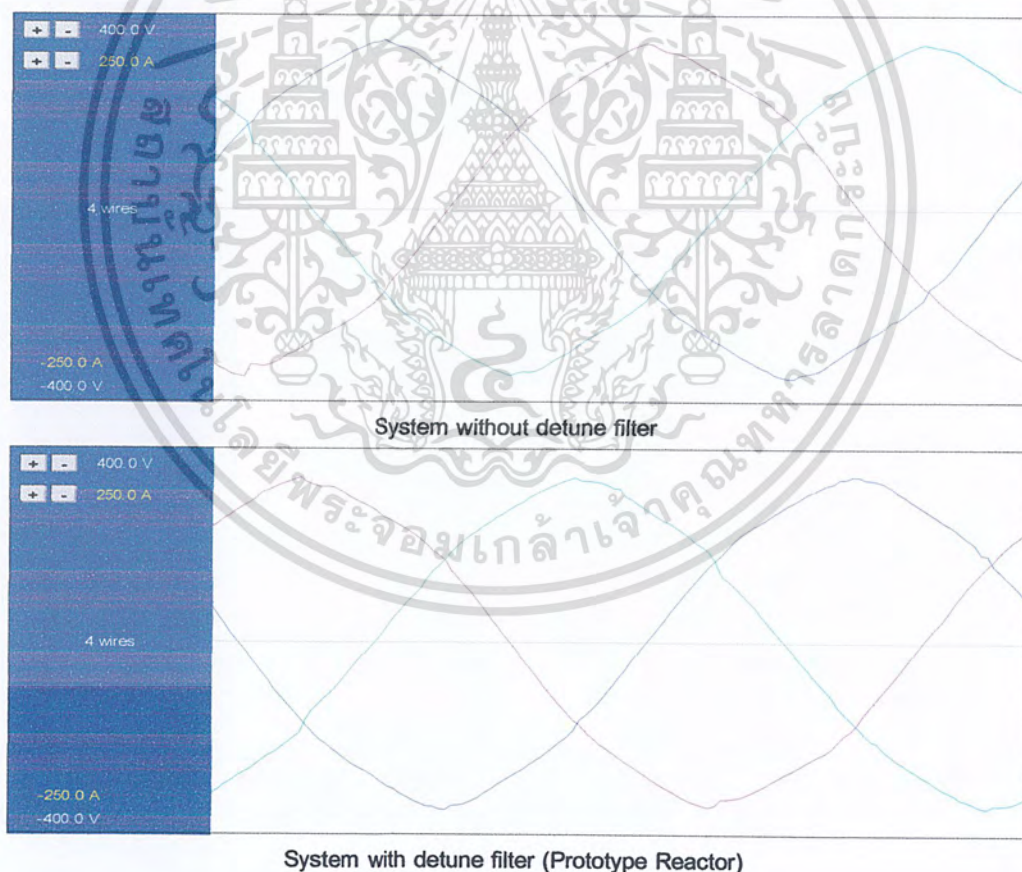
4.4 การเปรียบเทียบผลการติดตั้งวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์

การทดสอบจะทำการเปรียบเทียบจะค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการกรองสัญญาณฮาร์โมนิกส์ ระหว่างดีจูนฟิลเตอร์ที่ใช้รีแอคเตอร์ต้นแบบ และดีจูนฟิลเตอร์ที่ใช้รีแอคเตอร์ Nokian (Nokian Capacitor)

โดยการเปรียบเทียบจะแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ

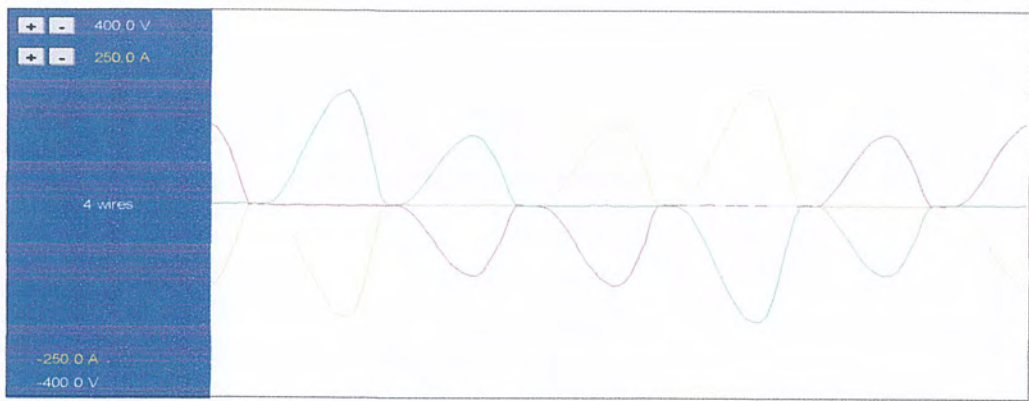
1. การเปรียบเทียบวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์ ก่อนและหลังการติดตั้ง โดยใช้รีแอคเตอร์ต้นแบบ
2. การเปรียบเทียบวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์ ก่อนและหลังการติดตั้ง โดยใช้รีแอคเตอร์ Nokian (Nokian Capacitor)
3. การเปรียบเทียบวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์ ระหว่างรีแอคเตอร์ต้นแบบ กับรีแอคเตอร์ Nokian (Nokian Capacitor)

4.4.1 การเปรียบเทียบวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์ ก่อนและหลังการติดตั้ง โดยใช้รีแอคเตอร์ต้นแบบ



รูปที่ 4.21 รูปคลื่นแรงดัน ทั้ง 3 เฟสของระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



System without detune filter

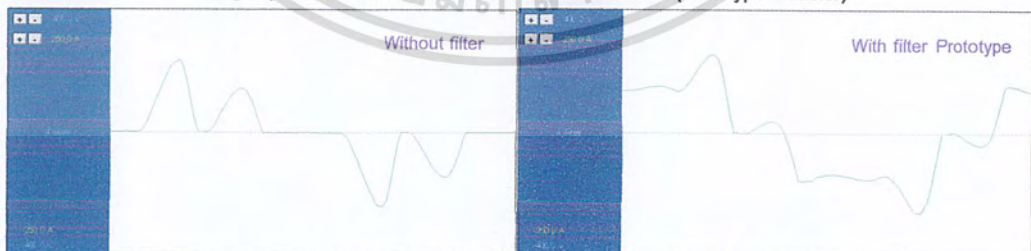


System with detune filter (Prototype Reactor)

รูปที่ 4.22 รูปคลื่นกระแส ทั้ง 3 เฟสของระบบไฟฟ้า



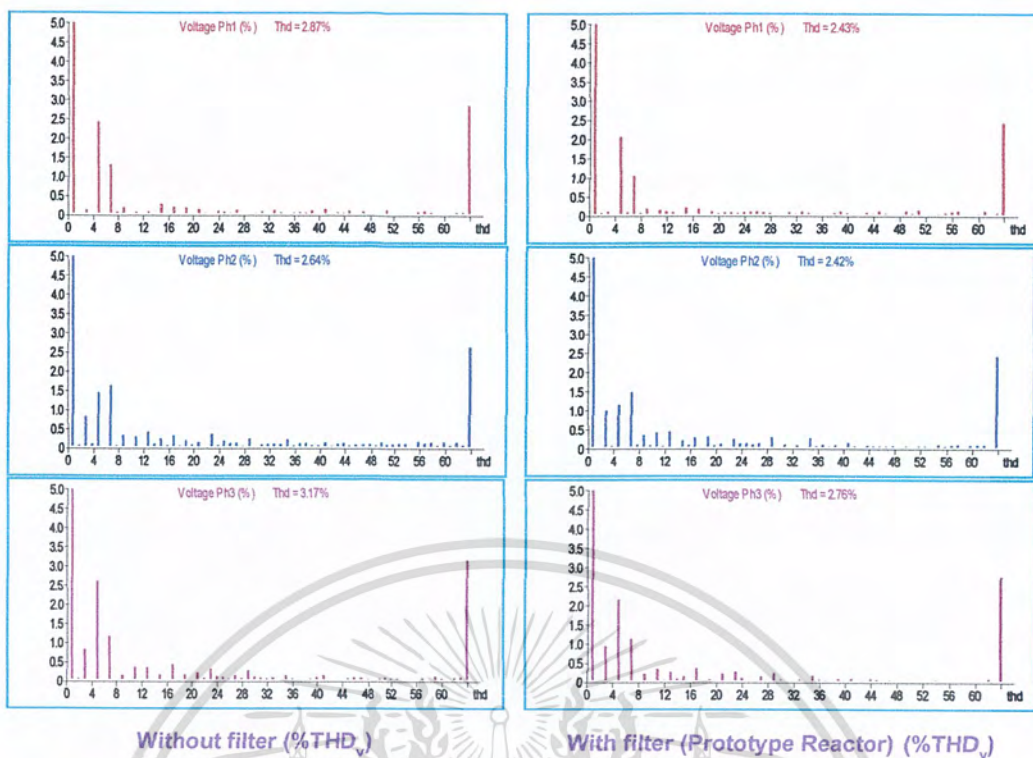
Voltage system without detune filter & with detune filter (Prototype Reactor)



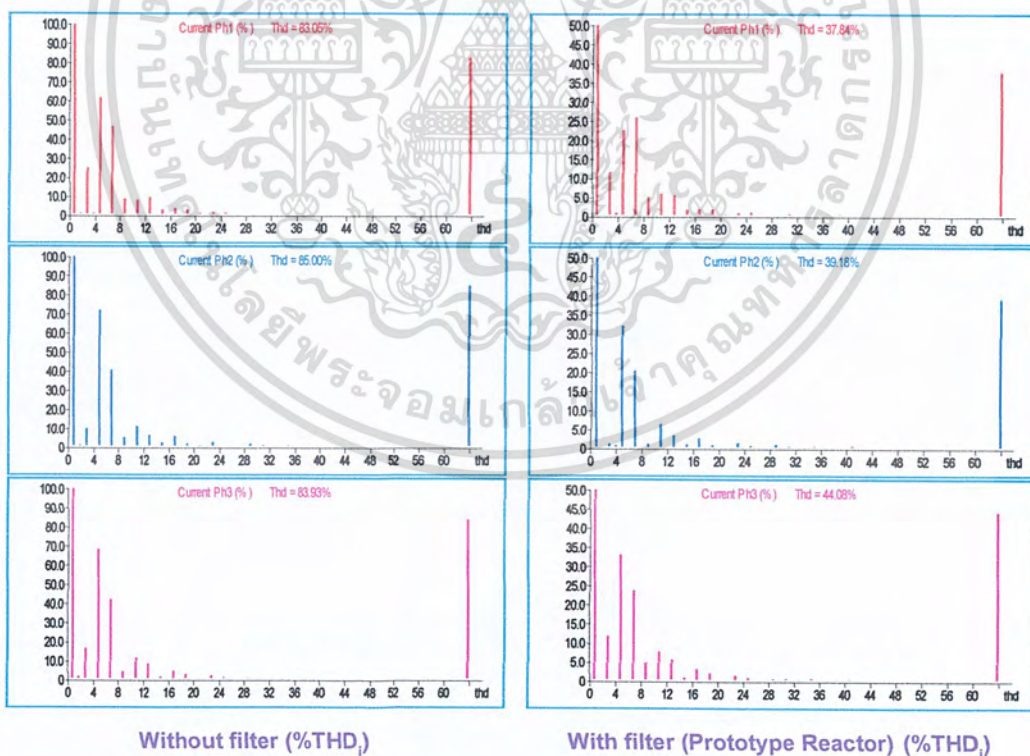
Current system without detune filter & with detune filter (Prototype Reactor)

รูปที่ 4.23 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสเฟส A ของระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

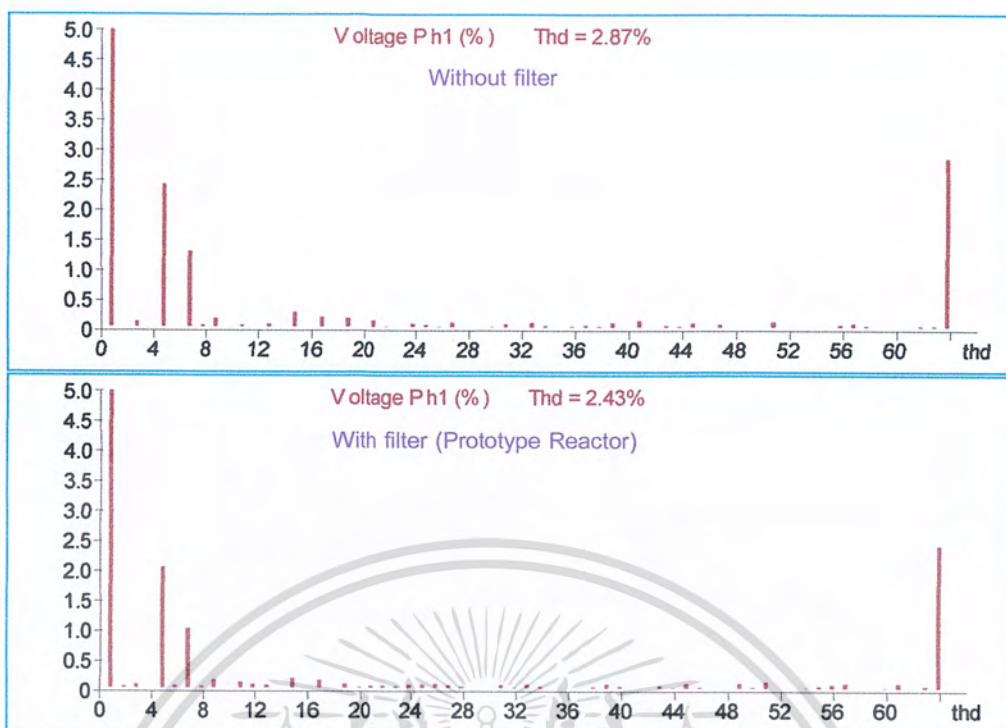


รูปที่ 4.24 สเปกตรัมของแรงดันก่อนและหลังการติดตั้งวงจรฟิลเตอร์

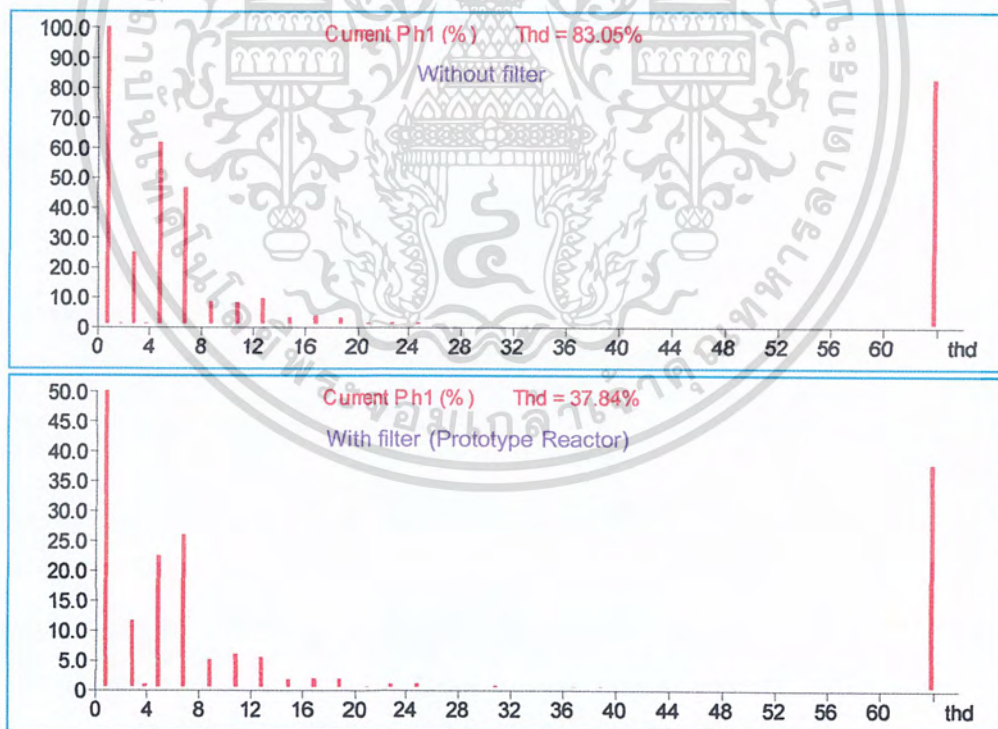


รูปที่ 4.25 สเปกตรัมของกระแสก่อนและหลังการติดตั้งวงจรฟิลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 สเปกตรัมของแรงดันเฟส A ก่อนและหลังการติดตั้งวงจรตัวกรอง



