

การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแพสซีฟในระบบไฟฟ้าแรงสูง

นายจักรพงษ์ ทัพสอาด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

PASSIVE HARMONIC FILTER DESIGN IN HIGH VOLTAGE SYSTEMS

Mr. Jakkapong Tupsa-ard

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแพสซีฟในระบบไฟฟ้าแรงสูง
โดย	นายจักรพงษ์ ทัพสอาด
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ไชยะ แซ่มซ้อย
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชัสอนันต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ไชยะ แซ่มซ้อย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชัสอนันต์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศนีย์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชวาลย์ เจริญบุตร)

จักรพงษ์ ทัพสอาด : การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแพสซีฟในระบบไฟฟ้าแรงสูง
(PASSIVE HARMONIC FILTER DESIGN IN HIGH VOLTAGE SYSTEMS)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ไชยะ แซ่มซ้อย อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม :
ผศ.ดร.ธวัชชัย เตชัสอนันต์, 272 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแพสซีฟในระบบไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งใช้งานในสภาวะปกติ ผลการศึกษาได้นำมาสู่การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกชนิด ปรับคลื่นเดี่ยว ผ่านสูงอันดับสอง ผ่านสูงอันดับสาม และผ่านสูงชนิดซี พร้อมกันนี้ยังได้พิจารณาการออกแบบชุดตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้าแรงสูงประเภท Externally fused Internally fused และ Fuseless นอกจากนี้โปรแกรมยังสามารถวิเคราะห์โพลดิโพลว์ ฮาร์มอนิกโพลว์ของระบบไฟฟ้า การสแกนความถี่ และแสดงรูปภาพของแรงดันที่บัสต่าง ๆ ได้ ผลจากการพิจารณาการออกแบบชุดตัวเก็บประจุนี้ ทำให้สามารถออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแพสซีฟในระบบไฟฟ้าแรงสูงได้ง่ายและรวดเร็ว อีกทั้งใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ปัญหาฮาร์มอนิกได้อย่างเหมาะสม

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อ.....
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา 2554 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5270661921 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : HARMONIC FILTER DESIGN / PASSIVE HARMONIC FILTER / SINGLE TUNED FILTER / HIGH PASS FILTER / EXTERNALLY FUSED CAPACITOR BANK / INTERNALLY FUSED CAPACITOR BANK / FUSELESS CAPACITOR BANK

JAKKAPONG TUPSA-ARD : PASSIVE HARMONIC FILTER DESIGN IN HIGH VOLTAGE SYSTEMS. ADVISOR : ASSOC. PROF. CHAIYA CHAMCHOY, CO-ADVISOR : ASST. PROF. THAVATCHAI TAYJASANANT, Ph.D., 272 pp.

This thesis studies passive harmonic filter design in high voltage systems based on normal conditions. Results lead to development of a computer program to design harmonic filter such as single-tuned, second order high-pass, third order high-pass, c-type high-pass filters. The design of capacitor bank such as externally fused, internally fused and fuseless are also considered. Moreover, the developed program can perform load flow, harmonic flow, frequency scan and voltage waveforms at various buses. Results from capacitor bank design can simplify and speed up passive harmonic filter design in high voltage systems. Proper measures can be implemented to mitigate harmonic problems.

Department : Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study : Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2011 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ไชยะ แซ่มซ้อย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย เตชัสอนันต์ ซึ่งเป็นที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำ ต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิทยานิพนธ์ ตลอดจนชี้ให้เห็นข้อบกพร่องและแนวทางแก้ไข ต่างๆ นับตั้งแต่เริ่มต้นทำวิทยานิพนธ์จะกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไข เนื้อหาจนสำเร็จเรียบร้อย

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ซึ่งประกอบด้วย อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล (ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์) อาจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศนีย์ (กรรมการ) และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชวาลย์ เจริญบุตร (กรรมการ ภายนอกมหาวิทยาลัย) ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ ลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาที่ได้ให้กำลังใจเสมอมา และทุกๆท่านที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	น
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินการ.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	2
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	3
2. หลักการและทฤษฎีของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแพสซีฟ.....	4
2.1 ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบกรองผ่านปรับคลื่นเดียว.....	4
2.2 ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบกรองผ่านสูง.....	10
2.2.1 ตัวกรองผ่านสูงลำดับที่หนึ่ง.....	11
2.2.2 ตัวกรองผ่านสูงลำดับสอง.....	12
2.2.3 ตัวกรองผ่านสูงลำดับสาม.....	13
2.2.4 ตัวกรองผ่านสูงชนิดซี.....	16
3. หลักการและทฤษฎีของตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้าแรงสูง.....	19
3.1 ลักษณะเฉพาะของตัวเก็บประจุแรงสูง.....	20
3.1.1 การทำงานอย่างต่อเนื่องภายใต้เงื่อนไขแรงดัน กระแส และ กำลังรีแอกทีฟสูงสุด.....	20
3.1.2 ปริมาณความจุไฟฟ้า.....	20
3.1.3 พิกัดแรงดันและกำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุ.....	20

3.1.4 ความถี่.....	20
3.1.5 อุณหภูมิแวดล้อม.....	20
3.1.6 ความสามารถในการกำจัดหรือลดระดับแรงดันตกค้าง.....	20
3.2 โครงสร้างของชุดตัวเก็บประจุแรงสูง.....	22
3.2.1 ชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused.....	22
3.2.2 ชุดตัวเก็บประจุแบบ Internally fused.....	24
3.2.3 ชุดตัวเก็บประจุแบบ Fuseless.....	25
3.2.4 ลักษณะการต่อตัวเก็บประจุ.....	27
3.3 ตัวรีแอคเตอร์.....	29
4. การออกแบบและพัฒนาโปรแกรมสำหรับการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบ แพสซีฟในระบบไฟฟ้าแรงสูง.....	30
4.1 การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก.....	30
4.2 การออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง.....	36
4.3 การทำงานของโปรแกรม.....	57
4.4 การพัฒนาโปรแกรมสำหรับการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบ ไฟฟ้าแรงสูง.....	59
4.4.1 การพัฒนาโปรแกรมส่วนหน้าหลักของโปรแกรม.....	59
4.4.2 การพัฒนาโปรแกรมส่วนการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก.....	63
4.4.3 การพัฒนาโปรแกรมส่วนการออกแบบชุดตัวเก็บประจุ.....	63
4.4.4 ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม.....	66
5. การวิเคราะห์และการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงสูง.....	76
5.1 ระบบทดสอบ 13 บัส (ระบบแรงดันจำหน่าย) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก อยู่ที่บัส 8 (4.16kV)	81
5.1.1 ใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดปรับคลื่นเดี่ยวชนิดเดียวในการกรอง ฮาร์มอนิก.....	84
5.1.2 ใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองแบบผ่านสูง อันดับสองในการกรองฮาร์มอนิก.....	92
5.1.3 ใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองแบบผ่านสูง อันดับสามในการกรองฮาร์มอนิก.....	98

5.1.4 ใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองแบบผ่านสูง ชนิดซีในการกรองฮาร์มอนิก.....	104
5.2 ระบบทดสอบ 13 บัส (ระบบแรงดันจำหน่าย) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก อยู่ที่บัส 3 (13.8 kV)	113
5.2.1 ใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดปรับคลื่นเดี่ยวชนิดเดียวในการกรอง ฮาร์มอนิก.....	116
5.2.2 ใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองแบบผ่านสูง อันดับสองในการกรองฮาร์มอนิก.....	124
5.2.3 ใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองแบบผ่านสูง อันดับสามในการกรองฮาร์มอนิก.....	130
5.2.4 ใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองผ่านสูง ชนิดซีในการกรองฮาร์มอนิก.....	136
5.3 ระบบทดสอบ 13 บัส (ระบบแรงดันส่ง) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก อยู่ที่บัส 7 (33 kV).....	145
5.3.1 ใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดปรับคลื่นเดี่ยวชนิดเดียวในการกรอง ฮาร์มอนิก.....	148
5.3.2 ใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองผ่านสูง อันดับสองในการกรองฮาร์มอนิก.....	163
5.3.3 ใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองผ่านสูง อันดับสามในการกรองฮาร์มอนิก.....	169
5.3.4 ใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองผ่านสูง ชนิดซีในการกรองฮาร์มอนิก.....	177
5.4 ระบบทดสอบ 13 บัส (ระบบแรงดันส่ง) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก อยู่ที่บัส 9 (115 kV).....	188
5.4.1 ใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดปรับคลื่นเดี่ยวชนิดเดียวในการกรอง ฮาร์มอนิก.....	191
5.4.2 ใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองผ่านสูง อันดับสองในการกรองฮาร์มอนิก.....	206

5.4.3 ใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองผ่านสูง อันดับสามในการกรองฮาร์มอนิก.....	213
5.4.4 ใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองผ่านสูง ชนิดซีในการกรองฮาร์มอนิก.....	220
5.5 ระบบทดสอบ 13 บัส (ระบบแรงดันส่ง) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก อยู่ที่บัส 5 (230 kV).....	230
5.5.1 ใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดปรับคลื่นเดี่ยวชนิดเดียวในการกรอง ฮาร์มอนิก.....	233
5.5.2 ใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองผ่านสูง อันดับสองในการกรองฮาร์มอนิก.....	243
5.5.3 ใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองผ่านสูง อันดับสามในการกรองฮาร์มอนิก.....	249
5.5.4 ใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองผ่านสูง ชนิดซีในการกรองฮาร์มอนิก.....	257
6. สรุปและข้อเสนอแนะ.....	267
รายการอ้างอิง.....	270
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	272

สารบัญญัตินำ

ตารางที่		หน้า
3.1	ขนาดมาตรฐานตามพิกัดแรงดันและกำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุแรงสูง.....	21
3.2	อุณหภูมิแวดล้อมสูงสุด.....	22
3.3	จำนวนชั้นต่ำของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกันในแต่ละกลุ่มอนุกรม เพื่อจำกัดแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุที่ยังคงอยู่เมื่อตัวเก็บประจุ 1 ตัวถูกปลดไม่ให้เกิน 110 %.....	23
3.4	ตารางเปรียบเทียบระหว่างชุดตัวเก็บประจุแบบ Internally fused กับ Externally fused.....	25
4.1	แสดงความหมายของพารามิเตอร์ในการแสดงผลของการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก.....	35
4.2	แสดงการต่อชุดตัวเก็บประจุที่พิจารณาในการออกแบบ.....	36
5.1	ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของสายส่ง.....	76
5.2	ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าและตัวเก็บประจุ.....	77
5.3	ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง.....	77
5.4	ข้อมูลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 13 บัส แรงดันจำหน่าย.....	77
5.5	ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของสายส่ง หม้อแปลง และตัวเก็บประจุ.....	78
5.6	ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า.....	79
5.7	ข้อมูลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 13 บัส แรงดันส่ง.....	79
5.8	ข้อมูลสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก (6-pulse).....	80
5.9	ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โพลาร์ (กรณี 5.1).....	82
5.10	ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์ (กรณี 5.1).....	83
5.11	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.1.1).....	84
5.12	ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 8 (กรณี 5.1.1).....	85
5.13	ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกจำนวน 3 ชุดที่บัส 8 (กรณี 5.1.1).....	86

ตารางที่	หน้า
5.14 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรอง ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.1.1).....	87
5.15 ผลการเปรียบเทียบ %THDv กรณีต่าง ๆ (กรณี 5.1.1).....	91
5.16 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.1.1).....	91
5.17 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.1.2).....	92
5.18 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 8 (กรณี 5.1.2).....	92
5.19 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิก จำนวน 3 ชุดที่บัส 8 (กรณี 5.1.2).....	93
5.20 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรอง ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.1.2).....	94
5.21 ผลการเปรียบเทียบ %THDv กรณีต่าง ๆ (กรณี 5.1.2).....	96
5.22 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.1.2).....	97
5.23 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.1.3).....	98
5.24 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 8 (กรณี 5.1.3).....	98
5.25 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิก จำนวน 3 ชุดที่บัส 8 (กรณี 5.1.3).....	99
5.26 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรอง ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.1.3).....	100
5.27 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุ (C2) ของตัวกรองฮาร์มอนิก อันดับที่ 11 (กรณี 5.1.3).....	100
5.28 ผลการเปรียบเทียบ %THDv กรณีต่าง ๆ (กรณี 5.1.3).....	103
5.29 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.1.3).....	103
5.30 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.1.4).....	104

ตารางที่	หน้า
5.31 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหนดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุด ที่บัส 8 (กรณี 5.1.4).....	104
5.32 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิก จำนวน 3 ชุดที่บัส 8 (กรณี 5.1.4).....	105
5.33 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของ ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.1.4).....	106
5.34 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุ (C2) ของตัวกรอง ฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.1.4).....	106
5.35 ผลการเปรียบเทียบ %THDv กรณีต่าง ๆ (กรณี 5.1.4).....	109
5.36 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.1.4).....	109
5.37 ผลการเปรียบเทียบค่า %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.1).....	110
5.38 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.1).....	110
5.39 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหนดโพลาร์ (กรณี 5.2).....	114
5.40 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์ (กรณี 5.2).....	115
5.41 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.2.1).....	117
5.42 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหนดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุด ที่บัส 3 (กรณี 5.2.1).....	117
5.43 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิก จำนวน 3 ชุดที่บัส 3 (กรณี 5.2.1).....	118
5.44 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของ ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.2.1).....	119
5.45 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.2.1).....	123
5.46 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.2.1).....	123
5.47 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.2.2).....	124
5.48 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหนดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุด ที่บัส 3 (กรณี 5.2.2).....	124

ตารางที่	หน้า	
5.49	ผลลัพท์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิก จำนวน 3 ชุดที่บัส 3 (กรณี 5.2.2).....	125
5.50	ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของ ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.2.2).....	126
5.51	ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.2.2).....	128
5.52	ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.2.2).....	129
5.53	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.2.3).....	130
5.54	ผลลัพท์ของการวิเคราะห์โพลาร์โพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุด ที่บัส 3 (กรณี 5.2.3).....	130
5.55	ผลลัพท์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิก จำนวน 3 ชุดที่บัส 3 (กรณี 5.2.3).....	131
5.56	ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของ ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.2.3).....	132
5.57	ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุ (C2) ของตัวกรอง ฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.2.3).....	132
5.58	ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.2.3).....	135
5.59	ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.2.3).....	135
5.60	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.2.4).....	136
5.61	ผลลัพท์ของการวิเคราะห์โพลาร์โพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุด ที่บัส 3(กรณี 5.2.4).....	136
5.62	ผลลัพท์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิก จำนวน 3 ชุดที่บัส 3 (กรณี 5.2.4).....	137
5.63	ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของ ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.2.4).....	138
5.64	ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุ (C2) ของตัวกรอง ฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.2.4).....	138

ตารางที่	หน้า
5.65 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.2.4).....	141
5.66 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.2.4).....	141
5.67 ผลการเปรียบเทียบค่า%THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.2).....	142
5.68 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.2).....	142
5.69 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โพลดิโพล (กรณี 5.3).....	146
5.70 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพล (กรณี 5.3).....	147
5.71 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.3.1).....	148
5.72 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โพลดิโพลเมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุด ที่บัส 7 (กรณี 5.3.1).....	149
5.73 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพล (กรณี 5.3.1).....	150
5.74 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.3.1).....	152
5.75 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โพลดิโพลเมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุด ที่บัส 7(กรณี 5.3.1).....	152
5.76 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพล (กรณี 5.3.1).....	153
5.77 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของ ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (กรณี 5.3.1).....	154
5.78 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของ ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 (กรณี 5.3.1).....	156
5.79 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของ ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.3.1).....	158
5.80 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้ เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง (กรณี 5.3.1).....	159
5.81 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.3.1).....	161
5.82 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.3.1).....	162
5.83 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.3.2).....	163

ตารางที่	หน้า
5.84 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหนดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุด ที่บัส 7 (กรณี 5.3.2).....	163
5.85 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์ (กรณี 5.3.2).....	164
5.86 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้ เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง (กรณี 5.3.2).....	165
5.87 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.3.2).....	167
5.88 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.3.2).....	168
5.89 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.3.3).....	169
5.90 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหนดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุด ที่บัส 7 (กรณี 5.3.3).....	169
5.91 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์ (กรณี 5.3.3).....	170
5.92 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของ ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.3.3).....	171
5.93 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C2) ของ ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.3.3).....	172
5.94 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้ เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง (กรณี 5.3.3).....	173
5.95 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.3.3).....	176
5.96 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.3.3).....	176
5.97 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.3.4).....	177
5.98 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหนดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุด ที่บัส 7 (กรณี 5.3.4).....	177
5.99 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์ (กรณี 5.3.4).....	178
5.100 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของ ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.3.4).....	179
5.101 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C2) ของ ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.3.4).....	180

ตารางที่	หน้า	
5.102	ผลลัพท์การตรวจสอบภาวะไหลเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้ เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง (กรณี 5.3.4).....	181
5.103	ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.3.4).....	184
5.104	ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.3.4).....	185
5.105	ผลการเปรียบเทียบค่า%THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.3).....	185
5.106	ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.3).....	185
5.107	ผลลัพท์ของการวิเคราะห์ไหลโพลาร์ (กรณี 5.4).....	189
5.108	ผลลัพท์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์ (กรณี 5.4).....	190
5.109	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.4.1).....	191
5.110	ผลลัพท์ของการวิเคราะห์ไหลโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุด ที่บัส 9 (กรณี 5.4.1).....	192
5.111	ผลลัพท์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์ (กรณี 5.4.1).....	193
5.112	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.4.1).....	195
5.113	ผลลัพท์ของการวิเคราะห์ไหลโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุด ที่บัส 9 (กรณี 5.4.1).....	195
5.114	ผลลัพท์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์ (กรณี 5.4.1).....	196
5.115	ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของ ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (กรณี 5.4.1).....	197
5.116	ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของ ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 (กรณี 5.4.1).....	199
5.117	ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของ ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.4.1).....	200
5.118	ผลลัพท์การตรวจสอบภาวะไหลเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้ เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง (กรณี 5.4.1).....	201
5.119	ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.4.1).....	205
5.120	ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.4.1).....	205

ตารางที่	หน้า
5.121 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.4.2).....	206
5.122 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โพลดิโพลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุด ที่บัส 9 (กรณี 5.4.2).....	206
5.123 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลว์ (กรณี 5.4.2).....	207
5.124 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง (กรณี 5.4.2).....	208
5.125 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.4.2).....	212
5.126 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.4.2).....	212
5.127 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.4.3).....	213
5.128 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โพลดิโพลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุด ที่บัส 9 (กรณี 5.4.3).....	213
5.129 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลว์ (กรณี 5.4.3).....	214
5.130 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.4.3).....	215
5.131 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C2) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.4.3).....	216
5.132 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง (กรณี 5.4.3).....	216
5.133 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.4.3).....	219
5.134 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.4.3).....	219
5.135 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.4.4).....	220
5.136 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โพลดิโพลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุด ที่บัส 9 (กรณี 5.4.4).....	220
5.137 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลว์ (กรณี 5.4.4).....	221
5.138 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.4.4).....	222

ตารางที่	หน้า
5.139 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C2) ของ ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.4.4).....	223
5.140 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้ เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง (กรณี 5.4.4).....	223
5.141 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.4.4).....	226
5.142 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.4.4).....	226
5.143 ผลการเปรียบเทียบค่า %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.4).....	227
5.144 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.4).....	227
5.145 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์ (กรณี 5.5).....	231
5.146 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์ (กรณี 5.5).....	232
5.147 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.5.1).....	234
5.148 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุด ที่บัส 5 (กรณี 5.5.1).....	234
5.149 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์ (กรณี 5.5.1).....	235
5.150 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของ ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (กรณี 5.5.1).....	236
5.151 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของ ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 (กรณี 5.5.1).....	238
5.152 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของ ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.5.1).....	239
5.153 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้ เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง (กรณี 5.5.1).....	239
5.154 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.5.1).....	242
5.155 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.5.1).....	242
5.156 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.5.2).....	243
5.157 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุด ที่บัส 5 (กรณี 5.5.2).....	243

ตารางที่	หน้า
5.158	ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์ (กรณี 5.5.2)..... 244
5.159	ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้ เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง (กรณี 5.5.2)..... 245
5.160	ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.5.2)..... 248
5.161	ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.5.2)..... 248
5.162	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.5.3)..... 249
5.163	ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุด ที่บัส 5 (กรณี 5.5.3)..... 249
5.164	ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์ (กรณี 5.5.3)..... 250
5.165	ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของ ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.5.3)..... 251
5.166	ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C2) ของ ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.5.3)..... 251
5.167	ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้ เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง (กรณี 5.5.3)..... 252
5.168	ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.5.3)..... 255
5.169	ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.5.3)..... 256
5.170	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.5.4)..... 257
5.171	ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุด ที่บัส 5 (กรณี 5.5.4)..... 257
5.172	ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์ (กรณี 5.5.4)..... 258
5.173	ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของ ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.5.4)..... 259
5.174	ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C2) ของ ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.5.4)..... 259
5.175	ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้ เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง (กรณี 5.5.4)..... 259

ตารางที่	หน้า
5.176 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.5.4).....	262
5.177 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.5.4).....	263
5.178 ผลการเปรียบเทียบค่า %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.5).....	264
5.179 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.5).....	264

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	(a) ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดียวและ (b) ความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์กับความถี่.....	4
2.2	ลักษณะการติดตั้งตัวกรองเข้ากับระบบไฟฟ้า.....	6
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่ของรูปที่ 2.2.....	7
2.4	ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูง (a) ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับหนึ่ง (b) ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่สอง (c) ตัวกรองฮาร์มอนิกกว่าดับที่สาม (d) ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดซี.....	11
2.5	(a) ตัวกรองผ่านสูงอันดับสองและ (b) ความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์กับความถี่.....	12
2.6	ตัวกรองผ่านสูงอันดับสาม.....	13
2.7	การเทียบค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบกรองปรับคลื่นเดียวกับตัวกรองชนิดซี.....	17
3.1	(a) Externally fused, (b) Internally fused, (c) Fuseless.....	19
3.2	ชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ที่มีการต่อแบบ Single ground wye....	24
3.3	ชุดตัวเก็บประจุแบบ Internally fused ที่มีการต่อแบบ Single ground wye.....	25
3.4	ชุดตัวเก็บประจุแบบ Fuseless ที่มีการต่อแบบ Single ground wye.....	26
3.5	รูปแบบการต่อชุดตัวเก็บประจุแบบต่าง ๆ (a) Delta, (b) Grounded wye, (c) Ungrounded wye, (d) Split ungrounded wye, (e) Split grounded wye.....	27
3.6	การตรวจจับความไม่สมดุลของแรงดันนิวทรัลสำหรับการต่อแบบ Single grounded wye.....	27
3.7	การตรวจจับความไม่สมดุลของกระแสนิวทรัลสำหรับการต่อแบบ Split ungrounded wye.....	28
3.8	การตรวจจับความไม่สมดุลของกระแสในสายนิวทรัลสำหรับการต่อแบบ Split grounded wye.....	28
3.9	ตัวอย่างการต่อตัวเก็บประจุแบบ H configuration.....	29
4.1	โพลีชาร์ตการพิจารณาการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟของตัวกรองแต่ละตัว.....	30
4.2	โพลีชาร์ตการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบกรองปรับคลื่นเดียว.....	31

ภาพที่	หน้า
4.3 โพลีชาร์ตการออกแบบตัวกรองผ่านสูงอันดับสอง.....	32
4.4 โพลีชาร์ตการออกแบบตัวกรองผ่านสูงอันดับสาม.....	33
4.5 โพลีชาร์ตการออกแบบตัวกรองผ่านสูงชนิดซี.....	34
4.6 โพลีชาร์ตการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ต่อแบบ Split wye equal legs ที่ระดับแรงดันจำหน่าย.....	38
4.7 โพลีชาร์ตการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ต่อแบบ Split wye unequal legs ที่ระดับแรงดันจำหน่าย.....	39
4.8 โพลีชาร์ตการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ต่อแบบ Single wye ที่ระดับแรงดันจำหน่าย.....	40
4.9 โพลีชาร์ตการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแบบ Internally fused ที่ระดับแรงดันจำหน่าย.....	43
4.10 โพลีชาร์ตการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ต่อแบบ Split wye equal legs ที่ระดับแรงดันส่ง.....	46
4.11 โพลีชาร์ตการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ต่อแบบ Split wye unequal legs ที่ระดับแรงดันส่ง.....	47
4.12 โพลีชาร์ตการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ต่อแบบ Single wye ที่ระดับแรงดันส่ง.....	48
4.13 โพลีชาร์ตการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแบบ Fuseless ต่อแบบ Split wye ที่ระดับแรงดันส่ง.....	52
4.14 โพลีชาร์ตการทำงานของโปรแกรม.....	57
4.15 หน้าหลักของโปรแกรมออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงสูง.....	60
4.16 ตัวอย่างข้อมูลอินพุตของระบบทดสอบโดยป้อนข้อมูลผ่านโปรแกรม excel.....	61
4.17 หน้าหลักของโปรแกรมออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงสูงขณะใช้งาน.....	62
4.18 หน้าโปรแกรมในส่วนการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก.....	64
4.19 หน้าโปรแกรมในส่วนการออกแบบตัวเก็บประจุแรงสูงแรงดันมากกว่า 20 kV....	65
4.20 หน้าโปรแกรมในส่วนการออกแบบตัวเก็บประจุแรงสูงแรงดันน้อยกว่า 20 kV....	66
4.21 หน้าโปรแกรมหลัก.....	66

ภาพที่	หน้า	
4.22	แผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ.....	67
4.23	ไฟล์อินพุต.....	67
4.24	ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหนดโพลาร์ที่ความถี่หลักมูล.....	68
4.25	กราฟความผิดเพี้ยนของกระแสของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก.....	68
4.26	การเลือกบัลที่ติดตั้งแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก.....	68
4.27	ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหนดโพลาร์ที่ความถี่หลักมูล.....	69
4.28	กราฟความผิดเพี้ยนของแรงดันของบัลที่สนใจซึ่งเป็นผลจากการวิเคราะห์โหนดโพลาร์ที่ความถี่ฮาร์มอนิก.....	69
4.29	การสแกนความถี่ที่บัล 7.....	70
4.30	ปุ่ม “Filter Design” ที่ใช้เปิดหน้าโปรแกรมการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก.....	70
4.31	หน้าโปรแกรมการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก.....	70
4.32	การใส่ข้อมูลอินพุตของการออกแบบตัวกรอง.....	71
4.33	ผลลัพธ์ของการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก.....	71
4.34	หน้าโปรแกรมการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกที่มีแรงดันออกแบบน้อยกว่า 20 kV.....	72
4.35	หน้าโปรแกรมการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกที่มีแรงดันออกแบบมากกว่า 20 kV.....	72
4.36	การเลือกชุดตัวเก็บประจุที่ต่อแบบ Single Wye ในการทดลองใช้ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุเป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง.....	73
4.37	ค่าความจุที่ได้เลือกจากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุ.....	73
4.38	การตรวจสอบภาวะโหนดเกินของตัวเก็บประจุ.....	74
4.39	ผลการตรวจสอบภาวะโหนดเกินของตัวเก็บประจุ.....	74
4.40	การทดสอบเมื่อค่าความจุไฟฟ้าลดลงจากเดิม 5%.....	75
5.1	แผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 13 บัล แรงดันจำหน่าย.....	76
5.2	แผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 13 บัล แรงดันส่ง.....	78
5.3	แผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 13 บัล (แรงดันจำหน่าย) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอยู่ที่บัล 8 (4.16kV).....	81

ภาพที่	หน้า	
5.4	วงจรมมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวกรองฮาร์มอนิก อันดับที่ 5.....	87
5.5	วงจรมมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกโดยใช้ตัวเก็บประจุชนิดสามเฟสในการ ออกแบบ.....	89
5.6	วงจรมมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงอันดับสองกรองฮาร์มอนิก อันดับที่ 11.....	94
5.7	วงจรมมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงอันดับสามกรองฮาร์มอนิก อันดับที่ 11.....	100
5.8	วงจรมมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงชนิดซีกรองฮาร์มอนิก อันดับที่ 11.....	106
5.9	อิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของบัสที่ 8 ซึ่งเป็นบัสที่มีแหล่งกำเนิด ฮาร์มอนิกต่ออยู่ (กรณี 5.1).....	112
5.10	อิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของบัสที่ 3 ซึ่งเป็นบัสที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่ (กรณี 5.1).....	112
5.11	แผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 13 บัส (แรงดันจำหน่าย) แหล่งกำเนิด ฮาร์มอนิกอยู่ที่บัส 3 (13.8kV).....	113
5.12	วงจรมมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวกรองฮาร์มอนิก อันดับที่ 11.....	119
5.13	วงจรมมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงอันดับสองกรองฮาร์มอนิก อันดับที่ 11.....	126
5.14	วงจรมมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงอันดับสามกรองฮาร์มอนิก อันดับที่ 11.....	132
5.15	วงจรมมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงชนิดซีกรองฮาร์มอนิก อันดับที่ 11.....	138
5.16	อิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของบัสที่ 3 ซึ่งเป็นบัสที่มีแหล่งกำเนิด ฮาร์มอนิกและตัวเก็บประจุต่ออยู่ (กรณี 5.2).....	144
5.17	แผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 13 บัส (แรงดันส่ง) แหล่งกำเนิด ฮาร์มอนิกอยู่ที่บัส 7 (33kV).....	145

ภาพที่	หน้า
5.18	160
วงจรมมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยว (a) ชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Split Wye Unequal Leg กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (b) ชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกที่ 7 และ (c) ชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกที่ 11.....	
5.19	166
วงจรมมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (b) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Split Wye Equal Leg กรองฮาร์มอนิกที่ 7 และ (c) แบบผ่านสูงอันดับสองโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Split Wye Unequal Leg กรองฮาร์มอนิกที่ 11.....	
5.20	174
วงจรมมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (b) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Split Wye Unequal Leg กรองฮาร์มอนิกที่ 7 และ (c) แบบผ่านสูงอันดับสามโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Split Wye Equal Leg กรองฮาร์มอนิกที่ 11.....	
5.21	182
แสดงวงจรมมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Split Wye Equal Leg กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (b) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกที่ 7 และ (c) แบบผ่านสูงชนิดซีโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11.....	
5.22	187
อิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของบัสที่ 7 ซึ่งเป็นบัสที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่ (กรณี 5.3).....	
5.23	187
อิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของบัสที่ 9 ซึ่งเป็นบัสที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่ (กรณี 5.3).....	
5.24	188
แผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 13 บัส (แรงดันส่ง) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่อที่บัส 9 (115kV).....	

ภาพที่	หน้า
5.25 แสดงวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (b) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 (c) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11.....	202
5.26 แสดงวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (b) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 (c) แบบผ่านสูงอันดับสองโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11.....	209
5.27 แสดงวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Split Wye Equal Leg (b) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 (c) แบบผ่านสูงอันดับสามโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11.....	217
5.28 แสดงวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Split Wye Equal Leg (b) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 (c) แบบผ่านสูงชนิดซีโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11.....	224
5.29 อิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของบัสที่ 9 ซึ่งเป็นบัสที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกและตัวเก็บประจุต่ออยู่ (กรณี 5.4).....	229
5.30 แผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 13 บัส (แรงดันส่ง) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่อบัส 5 (230kV).....	230
5.31 แสดงวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (b) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 (c) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11.....	240

ภาพที่	หน้า
5.32 แสดงวงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (b) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 (c) แบบผ่านสูงอันดับสองโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11	246
5.33 แสดงวงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (b) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 (c) แบบผ่านสูงอันดับสามโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11.....	253
5.34 แสดงวงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (b) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 (c) แบบผ่านสูงชนิดซีโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11.....	260
5.35 อิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของบัสที่ 5 ซึ่งเป็นบัสที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่ (กรณี 5.5).....	266
5.36 อิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของบัสที่ 9 ซึ่งเป็นบัสที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่ (กรณี 5.5).....	266

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบัน มีการใช้งานอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นเพิ่มมากขึ้น เช่น วงจรเรียงกระแส มอเตอร์ปรับความเร็วรอบ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแบบสวิตชิง เต้าหลอมโลหะ (Arc Furnace) เป็นต้น ซึ่งล้วนแต่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ทำให้แรงดันและกระแสของระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจากรูปไซน์ เป็นสาเหตุให้เกิดปัญหามากมายในระบบไฟฟ้าเช่น อุปกรณ์ไฟฟ้ามีความร้อนสูงขึ้น อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้ากำลังทำงานผิดพลาด การรบกวนระบบการสื่อสาร เป็นต้น วิธีหนึ่งที่เป็นที่นิยมในการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกคือการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแพสซีฟในการกรองฮาร์มอนิก โดยตัวกรองฮาร์มอนิกจะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุดที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่กำหนด เพื่อให้กระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกไหลผ่านตัวกรองฮาร์มอนิกแทนที่จะไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้าและชุดกรองฮาร์มอนิกยังสามารถชดเชยค่ากำลังรีแอกทีฟให้กับระบบไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบให้เหมาะสม

เนื่องจากการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกที่ใช้กับระบบไฟฟ้าแรงสูงนั้นค่อนข้างจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนกว่าการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงต่ำคือในระบบแรงต่ำมักจะใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบความถี่เดียว 1 ชุดหรือมากกว่าในการกรองฮาร์มอนิกก็เพียงพอ ส่วนในระบบไฟฟ้าแรงสูงมีการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกหลากหลายแบบมากขึ้นเช่น แบบผ่านสูงอันดับสอง แบบผ่านสูงอันดับสาม และ แบบผ่านสูงชนิดซี เป็นต้นและมีการใช้ตัวเก็บประจุจำนวนมากในการต่อให้เป็นชุดตัวเก็บประจุที่ใช้กับระบบไฟฟ้าแรงสูง

ด้วยเหตุนี้จึงได้จัดทำวิทยานิพนธ์นี้ขึ้นเพื่อศึกษาการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงสูงและพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการพิจารณาการออกแบบให้ง่ายยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1) เพื่อศึกษาประเภทของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแพสซีฟในระบบไฟฟ้าแรงสูง
- 2) เพื่อออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับใช้ในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงสูง

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงสูงและใช้ในการวิเคราะห์การแก้ปัญหาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ตัวอย่างมีขอบเขตดังนี้

- 1) แบบจำลองของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้คิดเป็นแบบจำลองแบบเชิงเส้น โดยพิจารณาให้ระบบอยู่ในสภาวะสมดุล และคำนวณเป็นค่าต่อเฟส
- 2) ไม่พิจารณาผลของหม้อแปลงที่มีแท็ปและไม่คิดถึงการเปลี่ยนมุมเฟสของกระแสและแรงดันที่ผ่านหม้อแปลง
- 3) การคำนวณโหลดโพลาร์ที่ความถี่หลักมูลจะไม่คิดผลของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส
- 4) การคำนวณฮาร์มอนิกโพลาร์จะพิจารณาว่าแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเป็นแหล่งกำเนิดกระแสอุดมคติ และไม่พิจารณา interharmonic
- 5) ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแพสซีฟที่ใช้พิจารณาในการออกแบบคือ ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยว ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงอันดับสอง แบบผ่านสูงอันดับสาม และ แบบผ่านสูงชนิดซี
- 6) ชุดตัวเก็บประจุที่พิจารณาในการออกแบบคือ แบบ Externally fused Internally fused และ Fuseless

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการงาน

- 1) กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตการศึกษาวิจัย
- 2) ศึกษาการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแพสซีฟชนิดต่าง ๆ
- 3) ศึกษาการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง
- 4) ออกแบบและพัฒนาโปรแกรม
- 5) วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย
- 6) เรียบเรียงผลงานวิจัย พิมพ์ผลงาน และจัดเข้ารูปเล่ม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแพสซีฟชนิดต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้าแรงสูงได้
- 2) สามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาวิเคราะห์ปัญหาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าและเลือกใช้ตัวกรองชนิดต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ประกอบด้วยรายละเอียดของแต่ละบทดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแพสซีฟตัวกรองฮาร์มอนิกที่พิจารณาได้แก่ ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยว ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงอันดับสอง แบบผ่านสูงอันดับสาม และ แบบผ่านสูงชนิดซี โดยจะกล่าวถึงคุณลักษณะของตัวกรองและสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวกรอง

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีของชุดตัวเก็บประจุแรงสูง ได้แก่ ลักษณะเฉพาะของตัวเก็บประจุแรงสูง โครงสร้างของตัวเก็บประจุแรงสูง ลักษณะการต่อชุดตัวเก็บประจุแรงสูง และตัวรีแอคเตอร์สำหรับตัวกรองฮาร์มอนิก

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมสำหรับการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงสูง บทนี้กล่าวถึงการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแต่ละชนิด การออกแบบชุดตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้าแรงสูง การทำงานของโปรแกรม และการออกแบบโปรแกรมสำหรับการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงสูง

บทที่ 5 กล่าวถึงตัวอย่างการวิเคราะห์และการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก โดยใช้ระบบทดสอบ 13 บัส ระดับแรงดันจำหน่ายและระดับแรงดันส่ง โดยทำการทดสอบทั้งหมด 5 กรณีดังนี้ ระบบทดสอบ 13 บัสแรงดันจำหน่ายแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอยู่ที่บัส 8 (4.16 kV) ระบบทดสอบ 13 บัสแรงดันจำหน่ายแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอยู่ที่บัส 3 (13.8 kV) ระบบทดสอบ 13 บัสแรงดันส่งแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอยู่ที่บัส 7 (33 kV) ระบบทดสอบ 13 บัสแรงดันส่งแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอยู่ที่บัส 9 (115 kV) และ ระบบทดสอบ 13 บัสแรงดันส่งแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอยู่ที่บัส 5 (230 kV)

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ บทนี้เป็นการสรุปผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงสูงในบทที่ 5 และข้อเสนอแนะสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของโปรแกรมสำหรับการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงสูง

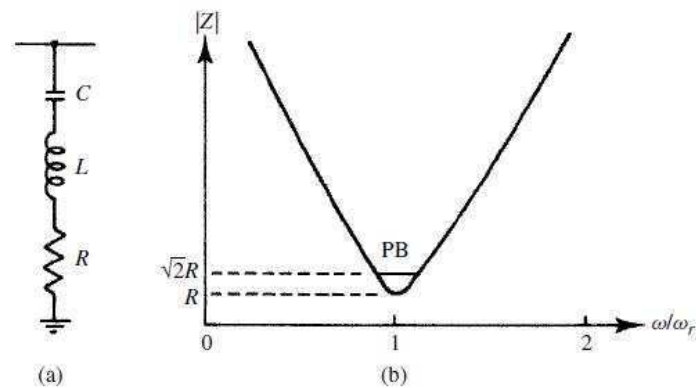
บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแพสซีฟ

ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ สามารถสร้างได้โดยใช้ส่วนประกอบหลักสามชนิด คือ ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และ ตัวต้านทาน นำมาต่อกันเพื่อทำให้เป็นวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม หรือแบบขนานเพื่อทำให้ได้วงจรที่มีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ำมากหรือสูงมาก ณ ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance Frequency) หรือความถี่ปรับคลื่น (Tuning frequency) ตัวกรองฮาร์มอนิกจะมีคุณสมบัติเป็นตัวต้านทานที่ความถี่ปรับคลื่น นั่นคือ ตัวกรองฮาร์มอนิกจะมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ ค่าความต้านทาน ที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ปรับคลื่นจะมีคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุ และตัวกรอง จะมีคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำเมื่อความถี่มีค่าสูงกว่าความถี่ปรับคลื่น ตัวกรองฮาร์มอนิกที่นิยม นำมาใช้ในทางปฏิบัติคือ แบบปรับคลื่นเดี่ยว (Single tuned or Notch Filter) และ แบบผ่านสูง (High pass or Damped Filter)

2.1. ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยว [1-2]

ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวประกอบไปด้วยการต่ออนุกรมกันของ ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และ ตัวเก็บประจุ โดยทั่วไปตัวต้านทานมักจะเป็นค่าความต้านทาน ภายในขดลวดตัวเหนี่ยวนำ แสดงดังรูปที่ 2.1 โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์และค่าอิมพีแดนซ์ของ ตัวกรองนี้เป็นไปตามสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 (a) ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบกรองผ่านปรับคลื่นเดี่ยว (b) ความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์กับความถี่ [1]

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.1)$$

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (2.2)$$

โดยที่ f_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์ (Hz)

L คือ ค่าความเหนี่ยวนำ (H)

C คือ ค่าความจุไฟฟ้า (F)

ω คือ ความถี่เชิงมุม (rad/s)

โดยทั่วไปตัวกรองชนิดนี้มีค่าตัวประกอบคุณภาพของตัวกรอง (Q-Factor) อยู่ในช่วง 15-80 ซึ่งค่าตัวประกอบคุณภาพของตัวกรองคือความสามารถของตัวกรองที่จะดูดกลืนพลังงานที่ความถี่ปรับคลื่น เป็นแฟกเตอร์ที่ใช้กำหนดความคม (Sharpness) ในการจูนของตัวกรอง ตัวกรองที่มี Q-Factor สูงนั้นคือ ตัวกรองจะมีความคมในการจูนมาก มักใช้ในการจูนเพื่อกรองฮาร์มอนิกที่ความถี่ใดความถี่หนึ่ง โดยค่าตัวประกอบคุณภาพของตัวกรองถูกนิยามไว้คืออัตราส่วนระหว่างค่ารีแอกแตนซ์ (ของตัวเหนี่ยวนำหรือตัวเก็บประจุ) ที่ความถี่เรโซแนนซ์กับค่าความต้านทานของตัวกรอง ดังสมการที่ 2.3

$$Q_f = \frac{X_0}{R} = \frac{\omega_0}{\omega_1 - \omega_2} = \frac{\omega_0}{PB} \quad (2.3)$$

โดยที่ X_0 คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำหรือตัวเก็บประจุที่ความถี่เรโซแนนซ์

ω_0 เป็นความถี่เชิงมุมที่ความถี่ปรับคลื่น (rad/s)

ω_1 และ ω_2 คือความถี่ที่ ± 3 dB ของ ω_0

PB คือ ความกว้างแถบการกรอง (Pass Band, rad/s)

เมื่อกำหนดให้ h เป็นอัตราส่วนระหว่างความถี่ฮาร์มอนิกกับความถี่หลักมูลของระบบ ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำและรีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุจะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ

$$X_{Lh} = h\omega L \quad (2.4)$$

$$X_{Ch} = \frac{1}{(h\omega C)} \quad (2.5)$$

ถ้ากำหนดให้ค่าความต้านทานเป็นศูนย์ ค่าอิมพีแดนซ์ในสมการที่ 2.2 จะมีค่าเป็นศูนย์ที่ความถี่ปรับคลื่น เมื่อ

$$X_{Lh} = X_{Ch} \quad (2.6)$$

แทนสมการที่ 2.4 และ 2.5 ในสมการที่ 2.6 จะได้ความสัมพันธ์ของอันดับฮาร์มอนิกกับค่ารีแอกแตนซ์ดังสมการที่ 2.7

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

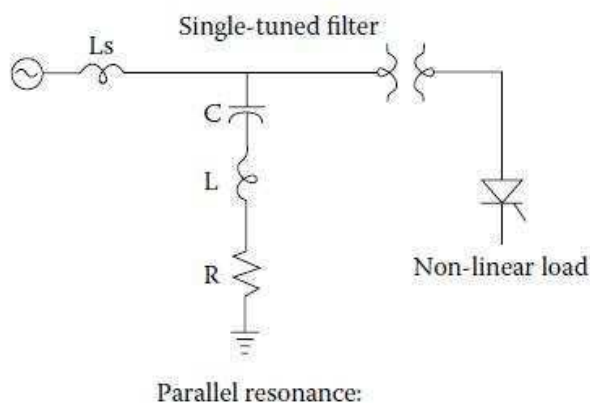
$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{100}{\%X_L}} \quad (2.7)$$

จากสมการที่ 2.2 เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองฮาร์มอนิกเท่านั้น เมื่อเรานำตัวกรองฮาร์มอนิกไปติดตั้งกับระบบไฟฟ้าจะทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์แบบขนานเกิดขึ้นซึ่งจะมีค่าต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ของตัวกรองฮาร์มอนิกเล็กน้อยเป็นไปตามสมการที่ 2.8 ดังรูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการติดตั้งตัวกรองขนานเข้ากับระบบไฟฟ้าและรูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่

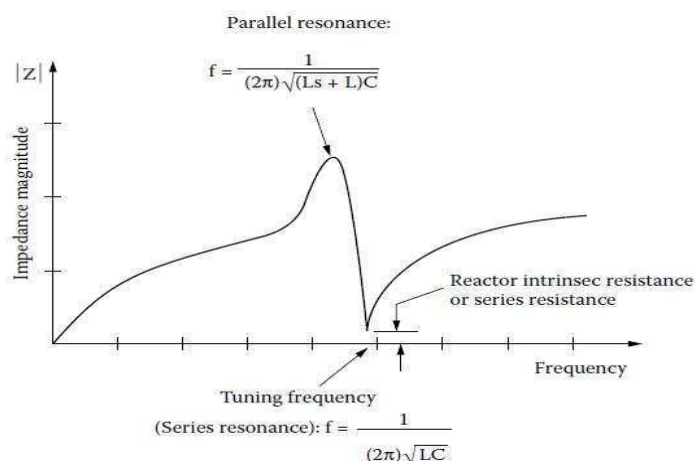
$$f_{r-p} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_S + L)C}} \quad (2.8)$$

โดยที่ f_{r-p} คือความถี่เรโซแนนซ์แบบขนาน

L_S คือความเหนี่ยวนำของระบบไฟฟ้า



รูปที่ 2.2 ลักษณะการติดตั้งตัวกรองเข้ากับระบบไฟฟ้า [2]



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับความถี่ของรูปที่ 2.2 [2]

จากสมการที่ 2.8 จะเห็นว่าความถี่เรโซแนนซ์แบบขนานนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำของระบบไฟฟ้าเพียงค่าเดียว เมื่อความเหนี่ยวนำของระบบเปลี่ยนแปลงไปก็จะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์แบบขนานเปลี่ยนไปด้วย ตัวอย่างเช่นมีการติดตั้งหม้อแปลงเพิ่มขึ้นที่สถานีไฟฟ้า หรือการเปิดวงจรหม้อแปลงเพื่อบำรุงรักษา เป็นต้น หรือในอีกกรณีหนึ่งคือการเพิ่มตัวเก็บประจุเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังที่บริเวณโหลดไม่เป็นเชิงเส้นก็จะส่งผลกระทบต่อค่าความถี่เรโซแนนซ์แบบขนานเช่นกัน จากที่กล่าวมาหากทำการจูนความถี่เรโซแนนซ์แบบอนุกรมของตัวกรองให้พอดีกับความถี่ฮาร์มอนิกที่ต้องการจะกรอง ปัญหาที่ระบบอาจจะได้รับผลกระทบจากเรโซแนนซ์แบบขนานอาจเกิดขึ้นได้เนื่องจาก เมื่อใช้งานตัวกรองไปนานๆ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุมีการเปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องมาจากผลของอุณหภูมิและอายุการใช้งาน หรือในกรณีฟิวส์ภายในตัวเก็บประจุเกิดความเสียหายทำให้ค่าความจุไฟฟ้ารวมลดลง จึงทำให้ความถี่เรโซแนนซ์อนุกรมของตัวกรองมีค่าเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งความถี่เรโซแนนซ์ขนานตรงกันกับความถี่ฮาร์มอนิกพอดี ก็จะทำให้เกิดการขยายตัวของแรงดันขึ้นทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ในระบบ ดังนั้นในทางปฏิบัติมักแก้ปัญหาเรโซแนนซ์ ดังกล่าวโดยการเลื่อนความถี่ที่ต้องการจูนให้มีค่าน้อยกว่าความถี่ฮาร์มอนิกที่ต้องการกรองเล็กน้อย โดยยอมให้คุณสมบัติในการกรองเปลี่ยนไปบ้างโดยทั่วไปประมาณ 3-5% [2]

- ข้อดีของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบกรองปรับคลื่นเดียว

1. เป็นตัวกรองฮาร์มอนิกที่มีโครงสร้างอย่างง่าย เพราะมีส่วนประกอบเพียงสองชนิดเท่านั้นคือ ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ โดยที่ตัวต้านทานในวงจรสมมูลคือ ความต้านทานของขดลวดตัวเหนี่ยวนำ

2. เป็นตัวกรองที่มีค่าตัวประกอบคุณภาพของตัวกรอง (Q-Factor) สูง ทำให้ได้ตัวกรองฮาร์มอนิกที่มีอัตราลดทอนกระแสฮาร์มอนิกที่เจาะจงไว้สูง
 3. มีอัตราการสูญเสียต่ำ เพราะการสูญเสียส่วนใหญ่เกิดในตัวเหนี่ยวนำ
 4. ต้องการการบำรุงรักษาต่ำ เนื่องจากใช้ส่วนประกอบน้อย มีโครงสร้างอย่างง่าย
- **ข้อเสียของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบกรองปรับคลื่นเดียว**
 1. ต้องใช้ตัวกรองหลายตัว เพื่อกรองกระแสฮาร์มอนิกหลายๆ อันดับพร้อมๆ กันเนื่องจากตัวกรองแต่ละตัวจะทำหน้าที่กรองกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่เจาะจงไว้เท่านั้น ซึ่งจะกรองฮาร์มอนิกอันดับอื่นๆ ได้น้อย
 2. เนื่องจากตัวกรองมีค่าตัวประกอบคุณภาพสูง ทำให้มีความกว้างแถบในการกรองแคบ จึงไวต่อการแปรเปลี่ยนของความถี่หลักมูลของระบบ และการแปรเปลี่ยนค่าส่วนประกอบของตัวกรอง
 3. มีความจำเป็นต้องปรับตั้งค่าความถี่เรโซแนนซ์ในภาคสนาม ทำให้ต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีแทป ราคาของตัวเหนี่ยวนำจึงแพงกว่าปกติ

สมการที่ใช้ในการออกแบบตัวกรอง

เมื่อตัวกรองถูกจูนที่อันดับฮาร์มอนิก h ดังนั้นที่ความถี่หลักมูลค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ (X_C) จะมีค่ามากกว่าค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ (X_L) หรืออาจกล่าวได้ว่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_C) จะมีค่ามากกว่าแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (V_L) และถ้าตัวกรองมีค่าตัวประกอบคุณภาพสูง ดังนั้นแรงดันของตัวกรองคือ

$$V_C = V_L + V_S \quad (2.9)$$

โดยที่ V_C , V_L และ V_S คือแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และแรงดันของระบบตามลำดับ (กำหนดเป็นแรงดันระหว่างสาย)

กำลังรีแอกทีฟของตัวกรองคือ

$$\begin{aligned} Q_{f_{comp}} &= \frac{V_S^2}{X_C - X_L} \\ &= \frac{V_S^2}{Z_F} \end{aligned} \quad (2.10)$$

เมื่อ X_C , X_L คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่หลักมูลตามลำดับ

Z_F คือ อิมพีแดนซ์ของตัวกรอง

สำหรับที่อันดับฮาร์มอนิกที่ความถี่ปรับคลื่น h

$$X_0 = hX_L = \frac{X_C}{h}$$

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} \quad \text{และ} \quad V_L = \frac{V_C}{h^2}$$

ดังนั้น

$$Q_{f_{comp}} = \frac{V_S^2}{X_C \left(1 - \frac{1}{h^2}\right)}$$

$$= \frac{V_S^2}{X_C} \left(\frac{h^2}{h^2 - 1}\right) \quad (2.11)$$

$$= Q_{cr} \left(\frac{V_S}{V_{cr}}\right)^2 \left(\frac{h^2}{h^2 - 1}\right)$$

$$Q_{cr} = Q_{f_{comp}} \left(\frac{V_{cr}}{V_S}\right)^2 \left(\frac{h^2 - 1}{h^2}\right) \quad (2.12)$$

เมื่อ Q_{cr} คือ กำลังรีแอกทีฟพิกัดของตัวเก็บประจุ (VAR)

V_{cr} คือ แรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ (V)

และ

$$V_C - V_L = V_C \left(1 - \frac{1}{h^2}\right) = V_S$$

$$V_C = \left(\frac{h^2}{h^2 - 1}\right) V_S \quad (2.13)$$

การรับโหลดที่ความถี่หลักมูล

ตัวเก็บประจุ

$$\frac{V_C^2}{X_C} = \left(\frac{V_S^2}{X_C}\right) \left(\frac{h^2}{h^2 - 1}\right)^2 \quad (2.14)$$

ตัวเหนี่ยวนำ

$$\frac{V_L^2}{X_L} = \left(\frac{V_C^2}{h^2}\right) \left(\frac{h^2}{X_C}\right) = \frac{V_C^2}{h^2 X_C} \quad (2.15)$$

การรับโหลดที่ความถี่ฮาร์มอนิก

$$Q_{ch} = I_h^2 \frac{X_C}{h} \quad (2.16)$$

การรับโหลดที่ความถี่ฮาร์มอนิกของตัวเก็บประจุจะเท่ากับตัวเหนี่ยวนำเนื่องจากค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุเท่ากับค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ฮาร์มอนิกที่จูน

กระแสที่ความถี่หลักมูล

$$I_1 = \frac{Q_{f_{comp}}}{\sqrt{3}V_S} \quad (2.17)$$

กำลังสูญเสียรวม

$$P = (I_1^2 + I_h^2)R \quad (2.18)$$

สมการที่ใช้คำนวณค่าองค์ประกอบของตัวกรอง

$$C = \frac{Q_{cr}}{2\pi f_{cr}^2} \quad (2.19)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 C} \quad (2.20)$$

$$R = \frac{2\pi f_r L}{Q_F} \quad (2.21)$$

เมื่อ Q_F คือ ตัวประกอบคุณภาพของตัวกรอง

Q_{cr} คือ กำลังรีแอกทีฟพิกัดของตัวเก็บประจุ (VAR)

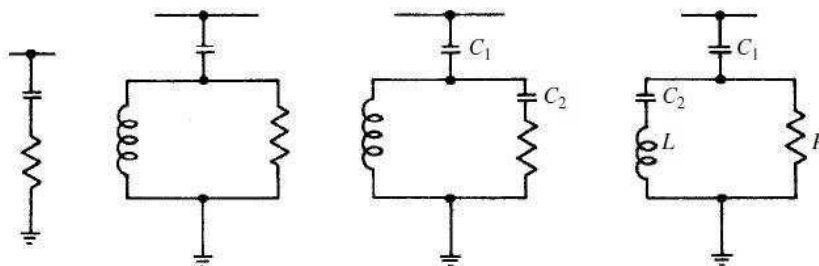
V_{cr} คือ แรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ (V)

f คือ ความถี่หลักมูล (Hz)

f_r คือ ความถี่ปรับคลื่น (Hz)