รูปที่ 4.27 สเปกตรัมของกระแสเฟส A ก่อนและหลังการติดตั้งวงจรตัวกรอง

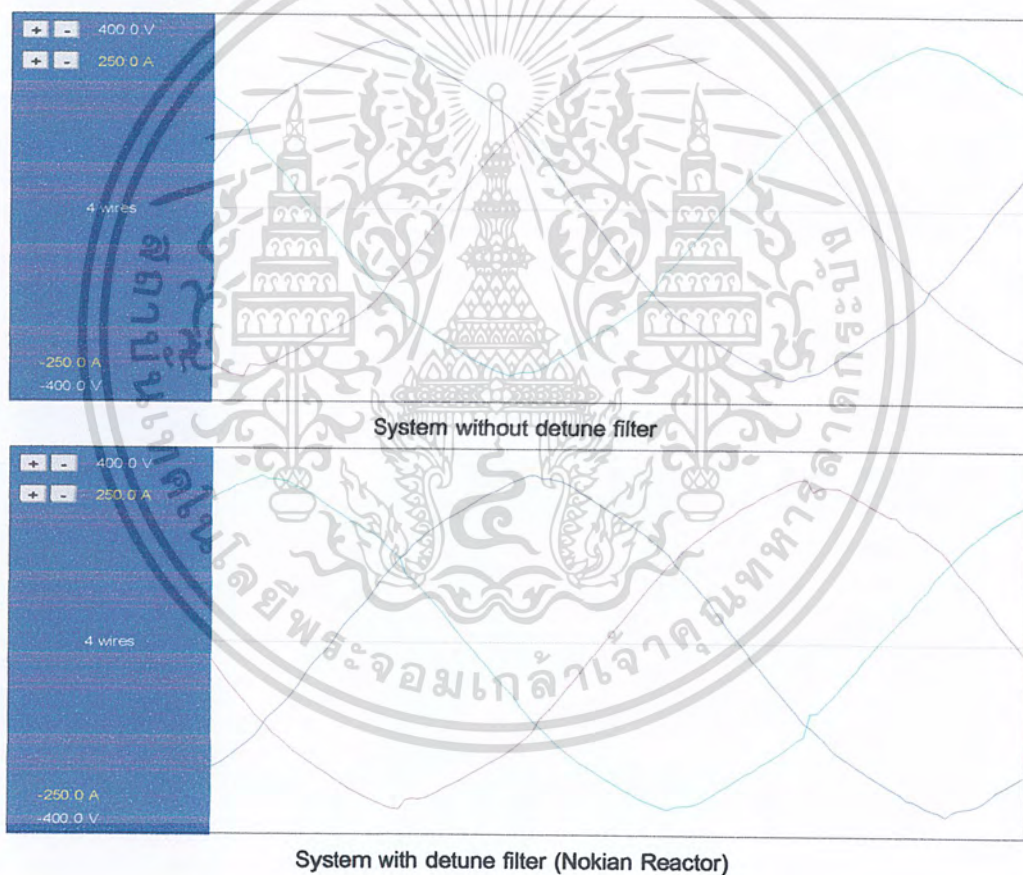
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบการติดตั้งวงจรดีจูนฟิลเตอร์

| การบันทึกผล | %THD _v (%) | | | %THD _i (%) | | |
|--|-----------------------|------|------|-----------------------|-------|-------|
| | Ø A | Ø B | Ø C | Ø A | Ø B | Ø C |
| ก่อนการติดตั้งวงจรดีจูนฟิลเตอร์ | 2.87 | 2.64 | 3.17 | 88.05 | 85.00 | 83.93 |
| หลังการติดตั้งวงจรดีจูนฟิลเตอร์ (Reactor ต้นแบบ) | 2.43 | 2.42 | 2.76 | 37.84 | 39.18 | 44.08 |

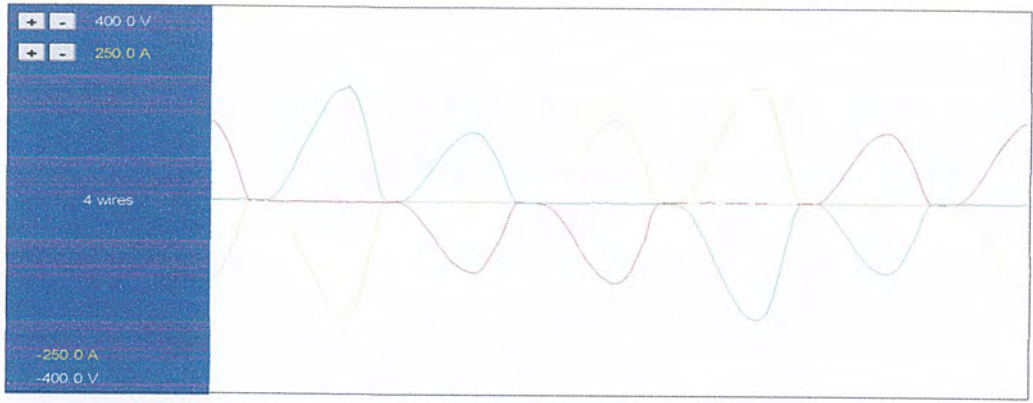
จากผลการเปรียบเทียบ จะเห็นว่าหลังการติดตั้งวงจรดีจูนฟิลเตอร์ที่ใช้รีแอคเตอร์ต้นแบบ รูปคลื่นกระแสและแรงดันเป็นรูปไซน์มากขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงการกรองฮาร์โมนิกส์ในเฟส A ค่า %THD_v จะลดลง 15.33% และค่า %THD_i จะลดลง 57.02%

4.4.2 การเปรียบเทียบวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์ ก่อนและหลังการติดตั้ง โดยใช้รีแอคเตอร์ Nokian (Nokian Capacitor)



รูปที่ 4.28 รูปคลื่นแรงดันทั้ง 3 เฟสของระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



System without detune filter

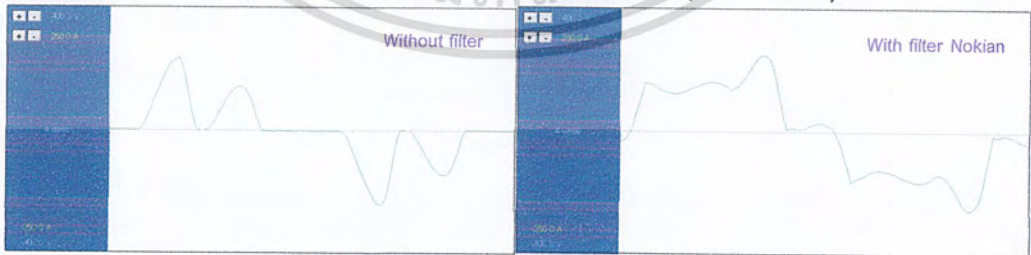


System with detune filter (Nokian Reactor)

รูปที่ 4.29 รูปคลื่นกระแส ทัง 3 เฟสของระบบไฟฟ้า



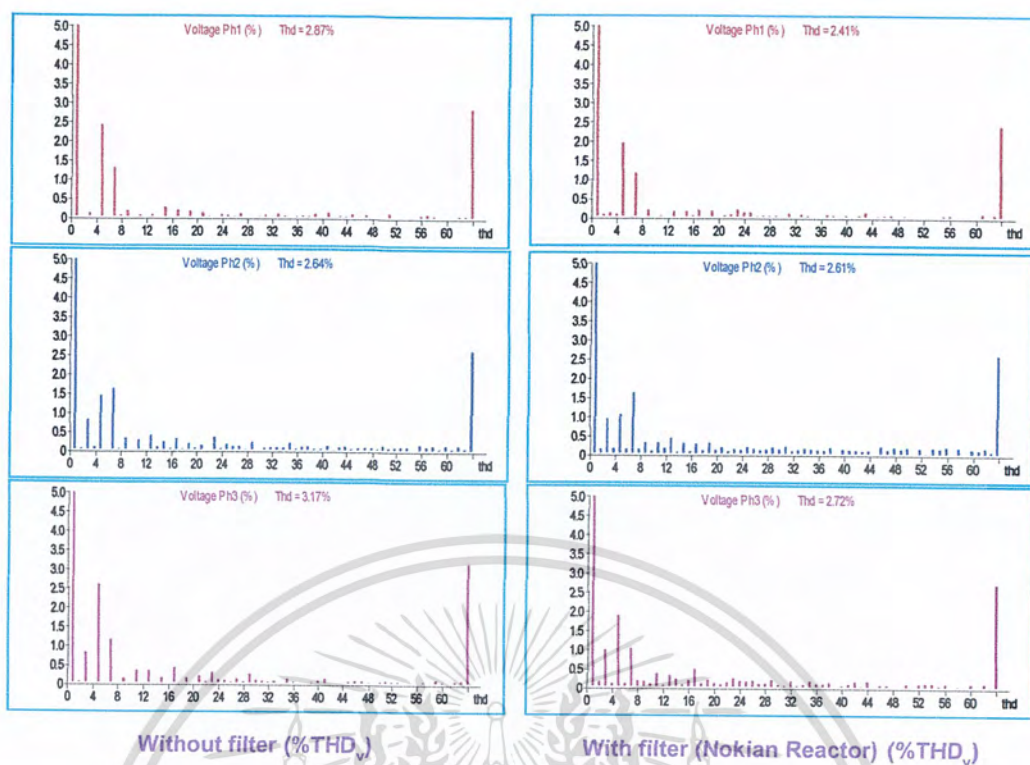
Voltage system without detune filter & with detune filter (Nokian Reactor)



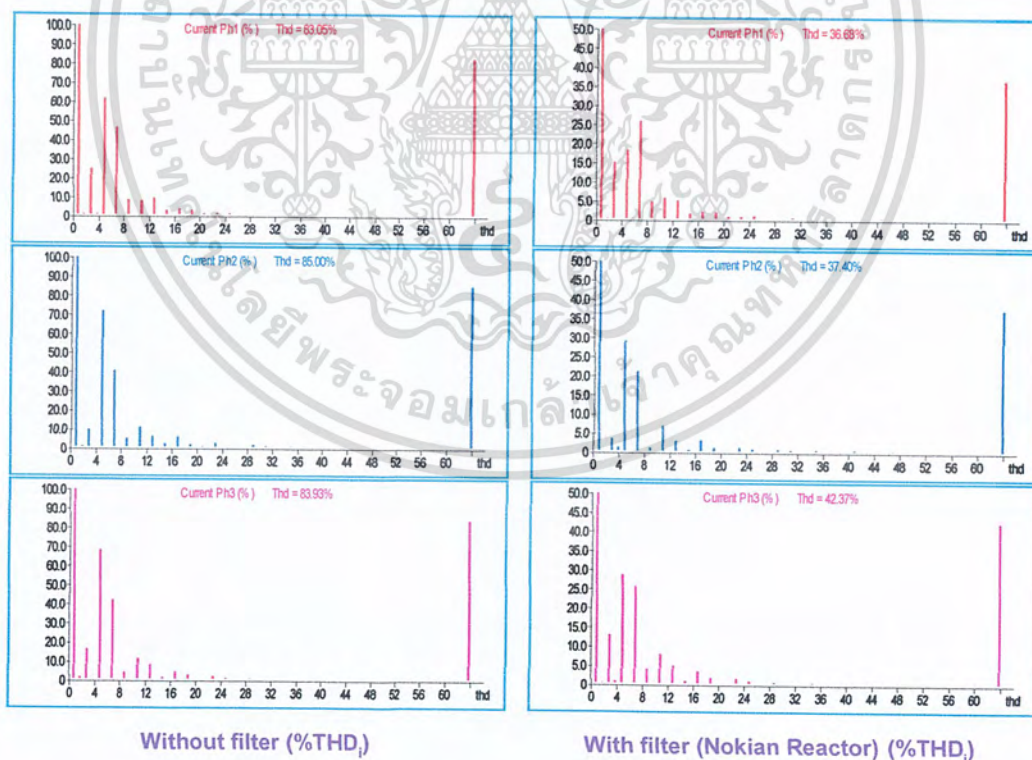
Current system without detune filter & with detune filter (Nokian Reactor)

รูปที่ 4.30 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสเฟส A ของระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

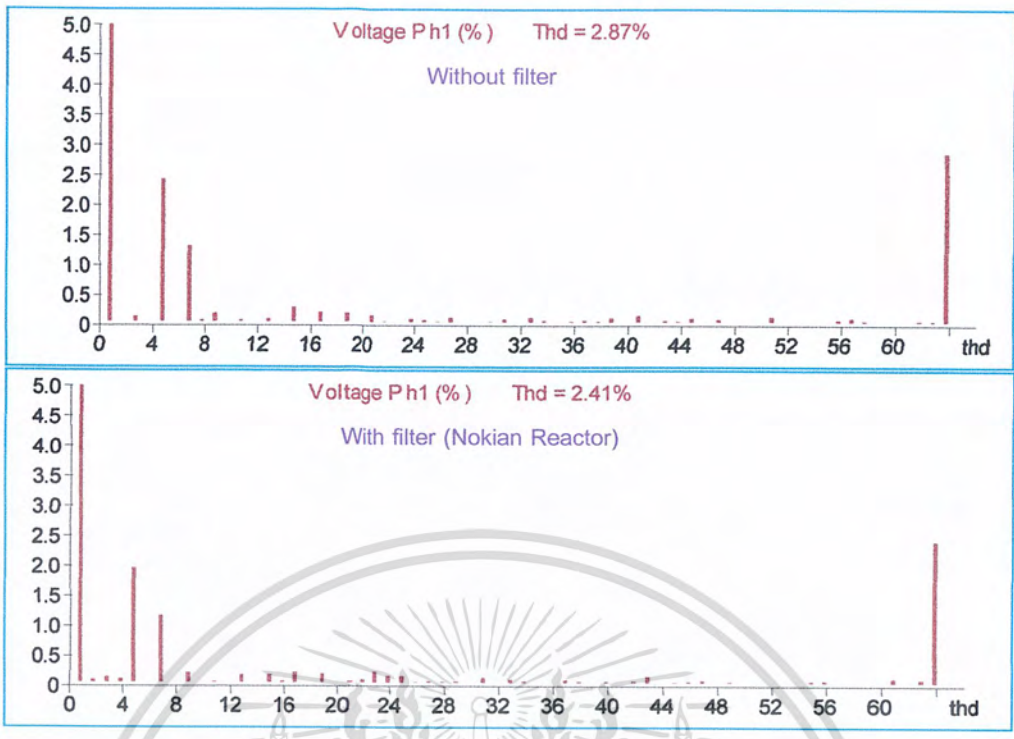


รูปที่ 4.31 สเปกตรัมของแรงดันก่อนและหลังการติดตั้งวงจรฟิลเตอร์

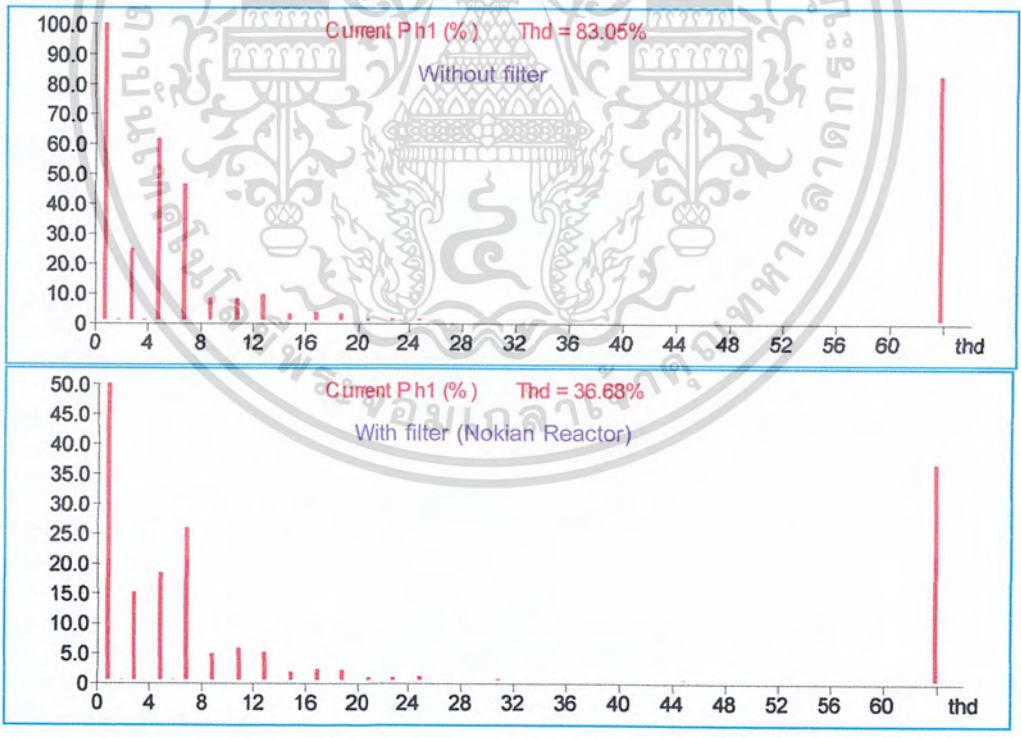


รูปที่ 4.32 สเปกตรัมของกระแสก่อนและหลังการติดตั้งวงจรฟิลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 สเปกตรัมของแรงดันเฟส A ก่อนและหลังการติดตั้งวงจรตัวกรอง