2.2. ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบกรองผ่านสูง

ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบกรองผ่านสูงมีหลากหลายรูปแบบคือ ตัวกรองผ่านสูงอันดับหนึ่ง ตัวกรองผ่านสูงอันดับสอง ตัวกรองผ่านสูงอันดับสาม และ ตัวกรองผ่านสูงชนิดซี โดยตัวกรองชนิดนี้ประกอบไปด้วย ตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ และตัวต้านทานหน่วง ซึ่งทั้งสามส่วนทำการต่อกันในรูปแบบต่าง ๆ ตามรูปแบบของตัวกรอง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูง (a) แบบผ่านสูงอันดับหนึ่ง (b) แบบผ่านสูงอันดับสอง (c) แบบผ่านสูงอันดับสาม (d) แบบผ่านสูงชนิดซี [1]

ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบนี้มีตัวต้านทานหน่วงเพื่อลดค่าตัวประกอบคุณภาพของตัวกรองให้ต่ำลง เพื่อเพิ่มความกว้างแถบการกรองให้กว้างขึ้นทำให้สามารถกรองฮาร์มอนิกได้หลายๆ อันดับพร้อมๆ กัน โดยทั่วไปค่าตัวประกอบคุณภาพของตัวกรองชนิดนี้จะอยู่ในช่วง 0.5-5 โดยค่าตัวประกอบคุณภาพคำนวณได้ดังนี้ [1]

$$Q_f = \frac{R}{X_0} = \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \quad (2.22)$$

X_0 คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่เรโซแนนซ์

2.2.1 ตัวกรองผ่านสูงอันดับหนึ่ง [3]

ตัวกรองชนิดนี้ประกอบด้วยตัวเก็บประจู่ต่ออนุกรมกับตัวต้านทานดังรูปที่ 2.4 (a) โดยมีค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองแสดงดังสมการที่ 2.23

$$Z = R + \frac{1}{j\omega C} \quad (2.23)$$

ตัวกรองชนิดนี้จะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำที่ความถี่สูงๆ เนื่องจากพฤติกรรมของตัวเก็บประจู่ และเนื่องจากตัวกรองนี้ไม่มีตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ตัวต้านทานกลายเป็นตัวทำหน้าที่จำกัดกระแสที่ไหลเข้าตัวกรองผ่านตัวเก็บประจู่ กรณีที่ความถี่สูงค่าอิมพีแดนซ์ต่ำจะทำให้ตัวเก็บประจู่จำเป็นต้องมีขนาดใหญ่ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนและอาจเกิดการชดเชยกำลังรีแอกทีฟให้กับระบบมากเกินไป (Overcompensation) ส่วนในกรณีที่ความถี่หลักมูลกระแสทั้งหมดที่ผ่านตัวกรองก็ไหลผ่านตัวต้านทานด้วยทำให้มีกำลังสูญเสียสูง โดยทั่วไปจึงไม่นิยมใช้ตัวกรองชนิดนี้เนื่องจากมีข้อเสียดังกล่าว

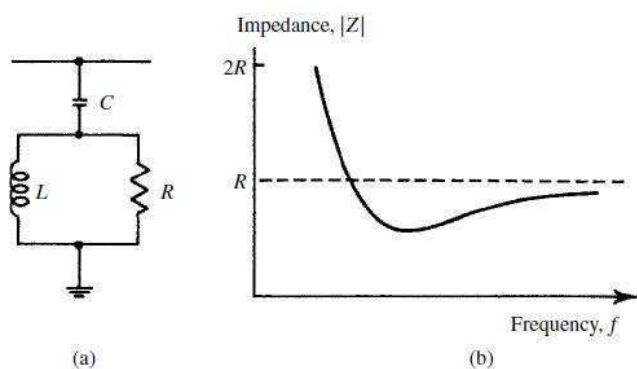
2.2.2 ตัวกรองผ่านสูงอันดับสอง [3]

ตัวกรองชนิดนี้ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำต่อขนานกับตัวต้านทานแล้วต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุดังรูปที่ 2.4 (b) ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองแสดงดังสมการที่ 2.24

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

ตัวกรองชนิดนี้จะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุดที่ความถี่ที่ปรับคลื่นเนื่องจากทำการจูนให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมของตัวเก็บประจุกับตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่นี้ กรณีที่ความถี่หลักมูลค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าน้อยทำให้กระแสส่วนใหญ่ที่ไหลผ่านตัวกรองจะผ่านตัวเหนี่ยวนำมากกว่าผ่านตัวต้านทานทำให้กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นน้อยกว่าตัวกรองอันดับหนึ่งซึ่งพฤติกรรมของตัวกรองชนิดนี้จะคล้ายๆ กับตัวกรองปรับคลื่นเดียว กรณีที่ความถี่สูงกว่าความถี่ปรับคลื่น ค่ารีแอกแตนซ์ตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าแปรผันตามความถี่ทำให้มีค่าสูงขึ้น กระแสที่ไหลผ่านตัวกรองก็จะไหลผ่านตัวต้านทานมากกว่าที่จะผ่านตัวเหนี่ยวนำทำให้ตัวกรองชนิดนี้มีพฤติกรรมคล้ายๆ ตัวกรองอันดับหนึ่ง ตัวกรองชนิดนี้ถือว่ามีคุณสมบัติในการกรองดีที่สุดในทางปฏิบัตินิยมใช้มากที่สุด แต่ข้อเสียคือมีกำลังสูญเสียที่ความถี่หลักมูลมากกว่าตัวกรองชนิดอันดับสามและชนิดสี่

หลักการออกแบบตัวกรองชนิดนี้คือทำการออกแบบตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมที่ความถี่ที่ต้องการจูนโดยใช้สมการของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดียว และทำการคำนวณค่าความต้านทานห้วงจากสมการที่ 2.22 เพื่อนำไปขนานกับตัวเหนี่ยวนำจะทำให้ตัวกรองมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำที่ความถี่สูงเป็นไปตามรูปที่ 2.5 (b)



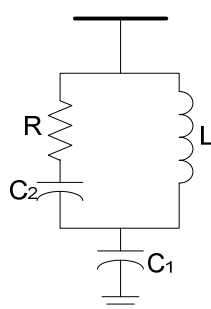
รูปที่ 2.5 (a) ตัวกรองผ่านสูงอันดับสอง (b) ความสัมพันธ์ของอิมพีแดนซ์กับความถี่ [1]

2.2.3 ตัวกรองผ่านสูงอันดับสาม [8]

ตัวกรองชนิดนี้ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำต่อขนานกับตัวต้านทานซึ่งอนุกรมกับตัวเก็บประจุ (C_2) และต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ (C_1) ดังรูปที่ 2.4 (c) ส่วนค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดนี้ แสดงดังสมการที่ 2.25

$$Z = \frac{\omega^4 R(LC_2)^2 + j[\omega^3 R^2 LC_2^2 - \omega L(\omega^2 LC_2 - 1)]}{\omega^2 (RC_2)^2 + (\omega^2 LC_2 - 1)^2} + \frac{1}{j\omega C_1} \quad (2.25)$$

ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดนี้มีลักษณะคล้ายๆ กับตัวกรองอันดับสองแต่มีตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งตัว (C_2) โดยพฤติกรรมของตัวกรองนี้จะคล้ายกับตัวกรองอันดับสองคือ ตัวกรองจะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุดเมื่อทำการจูนตัวเก็บประจุ (C_1 และ C_2) กับตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ที่ต้องการ ในกรณีที่ความถี่หลักมูล ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าน้อยและค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ (C_2) จะมีค่ามาก ทำให้กระแสส่วนใหญ่ที่ไหลผ่านตัวกรองจะผ่านตัวเหนี่ยวนำมากกว่าผ่านตัวต้านทานที่อนุกรมอยู่กับตัวเก็บประจุ (C_2) ทำให้กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นน้อยกว่าตัวกรองอันดับสอง ซึ่งพฤติกรรมของตัวกรองขณะนี้คล้ายกับตัวกรองปรับคลื่นเดี่ยว ส่วนกรณีที่ความถี่สูง ค่ารีแอกแตนซ์ตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากแปรผันตามความถี่ กระแสที่ไหลผ่านตัวกรองก็จะไหลผ่านตัวต้านทานที่อนุกรมอยู่กับตัวเก็บประจุ (C_2) มากกว่าที่จะผ่านตัวเหนี่ยวนำทำให้ตัวกรองชนิดนี้มีพฤติกรรมคล้ายตัวกรองอันดับหนึ่ง จะเห็นว่าข้อดีของตัวกรองผ่านสูงอันดับสามก็คือการลดกำลังสูญเสียที่ความถี่หลักมูลให้น้อยลงกว่าตัวกรองอันดับสองโดยการเพิ่ม C_2



รูปที่ 2.6 ตัวกรองผ่านสูงอันดับสาม

จาก [8] กำหนดให้ C_1 และ C_2 มีค่าเท่ากันคือเท่ากับ C ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ในสมการที่ 2.25 เป็นดังนี้

$$Z = \frac{\omega^4 R(LC)^2 + j[\omega^3 R^2 LC^2 - \omega L(\omega^2 LC - 1)]}{\omega^2 (RC)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2} + \frac{1}{j\omega C} \quad (2.26)$$

จากกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวกรอง ที่ความถี่หนึ่ง ๆ ที่ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งก็คือความถี่ปรับคลื่นของตัวกรอง ดังสมการที่ 2.27

$$\frac{\omega^3 R^2 L C^2 - \omega L (\omega^2 L C - 1)}{\omega^2 (RC)^2 + (\omega^2 L C - 1)^2} - \frac{1}{\omega C} = 0 \quad (2.27)$$

จากสมการที่ 2.27 สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$(\omega^2 L C - 1)[\omega^2 (RC)^2 - 2\omega^2 L C + 1] = 0$$

กำหนดให้

$$\omega_H = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.28)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} \quad (2.29)$$

$$m = \left(\frac{\omega_0}{\omega_H} \right)^2 = \frac{L}{R^2 C} \quad (2.30)$$

ω_H คือ ความถี่ปรับคลื่นเชิงมุม (rad/s)

ω_0 และ m คือ ตัวแปรที่แนะนำขึ้นมาใหม่จาก [8]

เมื่อ $\omega = \omega_H$ ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองจะเหลือเพียงค่าความต้านทานเท่านั้นดังสมการที่ 2.31

$$Z(\omega_H) = r(\omega_H) = \frac{\omega_H^2 L^2}{R} = \frac{L}{RC} = mR \quad (2.31)$$

และจะได้ค่าตัวประกอบคุณภาพของตัวกรองดังสมการที่ 2.32

$$Q_f = \frac{R}{h\omega_1 L} = h\omega_1 C R = \frac{\omega_H}{\omega_0} = \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (2.32)$$

เมื่อแทนสมการที่ 2.28 และ 2.32 ลงในสมการที่ 2.26 จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เชิงมุมหลักมูล ดังสมการที่ 2.33

$$Z(\omega_1) = \frac{R}{Q_f^2 h^2 + (h^2 - 1)^2} + j \frac{(1 - h^2)(Q_f^2 + h^2 - 2)}{[Q_f^2 h^2 + (h^2 - 1)^2] \omega_1 C} \quad (2.33)$$

เมื่อ $h \geq 3$ ค่าความต้านทานของสมการที่ 2.33 มีค่าน้อยมากทำให้สมการที่ 2.33 เปลี่ยนแปลงไปดังสมการที่ 2.34

$$Z(\omega_1) \approx j \frac{(1-h^2)(Q_f^2 + h^2 - 2)}{[Q_f^2 h^2 + (h^2 - 1)^2] \omega_1 C} \approx j \frac{2-h^2}{(h^2 - 1) \omega_1 C} \approx \frac{V_S^2}{j Q_{comp}} \quad (2.34)$$

V_S คือแรงดันระบบไฟฟ้า

Q_{comp} คือกำลังรีแอกทีฟที่ฟีดแบ็คเข้าระบบไฟฟ้า

แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_1 หาได้จากสมการที่ 2.35

$$V_{C1} = \left(\frac{h^2 - 1}{h^2 - 2} \right) V_S \quad (2.35)$$

แรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_2 หาได้จากสมการที่ 2.36

$$\begin{aligned} V_{C2} &= \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{X_C} \right)^2}} \right) V_L \\ &= \frac{V_S}{(h^2 - 2)} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{X_C} \right)^2}} \right) \end{aligned} \quad (2.36)$$

กำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุ C_1 หาได้จากสมการที่ 2.37

$$\begin{aligned} Q_{comp} &= \frac{V_S^2}{X_{C1}} \left(\frac{h^2 - 1}{h^2 - 2} \right) \\ &= Q_{cr,c1} \left(\frac{V_S}{V_{cr}} \right)^2 \left(\frac{h^2 - 1}{h^2 - 2} \right) \\ Q_{cr,c1} &= Q_{comp} \left(\frac{V_{cr}}{V_S} \right)^2 \left(\frac{h^2 - 2}{h^2 - 1} \right) \end{aligned} \quad (2.37)$$

กำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุ C_2 หาได้จากสมการที่ 2.38

$$Q_{cr,c2} = \frac{V_{cr,c2}^2}{X_{c2}} \quad (2.38)$$

2.2.4 ตัวกรองผ่านสูงชนิดซี [9]

ตัวกรองชนิดนี้ประกอบด้วยตัวต้านทานต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำซึ่งอนุกรมอยู่กับตัวเก็บประจุ (C_2) แล้วต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ (C_1) ดังรูปที่ 2.4 (d) ส่วนค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองแสดงดังสมการที่ 2.39

$$Z = \frac{R(\omega^2 LC_2 - 1)^2 + jR^2 \omega C(\omega^2 LC_2 - 1)}{(R\omega C_2)^2 + (\omega^2 LC_2 - 1)^2} + \frac{1}{j\omega C_1} \quad (2.39)$$

ตัวกรองชนิดนี้จะมีคุณสมบัติอยู่ระหว่างตัวกรองอันดับสองและอันดับสาม โดยพฤติกรรมของตัวกรองเป็นดังนี้ ที่ความถี่หลักมูลตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (C_2) ถูกจูนให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานน้อยมากที่ความถี่หลักมูลจึงทำให้เกิดกำลังสูญเสียต่ำ ซึ่งพฤติกรรมของตัวกรองชนิดนี้แทนด้วยตัวเก็บประจุ (C_1) ตัวเดียว กรณีที่ความถี่เพิ่มขึ้นตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ($C_1 + C_2$) ถูกจูนที่ความถี่ที่ต้องการทำให้ตัวกรองมีพฤติกรรมเป็นตัวกรองปรับคลื่นเดียว กรณีที่ความถี่สูงขึ้นของตัวเหนี่ยวนำจะมีค่ารีแอคแตนซ์เพิ่มมากขึ้นทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานมากกว่าที่จะไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ ทำให้ตัวกรองมีพฤติกรรมคล้ายๆ เป็นตัวกรองอันดับหนึ่ง จะเห็นว่าข้อดีของตัวกรองชนิดนี้ก็คือจะมีค่ากำลังสูญเสียต่ำที่ความถี่หลักมูล แต่ก็มีข้อเสียคือตัวกรองชนิดนี้มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่หลักมูลและการเบี่ยงเบนค่าส่วนประกอบของตัวกรองมากกว่าตัวกรองผ่านสูงชนิดอื่น

จาก [9] แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของตัวกรองผ่านสูงชนิดซีกับตัวกรองฮาร์มอนิกแบบกรองปรับคลื่นเดียวว่ามีความใกล้เคียงกัน ทำให้การออกแบบตัวกรองชนิดนี้สามารถทำได้โดยเริ่มจากการออกแบบให้เป็นตัวกรองฮาร์มอนิกแบบกรองปรับคลื่นเดียวก่อนคือคำนวณค่าตัวเก็บประจุ (C) และตัวเหนี่ยวนำ (L) ที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ที่ต้องการจูน จากรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าตัวเก็บประจุ (C) ของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดียวมีความสัมพันธ์กับตัวเก็บประจุของตัวกรองชนิดซีตามสมการที่ 2.40

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (2.40)$$

และตัวเก็บประจุ (C_2) จะต้องจูนกับตัวเหนี่ยวนำ (L) ที่ความถี่หลักมูล ทำให้ C_2 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.41

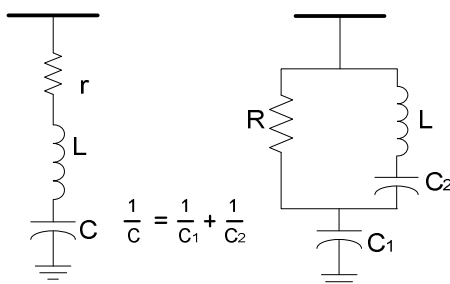
$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi f C_2} \quad (2.41)$$

เมื่อ f คือความถี่หลักมูล

จากสมการที่ 2.39 ที่ความถี่หลักมูลจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการที่ 2.42

$$Z(\omega_{fund}) = \frac{1}{j\omega C_1} = \frac{V_S^2}{jQ_{comp}} \quad (2.42)$$

จะได้ว่า $V_{c1} = V_s$ (2.43)



รูปที่ 2.7 การเทียบค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบกรองปรับคลื่นเดียวกับตัวกรองชนิดซี

จากสมการที่ 2.11 ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุจะเป็นค่ารวมระหว่างรีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ C_1 และรีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ C_2 ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหา ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำได้ตามสมการที่ 2.7 และค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำที่ได้ี้จะมีค่าเท่ากับค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ C_2 ตามสมการที่ 2.41 ทำให้สามารถหาค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุ C_2 ได้ ส่วนในการคำนวณหาค่าความต้านทานหน่วงสามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 2.22

ค่าแรงดันที่ตัวเก็บประจุ C_2 หาได้จากสมการที่ 2.44

$$\begin{aligned} V_{C2} &= V_L = \frac{V_C}{h^2} \\ V_{C2} &= \frac{V_{C1} + V_{C2}}{h^2} \\ V_{C2} &= \frac{V_{C1}}{(h^2 - 1)} \end{aligned} \quad (2.44)$$

ค่ากำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุ C_1

$$\begin{aligned} Q_{comp} &= \frac{V_S^2}{X_{C1}} = \frac{V_S^2}{\frac{(V_{cr,c1})^2}{Q_{cr,c1}}} \\ Q_{cr,c1} &= Q_{comp} \times \left(\frac{V_{cr,c1}}{V_S} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.45)$$

ค่ากำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุ C_2

$$Q_{cr,c2} = \frac{V_{cr,c2}^2}{X_{c2}} \quad (2.46)$$

- ข้อดีของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบกรองผ่านสูง

1. มีประสิทธิภาพสูงในการกรองกระแสฮาร์มอนิกได้หลายๆ อันดับพร้อมๆ กัน เนื่องจากมีความกว้างแถบในการกรองกว้าง

2. สมรรถนะในการทำงานมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความถี่หลักมูล และค่าของส่วนประกอบของตัวกรอง

3. กำลังสูญเสียที่ความถี่หลักมูลในตัวต้านทานหน่วงในตัวกรองชนิดซีและตัวกรองอันดับสามมีค่าต่ำ

4. ในการใช้งานตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดียว มักจะส่งผลให้เกิดการเรโซแนนซ์แบบขนานระหว่างตัวกรองกับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่ที่จูนไว้หรือที่ความถี่ระหว่างของตัวกรองที่ทำการจูนไว้ (กรณีมีตัวกรองหลายตัว) ในกรณีนี้การใช้ตัวกรองผ่านสูงหนึ่งชุดหรือมากกว่าจึงเป็นทางเลือกที่นิยมมากกว่า

- ข้อเสียของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบกรองผ่านสูง

1. เพื่อให้จะให้ความสามารถในการกรองฮาร์มอนิกคล้ายกับตัวกรองแบบปรับคลื่นเดียว ตัวกรองจะต้องออกแบบให้มีพิกัดกำลัง (VA) ที่ความถี่หลักมูลสูงกว่า แม้ว่าอาจจะมีความสามารถในการกรองอยู่ในระดับที่ต้องการโดยที่ค่ากำลังงานรีแอกทีฟที่ต้องการชดเชยต่อระบบยังไม่เกินระดับที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปแล้วค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุดของตัวกรองชนิดนี้จะสูงกว่าแบบปรับคลื่นเดียวที่ความถี่ที่จูนไว้เสมอ

2. ค่ากำลังสูญเสียที่ตัวต้านทานและในตัวเหนี่ยวนำปกติจะมีค่าสูงกว่า เมื่อเทียบกับตัวกรองแบบปรับคลื่นเดียว

3. ตัวกรองชนิดซีและตัวกรองอันดับสาม จะมีสมรรถนะในการกรองกระแสฮาร์มอนิกต่ำกว่าตัวกรองอันดับสอง

4. พิกัดของตัวต้านทานหน่วงจะต้องสูงพอที่จะรับผลกระทบจากการเกิดการดีจูนของตัวกรอง

5. เป็นตัวกรองที่เริ่มมีความซับซ้อนมากขึ้น เนื่องจากใช้ส่วนประกอบที่มีจำนวนมากกว่า

6. สำหรับตัวกรองผ่านสูงชนิดซี อาจจะต้องใช้ตัวเหนี่ยวนำชนิดที่มีแทปเพื่อปรับตั้งความถี่เรโซแนนซ์ในภาคสนาม เพื่อให้ถูกต้องตรงกับความถี่หลักมูล จึงทำให้มีราคาแพงขึ้น

บทที่ 3

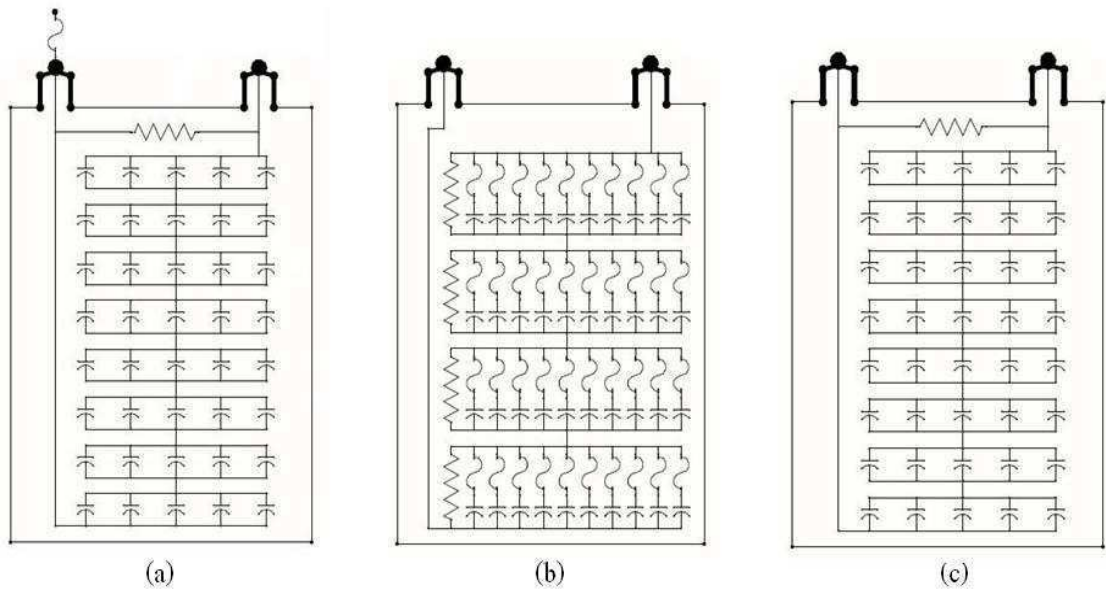
หลักการและทฤษฎีของชุดตัวเก็บประจุแรงสูง

3.1 ตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้าแรงสูง [13-16]

ส่วนประกอบอย่างง่ายของตัวเก็บประจุประกอบด้วยแผ่นอิเล็กโทรดบาง ๆ วางซ้อนทับกับฉนวนเป็นชั้น ๆ แล้วม้วนเข้าด้วยกันเป็น Element ซึ่งภายในตัวเก็บประจุแต่ละตัวประกอบด้วยหลาย Element เพื่อให้ได้ขนาดพิกัดแรงดันและกำลังรีแอกทีฟตามที่ต้องการ ตัวเก็บประจุสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภทคือ ตัวเก็บประจุที่ใช้ฟิวส์สำหรับป้องกันความผิดพลาด และตัวเก็บประจุที่ใช้การลัดวงจรของ Element ภายในตัวเก็บประจุสำหรับป้องกันความผิดพลาด

ตัวเก็บประจุที่ใช้ฟิวส์สำหรับป้องกันความผิดพลาดจะมีอยู่ 2 ชนิดคือตัวเก็บประจุที่ใช้ฟิวส์ที่อยู่ภายนอกตัวเก็บประจุ (Externally fused) และตัวเก็บประจุที่แต่ละ Elements ภายในตัวเก็บประจุต่อเชื่อมเข้ากับฟิวส์ (Internally fused) ดังรูปที่ 3.1 (a) และ 3.1 (b) ตามลำดับ

ส่วนตัวเก็บประจุที่ใช้การลัดวงจรของ Element ภายในตัวเก็บประจุสำหรับป้องกันความผิดพลาด (Fuseless) แสดงดังรูปที่ 3.1 (c)



รูปที่ 3.1 (a) Externally fused (b) Internally fused (c) Fuseless [13]

3.1.1 ลักษณะเฉพาะของตัวเก็บประจุแรงสูง [15]

3.1.1.1 การทำงานอย่างต่อเนื่องภายใต้เงื่อนไขแรงดัน กระแส และกำลังรีแอกทีฟสูงสุด

ตัวเก็บประจุควรจะสามารถทำงานได้ตามปกติภายใต้เงื่อนไขการทำงานอย่างต่อเนื่องที่ไม่เกิน

- 1) 110% ของแรงดันอาร์เอ็มเอสพิกัด
- 2) 120% ของแรงดันค่ายอด (รวมฮาร์มอนิก แต่ไม่รวมผลของภาวะชั่วคราว)
- 3) 135% ของกระแสอาร์เอ็มเอสที่ระบุตามขนาดพิกัดแรงดัน และ kVAR (180% ถ้ารวมผลของกระแสฮาร์มอนิก)
- 4) 135% ของพิกัด kVAR

3.1.1.2 ปริมาณความจุไฟฟ้า

ปริมาณความจุไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 25 °C ควรมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0-10% เมื่อพิจารณาที่ kVAR พิกัด แรงดันรูปคลื่นไซน์และความถี่ที่กำหนด

3.1.1.3 พิกัดแรงดันและกำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุที่แสดงในตารางที่ 3.1 จะมีค่ากำลังรีแอกทีฟไม่น้อยกว่าและไม่เกิน 110% ของค่าพิกัดที่อุณหภูมิ 25 °C เมื่อพิจารณาที่พิกัดแรงดันรูปคลื่นไซน์และความถี่ที่กำหนด

3.1.1.4 ความถี่

ตัวเก็บประจุกำลังจะออกแบบสำหรับการทำงานที่พิกัดความถี่ 50 Hz หรือ 60 Hz

3.1.1.5 อุณหภูมิแวดล้อม

ตัวเก็บประจุสามารถทำงานได้ปกติอย่างต่อเนื่องภายใต้อุณหภูมิที่ไม่ต่ำกว่า -40 °C และไม่สูงกว่าอุณหภูมิที่แสดงในตารางที่ 3.2

3.1.1.6 ความสามารถในการกำจัดหรือลดระดับแรงดันตกค้าง

ภายในตัวเก็บประจุจะต้องมีอุปกรณ์สำหรับกำจัดแรงดันที่เหลือตกค้างอยู่ในตัวเก็บประจุให้มีค่าลดลงจนกระทั่งเหลือไม่เกิน 50 V ภายในระยะเวลา 5 นาทีจากพิกัดแรงดันค่ายอด

ตารางที่ 3.1 ขนาดมาตรฐานตามพิกัดแรงดันและกำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุแรงสูง [15]

Volts, rms (terminal-to-terminal)	Kilovar	Number of phases	BIL kV*
216	5, 7 1/2, 13 1/3, 20 และ 25	1 และ 3	30**
240	2.5, 5, 7 1/2, 10, 15, 20, 25 และ 50	1 และ 3	30**
480, 600	5, 10, 15, 20, 25, 35, 50, 60 และ 100	1 และ 3	30**
2 400	50, 100, 150, 200, 300 และ 400	1 และ 3	75, 95, 125, 150 และ 200
2 770	50, 100, 150, 200, 300, 400 และ 500	1 และ 3	75, 95, 125, 150 และ 200
4 160 4 800	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700 และ 800	1 และ 3	75, 95, 125, 150 และ 200
6 640, 7 200, 7 620, 7 960, 8 320, 9 540 9 960, 11 400 12 470, 13 280 13 800, 14 400	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700 และ 800	1	95, 125, 150 และ 200
15 125	50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600 700 และ 800	1	125, 150 และ 200
19 920	100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700และ 800	1	125, 150 และ 200
20 800 21 600 22 800 23 800 24 940	100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700และ 800	1	150 และ 200

** ไม่สามารถใช้ในอาคาร (Not applicable to indoor ratings)

ตารางที่ 3.2 อุณหภูมิแวดล้อมสูงสุด [15]

Mounting arrangement	Ambient air temperature (°C) 4-h average*
ตัวเก็บประจุต่อแยก (Isolated capacitor)	46
ตัวเก็บประจุต่อแถวเดียว (Single row of capacitors)	46
ตัวเก็บประจุที่ต่อหลายแถวหรือต่อเป็นชั้น (Multiple rows and tiers of capacitors)	40
ตัวเก็บประจุที่ประกอบอยู่ในโลหะปิด (Metal-enclosed or -housed equipments)	40

*ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของสี่ชั่วโมงต่อเนื่องที่อ่านได้สูงสุด ในวันที่ร้อนที่สุด ณ ตำแหน่งนั้น ๆ

(The arithmetic average of the four consecutive highest hourly readings during the hottest day expected at that location)

3.2 โครงสร้างของชุดตัวเก็บประจุแรงสูง [16]

ชุดตัวเก็บประจุที่ใช้ในระบบแรงสูง แบ่งตามลักษณะโครงสร้างได้เป็น 3 ชนิดคือ

- 1) ชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused
- 2) ชุดตัวเก็บประจุแบบ Internally fused
- 3) ชุดตัวเก็บประจุแบบ Fuseless

3.2.1 ชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused

ชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ประกอบด้วย กลุ่มอนุกรม (S) จำนวน 1 กลุ่มหรือมากกว่าของหน่วยเก็บประจุที่ต่อขนานกันต่อเฟส (Pa) โดยแต่ละหน่วยเก็บประจุจะมี ฟิวส์ทำหน้าที่ป้องกันเมื่อเกิดความขัดข้องหรือความผิดปกติของขึ้นดังรูปที่ 3.2

เนื่องจาก Externally fused สามารถที่จะแยกกระแสผิดปกติแรงดันสูงได้ทำให้ การออกแบบสามารถใช้ตัวเก็บประจุที่มีพิกัดแรงดันสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้น ชุดตัวเก็บประจุชนิดนี้จึงมีจำนวนกลุ่มอนุกรมน้อย

ขนาดของแต่ละหน่วยตัวเก็บประจุจะมีพิกัด kVAR ที่ค่อนข้างใหญ่เพื่อลดจำนวน หน่วยตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกันในแต่ละกลุ่มอนุกรม เนื่องจากจำนวนหน่วยตัวเก็บประจุที่ต่อ

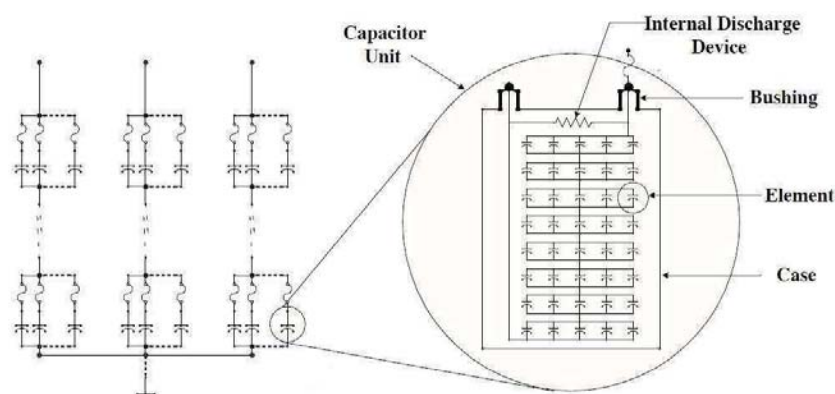
ขนานกันถ้ามีมากจะมีผลทำให้ความไวในการตรวจจับความไม่สมดุลลดลง และลดปริมาณพลังงานสะสมในกลุ่มขนานเพื่อลดโอกาสของการเกิดการบวมหรือปริแตกของ case

แต่หน่วยตัวเก็บประจุจะต้องมีขนาดพิกัด kVAR ไม่ใหญ่จนเกินไป เนื่องจากถูกจำกัดด้วยจำนวนที่น้อยที่สุดของหน่วยตัวเก็บประจุที่ขนานกันในแต่ละกลุ่มอนุกรม โดยพิจารณาจากการปลด 1 หน่วยตัวเก็บประจุในกลุ่มแล้วไม่ก่อให้เกิดแรงดันเกิน 110 % ของแรงดันพิกัด ตกรวมหน่วยตัวเก็บประจุที่ยังคงเหลืออยู่ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 จำนวนขั้นต่ำของตัวเก็บประจุต่อขนานกันในแต่ละกลุ่มอนุกรม เพื่อจำกัดแรงดัน ตกรวมตัวเก็บประจุที่ยังคงอยู่เมื่อตัวเก็บประจุ 1 ตัวถูกปลดไม่ให้เกิน 110 % [14]

Number of series Groups (S)	Grounded Y or Δ (Pa)	Ungrounded Y (Pa)	Split ungrounded Y (equal sections, Pa)
1	-	4	2
2	6	8	7
3	8	9	8
4	9	10	9
5	9	10	10
6	10	10	10
7	10	10	10
8	10	11	10
9	10	11	10
10	10	11	11
11	10	11	11
12 and over	11	11	11

จำนวนมากที่สุดของหน่วยตัวเก็บประจุต่อขนานกันในแต่ละกลุ่มอนุกรม NEMA CP1-1988 แนะนำไว้ว่ากำลังรีแอกทีฟทั้งหมดใน 1 กลุ่มขนานจะต้องไม่เกิน 4650 kVAR สำหรับหน่วยตัวเก็บประจุที่มีฉนวนแบบ All film (3100 kVAR สำหรับตัวเก็บประจุที่ต่ำกว่า) เพื่อป้องกันการระเบิดของฟิวส์ที่ใช้ป้องกันตัวเก็บประจุ เนื่องจากการถ่ายประจุผ่านฟิวส์ในขณะที่เกิดการลัดวงจร



รูปที่ 3.2 ชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ที่มีการต่อแบบ Single ground wye [13]

3.2.2 ชุดตัวเก็บประจุแบบ Internally fused

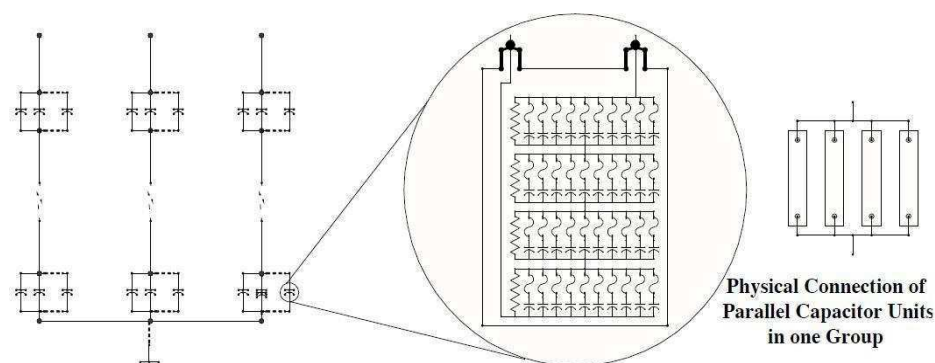
ชุดตัวเก็บประจุแบบ Internally fused ประกอบด้วย กลุ่มอนุกรมของหน่วยตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกันต่อเฟส โดยภายในของแต่ละหน่วยตัวเก็บประจุประกอบด้วย กลุ่มอนุกรมของ Element ที่ต่อขนานกันแต่ละ Element ถูกต่อเข้ากับฟิวส์ดังรูปที่ 3.3 ชุดตัวเก็บประจุแบบ Internally fused จะไม่มีข้อจำกัดในด้านการออกแบบขนาด KVAR เหมือนชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused เนื่องจากภายในตัวเก็บประจุมีฟิวส์สำหรับกำจัดพลังงานของ element ทำให้จำนวนตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกันต่อกลุ่มอนุกรมน้อยกว่าเมื่อเทียบกับชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused

จำนวนกลุ่มอนุกรมของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกันและจำนวน element ที่ต่อขนานกันภายในตัวเก็บประจุ ต้องมีความเหมาะสมเพื่อที่จะลดขนาดแรงดันเกินที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุที่ยังคงเหลืออยู่ และไม่มีผลกระทบต่อหน่วยตัวเก็บประจุ เมื่อฟิวส์ทำการปลด element ที่ชำรุดภายในตัวเก็บประจุ

จำนวนมากที่สุดของหน่วยตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกันต่อกลุ่มอนุกรมขึ้นอยู่กับความสามารถในการทนพลังงานสะสมในกลุ่มขนานของฟิวส์ภายในหน่วยตัวเก็บประจุ โดยทั่วไปจะมีตัวเก็บประจุอย่างน้อย 2 ตัวต่อขนานกันใน 1 อนุกรม

ถ้าชุดตัวเก็บประจุมีจำนวนกลุ่มอนุกรมน้อยที่สุด ในบางครั้งอาจทำให้มีจำนวนตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกันมากเกินไป สามารถแก้ไขโดยการเพิ่มจำนวนกลุ่มอนุกรมหรือเปลี่ยนการจัดเรียงชุดตัวเก็บประจุใหม่เป็นแบบ Multiple wyes

ตารางที่ 3.4 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียระหว่างชุดตัวเก็บประจุแบบ Internally fused กับ Externally fused ในด้านต่าง ๆ



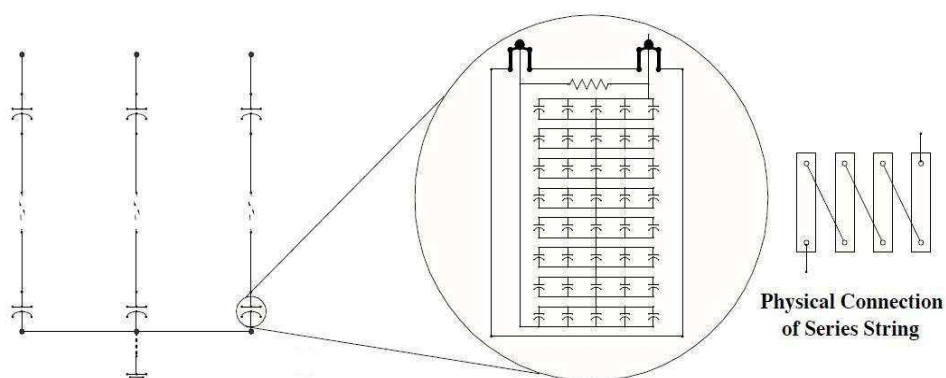
รูปที่ 3.3 ชุดตัวเก็บประจุแบบ Internally fused ที่มีการต่อแบบ Single ground wye [13]

ตารางที่ 3.4 ตารางเปรียบเทียบระหว่างชุดตัวเก็บประจุแบบ Internally fused กับ Externally fused

	Internally fused	Externally fused
กำลังสูญเสียของตัวเก็บประจุ	มากกว่า	น้อยกว่า
กำลังสูญเสียรีแอกทีฟจากการทำงานของฟิวส์	ต่ำกว่า	สูงกว่า
การปลดชุดตัวเก็บประจุจากการทำงานของฟิวส์	น้อยกว่า	มากกว่า
การทำงานที่ผิดพลาดของฟิวส์	ต่ำกว่า	สูงกว่า
โอกาสเกิดการบวมหรือปริแตกของ case	ต่ำกว่า	สูงกว่า
การป้องกันโดยการตรวจจับความไม่สมดุล	ง่ายกว่า	ยากกว่า
เนื้อที่สำหรับการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ	น้อยกว่า	มากกว่า
จำนวน Spare parts	น้อยกว่า	มากกว่า
ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและบำรุงรักษา	ต่ำกว่า	สูงกว่า
ผลกระทบจากสภาวะอากาศแวดล้อม	ไม่มีผล	มีผล

3.2.3 ชุดตัวเก็บประจุแบบ Fuseless

ชุดตัวเก็บประจุแบบ Fuseless กระทำได้โดยการนำตัวเก็บประจุมาต่ออนุกรมกัน เรียกว่า String และนำแต่ละ String มาต่อขนานกันโดยไม่มีการเชื่อมต่อระหว่าง String เพื่อให้ได้ขนาดตัวเก็บประจุตามที่ต้องการดังรูปที่ 3.4 โดยทั่วไปชุดตัวเก็บประจุแบบ Fuseless จะใช้กับระบบแรงดัน 34.5 kV หรือสูงกว่า



รูปที่ 3.4 ชุดตัวเก็บประจุแบบ Fuseless ที่มีการต่อแบบ Single ground wye [13]

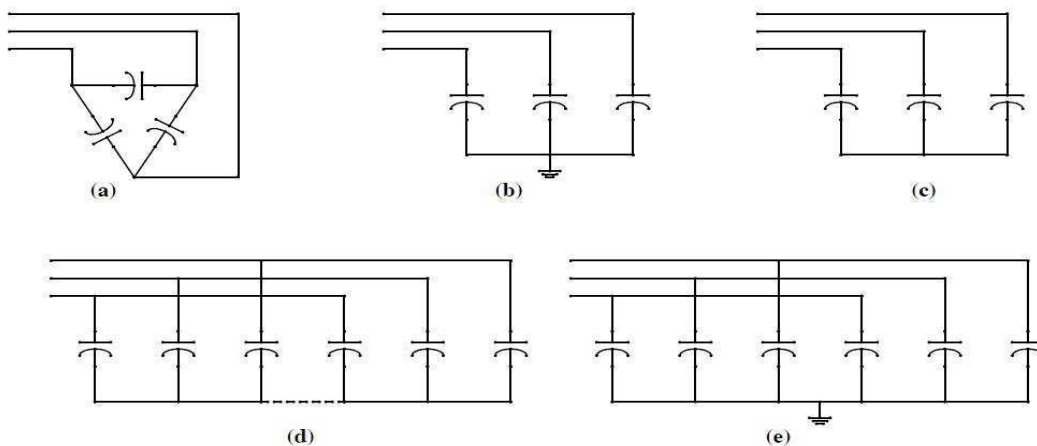
หน่วยตัวเก็บประจุชนิดนี้ที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นแบบ 2 บุษชิงและทำการฉนวนระหว่าง Element กับ case โดยแต่ละ String มักจะมีจำนวน Element มากกว่า 10 ตัวต่ออนุกรมกันเพื่อป้องกันแรงดันเกิน 110 % ตกคร่อมหน่วยตัวเก็บประจุที่ยังคงเหลืออยู่เมื่อ 1 Element เกิดลัดวงจร การออกแบบตัวเก็บประจุแบบ Fuseless ขึ้นอยู่กับจำนวน Element ของตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกัน และโหมดการขัดข้องของ element ที่จะลัดวงจร

ข้อดีของชุดตัวเก็บประจุแบบ Fuseless

1. ราคาการติดตั้งและดำเนินงานต่ำ
2. กำลังสูญเสียน้อย
3. พลังงานการถ่ายประจุน้อย
4. ใช้พื้นที่ติดตั้งน้อย
5. ความง่ายของการป้องกันชุดตัวเก็บประจุ
6. เพิ่มความน่าเชื่อถือและการทำงาน
7. ลดจำนวน Spare parts

3.2.4 ลักษณะการต่อตัวเก็บประจุ

การต่อตัวเก็บประจุสามารถทำได้หลายรูปแบบคือ Delta, Single grounded wye, Single ungrounded wye, Split grounded wye และ Split ungrounded wye ซึ่งการเลือกรูปแบบการต่อจะขึ้นอยู่กับระบบ พิกัดแรงดันและกำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุที่มีขายคุณสมบัติของฟิวส์ และรีเลย์ป้องกัน

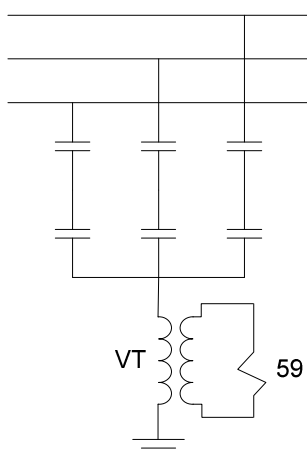


รูปที่ 3.5 รูปแบบการต่อชุดตัวเก็บประจุแบบต่าง ๆ (a) Delta, (b) Grounded wye, (c) Ungrounded wye, (d) Split ungrounded wye, (e) Split grounded wye [13]

ในระบบแรงสูงชุดตัวเก็บประจุที่ติดตั้งในสถานี มีลักษณะการต่อใช้งานดังนี้

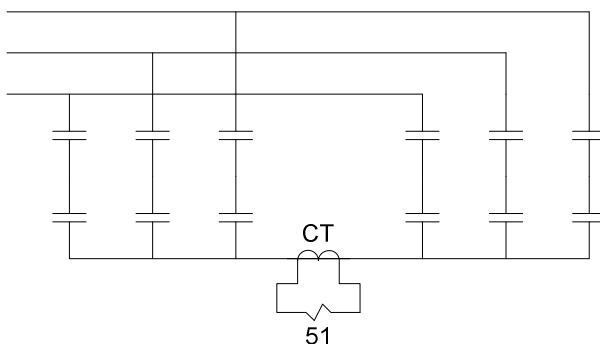
3.2.4.1 แรงดัน 22/33 kV มีการต่อใช้ 2 รูปแบบคือ

- การต่อแบบ Single grounded wye จะใช้หม้อแปลงแรงดันทำหน้าที่ตรวจจับความไม่สมดุลของแรงดันนิวทรัล แสดงดังรูปที่ 3.6 (59 คือรีเลย์แรงดันเกิน)



รูปที่ 3.6 การตรวจจับความไม่สมดุลของแรงดันนิวทรัลสำหรับการต่อแบบ Single grounded wye

- การต่อแบบ Split ungrounded wye โดยใช้หม้อแปลงกระแสต่อระหว่างจุดนิวทรัลของแต่ละชุด wye เพื่อทำหน้าที่ตรวจจับความไม่สมดุลของกระแสในสายนิวทรัลดังรูปที่ 3.7 (51 คือรีเลย์กระแสเกิน-เวลา)



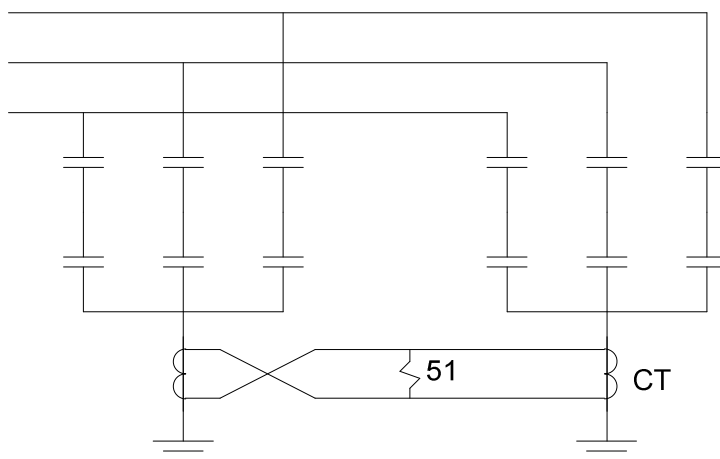
รูปที่ 3.7 การตรวจจับความไม่สมดุลของกระแสในสายนิวทรัลสำหรับการต่อแบบ Split ungrounded wye

3.2.4.2 แรงดัน 69/115 kV ต่อแบบ Split ungrounded wye (Neutral tied)

จะใช้หม้อแปลงกระแสต่อระหว่างจุดนิวทรัลของแต่ละชุด wye เพื่อทำหน้าที่ตรวจจับความไม่สมดุลของกระแสในสายนิวทรัล

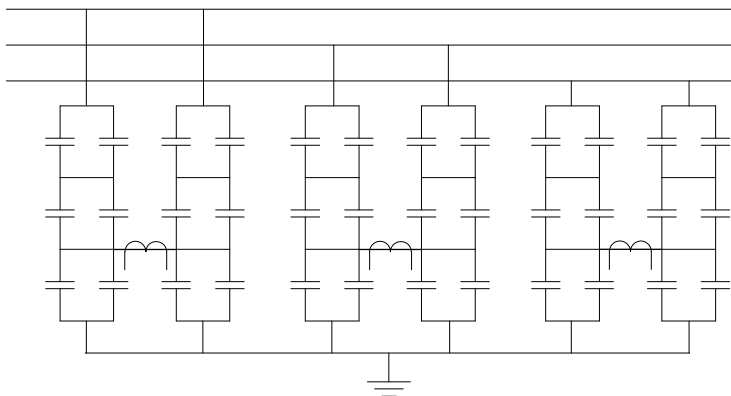
3.2.4.3 แรงดัน 230 kV มีการต่อใช้งาน 2 รูปแบบคือ

- การต่อแบบ Split grounded wye จะใช้หม้อแปลงกระแสทำหน้าที่ตรวจจับความไม่สมดุลของกระแสในสายนิวทรัลดังรูปที่ 3.8 (51 คือรีเลย์กระแสเกิน-เวลา)



รูปที่ 3.8 การตรวจจับความไม่สมดุลของกระแสในสายนิวทรัลสำหรับการต่อแบบ Split grounded wye

- H configuration สำหรับกรณีที่มีหลายกลุ่มอนุกรมของหน่วยตัวเก็บประจุอาจเปลี่ยนตำแหน่งของหม้อแปลงกระแสไปต่อเชื่อมระหว่างตำแหน่งที่เป็นลำดับอนุกรมเดียวกันของแต่ละชุด wye เข้าหากันดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างการต่อตัวเก็บประจุแบบ H configuration

3.3 ตัวรีแอกเตอร์ [19]

ตัวรีแอกเตอร์ที่นิยมใช้เป็นส่วนประกอบของตัวกรองฮาร์มอนิกคือแบบแกนอากาศ ซึ่งจะมีคุณสมบัติแบบเป็นเชิงเส้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับความถี่ และปริมาณกระแสไฟฟ้า ในทางปฏิบัติรีแอกเตอร์ที่นำมาใช้ในระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมจะมีขอบเขตที่ยอมรับได้ของค่าผิดพลาดเท่ากับ $\pm 5\%$ และค่าอัตราส่วน X/R ปกติแล้วจะอยู่ในช่วง 50-150 ซึ่งถ้าต้องการค่าที่ต่ำกว่านี้สามารถทำได้โดยอนุกรมตัวต้านทานเข้าไปกับรีแอกเตอร์

การกำหนดพิกัดของรีแอกเตอร์ควรจะต้องเลือกรีแอกเตอร์สามารถทนต่อกระแสลัดวงจรที่จุดต่อระหว่างรีแอกเตอร์กับคาปาซิเตอร์ และควรระบุถึงระดับการฉนวนของรีแอกเตอร์ (BIL, The Basic Impulse Isolation Level) ควรที่จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับกรณีที่ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ระดับแรงดันไฟฟ้าเดียวกัน ซึ่งพารามิเตอร์ที่ควรระบุเกี่ยวกับพิกัดรีแอกเตอร์มีดังนี้คือ

1. กระแสอาร์เอ็มเอสที่ความถี่หลักมูล
2. กระแสอาร์เอ็มเอสที่ความถี่ฮาร์มอนิก
3. พิกัดกระแสลัดวงจร
4. ค่าอัตราส่วน X/R
5. ระดับแรงดันที่ใช้งาน
6. ระดับการฉนวน (BIL)

การหากระแสพิกัดของตัวรีแอกเตอร์สามารถหาได้จากสมการที่ 3.1

$$I_L = \sqrt{(1.1I_1)^2 + \sum I_h^2} \quad (3.1)$$

บทที่ 4

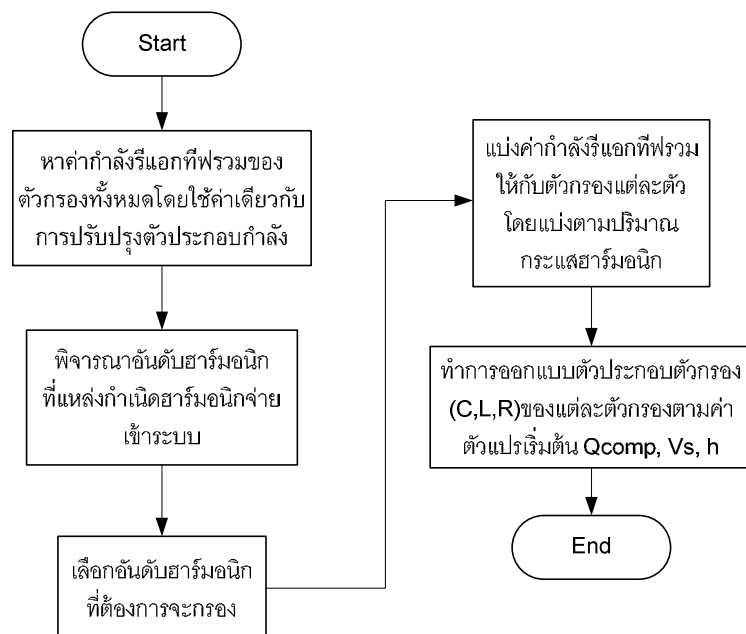
การออกแบบและพัฒนาโปรแกรมสำหรับการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก แบบแพสซีฟในระบบไฟฟ้าแรงสูง

เนื้อหาในบทนี้ประกอบไปด้วย การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก การออกแบบชุดตัวเก็บประจุ การทำงานของโปรแกรม และการออกแบบโปรแกรมสำหรับออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงสูง

4.1 การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก

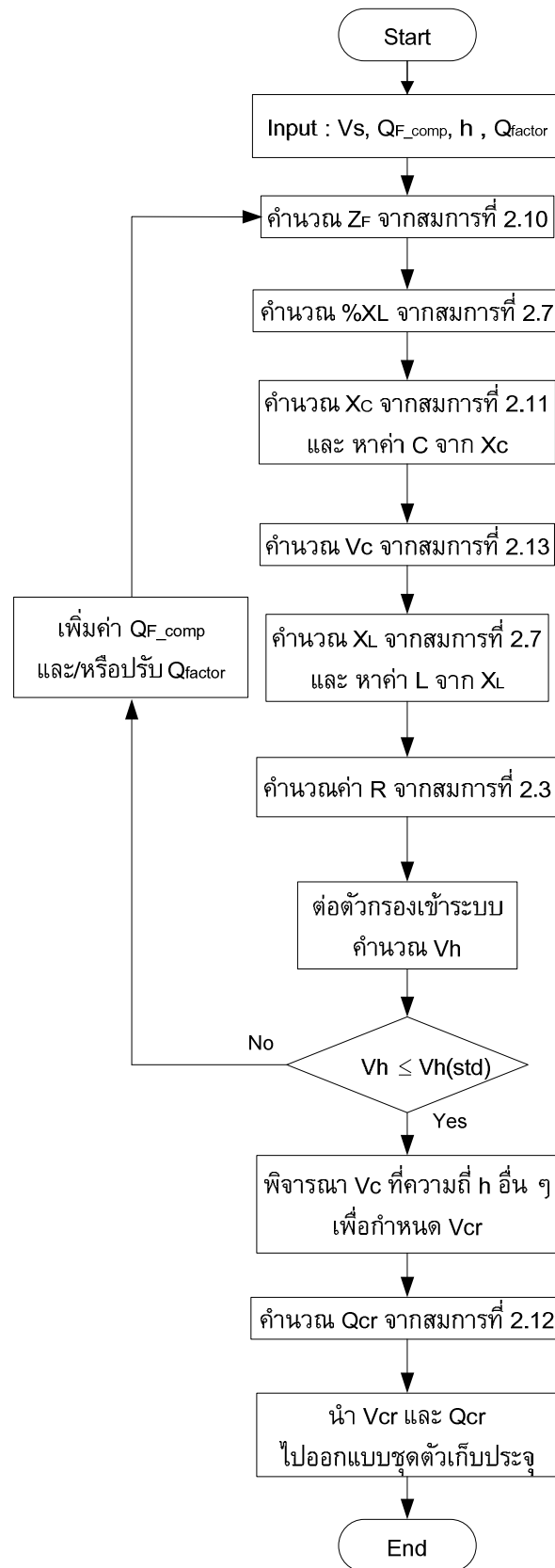
หน้าที่ของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแพสซีฟอย่างหนึ่งคือการชดเชยกำลังรีแอกทีฟเข้าสู่ระบบไฟฟ้า การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแพสซีฟจึงจำเป็นต้องใช้ค่ากำลังรีแอกทีฟในการออกแบบ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอให้ค่ากำลังรีแอกทีฟรวมของตัวกรองทั้งหมดใช้ค่าเดียวกับค่ากำลังรีแอกทีฟที่ใช้ในการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง ส่วนค่ากำลังรีแอกทีฟของแต่ละตัวกรองสามารถหาได้จากการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟรวมตามค่าปริมาณกระแสฮาร์มอนิกโดยแสดงเป็นโพลีชาร์ตดังรูปที่ 4.1

ตัวกรองฮาร์มอนิกที่พิจารณาในการออกแบบทั้งหมด 4 แบบคือ 1. แบบปรับคลื่นเดี่ยว 2. แบบผ่านสูงอันดับสอง 3. แบบผ่านสูงอันดับสาม และ 4. แบบผ่านสูงชนิดซี โดยการออกแบบตัวกรองแต่ละชนิดแสดงเป็นโพลีชาร์ตดังรูปที่ 4.2-4.5



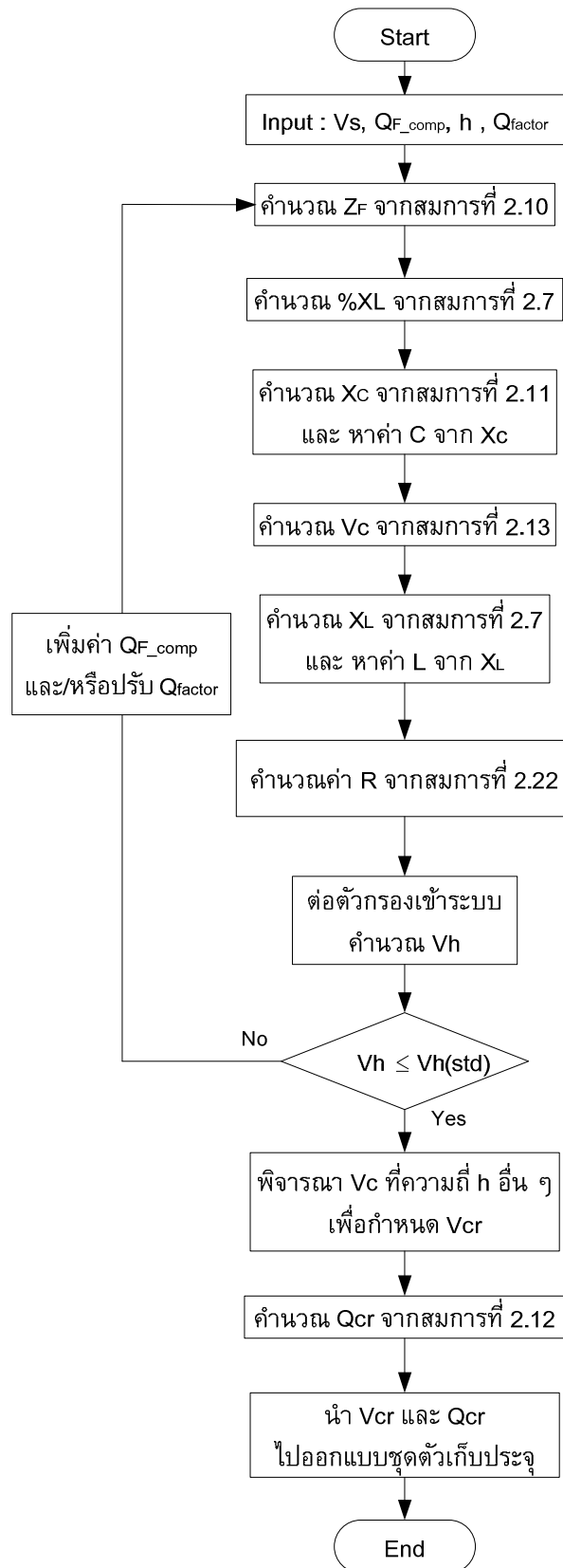
รูปที่ 4.1 โพลีชาร์ตการพิจารณาการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟของตัวกรองแต่ละตัว

4.1.1 ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดียว



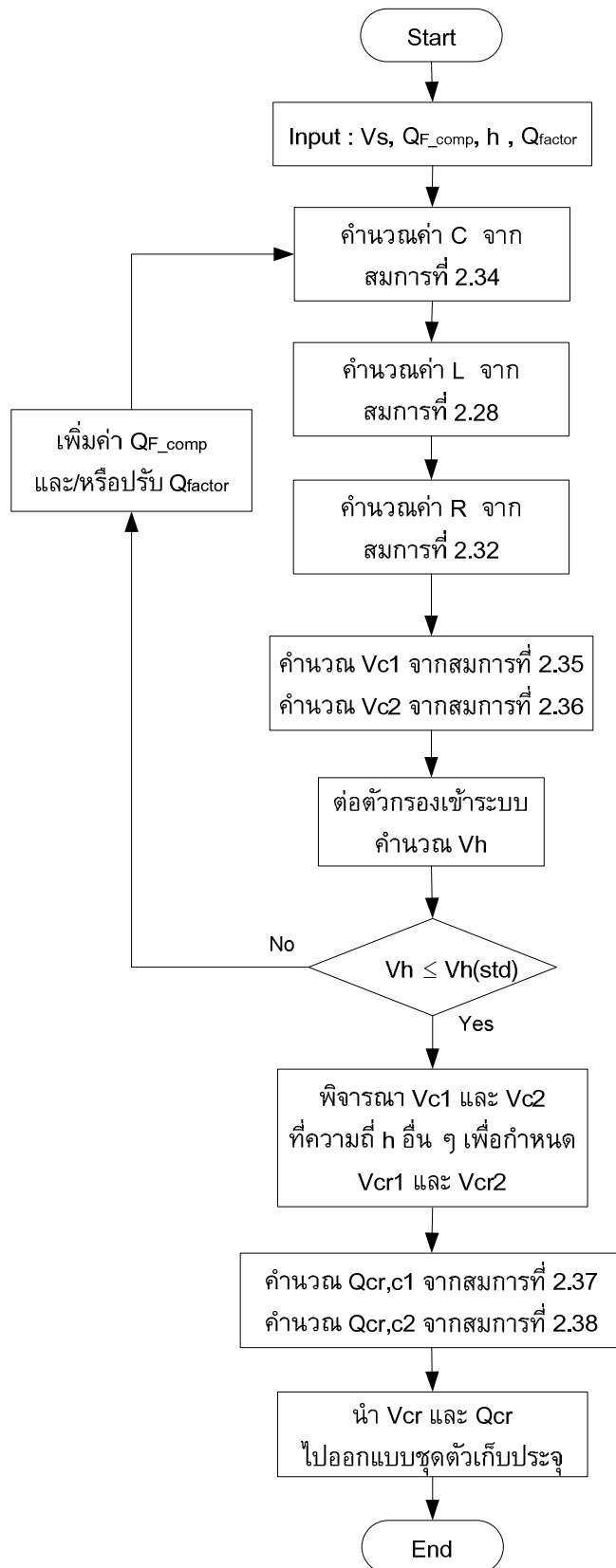
รูปที่ 4.2 โพล์ซาร์ตการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดียว

4.1.2 ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงลำดับสอง



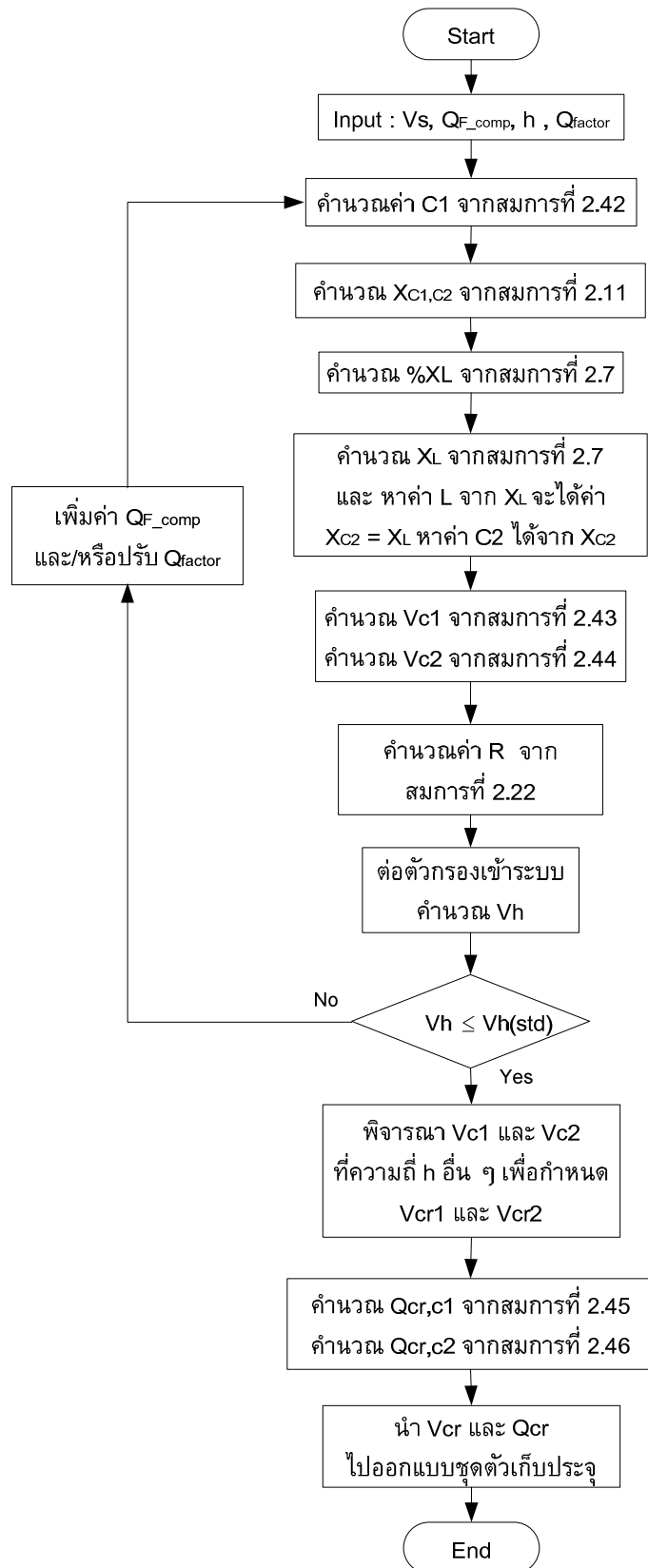
รูปที่ 4.3 โฟลว์ชาร์ตการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงอันดับสอง

4.1.3 ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงลำดับสาม



รูปที่ 4.4 โฟลว์ชาร์ตการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงอันดับสาม

4.1.4 ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงชนิดซี



รูปที่ 4.5 โฟลว์ชาร์ตการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงชนิดซี

4.1.5 การแสดงผลลัพธ์ของการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก

การแสดงผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ตัวกรองฮาร์มอนิกแต่ละชนิดประกอบด้วย Impedance of Z, % Reactor, C1F, C1C, VC1, C2F, C2C, VC2, L, R โดยพารามิเตอร์แต่ละตัวอธิบายความหมายในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความหมายของพารามิเตอร์ในการแสดงผลของการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก

พารามิเตอร์	ความหมาย
Impedance of Z	ค่าอิมพีแดนซ์รวมของตัวกรองฮาร์มอนิกในหน่วยโอห์ม
% Reactor	ค่าเปอร์เซ็นต์อินดักทีฟรีแอกแตนซ์เทียบกับค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์
C1F	ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุตัวที่หนึ่งที่ได้จากการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในหน่วยไมโครฟารัด
C1C	ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุตัวที่หนึ่งที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุในหน่วยไมโครฟารัด
VC1	ค่าแรงดันไลน์ของตัวเก็บประจุตัวที่หนึ่งในหน่วยกิโลโวลต์
C2F	ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุตัวที่สองที่ได้จากการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในหน่วยไมโครฟารัด
C2C	ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุตัวที่สองที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุในหน่วยไมโครฟารัด
VC2	ค่าแรงดันไลน์ของตัวเก็บประจุตัวที่สองในหน่วยกิโลโวลต์
L	ค่าความเหนี่ยวนำของตัวรีแอกเตอร์ในหน่วยมิลลิเฮนรี่
R	ค่าความต้านทานที่ใช้ในตัวกรองในหน่วยโอห์ม

4.2 การออกแบบชุดตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้าแรงสูง

การออกแบบชุดตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้าแรงสูง พิจารณาชนิดของตัวเก็บประจุและรูปแบบการต่อตัวเก็บประจุดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ชนิดตัวเก็บประจุและรูปแบบการต่อชุดตัวเก็บประจุที่พิจารณาในการออกแบบ

ระดับแรงดันจำหน่าย ($V \leq 33\text{kV}$)	ระดับแรงดันส่ง ($33\text{kV} < V \leq 230\text{kV}$)
- ตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ต่อแบบ <ul style="list-style-type: none"> ○ Split wye equal legs ○ Split wye unequal legs ○ Single wye 	- ตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ต่อแบบ <ul style="list-style-type: none"> ○ Split wye equal legs ○ Split wye unequal legs ○ Single wye
- ตัวเก็บประจุแบบ Internally fused ต่อแบบ <ul style="list-style-type: none"> ○ Split wye equal legs ○ Split wye unequal legs ○ Single wye 	- ตัวเก็บประจุแบบ Internally fused ต่อแบบ <ul style="list-style-type: none"> ○ Split wye equal legs ○ Split wye unequal legs ○ Single wye
	- ตัวเก็บประจุแบบ Fuseless ต่อแบบ <ul style="list-style-type: none"> ○ Split wye equal legs ○ Split wye unequal legs ○ Single wye

ชุดตัวเก็บประจุที่ใช้แรงดันในการออกแบบต่ำกว่า 20 kV ซึ่งเป็นระดับแรงดันสูงปานกลาง และเพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบ จึงใช้การออกแบบ single wye ในการออกแบบ

การออกแบบชุดตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้าแรงสูงแสดงเป็นโฟลว์ชาร์ตดังนี้

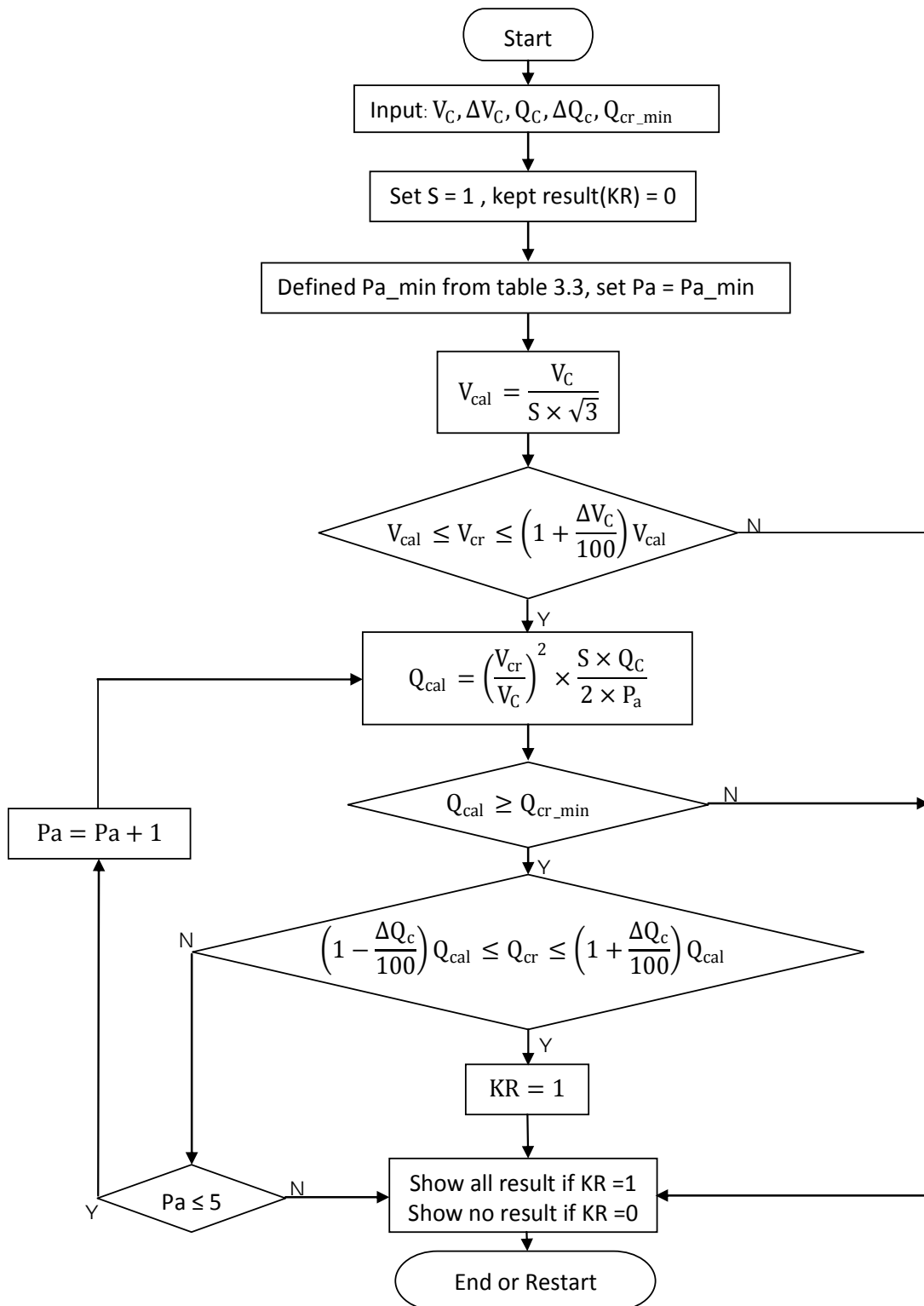
ระดับแรงดันจำหน่าย

- ชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ทำการต่อแบบ Split wye equal legs แสดงดังรูปที่ 4.6
- ชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ทำการต่อแบบ Split wye unequal legs แสดงดังรูปที่ 4.7
- ชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ทำการต่อแบบ Single wye แสดงดังรูปที่ 4.8

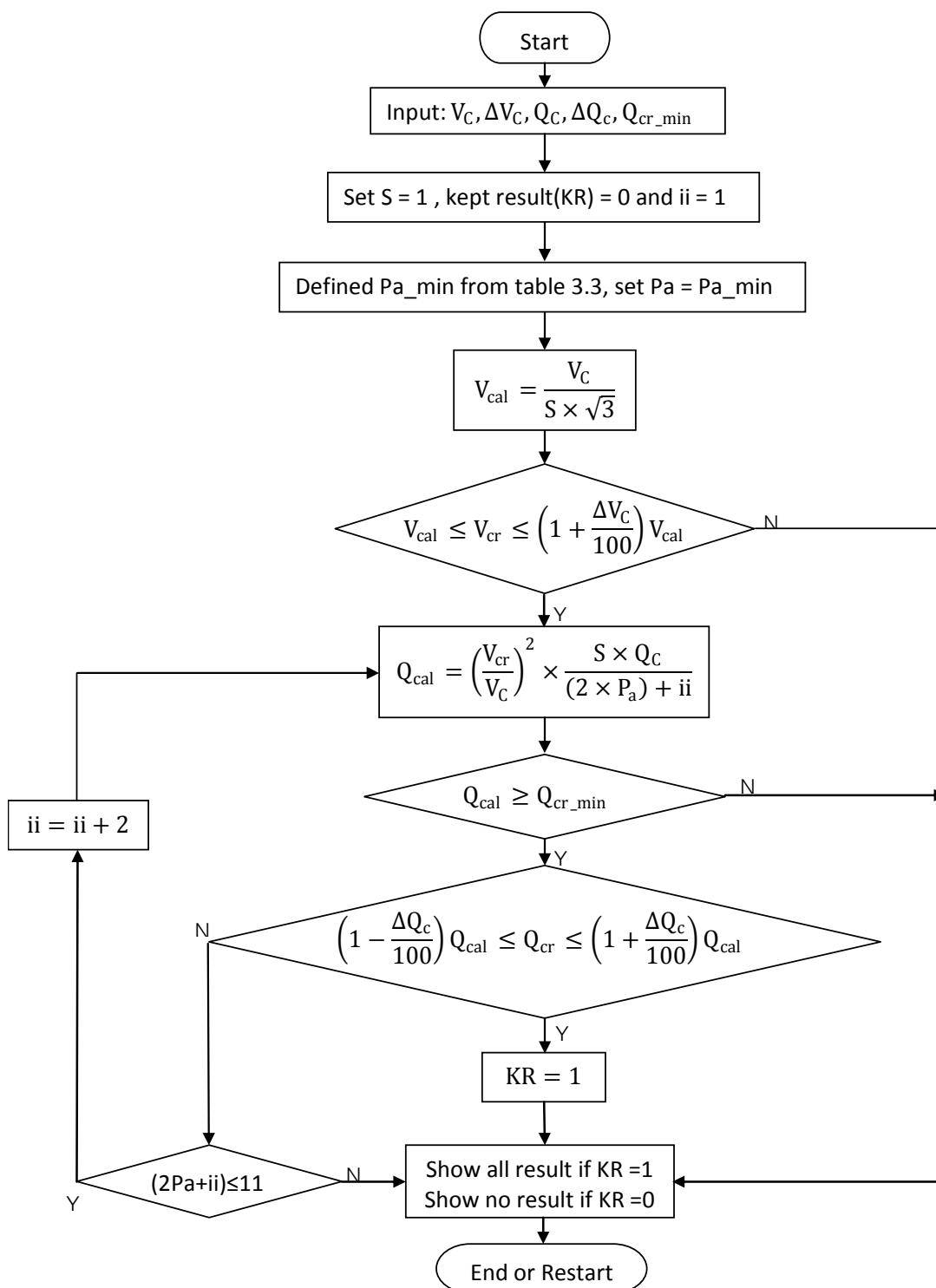
- ชุดตัวเก็บประจุแบบ Internally fused ทำการต่อแบบ Split wye equal legs, Split wye unequal legs และ Single wye แสดงดังรูปที่ 4.9

ระดับแรงดันสูง

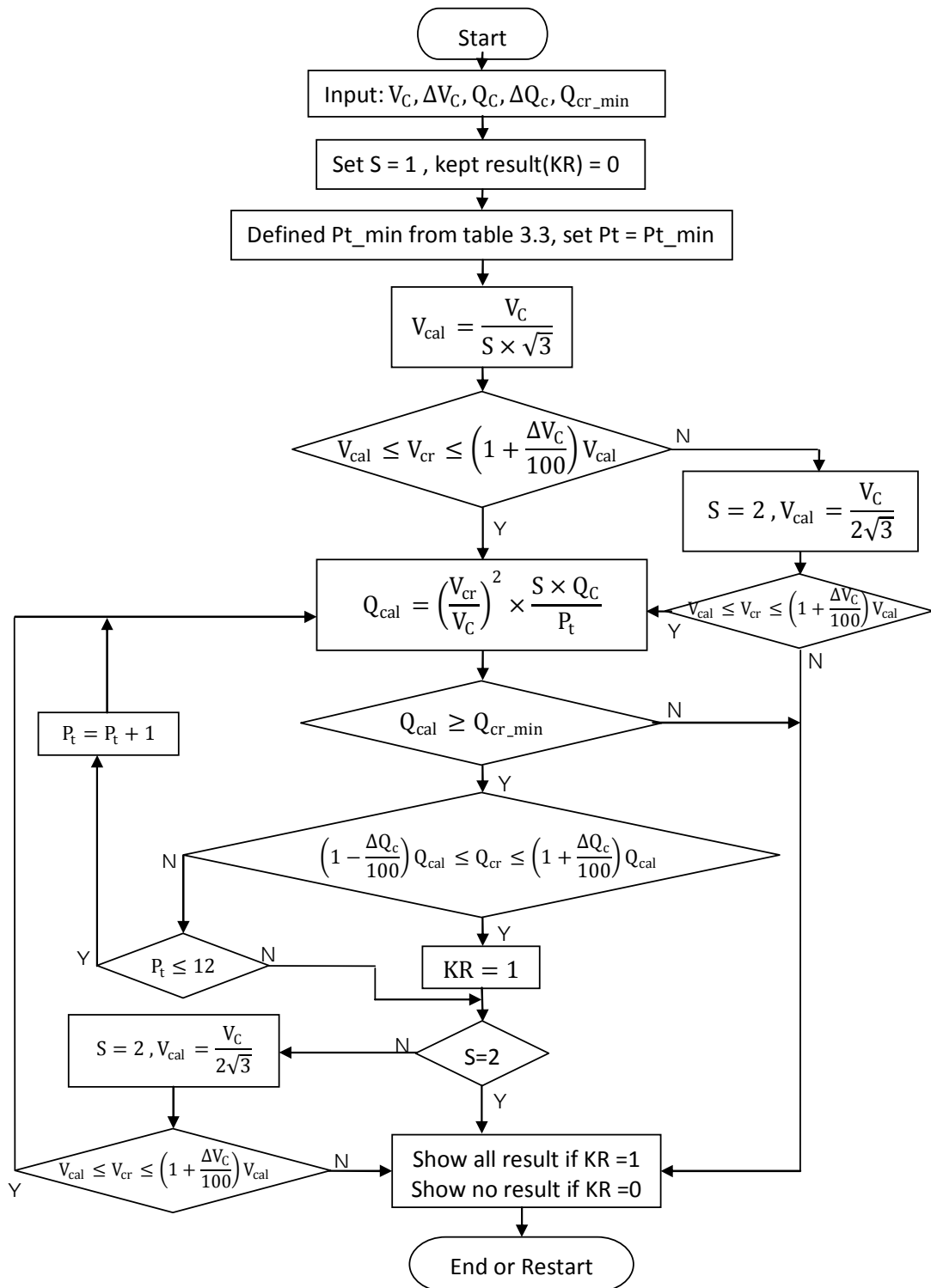
- ชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ทำการต่อแบบ Split wye equal legs แสดงดังรูปที่ 4.10
- ชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ทำการต่อแบบ Split wye unequal legs แสดงดังรูปที่ 4.11
- ชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ทำการต่อแบบ Single wye แสดงดังรูปที่ 4.12
- ชุดตัวเก็บประจุแบบ Internally fused ทำการต่อแบบ Split wye equal legs, Split wye unequal legs และ Single wye แสดงดังรูปที่ 4.9
- ชุดตัวเก็บประจุแบบ Fuseless ทำการต่อแบบ Split wye equal legs, Split wye unequal legs และ Single wye แสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.6 โฟลว์ชาร์ตการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ต่อแบบ Split wye equal legs ที่ระดับแรงดันจำหน่าย [16]



รูปที่ 4.7 โฟลว์ชาร์ตการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ต่อแบบ Split wye unequal legs ที่ระดับแรงดันจำหน่าย [16]



รูปที่ 4.8 โฟลว์ชาร์ตการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ต่อแบบ Single wye ที่ระดับแรงดันจำหน่าย [16]

4.2.1 ขั้นตอนการพิจารณาการออกแบบตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ที่ระดับแรงดันจำหน่าย [16]

- 1) ตรวจสอบค่าดัชนีว่าต้องการออกแบบชุดตัวเก็บประจุที่มีการต่อแบบ Split wye equal legs, Split wye unequal legs หรือ Single wye
- 2) คำนวณหาค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัว : V_{cal}

$$V_{cal} = \frac{V_c}{S \times \sqrt{3}}$$

V_c คือ แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ได้จากการออกแบบตัวกรอง

S คือ จำนวนกลุ่มอนุกรมของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกัน

- 3) ตรวจสอบแรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุจากฐานข้อมูลที่ต้องการ ([15] หรือข้อมูลผู้ผลิต): V_{cr}

$$V_{cal} \leq V_{cr} \leq \left(1 + \frac{\Delta V_c}{100}\right) V_{cal}$$

ΔV_c คือ ร้อยละของการเผื่อขนาดพิกัดแรงดัน

- 4) คำนวณหาค่ากำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุแต่ละตัว : Q_{cal}

- กรณีตัวเก็บประจุที่มีการต่อแบบ Split wye equal leg

$$\begin{aligned} Q_{cal} &= \left(\frac{V_{cr}}{V_c \div (S \times \sqrt{3})} \right)^2 \times \frac{Q_c}{3 \times 2 \times P_a \times S} \\ &= \left(\frac{V_{cr}}{V_c} \right)^2 \times \frac{S \times Q_c}{2 \times P_a} \end{aligned}$$

Q_c คือ กำลังรีแอกทีฟรวมที่ต้องการ (MVAR)

P_a คือ จำนวนตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกันใน 1 อนุกรมของแต่ละขาในแต่ละเฟส

- กรณีตัวเก็บประจุที่มีการต่อแบบ Split wye unequal legs

$$\begin{aligned} Q_{cal} &= \left(\frac{V_{cr}}{V_c \div (S \times \sqrt{3})} \right)^2 \times \frac{Q_c}{3 \times P_t \times S} \\ &= \left(\frac{V_{cr}}{V_c} \right)^2 \times \frac{S \times Q_c}{P_t} \end{aligned}$$

$$P_t = (2 \times P_a) + ii$$

P_t คือ จำนวนตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกันใน 1 กลุ่มอนุกรมของแต่ละเฟส

ii คือ แฟกเตอร์ที่นำมาบวกเพื่อทำให้ P_t มีค่าเป็นจำนวนคี่

- กรณีตัวเก็บประจุที่มีการต่อแบบ Single wye

$$Q_{cal} = \left(\frac{V_{cr}}{V_c \div (S \times \sqrt{3})} \right)^2 \times \frac{Q_c}{3 \times P_t \times S}$$

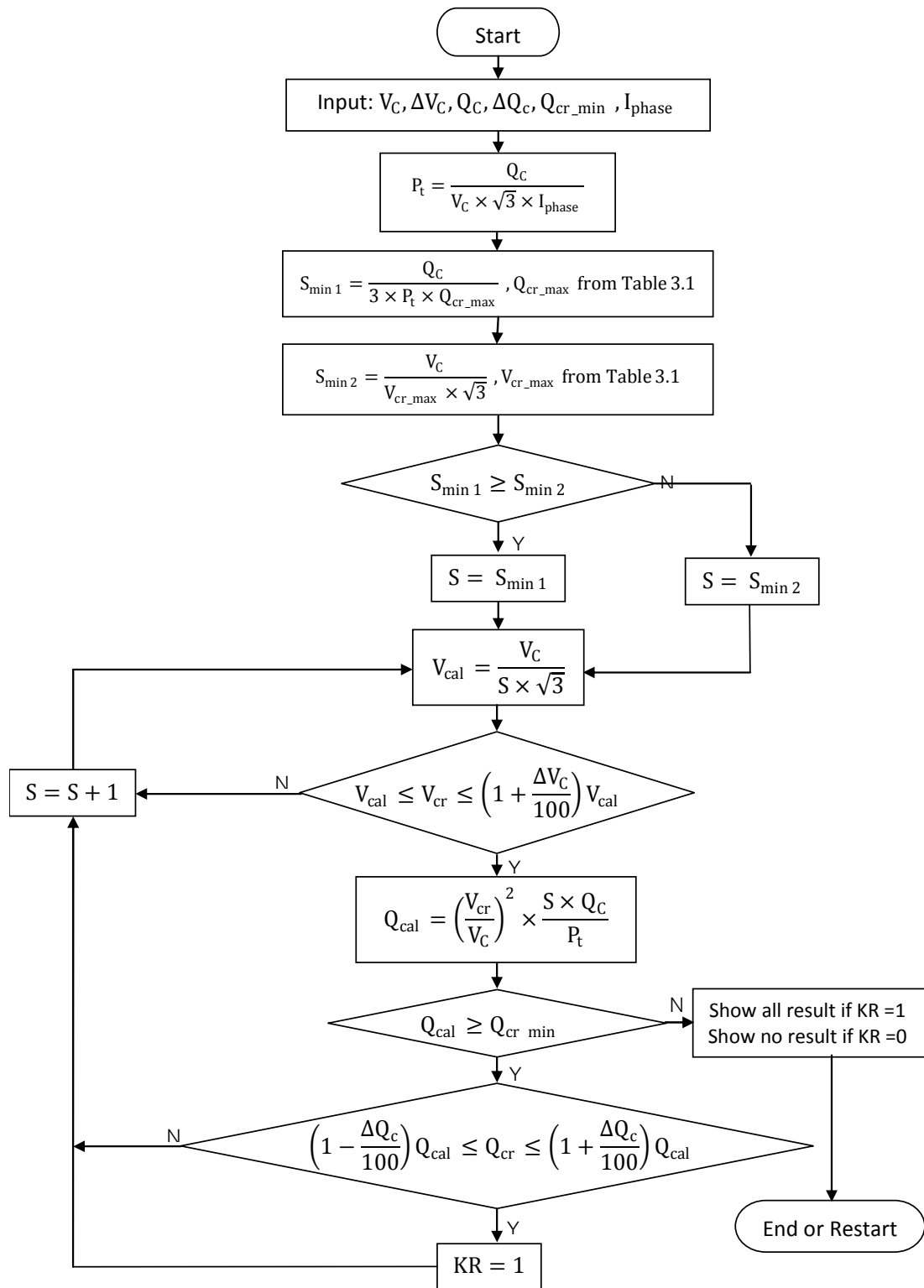
$$= \left(\frac{V_{cr}}{V_c} \right)^2 \times \frac{S \times Q_c}{P_t}$$

$$P_t = P_a$$

- 5) ตรวจสอบกำลังรีแอกทีฟที่พิกัดของตัวเก็บประจุจากฐานข้อมูลที่ต้องการ ([15] หรือข้อมูลผู้ผลิต): Q_{cr}

$$\left(1 - \frac{\Delta Q}{100} \right) Q_{cal} \leq Q_{cr} \leq \left(1 + \frac{\Delta Q_c}{100} \right) Q_{cal}$$

ΔQ_c คือ ความคลาดเคลื่อนของกำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุ (%)



รูปที่ 4.9 โฟลว์ชาร์ตการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแบบ Internally fused ที่ระดับแรงดันจำหน่าย [16]

4.2.2 ขั้นตอนการพิจารณาการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแบบ Internally fused ที่ระดับแรงดันจำหน่าย [16]

1. คำนวณหาจำนวน Strings ของแต่ละเฟส: P_t

$$P_t = \frac{Q_c}{V_c \times I_{phase} \times \sqrt{3}}$$

2. คำนวณหาจำนวนกลุ่มอนุกรมขั้นต่ำของตัวเก็บประจุของแต่ละ String เมื่อพิจารณากำลักรีแอกทีฟ: S_{min1}

$$S_{min1} = \frac{Q_c}{3 \times P_t \times Q_{cr_max}}$$

Q_{cr_max} คือ พิกัดกำลังรีแอกทีฟสูงสุดของตัวเก็บประจุจาก [15] หรือข้อมูลผู้ผลิต

3. คำนวณหาจำนวนกลุ่มอนุกรมขั้นต่ำของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกัน เมื่อพิจารณาพิกัดแรงดันสูงสุดของตัวเก็บประจุจาก [15] หรือข้อมูลผู้ผลิต : S_{min2}

$$S_{min2} = \frac{V_c}{V_{max} \times \sqrt{3}}$$

V_{max} คือ พิกัดแรงดันสูงสุดของตัวเก็บประจุจาก [15] หรือข้อมูลผู้ผลิต

4. เลือกจำนวนกลุ่มอนุกรมขั้นต่ำของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกัน: S_{min} จากจำนวนที่มีค่ามากกว่าระหว่าง S_{min1} และ S_{min2}

5. คำนวณหาแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัว: V_{cal}

$$V_{cal} = \frac{V_c}{S \times \sqrt{3}}$$

6. ตรวจสอบแรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุจากฐานข้อมูลที่ต้องการ ([15] หรือข้อมูลผู้ผลิต) : V_{cr}

$$V_{cal} \leq V_{cr} \leq \left(1 + \frac{\Delta V_c}{100}\right) V_{cal}$$

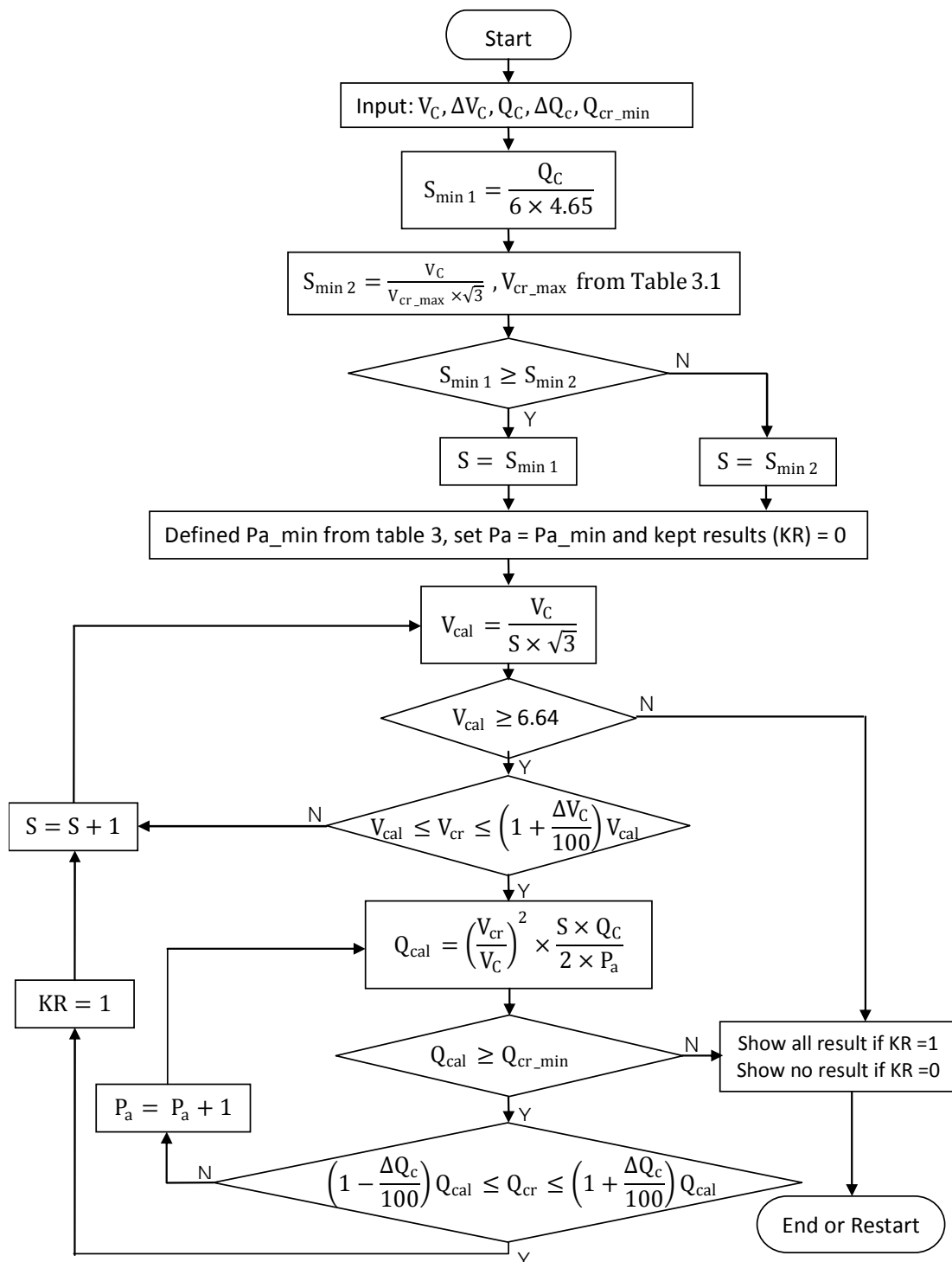
7. คำนวณหาค่ากำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุแต่ละตัว: Q_{cal}

$$Q_{cal} = \left(\frac{V_{cr}}{V_c \div (S \times \sqrt{3})} \right)^2 \times \frac{Q_c}{3 \times P_t \times S}$$

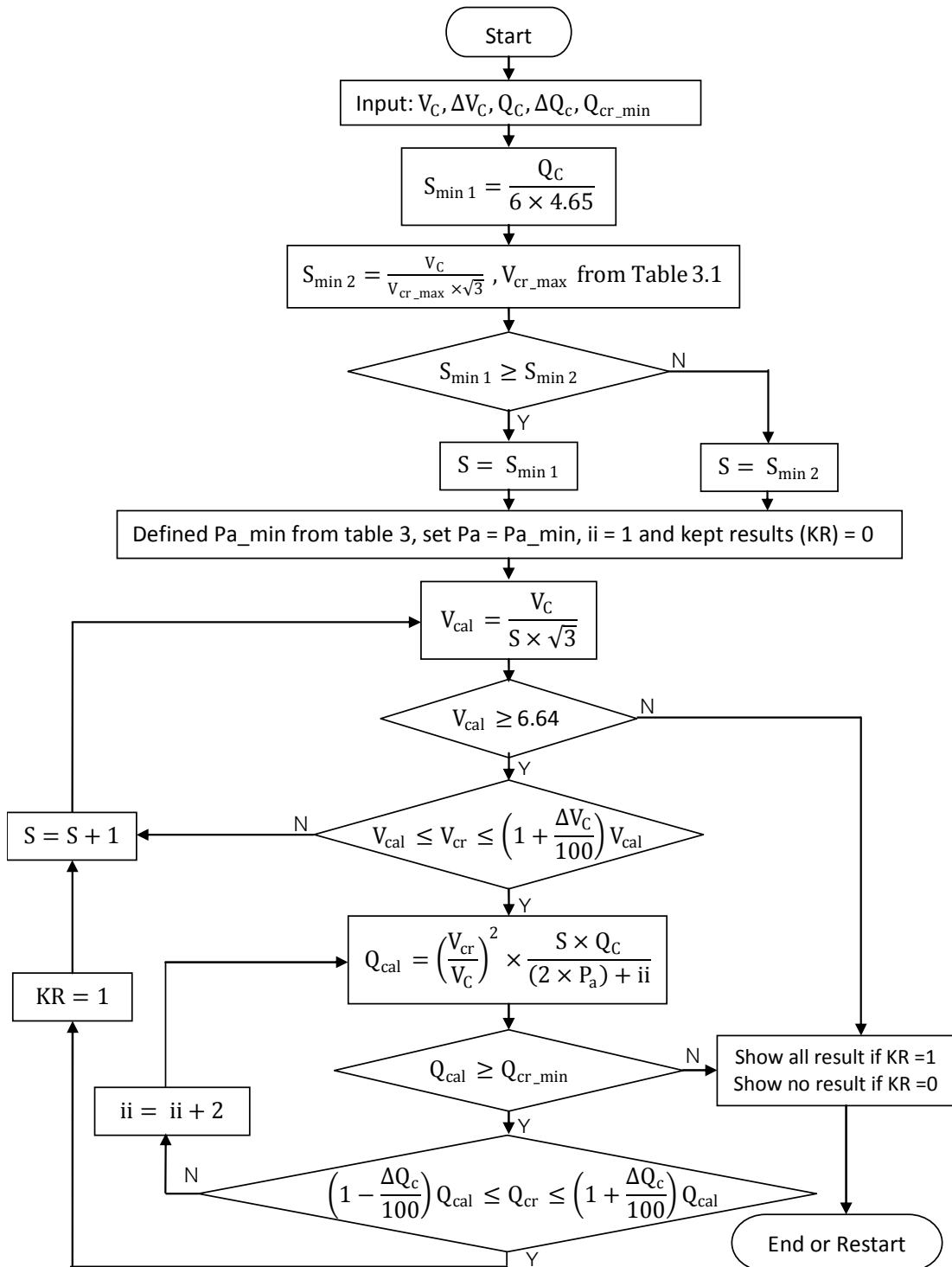
$$= \left(\frac{V_{cr}}{V_c} \right)^2 \times \frac{S \times Q_c}{P_t}$$

8. ตรวจสอบกำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุจากฐานข้อมูลที่ต้องการ ([15] หรือข้อมูลผู้ผลิต) : Q_{cr}

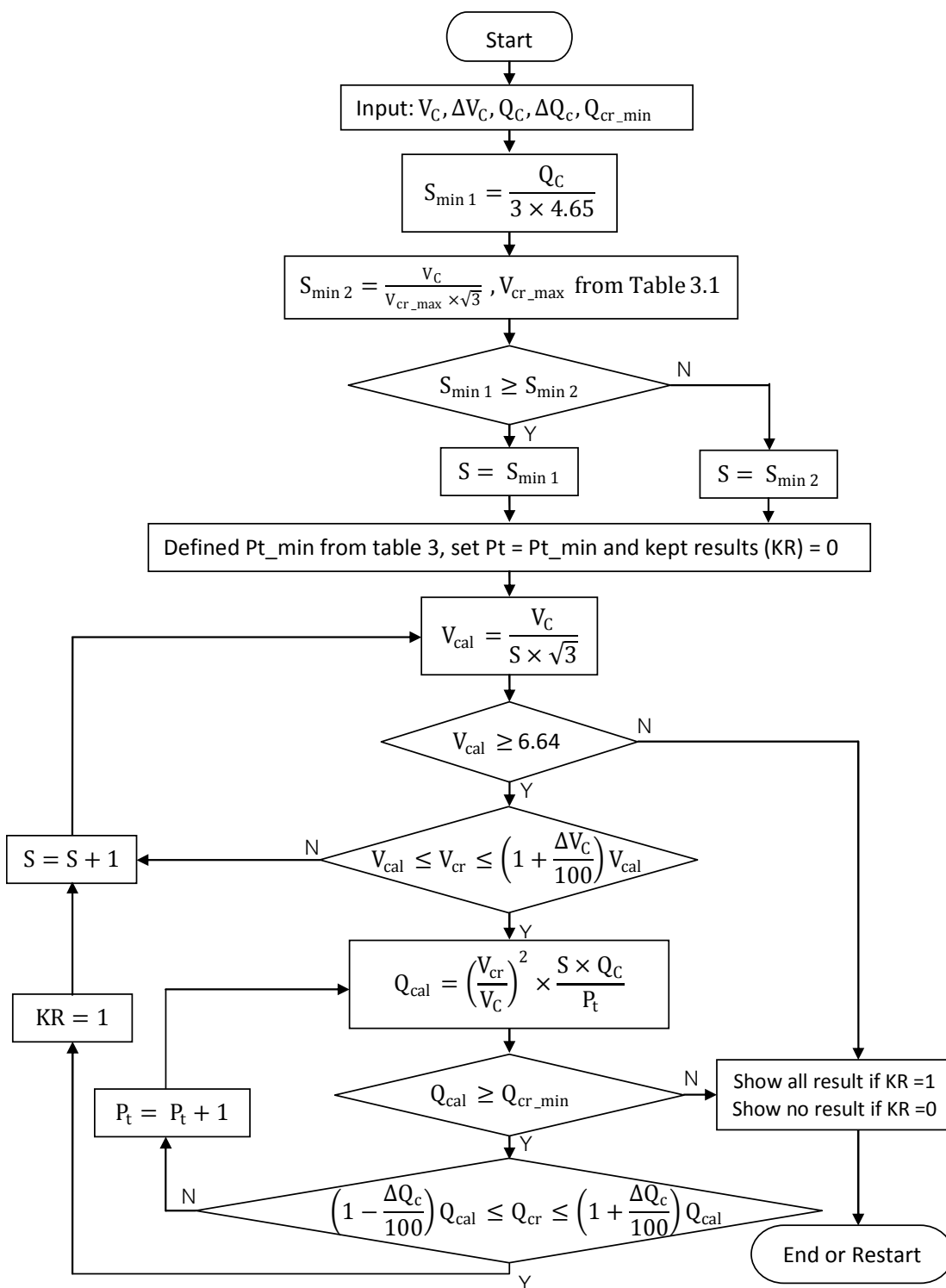
$$\left(1 - \frac{\Delta Q}{100} \right) Q_{cal} \leq Q_{cr} \leq \left(1 + \frac{\Delta Q_c}{100} \right) Q_{cal}$$



รูปที่ 4.10 โฟลว์ชาร์ตการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ต่อแบบ Split wye equal legs ที่ระดับแรงดันส่ง [16]



รูปที่ 4.11 โฟลว์ชาร์ตการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ต่อแบบ Split wye unequal legs ที่ระดับแรงดันส่ง [16]



รูปที่ 4.12 โฟลว์ชาร์ตการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ต่อแบบ Single wye ที่ระดับแรงดันส่ง [16]

4.2.3 ขั้นตอนการพิจารณาการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused ที่ระดับแรงดันสูง [16]

1. ตรวจสอบค่าดัชนีว่าต้องการออกแบบชุดตัวเก็บประจุที่มีการต่อแบบ Split wye equal legs, Split wye unequal legs หรือ Single wye
2. คำนวณหาจำนวนกลุ่มขั้นต่ำของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกัน เมื่อพิจารณากำลังรีแอกทีฟในแต่ละกลุ่มขนาน: $S_{\min 1}$

- กรณีชุดตัวเก็บประจุที่มีการต่อแบบ Split wye

$$S_{\min 1} = \frac{Q_c}{6 \times 4.65^*}$$

- กรณีชุดตัวเก็บประจุที่มีการต่อแบบ Single wye

$$S_{\min 1} = \frac{Q_c}{3 \times 4.65^*}$$

4.65* มีที่มาจาก NEMA CPQ-1988 แนะนำไว้ว่าจำนวนมากที่สุดของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกันในแต่ละกลุ่มอนุกรมควรจะมีกำลังงานรีแอกทีฟทั้งหมดใน 1 กลุ่มขนานไม่เกิน 4.65 MVAR สำหรับตัวเก็บประจุที่มีฉนวนแบบ All film (3.1 MVAR สำหรับตัวเก็บประจุที่รุ่นเก่ากว่า) เพื่อป้องกันการระเบิดของฟิวส์ที่ใช้ป้องกันตัวเก็บประจุ เนื่องจากการถ่ายประจุผ่านฟิวส์ในขณะที่เกิดการลัดวงจร

3. คำนวณหาจำนวนกลุ่มอนุกรมขั้นต่ำของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกันเมื่อพิจารณาพิกัดแรงดันสูงสุดของตัวเก็บประจุจาก([15] หรือข้อมูลผู้ผลิต) : $S_{\min 2}$

$$S_{\min 2} = \frac{V_c}{V_{\max} \times \sqrt{3}}$$

V_{\max} คือ พิกัดแรงดันสูงสุดของตัวเก็บประจุจาก [15] หรือข้อมูลผู้ผลิต

สาเหตุที่พิจารณาพิกัดแรงดันสูงสุดของตัวเก็บประจุ เนื่องจากตัวเก็บประจุแบบ Externally fused สามารถที่จะแยกกระแสผิดพ้องแรงดันสูงได้ ทำให้การออกแบบสามารถใช้ตัวเก็บประจุที่มีพิกัดแรงดันสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

4. เลือกจำนวนกลุ่มอนุกรมขั้นต่ำของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกัน : S_{\min} จากจำนวนที่มีค่ามากกว่าระหว่าง $S_{\min 1}$ และ $S_{\min 2}$

5. คำนวณหาค่าแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัว: V_{cal}

$$V_{cal} = \frac{V_c}{S \times \sqrt{3}}$$

หมายเหตุ $V_{cal} \geq 6.64$ หมายถึง การเลือกใช้หน่วยตัวเก็บประจุที่มีพิกัดแรงดันมากกว่า 6.64 kV ในการออกแบบ [16]

6. ตรวจสอบแรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุจากฐานข้อมูลที่ต้องการ ([15] หรือข้อมูลผู้ผลิต) : V_{cr}

$$V_{cal} \leq V_{cr} \leq \left(1 + \frac{\Delta V_c}{100}\right) V_{cal}$$

7. คำนวณหาค่ากำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุแต่ละตัว : Q_{cal}

- กรณีตัวเก็บประจุที่มีการต่อแบบ Split wye equal legs

$$\begin{aligned} Q_{cal} &= \left(\frac{V_{cr}}{V_c \div (S \times \sqrt{3})} \right)^2 \times \frac{Q_c}{3 \times 2 \times P_a \times S} \\ &= \left(\frac{V_{cr}}{V_c} \right)^2 \times \frac{S \times Q_c}{2 \times P_a} \end{aligned}$$

- กรณีตัวเก็บประจุที่มีการต่อแบบ Split wye unequal legs

$$\begin{aligned} Q_{cal} &= \left(\frac{V_{cr}}{V_c \div (S \times \sqrt{3})} \right)^2 \times \frac{Q_c}{3 \times P_t \times S} \\ &= \left(\frac{V_{cr}}{V_c} \right)^2 \times \frac{S \times Q_c}{P_t} \\ P_t &= (2 \times P_a) + ii \end{aligned}$$