รูปที่ 4.34 สเปกตรัมของกระแสเฟส A ก่อนและหลังการติดตั้งวงจรตัวกรอง

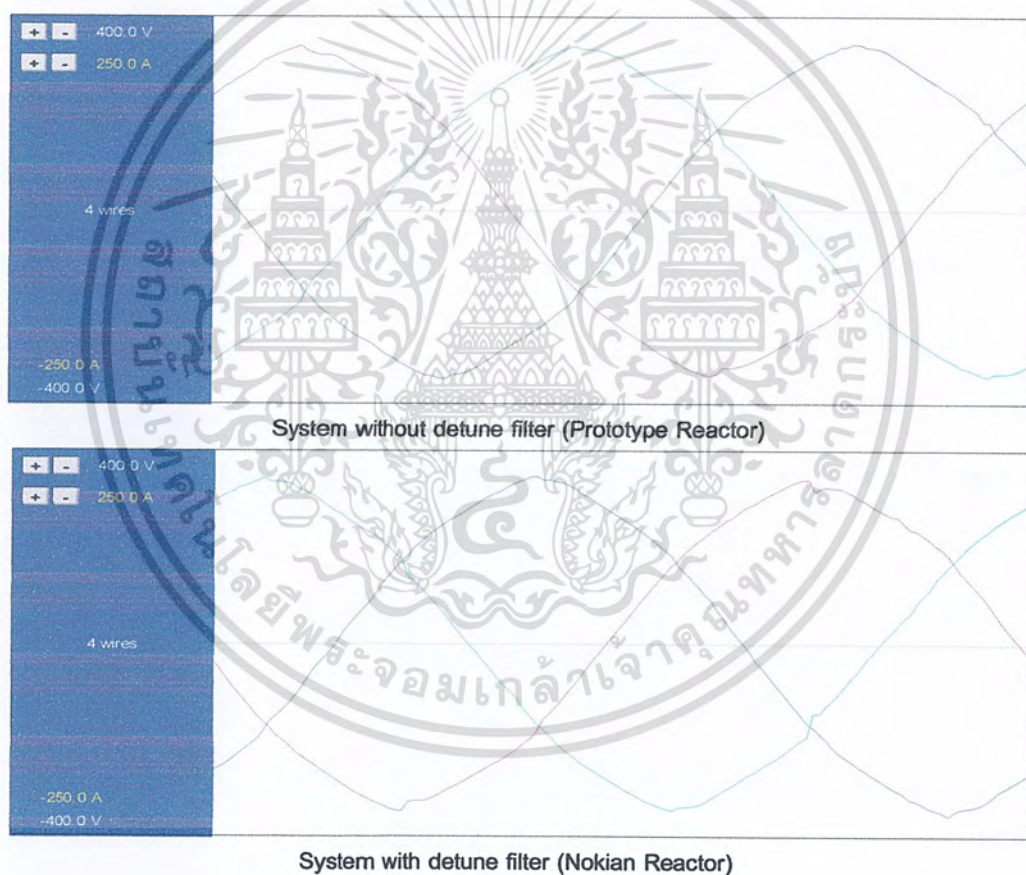
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบการติดตั้งวงจรฟิลเตอร์

| การบันทึกผล | %THD _v (%) | | | %THD _i (%) | | |
|---|-----------------------|------|------|-----------------------|-------|-------|
| | Ø A | Ø B | Ø C | Ø A | Ø B | Ø C |
| ก่อนการติดตั้งวงจรฟิลเตอร์ | 2.87 | 2.64 | 3.17 | 88.05 | 85.00 | 83.93 |
| หลังการติดตั้งวงจรฟิลเตอร์ (Nokian Reactor) | 2.41 | 2.61 | 2.72 | 36.68 | 37.40 | 42.37 |

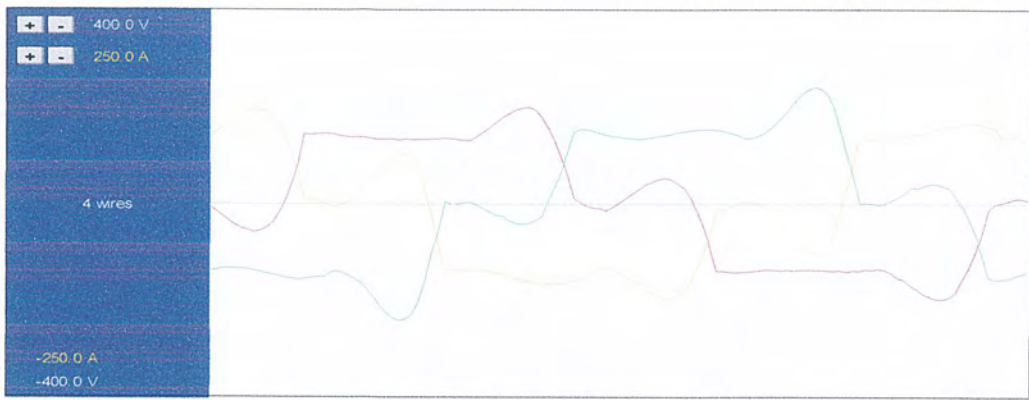
จากผลการเปรียบเทียบ จะเห็นว่าหลังการติดตั้งวงจรฟิลเตอร์ที่ใช้รีแอคเตอร์ Nokian (Nokian Capacitor) รูปคลื่นกระแสและแรงดันเป็นรูปไซน์มากขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงการกรองฮาร์โมนิกส์ในเฟส A ค่า %THD_v จะลดลง 16.03% และค่า %THD_i จะลดลง 58.34%

4.4.3 การเปรียบเทียบวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์ ระหว่างรีแอคเตอร์ต้นแบบ กับรีแอคเตอร์ Nokian (Nokian Capacitor)



รูปที่ 4.35 รูปคลื่นแรงดัน ทั้ง 3 เฟสของระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



System with detune filter (Prototype Reactor)

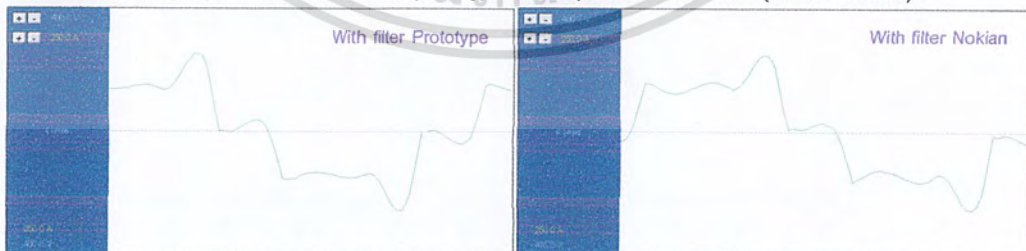


System with detune filter (Nokian Reactor)

รูปที่ 4.36 รูปคลื่นกระแส ทั้ง 3 เฟสของระบบไฟฟ้า



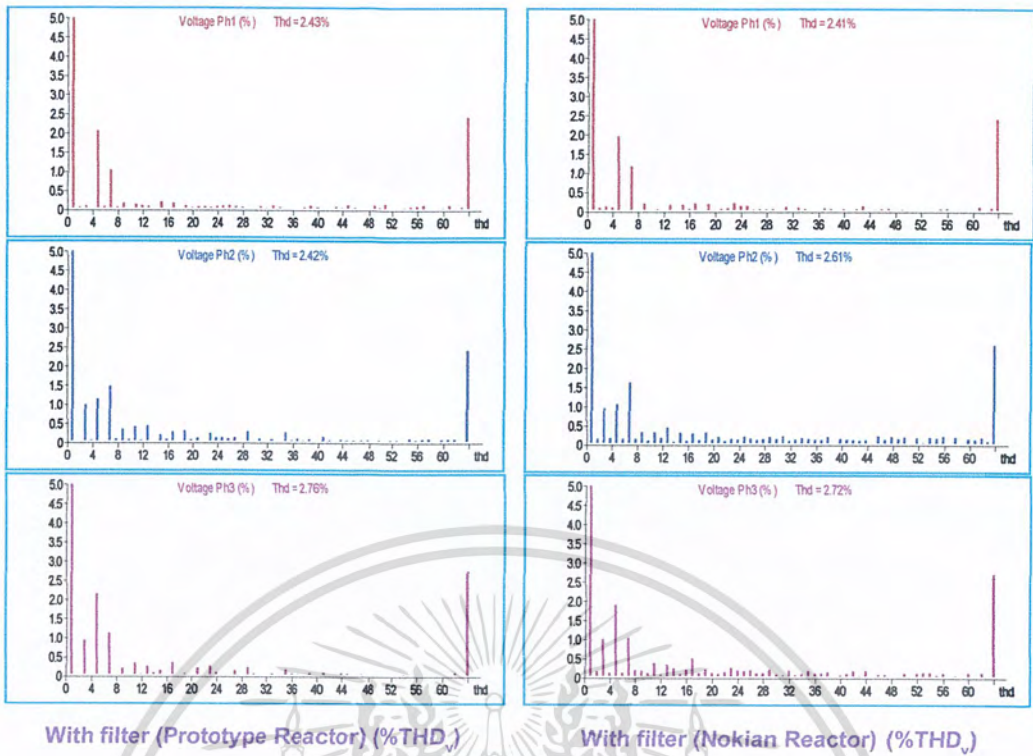
Voltage system with detune filter (Prototype Reactor) & with detune filter (Nokian Reactor)



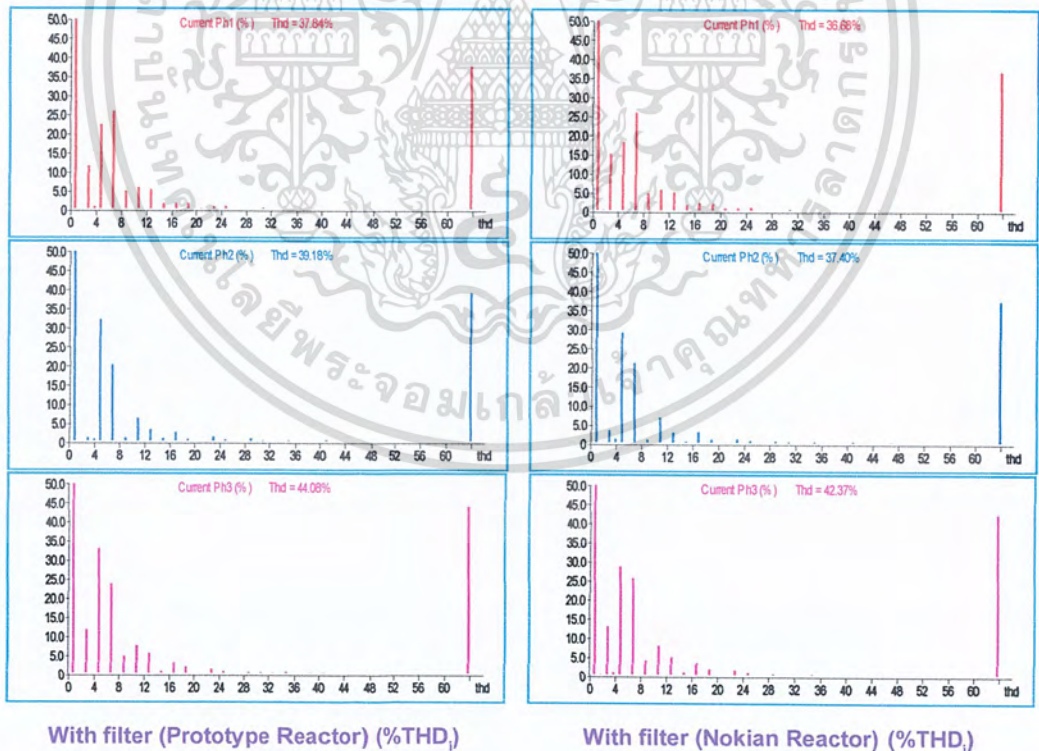
Current system with detune filter (Prototype Reactor) & with detune filter (Nokian Reactor)

รูปที่ 4.37 รูปคลื่นแรงดัน และกระแสเฟส A ของระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

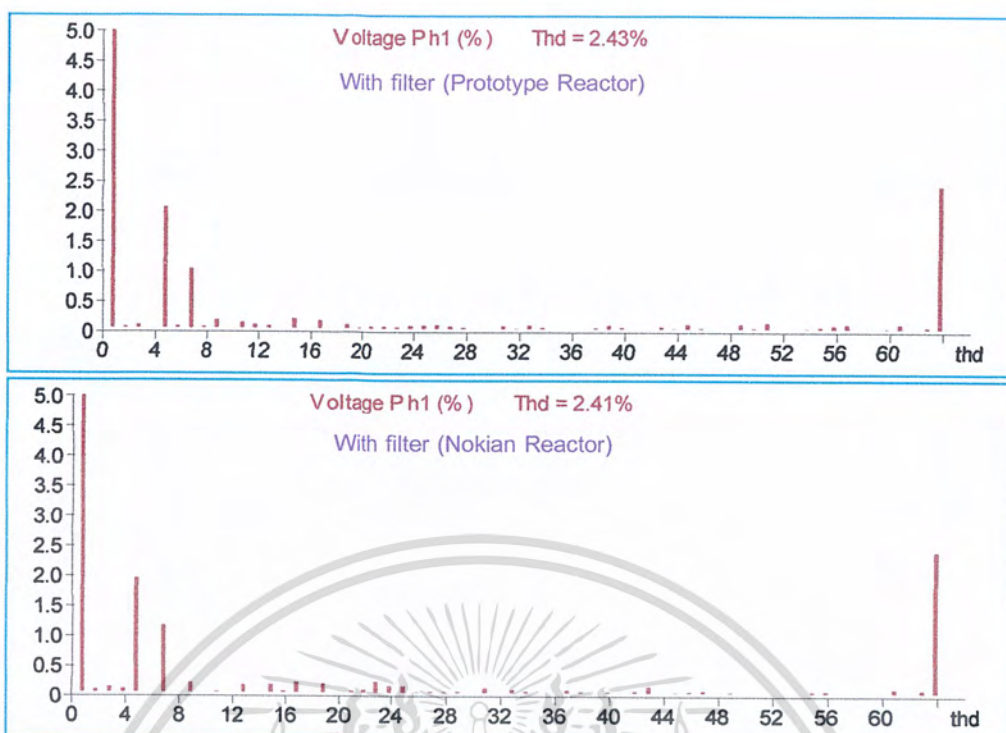


รูปที่ 4.38 สเปกตรัมของแรงดันระหว่างรีแอกเตอร์ต้นแบบ กับรีแอกเตอร์ของ Nokia

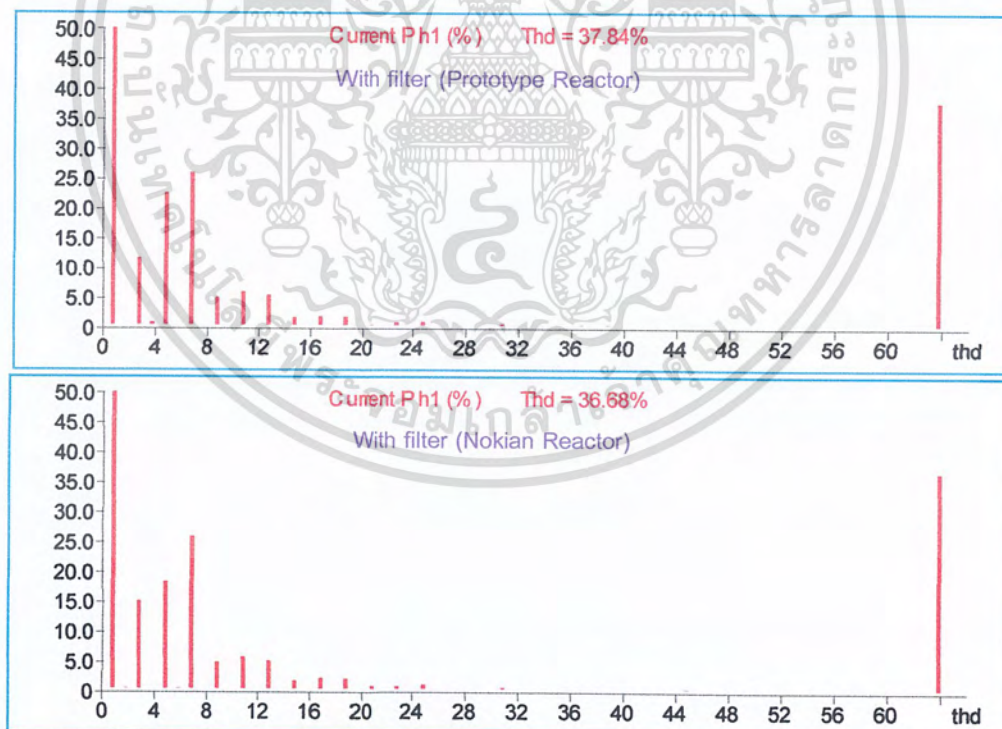


รูปที่ 4.39 สเปกตรัมของกระแสระหว่างรีแอกเตอร์ต้นแบบ กับรีแอกเตอร์ Nokia

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 สเปกตรัมของแรงดันเฟส A ระหว่างรีแอกเตอร์ต้นแบบ กับรีแอกเตอร์ Nokian