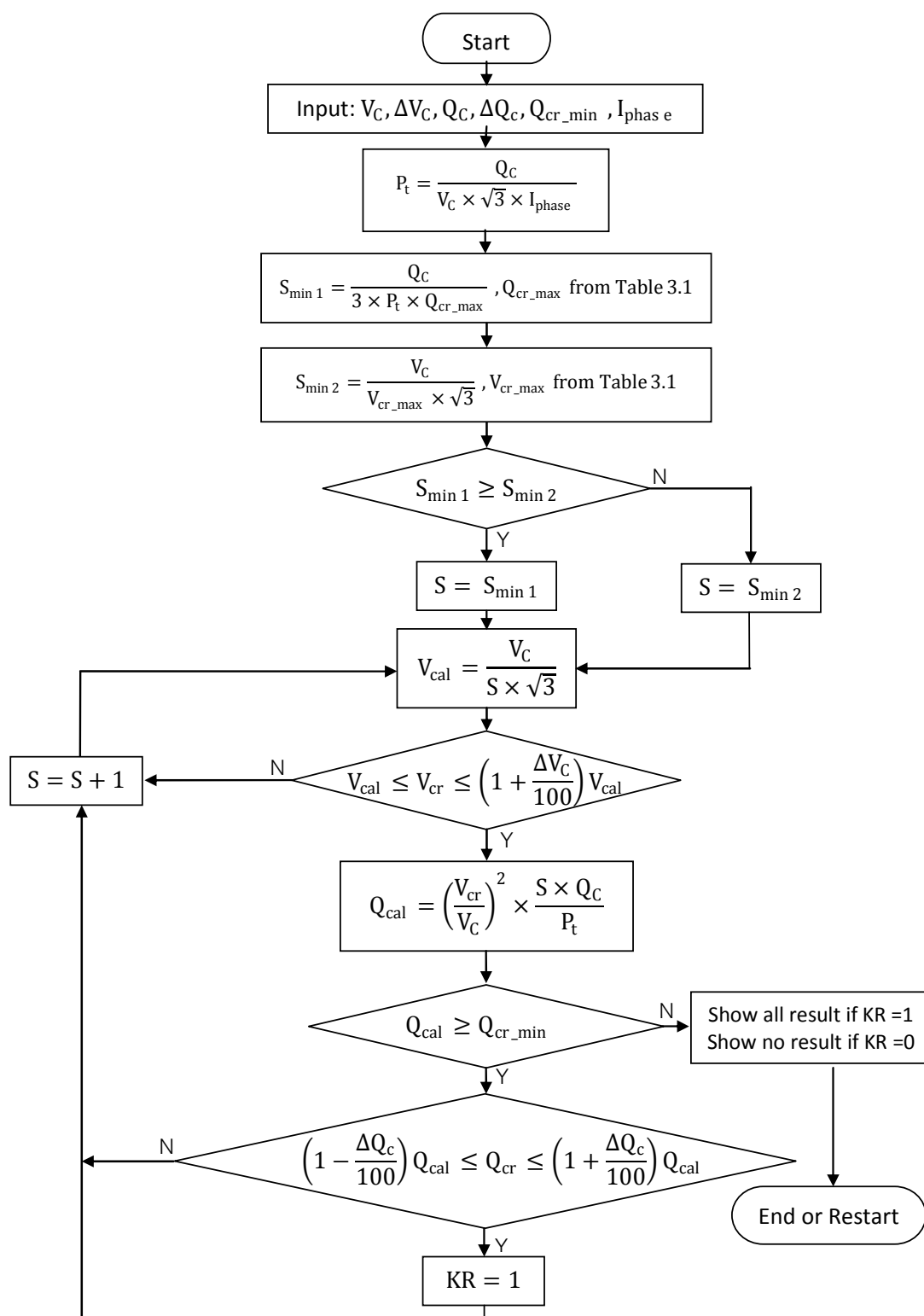
- กรณีตัวเก็บประจุที่มีการต่อแบบ Single wye

$$\begin{aligned} Q_{cal} &= \left(\frac{V_{cr}}{V_c \div (S \times \sqrt{3})} \right)^2 \times \frac{Q_c}{3 \times P_t \times S} \\ &= \left(\frac{V_{cr}}{V_c} \right)^2 \times \frac{S \times Q_c}{P_t} \\ P_t &= P_a \end{aligned}$$

8. ตรวจสอบกำลังรีแอกทีฟพิกัดของตัวเก็บประจุจากฐานข้อมูลที่ต้องการ ([15] หรือข้อมูลผู้ผลิต) : Q_{cr}

$$\left(1 - \frac{\Delta Q}{100}\right) Q_{cal} \leq Q_{cr} \leq \left(1 + \frac{\Delta Q_c}{100}\right) Q_{cal}$$

ขั้นตอนการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแบบ Internally fused ที่ระดับแรงดันส่งสามารถกระทำได้ในทำนองเดียวกันกับการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแบบ Internally fused ที่ระดับแรงดันจำหน่าย



รูปที่ 4.13 โฟลว์ชาร์ตการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแบบ Fuseless ต่อแบบ Split wye ที่ระดับแรงดันส่ง [16]

4.2.4 ขั้นตอนการพิจารณาการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแบบ Fuseless ที่ระดับแรงดันสั่ง [16]

1. คำนวณหาจำนวน Strings ของแต่ละเฟส: P_t

$$P_t = \frac{Q_c}{V_c \times 60^* \times \sqrt{3}}$$

60° แอมแปร์ (I_{phase}) ดูรายละเอียดได้จาก [21] หรือข้อมูลผู้ผลิต

2. คำนวณหาจำนวนกลุ่มอนุกรมขั้นต่ำของตัวเก็บประจุของแต่ละ String เมื่อพิจารณากำลังรีแอกทีฟ : $S_{\text{min}1}$

$$S_{\text{min}1} = \frac{Q_c}{3 \times P_t \times Q_{cr_max}}$$

Q_{cr_max} คือ พิกัดกำลังรีแอกทีฟสูงสุดของตัวเก็บประจุจาก [15] หรือข้อมูลผู้ผลิต

3. คำนวณหาจำนวนกลุ่มอนุกรมขั้นต่ำของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกัน เมื่อพิจารณาพิกัดแรงดันสูงสุดของตัวเก็บประจุจาก [15] หรือข้อมูลผู้ผลิต : $S_{\text{min}2}$

$$S_{\text{min}2} = \frac{V_c}{V_{\text{max}} \times \sqrt{3}}$$

V_{max} คือ พิกัดแรงดันสูงสุดของตัวเก็บประจุจาก [15] หรือข้อมูลผู้ผลิต

4. เลือกจำนวนกลุ่มอนุกรมขั้นต่ำของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกัน: S_{min} จากจำนวนที่มีค่ามากกว่าระหว่าง $S_{\text{min}1}$ และ $S_{\text{min}2}$
5. คำนวณหาแรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุแต่ละตัว: V_{cal}

$$V_{cal} = \frac{V_c}{S \times \sqrt{3}}$$

6. ตรวจสอบแรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุจากฐานข้อมูลที่ต้องการ ([15] หรือข้อมูลผู้ผลิต) :

V_{cr}

$$V_{cal} \leq V_{cr} \leq \left(1 + \frac{\Delta V_c}{100}\right) V_{cal}$$

7. คำนวณหาค่ากำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุแต่ละตัว: Q_{cal}

$$\begin{aligned} Q_{cal} &= \left(\frac{V_{cr}}{V_c \div (S \times \sqrt{3})} \right)^2 \times \frac{Q_c}{3 \times P_t \times S} \\ &= \left(\frac{V_{cr}}{V_c} \right)^2 \times \frac{S \times Q_c}{P_t} \end{aligned}$$

8. ตรวจสอบกำลังรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุจากฐานข้อมูลที่ต้องการ ([15] หรือข้อมูลผู้ผลิต) :

Q_{cr}

$$\left(1 - \frac{\Delta Q}{100}\right) Q_{cal} \leq Q_{cr} \leq \left(1 + \frac{\Delta Q_c}{100}\right) Q_{cal}$$

4.2.5 การแสดงผลลัพธ์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุ

4.2.5.1 การแสดงผลลัพธ์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแบบ Externally fused [16]

S แสดงจำนวนกลุ่มอนุกรมของตัวเก็บประจุ

P_a แสดงจำนวนตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกันในแต่ละกลุ่มอนุกรม

N แสดงจำนวนตัวเก็บประจุทั้งหมด

- กรณี Externally fused แบบ Split wye equal legs

$$N = 6 \times S \times P_a$$

- กรณี Externally fused แบบ Split wye unequal legs

$$N = 3 \times S \times (P_{a1} + P_{a2})$$

P_{a1} คือ จำนวนตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกันในแต่ละกลุ่มอนุกรมที่อยู่ทางซ้ายของแต่ละเฟส

P_{a2} คือ จำนวนตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกันในแต่ละกลุ่มอนุกรมที่อยู่ทางขวาของแต่ละเฟส

- กรณี Externally fused แบบ Single wye

$$N = 3 \times S \times P_t$$

V_{cr} แสดงขนาดแรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ

ΔV_c คือ ร้อยละของการเผื่อขนาดพิกัดแรงดัน

$$\Delta V_c = \left(\frac{V_{cr} \times S \times \sqrt{3}}{V_c} - 1 \right) \times 100$$

Q_{cr} แสดงขนาด kVAR พิกัดของตัวเก็บประจุ

Q_{cr_total} แสดงขนาด MVAR พิกัดรวมของตัวเก็บประจุ

$$Q_{cr_total} = \frac{Q_{cr} \times N}{1000}$$

Q_{comp} แสดงขนาด MVAR รวมของตัวเก็บประจุที่สามารถชดเชยเข้าระบบ

$$Q_{comp} = \left(\frac{V_c}{V_{cr} \times S \times \sqrt{3}} \right)^2 \times Q_{cr_total}$$

4.2.5.2 การแสดงผลลัพธ์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแบบ Internally fused [16]

S แสดงจำนวนกลุ่มอนุกรมของตัวเก็บประจุ

P_a แสดงจำนวนตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกันในแต่ละกลุ่มอนุกรม

N แสดงจำนวนตัวเก็บประจุทั้งหมด

- กรณี Internally fused แบบ Split wye equal legs

$$N = 6 \times S \times P_a$$

- กรณี Internally fused แบบ Split wye unequal legs

$$N = 3 \times S \times (P_{a1} + P_{a2})$$

P_{a1} คือ จำนวนตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกันในแต่ละกลุ่มอนุกรมที่อยู่ทางซ้ายของแต่ละเฟส

P_{a2} คือ จำนวนตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกันในแต่ละกลุ่มอนุกรมที่อยู่ทางขวาของแต่ละเฟส

- กรณี Internally fused แบบ Single wye

$$N = 3 \times S \times P_t$$

V_{cr} แสดงขนาดแรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ

ΔV_c คือ ร้อยละของการเผื่อขนาดพิกัดแรงดัน

$$\Delta V_c = \left(\frac{V_{cr} \times S \times \sqrt{3}}{V_c} - 1 \right) \times 100$$

Q_{cr} แสดงขนาด kVAR พิกัดของตัวเก็บประจุ

Q_{cr_total} แสดงขนาด MVAR พิกัดรวมของตัวเก็บประจุ

$$Q_{cr_total} = \frac{Q_{cr} \times N}{1000}$$

Q_{comp} แสดงขนาด MVAR รวมของตัวเก็บประจุที่สามารถชดเชยเข้าระบบ

$$Q_{comp} = \left(\frac{V_c}{V_{cr} \times S \times \sqrt{3}} \right)^2 \times Q_{cr_total}$$

4.2.5.3 การแสดงผลลัพธ์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแบบ Fuseless

[16]

S แสดงจำนวนกลุ่มอนุกรมของตัวเก็บประจุ

P_a แสดงจำนวน String ของแต่ละขาในแต่ละเฟส

Section แสดงจำนวน sections ของ elements ภายในตัวเก็บประจุแต่ละตัว

- กรณีไม่ทราบจำนวน element ภายในตัวเก็บประจุแต่ละตัว

$$Sections = \frac{V_{cr}}{V_{elem}}$$

V_{elem} คือ พิกัดแรงดันของ elements โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วง 1800-2400 V [13]

- กรณี Fuseless แบบ Split wye equal legs

$$N = 6 \times S \times P_a$$

- กรณี Fuseless แบบ Split wye unequal legs

$$N = 3 \times S \times (P_{a1} + P_{a2})$$

P_{a1} คือ จำนวนString ของขาที่อยู่ทางซ้ายของแต่ละเฟส

P_{a2} คือ จำนวนString ของขาที่อยู่ทางขวาของแต่ละเฟส

V_{cr} แสดงขนาดแรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ

ΔV_c คือ ร้อยละของการเผื่อขนาดพิกัดแรงดัน

$$\Delta V_c = \left(\frac{V_{cr} \times S \times \sqrt{3}}{V_c} - 1 \right) \times 100$$

Q_{cr} แสดงขนาด kVAR พิกัดของตัวเก็บประจุ

Q_{cr_total} แสดงขนาด MVAR พิกัดรวมของตัวเก็บประจุ

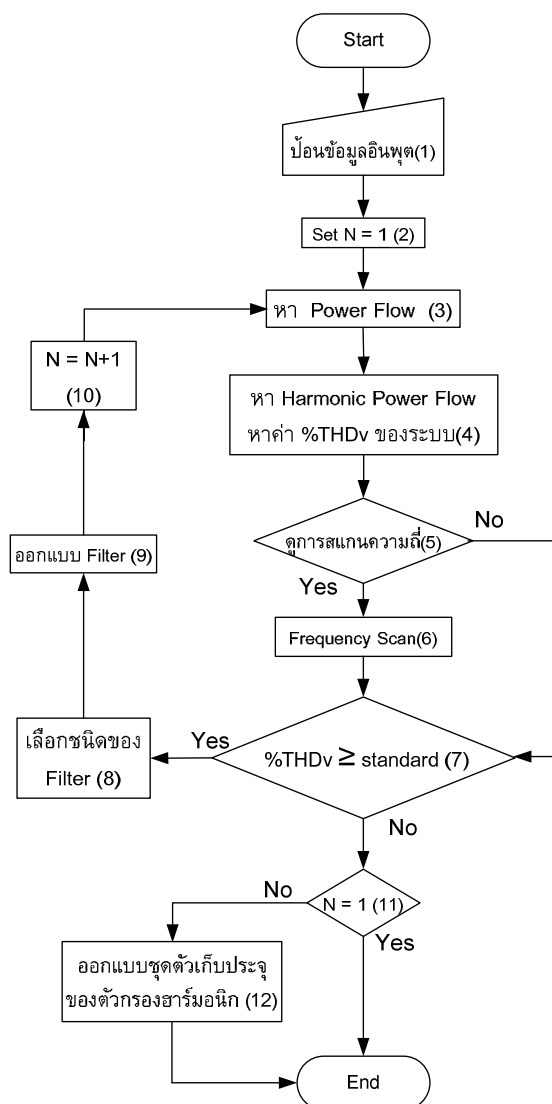
$$Q_{cr_total} = \frac{Q_{cr} \times N}{1000}$$

Q_{comp} แสดงขนาด MVAR รวมของตัวเก็บประจุที่สามารถชดเชยเข้าระบบ

$$Q_{comp} = \left(\frac{V_c}{V_{cr} \times S \times \sqrt{3}} \right)^2 \times Q_{cr_total}$$

4.3 การทำงานของโปรแกรม

โปรแกรมนี้ประกอบไปด้วย 6 ส่วนหลักคือ 1) ข้อมูลอินพุทของระบบทดสอบ 2) การคำนวณโหลดไฟลว์ที่ความถี่หลักมูล (Power flow) 3) การคำนวณโหลดไฟลว์ที่ความถี่ฮาร์มอนิก (Harmonic power flow) 4) การสแกนความถี่ (Frequency scan) 5) การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟ (Passive filter design) และ 6) การออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูงสำหรับตัวกรองฮาร์มอนิก (High voltage capacitor design for filter) โดยการทำงานของโปรแกรมแสดงเป็นโฟลว์ชาร์ตดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรม

การอธิบายแต่ละส่วนของไฟล์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรม

ส่วนที่ 1 : ป้อนข้อมูลอินพุต คือการใส่ข้อมูลของระบบตัวอย่างได้แก่ ข้อมูลกิ่ง (Branch data) ข้อมูลบัส (Bus data) ข้อมูลเจนเนอเรเตอร์ (Supply and local generator data) ข้อมูลตัวเก็บประจุ (PF Capacitor bank data) ข้อมูลสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก (Harmonic spectrum) ฐานข้อมูลหน่วยตัวเก็บประจุ (Capacitor bank unit)

ส่วนที่ 2 : ให้ $N = 1$ เป็นค่าเริ่มต้น

ส่วนที่ 3 : หา Power flow เป็นการหาโหลดโพลาร์ในระบบที่ความถี่หลักมูล

ส่วนที่ 4 : หา Harmonic Power flow เป็นการหาโหลดโพลาร์ในระบบที่ความถี่ฮาร์มอนิก

ส่วนที่ 5 : เป็นการตัดสินใจในการเลือกศึกษาการสแกนอิมพีแดนซ์

ส่วนที่ 6 : Frequency scans เป็นการสแกนค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่บัสที่สนใจที่ความถี่ต่าง ๆ

ส่วนที่ 7 : เป็นการเปรียบเทียบค่ากระแสฮาร์มอนิกและค่า %THDv ว่าเกินค่ามาตรฐานหรือไม่ โดยยึดถือตาม Std-ER G 5/4

ส่วนที่ 8 : เลือก filter โดยชนิดตัวกรองที่มีให้เลือกได้แก่ Single tuned, High pass 2 order, High pass 3 order, และ C-type

ส่วนที่ 9 : ทำการออกแบบตัวประกอบตัวกรอง (C, L, R) และทดลองใส่ตัวกรองเข้าไปในระบบ

ส่วนที่ 10 : ทำการเพิ่มค่า N ขึ้นหนึ่งค่าเพื่อให้รู้ว่ามีการออกแบบตัวกรอง

ส่วนที่ 11 : ทำการตรวจสอบค่า N ว่าเท่ากับหนึ่งหรือไม่ ถ้า N เท่ากับหนึ่งแสดงว่ายังไม่มีกรออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก

ส่วนที่ 12 : เมื่อ N ไม่เท่ากับหนึ่ง ทำการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูงของตัวกรองฮาร์มอนิก

4.4 การพัฒนาโปรแกรมสำหรับการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงสูง

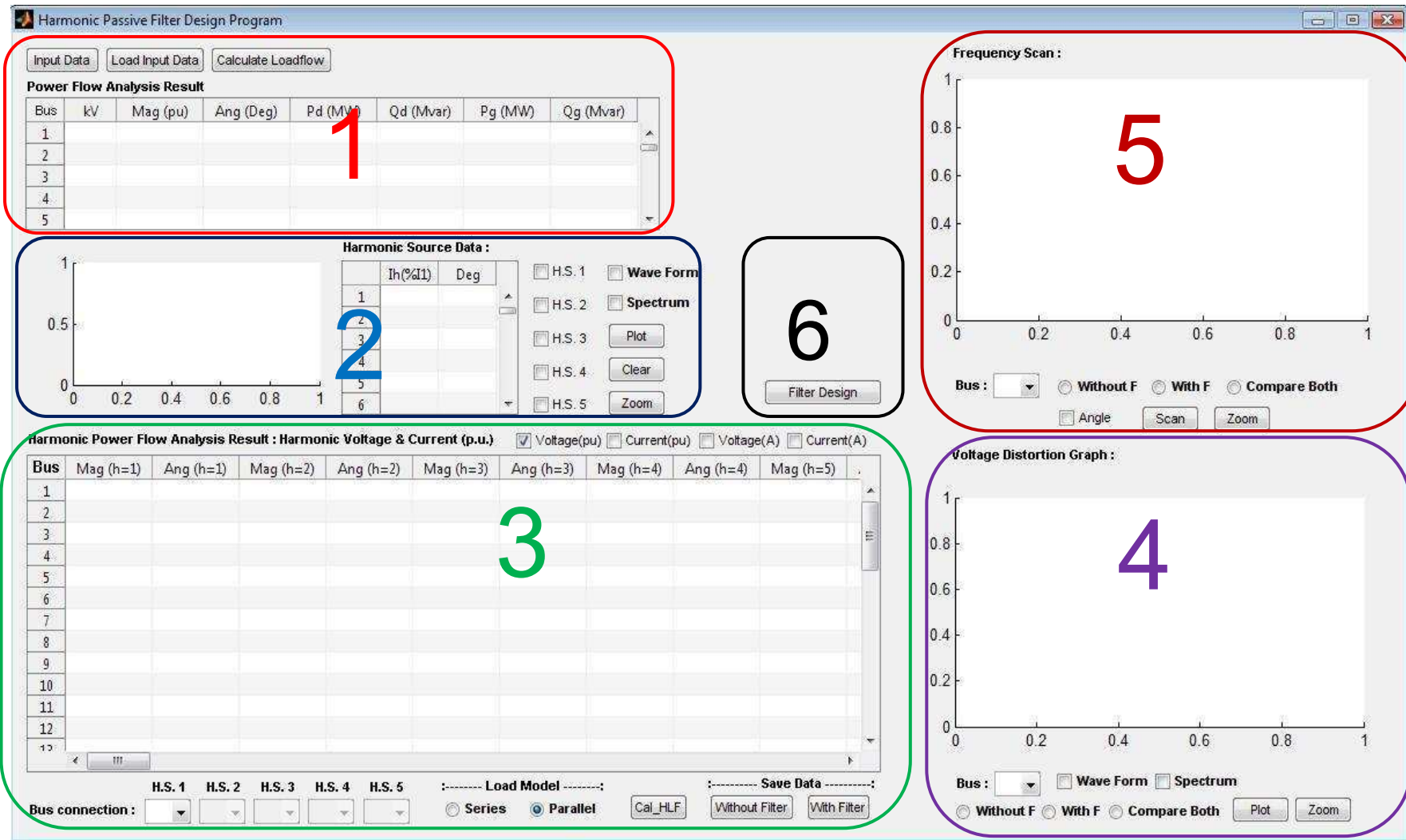
การพัฒนาโปรแกรมสำหรับการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงสูงแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ ดังนี้ 1) การพัฒนาในส่วนหน้าหลักของโปรแกรม 2) การพัฒนาในส่วนการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก และ 3) การพัฒนาในส่วนของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

4.4.1 การพัฒนาโปรแกรมในส่วนหน้าหลักของโปรแกรม

ส่วนหน้าหลักของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 4.15 ซึ่งในหน้าต่างนี้ประกอบไปด้วย 6 ส่วนดังนี้

- 1) ข้อมูลอินพุตและการวิเคราะห์โพลาร์ที่ความถี่หลักมูล ในส่วนนี้ใช้สำหรับป้อนข้อมูลอินพุตผ่านโปรแกรม excel และวิเคราะห์โพลาร์ที่ความถี่หลักมูล ผลลัพธ์ที่จะแสดงในส่วนนี้คือค่าแรงดันและค่ากำลังไฟฟ้าของบัสทุกบัส โดยแรงดันจะแสดงในหน่วยเปอร์เซ็นต์ ส่วนค่ากำลังไฟฟ้าจะแสดงในหน่วย MW และ MVar
- 2) ข้อมูลสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ในส่วนนี้จะแสดงขนาดและมุมของสเปกตรัมของแต่ละแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก และสามารถเขียนกราฟความถี่รวมของสเปกตรัมได้
- 3) การวิเคราะห์โพลาร์ที่ความถี่ฮาร์มอนิก ผลลัพธ์ที่แสดงในส่วนนี้คือค่าแรงดันในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ของทุกบัสทุกความถี่ กระแสทุกกิ่งของระบบในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ และค่าความถี่รวมของแรงดันและกระแส
- 4) กราฟความถี่รวมของแรงดัน ในส่วนนี้จะนำค่าแรงดันที่ได้จากส่วนที่ 3 นำมาเขียนกราฟเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบ ระหว่างก่อนติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกและหลังติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกเข้าในระบบ
- 5) การสแกนความถี่ ในส่วนนี้เป็นการแสดงกราฟการสแกนอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ โดยสามารถเปรียบเทียบกราฟระหว่างก่อนและหลังติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิก
- 6) การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก ในส่วนนี้เพื่อนำไปสู่หน้าต่างของการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก

รูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงตัวอย่างข้อมูลอินพุตของระบบทดสอบโดยป้อนข้อมูลผ่านโปรแกรม Excel และหน้าหลักของโปรแกรมออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงสูงขณะใช้งาน ตามลำดับ

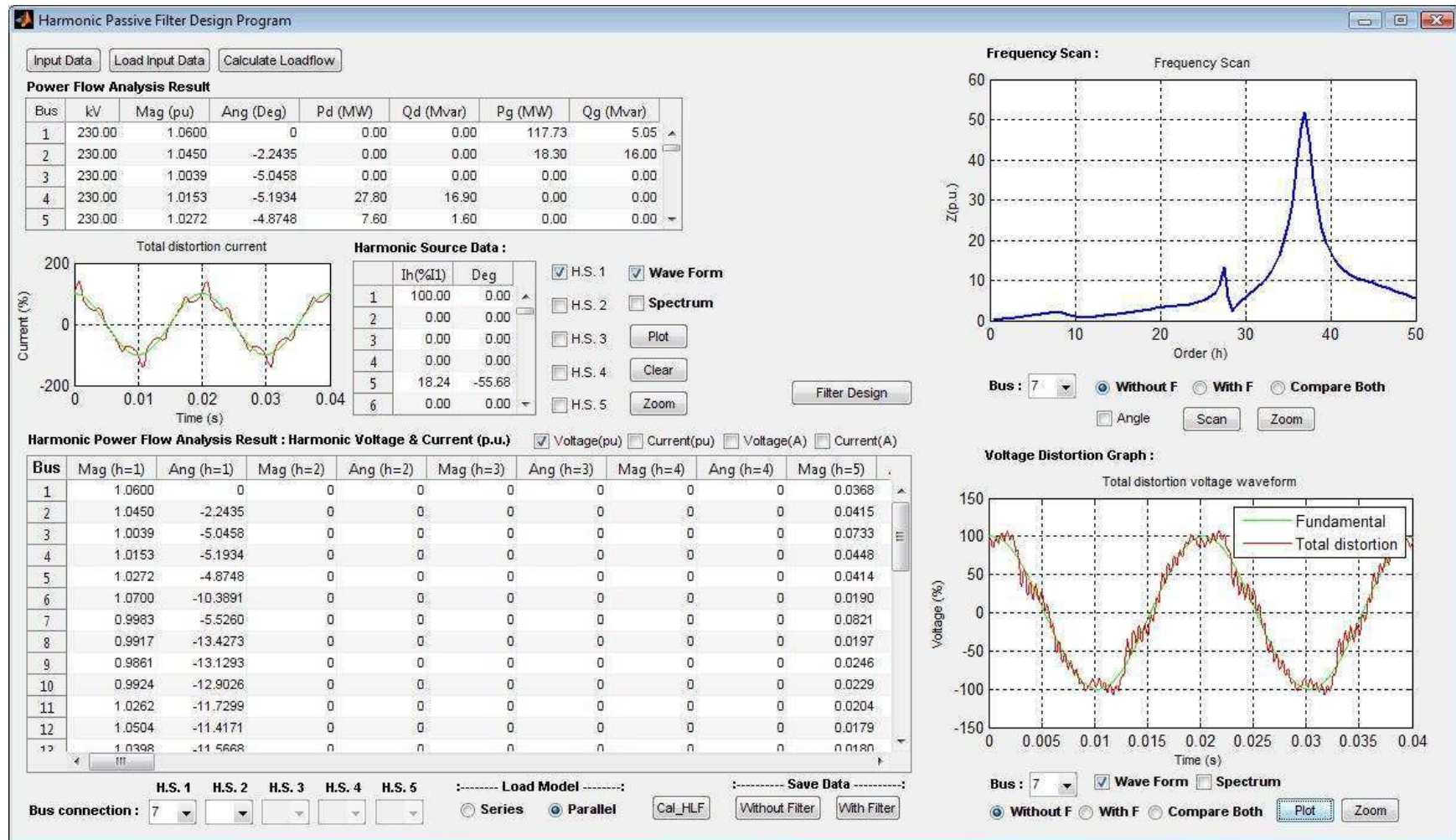


รูปที่ 4.15 หน้าหลักของโปรแกรมออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงสูง

Inputdata2 - Microsoft Excel

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	%	Bus data														
2	%			GEN		LOAD										
3	%	Bus	mag. V	MW	Mvar	MW	Mvar	Type	kV	(1 = slack bus , 2 = PV bus , 3 = PQ bus)						
4		1	1.06	0	0	0	0	1	230							
5		2	1.045	18.3	0	0	0	2	230							
6		3	1	0	0	0	0	3	230							
7		4	1	0	0	27.8	16.9	3	230							
8		5	1	0	0	63.6	31.6	3	230							
9		6	1.07	11.2	0	0	0	2	115							
10		7	1	0	0	30	20	3	33							
11		8	1	0	0	14.9	5	3	115							
12		9	1	0	0	29.5	16.6	3	115							
13		10	1	0	0	9	5.8	3	115							
14		11	1	0	0	3.5	1.8	3	115							
15		12	1	0	0	6.1	1.6	3	115							
16		13	1	0	0	13.5	5.8	3	115							

รูปที่ 4.16 ตัวอย่างข้อมูลอินพุตของระบบทดสอบโดยป้อนข้อมูลผ่านโปรแกรม excel



รูปที่ 4.17 หน้าหลักของโปรแกรมออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงสูงขณะใช้งาน

4.4.2 การพัฒนาโปรแกรมในส่วนการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก

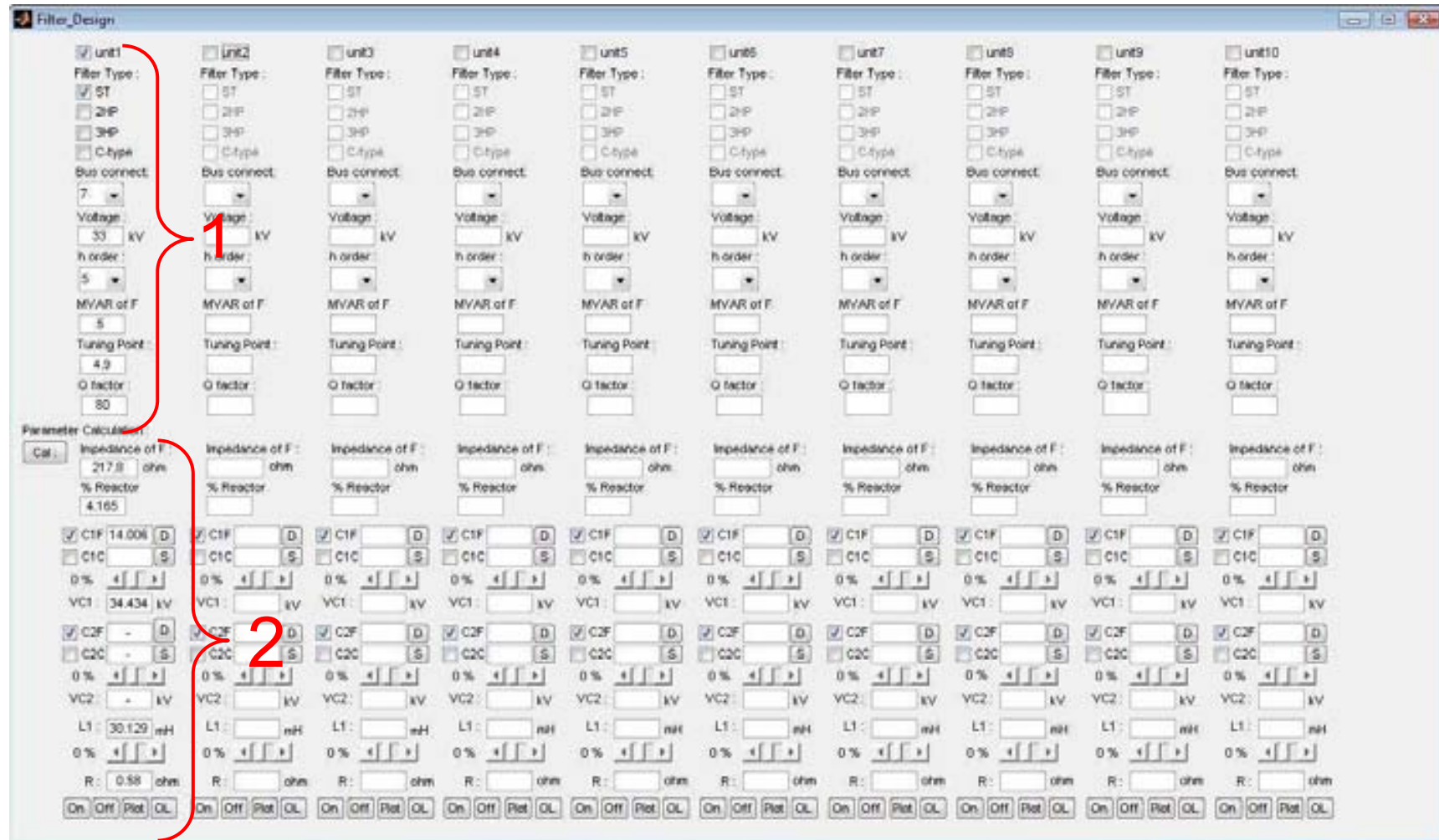
ส่วนนี้เป็นส่วนของการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงดังรูปที่ 4.18 หน้าโปรแกรมนี้สามารถออกแบบได้ทั้งหมด 10 ตัว แต่ละตัวแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

- 1) ส่วนอินพุต ในส่วนนี้เป็นการกำหนดคุณลักษณะของตัวกรอง โดยอินพุตที่ต้องการคือ ชนิดของตัวกรอง บัสที่ต้องการติดตั้งตัวกรอง แรงดันไฟฟ้าที่บัส อันดับฮาร์มอนิกที่ต้องการจะกรอง ค่ากำลังรีแอกทีฟของตัวกรอง ความถี่ที่ต้องการจูน และค่าตัวประกอบคุณภาพของตัวกรอง
- 2) ส่วนเอาต์พุต ในส่วนนี้จะแสดงผลที่ได้จากการออกแบบคือ ค่าอิมพีแดนซ์รวมของตัวกรอง เปอร์เซ็นต์รีแอกเตอร์ ค่าความจุไฟฟ้าในหน่วยไมโครฟารัด (C_1 , C_2) ค่าแรงดันของตัวเก็บประจุ ค่าความเหนี่ยวนำในหน่วยมิลลิเฮนรี่ ค่าความต้านทานในหน่วยโอห์ม นอกจากนี้ยังมีปุ่มอีกสี่ปุ่มดังนี้ ปุ่ม “on” ใช้ในการต่อตัวกรองเข้าสู่ระบบ ปุ่ม “off” ใช้ตัดตัวกรองออกจากระบบ ปุ่ม “plot” ใช้ในการเขียนกราฟคุณลักษณะของตัวกรอง ปุ่ม “OL” ใช้ในการตรวจสอบภาวะไหลเกินของตัวกรอง

4.4.3 การพัฒนาโปรแกรมในส่วนของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง

ในส่วนนี้เป็นการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูงแสดงดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 โดยที่รูปที่ 4.19 เป็นหน้าโปรแกรมการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูงที่มีแรงดันมากกว่า 20 kV ส่วนรูปที่ 4.20 เป็นหน้าโปรแกรมการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูงที่มีแรงดันน้อยกว่า 20 kV (พิจารณาการต่อแบบ Single Wye เท่านั้น) หน้าโปรแกรมนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

- 1) ส่วนอินพุต ในส่วนนี้เป็นการกำหนดเงื่อนไขการออกแบบตัวเก็บประจุเช่น เปอร์เซ็นต์แรงดันไฟฟ้าที่ต้องการเพื่อในการออกแบบ เปอร์เซ็นต์กำลังรีแอกทีฟที่ต้องการเพื่อในการออกแบบ ค่ากำลังรีแอกทีฟต่ำสุดของหน่วยตัวเก็บประจุที่จะใช้ในการออกแบบ เป็นต้น
- 2) ส่วนเอาต์พุต ในส่วนนี้จะแสดงผลการออกแบบชุดตัวเก็บประจุที่ได้จากการออกแบบ โดยจะแสดงในรูปของตารางซึ่งแสดงดังรูป 4.19



รูปที่ 4.18 หน้าโปรแกรมในส่วนการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก

Cap1_unit1

Parameter

H_Factor: 1 % VC: 34.434 kV Delta VC: 10 % I phase: 60 A
 Vs_Factor: 1.00 % VC_d: 34.434 kV Delta QC: 3 %
 QC_d: 5.21725 MVAR Qcr min: 100 MVAR Recalculate

Externally Fused

Split Wye Equal Leg: 1

	S	Pa	Total cap	Vcr	Delta Vs (%)	Qcr (kVAR)	Qcr_t (MVA)
1	1	10	60	21.6000	8.6493	100	
2							

Split Wye Ground Unequal Leg: 1

	S	Pa1	Pa2	Total cap	Vcr	Delta Vs	Qcr (kVAR)	Qcr_t (MVA)
1	1	8	9	51	19.9200	0.1988	100	5.10
2								

Split Wye Unground Unequal Leg: 1

	S	Pa1	Pa2	Total cap	Vcr	Delta Vs	Qcr (kVAR)	Qcr_t (MVA)
1	1	8	9	51	19.9200	0.2000	100	5.10
2								

Single Wye Ground: 1

	S	Pa	Total cap	Vcr	Delta Vs (%)	Qcr (kVAR)	Qcr_t (MVA)
1	1	17	51	19.9200	0.1988	100	5.10
2							

Single Wye Unground: 1

	S	Pa	Total cap	Vcr	Delta Vs (%)	Qcr (kVAR)	Qcr_t (MVA)
1	1	17	51	19.9200	0.2000	100	5.10
2							

Internally Fused

Split Wye Equal Leg: 1

	S	Pa	Total cap	Vcr	Delta Vs (%)	Qcr (kVAR)	Qcr_t (MVA)
1	0	0	0	0	0	0	0
2							

Split Wye Unequal Leg: 1

	S	Pa1	Pa2	Total cap	Vcr	Delta Vs	Qcr (kVAR)	Qcr_t (MVA)
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2								

Single Wye: 1

	S	Pa	Total cap	Vcr	Delta Vs (%)	Qcr (kVAR)	Qcr_t (MVA)
1	0	0	0	0	0	0	0
2							

Fuseless

Split Wye Equal Leg: 1

	S	Section	Pa	Total cap	Vcr	Delta Vs	Qcr (kVAR)	Qcr_t (MVA)
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2								

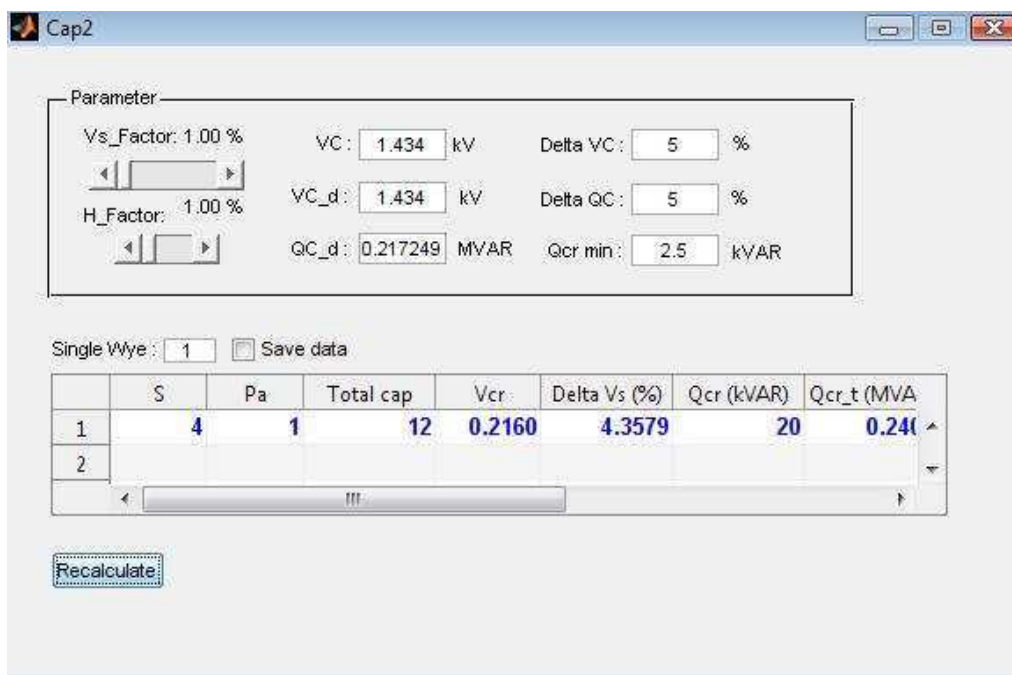
Split Wye Unequal Leg: 1

	S	Section	Pa1	Pa2	Total cap	Vcr	Delta Vs	Qcr (kVAR)	Qc
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2									

Single Wye: 1

	S	Section	Pa	Total cap	Vcr	Delta Vs	Qcr (kVAR)	Qcr_t (MVA)
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2								

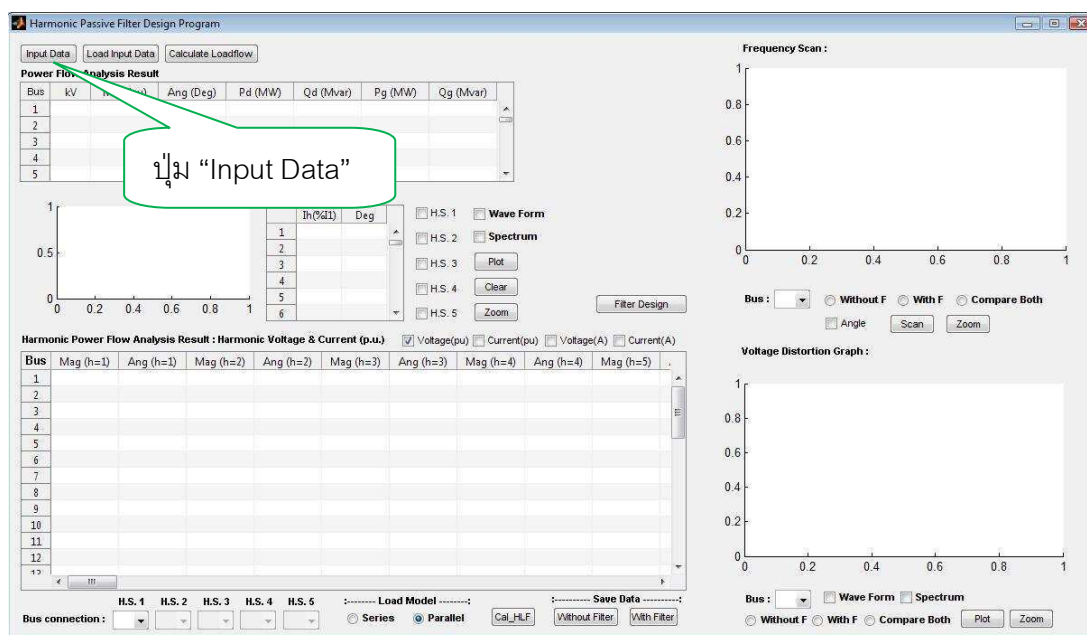
รูปที่ 4.19 หน้าโปรแกรมในส่วนการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูงแรงดันมากกว่า 20 kV



รูปที่ 4.20 หน้าโปรแกรมในส่วนการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูงแรงดันน้อยกว่า 20 kV

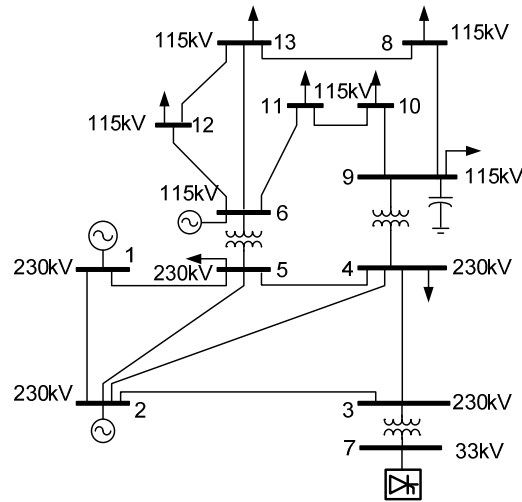
4.4.4 ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรม

1. เปิดโปรแกรม MATLAB แล้วเปิดไฟล์โปรแกรมการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแพสซีฟในระบบไฟฟ้าแรงสูงจากนั้นกด F5 เพื่อรันโปรแกรม โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างหลักขึ้นมา ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 หน้าโปรแกรมหลัก

2. กดปุ่ม “Input Data” เพื่อทำการใส่ข้อมูลอินพุตของระบบทดสอบ ตัวอย่างระบบทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.22 เมื่อกดปุ่ม “Input Data” โปรแกรมจะเปิดไฟล์อินพุตซึ่งเป็นไฟล์ของ โปรแกรม excel ดังรูป 4.23 เมื่อใส่ข้อมูลครบจากนั้นกดปุ่ม save file



รูปที่ 4.22 แผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ

The screenshot shows the following data in the Excel spreadsheet:

Bus	Voltage (kV)	GEN		LOAD		Type	kV
		MW	Mvar	MW	Mvar		
1	1.06	0	0	0	0	1	230
2	1.045	18.3	0	0	0	2	230
3	1	0	0	0	0	3	230
4	1	0	0	27.8	16.9	3	230
5	1	0	0	63.6	31.6	3	230
6	1.07	11.2	0	0	0	2	115
7	1	0	0	30	20	3	33
8	1	0	0	14.9	5	3	115
9	1	0	0	29.5	16.6	3	115
10	1	0	0	9	5.8	3	115
11	1	0	0	3.5	1.8	3	115
12	1	0	0	6.1	1.6	3	115
13	1	0	0	13.5	5.8	3	115

A green callout points to the input data fields with the text: ป้อนข้อมูลอินพุต

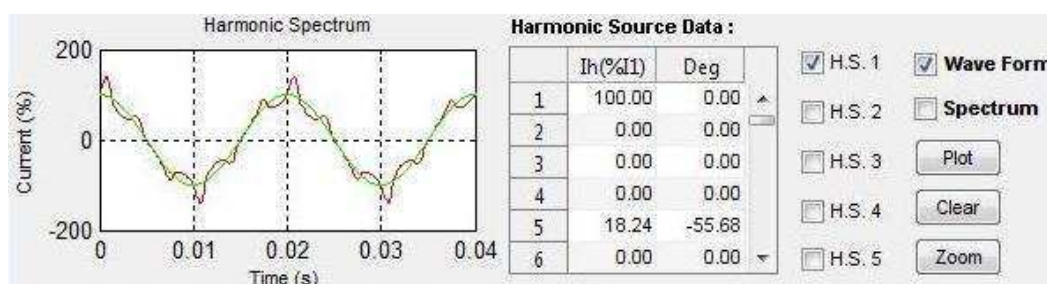
รูปที่ 4.23 ไฟล์อินพุต

3. เมื่อป้อนข้อมูลอินพุตเสร็จเรียบร้อยแล้ว ทำการโหลดข้อมูลอินพุตเข้าสู่โปรแกรมโดยกดปุ่ม “Load Input Data” จากนั้นทำการวิเคราะห์โหลดโพล์ที่ความถี่หลักมูล โดยกดปุ่ม “Calculate Loadflow” โปรแกรมจะแสดงผลดังรูปที่ 4.24

Power Flow Analysis Result							
Bus	kV	Mag (pu)	Ang (Deg)	Pd (MW)	Qd (Mvar)	Pg (MW)	Qg (Mvar)
1	230.00	1.0600	0.00	0.00	0.00	117.73	5.05
2	230.00	1.0450	-2.24	0.00	0.00	18.30	16.00
3	230.00	1.0040	-5.05	0.00	0.00	0.00	0.00
4	230.00	1.0150	-5.19	27.80	16.90	0.00	0.00
5	230.00	1.0270	-4.88	7.60	1.60	0.00	0.00

รูปที่ 4.24 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพล์ที่ความถี่หลักมูล

4. โปรแกรมสามารถเขียนกราฟความผิดเพี้ยนรวมของกระแสของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกได้ ดังรูปที่ 4.25 โดยการเลือกแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก และเลือกการแสดงผลกราฟเป็นรูปคลื่นหรือการแสดงผลเป็นสเปกตรัม จากนั้นกดปุ่ม “Plot”



รูปที่ 4.25 กราฟความผิดเพี้ยนรวมของกระแสของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

5. เมื่อวิเคราะห์โหลดโพล์ที่ความถี่หลักมูลแล้ว จากนั้นทำการวิเคราะห์โหลดโพล์ที่ความถี่ฮาร์มอนิก โดยทำการระบุบัสที่ติดตั้งแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก แสดงดังรูปที่ 4.26

	H.S. 1	H.S. 2	H.S. 3	H.S. 4	H.S. 5
Bus connection :	7				

รูปที่ 4.26 การเลือกบัสที่ติดตั้งแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

จากรูปที่ 4.26 แสดงให้เห็นว่า มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอยู่หนึ่งแหล่งซึ่งต่ออยู่ที่บัส 7 ในระบบ

6. ทำการวิเคราะห์โหนดโพลาร์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกโดยกดปุ่ม “Cal HLF” โปรแกรมจะการคำนวณและแสดงผลดังรูปที่ 4.27

Harmonic Power Flow Analysis Result : Harmonic Voltage & Current (p.u.) Voltage Current

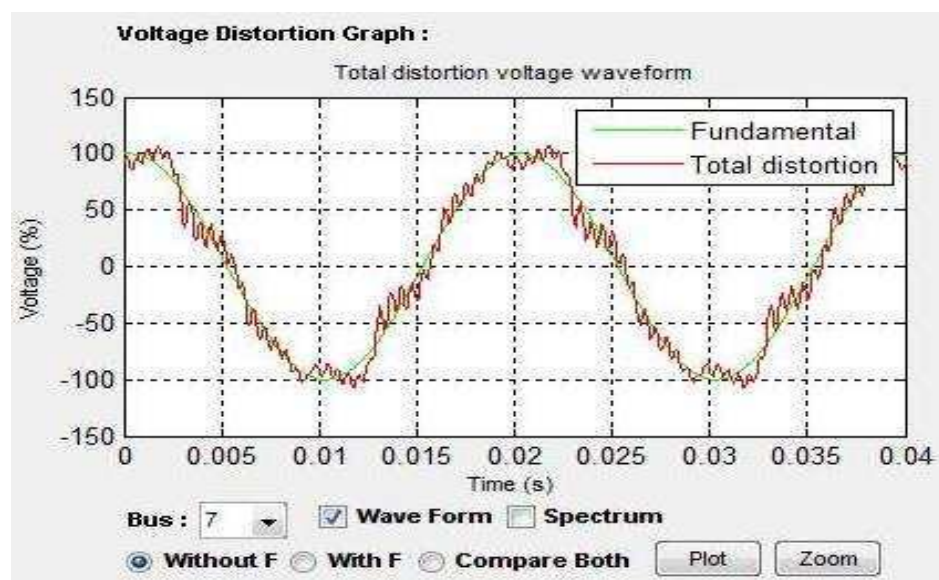
Bus	Mag (h=1)	Ang (h=1)	Mag (h=2)	Ang (h=2)	Mag (h=3)	Ang (h=3)	Mag (h=4)	Ang (h=4)	Mag (h=5)
1	1.0600	0	0	0	0	0	0	0	0.0368
2	1.0450	-2.2435	0	0	0	0	0	0	0.0415
3	1.0039	-5.0458	0	0	0	0	0	0	0.0733
4	1.0153	-5.1934	0	0	0	0	0	0	0.0448
5	1.0272	-4.8748	0	0	0	0	0	0	0.0414
6	1.0700	-10.3891	0	0	0	0	0	0	0.0190
7	0.9983	-5.5260	0	0	0	0	0	0	
8	0.9917	-13.4273	0	0	0	0	0	0	
9	0.9861	-13.1293	0	0	0	0	0	0	
10	0.9924	-12.9026	0	0	0	0	0	0	0.0229
11	1.0262	-11.7299	0	0	0	0	0	0	0.0204
12	1.0504	-11.4171	0	0	0	0	0	0	0.0179
13	1.0398	-11.5668	0	0	0	0	0	0	0.0180

ปุ่ม “Cal_HLF”

Bus connection : 7 H.S. 1 H.S. 2 H.S. 3 H.S. 4 H.S. 5 Load Model : Series Parallel Save Data : Cal_HLF Without Filter With Filter

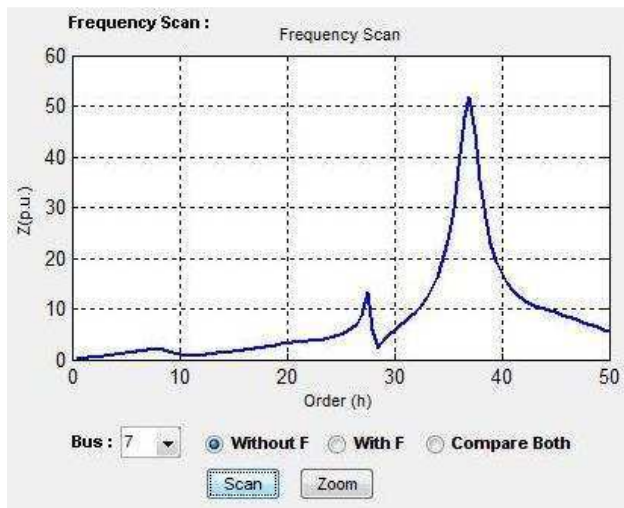
รูปที่ 4.27 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหนดโพลาร์ที่ความถี่ฮาร์มอนิก

7. จากรูปที่ 4.27 จะมีปุ่มที่ชื่อว่า “Without Filter” และ “With Filter” ซึ่งใช้ในการเก็บข้อมูลค่าแรงดันที่บัสต่าง ๆ ในขณะที่ยังไม่ได้ต่อตัวกรองเข้าสู่ระบบและขณะที่ต่อตัวกรองเข้าสู่ระบบตามลำดับ ซึ่งการเก็บข้อมูลนี้จะนำไปใช้ในการเขียนกราฟความผิดเพี้ยนของแรงดัน ดังรูปที่ 4.28 โดยการเลือกบัสที่ต้องการเขียนกราฟและเลือกเขียนกราฟรูปคลื่นหรือสเปกตรัม แล้วกดปุ่ม “Plot”



รูปที่ 4.28 กราฟความผิดเพี้ยนของแรงดันของบัสที่สนใจซึ่งเป็นผลจากการวิเคราะห์โหนดโพลาร์ที่ความถี่ฮาร์มอนิก

8. หากต้องการศึกษาการสแกนความถี่ที่สามารถทำได้โดยการเลือกบัลต์ที่ต้องการศึกษาแล้วกดปุ่ม “Scan” ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.29

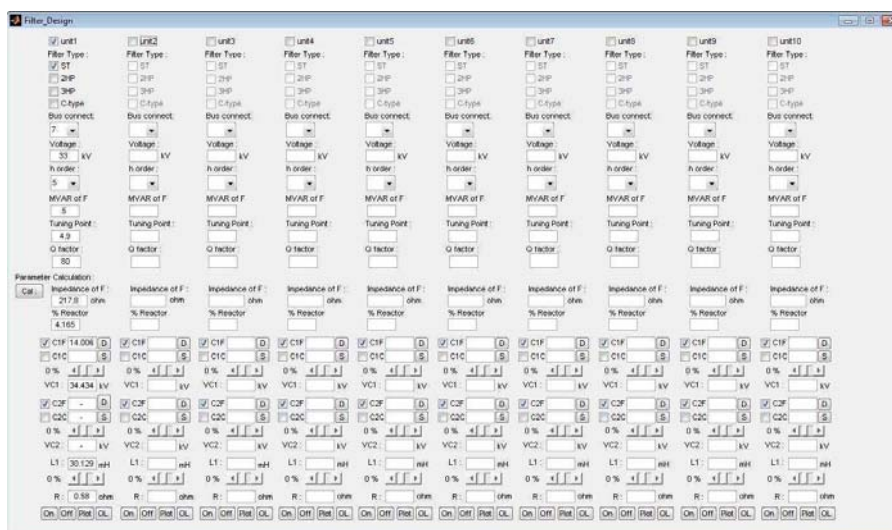


รูปที่ 4.29 การสแกนความถี่ที่บัลต์ 7

9. เมื่อทำการวิเคราะห์โหลดโพลร์ที่ความถี่ฮาร์มอนิก และพบว่าค่า %THDv ของบัลต์ที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่เกินกว่าค่า %THDv ของค่ามาตรฐานกำหนด จำเป็นต้องออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกเพื่อใช้ลดค่า %THDv ให้ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน โดยการกดปุ่ม “Filter Design” โปรแกรมจะทำการเปิดหน้าต่างโปรแกรมในส่วนของการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก ดังรูปที่ 4.30 และ 4.31



รูปที่ 4.30 ปุ่ม “Filter Design” ที่ใช้เปิดหน้าต่างโปรแกรมการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก



รูปที่ 4.31 หน้าโปรแกรมการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก

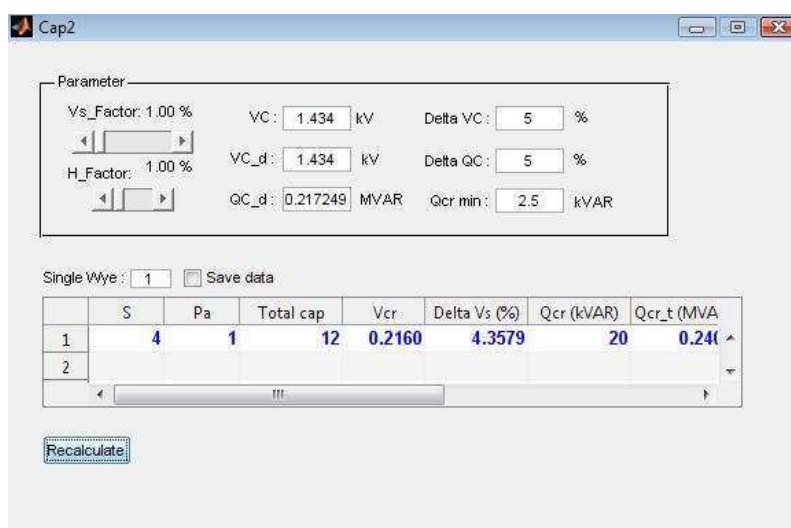
10. ขั้นตอนในการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกจะต้องใส่ข้อมูลอินพุตของการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก เช่น ชนิดของตัวกรอง แรงดันบัส ค่ากำลังรีแอกทีฟ อันดับฮาร์มอนิกที่ต้องการกรองตัวประกอบตัวกรอง เป็นต้น ดังรูปที่ 4.32

รูปที่ 4.32 การใส่ข้อมูลอินพุตของการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก

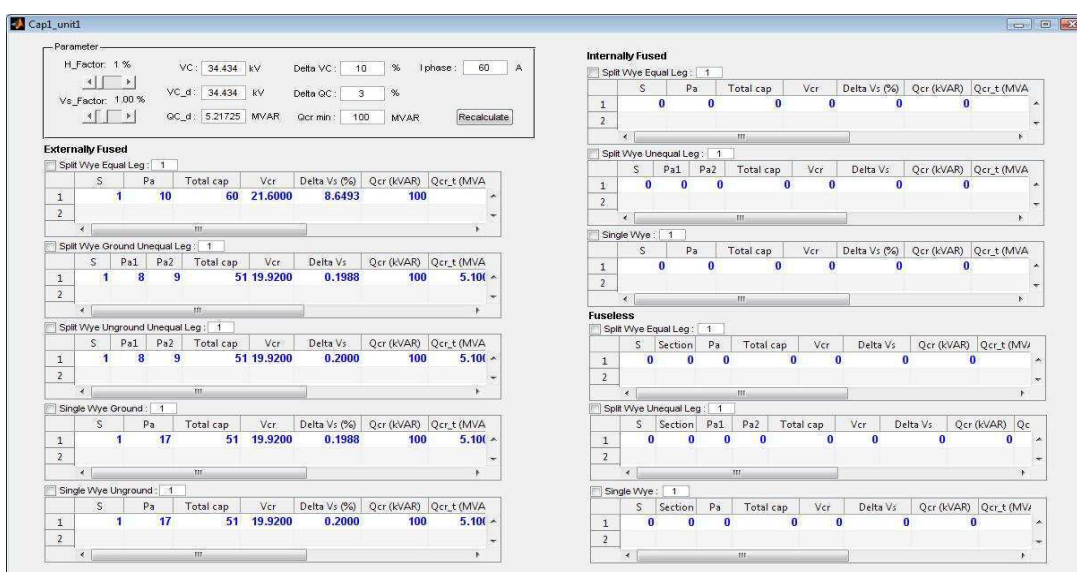
เมื่อใส่ข้อมูลอินพุตเสร็จเรียบร้อยแล้ว สามารถทำการออกแบบตัวกรองได้โดยการกดปุ่ม “Cal” โปรแกรมจะแสดงผลพารามิเตอร์ของการออกแบบดังรูปที่ 4.33

รูปที่ 4.33 ผลลัพธ์ของการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก

11. เมื่อออกแบบตัวกรองเสิร์จลีน ต่อไปก็นำตัวกรองต่อเข้าสู่ระบบโดยการกดปุ่ม “On” โปรแกรม จะทำการต่อตัวกรองเข้าสู่ระบบ จากนั้นทำการวิเคราะห์โหลดโฟลว์ที่ความถี่หลักมูลและที่ความถี่ ฮาร์มอนิกเพื่อพิจารณาค่า %THDv ของบัสที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่ว่ามีค่าต่ำกว่าค่า มาตรฐานหรือไม่ ถ้าปรากฏว่าค่า %THDv ต่ำกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนด จะถือว่าการออกแบบ ตัวกรองฮาร์มอนิกเป็นอันเสร็จสิ้น ต่อไปก็ทำการออกแบบชุดตัวเก็บประจุที่จะใช้ส่วนประกอบของ ตัวกรองฮาร์มอนิก โดยการกดปุ่ม “D” แสดงในรูปที่ 4.33 เมื่อกดปุ่ม “D” โปรแกรมจะเปิดหน้า โปรแกรมการออกแบบชุดตัวเก็บประจุดังรูปที่ 4.34 และ 4.35 ในการออกแบบชุดตัวเก็บประจุ สามารถออกแบบได้โดยกดปุ่ม “Recalculate”



รูปที่ 4.34 หน้าโปรแกรมการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกที่มีแรงดันออกแบบน้อยกว่า 20 kV



รูปที่ 4.35 หน้าโปรแกรมการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกที่มีแรงดันออกแบบมากกว่า 20 kV

12. เมื่อออกแบบชุดตัวเก็บประจุเสร็จสิ้น โปรแกรมสามารถนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุไปใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองเพื่อทดสอบการทำงานของตัวกรอง ฮาร์มอนิกว่ายังสามารถทำให้ค่า %THDv น้อยกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่และตัวเก็บประจุจะเกิดภาวะโหลดเกินหรือไม่ การทดลองนี้สามารถทำได้โดยการทำเครื่องหมายถูกหน้าผลลัพธ์ของการออกแบบเพื่อเป็นการเลือกการออกแบบชุดตัวเก็บประจุชุดนั้น แสดงดังรูปที่ 4.36

	S	Pa	Total cap	Vcr	Delta Vs (%)	Qcr (kVAR)	Qcr_t (MVA)
1	1	17	51	19.9200	0.1988	100	5.10
2							

รูปที่ 4.36 การเลือกชุดตัวเก็บประจุที่ต่อแบบ Single Wye ในการทดลองนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุไปใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง

หลังจากเลือกชุดตัวเก็บประจุที่จะทดลองใช้ค่าความจุไฟฟ้าเป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองแล้ว จากนั้นต้องกดปุ่ม "S" เพื่อแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่เลือกนั้นที่หน้าโปรแกรมออกแบบตัวกรอง ดังรูปที่ 4.37

Parameter Calculation :

Cal : Impedance of F : 217.8 ohm Impedance of F : ohm

% Reactor 4.165 % Reactor

C1F 14.006 D C1F S

C1C 13.637 S C1C S

0 % VC1 : 34.434 kV VC2 : kV

C2F - D C2C - S

0 % VC2 : - kV

L1 : 30.129 mH R : 0.773 ohm R : ohm

On Off Plot OL On Off Plot OL

เครื่องหมายถูกหมายถึงโปรแกรมจะนำผลลัพธ์ที่ถูกทำเครื่องหมายถูกไปใช้ในการคำนวณ

ปุ่ม "S" เพื่อแสดงค่าความจุที่ได้เลือกจากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุ (รูป 4.36)

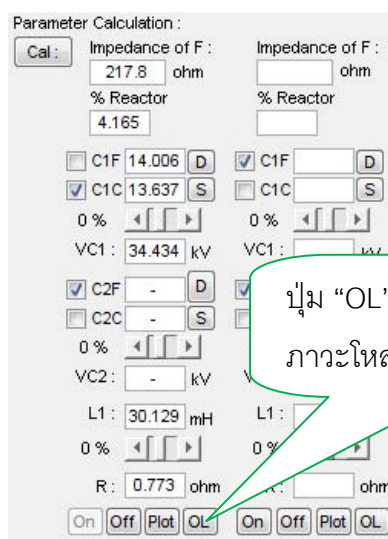
รูปที่ 4.37 ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้เลือกจากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุ

จากรูปที่ 4.37 จะเห็นว่า มีเครื่องหมายถูกแสดงอยู่หน้า C1C หมายถึงโปรแกรมจะนำผลลัพธ์ 13.637 μF ซึ่งเป็นค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุไปใช้ในการ

คำนวณ ถ้าเครื่องหมายถูกอยู่หน้า C1F หมายถึงโปรแกรมจะนำผลลัพธ์ 14.006 μF ซึ่งเป็นค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกไปใช้ในการคำนวณ

13. จากรูปที่ 4.37 เมื่อมีการทำเครื่องหมายถูกหน้า C1C แสดงว่าโปรแกรมจะใช้ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุไปใช้ในการคำนวณ เมื่อกดปุ่ม “On” โปรแกรมจะทำการต่อตัวกรองเข้าสู่ระบบ จากนั้นทำการวิเคราะห์โหลดโพลาร์ที่ความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์มอนิก และสามารถตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุได้ โดยการกดปุ่ม “OL” ในหน้าโปรแกรมการออกแบบตัวกรอง ดังรูปที่ 4.38

รูปที่ 4.39 แสดงผลการตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุ แสดงขนาดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านพารามิเตอร์ของตัวกรอง แสดงกำลังสูญเสียของตัวกรอง



รูปที่ 4.38 การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุ

	IC1	VC1	IL1	VL1	IR	VR	IC2
fund	87.9398	1.9986e+04	96.7338	832.3768	87.9398	67.9789	
2	0	0	0	0	0	0	
3	0	0	0	0	0	0	
4	0	0	0	0	0	0	
5	99.6631	4.5300e+03	99.6631	4.7167e+03	99.6631	77.0412	
6	0	0	0	0	0	0	
7	30.0451	975.4634	30.0451	1.9907e+03	30.0451	23.2253	
8	0	0	0	0	0	0	
9	0	0	0	0	0	0	
10	0	0	0	0	0	0	

Capacitor 1 : IC_unit : 8.02 A IC_unit : - A Icr_unit : 5.02 A Ic/Icr : 1.6

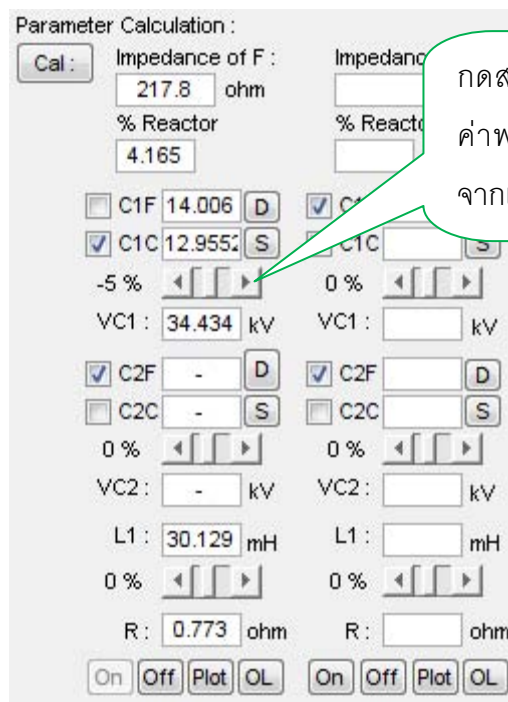
Capacitor 2 : IC_unit : - A Icr_unit : - A Ic/Icr : -

Inductor : ILr : 142.2 A

Resistor : Total loss : 14.38 kW

รูปที่ 4.39 ผลการตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุ

14. หากต้องการทดสอบเกี่ยวกับการที่ค่าความจุไฟฟ้าหรือค่าความเหนี่ยวนำมีการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเดิมสามารถทำได้โดยการกดสไลด์บาร์เพื่อเปลี่ยนค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงจากค่าเดิม ในโปรแกรมนี้จะสามารถเปลี่ยนค่าได้ครั้งละ 1 % ของค่าเดิม ดังรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 การทดสอบเมื่อค่าความจุไฟฟ้าลดลงจากเดิม 5%

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์แล้วค่าที่เปลี่ยนแปลงนั้นสามารถใช้คำนวณในโปรแกรมได้โดยการทำเครื่องหมายถูกหน้าผลลัพธ์ที่ต้องการคำนวณ

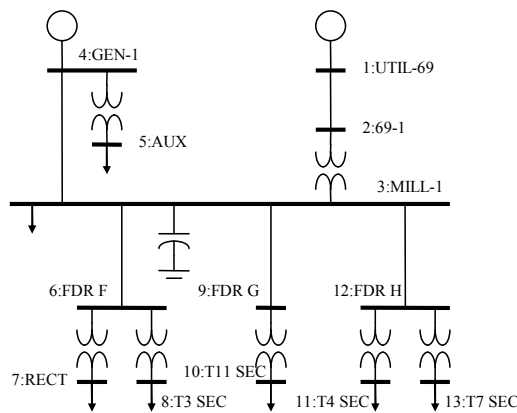
บทที่ 5

การวิเคราะห์และการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงสูง

บทนี้แสดงตัวอย่างการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดต่าง ๆ ในการแก้ปัญหาฮาร์มอนิก โดยใช้ระบบทดสอบ แบ่งเป็น 5 กรณี เพื่อแสดงให้เห็นถึงการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกที่ระดับแรงดันสูงที่มีระดับแรงดันที่แตกต่างกัน 5 ระดับดังนี้

1. ระบบทดสอบ 13 บัส (แรงดันจำหน่าย) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอยู่ที่บัส 8 (4.16 kV)
2. ระบบทดสอบ 13 บัส (แรงดันจำหน่าย) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอยู่ที่บัส 3 (13.8 kV)
3. ระบบทดสอบ 13 บัส (แรงดันส่ง) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอยู่ที่บัส 7 (33 kV)
4. ระบบทดสอบ 13 บัส (แรงดันส่ง) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอยู่ที่บัส 9 (115 kV)
5. ระบบทดสอบ 13 บัส (แรงดันส่ง) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอยู่ที่บัส 5 (230 kV)

ระบบทดสอบ 13 บัส แรงดันจำหน่าย ดัดแปลงมาจาก [20] มีแผนภาพเส้นเดียวดังรูปที่ 5.1 และข้อมูลของระบบแสดงในตารางที่ 5.1 ถึงตารางที่ 5.4 โดยข้อมูลทั้งหมดจะแสดงในเทอมเปอร์ยูนิต ยกเว้นข้อมูลกำลังไฟฟ้าและค่าเบสของกำลังไฟฟ้าคือ 100 MVA



รูปที่ 5.1 แผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบ 13 บัส แรงดันจำหน่าย

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของสายส่ง

Form	To	Base 100 MVA	
		R(p.u.)	X(p.u.)
UTIL-69	69-1	0.01390	0.02960
MILL-1	GEN-1	0.01220	0.02430
MILL-1	FDR F	0.00750	0.00630
MILL-1	FDR G	0.01570	0.01310
MILL-1	FDR H	0.01090	0.00910

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและตัวเก็บประจุ

Bus	Base 100 MVA	
	R (p.u.)	X (p.u.)
UTIL-69 (Gen)	0.05	1
GEN-1 (Gen)	0.00	12.5
MILL-1 (Cap)	0.00	-20

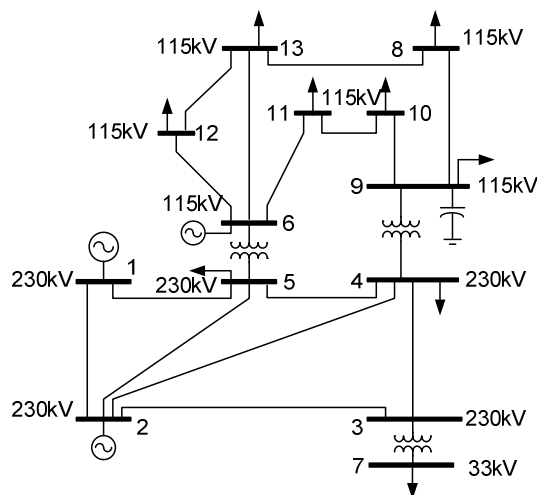
ตารางที่ 5.3 ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง

Form	To	Voltage		Tap	MVA	R (%)	X (%)	Base 100 MVA	
		HV(kV)	LV(kV)					R(p.u.)	X(p.u.)
69-1	MILL-1	69.00	13.80	1	15	0.46980	7.98620	0.03132	0.53241
GEN-1	AUX	13.80	0.48	1	1.5	0.95930	5.66940	0.63953	3.77960
FDR F	RECT	13.80	0.48	1	1.25	0.73980	4.43880	0.59184	3.55104
FDR F	T3 SEC	13.80	4.16	1	1.725	0.74420	5.95370	0.43142	3.45142
FDR G	T11 SEC	13.80	0.48	1	1.5	0.87430	5.68310	0.58287	3.78873
FDR H	T4 SEC	13.80	0.48	1	1.5	0.83630	5.43600	0.55753	3.62400
FDR H	T7 SEC	13.80	2.40	1	3.75	0.45680	5.48100	0.12181	1.46160

ตารางที่ 5.4 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 13 บัส แรงแดันจำหน่าย

Bus	Nominal V (kV)	P _{load} (MW)	Q _{load} (MVar)	P _{gen} (MW)	Q _{gen} (MVar)
1:UTIL-69	69	0	0	-	-
2:69-1	69	0	0	0	0
3:MILL-1	13.8	2.24	2.00	0	0
4:GEN1	13.8	0	0	2.00	-
5:Aux	0.48	0.60	0.53	0	0
6:FDR F	13.8	0	0	0	0
7:RECT	0.48	1.15	0.29	0	0
8:T3 SEC	4.16	1.31	1.13	0	0
9:FDR G	13.8	0	0	0	0
10:T11 SEC	0.48	0.81	0.80	0	0
11:T4 SEC	0.48	0.37	0.33	0	0
12: FDR H	13.8	0	0	0	0
13: T7 SEC	2.4	2.80	2.50	0	0

ระบบทดสอบ 13 บัส แรงดันส่ง ดัดแปลงมาจาก [20] มีแผนภาพเส้นเดียวดังรูปที่ 5.2 และข้อมูลของระบบแสดงในตารางที่ 5.5 ถึงตารางที่ 5.7 โดยข้อมูลทั้งหมดจะแสดงในเทอมเปอร์ยูนิต ยกเว้นข้อมูลกำลังไฟฟ้าและค่าเบสของกำลังไฟฟ้าคือ 100 MVA



รูปที่ 5.2 แผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบ 13 บัส แรงดันส่ง

ตารางที่ 5.5 ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของสายส่ง หม้อแปลงและตัวเก็บประจุ

From Bus	To Bus	Base 100 MVA		
		R(p.u.)	X(p.u.)	B(p.u.)
4	9	0	0.55618	0
5	6	0	0.2502	0
6	11	0.09495	0.19887	0
6	12	0.12285	0.25575	0
6	13	0.06613	0.13024	0
9	10	0.03181	0.08448	0
9	8	0.0127	0.27033	0
10	11	0.08203	0.19202	0
12	13	0.22087	0.19985	0
13	8	0.17089	0.34795	0
3	4	0.067	0.17099	0
1	2	0.01937	0.05916	0.05279
1	5	0.05402	0.223	0.0492
2	3	0.04697	0.19794	0.0152
2	4	0.0581	0.17628	0.0374

ตารางที่ 5.5 ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของสายส่ง หม้อแปลงและตัวเก็บประจุ (ต่อ)

From Bus	To Bus	Base 100 MVA		
		R(p.u.)	X(p.u.)	B(p.u.)
2	5	0.05693	0.17384	0.03386
4	5	0.01335	0.04209	0.0128
3	7	0	0.028	0
9	0	0	0	0.0633

ตารางที่ 5.6 ข้อมูลอิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

Bus	Base 100 MVA	
	R (p.u.)	X (p.u.)
1	0.00	0.25
2	0.00	0.25
6	0.00	0.25

ตารางที่ 5.7 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบ 13 บัส แรงดันส่ง

Bus	Nominal V (kV)	P_{load} (MW)	Q_{load} (MVar)	P_{gen} (MW)	Q_{gen} (MVar)
1	230	0	0	-	-
2	230	0	0	18.3	-
3	230	0	0	0	0
4	230	27.8	16.9	0	0
5	230	7.6	1.6	0	0
6	115	0	0	11.2	-
7	33	30	20	0	0
8	115	14.9	5	0	0
9	115	29.5	16.6	0	0
10	115	9	5.8	0	0
11	115	3.5	1.8	0	0
12	115	6.1	1.6	0	0
13	115	13.5	5.8	0	0

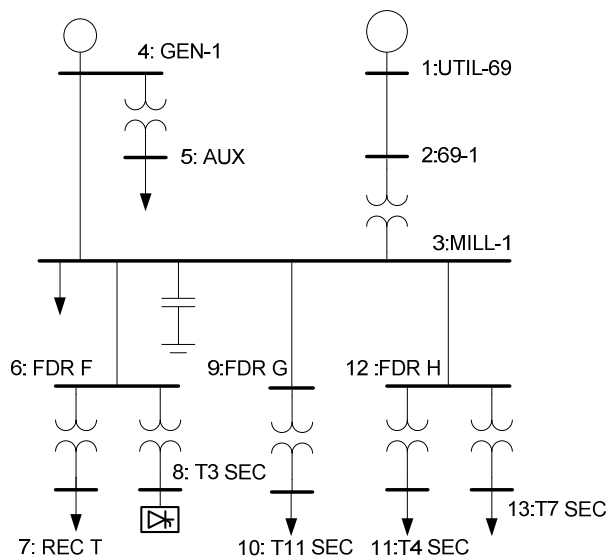
ตารางที่ 5.8 ข้อมูลสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก (6-pulse)

Harmonic order	Percent	Relative Angle
1	100.00	0.00
5	18.24	-55.68
7	11.90	-84.11
11	5.73	-143.56
13	4.01	-175.58
17	1.93	111.39
19	1.39	68.30
23	0.94	-24.61
25	0.86	-67.64
29	0.71	-145.46
31	0.62	176.83
35	0.44	97.40
37	0.38	54.36

ในการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองในแต่ละกรณีจะเริ่มจากการวิเคราะห์โหลดโพล์ที่ความถี่หลักมูลของระบบตัวอย่าง จากนั้นทำการวิเคราะห์โหลดโพล์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกเพื่อเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิก (%THDv) ของระบบกับค่ามาตรฐาน หากพบว่าค่า %THDv ของระบบสูงกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนด จึงจะทำการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก เพื่อลดค่า %THDv ให้มีค่าต่ำกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนด เมื่อออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกที่สามารถทำให้ค่า %THDv ให้มีค่าต่ำกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนด จากนั้นทำการออกแบบชุดตัวเก็บประจุของแต่ละตัวกรองฮาร์มอนิก แล้วนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุทดลองใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง เพื่อเปรียบเทียบผลของค่า %THDv ที่ใช้ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุกับค่า %THDv ที่ใช้ค่าความจุไฟฟ้าได้จากการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก

5.1. ระบบทดสอบ 13 บัส (แรงดันจำหน่าย) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอยู่ที่บัส 8 (4.16 kV)

กรณีนี้กำหนดให้โหลดที่บัส 8 เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเนื่องจากต้องการให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันที่บัส 8 มีค่าสูง จึงไม่ต้องการให้มีโหลดอื่น ๆ ต่อร่วมที่บัส 8



รูปที่ 5.3 แผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 13 บัส (แรงดันจำหน่าย) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอยู่ที่บัส 8 (4.16kV)

ผลการคำนวณและวิเคราะห์

การวิเคราะห์และการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบ่งออกเป็น 4 กรณีดังนี้

- 5.1.1 การใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวชนิดเดียวในการกรองฮาร์มอนิก
- 5.1.2 การใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงลำดับสองในการกรองฮาร์มอนิก
- 5.1.3 การใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงลำดับสามในการกรองฮาร์มอนิก
- 5.1.4 การใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงชนิดซีในการกรองฮาร์มอนิก

แต่ละกรณีจะมีการวิเคราะห์และออกแบบรวมทั้งสิ้น 4 ส่วน คือ 1. โหลดโพล์ 2. ฮาร์มอนิกโพล์ 3. การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก และ 4. การออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองฮาร์มอนิก

ในส่วนนี้เป็นการวิเคราะห์ระบบกรณีพื้นฐานโดยไม่มีการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก จึงวิเคราะห์เพียง 2 ส่วนคือ โหลดโพลาร์และฮาร์มอนิกโพลาร์เท่านั้น ส่วนหัวข้อ 5.1.1-5.1.4 จะทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 4 ส่วน ผลลัพธ์ของการหาโหลดโพลาร์ (กรณี 5.1) แสดงในตารางที่ 5.9 ส่วนผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์ (กรณี 5.1) แสดงในตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.9 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์ (กรณี 5.1)

Bus	Nominal V (kV)	V_{mag} (p.u.)	θ (deg)	P_{load} (MW)	Q_{load} (MVar)	P_{gen} (MW)	Q_{gen} (MVar)
1:UTIL-69	69	1	0	0	0	7.37	0.58
2:69-1	69	0.9988	-0.1204	0	0	0	0
3:MILL-1	13.8	0.9943	-2.3707	2.24	2	0	4.94
4:GEN1	13.8	0.9950	-2.3673	0	0	2	2.85
5:Aux	0.48	0.9702	-3.5122	0.60	0.53	0	0
6:FDR F	13.8	0.9940	-2.3729	0	0	0	0
7:RECT	0.48	0.9756	-4.6848	1.15	0.29	0	0
8:T3 SEC	4.16	0.9459	-4.8320	1.31	1.13	0	0
9:FDR G	13.8	0.9940	-2.3692	0	0	0	0
10:T11 SEC	0.48	0.9571	-3.9368	0.81	0.80	0	0
11:T4 SEC	0.48	0.9793	-3.0495	0.37	0.33	0	0
12:FDR H	13.8	0.9936	-2.3682	0	0	0	0
13:T7 SEC	2.4	0.9508	-4.6660	2.80	2.50	0	0

ตารางที่ 5.10 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโวลต์ (กรณี 5.1)

Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	69	1	0	0.0164	79.4983	0.0063	-68.9505	0.0015	50.2592	0.0009	-66.7995	1.7609	3	0.5870
2	69	0.9988	-0.1204	0.0168	79.3601	0.0064	-69.0492	0.0016	50.1964	0.0009	-66.8526	1.8152	3	0.6051
3	13.8	0.9943	-2.3707	0.0256	79.3729	0.0098	-69.0401	0.0024	50.2022	0.0013	-66.8477	2.7664	4	0.6916
4	13.8	0.995	-2.3673	0.0255	79.3187	0.0097	-69.1213	0.0024	50.0801	0.0013	-66.9845	2.7571	4	0.6893
5	0.48	0.9702	-3.5122	0.0237	67.9228	0.0089	-84.9362	0.0020	26.0361	0.0011	-94.7964	2.6171	4	0.6543
6	13.8	0.994	-2.3729	0.0255	79.6016	0.0097	-68.6822	0.0023	50.7793	0.0013	-66.1695	2.7612	4	0.6903
7	0.48	0.9756	-4.6848	0.0211	69.0162	0.0079	-83.5304	0.0018	27.9973	0.0010	-92.6029	2.3202	4	0.5801
8	4.16	0.9459	-4.832	0.0549	162.4582	0.0447	72.1256	0.0376	-144.6087	0.0317	102.1717	10.0062	4	2.5016
9	13.8	0.994	-2.3692	0.0255	79.3274	0.0098	-69.1005	0.0024	50.1237	0.0013	-66.9305	2.7650	4	0.6912
10	0.48	0.9571	-3.9368	0.0227	62.3497	0.0083	-92.3072	0.0018	16.1039	0.0010	-105.5215	2.5338	4	0.6334
11	0.48	0.9792	-3.0495	0.0245	72.3796	0.0093	-78.8095	0.0022	35.0653	0.0012	-84.5652	2.6937	4	0.6734
12	13.8	0.9936	-2.3682	0.0255	79.2675	0.0097	-69.1785	0.0024	50.0264	0.0013	-67.0320	2.7629	4	0.6907
13	2.4	0.9508	-4.666	0.0218	59.0074	0.0079	-96.5499	0.0017	10.8643	0.0009	-110.9456	2.4464	4	0.6116

จากตารางที่ 5.10 จะเห็นว่าบัสที่ 8 มีค่า %THDv สูงกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนด 2.5 เท่า จึงจำเป็นต้องออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก เพื่อลดค่า %THDv ให้มีค่าต่ำกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนด

โดยที่ค่ากำลังรีแอกทีฟของตัวกรองฮาร์มอนิกทั้งหมดจะใช้ค่าเดียวกันกับค่ากำลังรีแอกทีฟที่ใช้ในการปรับค่าตัวประกอบกำลัง (P.F) ของบัสที่ 8 ให้เป็น 0.95 เนื่องจากค่า P.F ของบัสที่ 8 เดิมมีค่าเท่ากับ 0.76 ดังนั้นจะได้ค่ากำลังรีแอกทีฟที่จะชดเชยเข้าสู่ระบบเท่ากับ 0.7 MVar

5.1.1. ใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดียวชนิดเดียวในการกรองฮาร์มอนิก

กรณีนี้จะใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยว (ST) จำนวนสามชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 จึงทำการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟให้กับแต่ละตัวกรองโดยแบ่งตามปริมาณกระแสฮาร์มอนิกดังนี้

ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5

$$Q_{filter,5} = \frac{18.24}{18.24+11.9+5.73} \times 0.7 = 0.3559MVar$$

ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7

$$Q_{filter,7} = \frac{11.9}{18.24+11.9+5.73} \times 0.7 = 0.2322MVar$$

ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11

$$Q_{filter,11} = \frac{5.73}{18.24+11.9+5.73} \times 0.7 = 0.1118MVar$$

จะได้ค่ากำลังรีแอกทีฟสำหรับตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 เท่ากับ 0.36 MVar สำหรับตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 เท่ากับ 0.23 MVar และ สำหรับตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 เท่ากับ 0.11 MVar ซึ่งทั้งสามชุดทำการติดตั้งเข้าที่บัส 8 ผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.11 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.1.1)

Type	Bus	kV	H	MVar	Tp (Hz)	Qf	C1(uF)	VC1(kV)	L(mH)	R(ohm)
ST	8	4.16	5	0.36	235	60	63.219	4.357	7.255	0.179
ST	8	4.16	7	0.23	335	60	41.363	4.255	5.457	0.191
ST	8	4.16	11	0.11	535	60	20.056	4.197	4.413	0.247

จากตารางที่ 5.11 พารามิเตอร์ T_p (Hz) คือ ความถี่ปรับคลื่น (tuning point frequency) โดยเลือกระหว่าง 225-250 Hz (ช่วงความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ฮาร์มอนิกที่ต้องการจะกรอง 10%) ส่วนค่า Q_f คือ ค่าตัวประกอบคุณภาพ โดยเลือกระหว่างคือ 15-80 จากนั้นทดลองวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์ ถ้าค่าความผิดเพี้ยนรวมของบัสที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่มีค่าไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด จะถือว่าค่า T_p และ Q_f ที่เลือกสามารถนำมาใช้ออกแบบได้ ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 8 แสดงในตารางที่ 5.12 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 8 แสดงในตารางที่ 5.13 ผลลัพธ์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.14 และรูปที่ 5.4 แสดงตัวอย่างวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ส่วนตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวที่กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 และ 11 สามารถเขียนวงจรมูลได้เหมือนกับรูปที่ 5.4

ตารางที่ 5.12 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 8 (กรณี 5.1.1)

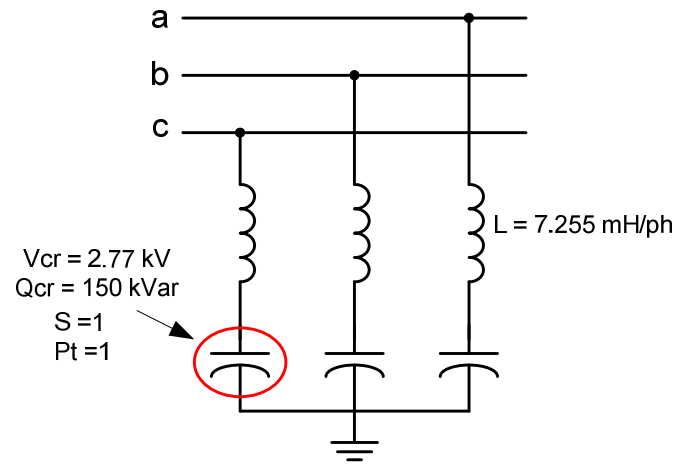
Bus	Nominal V (kV)	V_{mag} (p.u.)	θ (deg)	P_{load} (MW)	Q_{load} (Mvar)	P_{gen} (MW)	Q_{gen} (Mvar)
1:UTIL-69	69	1	0	0	0	7.36	0.55
2:69-1	69	0.9988	-0.1206	0	0	0	0
3:MILL-1	13.8	0.9944	-2.3698	2.24	2	0	4.94
4:GEN1	13.8	0.9950	-2.3616	0	0	2	2.18
5:Aux	0.48	0.9702	-3.5065	0.60	0.53	0	0
6:FDR F	13.8	0.9942	-2.3750	0	0	0	0
7:RECT	0.48	0.9759	-4.6859	1.15	0.29	0	0
8:T3 SEC	4.16	0.9706	-4.9439	1.31	1.13	0	0.70
9:FDR G	13.8	0.9942	-2.3682	0	0	0	0
10:T11 SEC	0.48	0.9572	-3.9353	0.81	0.80	0	0
11:T4 SEC	0.48	0.9794	-3.0483	0.37	0.33	0	0
12:FDR H	13.8	0.9938	-2.3672	0	0	0	0
13:T7 SEC	2.4	0.9510	-4.6643	2.80	2.50	0	0

ตารางที่ 5.13 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโวลต์เมื่อติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกจำนวน 3 ชุดที่บัส 8 (กรณี 5.1.1)

Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	69	1	0	0.0062	89.8872	0.0013	-71.2253	0.0002	38.1451	0.0003	-67.3271	0.6337	3	0.2112
2	69	0.9988	-0.1206	0.0064	89.749	0.0014	-71.3241	0.0002	38.0823	0.0003	-67.3803	0.6533	3	0.2178
3	13.8	0.9944	-2.3698	0.0097	89.7618	0.0021	-71.3149	0.0003	38.0881	0.0004	-67.3754	0.9954	4	0.2489
4	13.8	0.995	-2.3616	0.0096	89.7076	0.0021	-71.3961	0.0003	37.966	0.0004	-67.5121	0.9923	4	0.2481
5	0.48	0.9702	-3.5065	0.0089	78.3117	0.0019	-87.211	0.0002	13.922	0.0004	-95.324	0.9438	4	0.2359
6	13.8	0.9942	-2.375	0.0097	89.9904	0.0021	-70.9571	0.0002	38.6652	0.0004	-66.6972	0.9943	4	0.2486
7	0.48	0.9759	-4.6859	0.008	79.4089	0.0017	-85.8001	0.0002	15.8907	0.0003	-93.1221	0.8370	4	0.2093
8	4.16	0.9706	-4.9439	0.0207	172.8568	0.0095	69.8612	0.0041	-156.7196	0.0102	101.6462	3.1490	4	0.7873
9	13.8	0.9942	-2.3682	0.0097	89.7163	0.0021	-71.3753	0.0003	38.0096	0.0004	-67.4581	0.9950	4	0.2487
10	0.48	0.9572	-3.9353	0.0086	72.744	0.0018	-94.5751	0.0002	3.9986	0.0003	-106.0398	0.9155	4	0.2289
11	0.48	0.9794	-3.0483	0.0093	82.7708	0.002	-81.0812	0.0002	22.9559	0.0004	-85.0874	0.9701	4	0.2425
12	13.8	0.9938	-2.3672	0.0096	89.6564	0.0021	-71.4533	0.0003	37.9123	0.0004	-67.5597	0.9942	4	0.2486
13	2.4	0.951	-4.6643	0.0082	69.4025	0.0017	-98.8169	0.0002	-1.2404	0.0003	-111.4637	0.8852	4	0.2213

ตารางที่ 5.14 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.1.1)

h order	S	Pt	Total cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (Mvar)	Qcomp (Mvar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	Icr(A)	Ic1_rms(A)	Ic1/Icr
5	1	1	3	2.7700	10.1166	150	0.4500	0.3711	121.2567	62.2274	62.2274	54.15	61.12	1.13
7	1	1	3	2.7700	12.7563	100	0.3000	0.2360	127.1398	41.4850	41.4850	36.1	38.74	1.07
11	1	1	3	2.7700	14.3145	50	0.1500	0.1148	130.6781	20.7425	20.7425	18.05	19.12	1.06



รูปที่ 5.4 วงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5

จากตารางที่ 5.13 จะเห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 เข้าที่บัส 8 ทำให้ค่า %THDv ที่บัส 8 ลดลงเหลือ 0.7873 เท่า ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานกำหนด

จะเห็นได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุในตารางที่ 5.14 มีค่าใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในตารางที่ 5.11 และในตารางที่ 5.14 ในหัวข้อ I_{c1_rms} หมายถึงรากที่สองของค่าเฉลี่ยของกระแสยกกำลังสองที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ (C1) ซึ่งได้จากการทดลองใช้ค่าความจุไฟฟ้าจากตารางที่ 5.14 ใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง และสามารถดูภาวะโหลดเกินของตัวเก็บประจุได้จากหัวข้อ I_{c1}/I_{cr} ถ้ามีค่ามากกว่า 1.3 เท่า จะถือว่าเกิดภาวะโหลดเกินของตัวเก็บประจุ

จากการออกแบบพบว่าในระดับแรงดัน 4.16 kV สามารถใช้ตัวเก็บประจุชนิดสามเฟสเพียงหนึ่งตัวในการออกแบบได้ โดยภายในตัวเก็บประจุจะต่อเป็นแบบเดลต้าแสดงดังรูปที่ 5.5 และในการออกแบบตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองโดยใช้ตัวเก็บประจุชนิดสามเฟสสามารถทำได้ดังนี้

การออกแบบตัวกรองปรับคลื่นเดียวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 โดยใช้ตัวเก็บประจุสามเฟส

จากสมการที่ 2.12

$$Q_{cr} = Q_{f_{comp}} \left(\frac{V_{cr}}{V_S} \right)^2 \left(\frac{h^2 - 1}{h^2} \right)$$

จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 5.11 เลือกใช้ตัวเก็บประจุสามเฟสที่มีแรงดันพิกัด 4.8 kV ในการออกแบบ จะได้

$$Q_{cr} = 0.36 \times \left(\frac{4.8}{4.16} \right)^2 \times \left(\frac{4.7^2 - 1}{4.7^2} \right) = 0.458 MVar$$

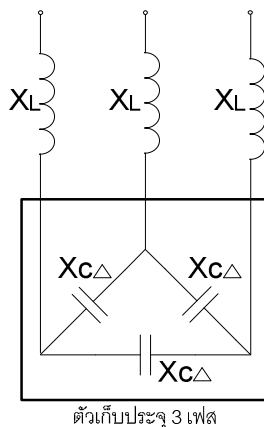
จากตารางที่ 3.1 เลือกตัวเก็บประจุสามเฟสที่มีพิกัด 4.8 kV 500 kVar จะได้ค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 69.0777 μ Fต่อเฟส และ จากสมการที่ 2.7

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{100}{\%X_L}}$$

สามารถหาค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำได้ เท่ากับ 2.086 โอห์ม จะได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 6.64 mH จากสมการที่ 2.3 และตารางที่ 5.11

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

สามารถหาค่าความต้านทานได้ เท่ากับ 0.163 โอห์ม



ตัวเก็บประจุ 3 เฟส

รูปที่ 5.5 วงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกโดยใช้ตัวเก็บประจุสามเฟสในการออกแบบ

การออกแบบตัวกรองปรับคลื่นเดียวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 โดยใช้ตัวเก็บประจุสามเฟส

จากสมการที่ 2.12

$$Q_{cr} = Q_{f_{comp}} \left(\frac{V_{cr}}{V_S} \right)^2 \left(\frac{h^2 - 1}{h^2} \right)$$

จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 5.11 เลือกใช้ตัวเก็บประจุสามเฟสที่มีแรงดันพิกัด 4.8 kV ในการออกแบบ จะได้

$$Q_{cr} = 0.23 \times \left(\frac{4.8}{4.16} \right)^2 \times \left(\frac{6.7^2 - 1}{6.7^2} \right) = 0.299 \text{ MVar}$$

จากตารางที่ 3.1 เลือกตัวเก็บประจุสามเฟสที่มีแรงดันพิกัด 4.8 kV 300 kVar จะได้ค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 41.4466 μF ต่อเฟส และ จากสมการที่ 2.7

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{100}{\%X_L}}$$

สามารถหาค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำได้ เท่ากับ 1.711 โอห์มจะได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 5.4458 mH จากสมการที่ 2.3 และตารางที่ 5.11

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

สามารถหาค่าความต้านทานได้ เท่ากับ 0.191 โอห์ม

การออกแบบตัวกรองปรับคลื่นเดียวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยใช้ตัวเก็บประจุสามเฟส

จากสมการที่ 2.12

$$Q_{cr} = Q_{f_{comp}} \left(\frac{V_{cr}}{V_S} \right)^2 \left(\frac{h^2 - 1}{h^2} \right)$$

จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 5.11 เลือกใช้ตัวเก็บประจุสามเฟสที่มีแรงดันพิกัด 4.8 kV ในการออกแบบ จะได้

$$Q_{cr} = 0.11 \times \left(\frac{4.8}{4.16} \right)^2 \times \left(\frac{10.7^2 - 1}{10.7^2} \right) = 0.145 MVar$$

จากตารางที่ 3.1 เลือกตัวเก็บประจุสามเฟสที่มีแรงดันพิกัด 4.8 kV 150 kVar จะได้ค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 20.7233 μ Fต่อเฟส และ จากสมการที่ 2.7

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{100}{\%X_L}}$$

สามารถหาค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำได้ เท่ากับ 1.3416 โอห์ม จะได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 4.27 mH จากสมการที่ 2.3 และตารางที่ 5.11

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

สามารถหาค่าความต้านทานได้ เท่ากับ 0.239 โอห์ม

ในการออกแบบตัวเก็บประจุด้วยมือนี้ไม่สามารถตรวจสอบภาวะโหลดเกินและหาค่ากำลังสูญเสียของตัวเก็บประจุได้

เมื่อออกแบบชุดตัวเก็บประจุเสร็จสิ้น จากนั้นทดลองนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบตัวเก็บประจุ (ตารางที่ 5.14) ใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองเพื่อทดสอบหาค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุนั้นจะทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 5.15

ตารางที่ 5.16 แสดงค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิกทั้งหมด โดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าในตารางที่ 5.14 ใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง

ตารางที่ 5.15 ผลการเปรียบเทียบ %THDv กรณีต่าง ๆ (กรณี 5.1.1)

Bus	%THDv		
	Filter Design	Capacitor Design	ER G5/4
1	0.6337	0.5754	3
2	0.6533	0.5931	3
3	0.9954	0.9038	4
4	0.9923	0.9009	4
5	0.9438	0.8566	4
6	0.9943	0.9026	4
7	0.8370	0.7596	4
8	3.1490	3.0584	4
9	0.9950	0.9033	4
10	0.9155	0.8306	4
11	0.9701	0.8806	4
12	0.9942	0.9027	4
13	0.8852	0.8030	4

ตารางที่ 5.16 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.1.1)

H order	Loss (W)		
	Unit1	Unit2	Unit 3
Fund	406.21	184.87	58.09
5	259.02	8.41	0.88
7	1.3	93.04	0.9
11	0.08	0.25	25.56
13	0.17	0.45	4.06
17	0.06	0.13	0.48
19	0.03	0.07	0.21
23	0.01	0.03	0.08
25	0.01	0.03	0.07
29	0.01	0.02	0.04
31	0.01	0.01	0.03
35	0	0.01	0.01
37	0	0	0.01
รวม	666.91	287.31	90.42

5.1.2. ใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองแบบผ่านสูงอันดับสองในการกรองฮาร์มอนิก

กรณีนี้จะใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยว (ST) จำนวนสองชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 กับ 7 และใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงอันดับสอง (2HP) จำนวนหนึ่งชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟให้กับแต่ละตัวกรองจะเหมือนกับกรณี 5.1.1 ผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.17 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 8 แสดงในตารางที่ 5.18 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 8 แสดงในตารางที่ 5.19 ผลลัพธ์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.20 และรูปที่ 5.6 แสดงตัวอย่างวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงอันดับสองกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11

ตารางที่ 5.17 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.1.2)

Type	Bus	kV	H	MVar	Tp (Hz)	Qf	C1(uF)	VC1(kV)	L(mH)	R(ohm)
ST	8	4.16	5	0.36	235	60	63.219	4.357	7.255	0.179
ST	8	4.16	7	0.23	335	60	41.363	4.255	5.457	0.191
2HP	8	4.16	11	0.11	535	3	20.056	4.197	4.413	44.498

ตารางที่ 5.18 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 8 (กรณี 5.1.2)

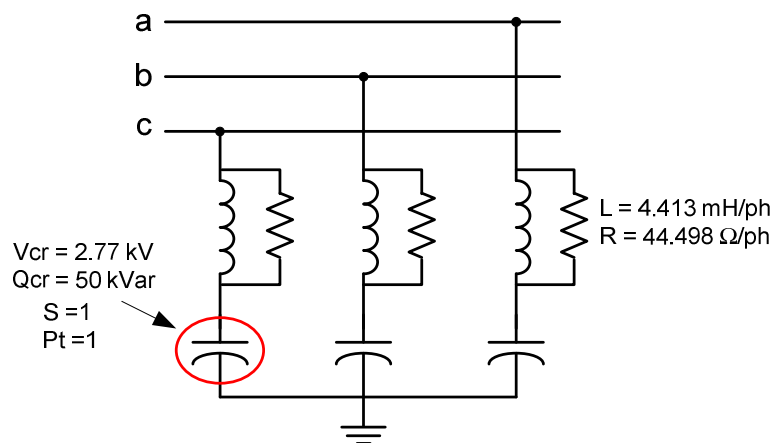
Bus	Nominal V (kV)	V _{mag} (p.u.)	θ (deg)	P _{load} (MW)	Q _{load} (MVar)	P _{gen} (MW)	Q _{gen} (MVar)
1:UTIL-69	69	1	0	0	0	7.36	0.55
2:69-1	69	0.9988	-0.1206	0	0	0	0
3:MILL-1	13.8	0.9944	-2.3697	2.24	2	0	4.94
4:GEN1	13.8	0.9950	-2.3616	0	0	2	2.18
5:Aux	0.48	0.9702	-3.5064	0.60	0.53	0	0
6:FDR F	13.8	0.9942	-2.3750	0	0	0	0
7:RECT	0.48	0.9759	-4.6859	1.15	0.29	0	0
8:T3 SEC	4.16	0.9706	-4.9436	1.31	1.13	0	0.70
9:FDR G	13.8	0.9942	-2.3682	0	0	0	0
10:T11 SEC	0.48	0.9572	-3.9353	0.81	0.80	0	0
11:T4 SEC	0.48	0.9794	-3.0482	0.37	0.33	0	0
12:FDR H	13.8	0.9938	-2.3672	0	0	0	0
13:T7 SEC	2.4	0.9510	-4.6642	2.80	2.50	0	0

ตารางที่ 5.19 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโวลต์เมื่อติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกจำนวน 3 ชุดที่บัส 8 (กรณี 5.1.2)

Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	69	1	0	0.0062	89.8157	0.0013	-71.6069	0.0007	12.2404	0.0003	-89.089	0.6372	3	0.2124
2	69	0.9988	-0.1206	0.0064	89.6775	0.0014	-71.7057	0.0007	12.1776	0.0004	-89.1422	0.6569	3	0.2190
3	13.8	0.9944	-2.3697	0.0097	89.6903	0.0021	-71.6965	0.0011	12.1834	0.0005	-89.1373	1.0009	4	0.2502
4	13.8	0.995	-2.3616	0.0096	89.6361	0.0021	-71.7778	0.0011	12.0613	0.0005	-89.2741	0.9978	4	0.2494
5	0.48	0.9702	-3.5064	0.0089	78.2402	0.0019	-87.5927	0.001	-11.9827	0.0004	-117.0859	0.9482	4	0.2370
6	13.8	0.9942	-2.375	0.0096	89.9189	0.002	-71.3388	0.0011	12.7605	0.0005	-88.4592	0.9994	4	0.2499
7	0.48	0.9759	-4.6859	0.008	79.3374	0.0017	-86.1817	0.0008	-10.014	0.0004	-114.884	0.8407	4	0.2102
8	4.16	0.9706	-4.9436	0.0207	172.7853	0.0094	69.4796	0.0175	177.3757	0.0127	79.8842	3.7060	4	0.9265
9	13.8	0.9942	-2.3682	0.0096	89.6449	0.0021	-71.7569	0.0011	12.1049	0.0005	-89.22	1.0005	4	0.2501
10	0.48	0.9572	-3.9353	0.0086	72.6725	0.0018	-94.9567	0.0009	-21.9061	0.0004	-127.8017	0.9191	4	0.2298
11	0.48	0.9794	-3.0482	0.0093	82.6994	0.002	-81.4628	0.001	-2.9488	0.0005	-106.8493	0.9751	4	0.2438
12	13.8	0.9938	-2.3672	0.0096	89.585	0.0021	-71.8349	0.0011	12.0076	0.0005	-89.3216	0.9997	4	0.2499
13	2.4	0.951	-4.6642	0.0082	69.331	0.0017	-99.1985	0.0008	-27.1451	0.0003	-133.2256	0.8883	4	0.2221

ตารางที่ 5.20 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.1.2)

h order	S	Pt	Total cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	Icr(A)	Ic1_rms(A)	Ic1/Icr
5	1	1	3	2.7700	10.1166	150	0.4500	0.3711	121.2567	62.2274	62.2274	54.15	61.15	1.13
7	1	1	3	2.7700	12.7563	100	0.3000	0.2360	127.1398	41.4850	41.4850	36.10	38.88	1.08
11	1	1	3	2.7700	14.3145	50	0.1500	0.1148	130.6781	20.7425	20.7425	18.05	18.35	1.02



รูปที่ 5.6 วงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงอันดับสองกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11

จากตารางที่ 5.19 จะเห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 เข้าที่บัส 8 ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 8 ลดลงเหลือ 0.9265 เท่าซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

จะเห็นได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุในตารางที่ 5.20 มีค่าใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในตารางที่ 5.17 และจะเห็นว่าค่า I_{c1}/I_{cr} ของแต่ละตัวกรองมีค่าน้อยกว่า 1.3 เท่า ซึ่งไม่เกิดภาวะโหลดเกินของตัวเก็บประจุ

จากการออกแบบพบว่าในระดับแรงดัน 4.16 kV สามารถใช้ตัวเก็บประจุชนิดสามเฟสเพียงหนึ่งตัวในการออกแบบได้ โดยภายในตัวเก็บประจุจะต่อเป็นแบบเดลต้า ซึ่งการออกแบบตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 5 และ 7 จะเหมือนกับกรณีที่ 5.1.1 ส่วนการออกแบบตัวกรองผ่านสูงอันดับสองกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยใช้ตัวเก็บประจุสามเฟสสามารถทำได้ดังนี้

การออกแบบตัวกรองผ่านสูงอันดับสองกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยใช้ตัวเก็บประจุสามเฟส

จากสมการที่ 2.12

$$Q_{cr} = Q_{f_{comp}} \left(\frac{V_{cr}}{V_S} \right)^2 \left(\frac{h^2 - 1}{h^2} \right)$$

จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 5.17 เลือกใช้ตัวเก็บประจุสามเฟสที่มีแรงดันพิกัด 4.8 kV ในการออกแบบ จะได้

$$Q_{cr} = 0.11 \times \left(\frac{4.8}{4.16} \right)^2 \times \left(\frac{10.7^2 - 1}{10.7^2} \right) = 0.145 \text{ MVar}$$