รูปที่ 4.41 สเปกตรัมของกระแสเฟส A ระหว่างรีแอกเตอร์ต้นแบบ กับรีแอกเตอร์ Nokian

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ผลการเปรียบเทียบการติดตั้งวงจรถัดจูนฟิลเตอร์

| การบันทึกผล | %THD _v (%) | | | %THD _i (%) | | |
|---|-----------------------|------|------|-----------------------|-------|-------|
| | Ø A | Ø B | Ø C | Ø A | Ø B | Ø C |
| การติดตั้งวงจรถัดจูนฟิลเตอร์ (Reactor ต้นแบบ) | 2.43 | 2.42 | 2.76 | 37.84 | 39.18 | 44.08 |
| การติดตั้งวงจรถัดจูนฟิลเตอร์ (Nokian Reactor) | 2.41 | 2.61 | 2.72 | 36.68 | 37.40 | 42.37 |

จากผลการเปรียบเทียบ จะเห็นว่าการติดตั้งวงจรถัดจูนฟิลเตอร์ ที่ใช้รีแอคเตอร์ต้นแบบกับการติดตั้งวงจรถัดจูนฟิลเตอร์ ที่ใช้รีแอคเตอร์ Nokian (Nokian Capacitor) มีลักษณะของรูปคลื่นกระแส แรงดัน และสเปคตรัมใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาถึงค่าความแตกต่างสำหรับการกรองฮาร์โมนิกสีนเฟส A ค่า %THD_v จะแตกต่างกัน 0.82% และค่า %THD_i จะแตกต่างกัน 3.07%

4.5 สรุป

จากผลการเปรียบเทียบการติดตั้งวงจรถัดจูนฟิลเตอร์ ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.11 ผลการเปรียบเทียบก่อนและหลังการติดตั้งวงจรถัดจูนฟิลเตอร์

| การบันทึกผล | %THD _v (%) | | | %THD _i (%) | | |
|--|-----------------------|------|------|-----------------------|-------|-------|
| | Ø A | Ø B | Ø C | Ø A | Ø B | Ø C |
| ก่อนการติดตั้งวงจรถัดจูนฟิลเตอร์ | 2.87 | 2.64 | 3.17 | 88.05 | 85.00 | 83.93 |
| หลังการติดตั้งจูนฟิลเตอร์ (Reactor ต้นแบบ) | 2.43 | 2.42 | 2.76 | 37.84 | 39.18 | 44.08 |
| หลังการติดตั้งจูนฟิลเตอร์ (Nokian Reactor) | 2.41 | 2.61 | 2.72 | 36.68 | 37.40 | 42.37 |

จากผลการติดตั้งวงจรถัดจูนฟิลเตอร์ จะเห็นว่าการติดตั้งวงจรถัดจูนฟิลเตอร์ที่ใช้รีแอคเตอร์ต้นแบบ สามารถติดตั้งและใช้งานได้จริงกับระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม และจากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่าวงจรถัดจูนฟิลเตอร์ที่ใช้รีแอคเตอร์ต้นแบบ มีความสามารถในการทดทอนกระแสฮาร์โมนิกส์ได้เท่าเทียมกับ วงจรถัดจูนฟิลเตอร์ที่ใช้รีแอคเตอร์ Nokian (Nokian Capacitor)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ปริญญาโทพนธ์นี้ ได้นำเสนอวิธีการออกแบบรีแอกเตอร์หรือตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็ก 3 เฟส ซึ่งเป็นการนำเอาคุณลักษณะเฉพาะของรีแอกเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาทางคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม รีแอกเตอร์ที่ออกแบบได้จะนำไปใช้งานเป็นวงจรดีจูนฟิลเตอร์ ซึ่งวงจรสามารถแก้ปัญหาที่เกิดจากสัญญาณฮาร์มอนิกส์ ทำให้คาปาซิเตอร์ในระบบทำงานได้โดยไม่เสียหายเนื่องจากการเกิดรีโซแนนซ์ระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้ากับคาปาซิเตอร์และยังรักษาค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้เข้าใกล้ 1 เพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าให้น้อยลงรวมทั้งยังสามารถป้องกันการตัดตอนทางด้านแรงดันต่ำของ ACB (Air circuit breaker) ที่เกิดจากการขยายตัวของกระแสฮาร์มอนิกส์ ส่งผลให้กระบวนการผลิตในทางอุตสาหกรรมสามารถดำเนินต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลการทดสอบรีแอกเตอร์

จากการทดสอบรีแอกเตอร์ในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาค่าความเหนี่ยวนำ และพิกัดกระแสของรีแอกเตอร์ สารณสรุปผลได้ตามตารางดังนี้

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบรีแอกเตอร์

| Phase | V (V) | I (A) | L (mH) | Error (%) |
|--------|-------|-------|--------|-----------|
| A | 20.0 | 79.51 | 0.801 | 2.43 |
| B | 19.7 | 77.12 | 0.813 | 3.96 |
| C | 19.7 | 78.52 | 0.799 | 2.17 |
| เฉลี่ย | 19.8 | 78.38 | 0.804 | 2.81 |

จากผลการทดสอบพบว่ารีแอกเตอร์สามารถรับกระแสที่พิกัดได้คือ 75 แอมแปร์ และค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) เฉลี่ยแล้วเท่ากับ 0.804 mH ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าความเหนี่ยวนำอยู่ในช่วงของมาตรฐานที่กำหนดไว้คือ -3% ถึง +3% จะเห็นได้ว่าต้นแบบรีแอกเตอร์ที่สร้างขึ้น มีพิกัดกระแสและค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด

5.1.2 ผลการทดสอบวงจรรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์

จากการทดสอบวงจรรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์ โดยใช้รีแอคเตอร์ต้นแบบ และดีจูนฟิลเตอร์ที่ใช้รีแอคเตอร์ Nokian (Nokian Capacitor) สารกึ่งตัวนำผลได้ตามตารางดังนี้

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบวงจรรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์

| การบันทึกผล | %THD _v (%) | | | %THD _i (%) | | |
|---|-----------------------|------|------|-----------------------|-------|-------|
| | Ø A | Ø B | Ø C | Ø A | Ø B | Ø C |
| ก่อนการติดตั้งวงจรรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์ | 2.87 | 2.64 | 3.17 | 88.05 | 85.00 | 83.93 |
| หลังการติดตั้งดีจูนฟิลเตอร์ (Reactor ต้นแบบ) | 2.43 | 2.42 | 2.76 | 37.84 | 39.18 | 44.08 |
| หลังการติดตั้งดีจูนฟิลเตอร์ (Nokian Reactor) | 2.41 | 2.61 | 2.72 | 36.68 | 37.40 | 42.37 |

จากผลการทดสอบ จะเห็นว่าหลังการติดตั้งวงจรรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์ที่ใช้รีแอคเตอร์ต้นแบบ การกรองฮาร์โมนิกส์ในเฟส A ค่า %THD_v จะลดลง 15.33% และค่า %THD_i จะลดลง 57.02% และวงจรรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์ที่ใช้รีแอคเตอร์ Nokian (Nokian Capacitor) การกรองฮาร์โมนิกส์ในเฟส A ค่า %THD_v จะลดลง 16.03% และค่า %THD_i จะลดลง 58.34% ซึ่งเมื่อนำผลของการติดตั้งวงจรรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์ที่ใช้รีแอคเตอร์ทั้ง 2 พบว่าวงจรรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์ที่ใช้รีแอคเตอร์ต้นแบบ กับการติดตั้งวงจรรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์ ที่ใช้รีแอคเตอร์ Nokian (Nokian Capacitor) มีค่าความแตกต่างสำหรับการกรองฮาร์โมนิกส์ในเฟส A ค่า %THD_v จะแตกต่างกัน 0.82% และค่า %THD_i จะแตกต่างกัน 3.07%

จากผลการติดตั้งวงจรรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์ จะเห็นว่าการติดตั้งวงจรรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์ที่ใช้รีแอคเตอร์ต้นแบบ สามารถติดตั้งและใช้งานได้จริงกับระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม และจากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่าวงจรรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์ที่ใช้รีแอคเตอร์ต้นแบบ มีความสามารถในการลดทอนกระแสฮาร์โมนิกส์ได้เท่าเทียมกับ วงจรรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์ที่ใช้รีแอคเตอร์ Nokian (Nokian Capacitor)

จากผลการทดสอบที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการเขียนโปรแกรมคำนวณการออกแบบรีแอคเตอร์ ด้วยโปรแกรม Microsoft visual basic สามารถออกแบบรีแอคเตอร์ต้นแบบได้หลายขนาดพิกัดกระแส และผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Finite Element Method Magnetics (FEMM) ให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ
2. วงจรรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์ที่ใช้รีแอคเตอร์ต้นแบบ สามารถนำไปใช้ได้จริงกับระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรม
3. วงจรรองฮาร์โมนิกส์ดีจูนฟิลเตอร์ที่ใช้รีแอคเตอร์ต้นแบบ สามารถลดทอนฮาร์โมนิกส์ ได้เท่าเทียมกับรีแอคเตอร์ของ Nokian

5.2 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

1. ในการเขียนโปรแกรมคำนวณการออกแบบรีแอกเตอร์ ควรปรับปรุงหน้าต่างทางด้านเอาร์ทูท เพื่อให้ง่ายต่อการนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการออกแบบ ไปสร้างรีแอกเตอร์
2. รีแอกเตอร์ที่ออกแบบเป็นแบบแกนเหล็กสามเฟส ควรออกแบบรีแอกเตอร์ให้มีความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก และค่าความเหนี่ยวนำเท่ากันทุกเฟส
3. รีแอกเตอร์ที่ออกแบบ ควรมีขนาด น้ำหนักและต้นทุนการผลิตลดลง ที่พิกัดกระแสเท่ากัน
4. การบันทึกผลการทดลอง และการวิเคราะห์ค่าของสัญญาณฮาร์โมนิกส์ ก่อนและหลังจากติดตั้งจอร์ตจูนฟิลเตอร์ ควรเก็บค่าในขณะที่ใช้โหลดเต็มพิกัด





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PRELIMINARY PRODUCT DATA BULLETIN

ORIENTED ELECTRICAL STEELS

SPECIFICATIONS

In terms of maximum core loss, AK Steel Oriented CARLITE® Electrical Steel specifications are determined at 1.7T at either 50 Hz or 60Hz. Induction is specified at 800 A/m. All test grading is conducted using as-sheared single sheet test samples which are tested in the direction of rolling in accordance with ASTM testing procedures. Samples are secured from each end of the coil and the higher core loss value is used for certification of conformance to product grade guarantees.

Maximum Core Loss

| Product | Grade | Thickness, mm (in.) | Assumed Density, kg/dm ³ | Resistivity, Ω-m, x10 ⁻⁸ | Maximum Core Loss, Watts per kilogram | | | | Maximum Core Loss, Watts per pound | | | | Minimum Induction at 800 A/m, T |
|----------|-------|------------------------|--|---|--|------|------|------|---------------------------------------|-------|------|-------|---------------------------------------|
| | | | | | 50 Hz | | 60Hz | | 50 Hz | | 60Hz | | |
| Oriented | M-3 | 0.23 (.009) | 7.65 | 50 | 1.5T | 1.7T | 1.5T | 1.7T | 1.5T | 1.7T | 1.5T | 1.7T | 1.80 |
| | M-4 | 0.27 (.011) | | | --- | 1.10 | --- | 1.41 | --- | 0.500 | --- | 0.640 | 1.79 |
| | M-5 | 0.30 (.012) | | | --- | 1.20 | --- | 1.55 | --- | 0.545 | --- | 0.710 | 1.78 |
| | M-6 | 0.35 (.014) | | | --- | 1.40 | --- | 1.82 | --- | 0.635 | --- | 0.830 | 1.78 |
| | | | | | --- | 1.55 | --- | 2.04 | --- | 0.710 | --- | 0.920 | 1.78 |

Typical Core Loss

| Product | Grade | Thickness, mm (in.) | Assumed Density, kg/dm ³ | Resistivity, Ω-m, x10 ⁻⁸ | Typical Core Loss, Watts per kilogram | | | | Typical Core Loss, Watts per pound | | | | Typical Induction at 800 A/m, T |
|----------|-------|------------------------|--|---|--|------|------|------|---------------------------------------|-------|-------|-------|---------------------------------------|
| | | | | | 50 Hz | | 60Hz | | 50 Hz | | 60Hz | | |
| Oriented | M-3 | 0.23 (.009) | 7.65 | 50 | 0.68 | 1.02 | 0.88 | 1.32 | 0.309 | 0.461 | 0.400 | 0.600 | 1.84 |
| | M-4 | 0.27 (.011) | | | 0.77 | 1.15 | 1.01 | 1.48 | 0.349 | 0.520 | 0.460 | 0.670 | 1.84 |
| | M-5 | 0.30 (.012) | | | 0.89 | 1.28 | 1.17 | 1.65 | 0.404 | 0.581 | 0.530 | 0.750 | 1.83 |
| | M-6 | 0.35 (.014) | | | 0.98 | 1.42 | 1.30 | 1.85 | 0.445 | 0.644 | 0.590 | 0.840 | 1.83 |

The core loss and exciting power of the AK Steel Oriented Electrical Steel grades are determined by magnetic tests performed in accordance with general procedures approved by the American Society for Testing and Materials.