จากตารางที่ 3.1 เลือกตัวเก็บประจุสามเฟสที่มีแรงดันพิกัด 4.8 kV 150 kVar จะได้ค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 20.7233 μF ต่อเฟส และ จากสมการที่ 2.7

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{100}{\%X_L}}$$

สามารถหาค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำได้ เท่ากับ 1.3416 โอห์ม จะได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 4.27 mH จากสมการที่ 2.22 และตารางที่ 5.17

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

สามารถหาค่าความต้านทานได้ เท่ากับ 43.061 โอห์ม

การออกแบบตัวเก็บประจุด้วยมือนี้ไม่สามารถตรวจสอบภาวะไหลเกินและหาค่ากำลังสูญเสียของตัวเก็บประจุได้

เมื่อออกแบบชุดตัวเก็บประจุเสร็จสิ้น จากนั้นทดลองนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบตัวเก็บประจุ (ตารางที่ 5.20) ใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองเพื่อทดสอบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจื่อยังคงทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด ผลลัพธ์การทดลองแสดงในตารางที่ 5.21

ตารางที่ 5.22 แสดงค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิกทั้งหมด โดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าในตารางที่ 5.20 ใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง

ตารางที่ 5.21 ผลการเปรียบเทียบ %THDv กรณีต่าง ๆ (กรณี 5.1.2)

Bus	%THDv		
	Filter Design	Capacitor Design	ER G5/4
1	0.6372	0.5786	3
2	0.6569	0.5964	3
3	1.0009	0.9088	4
4	0.9978	0.9059	4
5	0.9482	0.8606	4
6	0.9994	0.9073	4
7	0.8407	0.7630	4
8	3.7060	3.5459	4
9	1.0005	0.9084	4
10	0.9191	0.8339	4
11	0.9751	0.8852	4
12	0.9997	0.9077	4
13	0.8883	0.8058	4

ตารางที่ 5.22 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.1.2)

H order	Loss (W)		
	Unit1	Unit2	Unit 3
Fund	406.21	184.87	10.14
5	259.02	8.41	3.71
7	1.3	93.04	6.67
11	0.68	2.15	338.44
13	0.25	0.65	108.65
17	0.06	0.14	23.8
19	0.03	0.07	13.08
23	0.02	0.03	7.45
25	0.01	0.03	6.93
29	0.01	0.02	5.87
31	0.01	0.01	5.11
35	0	0.01	3.14
37	0	0	2.55
รวม	667.6	289.43	535.54

5.1.3. ใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองแบบผ่านสูงอันดับสามในการกรองฮาร์มอนิก

กรณีนี้จะใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยว (ST) จำนวนสองชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 กับ 7 และใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงอันดับสาม (3HP) จำนวนหนึ่งชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟให้กับแต่ละตัวกรองจะเหมือนในกรณีที่ 5.1.1 ผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.23 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโฟลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 8 แสดงในตารางที่ 5.24 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโฟลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 8 แสดงในตารางที่ 5.25 ผลลัพธ์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.26-5.27 และรูปที่ 5.7 แสดงตัวอย่างวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงอันดับสามกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11

ตารางที่ 5.23 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.1.3)

Type	h	MVar	Tp (Hz)	Qf	C1(uF)	VC1(kV)	C2(uF)	VC2(kV)	L(mH)	R(ohm)
ST	5	0.36	235	60	63.219	4.357	-	-	7.255	0.179
ST	7	0.23	335	60	41.363	4.255	-	-	5.457	0.191
3HP	11	0.11	535	3	20.055	4.197	20.055	0.036	4.413	44.502

ตารางที่ 5.24 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโฟลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 8 (กรณี 5.1.3)

Bus	Nominal V (kV)	V_{mag} (p.u.)	θ (deg)	P_{load} (MW)	Q_{load} (MVar)	P_{gen} (MW)	Q_{gen} (MVar)
1:UTIL-69	69	1	0	0	0	7.36	0.55
2:69-1	69	0.9988	-0.1206	0	0	0	0
3:MILL-1	13.8	0.9944	-2.3697	2.24	2	0	4.94
4:GEN1	13.8	0.9950	-2.3615	0	0	2	2.18
5:Aux	0.48	0.9702	-3.5064	0.60	0.53	0	0
6:FDR F	13.8	0.9942	-2.3749	0	0	0	0
7:RECT	0.48	0.9759	-4.6859	1.15	0.29	0	0
8:T3 SEC	4.16	0.9706	-4.9435	1.31	1.13	0	0.70
9:FDR G	13.8	0.9942	-2.3682	0	0	0	0
10:T11 SEC	0.48	0.9572	-3.9353	0.81	0.80	0	0
11:T4 SEC	0.48	0.9794	-3.0482	0.37	0.33	0	0
12:FDR H	13.8	0.9938	-2.3672	0	0	0	0
13:T7 SEC	2.4	0.9510	-4.6642	2.80	2.50	0	0

ตารางที่ 5.25 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโวลต์เมื่อติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกจำนวน 3 ชุดที่บัส 8 (กรณี 5.1.3)

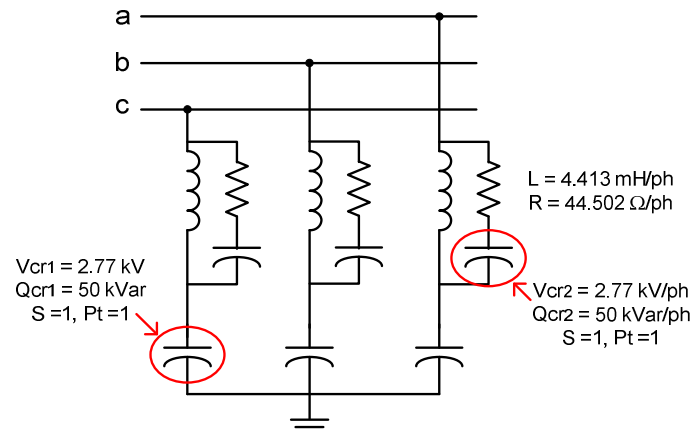
Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	69	1	0	0.0062	89.8143	0.0013	-71.7134	0.0006	20.5769	0.0004	-84.1122	0.6374	3	0.2125
2	69	0.9988	-0.1206	0.0064	89.6761	0.0014	-71.8121	0.0007	20.514	0.0004	-84.1654	0.6570	3	0.2190
3	13.8	0.9944	-2.3697	0.0097	89.6888	0.0021	-71.803	0.001	20.5198	0.0006	-84.1605	1.0012	4	0.2503
4	13.8	0.995	-2.3615	0.0096	89.6346	0.0021	-71.8842	0.001	20.3978	0.0006	-84.2973	0.9980	4	0.2495
5	0.48	0.9702	-3.5064	0.009	78.2388	0.0019	-87.6991	0.0009	-3.6462	0.0005	-112.1092	0.9485	4	0.2371
6	13.8	0.9942	-2.3749	0.0097	89.9175	0.0021	-71.4452	0.001	21.0969	0.0005	-83.4824	0.9997	4	0.2499
7	0.48	0.9759	-4.6859	0.008	79.336	0.0017	-86.2881	0.0007	-1.6775	0.0004	-109.9072	0.8411	4	0.2103
8	4.16	0.9706	-4.9435	0.0208	172.7839	0.0095	69.3732	0.0158	-174.2878	0.0131	84.861	3.6703	4	0.9176
9	13.8	0.9942	-2.3682	0.0097	89.6434	0.0021	-71.8633	0.001	20.4414	0.0006	-84.2432	1.0007	4	0.2502
10	0.48	0.9572	-3.9353	0.0086	72.6711	0.0018	-95.0632	0.0008	-13.5696	0.0004	-122.8249	0.9195	4	0.2299
11	0.48	0.9794	-3.0482	0.0093	82.6979	0.002	-81.5692	0.0009	5.3877	0.0005	-101.8725	0.9754	4	0.2438
12	13.8	0.9938	-2.3672	0.0097	89.5835	0.0021	-71.9414	0.001	20.3441	0.0006	-84.3448	1.0000	4	0.2500
13	2.4	0.951	-4.6642	0.0082	69.3296	0.0017	-99.3049	0.0007	-18.8087	0.0004	-128.2488	0.8888	4	0.2222

ตารางที่ 5.26 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.1.3)

h order	S	Pa	Total cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	Icr(A)	Ic1_rms(A)	Ic1/Icr
5	1	1	3	2.7700	10.1166	150	0.4500	0.3711	121.2567	62.2274	62.2274	54.15	61.14	1.13
7	1	1	3	2.7700	12.7563	100	0.3000	0.2360	127.1398	41.4850	41.4850	36.10	38.87	1.08
11	1	1	3	2.7700	14.3145	50	0.1500	0.1148	130.6781	20.7425	20.7425	18.05	17.53	0.97

ตารางที่ 5.27 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุ (C2) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.1.3)

h order	S	Pt	Total cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	Icr(A)	Ic2_rms(A)	Ic2/Icr
11	1	1	3	2.7700	13.227	50	0.1500	0.000084	1.78x10 ⁶	20.7425	20.7425	18.05	3.06	0.17



รูปที่ 5.7 วงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงอันดับสามกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11

จากตารางที่ 5.25 จะเห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 เข้าที่บัส 8 ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 8 ลดลงเหลือ 0.9176 เท่าซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

จะเห็นได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุในตารางที่ 5.26 และ 5.27 มีค่าใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในตารางที่ 5.23 และจะเห็นว่าค่า I_{c1}/I_{cr} ของแต่ละตัวกรองมีค่าน้อยกว่า 1.3 เท่า ซึ่งไม่เกิดภาวะโหลดเกินของตัวเก็บประจุ

จากการออกแบบพบว่าในระดับแรงดัน 4.16 kV สามารถใช้ตัวเก็บประจุชนิดสามเฟสเพียงหนึ่งตัวในการออกแบบได้ โดยภายในตัวเก็บประจุจะต่อเป็นแบบเดลต้า ซึ่งการออกแบบตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 5 และ 7 จะเหมือนกับกรณีที่ 5.1.1 ส่วนการออกแบบตัวกรอง ผ่านสูงอันดับสามกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยใช้ตัวเก็บประจุสามเฟสสามารถทำได้ดังนี้

การออกแบบตัวกรองผ่านสูงอันดับสามกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยใช้ตัวเก็บประจุสามเฟส

จากสมการที่ 2.37

$$Q_{cr} = Q_{f_{comp}} \left(\frac{V_{cr}}{V_S} \right)^2 \left(\frac{h^2 - 2}{h^2 - 1} \right)$$

จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 5.23 เลือกใช้ตัวเก็บประจุสามเฟสที่มีแรงดันพิกัด 4.8 kV ในการออกแบบ จะได้

$$Q_{cr} = 0.11 \times \left(\frac{4.8}{4.16} \right)^2 \times \left(\frac{10.7^2 - 2}{10.7^2 - 1} \right) = 0.145 \text{ MVar}$$

จากตารางที่ 3.1 เลือกตัวเก็บประจุสามเฟสที่มีแรงดันพิกัด 4.8 kV 150 kVar จะได้ค่าความจุไฟฟ้า (C1) เท่ากับ 20.7233 μF ต่อเฟส

จากสมการที่ 2.38 เลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดหนึ่งเฟสที่มีพิกัด 2.77 kV 50 kVar จะได้ค่าความจุไฟฟ้า (C2) เท่ากับ 20.7425 μF ต่อเฟส

$$Q_{cr,c2} = \frac{V_{cr,c2}^2}{X_{c2}}$$

$$C = \frac{Q_{cr,c2}}{V_{cr,c2}^2 \times 2\pi f} = \frac{50 \text{ kVar}}{(2.77 \text{ kV})^2 \times 100\pi} = 20.7425 \mu\text{F}$$

จากสมการที่ 2.7

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{100}{\%X_L}}$$

สามารถหาค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำได้ เท่ากับ 1.3416 โอห์ม จะได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 4.27 mH จากสมการที่ 2.22 และตารางที่ 5.23

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

สามารถหาค่าความต้านทานได้เท่ากับ 43.061 โอห์ม

การออกแบบตัวเก็บประจุด้วยมือนี้ไม่สามารถตรวจสอบภาวะไหลเกินและหาค่ากำลังสูญเสียของตัวเก็บประจุได้

เมื่อออกแบบชุดตัวเก็บประจุเสร็จสิ้น จากนั้นทดลองนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบตัวเก็บประจุ (ตารางที่ 5.26-5.27) ใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองเพื่อทดสอบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจื่อยังคงทำให้ค่าความผิดพลาดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด ผลลัพธ์การทดลองแสดงในตารางที่ 5.28

ตารางที่ 5.29 แสดงค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิกทั้งหมด โดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าในตารางที่ 5.26 และ 5.27 ใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง

ตารางที่ 5.28 ผลการเปรียบเทียบ %THDv กรณีต่าง ๆ (กรณี 5.1.3)

Bus	%THDv		
	Filter Design	Capacitor Design	ER G5/4
1	0.6374	0.5789	3
2	0.6570	0.5968	3
3	1.0012	0.9093	4
4	0.9980	0.9064	4
5	0.9485	0.8611	4
6	0.9997	0.9078	4
7	0.8411	0.7635	4
8	3.6703	3.5392	4
9	1.0007	0.9089	4
10	0.9195	0.8345	4
11	0.9754	0.8857	4
12	1.0000	0.9082	4
13	0.8888	0.8064	4

ตารางที่ 5.29 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.1.3)

H order	Loss (W)		
	Unit1	Unit2	Unit 3
Fund	406.21	184.87	0.8
5	259.02	8.41	3.12
7	1.3	93.04	7.62
11	0.59	1.85	249.93
13	0.27	0.71	90.3
17	0.07	0.15	21.98
19	0.04	0.08	12.68
23	0.02	0.03	7.38
25	0.01	0.03	6.95
29	0.01	0.02	6
31	0.01	0.01	5.09
35	0	0.01	3.18
37	0	0.01	2.61
รวม	667.53	289.21	417.64

5.1.4. ใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองแบบผ่านสูงชนิดซีในการกรองฮาร์มอนิก

กรณีนี้จะใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยว (ST) จำนวนสองชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 กับ 7 และใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงชนิดซี (CT) จำนวนหนึ่งชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟให้กับแต่ละตัวกรองจะเหมือนกับกรณี 5.1.1 ผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.30 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโฟลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 8 แสดงในตารางที่ 5.31 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโฟลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 8 แสดงในตารางที่ 5.32 ผลลัพธ์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.33-5.34 และรูปที่ 5.8 แสดงตัวอย่างวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงชนิดซีกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11

ตารางที่ 5.30 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.1.4)

Type	h	MVar	Tp (Hz)	Qf	C1(uF)	VC1(kV)	C2(uF)	VC2(kV)	L(mH)	R(ohm)
ST	5	0.36	235	60	63.219	4.357	-	-	7.255	0.179
ST	7	0.23	335	60	41.363	4.255	-	-	5.457	0.191
CT	11	0.11	535	3	20.233	4.16	2296.22	0.037	4.413	44.498

ตารางที่ 5.31 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโฟลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 8 (กรณี 5.1.4)

Bus	Nominal V (kV)	V _{mag} (p.u.)	θ (deg)	P _{load} (MW)	Q _{load} (MVar)	P _{gen} (MW)	Q _{gen} (MVar)
1:UTIL-69	69	1	0	0	0	7.36	0.55
2:69-1	69	0.9988	-0.1206	0	0	0	0
3:MILL-1	13.8	0.9944	-2.3697	2.24	2	0	4.94
4:GEN1	13.8	0.9950	-2.3615	0	0	2	2.18
5:Aux	0.48	0.9702	-3.5064	0.60	0.53	0	0
6:FDR F	13.8	0.9942	-2.3749	0	0	0	0
7:RECT	0.48	0.9759	-4.6859	1.15	0.29	0	0
8:T3 SEC	4.16	0.9706	-4.9435	1.31	1.13	0	0.70
9:FDR G	13.8	0.9942	-2.3682	0	0	0	0
10:T11 SEC	0.48	0.9572	-3.9353	0.81	0.80	0	0
11:T4 SEC	0.48	0.9794	-3.0482	0.37	0.33	0	0
12:FDR H	13.8	0.9938	-2.3672	0	0	0	0
13:T7 SEC	2.4	0.9510	-4.6642	2.80	2.50	0	0

ตารางที่ 5.32 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโวลต์เมื่อติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกจำนวน 3 ชุดที่บัส 8 (กรณี 5.1.4)

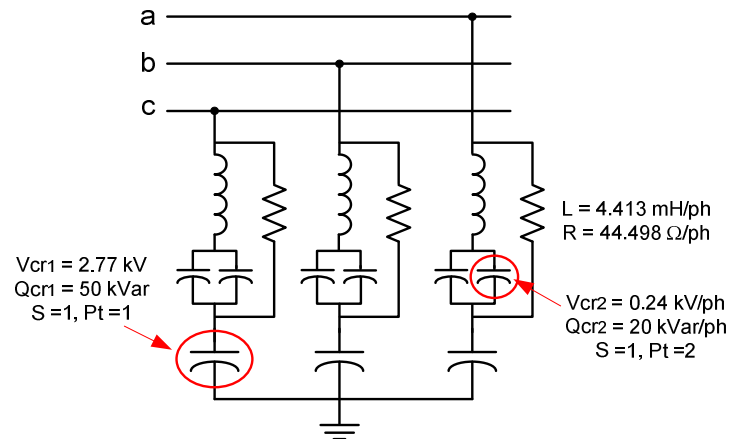
Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	69	1	0	0.0062	89.8226	0.0013	-71.5931	0.0007	11.8492	0.0003	-88.9909	0.6372	3	0.2124
2	69	0.9988	-0.1206	0.0064	89.6844	0.0014	-71.6918	0.0007	11.7864	0.0004	-89.0441	0.6569	3	0.2190
3	13.8	0.9944	-2.3697	0.0097	89.6972	0.0021	-71.6827	0.0011	11.7922	0.0005	-89.0392	1.0009	4	0.2502
4	13.8	0.995	-2.3615	0.0096	89.643	0.0021	-71.7639	0.0011	11.6702	0.0005	-89.176	0.9977	4	0.2494
5	0.48	0.9702	-3.5064	0.0089	78.2471	0.0019	-87.5788	0.0009	-12.3739	0.0004	-116.9879	0.9482	4	0.2370
6	13.8	0.9942	-2.3749	0.0096	89.9258	0.002	-71.3249	0.0011	12.3693	0.0005	-88.3611	0.9994	4	0.2499
7	0.48	0.9759	-4.6859	0.008	79.3443	0.0017	-86.1678	0.0008	-10.4052	0.0004	-114.7859	0.8407	4	0.2102
8	4.16	0.9706	-4.9435	0.0207	172.7922	0.0094	69.4935	0.0174	176.9845	0.0126	79.9823	3.6968	4	0.9242
9	13.8	0.9942	-2.3682	0.0097	89.6518	0.0021	-71.7431	0.0011	11.7137	0.0005	-89.1219	1.0004	4	0.2501
10	0.48	0.9572	-3.9353	0.0086	72.6794	0.0018	-94.9429	0.0008	-22.2972	0.0004	-127.7036	0.9191	4	0.2298
11	0.48	0.9794	-3.0482	0.0093	82.7063	0.002	-81.4489	0.001	-3.3399	0.0005	-106.7512	0.9751	4	0.2438
12	13.8	0.9938	-2.3672	0.0096	89.5919	0.0021	-71.8211	0.0011	11.6164	0.0005	-89.2235	0.9997	4	0.2499
13	2.4	0.951	-4.6642	0.0082	69.3379	0.0017	-99.1846	0.0008	-27.5363	0.0003	-133.1275	0.8883	4	0.2221

ตารางที่ 5.33 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.1.4)

h order	S	Pt	Total cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	Icr(A)	Ic1_rms(A)	Ic1/Icr
5	1	1	3	2.7700	10.1166	150	0.4500	0.3711	121.2567	62.2274	62.2274	54.15	61.14	1.13
7	1	1	3	2.7700	12.7563	100	0.3000	0.2360	127.1398	41.4850	41.4850	36.10	38.88	1.08
11	1	1	3	2.7700	15.3313	50	0.1500	0.1128	133.0130	20.7425	20.7425	18.05	18.32	1.01

ตารางที่ 5.34 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุ (C2) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.1.4)

h order	S	Pt	Total cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	Icr(A)	Ic2_rms(A)	Ic2/Icr
11	1	2	6	0.2400	1,023	20	0.1200	0.000951	12,622	1,105.2	2,210.5	83.33	8.99	0.11



รูปที่ 5.8 วงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงชนิดซีกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11

จากตารางที่ 5.32 จะเห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 เข้าที่บัส 8 ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 8 ลดลงเหลือ 0.9242 เท่า ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

จะเห็นได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุในตารางที่ 5.33 และ 5.34 มีค่าใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในตารางที่ 5.30 และจะเห็นว่าค่า I_{c1}/I_{cr} ของแต่ละตัวกรองมีค่าน้อยกว่า 1.3 เท่า ซึ่งไม่เกิดภาวะไหลเกินของตัวเก็บประจุ

จากการออกแบบพบว่าในระดับแรงดัน 4.16 kV การออกแบบตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองสามารถใช้ตัวเก็บประจุชนิดสามเฟสเพียงหนึ่งตัวในการออกแบบได้ โดยภายในตัวเก็บประจุจะต่อเป็นแบบเดลต้า ซึ่งการออกแบบตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 5 และ 7 จะเหมือนกับกรณีที่ 5.1.1 ส่วนการออกแบบตัวกรองผ่านสูงชนิดซีกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยใช้ตัวเก็บประจุสามเฟสสามารถทำได้ดังนี้

การออกแบบตัวกรองผ่านสูงชนิดซีกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยใช้ตัวเก็บประจุสามเฟส

จากสมการที่ 2.45

$$Q_{cr} = Q_{f_{comp}} \left(\frac{V_{cr,c1}}{V_S} \right)^2$$

จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 5.30 เลือกใช้ตัวเก็บประจุสามเฟสที่มีแรงดันพิกัด 4.8 kV ในการออกแบบ จะได้

$$Q_{cr} = 0.11 \times \left(\frac{4.8}{4.16} \right)^2 = 0.146 \text{ MVar}$$

จากตารางที่ 3.1 เลือกตัวเก็บประจุสามเฟสที่มีแรงดันพิกัด 4.8 kV 150 kVar จะได้ค่าความจุไฟฟ้า (C1) เท่ากับ 20.7233 μF ต่อเฟส

จากสมการที่ 2.11 จะได้ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจรรวม (C1 อนุกรมกับ C2)

$$Q_{f_{comp}} = \frac{V_S^2}{X_C} \left(\frac{h^2}{h^2 - 1} \right)$$

$$X_C = \frac{4.16^2}{0.11} \times \left(\frac{10.7^2}{10.7^2 - 1} \right) = 158.709 \Omega$$

จะได้ค่าความจุไฟฟ้ารวมเท่ากับ 20.0562 μF และจากสมการที่ 2.40 จะได้ค่าความจุไฟฟ้า (C2) เท่ากับ 623 μF จากสมการที่ 2.46 และตารางที่ 5.30 เลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดหนึ่งเฟสที่มีพิกัด 0.6 kV 35 kVar จะได้ค่าความจุไฟฟ้า (C2) เท่ากับ 309.468 μF ต่อเฟส ทำการต่อขนานกันสองตัวจะได้ค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 618.936 μF

$$Q_{cr,c2} = \frac{V_{cr,c2}^2}{X_{c2}}$$

$$C_2 = \frac{Q_{cr,c2}}{V_{cr,c2}^2 \times 2\pi f} \times 2 = \frac{35kVar}{(0.6kV)^2 \times 100\pi} \times 2 = 618.936 \mu\text{F}$$

จากสมการที่ 2.7 ค่า X_C คือค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุรวม (C1อนุกรมกับ C2) ซึ่งมีค่าความจุเท่ากับ 20.0519 μF

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{100}{\%X_L}}$$

สามารถหาค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำได้ เท่ากับ 1.3865 โอห์ม จะได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 4.413 mH จากสมการที่ 2.22 และตารางที่ 5.30

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

สามารถหาค่าความต้านทานได้ เท่ากับ 44.507 โอห์ม

การออกแบบตัวเก็บประจุด้วยมือนี้ไม่สามารถตรวจสอบภาวะโหลดเกินและหาค่ากำลังสูญเสียของตัวเก็บประจุได้

เมื่อออกแบบชุดตัวเก็บประจุเสร็จสิ้น จากนั้นทดลองนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบตัวเก็บประจุ (ตารางที่ 5.33-5.34) ใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองเพื่อทดสอบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจื่อยังคงทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด ผลลัพธ์การทดลองแสดงในตารางที่ 5.35

ตารางที่ 5.36 แสดงค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิกทั้งหมด โดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าในตารางที่ 5.33 และ 5.34 ใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง

ตารางที่ 5.35 ผลการเปรียบเทียบ %THDv กรณีต่าง ๆ (กรณี 5.1.4)

Bus	%THDv		
	Filter Design	Capacitor Design	ER G5/4
1	0.6372	0.5784	3
2	0.6569	0.5963	3
3	1.0009	0.9086	4
4	0.9977	0.9057	4
5	0.9482	0.8603	4
6	0.9994	0.9071	4
7	0.8407	0.7628	4
8	3.6968	3.5482	4
9	1.0004	0.9081	4
10	0.9191	0.8337	4
11	0.9751	0.8850	4
12	0.9997	0.9074	4
13	0.8883	0.8055	4

ตารางที่ 5.36 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.1.4)

H order	Loss (W)		
	Unit1	Unit2	Unit 3
Fund	406.12	184.83	0.01
5	259.02	8.41	3.34
7	1.3	93.04	6.24
11	0.69	2.18	346.75
13	0.25	0.65	110.27
17	0.06	0.14	23.36
19	0.03	0.07	13.11
23	0.02	0.03	7.45
25	0.01	0.03	6.93
29	0.01	0.02	5.88
31	0.01	0.01	5.11
35	0	0.01	3.14
37	0	0	2.55
รวม	667.52	289.42	534.15

ตารางที่ 5.37 และ 5.38 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันในกรณี 5.1.1-5.1.4 และผลการเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียของแต่ละตัวกรองฮาร์มอนิกตามลำดับ

ตารางที่ 5.37 ผลการเปรียบเทียบค่า%THDV ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.1)

Bus	%THDV			
	5.1.1 (ST)	5.1.2 (ST+2HP)	5.1.3 (ST+3HP)	5.1.4 (ST+CT)
1	0.6337	0.6372	0.6374	0.6372
2	0.6533	0.6569	0.6570	0.6569
3	0.9954	1.0009	1.0012	1.0009
4	0.9923	0.9978	0.9980	0.9977
5	0.9438	0.9482	0.9485	0.9482
6	0.9943	0.9994	0.9997	0.9994
7	0.8370	0.8407	0.8411	0.8407
8	3.1490	3.7060	3.6703	3.6968
9	0.9950	1.0005	1.0007	1.0004
10	0.9155	0.9191	0.9195	0.9191
11	0.9701	0.9751	0.9754	0.9751
12	0.9942	0.9997	1.0000	0.9997
13	0.8852	0.8883	0.8888	0.8883

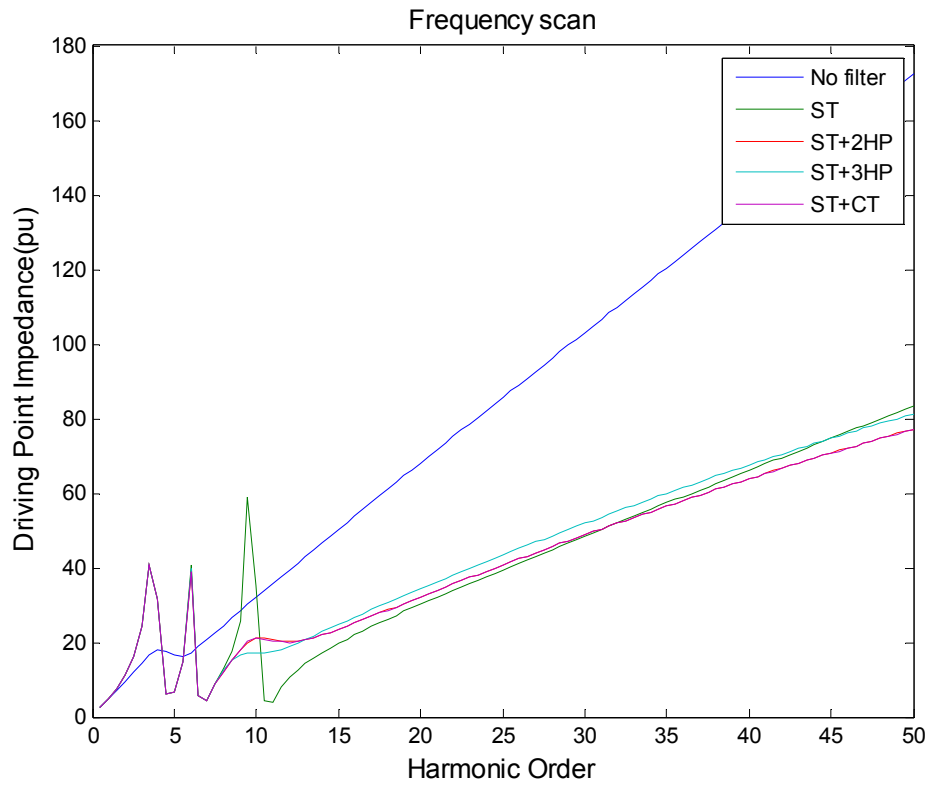
ตารางที่ 5.38 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.1)

Filter Unit	Loss (W) at Fundamental			
	5.1.1 (ST)	5.1.2 (ST+2HP)	5.1.3 (ST+3HP)	5.1.4 (ST+CT)
1	406.21	406.21	406.21	406.12
2	184.87	184.87	184.87	184.83
3	58.09	10.14	0.8	0.01
Filter Unit	Total Loss (W)			
	5.1.1 (ST)	5.1.2 (ST+2HP)	5.1.3 (ST+3HP)	5.1.4 (ST+CT)
1	666.91	667.6	667.53	667.52
2	287.31	289.43	289.21	289.42
3	90.42	535.54	417.64	534.15

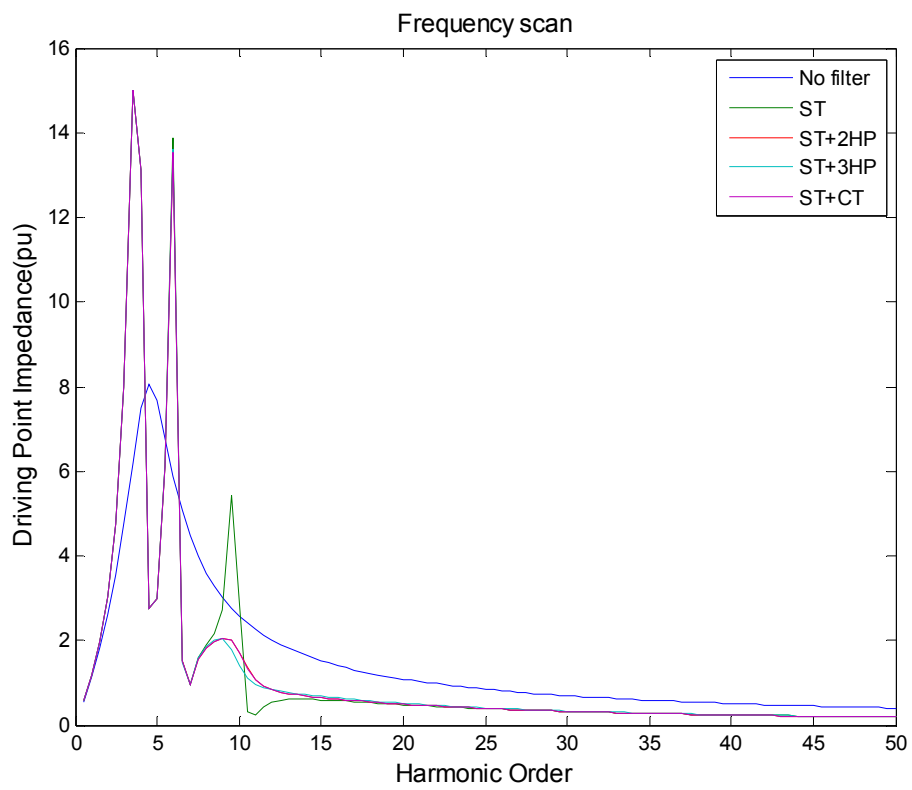
จากตารางที่ 5.37 จะเห็นว่าการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวชนิดเดียวในการกรองฮาร์มอนิกสามารถกรองฮาร์มอนิกได้ดีที่สุด ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันที่บัส 8 มีค่าต่ำสุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ๆ

จากตารางที่ 5.38 จะเห็นว่าการกำลังสูญเสียที่ความถี่หลักมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกผ่านสูงชนิดซีมีค่าน้อยที่สุดเนื่องจากตัวกรองชนิดนี้มีการทำให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมที่ความถี่หลักมูลผ่านตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (C_2) ทำให้มีกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานของตัวกรองน้อยมาก เมื่อพิจารณาค่ากำลังสูญเสียรวมของตัวกรองฮาร์มอนิกจะพบว่าตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวมีค่ากำลังสูญเสียรวมน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับตัวกรองชนิดอื่น ๆ กรณีของค่ากำลังสูญเสียรวมของตัวกรองฮาร์มอนิกจะมีความมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองฮาร์มอนิกและอิมพีแดนซ์ของระบบที่ความถี่ต่าง ๆ ที่สูงมากขึ้น โดยในแต่ละความถี่ที่สูงขึ้น ถ้าอิมพีแดนซ์ของระบบมีค่ามากกว่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองฮาร์มอนิกจะทำให้มีกระแสไหลผ่านเข้าตัวกรองฮาร์มอนิกมากกว่าที่จะไหลเข้าสู่ระบบทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองมีค่ามากขึ้น โดยเฉพาะตัวกรองแบบผ่านสูงซึ่งมีค่าความต้านทานสูงเมื่อเทียบกับตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยวจึงทำให้ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองผ่านสูงมีค่ามากกว่าตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยว

รูปที่ 5.9 แสดงอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของบัสที่ 8 ซึ่งเป็นบัสที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่และรูปที่ 5.10 แสดงอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของบัสที่ 8 ซึ่งเป็นบัสที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่ โดยแต่ละรูปจะเปรียบเทียบทั้งหมด 5 กราฟคือ 1) กรณีไม่มีตัวกรองฮาร์มอนิก 2) กรณี ST 3) กรณี ST+2HP 4) กรณี ST+3HP และ 5) กรณี ST+CT โดยแต่ละกรณีจะแสดงความแตกต่างด้วยสีของเส้นแต่ละเส้น จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ที่บัส 8 จะมีค่าต่ำกว่าที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 ทำให้กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านเข้าสู่ตัวกรองมากกว่าที่จะไหลเข้าสู่ระบบ



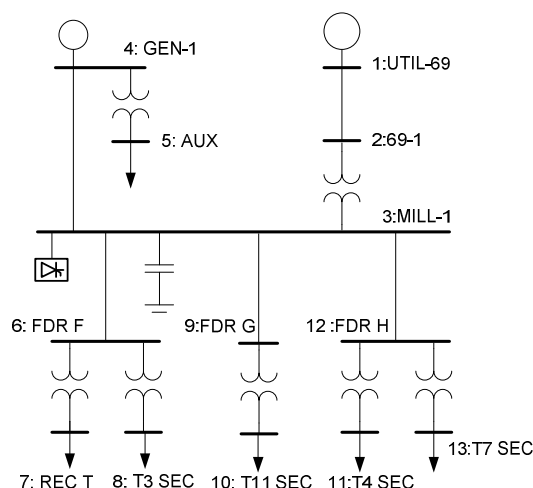
รูปที่ 5.9 อิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของบัสที่ 8 ซึ่งเป็นบัสที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่ (กรณี 5.1)



รูปที่ 5.10 อิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของบัสที่ 3 ซึ่งเป็นบัสที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่ (กรณี 5.1)

5.2. ระบบทดสอบ 13 บัส (แรงดันจำหน่าย) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอยู่ที่บัส 3 (13.8 kV)

กรณีนี้กำหนดให้โหลดที่บัส 3 เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก เนื่องจากต้องการให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันที่บัส 3 มีค่าสูง จึงไม่ต้องการให้มีโหลดอื่น ๆ ต่อร่วมที่บัส 3



รูปที่ 5.11 แผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบ 13 บัส (แรงดันจำหน่าย) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอยู่ที่บัส 3 (13.8kV)

ผลการคำนวณและวิเคราะห์

การวิเคราะห์และการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบ่งออกเป็น 4 กรณีดังนี้

- 5.2.1 การใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวชนิดเดียวในการกรองฮาร์มอนิก
- 5.2.2 การใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงลำดับสองในการกรองฮาร์มอนิก
- 5.2.3 การใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงลำดับสามในการกรองฮาร์มอนิก
- 5.2.4 การใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงชนิดซีในการกรองฮาร์มอนิก

แต่ละกรณีจะมีการวิเคราะห์และออกแบบรวมทั้งสิ้น 4 ส่วนคือ 1. โหลดโพล์ 2. ฮาร์มอนิกโพล์ 3. การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก และ 4. การออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองฮาร์มอนิก

ในส่วนนี้เป็นการวิเคราะห์ระบบกรณีพื้นฐานโดยไม่มีการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก จึงวิเคราะห์เพียง 2 ส่วนคือ โหลดโพลาร์และฮาร์มอนิกโพลาร์เท่านั้น ส่วนหัวข้อ 5.2.1-5.2.4 จะทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 4 ส่วน ผลลัพธ์ของการหาโหลดโพลาร์ (กรณี 5.2) แสดงในตารางที่ 5.39 ส่วนผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์ (กรณี 5.2) แสดงในตารางที่ 5.40

ตารางที่ 5.39 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์ (กรณี 5.2)

Bus	Nominal V (kV)	V_{mag} (p.u.)	θ (deg)	P_{load} (MW)	Q_{load} (MVar)	P_{gen} (MW)	Q_{gen} (MVar)
1:UTIL-69	69	1	0	0	0	7.37	0.58
2:69-1	69	0.9988	-0.1204	0	0	0	0
3:MILL-1	13.8	0.9943	-2.3707	2.24	2	0	4.94
4:GEN1	13.8	0.9950	-2.3673	0	0	2	2.85
5:Aux	0.48	0.9702	-3.5122	0.60	0.53	0	0
6:FDR F	13.8	0.9940	-2.3729	0	0	0	0
7:RECT	0.48	0.9756	-4.6848	1.15	0.29	0	0
8:T3 SEC	4.16	0.9459	-4.8320	1.31	1.13	0	0
9:FDR G	13.8	0.9940	-2.3692	0	0	0	0
10:T11 SEC	0.48	0.9571	-3.9368	0.81	0.80	0	0
11:T4 SEC	0.48	0.9793	-3.0495	0.37	0.33	0	0
12:FDR H	13.8	0.9936	-2.3682	0	0	0	0
13:T7 SEC	2.4	0.9508	-4.6660	2.80	2.50	0	0

ตารางที่ 5.40 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโวลต์ (กรณี 5.2)

Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	69	1	0	0.0326	72.2302	0.0112	-80.5302	0.0026	36.4758	0.0014	-82.0068	3.4608	3	1.1536
2	69	0.9988	-0.1204	0.0336	72.0920	0.0115	-80.6289	0.0027	36.4130	0.0015	-82.0600	3.5676	3	1.1892
3	13.8	0.9943	-2.3707	0.0509	72.1047	0.0175	-80.6198	0.0041	36.4188	0.0023	-82.0551	5.4371	4	1.3593
4	13.8	0.9950	-2.3673	0.0508	72.0505	0.0174	-80.7010	0.0040	36.2967	0.0023	-82.1919	5.4188	4	1.3547
5	0.48	0.9702	-3.5122	0.0472	60.6546	0.0159	-96.5159	0.0035	12.2527	0.0019	-110.0038	5.1469	4	1.2867
6	13.8	0.9940	-2.3729	0.0509	72.0659	0.0175	-80.6727	0.0040	36.3494	0.0023	-82.1286	5.4336	4	1.3584
7	0.48	0.9756	-4.6848	0.0421	61.4806	0.0142	-95.5209	0.0031	13.5673	0.0017	-108.5620	4.5679	4	1.1420
8	4.16	0.9459	-4.8320	0.0425	50.5814	0.0137	-109.5982	0.0027	-4.6713	0.0014	-127.9319	4.7371	4	1.1843
9	13.8	0.9940	-2.3692	0.0509	72.0593	0.0175	-80.6802	0.0040	36.3403	0.0023	-82.1378	5.4344	4	1.3586
10	0.48	0.9571	-3.9368	0.0452	55.0816	0.0149	-103.8869	0.0031	2.3205	0.0016	-120.7289	4.9860	4	1.2465
11	0.48	0.9793	-3.0495	0.0489	65.1115	0.0167	-90.3892	0.0038	21.2819	0.0021	-99.7726	5.2955	4	1.3239
12	13.8	0.9936	-2.3682	0.0508	71.9994	0.0174	-80.7582	0.0040	36.2430	0.0023	-82.2394	5.4303	4	1.3576
13	2.4	0.9508	-4.6660	0.0434	51.7393	0.0141	-108.1296	0.0029	-2.9191	0.0015	-126.1530	4.8160	4	1.2040

จากตารางที่ 5.40 จะเห็นว่าทุกบัสมีค่าความผิดพลาดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกสูงกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนด แต่บัสที่ 3 จะมีค่าสูงที่สุดคือ 1.3593 เท่า จึงจำเป็นต้องออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกติดตั้งที่บัส 3 เพื่อลดค่าความผิดพลาดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกให้มีค่าต่ำกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนด

โดยที่ค่ากำลังรีแอกทีฟของตัวกรองฮาร์มอนิกทั้งหมดจะใช้ค่าเดียวกันกับค่ากำลังรีแอกทีฟที่ใช้ในการปรับค่าตัวประกอบกำลัง (P.F) ของบัสที่ 3 ให้เป็น 0.95 เนื่องจากค่า P.F ของบัสที่ 3 เดิมมีค่าเท่ากับ 0.75 ดังนั้นจะได้ค่ากำลังรีแอกทีฟที่จะชดเชยเข้าสู่ระบบเท่ากับ 1.26 MVar

5.2.1. ใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดียวชนิดเดียวในการกรองฮาร์มอนิก

กรณีนี้จะใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดียว (ST) จำนวนสามชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 จึงทำการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟให้กับแต่ละตัวกรองโดยแบ่งตามปริมาณกระแสฮาร์มอนิกดังนี้

ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5

$$Q_{filter,5} = \frac{18.24}{18.24+11.9+5.73} \times 1.26 = 0.6407 \text{ MVar}$$

ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7

$$Q_{filter,7} = \frac{11.9}{18.24+11.9+5.73} \times 1.26 = 0.4180 \text{ MVar}$$

ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11

$$Q_{filter,11} = \frac{5.73}{18.24+11.9+5.73} \times 1.26 = 0.2013 \text{ MVar}$$

จะได้กำลังรีแอกทีฟสำหรับตัวกรองอันดับที่ 5 เท่ากับ 0.64 MVar สำหรับตัวกรองอันดับที่ 7 เท่ากับ 0.42 MVar และ สำหรับตัวกรองอันดับที่ 11 เท่ากับ 0.2 MVar ซึ่งตัวกรองทั้งสามชุดทำการติดตั้งเข้าที่บัส 3 เนื่องจากการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟตามปริมาณกระแสฮาร์มอนิกดังที่กล่าว เมื่อทดลองออกแบบชุดตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 5 และ 11 ทำให้ต้องใช้จำนวนตัวเก็บประจุจำนวนมากในการออกแบบจึงทำการปรับค่ากำลังรีแอกทีฟของตัวกรองอันดับ 5 เป็น 0.65 MVar สำหรับตัวกรองอันดับที่ 7 มีค่าเท่าเดิมคือ 0.42 MVar สำหรับตัวกรองอันดับที่ 11 เป็น 0.28 MVar ผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.41

ตารางที่ 5.41 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.2.1)

Type	Bus	kV	H	MVar	TP (Hz)	Qf	C1(uF)	VC1(kV)	L(mH)	R(ohm)
ST	3	13.8	5	0.65	245	60	10.412	14.4	40.53	1.040
ST	3	13.8	7	0.42	345	40	6.873	14.1	30.966	1.678
ST	3	13.8	11	0.28	545	60	4.641	13.92	18.377	1.049

จากตารางที่ 5.41 พารามิเตอร์ Tp (Hz) ถูกกำหนดเท่ากับ 245 345 และ 545 ส่วนค่า Qf เท่ากับ 60 และ 40 ซึ่งได้จากการทดลองวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์ ปรากฏว่าค่าความผิดเพี้ยนรวมของบัส ที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่ไม่เกินค่ามาตรฐานกำหนด จึงถือว่าค่า Tp และ Qf ที่กำหนดสามารถใช้ออกแบบได้ ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 3 แสดงในตารางที่ 5.42 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 3 แสดงในตารางที่ 5.43 ผลลัพธ์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.44 และรูปที่ 5.12 แสดงตัวอย่างวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวกรอง ฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ส่วนตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวที่กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 สามารถเขียนวงจรมูลได้เหมือนกับรูปที่ 5.12

ตารางที่ 5.42 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 3 (กรณี 5.2.1)

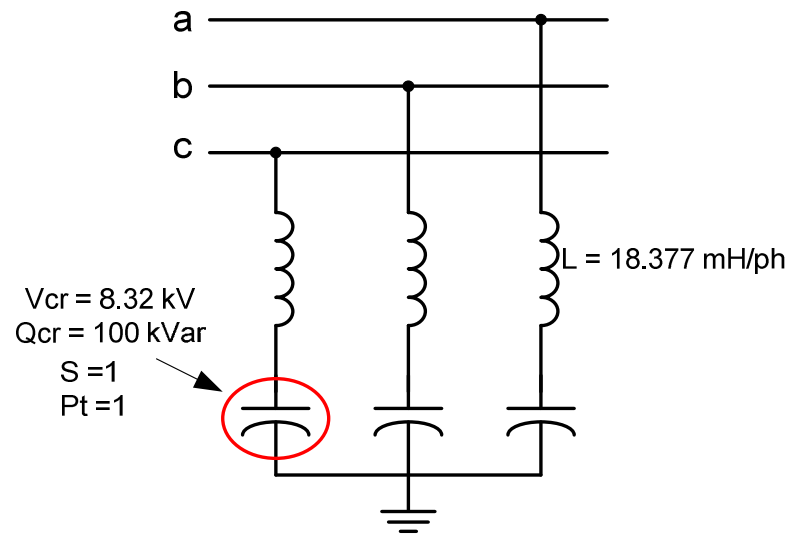
Bus	Nominal V (kV)	V _{mag} (p.u.)	θ (deg)	P _{load} (MW)	Q _{load} (MVar)	P _{gen} (MW)	Q _{gen} (MVar)
1:UTIL-69	69	1	0	0	0	7.37	0.52
2:69-1	69	0.9988	-0.1209	0	0	0	0
3:MILL-1	13.8	0.9946	-2.3726	2.24	2	0	6.3
4:GEN1	13.8	0.9950	-2.3602	0	0	2	1.57
5:Aux	0.48	0.9702	-3.5051	0.6	0.53	0	0
6:FDR F	13.8	0.9943	-2.3748	0	0	0	0
7:RECT	0.48	0.9760	-4.6853	1.15	0.29	0	0
8:T3 SEC	4.16	0.9462	-4.8323	1.31	1.13	0	0
9:FDR G	13.8	0.9943	-2.3711	0	0	0	0
10:T11 SEC	0.48	0.9574	-3.9377	0.81	0.8	0	0
11:T4 SEC	0.48	0.9796	-3.0509	0.37	0.33	0	0
12:FDR H	13.8	0.9940	-2.3701	0	0	0	0
13:T7 SEC	2.4	0.9512	-4.6664	2.8	2.5	0	0

ตารางที่ 5.43 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกจำนวน 3 ชุดที่บัส 3 (กรณี 5.2.1)

Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	69	1	0	0.0054	151.3062	0.0033	17.0615	0.0011	147.2878	0.0019	-79.4107	0.6707	3	0.2236
2	69	0.9988	-0.1209	0.0055	151.168	0.0034	16.9627	0.0011	147.2249	0.0019	-79.4638	0.6914	3	0.2305
3	13.8	0.9946	-2.3726	0.0084	151.1808	0.0052	16.9719	0.0017	147.2307	0.0029	-79.4589	1.0534	4	0.2633
4	13.8	0.995	-2.3602	0.0084	151.1266	0.0052	16.8906	0.0017	147.1087	0.0029	-79.5957	1.0500	4	0.2625
5	0.48	0.9702	-3.5051	0.0078	139.7307	0.0047	1.0757	0.0014	123.0647	0.0024	-107.4076	0.9847	4	0.2462
6	13.8	0.9943	-2.3748	0.0084	151.1419	0.0052	16.9189	0.0017	147.1613	0.0029	-79.5325	1.0526	4	0.2631
7	0.48	0.976	-4.6853	0.007	140.5623	0.0042	2.0786	0.0013	124.3906	0.0022	-105.9532	0.8748	4	0.2187
8	4.16	0.9462	-4.8323	0.007	129.6697	0.0041	-11.9914	0.0011	106.1585	0.0018	-125.3177	0.8885	4	0.2221
9	13.8	0.9943	-2.3711	0.0084	151.1354	0.0052	16.9115	0.0017	147.1523	0.0029	-79.5416	1.0527	4	0.2632
10	0.48	0.9574	-3.9377	0.0075	134.1678	0.0044	-6.2821	0.0013	113.1493	0.0021	-118.115	0.9434	4	0.2359
11	0.48	0.9796	-3.0509	0.0081	144.1919	0.0049	7.2085	0.0016	132.1029	0.0027	-97.166	1.0203	4	0.2551
12	13.8	0.994	-2.3701	0.0084	151.0755	0.0052	16.8335	0.0017	147.055	0.0029	-79.6432	1.0518	4	0.2629
13	2.4	0.9512	-4.6664	0.0072	130.8271	0.0042	-10.5231	0.0012	107.9106	0.0019	-123.5386	0.9054	4	0.2263

ตารางที่ 5.44 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.2.1)

h order	S	Pt	Total cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	Icr(A)	Ic1_rms(A)	Ic1/Icr
5	1	1	3	9.5400	14.7484	300	0.9000	0.6835	131.6719	10.4924	10.4924	31.45	37.13	1.18
7	1	1	3	9.5400	17.2231	200	0.6000	0.4366	137.4125	6.9949	6.9949	20.96	25.15	1.20
11	1	1	3	8.3200	3.5472	100	0.3000	0.2798	107.2202	4.5984	4.5984	12.02	13.77	1.15



รูปที่ 5.12 วงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11

จากตารางที่ 5.43 จะเห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 เข้าที่บัส 3 ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 3 ลดลงเหลือ 0.2637 เท่าซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

จะเห็นได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุในตารางที่ 5.44 มีค่าใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในตารางที่ 5.41

จากการออกแบบพบว่าในระดับแรงดัน 13.8 kV สามารถใช้ตัวเก็บประจุชนิดสามเฟสเพียงหนึ่งตัวในการออกแบบได้ โดยภายในตัวเก็บประจุจะต่อเป็นแบบเดลต่อการออกแบบตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองโดยใช้ตัวเก็บประจุชนิดสามเฟสสามารถทำได้ดังนี้

การออกแบบตัวกรองปรับคลื่นเดียวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 โดยใช้ตัวเก็บประจุสามเฟส

จากสมการที่ 2.12

$$Q_{cr} = Q_{f_{comp}} \left(\frac{V_{cr}}{V_S} \right)^2 \left(\frac{h^2 - 1}{h^2} \right)$$

จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 5.41 เลือกใช้ตัวเก็บประจุสามเฟสที่มีแรงดันพิกัด 14.4 kV ในการออกแบบ จะได้

$$Q_{cr} = 0.65 \times \left(\frac{14.4}{13.8} \right)^2 \times \left(\frac{4.9^2 - 1}{4.9^2} \right) = 0.6783 \text{ MVar}$$

จากตารางที่ 3.1 เลือกตัวเก็บประจุสามเฟสที่มีพิกัด 14.4 kV 800 kVar จะได้ค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 12.28 μF ต่อเฟส และ จากสมการที่ 2.7

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{100}{\%X_L}}$$

สามารถหาค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำได้เท่ากับ 10.796 โอห์ม จะได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 34.36 mH จากสมการที่ 2.3 และตารางที่ 5.41

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

สามารถหาค่าความต้านทานได้เท่ากับ 0.8816 โอห์ม

การออกแบบตัวกรองปรับคลื่นเดียวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 โดยใช้ตัวเก็บประจุสามเฟส

จากสมการที่ 2.12

$$Q_{cr} = Q_{f_{comp}} \left(\frac{V_{cr}}{V_S} \right)^2 \left(\frac{h^2 - 1}{h^2} \right)$$

จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 5.41 เลือกใช้ตัวเก็บประจุสามเฟสที่มีแรงดันพิกัด 14.4 kV ในการออกแบบ จะได้

$$Q_{cr} = 0.42 \times \left(\frac{14.4}{13.8} \right)^2 \times \left(\frac{6.9^2 - 1}{6.9^2} \right) = 0.4477 \text{ MVar}$$

จากตารางที่ 3.1 เลือกตัวเก็บประจุสามเฟสที่มีพิกัด 14.4 kV 500 kVar จะได้ค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 7.6753 μF ต่อเฟส และ จากสมการที่ 2.7

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{100}{\%X_L}}$$

สามารถหาค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำได้ เท่ากับ 8.7108 โอห์ม จะได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 27.72 mH จากสมการที่ 2.3 และตารางที่ 5.41

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

สามารถหาค่าความต้านทานได้ เท่ากับ 1.5 โอห์ม

การออกแบบตัวกรองปรับคลื่นเดียวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยใช้ตัวเก็บประจุสามเฟส

จากสมการที่ 2.12

$$Q_{cr} = Q_{f_{comp}} \left(\frac{V_{cr}}{V_S} \right)^2 \left(\frac{h^2 - 1}{h^2} \right)$$

จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 5.41 เลือกใช้ตัวเก็บประจุสามเฟสที่มีแรงดันพิกัด 14.4 kV ในการออกแบบ จะได้

$$Q_{cr} = 0.28 \times \left(\frac{14.4}{13.8} \right)^2 \times \left(\frac{10.9^2 - 1}{10.9^2} \right) = 0.3023 \text{ MVar}$$

จากตารางที่ 3.1 เลือกตัวเก็บประจุสามเฟสที่มีพิกัด 14.4 kV 300 kVar จะได้ค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 4.61 μF ต่อเฟส และ จากสมการที่ 2.7