The following conditions apply:

- Single sheet specimens
 - Sheared parallel to the rolling direction of the steel from fully processed coils
 - Tested as-sheared per ASTM A 804
- Density of all grades — 7.65 gm/cm³ per ASTM A 34

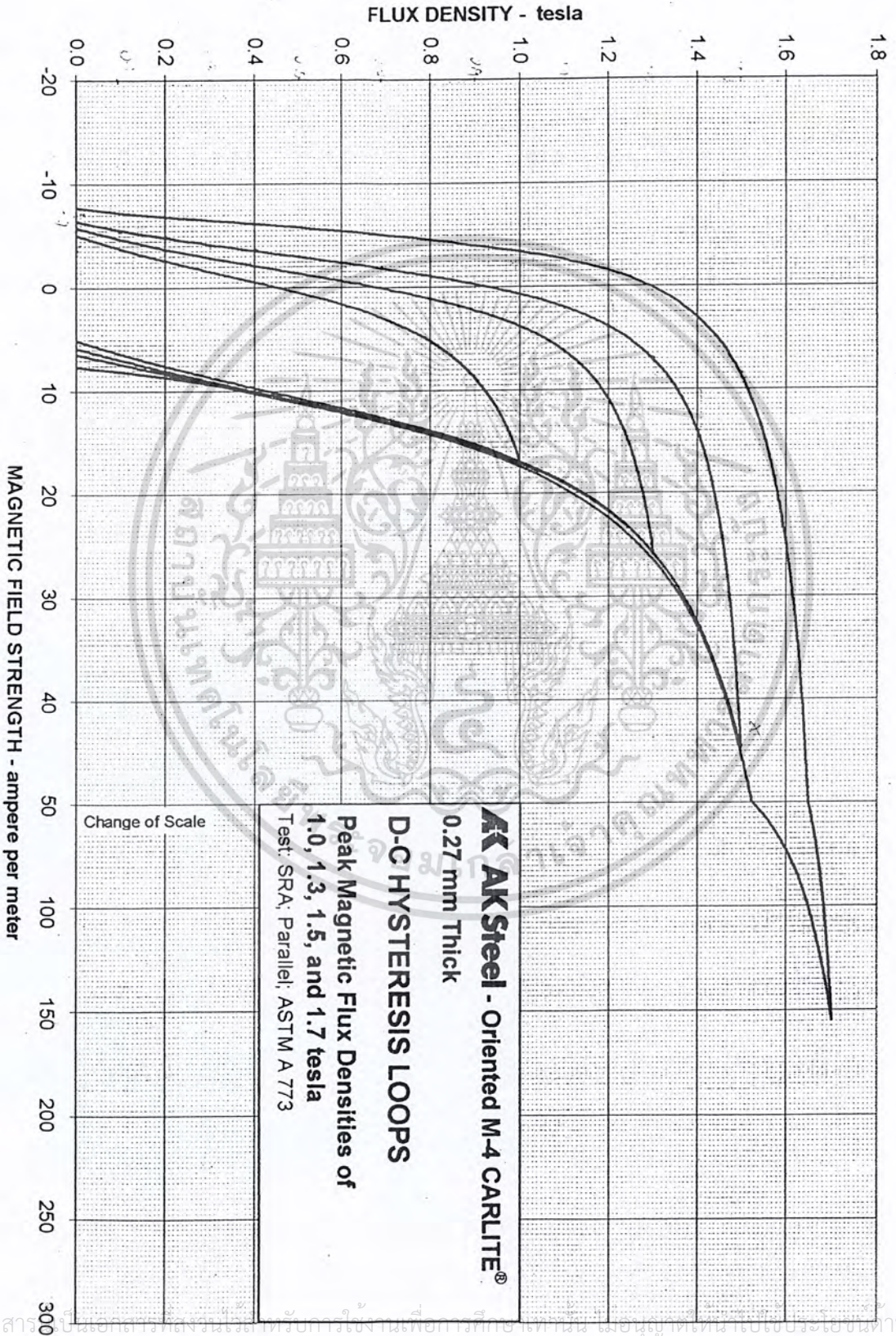
ASTM A 664 is a grade identification system for electrical steels. While this system has not been widely adopted by the manufacturers and consumers of electrical steels, it is used in ASTM A 876 to designate various grades of grain oriented electrical steel. The following is a listing of the corresponding AK Steel and ASTM grades:

AK Steel grade M-3 is approximately equivalent to ASTM Core Loss Types 23G045 and 23H070

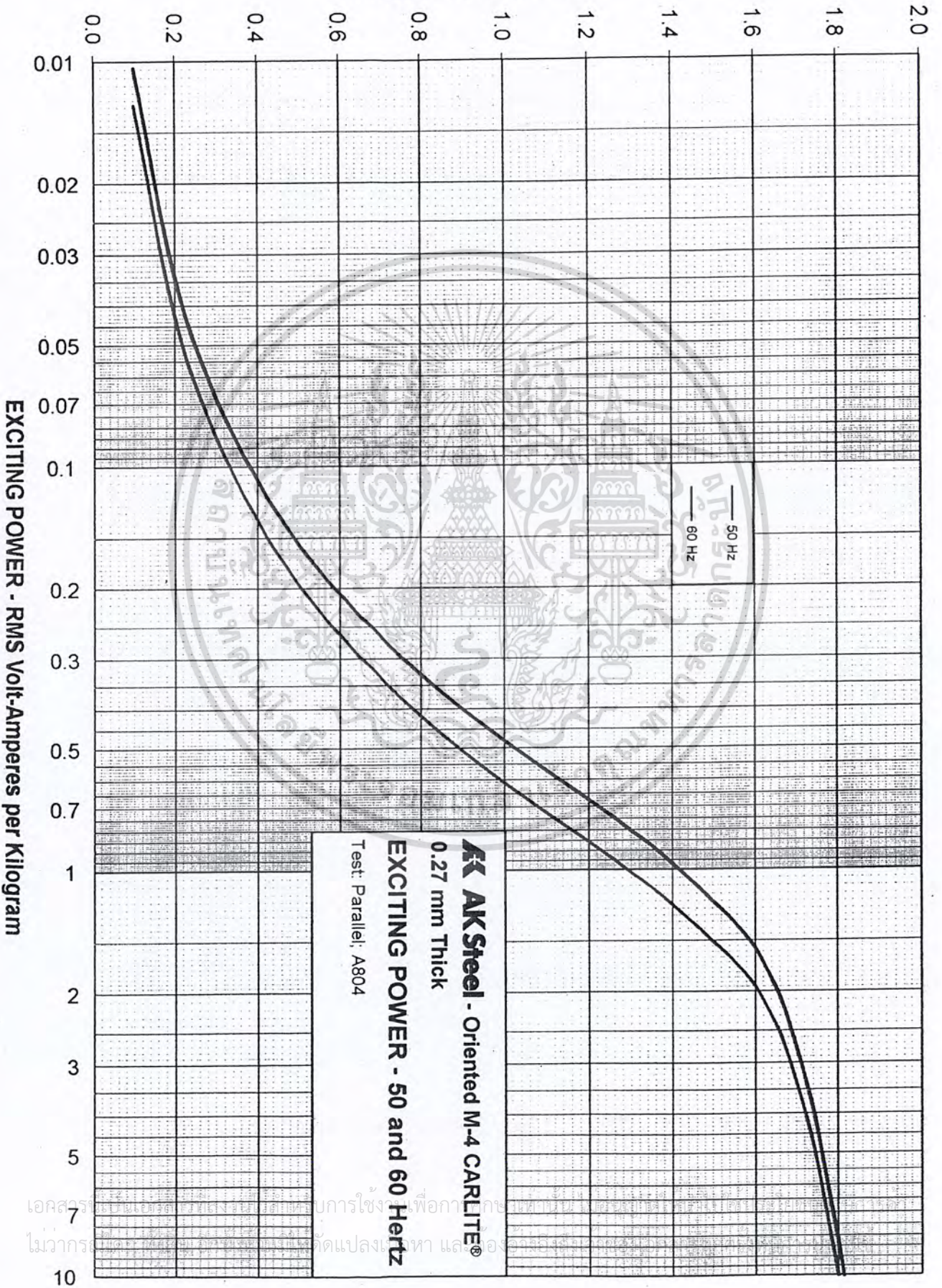
AK Steel grade M-4 is approximately equivalent to ASTM Core Loss Types 27G051 and 27H074

AK Steel grade M-5 is approximately equivalent to ASTM Core Loss Types 30G058 and 30H083

AK Steel grade M-6 is approximately equivalent to ASTM Core Loss Types 35G066 and 35H094

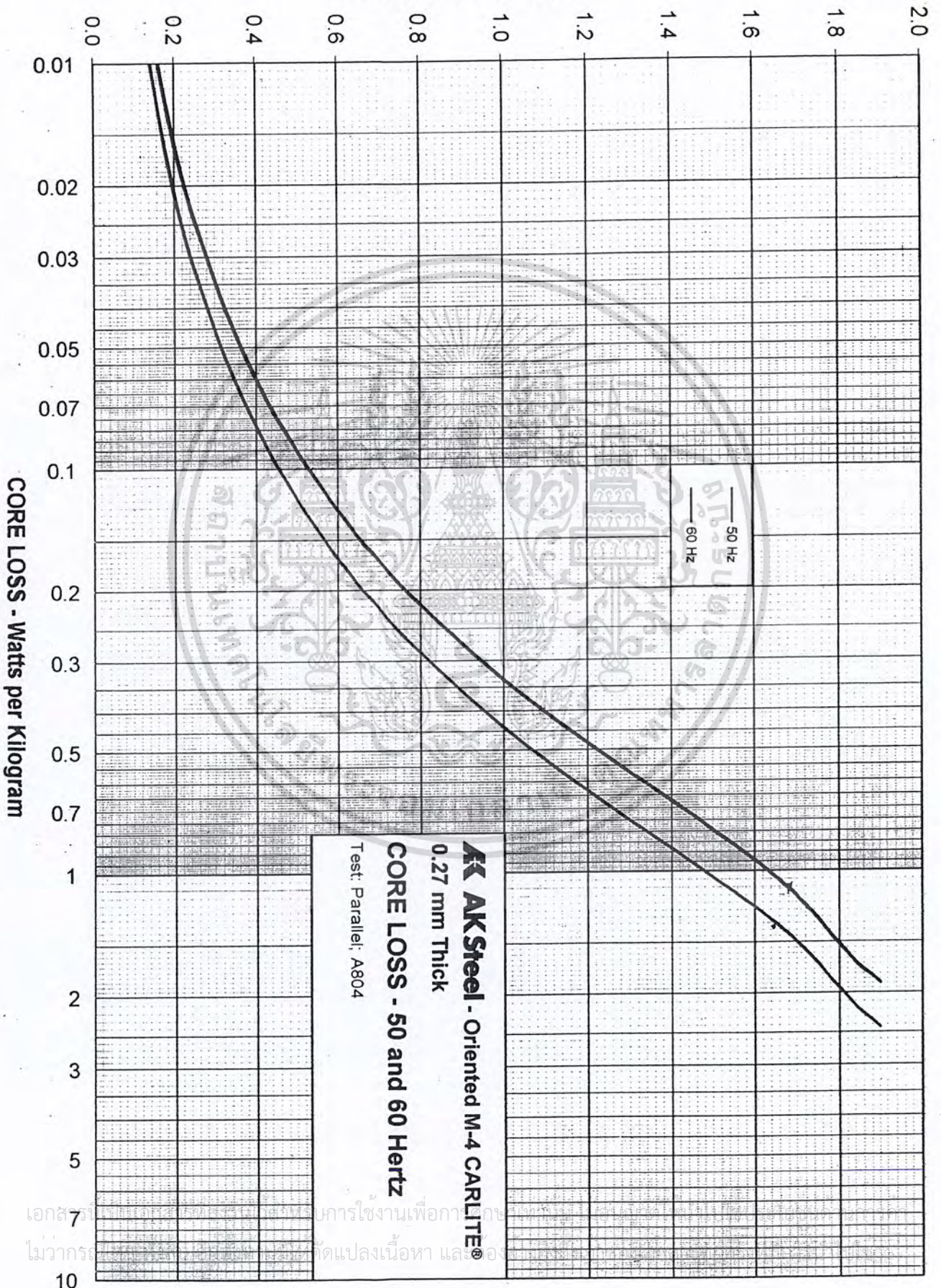


FLUX DENSITY - Tesla



EXCITING POWER - RMS Volt-Amperes per Kilogram

FLUX DENSITY - Tesla



POWER THERM

color : white

POWER THERM is a KREMPEL triple-layer insulation made from polyester film with polyester non-woven overlay on both sides. When using suitable impregnating agents and for flawless impregnation in accordance with IEC 626-3, for use in insulating systems up to 155°C.
 Provisional UL file no E312152

Dimensions and formats POWER THERM

| Type | Nominal thick-ness | Toler-ance | Film thick-ness | Area weight | Tole-rance | Area utili-zation | Standard core | Standard width |
|-----------------|--------------------|------------|-----------------|------------------|------------|----------------------------|---------------|----------------|
| | mm | ±% | µm | g/m ² | ±% | approx. m ² /kg | mm | mm |
| Powertherm 0.15 | 0.15 | 15 | 50 | 140 | 12 | 7.1 | 76 | 1000 |
| Powertherm 0.20 | 0.20 | 15 | 100 | 220 | 12 | 4.5 | 76 | 1000 |
| Powertherm 0.23 | 0.23 | 15 | 125 | 250 | 12 | 4.0 | 76 | 1000 |
| Powertherm 0.30 | 0.30 | 15 | 190 | 350 | 12 | 2.9 | 76 | 1000 |
| Powertherm 0.35 | 0.35 | 10 | 250 | 425 | 12 | 2.4 | 76 | 1000 |
| Powertherm 0.45 | 0.45 | 10 | 350 | 560 | 12 | 1.8 | 76 | 1000 |

Characteristic values POWER THERM

| Type | Nominal thick-ness | Tensile strength MD min | Tensile strength CMD min | Elonga-tion MD min | Elonga-tion CMD Min | Dielectric strength min | US code |
|-------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|----------|
| | mm | N/10mm | N/10mm | % | % | kV | - |
| Powertherm 0.15 | 0.15 | 110 | 100 | 20 | 50 | 6 | 2-2-2 |
| Powertherm 0.20 | 0.20 | 160 | 150 | 20 | 50 | 11 | 2-4-2 |
| Powertherm 0.23 | 0.23 | 200 | 190 | 20 | 50 | 13 | 2-5-2 |
| Powertherm 0.30 | 0.30 | 250 | 220 | 20 | 50 | 15 | 2-7.5-2 |
| * Powertherm 0.35 | 0.35 | 300 | 300 | 20 | 50 | 18 | 2-10-2 |
| Powertherm 0.45 | 0.45 | 400 | 350 | 20 | 50 | 22 | 2-13.8-2 |

Other types of Powertherm on request.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

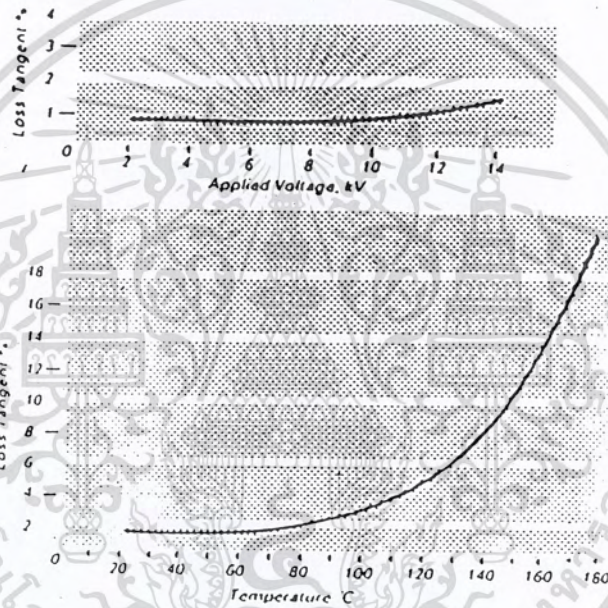
Data taken from production runs to show typical properties are not guaranteed nor to be used as specification without approval. We reserve the right to introduce changes within the framework of further technical development. We do not accept any obligations or liabilities in respect of this information. Page 2 of 2 04/2006

TYPICAL PROPERTIES

Dielectric Properties

Loss Tangent tests made on 1mm laminate cured for 16 hours at 140°C

| | | |
|---|-------|------------|
| Loss Tangent at 0.4kV per mm at 50Hz at | 20°C | 0.015 max. |
| | 155°C | 0.100 max. |
| | 180°C | 0.200 max. |
| Loss Tangent at 8.0kV per mm at 50Hz at | 20°C | 0.025 max. |



Typical loss tangent/voltage and loss tangent/temperature characteristics for an 11kV Insulated Stator Coil.

Typical Properties Continued

| | |
|---|---|
| Breakdown Stress at 50Hz at 20°C 155°C 180°C (10 sec breakdown BS method on laminates) | 43.5 kV/mm 40.0 kV/mm 39.0 kV/mm |
| Volume Resistivity* at 20°C 155°C 180°C | 2.5 x 10 ¹⁵ ohms 1.0 x 10 ¹⁵ ohms 0.8 x 10 ¹⁵ ohms |
| Permittivity at 20°C 155°C 180°C | 4.5 4.9 5.2 |
| Mechanical Properties Tensile Strength at 20°C 155°C | 200 MN/m ² 190 MN/m ² |
| Cross breaking strength* at 20°C 155°C 180°C | 250 MN/m ² 210 MN/m ² 180 MN/m ² |
| Resistance to Compression at 20°C Elastic Limit 155°C 180°C | 300 MN/m ² 200 MN/m ² 180 MN/m ² |

* Test methods in accordance with BS 2782

Physical Properties

| | |
|--------------------------------------|------------------------|
| Specific Gravity | 1.8 – 1.9 |
| Coefficient of Linear Expansion t/°C | 1.2 x 10 ⁻⁵ |
| Thermal Conductivity W/M/°C | 0.38 |

THERMAL PERFORMANCE

Novobond SX products have been evaluated to IEC 216-1 to determine their ability to operate satisfactorily at Class F (155°C) with a reasonable margin of safety to allow for overload conditions.

Figure 3 compares the thermal performance of Novobond S and SX. Novobond S has been used successfully in Class F H.V. machines with Class B temperature rises for 20 years and the graphs indicate an approximately 30°C improvement in Temperature Index (TI) for the Novobond SX to give the same reliability when Novobond SX is used in Class F H.V. machines with full Class F temperature rises.