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{100}{\%X_L}}$$

สามารถหาค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำได้ เท่ากับ 5.812 โอห์ม จะได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 18.49 mH จากสมการที่ 2.3 และตารางที่ 5.41

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

สามารถหาค่าความต้านทานได้ เท่ากับ 1.0558 โอห์ม

การออกแบบตัวเก็บประจุด้วยมือนี้ไม่สามารถตรวจสอบภาวะโหลดเกินและหาค่ากำลังสูญเสียของตัวเก็บประจุได้

เมื่อทำการออกแบบชุดตัวเก็บประจุเสร็จสิ้น จากนั้นทดลองนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบตัวเก็บประจุ (ตารางที่ 5.44) ใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองเพื่อทดสอบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจื่อยังคงทำให้ค่าความผิดพลาดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด ผลลัพธ์การทดลองแสดงในตารางที่ 5.45

ตารางที่ 5.46 แสดงค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิกทั้งหมด โดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าในตารางที่ 5.44 เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง

ตารางที่ 5.45 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.2.1)

Bus	%THDv		
	Filter Design	Capacitor Design	ER G5/4
1	0.6707	0.8379	3
2	0.6914	0.8637	3
3	1.0534	1.3159	4
4	1.0500	1.3118	4
5	0.9847	1.2331	4
6	1.0526	1.3149	4
7	0.8748	1.0952	4
8	0.8885	1.1145	4
9	1.0527	1.3151	4
10	0.9434	1.1829	4
11	1.0203	1.2761	4
12	1.0518	1.3139	4
13	0.9054	1.1356	4

ตารางที่ 5.46 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.2.1)

H order	Loss (W)		
	Unit1	Unit2	Unit 3
Fund	773.02	531.32	139.76
5	658.68	5.92	0.55
7	1.91	524.37	1.18
11	0.01	0.03	56.21
13	0.03	0.11	1.17
17	0	0	0.01
19	0	0	0
23	0	0	0
25	0	0	0
29	0	0	0
31	0	0	0
35	0	0	0
37	0	0	0
รวม	1,433.65	1,061.75	198.9

5.2.2. ใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองแบบผ่านสูงอันดับสองในการกรองฮาร์มอนิก

กรณีนี้จะใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยว (ST) จำนวนสองชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 กับ 7 และใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงอันดับสอง (2HP) จำนวนหนึ่งชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟให้กับแต่ละตัวกรองจะเหมือนกับกรณี 5.2.1 ผลลัพธ์ของค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.47 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 3 แสดงในตารางที่ 5.48 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 3 แสดงในตารางที่ 5.49 ผลลัพธ์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.50 และรูปที่ 5.13 แสดงตัวอย่างวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงอันดับสองกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11

ตารางที่ 5.47 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.2.2)

Type	Bus	kV	H	MVar	TP (Hz)	Qf	C1(uF)	VC1(kV)	L(mH)	R(ohm)
ST	3	13.8	5	0.65	245	60	10.412	14.4	40.53	1.040
ST	3	13.8	7	0.42	345	40	6.873	14.1	30.966	1.678
2HP	3	13.8	11	0.28	545	2	4.641	13.92	18.377	125.856

ตารางที่ 5.48 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 3 (กรณี 5.2.2)

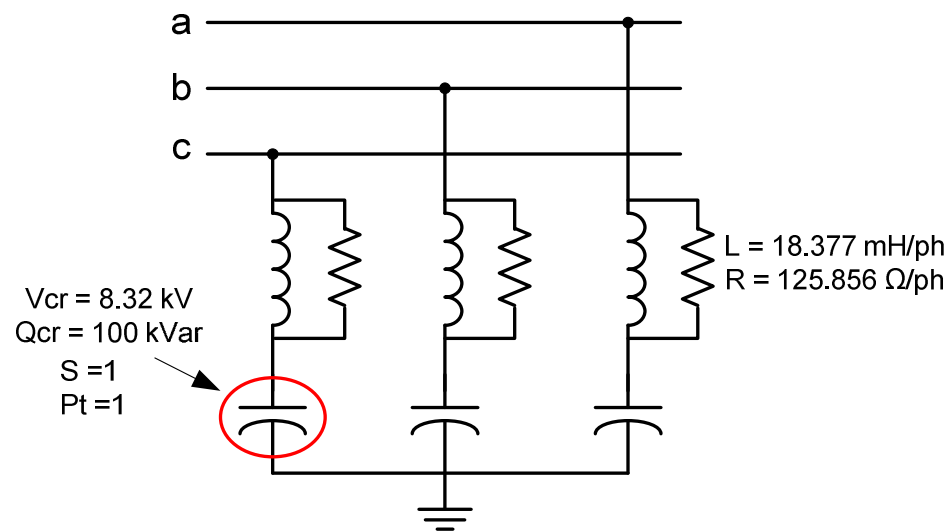
Bus	Nominal V (kV)	V _{mag} (p.u.)	θ (deg)	P _{load} (MW)	Q _{load} (MVar)	P _{gen} (MW)	Q _{gen} (MVar)
1:UTIL-69	69	1	0	0	0	7.37	0.52
2:69-1	69	0.9988	-0.1209	0	0	0	0
3:MILL-1	13.8	0.9946	-2.3725	2.24	2	0	6.3
4:GEN1	13.8	0.9950	-2.3601	0	0	2	1.57
5:Aux	0.48	0.9702	-3.5049	0.6	0.53	0	0
6:FDR F	13.8	0.9943	-2.3747	0	0	0	0
7:RECT	0.48	0.9760	-4.6852	1.15	0.29	0	0
8:T3 SEC	4.16	0.9462	-4.8322	1.31	1.13	0	0
9:FDR G	13.8	0.9943	-2.3710	0	0	0	0
10:T11 SEC	0.48	0.9574	-3.9376	0.81	0.8	0	0
11:T4 SEC	0.48	0.9796	-3.0508	0.37	0.33	0	0
12:FDR H	13.8	0.9940	-2.3700	0	0	0	0
13:T7 SEC	2.4	0.9512	-4.6663	2.8	2.5	0	0

ตารางที่ 5.49 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกจำนวน 3 ชุดที่บัส 3 (กรณี 5.2.2)

Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	69	1	0	0.0054	151.2609	0.0033	17.0411	0.0026	45.2187	0.0015	-74.9817	0.7018	3	0.2339
2	69	0.9988	-0.1209	0.0055	151.1227	0.0034	16.9424	0.0027	45.1559	0.0016	-75.0349	0.7235	3	0.2412
3	13.8	0.9946	-2.3725	0.0084	151.1354	0.0051	16.9515	0.0041	45.1617	0.0024	-75.03	1.1022	4	0.2756
4	13.8	0.995	-2.3601	0.0084	151.0812	0.0051	16.8703	0.0041	45.0397	0.0024	-75.1668	1.0987	4	0.2747
5	0.48	0.9702	-3.5049	0.0078	139.6853	0.0047	1.0554	0.0035	20.9956	0.002	-102.9787	1.0260	4	0.2565
6	13.8	0.9943	-2.3747	0.0084	151.0966	0.0051	16.8986	0.0041	45.0923	0.0024	-75.1035	1.1014	4	0.2753
7	0.48	0.976	-4.6852	0.0069	140.517	0.0042	2.0582	0.0032	22.3216	0.0018	-101.5242	0.9119	4	0.2280
8	4.16	0.9462	-4.8322	0.007	129.6243	0.004	-12.0117	0.0028	4.0894	0.0015	-120.8888	0.9185	4	0.2296
9	13.8	0.9943	-2.371	0.0084	151.09	0.0051	16.8911	0.0041	45.0832	0.0024	-75.1127	1.1015	4	0.2754
10	0.48	0.9574	-3.9376	0.0075	134.1225	0.0044	-6.3024	0.0031	11.0802	0.0017	-113.6861	0.9789	4	0.2447
11	0.48	0.9796	-3.0508	0.0081	144.1466	0.0049	7.1881	0.0038	30.0338	0.0022	-92.7371	1.0659	4	0.2665
12	13.8	0.994	-2.37	0.0084	151.0301	0.0051	16.8131	0.0041	44.9859	0.0024	-75.2143	1.1004	4	0.2751
13	2.4	0.9512	-4.6663	0.0072	130.7818	0.0041	-10.5434	0.0029	5.8416	0.0016	-119.1097	0.9369	4	0.2342

ตารางที่ 5.50 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.2.2)

h order	S	Pt	Total cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	Icr(A)	Ic1_rms(A)	Ic1/Icr
5	1	1	3	9.5400	14.7484	300	0.9000	0.6835	131.6719	10.4924	10.4924	31.45	37.13	1.18
7	1	1	3	9.5400	17.2231	200	0.6000	0.4366	137.4125	6.9949	6.9949	20.96	25.00	1.19
11	1	1	3	8.3200	3.5472	100	0.3000	0.2798	107.2202	4.5984	4.5984	12.02	11.68	0.97



รูปที่ 5.13 วงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงอันดับสองกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11

จากตารางที่ 5.49 จะเห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 เข้าที่บัส 3 ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 3 ลดลงเหลือ 0.2758 เท่าซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

จะเห็นได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุในตารางที่ 5.50 มีค่าใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในตารางที่ 5.47 และจะเห็นว่าค่า I_{c1}/I_{cr} ของแต่ละตัวกรองมีค่าน้อยกว่า 1.3 เท่า ซึ่งไม่เกิดภาวะโหลดเกินของตัวเก็บประจุ

จากการออกแบบพบว่าในระดับแรงดัน 13.8 kV สามารถใช้ตัวเก็บประจุชนิดสามเฟสเพียงหนึ่งตัวในการออกแบบได้ โดยภายในตัวเก็บประจุจะต่อเป็นแบบเดลต้า ซึ่งการออกแบบตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 5 และ 7 จะเหมือนกับกรณีที่ 5.2.1 การออกแบบตัวกรองผ่านสูงอันดับสองกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยใช้ตัวเก็บประจุแบบสามเฟสสามารถทำได้ดังนี้

การออกแบบตัวกรองผ่านสูงอันดับสองกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยใช้ตัวเก็บประจุสามเฟส

จากสมการที่ 2.12

$$Q_{cr} = Q_{f_{comp}} \left(\frac{V_{cr}}{V_S} \right)^2 \left(\frac{h^2 - 1}{h^2} \right)$$

จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 5.41 เลือกใช้ตัวเก็บประจุสามเฟสที่มีแรงดันพิกัด 14.4 kV ในการออกแบบ จะได้

$$Q_{cr} = 0.28 \times \left(\frac{14.4}{13.8} \right)^2 \times \left(\frac{10.9^2 - 1}{10.9^2} \right) = 0.3023 \text{ MVar}$$

จากตารางที่ 3.1 เลือกตัวเก็บประจุสามเฟสที่มีพิกัด 14.4 kV 300 kVar จะได้ค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 4.61 μF ต่อเฟส และ จากสมการที่ 2.7

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{100}{\%X_L}}$$

สามารถหาค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำได้ เท่ากับ 5.812 โอห์ม จะได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 18.49 mH จากสมการที่ 2.3 และตารางที่ 5.47

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

สามารถหาค่าความต้านทานได้ เท่ากับ 126.693 โอห์ม

การออกแบบตัวเก็บประจุด้วยมือนี้ไม่สามารถตรวจสอบภาวะโหลดเกินและหาค่ากำลังสูญเสียของตัวเก็บประจุได้

เมื่อออกแบบชุดตัวเก็บประจุเสร็จสิ้น จากนั้นทดลองนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบตัวเก็บประจุ (ตารางที่ 5.50) ใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองเพื่อทดสอบหาค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุนั้นจะทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด ผลลัพธ์การทดลองแสดงในตารางที่ 5.51

ตารางที่ 5.52 แสดงค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิกทั้งหมด โดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าในตารางที่ 5.50 เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง

ตารางที่ 5.51 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.2.2)

Bus	%THDv		
	Filter Design	Capacitor Design	ER G5/4
1	0.7018	0.8635	3
2	0.7235	0.8901	3
3	1.1022	1.3561	4
4	1.0987	1.3518	4
5	1.0260	1.2666	4
6	1.1014	1.3550	4
7	0.9119	1.1253	4
8	0.9185	1.1382	4
9	1.1015	1.3552	4
10	0.9789	1.2112	4
11	1.0659	1.3133	4
12	1.1004	1.3540	4
13	0.9369	1.1606	4

ตารางที่ 5.52 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.2.2)

H order	Loss (W)		
	Unit1	Unit2	Unit 3
Fund	773.02	531.32	35.22
5	658.68	5.92	3.23
7	1.87	511.01	11.03
11	0.09	0.42	33.9
13	0.02	0.07	11.03
17	0	0	0.72
19	0	0	0.24
23	0	0	0.07
25	0	0	0.03
29	0	0	0.03
31	0	0	0.01
35	0	0	0.01
37	0	0	0.01
รวม	1,433.67	1,048.75	95.51

5.2.3. ใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองแบบผ่านสูงอันดับสามในการกรองฮาร์มอนิก

กรณีนี้จะใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยว (ST) จำนวนสองชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 กับ 7 และใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงอันดับสาม (3HP) จำนวนหนึ่งชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยทำการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟให้กับแต่ละตัวกรองเหมือนกับกรณีที่ 5.2.1 ผลลัพธ์ของค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.53 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโฟลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 3 แสดงในตารางที่ 5.54 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโฟลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 3 แสดงในตารางที่ 5.55 ผลลัพธ์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.56-5.57 และรูปที่ 5.14 แสดงตัวอย่างวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงอันดับสามกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11

ตารางที่ 5.53 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.2.3)

Type	h	MVar	Tp (Hz)	Qf	C1(uF)	VC1(kV)	C2(uF)	VC2(kV)	L(mH)	R(ohm)
ST	5	0.65	245	60	10.412	14.4	-	-	40.53	1.040
ST	7	0.42	345	40	6.873	14.1	-	-	30.966	1.678
3HP	11	0.28	545	2	4.64	13.92	4.64	0.116	18.378	125.865

ตารางที่ 5.54 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโฟลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 3 (กรณี 5.2.3)

Bus	Nominal V (kV)	V _{mag} (p.u.)	θ (deg)	P _{load} (MW)	Q _{load} (MVar)	P _{gen} (MW)	Q _{gen} (MVar)
1:UTIL-69	69	1	0	0	0	7.37	0.52
2:69-1	69	0.9988	-0.1209	0	0	0	0
3:MILL-1	13.8	0.9946	-2.3725	2.24	2	0	6.3
4:GEN1	13.8	0.9950	-2.3600	0	0	2	1.57
5:Aux	0.48	0.9702	-3.5049	0.6	0.53	0	0
6:FDR F	13.8	0.9943	-2.3747	0	0	0	0
7:RECT	0.48	0.9760	-4.6851	1.15	0.29	0	0
8:T3 SEC	4.16	0.9462	-4.8321	1.31	1.13	0	0
9:FDR G	13.8	0.9943	-2.3710	0	0	0	0
10:T11 SEC	0.48	0.9574	-3.9375	0.81	0.8	0	0
11:T4 SEC	0.48	0.9796	-3.0508	0.37	0.33	0	0
12:FDR H	13.8	0.9940	-2.3700	0	0	0	0
13:T7 SEC	2.4	0.9512	-4.6663	2.8	2.5	0	0

ตารางที่ 5.55 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโวลต์เมื่อติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกจำนวน 3 ชุดที่บัส 3 (กรณี 5.2.3)

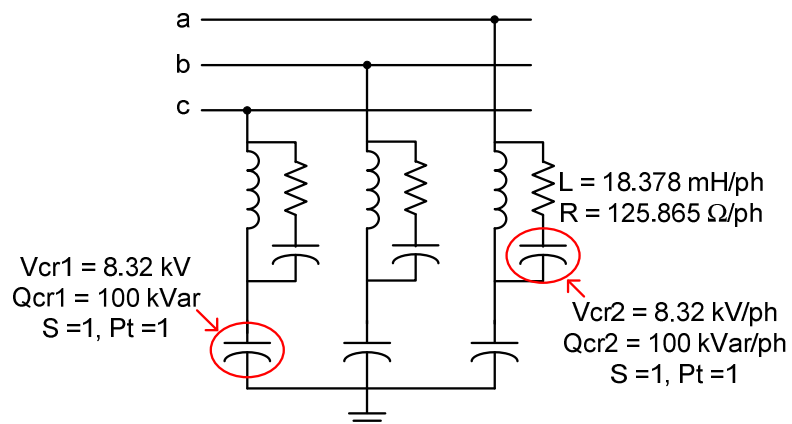
Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	69	1	0	0.0054	151.2454	0.0033	16.6556	0.0028	46.2959	0.0016	-76.7478	0.7108	3	0.2369
2	69	0.9988	-0.1209	0.0055	151.1072	0.0034	16.5569	0.0029	46.2331	0.0016	-76.801	0.7327	3	0.2442
3	13.8	0.9946	-2.3725	0.0084	151.1199	0.0051	16.566	0.0044	46.2389	0.0024	-76.7961	1.1163	4	0.2791
4	13.8	0.995	-2.36	0.0084	151.0657	0.0051	16.4848	0.0044	46.1169	0.0024	-76.9328	1.1127	4	0.2782
5	0.48	0.9702	-3.5049	0.0078	139.6698	0.0047	0.6699	0.0038	22.0728	0.002	-104.7447	1.0380	4	0.2595
6	13.8	0.9943	-2.3747	0.0084	151.0811	0.0051	16.5131	0.0044	46.1695	0.0024	-76.8696	1.1154	4	0.2789
7	0.48	0.976	-4.6851	0.007	140.5015	0.0042	1.6728	0.0034	23.3988	0.0018	-103.2903	0.9226	4	0.2306
8	4.16	0.9462	-4.8321	0.007	129.6088	0.004	-12.3972	0.003	5.1667	0.0015	-122.6549	0.9274	4	0.2318
9	13.8	0.9943	-2.371	0.0084	151.0745	0.0051	16.5056	0.0044	46.1605	0.0024	-76.8788	1.1156	4	0.2789
10	0.48	0.9574	-3.9375	0.0075	134.107	0.0044	-6.6879	0.0034	12.1575	0.0018	-115.4521	0.9892	4	0.2473
11	0.48	0.9796	-3.0508	0.0081	144.1311	0.0049	6.8026	0.0041	31.1111	0.0023	-94.5032	1.0790	4	0.2697
12	13.8	0.994	-2.37	0.0084	151.0146	0.0051	16.4276	0.0044	46.0632	0.0024	-76.9804	1.1145	4	0.2786
13	2.4	0.9512	-4.6663	0.0072	130.7663	0.0041	-10.9289	0.0031	6.9188	0.0016	-120.8758	0.9462	4	0.2365

ตารางที่ 5.56 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.2.3)

h order	S	Pt	Total cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	Icr(A)	Ic1_rms(A)	Ic1/Icr
5	1	1	3	9.5400	14.7484	300	0.9000	0.6835	131.6719	10.4924	10.4924	31.45	37.13	1.18
7	1	1	3	9.5400	17.2231	200	0.6000	0.4366	137.4125	6.9949	6.9949	20.96	25.00	1.19
11	1	1	3	8.3200	3.5398	100	0.3000	0.2798	107.2048	4.5984	4.5984	12.02	11.68	0.97

ตารางที่ 5.57 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุ (C2) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.2.3)

h order	S	Pt	Total cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	Icr(A)	Ic2_rms(A)	Ic2/Icr
11	1	1	3	8.3200	12,323	100	0.3000	0.000019	1.5433×10^6	4.5984	4.5984	12.02	0.71	0.06



รูปที่ 5.14 วงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงอันดับสามกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11

จากตารางที่ 5.55 จะเห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 เข้าที่บัส 3 ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 3 ลดลงเหลือ 0.2789 เท่าซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

จะเห็นได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุในตารางที่ 5.56 และ 5.57 มีค่าใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในตารางที่ 5.53 และจะเห็นว่าค่า I_{c1}/I_{cr} ของแต่ละตัวกรองมีค่าน้อยกว่า 1.3 เท่า ซึ่งไม่เกิดภาวะโหลดเกินของตัวเก็บประจุ

จากการออกแบบพบว่าในระดับแรงดัน 13.8 kV สามารถใช้ตัวเก็บประจุชนิดสามเฟสเพียงหนึ่งตัวในการออกแบบได้ โดยภายในตัวเก็บประจุจะต่อเป็นแบบเดลต้า ซึ่งการออกแบบตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 5 และ 7 จะเหมือนกับกรณีที่ 5.2.1 การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงอันดับสามโดยใช้ตัวเก็บประจุสามเฟสสามารถทำได้ดังนี้

การออกแบบตัวกรองผ่านสูงอันดับสามกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยใช้ตัวเก็บประจุสามเฟส

จากสมการที่ 2.37

$$Q_{cr} = Q_{f_{comp}} \left(\frac{V_{cr}}{V_S} \right)^2 \left(\frac{h^2 - 2}{h^2 - 1} \right)$$

จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 5.53 เลือกใช้ตัวเก็บประจุสามเฟสที่มีแรงดันพิกัด 14.4 kV ในการออกแบบ จะได้

$$Q_{cr} = 0.28 \times \left(\frac{14.4}{13.8} \right)^2 \times \left(\frac{10.9^2 - 2}{10.9^2 - 1} \right) = 0.3023 \text{ MVar}$$

จากตารางที่ 3.1 เลือกตัวเก็บประจุสามเฟสที่มีแรงดันพิกัด 14.4 kV 300 kVar จะได้ค่าความจุไฟฟ้า (C1) เท่ากับ 4.61 μF ต่อเฟส

จากสมการที่ 2.38 เลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดหนึ่งเฟสที่มีพิกัด 4.16 kV 50 kVar จะได้ค่าความจุไฟฟ้า (C2) เท่ากับ 9.19 μF ต่อเฟส ทำการอนุกรมกันสองตัว

$$Q_{cr,c2} = \frac{V_{cr,c2}^2}{X_{c2}}$$

$$C = \frac{Q_{cr,c2}}{V_{cr,c2}^2 \times 2\pi f} = \frac{50 \text{ kVar}}{(4.16 \text{ kV})^2 \times 100\pi \times 2} = 4.598 \mu\text{F}$$

จากสมการที่ 2.7

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{100}{\%X_L}}$$

สามารถหาค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำได้ เท่ากับ 5.812 โอห์ม จะได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 18.499 mH จากสมการที่ 2.22 และตารางที่ 5.53

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

สามารถหาค่าความต้านทานได้ เท่ากับ 126.693 โอห์ม

การออกแบบตัวเก็บประจุด้วยมือนี้ไม่สามารถตรวจสอบภาวะไหลดเกินและหาค่ากำลังสูญเสียของตัวเก็บประจุได้

เมื่อออกแบบตัวเก็บประจุเสร็จสิ้น จากนั้นทดลองนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบตัวเก็บประจุ (ตารางที่ 5.56-5.57) ใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองเพื่อทดสอบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจื่อยังคงทำให้ค่าความผิดพลาดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด ผลลัพธ์การทดลองแสดงในตารางที่ 5.58

ตารางที่ 5.59 แสดงค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิกทั้งหมด โดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าในตารางที่ 5.56 และ 5.57 เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง

ตารางที่ 5.58 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.2.3)

Bus	%THDv		
	Filter Design	Capacitor Design	ER G5/4
1	0.7108	0.8720	3
2	0.7327	0.8989	3
3	1.1163	1.3695	4
4	1.1127	1.3651	4
5	1.0380	1.2780	4
6	1.1154	1.3684	4
7	0.9226	1.1356	4
8	0.9274	1.1469	4
9	1.1156	1.3686	4
10	0.9892	1.2213	4
11	1.0790	1.3258	4
12	1.1145	1.3673	4
13	0.9462	1.1697	4

ตารางที่ 5.59 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.2.3)

H order	Loss (W)		
	Unit1	Unit2	Unit 3
Fund	773.02	531.32	1.15
5	658.68	5.92	2.11
7	1,87	511.01	13.49
11	0.01	0.48	38.35
13	0.02	0.07	7.59
17	0	0	0.53
19	0	0	0.19
23	0	0	0.06
25	0	0	0.02
29	0	0	0.02
31	0	0	0.01
35	0	0	0.01
37	0	0	0.01
รวม	1,433.69	1,048.81	63.54

5.2.4. ใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองแบบผ่านสูงชนิดซีในการกรองฮาร์มอนิก

กรณีนี้จะใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยว (ST) จำนวนสองชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 กับ 7 และใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงชนิดซี (CT) จำนวนหนึ่งชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟให้กับแต่ละตัวกรองเหมือนกรณี 5.2.1 ผลลัพธ์ของค่าพารามิเตอร์ของตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.60 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโฟลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 3 แสดงในตารางที่ 5.61 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโฟลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 3 แสดงในตารางที่ 5.62 ผลลัพธ์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.63-5.64 และรูปที่ 5.15 แสดงตัวอย่างวงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงชนิดซีกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11

ตารางที่ 5.60 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.2.4)

Type	h	MVar	TP (Hz)	Qf	C1(uF)	VC1(kV)	C2(uF)	VC2(kV)	L(mH)	R(ohm)
ST	5	0.65	245	60	10.412	14.4	-	-	40.53	1.040
ST	7	0.42	345	40	6.873	14.1	-	-	30.966	1.678
CT	11	0.28	545	2	4.68	13.8	551.356	0.117	18.377	125.856

ตารางที่ 5.61 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโฟลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 3 (กรณี 5.2.4)

Bus	Nominal V (kV)	V_{mag} (p.u.)	θ (deg)	P_{load} (MW)	Q_{load} (MVar)	P_{gen} (MW)	Q_{gen} (MVar)
1:UTIL-69	69	1	0	0	0	7.37	0.52
2:69-1	69	0.9988	-0.1209	0	0	0	0
3:MILL-1	13.8	0.9946	-2.3725	2.24	2	0	6.3
4:GEN1	13.8	0.9950	-2.3600	0	0	2	1.57
5:Aux	0.48	0.9702	-3.5049	0.6	0.53	0	0
6:FDR F	13.8	0.9943	-2.3747	0	0	0	0
7:RECT	0.48	0.9760	-4.6851	1.15	0.29	0	0
8:T3 SEC	4.16	0.9462	-4.8321	1.31	1.13	0	0
9:FDR G	13.8	0.9943	-2.3710	0	0	0	0
10:T11 SEC	0.48	0.9574	-3.9375	0.81	0.8	0	0
11:T4 SEC	0.48	0.9796	-3.0508	0.37	0.33	0	0
12:FDR H	13.8	0.9940	-2.3700	0	0	0	0
13:T7 SEC	2.4	0.9512	-4.6663	2.8	2.5	0	0

ตารางที่ 5.62 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโวลต์เมื่อติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกจำนวน 3 ชุดที่บัส 3 (กรณี 5.2.4)

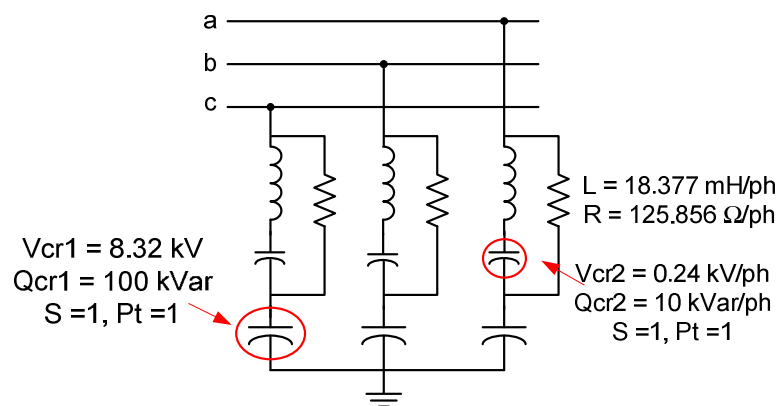
Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	69	1	0	0.0054	151.2644	0.0033	17.0366	0.0026	45.3442	0.0015	-74.9197	0.7018	3	0.2339
2	69	0.9988	-0.1209	0.0055	151.1262	0.0034	16.9379	0.0027	45.2814	0.0016	-74.9729	0.7235	3	0.2412
3	13.8	0.9946	-2.3725	0.0084	151.139	0.0051	16.947	0.0041	45.2872	0.0024	-74.968	1.1023	4	0.2756
4	13.8	0.995	-2.36	0.0084	151.0847	0.0051	16.8658	0.0041	45.1651	0.0024	-75.1048	1.0987	4	0.2747
5	0.48	0.9702	-3.5049	0.0078	139.6889	0.0047	1.0509	0.0035	21.1211	0.002	-102.9167	1.0261	4	0.2565
6	13.8	0.9943	-2.3747	0.0084	151.1001	0.0051	16.8941	0.0041	45.2178	0.0024	-75.0415	1.1014	4	0.2753
7	0.48	0.976	-4.6851	0.0069	140.5205	0.0042	2.0537	0.0031	22.447	0.0018	-101.4622	0.9119	4	0.2280
8	4.16	0.9462	-4.8321	0.007	129.6279	0.004	-12.0162	0.0028	4.2149	0.0015	-120.8268	0.9186	4	0.2296
9	13.8	0.9943	-2.371	0.0084	151.0936	0.0051	16.8866	0.0041	45.2087	0.0024	-75.0507	1.1015	4	0.2754
10	0.48	0.9574	-3.9375	0.0075	134.126	0.0044	-6.307	0.0031	11.2057	0.0017	-113.6241	0.9789	4	0.2447
11	0.48	0.9796	-3.0508	0.0081	144.1501	0.0049	7.1836	0.0038	30.1593	0.0022	-92.6751	1.0659	4	0.2665
12	13.8	0.994	-2.37	0.0084	151.0337	0.0051	16.8086	0.0041	45.1114	0.0024	-75.1523	1.1005	4	0.2751
13	2.4	0.9512	-4.6663	0.0072	130.7853	0.0041	-10.5479	0.0029	5.9671	0.0016	-119.0477	0.9370	4	0.2342

ตารางที่ 5.63 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.2.4)

h order	S	Pt	Total cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	Icr(A)	Ic1_rms(A)	Ic1/Icr
5	1	1	3	9.5400	14.7484	300	0.9000	0.6835	131.6719	10.4924	10.4924	31.45	37.13	1.18
7	1	1	3	9.5400	17.2231	200	0.6000	0.4366	137.4125	6.9949	6.9949	20.96	25.00	1.19
11	1	1	3	8.3200	4.4251	100	0.3000	0.2751	109.0460	4.5984	4.5984	12.02	11.58	0.96

ตารางที่ 5.64 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุ (C2) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.2.4)

h order	S	Pt	Total cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	Icr(A)	Ic2_rms(A)	Ic2/Icr
11	1	1	3	0.2400	255	10	0.030	0.002376	1,262	552.6213	552.6213	41.67	11.56	0.28



รูปที่ 5.15 วงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงชนิดซีกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11

จากตารางที่ 5.62 จะเห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 เข้าที่บัส 3 ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 3 ลดลงเหลือ 0.2757 เท่าซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

จะเห็นได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุในตารางที่ 5.63 และ 5.64 มีค่าใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในตารางที่ 5.60 และจะเห็นว่าค่า I_{c1}/I_{cr} ของแต่ละตัวกรองมีค่าน้อยกว่า 1.3 เท่า ซึ่งไม่เกิดภาวะไหลเกินของตัวเก็บประจุ

จากการออกแบบพบว่าในระดับแรงดัน 13.8 kV สามารถใช้ตัวเก็บประจุชนิดสามเฟสเพียงหนึ่งตัวในการออกแบบได้ โดยภายในตัวเก็บประจุจะต่อเป็นแบบเดลต้า ซึ่งการออกแบบตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 5 และ 7 จะเหมือนกับกรณีที่ 5.2.1 การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกผ่านสูงชนิดซีโดยใช้ตัวเก็บประจุสามเฟสสามารถทำได้ดังนี้

การออกแบบตัวกรองผ่านสูงชนิดซีกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยใช้ตัวเก็บประจุสามเฟส

จากสมการที่ 2.45

$$Q_{cr} = Q_{f_{comp}} \left(\frac{V_{cr,c1}}{V_S} \right)^2$$

จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 5.60 เลือกใช้ตัวเก็บประจุสามเฟสที่มีแรงดันพิกัด 14.4 kV ในการออกแบบ จะได้

$$Q_{cr} = 0.28 \times \left(\frac{14.4}{13.8} \right)^2 = 0.3049 \text{ MVar}$$

จากตารางที่ 3.1 เลือกตัวเก็บประจุสามเฟสที่มีแรงดันพิกัด 14.4 kV 300 kVar จะได้ค่าความจุไฟฟ้า (C1) เท่ากับ 4.61 μF ต่อเฟส

จากสมการที่ 2.11 จะได้ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจรรวม (C1 อนุกรมกับ C2)

$$Q_{f_{comp}} = \frac{V_S^2}{X_C} \left(\frac{h^2}{h^2 - 1} \right)$$

$$X_C = \frac{14.4^2}{0.28} \times \left(\frac{10.9^2}{10.9^2 - 1} \right) = 746.858 \Omega$$

จะได้ค่าความจุไฟฟ้ารวมเท่ากับ 4.26 μF และจากสมการที่ 2.40 จะได้ค่าความจุไฟฟ้า (C2) เท่ากับ 56.11 μF จากสมการที่ 2.46 และตารางที่ 5.60 เลือกใช้ตัวเก็บประจุชนิดหนึ่งเฟสที่มีพิกัด 2.4 kV 100 kVar จะได้ค่าความจุไฟฟ้า (C2) เท่ากับ 55.262 μF ต่อเฟส

$$Q_{cr,c2} = \frac{V_{cr,c2}^2}{X_{c2}}$$

$$C_2 = \frac{Q_{cr,c2}}{V_{cr,c2}^2 \times 2\pi f} = \frac{100kVar}{(2.4kV)^2 \times 100\pi} = 55.262\mu F$$

จากสมการที่ 2.7 ค่า X_C คือค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุรวม (C1อนุกรมกับ C2) ซึ่งจะมีค่าความจุเท่ากับ 4.255 μF

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{100}{\%X_L}}$$

สามารถหาค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำได้ เท่ากับ 6.296 โอห์ม จะได้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 20.04 mH จากสมการที่ 2.22 และตารางที่ 5.60

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

สามารถหาค่าความต้านทานได้ เท่ากับ 137.26 โอห์ม

การออกแบบตัวเก็บประจุด้วยมือนี้ไม่สามารถตรวจสอบภาวะไหลเกินและหาค่ากำลังสูญเสียของตัวเก็บประจุได้

เมื่อออกแบบชุดตัวเก็บประจุเสร็จสิ้น จากนั้นทดลองนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบตัวเก็บประจุ (ตารางที่ 5.63-5.64) ใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองเพื่อทดสอบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจื่อยังคงทำให้ค่าความผิดพลาดรวมของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด ผลลัพธ์การทดลองแสดงในตารางที่ 5.65

ตารางที่ 5.66 แสดงค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิกทั้งหมด โดยใช้ค่าความจุไฟฟ้าในตารางที่ 5.63 และ 5.64 เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง

ตารางที่ 5.65 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.2.4)

Bus	%THDv		
	Filter Design	Capacitor Design	ER G5/4
1	0.7018	0.8633	3
2	0.7235	0.8899	3
3	1.1023	1.3558	4
4	1.0987	1.3515	4
5	1.0261	1.2663	4
6	1.1014	1.3547	4
7	0.9119	1.1251	4
8	0.9186	1.1380	4
9	1.1015	1.3549	4
10	0.9789	1.2110	4
11	1.0659	1.3130	4
12	1.1005	1.3536	4
13	0.9370	1.1603	4

ตารางที่ 5.66 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.2.4)

H order	Loss (W)		
	Unit1	Unit2	Unit 3
Fund	773.02	531.32	0
5	658.68	5.92	2.94
7	1.87	511.01	10.45
11	0.09	0.42	33.91
13	0.02	0.07	11.13
17	0	0	0.72
19	0	0	0.24
23	0	0	0.07
25	0	0	0.03
29	0	0	0.03
31	0	0	0.01
35	0	0	0.01
37	0	0	0.01
รวม	1,433.67	1,048.75	59.54

ตารางที่ 5.67 และ 5.68 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันในกรณี 5.2.1-5.2.4 และผลการเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียของแต่ละตัวกรองฮาร์มอนิก

ตารางที่ 5.67 ผลการเปรียบเทียบค่า %THDV ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.2)

Bus	%THDV			
	5.2.1 (ST)	5.2.2 (ST+2HP)	5.2.3 (ST+3HP)	5.2.4 (ST+CT)
1	0.6707	0.7018	0.7108	0.7018
2	0.6914	0.7235	0.7327	0.7235
3	1.0534	1.1022	1.1163	1.1023
4	1.0500	1.0987	1.1127	1.0987
5	0.9847	1.0260	1.0380	1.0261
6	1.0526	1.1014	1.1154	1.1014
7	0.8748	0.9119	0.9226	0.9119
8	0.8885	0.9185	0.9274	0.9186
9	1.0527	1.1015	1.1156	1.1015
10	0.9434	0.9789	0.9892	0.9789
11	1.0203	1.0659	1.0790	1.0659
12	1.0518	1.1004	1.1145	1.1005
13	0.9054	0.9369	0.9462	0.9370

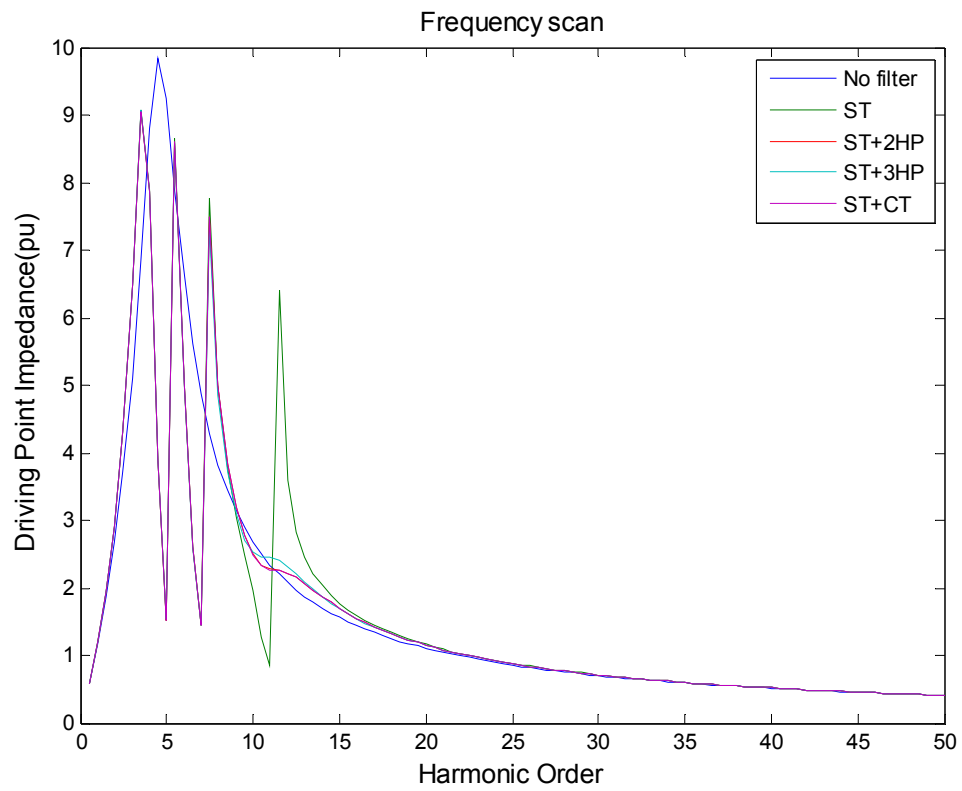
ตารางที่ 5.68 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.2)

Filter Unit	Loss (W) at Fundamental			
	5.2.1 (ST)	5.2.2 (ST+2HP)	5.2.3 (ST+3HP)	5.2.4 (ST+CT)
1	773.02	773.02	773.02	773.02
2	531.32	531.32	531.32	531.32
3	139.76	35.22	1.15	0
Filter Unit	Total Loss (W)			
	5.2.1 (ST)	5.2.2 (ST+2HP)	5.2.3 (ST+3HP)	5.2.4 (ST+CT)
1	1,433.65	1,433.67	1,433.69	1,433.67
2	1,061.75	1,048.75	1,048.81	1,048.75
3	198.9	95.51	63.54	59.54

จากตารางที่ 5.67 จะเห็นว่าการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวชนิดเดียวในการกรองฮาร์มอนิกสามารถกรองฮาร์มอนิกได้ดีที่สุด ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันที่บัส 3 มีค่าต่ำสุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ๆ

จากตารางที่ 5.68 จะเห็นว่าการกำลังสูญเสียที่ความถี่หลักมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกผ่านสูงชนิดซีมีค่าน้อยที่สุดเนื่องจากตัวกรองชนิดนี้มีการทำให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมที่ความถี่หลักมูลผ่านตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (C_2) ทำให้มีกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานของตัวกรองน้อยมาก เมื่อพิจารณาค่ากำลังสูญเสียรวมของตัวกรองฮาร์มอนิกจะพบว่าตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวมีค่ากำลังสูญเสียรวมที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับตัวกรองชนิดอื่น ๆ กรณีของค่ากำลังสูญเสียรวมของตัวกรองฮาร์มอนิกจะมีความมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองฮาร์มอนิกและอิมพีแดนซ์ของระบบที่ความถี่ต่าง ๆ ที่สูงมากขึ้น โดยในแต่ละความถี่ที่สูงขึ้น ถ้าอิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าน้อยกว่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองฮาร์มอนิกจะทำให้มีกระแสไหลผ่านเข้าตัวกรองฮาร์มอนิกน้อยกว่าที่จะไหลเข้าสู่ระบบทำให้ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองมีค่าน้อย ส่งผลให้ค่ากำลังสูญเสียรวมจะขึ้นอยู่กับค่ากำลังสูญเสียที่ความถี่หลักมูลโดยเฉพาะตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยวจะมีค่าความสูญเสียที่ความถี่หลักมูลมากที่สุดทำให้ค่ากำลังสูญเสียรวมของตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยวมีค่ามากกว่าตัวกรองแบบผ่านสูง

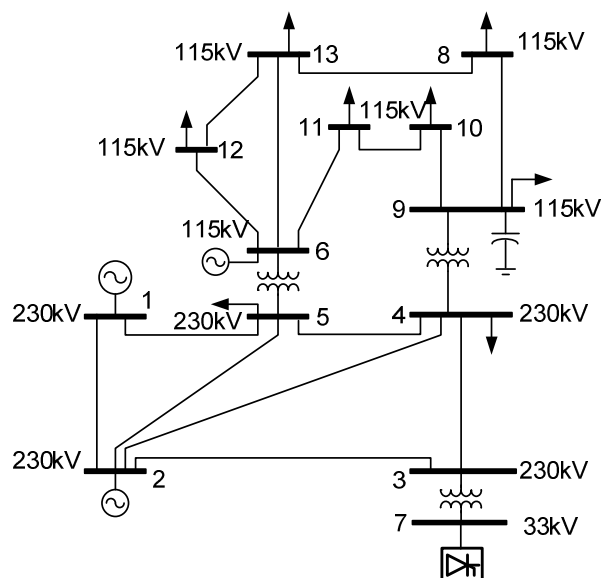
รูปที่ 5.16 แสดงอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของบัสที่ 3 ซึ่งเป็นบัสที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่และมีตัวเก็บประจุต่ออยู่ โดยแต่ละรูปจะเปรียบเทียบทั้งหมด 5 กราฟ คือ 1) กรณีไม่มีตัวกรองฮาร์มอนิก 2) กรณี ST 3) กรณี ST+2HP 4) กรณี ST+3HP และ 5) กรณี ST+CT โดยแต่ละกรณีจะแสดงความแตกต่างด้วยสีของเส้นแต่ละเส้น จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ที่บัส 3 จะมีค่าต่ำมากที่สุดที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 ทำให้กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านเข้าสู่ตัวกรองมากกว่าที่จะไหลเข้าสู่ระบบ



รูปที่ 5.16 อิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของบัสที่ 3 ซึ่งเป็นบัสที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกและตัวเก็บประจุต่ออยู่ (กรณี 5.2)

5.3. ระบบทดสอบ 13 บัส (แรงดันส่ง) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอยู่ที่บัส 7 (33 kV)

กรณีนี้กำหนดให้โหลดที่บัส 7 เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเนื่องจากต้องการให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันที่บัส 7 มีค่าสูง จึงไม่ต้องการให้มีโหลดอื่น ๆ ต่อร่วมที่บัส 7



รูปที่ 5.17 แผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบทดสอบ 13 บัส แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่อที่บัส 7

ผลการคำนวณและวิเคราะห์

การวิเคราะห์และการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบ่งออกเป็น 4 กรณีดังนี้

- 5.3.1 การใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวชนิดเดียวในการกรองฮาร์มอนิก
- 5.3.2 การใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงลำดับสองในการกรองฮาร์มอนิก
- 5.3.3 การใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงลำดับสามในการกรองฮาร์มอนิก
- 5.3.4 การใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงชนิดสี่ในการกรองฮาร์มอนิก

แต่ละกรณีจะมีการวิเคราะห์และออกแบบรวมทั้งสิ้น 4 ส่วนคือ 1. โหลดโพล์ 2. ฮาร์มอนิกโพล์ 3. การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก และ 4. การออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองฮาร์มอนิก

ในส่วนนี้เป็นการวิเคราะห์ระบบกรณีพื้นฐานโดยไม่มีการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกจึงวิเคราะห์เพียง 2 ส่วนคือ โหลดโพลาร์และฮาร์มอนิกโพลาร์เท่านั้น ส่วนหัวข้อ 5.3.1-5.3.4 จะทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 4 ส่วน ผลลัพธ์ของการหาโหลดโพลาร์ (กรณี 5.3) แสดงในตารางที่ 5.69 ส่วนผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์ (กรณี 5.3) แสดงในตารางที่ 5.70

ตารางที่ 5.69 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์ (กรณี 5.3)

Bus	Nominal V (kV)	V_{mag} (p.u.)	θ (deg)	P_{load} (MW)	Q_{load} (MVar)	P_{gen} (MW)	Q_{gen} (MVar)
1	230	1.0600	0	0	0	117.73	5.05
2	230	1.0450	-2.2435	0	0	18.3	16.0
3	230	1.0039	-5.0458	0	0	0	0
4	230	1.0153	-5.1934	27.8	16.9	0	0
5	230	1.0272	-4.8748	7.6	1.6	0	0
6	115	1.0700	-10.3891	0	0	11.2	51.02
7	33	0.9983	-5.5260	30	20	0	0
8	115	0.9917	-13.4273	14.9	5	0	0
9	115	0.9861	-13.1293	29.5	16.6	0	6.16
10	115	0.9924	-12.9026	9	5.8	0	0
11	115	1.0262	-11.7299	3.5	1.8	0	0
12	115	1.0504	-11.4171	6.1	1.6	0	0
13	115	1.0398	-11.5668	13.5	5.8	0	0

ตารางที่ 5.70 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโวลต์ (กรณี 5.3)

Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	230	1.0600	0	0.0368	-160.3805	0.0505	74.9479	0.0250	143.1523	0.0134	29.4163	6.5953	3	2.1984
2	230	1.0450	-2.2435	0.0415	-159.7310	0.0543	76.2227	0.0228	145.0815	0.0108	31.5933	7.0979	3	2.3660
3	230	1.0039	-5.0458	0.0733	-152.5681	0.0769	90.0508	0.0107	-139.9663	0.0103	-178.9730	13.5984	3	4.5328
4	230	1.0153	-5.1934	0.0448	-164.6058	0.0550	69.4589	0.0183	135.7039	0.0069	20.8872	7.4047	3	2.4682
5	230	1.0272	-4.8748	0.0414	-164.7612	0.0532	69.2197	0.0214	136.2639	0.0097	22.2196	7.0822	3	2.3607
6	115	1.0700	-10.3891	0.0190	176.0531	0.0216	41.9105	0.0059	111.0207	0.0026	4.7399	2.7767	3	0.9256
7	33	0.9983	-5.5260	0.0821	-150.5837	0.0836	93.7143	0.0138	-113.4999	0.0154	-174.1805	14.7872	3	4.9291
8	115	0.9917	-13.4273	0.0197	151.8266	0.0233	3.3563	0.0049	27.0473	0.0013	-95.4132	3.1238	3	1.0413
9	115	0.9861	-13.1293	0.0246	154.2816	0.0308	5.7045	0.0079	22.9534	0.0024	-110.3966	4.0847	3	1.3616
10	115	0.9924	-12.9026	0.0229	154.4685	0.0279	6.2273	0.0065	25.8218	0.0018	-104.4925	3.7020	3	1.2340
11	115	1.0262	-11.7299	0.0204	162.8979	0.0234	19.7670	0.0045	62.2968	0.0013	-40.3116	3.0644	3	1.0215
12	115	1.0504	-11.4171	0.0179	169.2976	0.0201	31.6729	0.0049	96.0030	0.0021	-9.0971	2.6269	3	0.8756
13	115	1.0398	-11.5668	0.0180	166.7660	0.0201	27.6275	0.0046	89.1364	0.0019	-13.8983	2.6521	3	0.8840

จากตารางที่ 5.70 จะเห็นว่าบัสที่ 7 มีค่าความผิดพลาดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกสูงกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนดไว้อยู่ 4.9291 เท่า จึงจำเป็นต้องออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกติดตั้งที่บัส 7 เพื่อลดค่าความผิดพลาดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกให้มีค่าต่ำกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนด

โดยที่ค่ากำลังรีแอกทีฟของตัวกรองฮาร์มอนิกทั้งหมดจะใช้ค่าเดียวกันกับค่ากำลังรีแอกทีฟที่ใช้ในการปรับค่า P.F ของบัสที่ 7 ให้เป็น 0.95 เนื่องจากค่า P.F ของบัสที่ 7 เดิมมีค่าเท่ากับ 0.83 ดังนั้นจะได้ค่ากำลังรีแอกทีฟที่จะชดเชยเข้าสู่ระบบเท่ากับ 10 MVar

5.3.1. ใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดียวชนิดเดียวในการกรองฮาร์มอนิก

ในกรณีนี้จะใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดียว (ST) จำนวนสามชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 จึงทำการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟให้กับแต่ละตัวกรองโดยแบ่งตามปริมาณกระแสฮาร์มอนิกดังนี้

ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5

$$Q_{filter,5} = \frac{18.24}{18.24+11.9+5.73} \times 10 = 5.0850 MVar$$

ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7

$$Q_{filter,7} = \frac{11.9}{18.24+11.9+5.73} \times 10 = 3.3175 MVar$$

ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11

$$Q_{filter,11} = \frac{5.73}{18.24+11.9+5.73} \times 10 = 1.5974 MVar$$

จะได้ค่ากำลังรีแอกทีฟสำหรับตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 เท่ากับ 5 MVar สำหรับตัวกรองอันดับที่ 7 เท่ากับ 3.3 MVar สำหรับตัวกรองอันดับที่ 11 เท่ากับ 1.7 MVar ผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.71 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 7 แสดงในตารางที่ 5.72 และผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 7 แสดงในตารางที่ 5.73

ตารางที่ 5.71 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.3.1)

Type	Bus	kV	H	MVar	Tp (Hz)	Qf	C1(uF)	VC1(kV)	L(mH)	R(ohm)
ST	7	33	5	5	240	60	13.98	34.497	31.455	0.791
ST	7	33	7	3.3	340	60	9.437	33.729	23.219	0.827
ST	7	33	11	1.7	540	60	4.926	33.285	17.633	0.997

ตารางที่ 5.72 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 7 (กรณี 5.3.1)

Bus	Nominal V (kV)	V_{mag} (p.u.)	θ (deg)	P_{load} (MW)	Q_{load} (MVar)	P_{gen} (MW)	Q_{gen} (MVar)
1	230	1.0600	0	0	0	117.6	4.16
2	230	1.0450	-2.2417	0	0	18.3	7.16
3	230	1.0152	-5.2041	0	0	0	0
4	230	1.0184	-5.2156	27.8	16.9	0	0
5	230	1.0292	-4.8831	7.6	1.6	0	0
6	115	1.0700	-10.3784	0	0	11.2	49.76
7	33	1.0125	-5.6728	30	20	0	10
8	115	0.9924	-13.4303	14.9	5	0	0
9	115	0.9873	-13.1319	29.5	16.6	0	6.17
10	115	0.9934	-12.9033	9	5.8	0	0
11	115	1.0267	-11.7259	3.5	1.8	0	0
12	115	1.0505	-11.4072	6.1	1.6	0	0
13	115	1.0400	-11.5596	13.5	5.8	0	0

ตารางที่ 5.73 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโวลต์ (กรณี 5.3.1)

Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	230	1.0600	0	0.0094	-158.9488	0.0061	92.4678	0.0059	162.4887	0.0074	32.6145	1.5357	3	0.5119
2	230	1.0450	-2.2415	0.0106	-158.302	0.0065	93.7392	0.0054	164.4116	0.0059	34.7843	1.5336	3	0.5112
3	230	1.0152	-5.2035	0.0186	-151.1605	0.0092	107.5392	0.0025	-120.5851	0.0057	-175.6562	2.8885	3	0.9628
4	230	1.0184	-5.2153	0.0114	-163.1595	0.0066	86.9983	0.0043	155.0765	0.0038	24.1333	1.4456	3	0.4819
5	230	1.0292	-4.8829	0.0105	-163.3179	0.0064	86.754	0.0051	155.6268	0.0054	25.4503	1.4543	3	0.4848
6	115	1.0700	-10.3781	0.0048	177.5003	0.0026	59.4257	0.0014	130.353	0.0014	7.9669	0.5564	3	0.1855
7	33	1.0125	-5.6721	0.0209	-149.1803	0.01	111.1982	0.0033	-94.0252	0.0085	-170.8792	3.2980	3	1.0993
8	115	0.9924	-13.4300	0.005	153.307	0.0028	20.9135	0.0012	46.3498	0.0007	-92.2585	0.5971	3	0.1990
9	115	0.9873	-13.1317	0.0063	155.766	0.0037	23.2684	0.0019	42.2722	0.0013	-107.2209	0.7739	3	0.2580
10	115	0.9934	-12.9030	0.0058	155.9513	0.0034	23.7885	0.0016	45.1333	0.001	-101.3293	0.7028	3	0.2343
11	115	1.0267	-11.7256	0.0052	164.3626	0.0028	37.3006	0.0011	81.564	0.0007	-37.1596	0.5916	3	0.1972
12	115	1.0505	-11.4069	0.0046	170.748	0.0024	49.1894	0.0012	115.3236	0.0011	-5.8717	0.5228	3	0.1743
13	115	1.0400	-11.5594	0.0046	168.2188	0.0024	45.1457	0.0011	108.4444	0.001	-10.6778	0.5250	3	0.1750