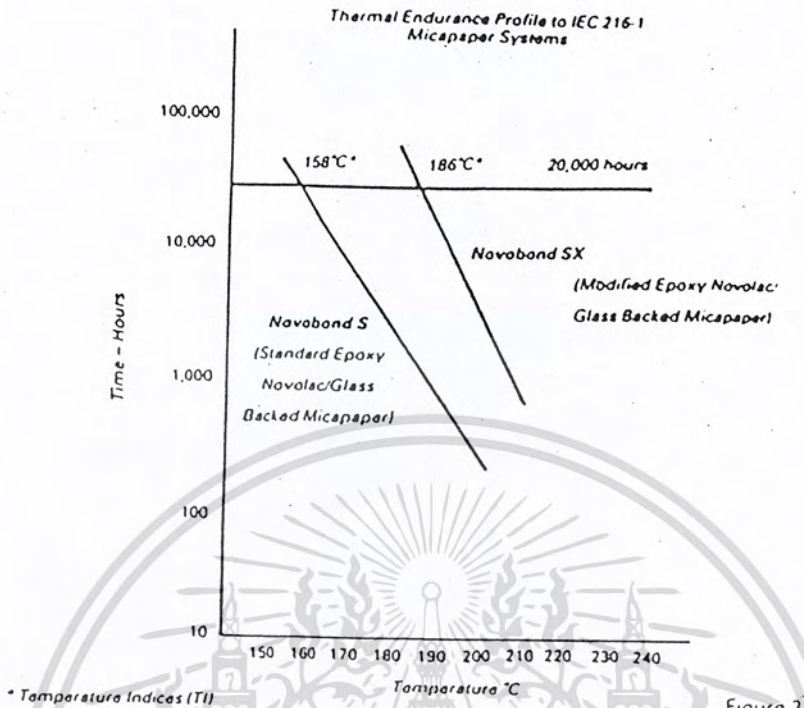


Figure 3

HANDLING PRECAUTIONS

Attention is drawn to the Material Safety Data Sheet which is available for this product. The product covered by this data sheet must not be put into use without a study of the appropriate safety precautions.

The data given is believed to be correct but it does not form a specification and may be subject to alteration without notification.

Should a supply specification be required, JSI would be pleased to agree parameters.

JSI cannot be aware of all the customer applications and processes for our products, hence, JSI make no warranty confirming the fitness or suitability of a product for any particular use.

Any proposed application of a JSI product should be tested and satisfactory performance independently confirmed.

Jones Stroud Insulations

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
Longridge, Preston PR3 3BS, United Kingdom. Tel (Int'l) +44 (0) 1772 783011 Fax (Int'l) +44 (0) 1772 784200
วารสารใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

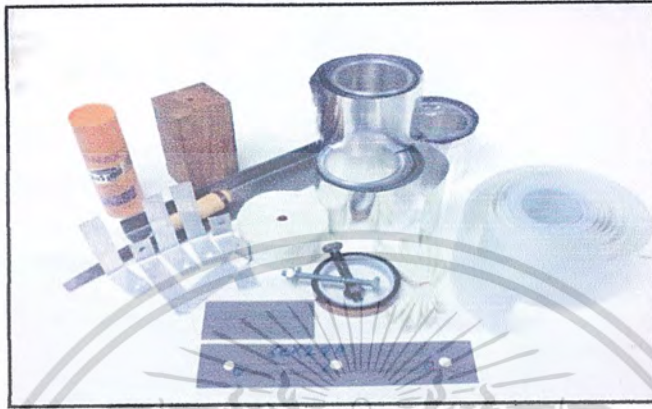


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

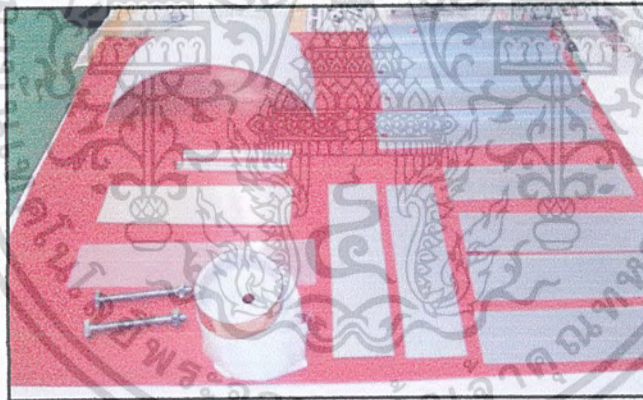
ขั้นตอนการสร้างรีแอกเตอร์

1. วัสดุอุปกรณ์

ทำการเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่จำเป็นในการสร้าง เช่น แผ่นเหล็ก M-4, อลูมิเนียมซีท, กระจาดฉนวน, ไยแก้ว, กระจุกงู, เหล็กฉาก และ อุปกรณ์ที่จำเป็นในการสร้างอื่นๆ



รูปที่ 1 อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้สร้างรีแอกเตอร์



รูปที่ 2 เหล็ก M-4 เหล็กฉาก กระจาดฉนวนและอุปกรณ์อื่นๆ

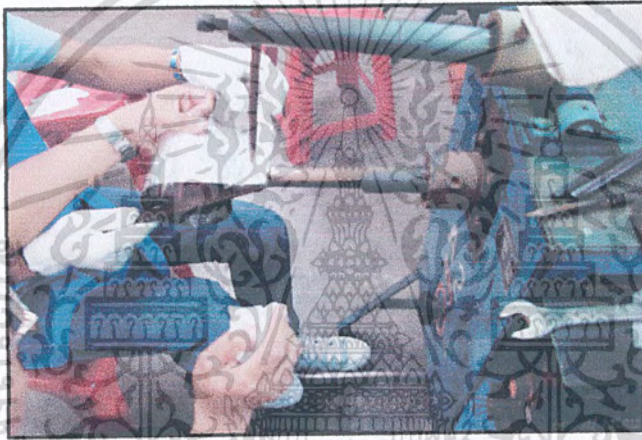
2. การพันคอยล์และการอาร์คอะลูมิเนียม

เมื่อเตรียมวัสดุอุปกรณ์ครบถ้วนแล้ว สามารถพันคอยล์ได้ โดยการนำแผ่นอลูมิเนียมและกระจาดฉนวน ที่ได้ตัดตามลักษณะที่ได้ทำการออกแบบไว้ โดยตัดให้กระจาดฉนวนมีขนาดใหญ่กว่าแผ่นอลูมิเนียมเล็กน้อยแล้วจึงนำมาประกบกัน ใส่ในบล็อกของเครื่องพันคอยล์ที่เตรียมไว้ พันจนได้จำนวนรอบที่ต้องการ จากนั้นจึงนำบัสบาร์และอลูมิเนียมไปอาร์คเพื่อให้เชื่อมติดกัน

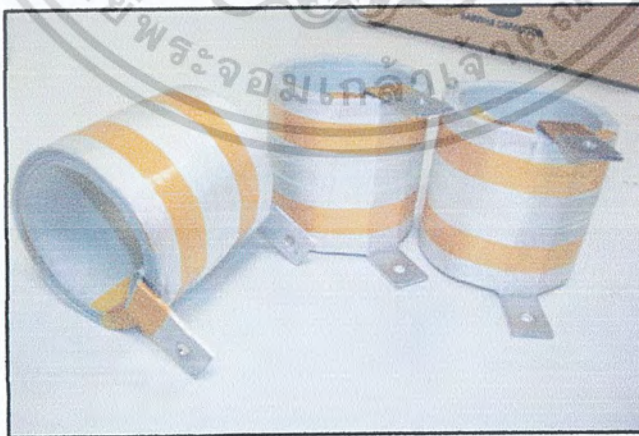
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 การพันคอยล์



รูปที่ 4 การอาร์คอะลูมิเนียม

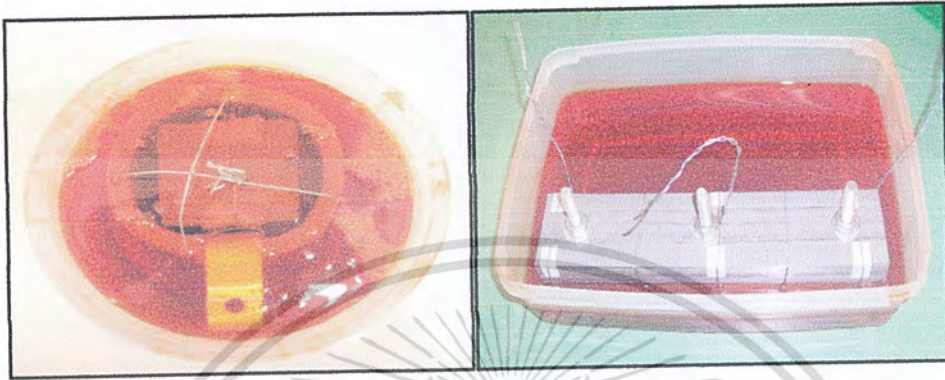


รูปที่ 5 ตัวอย่างคอยล์ที่พันเสร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การแช่น้ำยาวานิช

ขั้นตอนนี้เป็นกรนำเหล็ก M-4 ที่ได้ทำการตัดเตรียมไว้ นำมาประกอบกันที่ละแผ่นตามจำนวนที่ได้ทำการออกแบบไว้ จนได้เป็นโครงสร้างแกนเหล็กจนครบทุกอัน จากนั้นจึงนำเหล็กที่ประกอบเสร็จรวมทั้งคอยล์ที่พันเสร็จนำไปแช่วานิชจนน้ำยวานิชซึมเข้าไปด้านในจนทั่ว



รูปที่ 6 การแช่คอยล์และแกนเหล็กในน้ำยวานิช

4. การอบคอยล์และแกนเหล็ก

เมื่อแช่คอยล์และแกนเหล็กในน้ำยวานิชจนทั่วแล้ว จึงนำทั้งหมดไปอบที่ความร้อนอุณหภูมิประมาณ 50 องศา จนกว่าน้ำยวานิชจะแห้งสนิท ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนที่ทำการอบจะใช้เวลาไม่เท่ากัน จึงควรตรวจดูทุก ๆ 2-3 ชั่วโมง

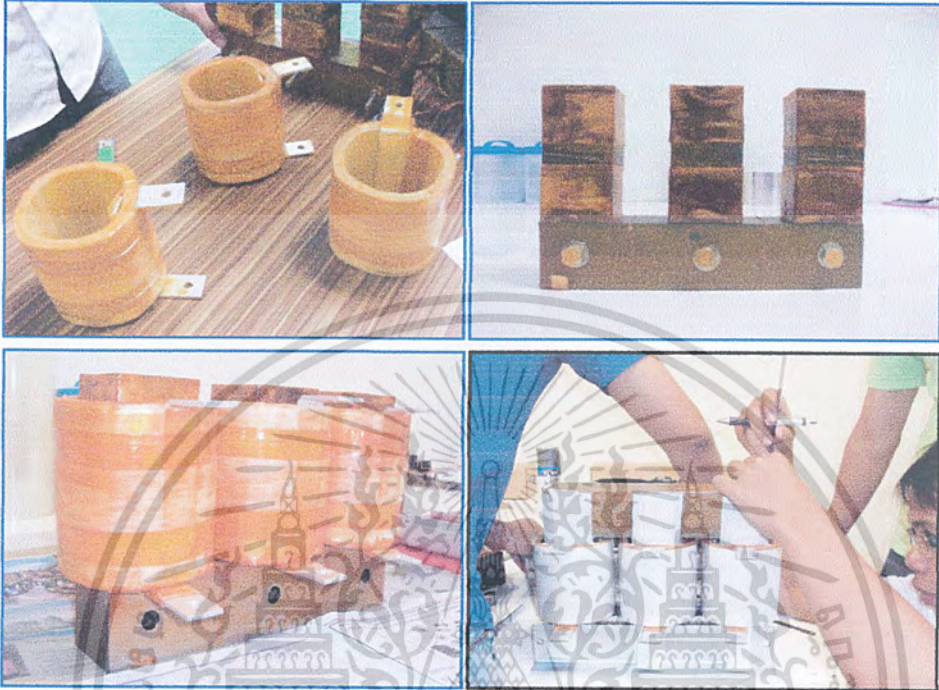


รูปที่ 7 การอบคอยล์และแกนเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การประกอบตัวรีแอกเตอร์

เมื่อทำการอบเรียงร้อยแล้ว ก็มาถึงการประกอบซึ่งต้องความชำนาญใช้ความละเอียดในการวัดระยะต่างๆ ให้ตรงกับค่าที่ได้ทำการออกแบบไว้



รูปที่ 8 การประกอบรีแอกเตอร์



รูปที่ 9 รีแอกเตอร์ที่ประกอบเสร็จ

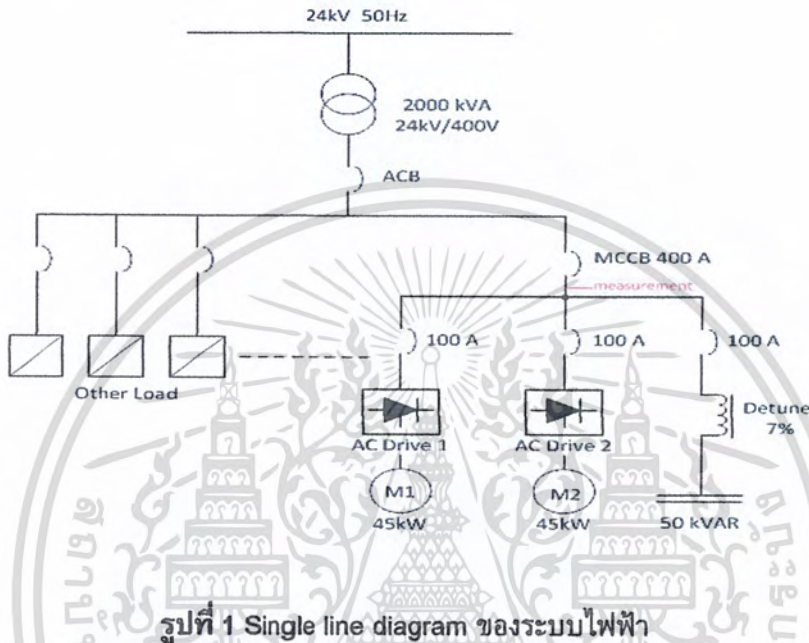
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การติดตั้งในโรงงานอุตสาหกรรม

สำหรับอุตสาหกรรมที่มีอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ตามมาตรฐานด้านแรงดันไฟฟ้าของ IEEE-519-1992 กำหนดไว้ว่า %THDv และ %THDi ควรจำกัดค่าไว้ที่ 3% และ 5-10% ตามลำดับ การติดตั้งในโรงงาน ไทยประสิทธิ์เท็กซ์ไทล์ จำกัดทำการติดตั้งกับโหลดที่มี AC Drive ขนาด 45 kW 2 ตัว ดังรูป



รูปที่ 2 การติดตั้งวงจรถัดจูนฟิลเตอร์ (Reactor ต้นแบบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 การติดตั้งวงจรตัวกรอง (Nokian Reactor)

เมื่อทำการติดตั้งเข้ากับระบบไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการเก็บข้อมูลทางไฟฟ้าและฮาร์โมนิกส์ ของระบบไฟฟ้าก่อนและหลังการติดตั้ง เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลทางคุณภาพของกำลังไฟฟ้าจากการติดตั้งวงจรตัวกรอง

การวัดฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Measuring)

การวัดฮาร์โมนิกส์ต้องอาศัยความชำนาญในการหาตำแหน่งที่ถูกต้องการวัดที่ปลอดภัยการเก็บข้อมูลให้ครบถ้วน เพื่อนำไปตีความและนำไปออกแบบวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ในที่สุด ดังนั้นข้อมูลพื้นฐานที่ต้องใช้ในการออกแบบฮาร์โมนิกส์ประกอบไปด้วย

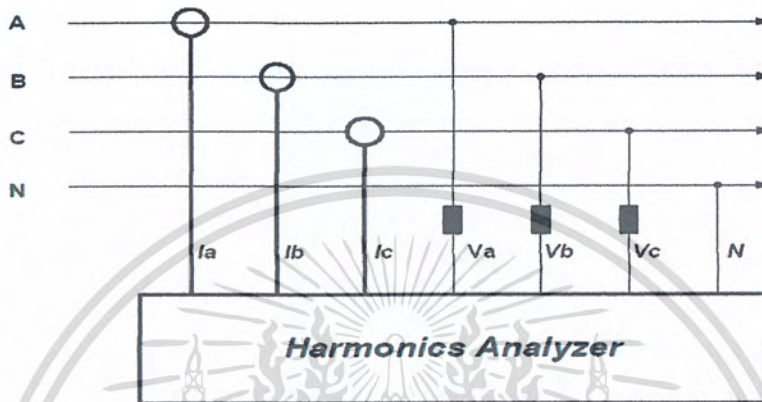
1. พิกัดแรงดันไฟฟ้า (rated voltage) พิกัดแรงดันไฟฟ้าใช้งาน (operating voltage) และเงื่อนไขทางคุณสมบัติของคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality) เช่นช่วงเวลาการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า
2. กำลังไฟฟ้รีแอกเตอร์ที่ระบบต้องการที่ความถี่ 50 Hz หรือความถี่พื้นฐาน
3. Single line diagram ของระบบไฟฟ้าและระบบเกี่ยวข้องเช่นระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าภายใน (Co-generator) ระบบรีเลย์เป็นต้น
4. รายละเอียดของภาระไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดของฮาร์โมนิกส์เช่น 6-pulse rectifier, 45 MW เป็นต้น
5. รายละเอียดของการเกิดฮาร์โมนิกส์อันดับอัมปริจูด ทั้งในทฤษฎีและการวัดจริงที่เวลาต่างๆ ซึ่งอาจจะใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมงหรือ 1 วันหรือ 7 วันขึ้นอยู่กับความชำนาญในการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ระดับของ short circuit level ของโครงข่ายระบบไฟฟ้าและช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของโครงข่ายระบบไฟฟ้า

7. ความต้องการของผู้ใช้หรือโรงงานว่าต้องการ %THD_v และ %THD_i ของฮาร์โมนิกส์ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆ

8. ความต้องการของผู้ใช้ที่จะติดระบบวงจรกรองฮาร์โมนิกส์ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าเช่น 400 V หรือ 22 kV เป็นต้น



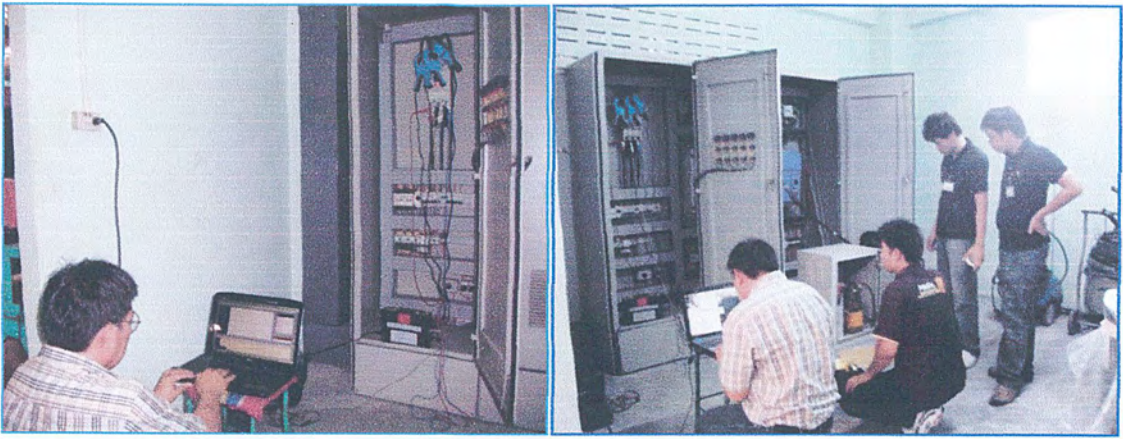
รูปที่ 4 วงจรการเชื่อมต่อเครื่องมือวัดกับระบบไฟฟ้าที่

ในรูปที่ 1 เป็นการเลือกตำแหน่งการวัดฮาร์โมนิกส์ที่ตำแหน่งหลัง MCCB 400A เพื่อตรวจสอบและบันทึกข้อมูลทางไฟฟ้าและฮาร์โมนิกส์ หลังจากนั้นนำเครื่องมือวัดฮาร์โมนิกส์มาติดตั้งในรูปที่ 4 สำหรับเครื่องมือที่นำมาวัดที่ดีที่สุดต้องใช้ชนิดที่วัดพร้อมกันทั้งสามเฟส ดังรูป



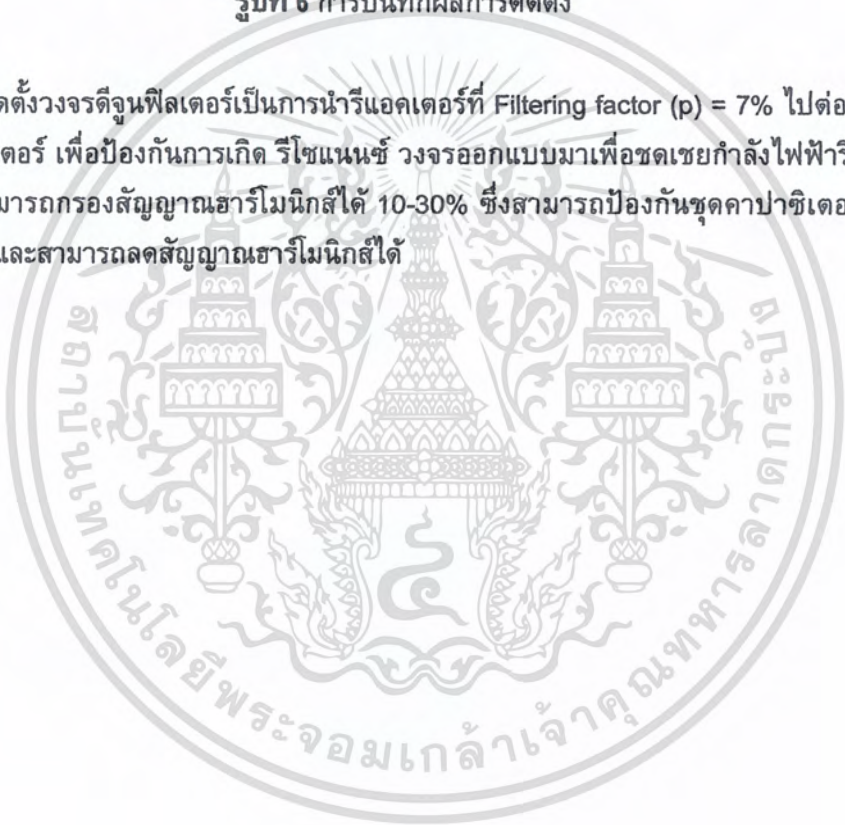
รูปที่ 3 เครื่องวัด Three phase power harmonic Analyzer Metrel MI 2292

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 การบันทึกผลการติดตั้ง

การติดตั้งวงจรตัวกรองเป็นนารีแอกเตอร์ที่ Filtering factor (p) = 7% ไปต่ออนุกรมเข้ากับชุดคาปาซิเตอร์ เพื่อป้องกันการเกิด รีโซแนนซ์ วงจรออกแบบมาเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้ระบบ และสามารถรองรับสัญญาณฮาร์โมนิกส์ได้ 10-30% ซึ่งสามารถป้องกันชุดคาปาซิเตอร์ไม่ให้เกิดความเสียหายและสามารถลดสัญญาณฮาร์โมนิกส์ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐานและการตรวจวัดฮาร์โมนิกส์

เมื่อมีฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าในปริมาณที่มาก จะทำให้เกิดผลเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้า โดยเฉพาะกรณีเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ขึ้น ซึ่งอาจทำให้อุปกรณ์ใช้ไฟฟ้ารับกระแสหรือแรงดันเกินพิกัดไปมาก ปัญหาเหล่านี้มีความสำคัญมากขึ้นเพราะ ผู้ใช้ไฟฟ้าโดยเฉพาะโรงงานอุตสาหกรรมได้นำอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์มาใช้มากขึ้น ประเทศที่ประสบปัญหาเรื่องนี้ จะมีการวางแผนป้องกันปัญหาเนื่องจากฮาร์โมนิกส์ด้วยการประกาศใช้มาตรฐานทางฮาร์โมนิกส์ขึ้น และมีการปรับปรุงเพื่อให้เหมาะสมกับสภาวะการณ์ปัจจุบัน เช่นประเทศสหรัฐอเมริกาประกาศใช้มาตรฐาน IEEE Std.519 ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1981 และมีการปรับปรุงเรื่อยมาฉบับที่ใช้ปัจจุบันคือ IEEE Std.519-1992 : IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic control in Electrical Power System ประเทศอังกฤษ ประกาศใช้มาตรฐานด้านฮาร์โมนิกส์ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1976 และยังใช้อยู่จนถึงปัจจุบันยังมีการปรับปรุงมาตรฐานฉบับดังกล่าวชื่อ Engineering Recommendation G.5/3-1976 : Limits for Harmonics in the United Kingdom Electricity Supply System สำหรับประเทศไทยทางการไฟฟ้าทั้งสามแห่ง (กฟผ. กฟภ. กฟน.) ได้ร่วมกันจัดทำข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์โมนิกส์เกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจอุตสาหกรรม ซึ่งอาจอ้างมาตรฐานของประเทศอังกฤษ (G.5/3) สำหรับบริษัทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงมาตรฐานที่เกี่ยวกับฮาร์โมนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับระบบอุตสาหกรรม ที่ควรศึกษาดังนี้

มาตรฐาน IEEE Std.519-1992

เป็นมาตรฐานที่โรงงานอุตสาหกรรม และบทความที่เกี่ยวกับฮาร์โมนิกส์ในระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมหลายบทความกล่าวถึง สำหรับรายละเอียดในส่วนของค่าจำกัดระดับความผิดเพี้ยนของกระแสหรือแรงดันฮาร์โมนิกส์นั้น จะทำการประเมินที่จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling: PCC) มาตรฐานฉบับนี้ได้แบ่งแนวทางปฏิบัติออกเป็น 2 แนวทาง คือ

1. แนวทางปฏิบัติสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละราย

จะพิจารณากระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากผู้ใช้ไฟฟ้าว่าส่วนที่ป้อนเข้าสู่ระบบว่ามีค่าเท่าใดด้วยการกำหนดค่าขีดจำกัดกระแสผิดเพี้ยนโดยใช้ดัชนีชี้วัด 2 ตัว คือ ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์รวม (Total Demand Distortion : TDD) และ กระแสฮาร์โมนิกส์ในแต่ละระดับ (Individual Harmonics Current Distortion : I_h) ค่าจำกัดจะแบ่งตามระดับแรงดัน และขนาดของกระแสลัดวงจร I_{SC} ต่อกระแสในช่วงที่มีความต้องการสูงสุด (I_L) ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าจำกัดของกระแสฮาร์โมนิกส์ตามมาตรฐาน IEEE Std.519-1992

| Vn ≤ 69 kV | | | | | | |
|---------------------------------|------|---------|---------|---------|-------|------|
| I _{sc} /I _L | h<11 | 11≤h<17 | 17≤h<23 | 23≤h<35 | 35 <h | TDD |
| <20 | 4.0 | 2.0 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 5.0 |
| 20-50 | 7.0 | 3.5 | 2.5 | 1.0 | 0.5 | 8.0 |
| 50-100 | 10.0 | 4.5 | 4.0 | 1.5 | 0.7 | 12.0 |
| 100-1000 | 12.0 | 5.5 | 5.0 | 2.0 | 1.0 | 15.0 |
| >1000 | 15.0 | 7.0 | 6.0 | 2.5 | 1.4 | 20.0 |
| 69 kV < Vn ≤ 161 kV | | | | | | |
| I _{sc} /I _L | h<11 | 11≤h<17 | 17≤h<23 | 23≤h<35 | 35 <h | TDD |
| <20 | 2.0 | 1.0 | 0.75 | 0.3 | 0.15 | 2.5 |
| 20-50 | 3.5 | 1.75 | 1.25 | 0.5 | 0.25 | 4.0 |
| 50-100 | 5.0 | 2.25 | 2.0 | 1.25 | 0.35 | 6.0 |
| 100-1000 | 6.0 | 2.75 | 2.5 | 1.0 | 0.5 | 7.5 |
| >1000 | 7.5 | 3.5 | 3.0 | 1.25 | 0.7 | 10.0 |
| Vn ≥ 161 kV | | | | | | |
| I _{sc} /I _L | h<11 | 11≤h<17 | 17≤h<23 | 23≤h<35 | 35 <h | TDD |
| <50 | 2.0 | 1.0 | 0.75 | 0.3 | 0.15 | 2.5 |
| ≥50 | 3.0 | 1.75 | 1.25 | 0.5 | 0.25 | 4.0 |

*อุปกรณ์ที่ก่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าที่จะถูกจัดให้อยู่ในค่ากระแสฮาร์โมนิกส์เหล่านี้โดยไม่คำนึงถึง

I_{sc}/I_L จริง

หมายเหตุ

- I_{sc} เป็นค่ากระแสลัดวงจรที่จุดต่อคร่อม (PCC) ปกติจะใช้กระแสลัดวงจรในกรณีเกิดการลัดวงจรแบบ 3 เฟส เพราะถือเป็นกรณีรุนแรงที่สุด
- I_L เป็นค่ากระแสที่วัดในช่วงผู้ใช้ไฟฟ้ามีความต้องการใช้พลังงานสูงสุดในเวลา 15 หรือ 30 นาที แต่ถ้าข้อมูลมีเพียงพอ I_L คำนวณได้จาก ค่าเฉลี่ยของกระแสคดีย่อยหลังในรอบ 1 ปี (คิดจากค่าบิลค่าไฟฟ้า) ในกรณีที่ผู้ใช้ไฟฟ้ารายใหม่จะประมาณกระแส I_L โดยการทำนายลักษณะโหลดล่วงหน้า (Predicted load profile)
- ค่าในตารางที่ 1 เป็นค่าจำกัดของฮาร์โมนิกส์ที่เป็นลำดับคี่ ส่วนค่าจำกัดของลำดับคู่จะใช้ค่าร้อยละ 25 ของค่าจำกัดลำดับที่อยู่เหนือขึ้นไปเช่น ถ้าพิจารณาฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 4 ให้ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า ร้อยละ 25 ของจำกัดของฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 5 เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วจะไม่พิจารณาฮาร์โมนิกส์ลำดับเลขคู่ เว้นแต่ผู้ใช้ไฟฟ้ามีชุดกรองฮาร์โมนิกส์ หรือคาปาซิเตอร์ของชุดปรับปรุงตัวประกอบกำลัง ซึ่งอาจทำให้เกิดสภาวะรีโซแนนซ์ ขยายกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับคู่ให้มากขึ้น

- กระแสผิดเพี้ยนนี้ไม่ให้มีผลของส่วนประกอบโดยตรง (DC offset not allowed)
- นิยามของ TDD คือ

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100$$

เมื่อ I_h คือ ขนาดของกระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ h (ค่า rms)

h คือ ลำดับฮาร์โมนิกส์

I_L คือ ยอดของกระแสในช่วงความต้องการสูงสุด

- ถ้าโหลดที่กำเนิดฮาร์โมนิกส์ประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ที่มีจำนวนพัลส์ (q) มากกว่า 6 พัลส์ ค่าจำกัดในตารางให้เพิ่มขึ้นด้วยตัวประกอบการคูณ $\sqrt{q/6}$ เช่น ถ้าแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิกส์เป็นคอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์ ค่าจำกัดในตารางของฮาร์โมนิกส์เฉพาะตัวให้เพิ่มขึ้นของตัวคูณ $\sqrt{2}$
- ฮาร์โมนิกส์ที่ไม่ใช่ฮาร์โมนิกส์เฉพาะตัว (Non-characteristic harmonic) ให้มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 25 ของค่าจำกัดในตารางที่ 1

จากตารางค่าจำกัดกระแสฮาร์โมนิกส์ตามมาตรฐาน IEEE Std.519-1992 พบว่าจะยอมให้ผู้ใช้ไฟฟ้าปล่อยกระแสฮาร์โมนิกส์เข้าสู่ระบบได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของโหลด เช่น ถ้าผู้ใช้ไฟฟ้ามีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับระบบจะยอมให้มีค่าจำกัดได้สูงกว่าผู้ใช้ไฟขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับระบบ

2. แนวปฏิบัติสำหรับการไฟฟ้า

เพื่อรักษาคุณภาพการจ่ายกำลังไฟฟ้า ทางกรไฟฟ้าจะพิจารณาในเรื่องของระดับแรงดันฮาร์โมนิกส์ผิดเพี้ยนที่จุด PCC โดยใช้ดัชนีชี้วัด 2 ตัวคือ แรงดันฮาร์โมนิกส์ผิดเพี้ยนรวม (Total Harmonic Distortion: THD_v) และแรงดันฮาร์โมนิกส์แต่ละลำดับ (Individual Harmonic Voltage: V_h) การไฟฟ้าจะพยายามรักษาแรงดันผิดเพี้ยนที่จุด PCC ด้วยการจำกัดค่ากระแสฮาร์โมนิกส์จากผู้ใช้ไฟฟ้า (ดังตารางที่ 2) และสำหรับค่าจำกัดของระดับแรงดันผิดเพี้ยนจะแบ่งตามระดับแรงดันดังตารางที่ 2 ซึ่งค่าจำกัดนี้เป็นสภาวะแรงดันผิดปกติ สำหรับสภาวะการใช้งานในช่วงสั้นๆ ของการเริ่มเดินเครื่องจักรหรือสภาวะผิดปกติ ค่าจำกัดของแรงดันฮาร์โมนิกส์ สามารถเพิ่มได้อีก 50% จากค่าที่กำหนดไว้

ตารางที่ 2 ค่าจำกัดแรงดันฮาร์โมนิกส์ ตาม IEEE Std.519-1992

| Bus voltage At PCC (V _n) | Individual Harmonic Voltage Distortion (%) | Total Voltage Distortion THD _v (%) |
|--------------------------------------|--|---|
| V _n ≤ 69 kv | 3.0 | 5.0 |
| 69 kv ≤ V _n ≤ 161 kv | 1.5 | 2.5 |
| V _n ≥ 161 kv | 1.0 | 1.5 |

*High – voltage system can have up to 2.0% THD cause is an HDVC terminal that will attenuate by the time it is tapped for a use

หมายเหตุ

- นิยามของ THD_v คือ

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_2^{\infty} V_h}}{V_1} \times 100\%$$

เมื่อ V₁ คือ ขนาดของแรงดันที่มีความถี่หลักมูลในสภาวะปกติของระบบ (ค่า rms)

V_h คือ ขนาดของแรงดันฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ h (ค่า rms)

h คือ ลำดับฮาร์โมนิกส์

จากตารางจะพบว่าที่ระดับแรงดันสูง ๆ การไฟฟ้าจะต้องให้ความสำคัญกับระดับแรงดันผิดเพี้ยน ค่าแรงดันฮาร์โมนิกส์จะมีค่าคงที่โดยไม่ขึ้นกับเลขลำดับฮาร์โมนิกส์ และจะกำหนดให้ระดับแรงดันผิดเพี้ยนมีค่าต่ำๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีเลือกชุดดีจูนฟิลเตอร์ (Detuned filter) อย่างถูกต้อง

ปัจจุบันมีการเลือกใช้ชุดดีจูนฟิลเตอร์ (detuned filter) แบบผิด ๆ อาจจะเป็นเพราะว่าไม่รู้เท่าถึงการณ์เนื่องจากผู้ผลิตแนะนำผิดหรือประหยัดต้นทุนค่าสินค้าหรืออะไรก็ตามแต่ท่านรู้ไหมว่าทำไมจะต้องเลือกใช้ดีจูนฟิลเตอร์แบบนั้นแบบนี้บทความนี้จะแสดงให้เห็นว่าท่านทราบเกี่ยวกับการเลือกชุดดีจูนฟิลเตอร์ และเหตุผลที่ต้องเลือกใช้โดยตัวท่านเองจะเป็นคนตัดสินใจเองว่าสิ่งที่กล่าวถึงถูกต้องหรือไม่ สมมติว่าระบบไฟฟ้าของอาคารหรือโรงงานของท่านใช้หรือต้องการจะใช้ capacitor unit ขนาด 50kVAR 400V เมื่อจะเปลี่ยนเป็นชุดดีจูนฟิลเตอร์ก็จะมีผู้ขายเสนอ 53kVAR 426V หรือ 56kVAR 440V หรือ 70kVAR 480V หรือ 75kVAR 500V หรือ 80kVAR 525V พร้อมกับ 6% และ 7% detuned reactor ทำไมจึงมีให้เลือกหลากหลายขนาดนี้ทั้ง ๆ ที่ต้องการใช้ชุดดีจูนฟิลเตอร์สำหรับ capacitor 50kVAR 400V เท่านั้น

เหตุผลคือความเข้าใจเกี่ยวกับการเลือกชุดดีจูนฟิลเตอร์ที่แตกต่างกันของแต่ละคนนั่นเองโดยความเป็นจริงแล้วมีเพียงหลักการเดียวเท่านั้นสำหรับแต่ละมาตรฐานโดยประเทศไทยนั้นจะอ้างอิงจาก IEEE standard ของอเมริกาหรือ IEC standard ของยุโรปที่เป็นมาตรฐานสากลแต่ในที่นี้เราจะใช้หลักการตาม IEC standard no. 61000-2 ว่าด้วยเรื่องเกี่ยวกับระดับฮาร์โมนิกส์ที่ยอมรับได้ในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำไม่เกิน 415 โวลต์ (Harmonic Limit)

IEC 61000-2 กล่าวถึงฮาร์โมนิกส์ของระบบไฟฟ้า 415 โวลต์ใดๆว่าจะต้องมีฮาร์โมนิกส์ไม่เกินค่าที่กำหนดเพื่อไม่ให้ก่อความรบกวนให้ระบบไฟฟ้าอื่นๆที่ใช้แหล่งจ่ายเดียวกันโดยขีดจำกัดของระดับฮาร์โมนิกส์นั้นจะต้องเป็นดังนี้

- แรงดันของฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 1 จะต้องไม่เกิน 10% ($U_1 \leq 10\%$)
- แรงดันของฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 จะต้องไม่เกิน 5% ($U_3 \leq 5\%$)
- แรงดันของฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 จะต้องไม่เกิน 5% ($U_5 \leq 5\%$)
- แรงดันของฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 7 จะต้องไม่เกิน 6% ($U_7 \leq 6\%$)
- แรงดันของฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 11 จะต้องไม่เกิน 5% ($U_{11} \leq 5\%$)
- แรงดันของฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 13 จะต้องไม่เกิน 3.5% ($U_{13} \leq 3.5\%$)
- แรงดันของฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 17 จะต้องไม่เกิน 3% ($U_{17} \leq 3\%$)

ในที่นี้เราจะเลือกใช้เฉพาะฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 1,3,5,7 เพราะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในไทยส่วนใหญ่ใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC power supply, six-pulse) ที่สร้างฮาร์โมนิกอันดับดังกล่าวโดยจะเปลี่ยนแปลงค่าฮาร์โมนิกส์ต่างๆ ดังนี้

แรงดันของฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 1 จะต้องไม่เกิน 6% ($U_1 = 6\%$) เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าของอาคารหรือโรงงานจะไม่ค่อยมีไฟฟ้าเกินเพราะใช้หม้อแปลง 22000 / 400V เกือบทั้งนั้นดังนั้นเราจึงเพื่อแค่แรงดันไฟฟ้านคร่อม capacitor ที่จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเหนี่ยวนำของ reactor เท่านั้น

แรงดันของฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 จะต้องไม่เกิน 0.5% ($U_3 = 0.5\%$) เนื่องจากฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 (หรืออันดับที่ 3 หารลงตัว) จะไหลลงสู่นิวทรัล (neutral) แต่ตัว capacitor มีต่อภายในแบบ delta จึงไม่มีนิวทรัลดังนั้นฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 3 ไม่ควรจะไหลลงสู่ capacitor

แรงดันของฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 จะต้องไม่เกิน 5% ($U_5 = 5\%$)

แรงดันของฮาร์โมนิกอันดับที่ 7 จะต้องไม่เกิน 5% ($U_7 = 5\%$)

แรงดันไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นคร่อมตัว capacitor นอกจากแรงดันไฟฟ้าของระบบ 400 โวลต์แล้วจะมีแรงดันไฟฟ้าอื่นๆ ได้แก่

1. แรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของ reactor (ขดลวด) เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

2. แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสฮาร์โมนิกสัทธิลเข้าสู่ตัว capacitor

ค่าความจุของ capacitor (reactive power หรือ kVAR) จะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมสูงขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือเครื่องวัดและอุปกรณ์ที่ใช้



A 1033 Current clamp 1000 A/1V

ผลิตภัณฑ์ : Three phase power harmonic Analyzer

รุ่น : Metrel MI2292

รายละเอียด :


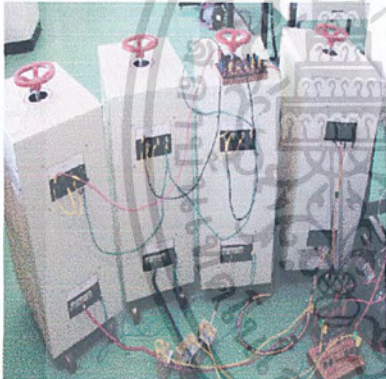

Measuring Functions:-

- Automatic EN 50160 power quality assessment test.
- Flicker measurement in accordance with EN 50160.
- Measurements according to IEC / EN 61000-4-30.
- Recording of short-period events like transients, inrush currents, resonant states, switching, ...
- Harmonics direction determination.
- Optional: 110 V version.
- Dimensions (w x h x l): 265 x 110 x 185 mm
- Mass (without accessories): 2 kg
- Protection degree: IP 64

Whats Included

- Instrument Power Quality Analyzer Plus
- Current clamp 1000 A/1 V, 3 pcs
- Test tips, 3 pcs
- Alligator clips, 4 pcs
- Voltage measurement cables, 4 pcs
- Mains cable
- PowerLink PC SW package with RS232 cable
- Power supply adapter
- Rechargeable batteries, 4 pcs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|---|--|
|  | <p>ผลิตภัณฑ์: Multi Meter รุ่น: Fluke-179/IMSK รายละเอียด: - True RMS 20 kHz - Accuracy = 0.09% Var or Vdc: 0 to 600 Volt Iac or Idc: 0 to 10 Amp</p> <p>ผลิตภัณฑ์: Clamp Meters รุ่น: Fluke 321/322 รายละเอียด: - Accuracy = 1.8% Resistance: 400 Ω Var or Vdc: 0 to 600 Volt Iac: 0 to 400 Amp</p> |
|  | <p>ผลิตภัณฑ์ Variac 3 phase รายละเอียด - Input Voltage 400 V - Output Current 30 A - Output Voltage 0 - 112% of Vin</p> |
|  | <p>ผลิตภัณฑ์ : น้ำยาวานิช 3A แดง รุ่น : W-23 รายละเอียด : น้ำยาวานิช 3A แดงมีสีแสด, มีความหนืดปานกลาง(สามารถผสมให้อ่อนลง หรือนำไปใช้ได้เลย), ทนความร้อนได้สูง, สามารถเก็บไว้ได้นาน 1 ปี</p> |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

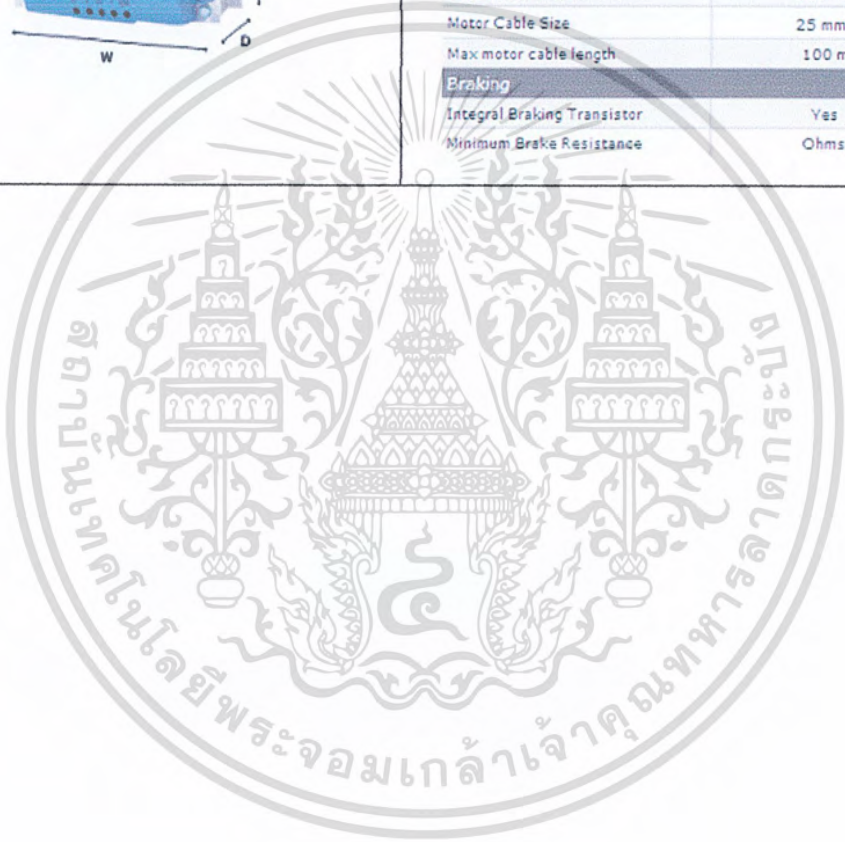


ผลิตภัณฑ์ : INVERTEK OPTDRIVE VTC

รุ่น : ODV-44450-IN

รายละเอียด :

| Input Ratings | |
|-----------------------------|--------------------|
| Supply Voltage | 380-480 Volts |
| No of Phases | 3 |
| Supply Current Continuous | 92.3 Amps |
| Supply Fuse or MCB (Type B) | 100 |
| Output Ratings | |
| Motor Output Rating | 45 kw |
| Output Voltage | 0-500 Volts |
| Output Amps | 90 Amps |
| Cable Information | |
| Supply Cable Size | 35 mm ² |
| Motor Cable Size | 25 mm ² |
| Max motor cable length | 100 m |
| Braking | |
| Integral Braking Transistor | Yes |
| Minimum Brake Resistance | Ohms |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทสำเร็จลุล่วงด้วยดี ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ รศ.จรงค์ บุญเสียง อาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยให้คำแนะนำ ให้ความอนุเคราะห์ด้านข้อมูลและข้อคิดต่างๆ ของการทำ ปริญญาโทมาด้วยดีตลอด รวมทั้งกรุณาตรวจสอบและแก้ไขจนสำเร็จเรียบร้อย

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย รศ.พิชิต ล้ายอง และ อ.สุวงษ์ โสมพงษ์ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการออกแบบและการทดสอบรีแอกเตอร์

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจในการศึกษา และเป็นผู้สนับสนุนทุกสิ่งทุกอย่างในการศึกษาตลอดมา

ขอขอบคุณสำนักห้องสมุดกลางและห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ได้สนับสนุนข้อมูล และหนังสือต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณบริษัทไทยประสิทธิ์เท็กซ์ไทล์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านการทดสอบ และติดตั้งในโรงงานอุตสาหกรรม

ขอขอบคุณภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] McLyman Colonel William T., **Transformer and Desing Handbook**, New York, Marcel Dekker Inc., 1989.
- [2] Nokian Capacitors, "Hamonics and Reactive Power Compensation in Practice," Nov., 2004.
- [3] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Standard 519-1992, Published by IEEE, 1992.
- [4] IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors, IEEE std. 1036-1992.
- [5] Robert G.Ellis, "Harmonic analysis of industrial power system," **IEEE transaction on industry Application**, 32, March/April 1996.
- [6] Guy Lemieux, "Power System Harmonic Resonance A Documented Case, "**IEEE Transaction on Industry Application**.Vol26, No.3, May/June 1990, pp.483
- [7] "ANSI/IEEE Standard for Shunt Power Capacitor," **ANSI/IEEE Standard 18**, 1992.
- [8] J.Arrillage, D.A. Bradley, and P.S. Bodge, **P.P. Power System Harmonic Norwich**, John Wiley & Sons, 1985.
- [9] "Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents," **ANSI/IEEE Std. C57.110**, 1986.
- [10] www.nokiancapacitors.com
- [11] www.aeg.com
- [11] Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters," **IEEE 519**, 1981.
- [12] Jens-Onno Krahn and Joachim Holtz, "Total Compensation of Line-Side Switching Harmonics in Converter-Fed Ac Locomotives," **IEEE Transactions on industry Application**, Vol.31, No.6, November/December 1995, pp. 1264-1273
- [13] Biminal K. Bose, **Power Electronic and AC Drive**, Englewood Cliffs : Prentice-Hall, 1996.
- [14] รศ.ดร. วีรเชษฐ ชันเงิน , วุฒิพล ชาราธิ์เศรษฐ์, "อิเล็กทรอนิกส์กำลัง" ห้างหุ้นส่วน จำกัด วีเจ.พรีนติ้ง, 2547.

- [15] ศุภี บรรจงจิตร, หลักการและเทคนิคการออกแบบระบบไฟฟ้า, กรุงเทพฯ, ซีเอ็ด
ยูเคชั่น, 2547.
- [16] ก่อเกียรติ กาญจนรัตน์, "การพัฒนาการออกแบบตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบแกน EI โดยใช้
วิธีการวิเคราะห์ค่ารีลัคแทนซ์แบบ 2 มิติ," วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต,
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,
2548.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้