จากตารางที่ 5.73 จะเห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 เข้าที่บัส 7 ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 7 ลดลงเหลือ 1.0993 เท่า ซึ่งยังมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด จึงทำการเพิ่มค่ากำลังรีแอกทีฟของตัวกรองโดยใช้ค่าเดียวกันกับค่ากำลังรีแอกทีฟที่ใช้ในการปรับค่า P.F ของบัสที่ 7 ให้เป็น 1 เนื่องจากค่า P.F ของบัสที่ 7 เดิมมีค่าเท่ากับ 0.83 ดังนั้นจะได้ค่ากำลังรีแอกทีฟที่จะชดเชยเข้าสู่ระบบเท่ากับ 20 MVar โดยทำการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟให้กับแต่ละตัวกรองโดยแบ่งตามปริมาณกระแสฮาร์มอนิกดังนี้

ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5

$$Q_{filter,5} = \frac{18.24}{18.24+11.9+5.73} \times 20 = 10.17MVar$$

ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7

$$Q_{filter,7} = \frac{11.9}{18.24+11.9+5.73} \times 20 = 6.6351MVar$$

ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11

$$Q_{filter,11} = \frac{5.73}{18.24+11.9+5.73} \times 20 = 3.1949MVar$$

จะได้ค่ากำลังรีแอกทีฟสำหรับตัวกรองอันดับที่ 5 เท่ากับ 10 MVar สำหรับตัวกรองอันดับที่ 7 เท่ากับ 6.6 MVar และ สำหรับตัวกรองอันดับที่ 11 เท่ากับ 3.4 MVar ซึ่งทั้งสามชุดทำการติดตั้งเข้าที่บัส 7 ผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.74 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 7 แสดงในตารางที่ 5.75 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 7 แสดงในตารางที่ 5.76 ผลลัพธ์การออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.77-5.79 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.80 และรูปที่ 5.18 แสดงตัวอย่างวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยว (a) ชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Split Wye Unequal Leg กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (b) ชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 และ (c) ชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ตามตารางที่ 5.80

ตารางที่ 5.74 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.3.1)

Type	Bus	kV	H	MVar	Tp (Hz)	Qf	C1(uF)	VC1(kV)	L(mH)	R(ohm)
ST	7	33	5	10	240	60	27.961	34.497	15.728	0.395
ST	7	33	7	6.6	340	60	18.874	33.729	11.609	0.413
ST	7	33	11	3.4	540	60	9.853	33.285	8.816	0.499

ตารางที่ 5.75 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดฟลิวเมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 7(กรณี 5.3.1)

Bus	Nominal V (kV)	V_{mag} (p.u.)	θ (deg)	P_{load} (MW)	Q_{load} (MVar)	P_{gen} (MW)	Q_{gen} (MVar)
1	230	1.0600	0	0	0	117.56	3.23
2	230	1.0450	-2.2416	0	0	18.3	-1.90
3	230	1.0268	-5.3692	0	0	0	0
4	230	1.0216	-5.2411	27.8	16.9	0	0
5	230	1.0312	-4.8940	7.6	1.6	0	0
6	115	1.0700	-10.3698	0	0	11.2	48.47
7	33	1.0271	-5.8265	30	20	0	20
8	115	0.9932	-13.4360	14.9	5	0	0
9	115	0.9885	-13.1373	29.5	16.6	0	6.19
10	115	0.9944	-12.9067	9	5.8	0	0
11	115	1.0272	-11.7244	3.5	1.8	0	0
12	115	1.0506	-11.3994	6.1	1.6	0	0
13	115	1.0401	-11.5548	13.5	5.8	0	0

ตารางที่ 5.76 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโวลต์ (กรณี 5.3.1)

Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	230	1.06	0	0.0053	-158.7163	0.0032	93.5905	0.0033	164.9323	0.0051	33.766	0.9367	3	0.3122
2	230	1.045	-2.2416	0.006	-158.0724	0.0034	94.8585	0.003	166.849	0.0041	35.9285	0.9122	3	0.3041
3	230	1.0268	-5.3692	0.0106	-150.9526	0.0048	108.6299	0.0014	-118.0956	0.0039	-174.3838	1.6752	3	0.5584
4	230	1.0216	-5.2411	0.0065	-162.9121	0.0035	88.141	0.0024	157.5571	0.0026	25.3336	0.8172	3	0.2724
5	230	1.0312	-4.894	0.006	-163.0736	0.0034	87.8914	0.0028	158.0976	0.0037	26.6348	0.8424	3	0.2808
6	115	1.07	-10.3698	0.0027	177.7483	0.0014	60.5435	0.0008	132.7927	0.001	9.1478	0.3165	3	0.1055
7	33	1.0271	-5.8265	0.0118	-148.9765	0.0053	112.2843	0.0018	-91.4399	0.0058	-169.6228	1.9374	3	0.6458
8	115	0.9932	-13.436	0.0029	153.5888	0.0015	22.0739	0.0007	48.7589	0.0005	-91.1511	0.3340	3	0.1113
9	115	0.9885	-13.1373	0.0036	156.0516	0.0019	24.4352	0.0011	44.6974	0.0009	-106.0927	0.4337	3	0.1446
10	115	0.9944	-12.9067	0.0033	156.2353	0.0018	24.9527	0.0009	47.5511	0.0007	-100.2136	0.3932	3	0.1311
11	115	1.0272	-11.7244	0.0029	164.6283	0.0015	38.4368	0.0006	83.9371	0.0005	-36.055	0.3314	3	0.1105
12	115	1.0506	-11.3994	0.0026	170.9993	0.0013	50.3084	0.0007	117.7514	0.0008	-4.6926	0.2961	3	0.0987
13	115	1.0402	-11.5548	0.0026	168.4726	0.0013	46.2665	0.0006	110.8593	0.0007	-9.5037	0.2966	3	0.0989

ตารางที่ 5.77 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (กรณี 5.3.1)

Externally Fused : Split Wye Equal Leg											
S	Pa	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
1	3	18	19.9200	0.0158	600	10.8000	10.7966	100.0316	4.8131	28.8785	
Externally Fused : Split Wye Ground Unequal Leg											
S	Pa1	Pa2	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
1	2	3	15	19.9200	0.0158	700	10.5000	10.4967	100.0316	5.6153	28.0763
Externally Fused : Split Wye Unground Unequal Leg											
S	Pa1	Pa2	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
1	4	5	27	19.9200	0.0200	400	10.8000	10.8000	100.0300	3.2087	28.8785
Externally Fused : Single Wye Ground											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
1	5	15	19.9200	0.0158	700	10.5000	10.4967	100.0316	5.6153	28.0763	
2	6	36	9.9600	0.0158	300	10.8000	10.7966	100.0316	9.6262	28.8785	

ตารางที่ 5.77 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (ต่อ) (กรณี 5.3.1)

Externally Fused : Single Wye Unground											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
1	5	15	19.9200	0.0200	700	10.5000	10.5000	100.0300	5.6153	28.0763	
Internally Fused: Split Wye Unequal Leg											
S	Pa1	Pa2	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
2	1	2	18	9.9600	0.0200	600	10.8000	10.8000	100.0300	19.2523	28.8785
3	1	2	27	6.6400	0.0200	400	10.8000	10.8000	100.0300	28.8785	28.8785
Internally Fused: Single Wye											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
2	3	18	9.9600	0.0200	600	10.8000	10.8000	100.0300	19.2523	28.8785	
3	3	27	6.6400	0.0200	400	10.8000	10.8000	100.0300	28.8785	28.8785	

ตารางที่ 5.78 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 (กรณี 5.3.1)

Externally Fused : Split Wye Equal Leg											
S	Pa	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
1	2	12	19.9200	2.2931	600	7.2000	6.8808	104.6389	4.8131	19.2523	
Externally Fused : Split Wye Ground Unequal Leg											
S	Pa1	Pa2	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
1	1	2	9	19.9200	2.2931	800	7.2000	6.8808	104.6389	6.4174	19.2523
Externally Fused : Single Wye Ground											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
1	3	9	19.9200	2.2931	800	7.2000	6.8808	104.6389	6.4174	19.2523	
Externally Fused : Single Wye Unground											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
1	4	12	19.9200	2.2931	600	7.2000	6.8808	104.6389	4.8131	19.2523	

ตารางที่ 5.78 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 (ต่อ) (กรณี 5.3.1)

Internally Fused : Split Wye Equal Leg										
S	Pa	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
2	1	12	9.9600	2.2900	600	7.2000	6.8800	104.6400	19.2523	19.2523
3	1	18	6.6400	2.2900	400	7.2000	6.8800	104.6400	28.8785	19.2523
Internally Fused : Single Wye										
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
2	2	12	9.9600	2.2900	600	7.2000	6.8800	104.6400	19.2523	19.2523
3	2	18	6.6400	2.2900	400	7.2000	6.8800	104.6400	28.8785	19.2523

ตารางที่ 5.79 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.3.1)

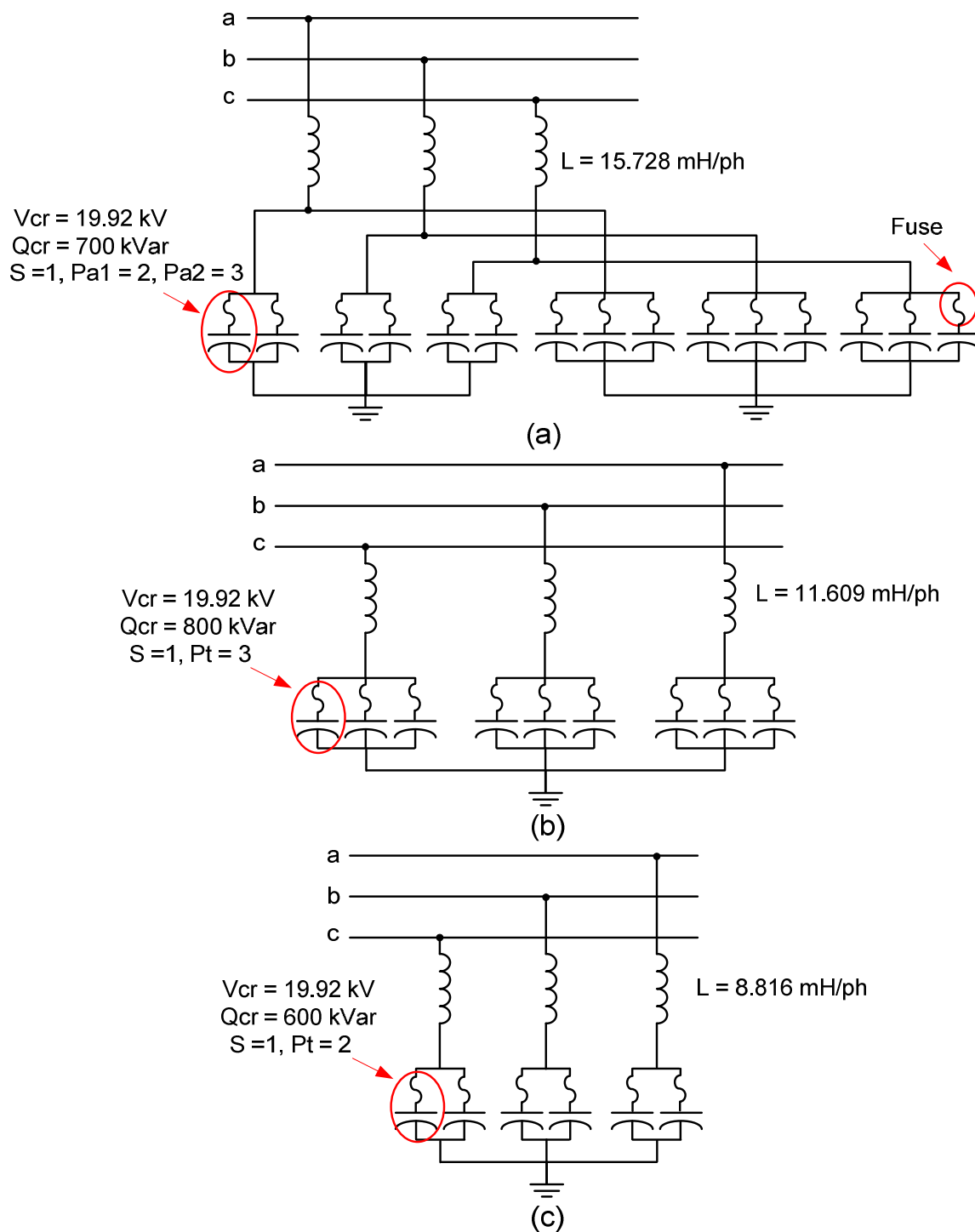
Externally Fused : Split Wye Equal Leg											
S	Pa	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
1	2	12	19.9200	3.6577	300	3.6000	3.3504	107.4491	2.4065	9.6262	
Externally Fused : Split Wye Ground Unequal Leg											
S	Pa1	Pa2	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
1	1	2	9	19.9200	3.6577	400	3.6000	3.3504	107.4491	3.2087	9.6262
Externally Fused : Single Wye Ground											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
1	2	6	19.9200	3.6577	600	3.6000	3.3504	107.4491	4.8131	9.6262	
Externally Fused : Single Wye Unground											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
1	4	12	19.9200	3.6577	300	3.6000	3.3504	107.4491	2.4065	9.6262	

ตารางที่ 5.79 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (ต่อ) (กรณี 5.3.1)

Internally Fused : Single Wye										
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	Δ Vs (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
2	1	6	9.9600	3.6600	600	3.6000	3.3500	107.4500	19.2523	9.6262
3	1	9	6.6400	3.6600	400	3.6000	3.3500	107.4500	28.8785	9.6262

ตารางที่ 5.80 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง (กรณี 5.3.1)

Filter Unit	Type of Capacitor Connection	Total Capacitance (uF)	C (Filter Design , uF)	Icr(A)	Ic1_rms(A)	Ic1/Icr
1 (C1)	Ext : Split Wye Ground Unequal Leg	28.0763	27.961	35.14	42.74	1.22
2 (C1)	Ext : Single Wye Ground	19.2523	18.874	40.16	46.18	1.15
3 (C1)	Ext : Single Wye Ground	9.6262	9.853	30.12	34.67	1.15



รูปที่ 5.18 วงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยว (a) ชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Split Wye Unequal Leg กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (b) ชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกที่ 7 และ (c) ชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกที่ 11

จากตารางที่ 5.76 จะเห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 เข้าที่บัส 7 ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 7 ลดลงเหลือ 0.6458 เท่าซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

จากตารางที่ 5.77–5.79 จะเห็นว่าสามารถออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับแต่ละตัวกรองฮาร์มอนิกได้หลายแบบ ซึ่งในแต่ละแบบนี้จะได้ค่าความจุไฟฟ้ารวมที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าของตัวกรองฮาร์มอนิกที่ได้ออกแบบไว้ในตารางที่ 5.74

เมื่อออกแบบชุดตัวเก็บประจุเสร็จสิ้น จากนั้นทดลองนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุทดลองใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองเพื่อทดสอบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุยังคงทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด ในการทดลองนี้จะเลือกใช้ชุดตัวเก็บประจุเพียงหนึ่งแบบจากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุในแต่ละตัวกรองเพื่อแสดงผล โดยหลักการในการเลือกคือ เลือกชุดตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุไฟฟ้ารวมใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้ออกแบบในตารางที่ 5.74 และชุดตัวเก็บประจุนั้นจะต้องไม่เกิดภาวะไหลดเกินเมื่อติดตั้งเข้าสู่ระบบ ผลลัพธ์การเลือกชุดตัวเก็บประจุแสดงในตารางที่ 5.80 ตารางที่ 5.81 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันกรณีต่าง ๆ และ กำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.82

ตารางที่ 5.81 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.3.1)

Bus	%THDv		
	Filter Design	Capacitor Design	ER G5/4
1	0.9367	0.9409	3
2	0.9122	0.9339	3
3	1.6752	1.7417	3
4	0.8172	0.8616	3
5	0.8424	0.8694	3
6	0.3165	0.3368	3
7	1.9374	2.0040	3
8	0.3340	0.3621	3
9	0.4337	0.4672	3
10	0.3932	0.4253	3
11	0.3314	0.3595	3
12	0.2961	0.3170	3
13	0.2966	0.3186	3

ตารางที่ 5.82 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.3.1)

H order	Loss (W)		
	Unit1	Unit2	Unit 3
Fund	12,876.58	6,055.91	1,775.98
5	5,154.06	104.8	10.18
7	19.03	1,763.59	10.47
11	0.09	0.29	530.79
13	1.51	4.05	52.52
17	0.75	1.72	7.43
19	0.46	1.02	3.65
23	0.26	0.54	1.57
25	0.24	0.5	1.38
29	0.12	0.25	0.64
31	0.15	0.3	0.74
35	0.12	0.24	0.57
37	0.12	0.23	0.54
รวม	18,053.49	7,933.43	2,396.46

5.3.2. ใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองผ่านสูงอันดับสองในการกรองฮาร์มอนิก

กรณีนี้จะใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยว (ST) จำนวนสองชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 ใช้ตัวกรองแบบผ่านสูงอันดับสอง (2HP) จำนวนหนึ่งชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟให้กับแต่ละตัวกรองจะเหมือนกับกรณี 5.3.1 ซึ่งตัวกรองทั้งสามชุดทำการติดตั้งเข้าที่บัส 7 ผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.83 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโฟลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 7 แสดงในตารางที่ 5.84 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโฟลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 7 แสดงในตารางที่ 5.85 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.86 และรูปที่ 5.19 แสดงตัวอย่างวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก

ตารางที่ 5.83 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.3.2)

Type	Bus	kV	h	MVar	Tp (Hz)	Qf	C1(uF)	VC1(kV)	L(mH)	R(ohm)
ST	7	33	5	10	240	60	27.961	34.497	15.728	0.395
ST	7	33	7	6.6	340	60	18.874	33.729	11.609	0.413
2HP	7	33	11	3.4	540	2	9.853	33.285	8.816	59.827

ตารางที่ 5.84 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโฟลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 7 (กรณี 5.3.2)

Bus	Nominal V (kV)	V _{mag} (p.u.)	θ (deg)	P _{load} (MW)	Q _{load} (MVar)	P _{gen} (MW)	Q _{gen} (MVar)
1	230	1.0600	0	0	0	117.6	3.23
2	230	1.0450	-2.2415	0	0	18.3	-1.90
3	230	1.0268	-5.3689	0	0	0	0
4	230	1.0216	-5.2410	27.8	16.9	0	0
5	230	1.0312	-4.8939	7.6	1.6	0	0
6	115	1.0700	-10.3697	0	0	11.2	48.47
7	33	1.0271	-5.8261	30	20	0	20
8	115	0.9932	-13.4358	14.9	5	0	0
9	115	0.9885	-13.1372	29.5	16.6	0	6.19
10	115	0.9944	-12.9066	9	5.8	0	0
11	115	1.0272	-11.7242	3.5	1.8	0	0
12	115	1.0506	-11.3993	6.1	1.6	0	0
13	115	1.0401	-11.5546	13.5	5.8	0	0

ตารางที่ 5.85 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโวลต์ (กรณี 5.3.2)

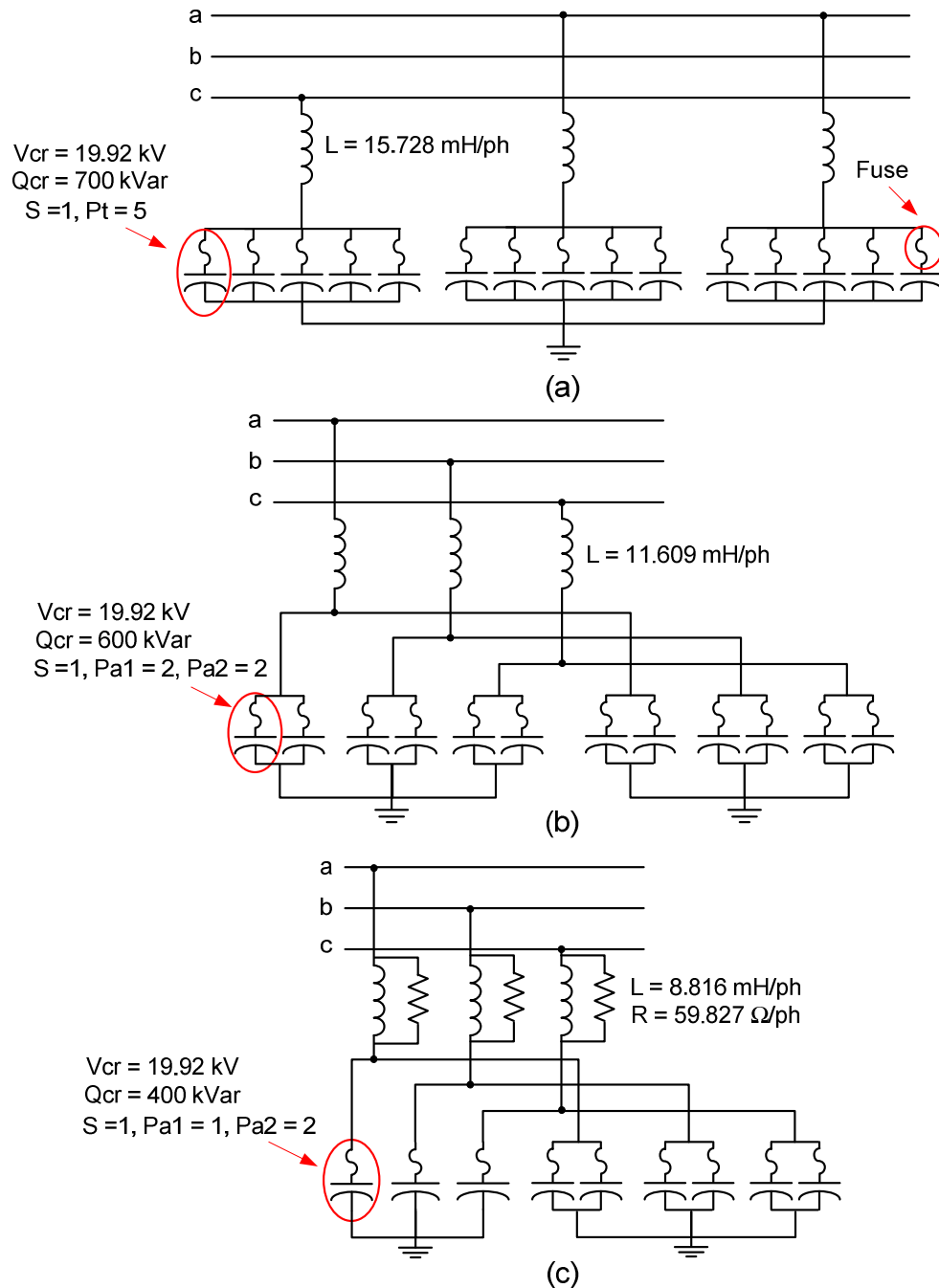
Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	230	1.06	0	0.0053	-158.8127	0.0032	93.2298	0.0157	137.2067	0.0071	9.5075	1.7909	3	0.5970
2	230	1.045	-2.2415	0.006	-158.1688	0.0034	94.4978	0.0143	139.1234	0.0057	11.67	1.6643	3	0.5548
3	230	1.0268	-5.3689	0.0105	-151.049	0.0048	108.2692	0.0067	-145.8212	0.0054	161.3577	1.8089	3	0.6030
4	230	1.0216	-5.241	0.0065	-163.0085	0.0034	87.7803	0.0115	129.8315	0.0037	1.0751	1.3895	3	0.4632
5	230	1.0312	-4.8939	0.006	-163.17	0.0033	87.5307	0.0134	130.372	0.0051	2.3763	1.5647	3	0.5216
6	115	1.07	-10.3697	0.0027	177.6519	0.0014	60.1829	0.0037	105.0671	0.0014	-15.1107	0.4708	3	0.1569
7	33	1.0271	-5.8261	0.0118	-149.073	0.0052	111.9236	0.0086	-119.1655	0.0082	166.1187	2.1679	3	0.7226
8	115	0.9932	-13.4358	0.0028	153.4924	0.0015	21.7132	0.0031	21.0333	0.0007	-115.4096	0.4549	3	0.1516
9	115	0.9885	-13.1372	0.0035	155.9552	0.0019	24.0745	0.005	16.9718	0.0013	-130.3512	0.6631	3	0.2210
10	115	0.9944	-12.9066	0.0033	156.1389	0.0018	24.592	0.0041	19.8255	0.001	-124.4722	0.5667	3	0.1889
11	115	1.0272	-11.7242	0.0029	164.5319	0.0015	38.0761	0.0028	56.2115	0.0007	-60.3135	0.4296	3	0.1432
12	115	1.0506	-11.3993	0.0026	170.9029	0.0013	49.9477	0.0031	90.0258	0.0011	-28.9511	0.4184	3	0.1395
13	115	1.0402	-11.5546	0.0026	168.3762	0.0013	45.9058	0.0029	83.1337	0.001	-33.7622	0.4052	3	0.1351

ตารางที่ 5.86 แสดงผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง (กรณี 5.3.2)

Unit Filter	Type of Capacitor	Total Capacitance (uF)	C (Filter Design , uF)	Icr(A)	Ic1_rms(A)	Ic1/Icr
1 (C1)	Ext : Single Wye Ground (1)	28.0763	27.961	35.14	42.75	1.22
2 (C1)	Ext : Split Wye Equal Leg	19.2523	18.874	30.12	34.57	1.15
3 (C1)	Ext : Split Wye Ground Unequal Leg	9.6262	9.853	20.08	20.84	1.04

* (1) หมายถึงการใช้ผลลัพธ์ในบรรทัดที่ 1

รูปที่ 5.19 แสดงวงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดียวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (b) แบบปรับคลื่นเดียวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Split Wye Equal Leg กรองฮาร์มอนิกที่ 7 และ (c) แบบผ่านสูงอันดับสองโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Split Wye Unequal Leg กรองฮาร์มอนิกที่ 11 ตามตารางที่ 5.86



รูปที่ 5.19 วงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดียวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (b) แบบปรับคลื่นเดียวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Split Wye Equal Leg กรองฮาร์มอนิกที่ 7 และ (c) แบบผ่านสูงอันดับสองโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Split Wye Unequal Leg กรองฮาร์มอนิกที่ 11

จากตารางที่ 5.85 จะเห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 เข้าที่บัส 7 ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 7 ลดลงเหลือ 0.7226 เท่าซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

จากตารางที่ 5.83 จะเห็นว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองมีค่าเหมือนกับพารามิเตอร์ในตารางที่ 5.74 (กรณี 5.3.1) ยกเว้นค่าความต้านทานของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ซึ่งทำให้การออกแบบชุดตัวเก็บประจุสามารถออกแบบได้เหมือนกับตารางที่ 5.77-5.79 จากนั้นทดลองนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุทดลองใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองเพื่อทดสอบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุยังคงทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด โดยในตอนนี้จะทำการเลือกใช้ชุดตัวเก็บประจุเพียงหนึ่งแบบจากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุในแต่ละตัวกรองเพื่อแสดงผล โดยหลักการในการเลือกคือ เลือกชุดตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุไฟฟารวมใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้ออกแบบในตารางที่ 5.83 และชุดตัวเก็บประจุนั้นจะต้องไม่เกิดภาวะโหลดเกินเมื่อติดตั้งเข้าสู่ระบบ ผลลัพธ์การเลือกชุดตัวเก็บประจุแสดงในตารางที่ 5.86 ตารางที่ 5.87 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันกรณีต่าง ๆ และ กำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.88

ตารางที่ 5.87 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.3.2)

Bus	%THDv		
	Filter Design	Capacitor Design	ER G5/4
1	1.7909	1.8402	3
2	1.6643	1.7180	3
3	1.8089	1.8832	3
4	1.3895	1.4478	3
5	1.5647	1.6190	3
6	0.4708	0.4936	3
7	2.1679	2.2468	3
8	0.4549	0.4828	3
9	0.6631	0.6983	3
10	0.5667	0.5993	3
11	0.4296	0.4573	3
12	0.4184	0.4405	3
13	0.4052	0.4280	3

ตารางที่ 5.88 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.3.2)

H order	Loss (W)		
	Unit1	Unit2	Unit 3
Fund	12,876.58	6,055.91	455.77
5	5,154.06	104.8	60.28
7	18.47	1,711.34	98.36
11	5.73	18.46	1,859.73
13	3.21	8.59	1,565.91
17	0.95	2.18	535.00
19	0.54	1.19	332.23
23	0.27	0.56	203.92
25	0.24	0.5	207.14
29	0.12	0.25	132.03
31	0.14	0.27	160.74
35	0.09	0.18	133.64
37	0.07	0.15	119.22
รวม	18,060.47	7,904.38	5,863.96

5.3.3. ใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองผ่านสูงอันดับสามในการกรองฮาร์มอนิก

กรณีนี้จะใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยว (ST) จำนวนสองชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 ใช้ตัวกรองแบบผ่านสูงอันดับสาม (3HP) จำนวนหนึ่งชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟให้กับแต่ละตัวกรองจะเหมือนกับกรณี 5.3.1 ซึ่งทั้งสามชุดทำการติดตั้งเข้าที่บัส 7 ผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.89 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ที่โหลดโฟลว์และฮาร์มอนิกโฟลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 7 แสดงในตารางที่ 5.90 และ 5.91 ตามลำดับ ผลลัพธ์การออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 แสดงในตารางที่ 5.92-5.93 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.94 และรูปที่ 5.20 แสดงตัวอย่างวงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก

ตารางที่ 5.89 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11(กรณี 5.3.3)

Type	h	MVar	TP (Hz)	Qf	C1(uF)	VC1(kV)	C2(uF)	VC2(kV)	L(mH)	R(ohm)
ST	5	10	240	60	27.961	34.497	-	-	15.728	0.395
ST	7	6.6	340	60	18.874	33.729	-	-	11.609	0.413
3HP	11	3.4	540	2	9.852	33.288	9.852	0.283	8.817	59.831

ตารางที่ 5.90 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ที่โหลดโฟลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 7 (กรณี 5.3.3)

Bus	Nominal V (kV)	V _{mag} (p.u.)	θ (deg)	P _{load} (MW)	Q _{load} (MVar)	P _{gen} (MW)	Q _{gen} (MVar)
1	230	1.0600	0	0	0	117.55	3.23
2	230	1.0450	-2.2415	0	0	18.3	-1.91
3	230	1.0268	-5.3688	0	0	0	0
4	230	1.0216	-5.2409	27.8	16.9	0	0
5	230	1.0312	-4.8939	7.6	1.6	0	0
6	115	1.0700	-10.3696	0	0	11.2	48.47
7	33	1.0271	-5.8260	30	20	0	20
8	115	0.9932	-13.4358	14.9	5	0	0
9	115	0.9885	-13.1371	29.5	16.6	0	6.19
10	115	0.9944	-12.9065	9	5.8	0	0
11	115	1.0272	-11.7242	3.5	1.8	0	0
12	115	1.0506	-11.3992	6.1	1.6	0	0
13	115	1.0401	-11.5546	13.5	5.8	0	0

ตารางที่ 5.91 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโวลต์ (กรณี 5.3.3)

Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	230	1.06	0	0.0053	-158.7978	0.0032	92.9727	0.0145	144.3816	0.0071	17.2827	1.7137	3	0.5712
2	230	1.045	-2.2415	0.006	-158.1539	0.0034	94.2407	0.0133	146.2983	0.0057	19.4452	1.5915	3	0.5305
3	230	1.0268	-5.3688	0.0106	-151.0341	0.0048	108.012	0.0062	-138.6463	0.0055	169.133	1.8578	3	0.6193
4	230	1.0216	-5.2409	0.0065	-162.9936	0.0035	87.5231	0.0106	137.0064	0.0037	8.8503	1.3268	3	0.4423
5	230	1.0312	-4.8939	0.006	-163.1551	0.0033	87.2735	0.0124	137.5468	0.0052	10.1515	1.4913	3	0.4971
6	115	1.07	-10.3696	0.0027	177.6668	0.0014	59.9257	0.0034	112.242	0.0014	-7.3355	0.4541	3	0.1514
7	33	1.0271	-5.826	0.0118	-149.0581	0.0052	111.6664	0.008	-111.9906	0.0082	173.8939	2.2189	3	0.7396
8	115	0.9932	-13.4358	0.0029	153.5073	0.0015	21.4561	0.0029	28.2082	0.0007	-107.6343	0.4401	3	0.1467
9	115	0.9885	-13.1371	0.0036	155.9701	0.0019	23.8174	0.0046	24.1467	0.0013	-122.576	0.6360	3	0.2120
10	115	0.9944	-12.9065	0.0033	156.1538	0.0018	24.3348	0.0038	27.0004	0.001	-116.6969	0.5458	3	0.1819
11	115	1.0272	-11.7242	0.0029	164.5468	0.0015	37.819	0.0026	63.3864	0.0007	-52.5382	0.4178	3	0.1393
12	115	1.0506	-11.3992	0.0026	170.9178	0.0013	49.6905	0.0029	97.2007	0.0011	-21.1758	0.4048	3	0.1349
13	115	1.0402	-11.5546	0.0026	168.3911	0.0013	45.6486	0.0026	90.3086	0.001	-25.987	0.3930	3	0.1310

ตารางที่ 5.92 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.3.3)

Externally Fused : Split Wye Equal Leg											
S	Pa	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
1	2	12	19.9200	3.6483	300	3.6000	3.3510	107.4297	2.4065	9.6262	
Externally Fused : Split Wye Ground Unequal Leg											
S	Pa1	Pa2	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
1	1	2	9	19.9200	3.6483	400	3.6000	3.3510	107.4297	3.2087	9.6262
Externally Fused : Single Wye Ground											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
1	2	6	19.9200	3.6483	600	3.6000	3.3510	107.4297	4.8131	9.6262	

ตารางที่ 5.92 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (ต่อ) (กรณี 5.3.3)

Externally Fused : Single Wye Unground										
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
1	4	12	19.9200	3.6483	300	3.6000	3.3510	107.4297	2.4065	9.6262
Internally Fused : Single Wye										
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
2	1	6	9.9600	3.6500	600	3.6000	3.3500	107.4300	19.2523	9.6262
3	1	9	6.6400	3.6500	400	3.6000	3.3500	107.4300	28.8785	9.6262

ตารางที่ 5.93 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C2) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.3.3)

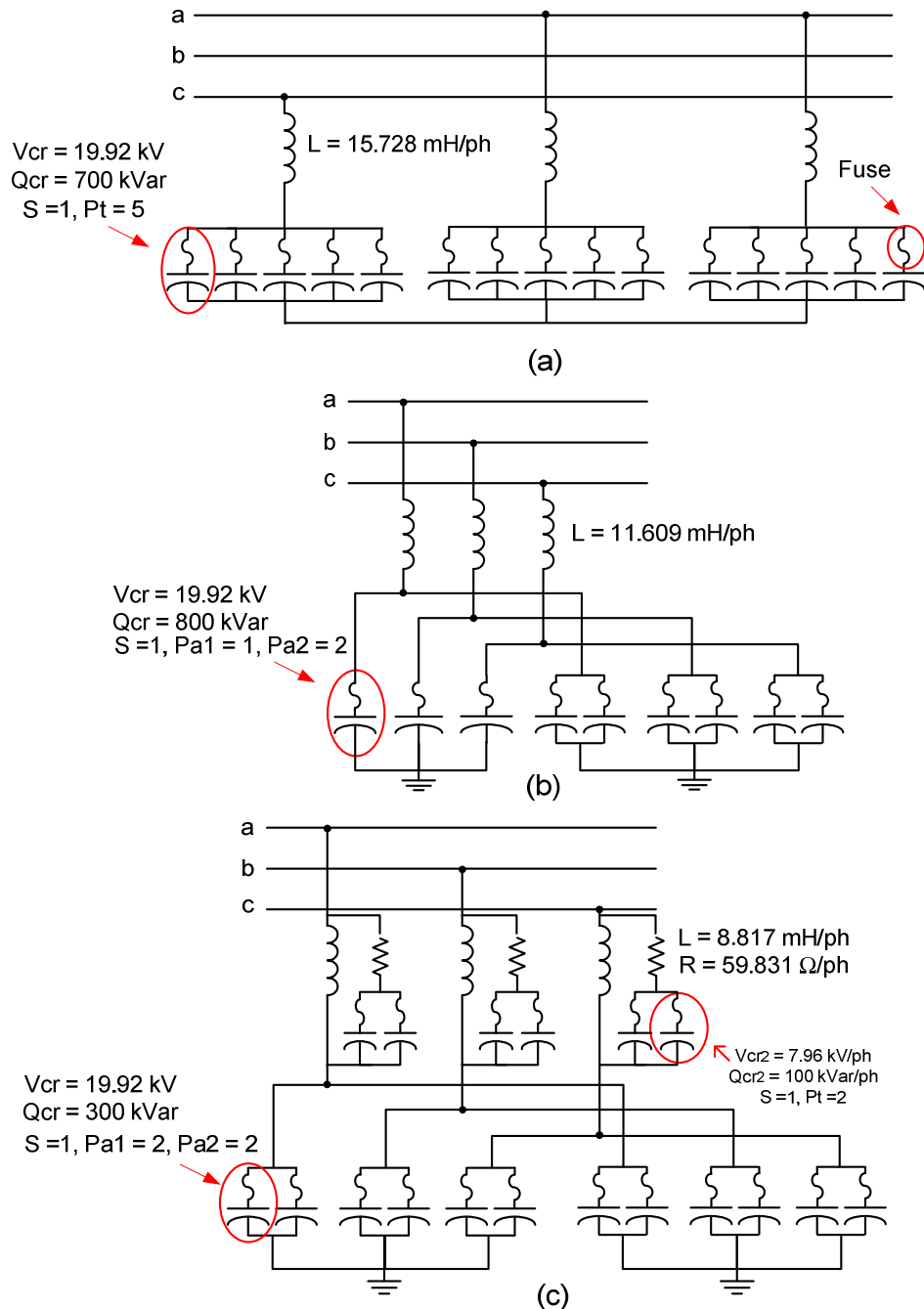
Single Wye										
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
1	2	6	7.9600	4,772	100	0.6000	0.000253	2.3734×10^5	5.0237	10.0474

ตารางที่ 5.94 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง (กรณี 5.3.3)

Unit Filter	Type of Capacitor	Total Capacitance (uF)	C (Filter Design , uF)	Icr(A)	Ic_rms(A)	Ic/Icr
1 (C1)	Ext : Single Wye Unground (1)	28.0763	27.961	35.14	42.75	1.22
2 (C1)	Ext : Split Wye Ground Unequal Leg	19.2523	18.874	40.16	46.24	1.15
3 (C1)	Ext : Split Wye Equal Leg	9.6262	9.852	15.06	15.42	1.02
3 (C2)	Single Wye	10.0474	9.852	12.56	4.38	0.35

* (1) หมายถึงการใช้ผลลัพธ์ในบรรทัดที่ 1

รูปที่ 5.20 แสดงวงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (b) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Split Wye Unequal Leg กรองฮาร์มอนิกที่ 7 และ (c) แบบผ่านสูงอันดับสามโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Split Wye Equal Leg กรองฮาร์มอนิกที่ 11 ตามตารางที่ 5.94



รูปที่ 5.20 วงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (b) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Split Wye Unequal Leg กรอง ฮาร์มอนิกที่ 7 และ (c) แบบผ่านสูงอันดับสามโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Split Wye Equal Leg กรองฮาร์มอนิก ที่ 11

จากตารางที่ 5.91 จะเห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 เข้าที่บัส 7 ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 7 ลดลงเหลือ 0.7396 เท่าซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

จากตารางที่ 5.89 จะเห็นว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองมีค่าเหมือนกับพารามิเตอร์ในตารางที่ 5.74 (กรณีที่ 5.3.1) ยกเว้นพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ซึ่งทำให้การออกแบบชุดตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 5 สามารถใช้ตารางที่ 5.77 ได้ การออกแบบชุดตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 7 สามารถใช้การออกแบบในตารางที่ 5.78 ได้ ส่วนชุดตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 11 จะทำการออกแบบใหม่ ผลลัพธ์การออกแบบชุดตัวเก็บประจุแสดงในตารางที่ 5.92-5.93

เมื่อออกแบบชุดตัวเก็บประจุเสร็จสิ้น จากนั้นทดลองนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุทดลองใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองเพื่อทดสอบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจยังคงทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด โดยในส่วนนี้จะทำการเลือกใช้ชุดตัวเก็บประจุเพียงหนึ่งแบบจากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุในแต่ละตัวกรองเพื่อแสดงผล โดยหลักการในการเลือกคือ เลือกชุดตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุไฟฟารวมใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้ออกแบบในตารางที่ 5.89 และชุดตัวเก็บประจุนั้นจะต้องไม่เกิดภาวะโหลดเกินเมื่อติดตั้งเข้าสู่ระบบ ผลลัพธ์การเลือกชุดตัวเก็บประจุแสดงในตารางที่ 5.94 ตารางที่ 5.95 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันกรณีต่าง ๆ และ กำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.96

ตารางที่ 5.95 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.3.3)

Bus	%THDv		
	Filter Design	Capacitor Design	ER G5/4
1	1.7137	1.7512	3
2	1.5915	1.6353	3
3	1.8578	1.9269	3
4	1.3268	1.3786	3
5	1.4913	1.5366	3
6	0.4541	0.4752	3
7	2.2189	2.2910	3
8	0.4401	0.4671	3
9	0.6360	0.6691	3
10	0.5458	0.5769	3
11	0.4178	0.4447	3
12	0.4048	0.4257	3
13	0.3930	0.4147	3

ตารางที่ 5.96 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.3.3)

H order	Loss (W)		
	Unit1	Unit2	Unit 3
Fund	12,876.58	6,055.91	16
5	5,154.06	104.8	41.24
7	19.03	1,763.59	126.61
11	4.85	15.64	1,536.1
13	3.21	8.59	1,091.45
17	1.11	2.54	465.66
19	0.65	1.42	312.46
23	0.3	0.64	195.77
25	0.3	0.61	218.83
29	0.14	0.28	130.92
31	0.16	0.32	173.45
35	0.11	0.22	148.7
37	0.09	0.18	134.77
รวม	18,060.58	7,954.72	4,591.96

5.3.4. ใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองผ่านสูงชนิดซีในการกรองฮาร์มอนิก

กรณีนี้จะใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยว (ST) จำนวนสองชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 ใช้ตัวกรองแบบผ่านสูงชนิดซี (CT) จำนวนหนึ่งชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟให้กับแต่ละตัวกรองจะเหมือนกับกรณี 5.3.4 ซึ่งตัวกรองทั้งสามชุดทำการติดตั้งเข้าที่บัส 7 ผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.97 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ที่โหลดโฟลว์และฮาร์มอนิกโฟลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 7 แสดงในตารางที่ 5.98 และ 5.99 ตามลำดับ ผลลัพธ์การออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 แสดงในตารางที่ 5.100-5.101 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.102 และรูปที่ 5.21 แสดงตัวอย่างวงจรมุมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก

ตารางที่ 5.97 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.3.4)

Type	h	MVar	TP (Hz)	Qf	C1(uF)	VC1(kV)	C2(uF)	VC2(kV)	L(mH)	R(ohm)
ST	5	10	240	60	27.961	34.497	-	-	15.728	0.395
ST	7	6.6	340	60	18.874	33.729	-	-	11.609	0.413
CT	11	3.4	540	2	9.938	33.000	1149.24	0.285	8.816	59.827

ตารางที่ 5.98 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ที่โหลดโฟลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 7 (กรณี 5.3.4)

Bus	Nominal V (kV)	V _{mag} (p.u.)	θ (deg)	P _{load} (MW)	Q _{load} (MVar)	P _{gen} (MW)	Q _{gen} (MVar)
1	230	1.0600	0	0	0	117.55	3.23
2	230	1.0450	-2.2415	0	0	18.3	-1.91
3	230	1.0268	-5.3688	0	0	0	0
4	230	1.0216	-5.2409	27.8	16.9	0	0
5	230	1.0312	-4.8939	7.6	1.6	0	0
6	115	1.0700	-10.3696	0	0	11.2	48.47
7	33	1.0271	-5.8260	30	20	0	20
8	115	0.9932	-13.4358	14.9	5	0	0
9	115	0.9885	-13.1371	29.5	16.6	0	6.19
10	115	0.9944	-12.9065	9	5.8	0	0
11	115	1.0272	-11.7242	3.5	1.8	0	0
12	115	1.0506	-11.3992	6.1	1.6	0	0
13	115	1.0401	-11.5546	13.5	5.8	0	0

ตารางที่ 5.99 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโวลต์ (กรณี 5.3.4)

Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	230	1.06	0	0.0053	-158.8047	0.0032	93.2386	0.0156	136.9944	0.0071	9.488	1.7845	3	0.5948
2	230	1.045	-2.2415	0.006	-158.1608	0.0034	94.5066	0.0143	138.9111	0.0057	11.6504	1.6588	3	0.5529
3	230	1.0268	-5.3688	0.0105	-151.041	0.0048	108.2779	0.0066	-146.0335	0.0054	161.3382	1.8065	3	0.6022
4	230	1.0216	-5.2409	0.0065	-163.0005	0.0034	87.7891	0.0114	129.6192	0.0036	1.0556	1.3854	3	0.4618
5	230	1.0312	-4.8939	0.006	-163.162	0.0033	87.5395	0.0134	130.1596	0.0051	2.3567	1.5595	3	0.5198
6	115	1.07	-10.3696	0.0027	177.66	0.0014	60.1916	0.0037	104.8548	0.0014	-15.1302	0.4696	3	0.1565
7	33	1.0271	-5.826	0.0118	-149.0649	0.0052	111.9323	0.0086	-119.3778	0.0081	166.0991	2.1643	3	0.7214
8	115	0.9932	-13.4358	0.0028	153.5004	0.0015	21.722	0.0031	20.821	0.0007	-115.4291	0.4540	3	0.1513
9	115	0.9885	-13.1371	0.0035	155.9632	0.0019	24.0833	0.005	16.7595	0.0013	-130.3707	0.6614	3	0.2205
10	115	0.9944	-12.9065	0.0033	156.1469	0.0018	24.6008	0.0041	19.6132	0.001	-124.4917	0.5654	3	0.1885
11	115	1.0272	-11.7242	0.0029	164.5399	0.0015	38.0849	0.0028	55.9992	0.0007	-60.333	0.4288	3	0.1429
12	115	1.0506	-11.3992	0.0026	170.9109	0.0013	49.9565	0.0031	89.8135	0.0011	-28.9706	0.4174	3	0.1391
13	115	1.0402	-11.5546	0.0026	168.3842	0.0013	45.9146	0.0028	82.9214	0.001	-33.7817	0.4044	3	0.1348

ตารางที่ 5.100 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.3.4)

Externally Fused : Split Wye Equal Leg											
S	Pa	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
1	2	12	19.9200	4.5529	300	3.6000	3.2933	109.3131	2.4065	9.6262	
Externally Fused : Split Wye Ground Unequal Leg											
S	Pa1	Pa2	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
1	1	2	9	19.9200	4.5529	400	3.6000	3.2933	109.3131	3.2087	9.6262
Externally Fused : Single Wye Ground											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
1	2	6	19.9200	4.5529	600	3.6000	3.2933	109.3131	4.8131	9.6262	

ตารางที่ 5.100 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (ต่อ) (กรณี 5.3.4)

Externally Fused : Single Wye Unground										
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
1	4	12	19.9200	4.5529	300	3.6000	3.2933	109.3131	2.4065	9.6262
Internally Fused : Single Wye										
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
3	1	9	6.6400	4.5500	400	3.6000	3.2900	109.3100	28.8785	9.6262

ตารางที่ 5.101 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C2) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.3.4)

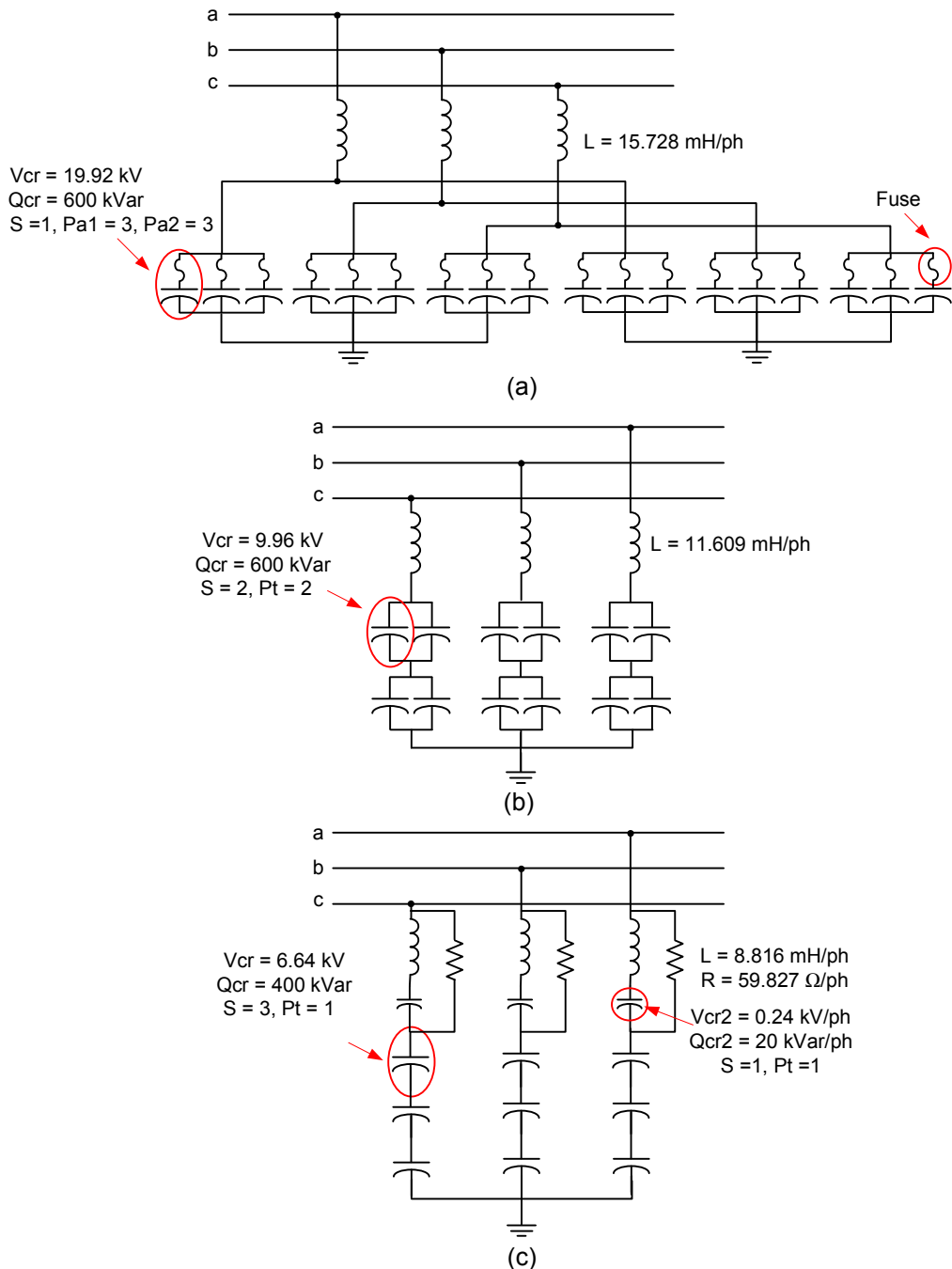
Single Wye										
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
1	1	3	0.2400	45.8569	20	0.0600	0.0282	212.7424	1,105.24	1,105.24

ตารางที่ 5.102 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง (กรณี 5.3.4)

Unit Filter	Type of Capacitor	Total Capacitance (uF)	C (Filter Design , uF)	Icr(A)	Ic_rms(A)	Ic/Icr
1 (C1)	Ext : Split Wye Equal Leg	28.8785	27.961	30.12	36.51	1.21
2 (C1)	Int : Single Wye (1)	19.2523	18.874	60.24	69.50	1.15
3 (C1)	Int : Single Wye	9.6262	9.938	60.24	62.2	1.03
3 (C2)	Single Wye	1,105.24	1,149.24	83.33	61.47	0.74

* (1) หมายถึงการใช้ผลลัพธ์ในบรรทัดที่ 1

รูปที่ 5.21 แสดงวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Split Wye Equal Leg กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (b) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกที่ 7 และ (c) แบบผ่านสูงชนิดซีโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกที่ 11 ตามตารางที่ 5.102



รูปที่ 5.21 แสดงวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Split Wye Equal Leg กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (b) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกที่ 7 และ (c) แบบผ่านสูงชนิดซีโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกที่ 11

จากตารางที่ 5.99 จะเห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 เข้าที่บัส 7 ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 7 ลดลงเหลือ 0.7214 เท่าซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

จากตารางที่ 5.97 จะเห็นว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองมีค่าเหมือนกับพารามิเตอร์ในตารางที่ 5.74 (กรณีที่ 5.3.1) ยกเว้นพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ซึ่งทำให้การออกแบบชุดตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 5 สามารถใช้ตารางที่ 5.77 ได้ การออกแบบชุดตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 7 สามารถใช้การออกแบบในตารางที่ 5.78 ได้ ส่วนชุดตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 11 จะทำการออกแบบใหม่ ผลลัพธ์การออกแบบชุดตัวเก็บประจุแสดงในตารางที่ 5.100-5.101 และตารางที่ 5.102 แสดงผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง

เมื่อออกแบบชุดตัวเก็บประจุเสร็จสิ้น จากนั้นทดลองนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุทดลองใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองเพื่อทดสอบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุยังคงทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด โดยในส่วนนี้จะทำการเลือกใช้ชุดตัวเก็บประจุเพียงหนึ่งแบบจากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุในแต่ละตัวกรองเพื่อแสดงผล โดยหลักการในการเลือกคือ เลือกชุดตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุไฟฟ้าวรวมใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้ออกแบบในตารางที่ 5.97 และชุดตัวเก็บประจุนั้นจะต้องไม่เกิดภาวะโหลดเกินเมื่อติดตั้งเข้าสู่ระบบ ผลลัพธ์การเลือกชุดตัวเก็บประจุแสดงในตารางที่ 5.102 ตารางที่ 5.103 แสดงผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ และกำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.104

ตารางที่ 5.103 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.3.4)

Bus	%THDv		
	Filter Design	Capacitor Design	ER G5/4
1	1.7845	1.8969	3
2	1.6588	1.7955	3
3	1.8065	2.0935	3
4	1.3854	1.5563	3
5	1.5595	1.7022	3
6	0.4696	0.5446	3
7	2.1643	2.4689	3
8	0.4540	0.5471	3
9	0.6614	0.7694	3
10	0.5654	0.6695	3
11	0.4288	0.5243	3
12	0.4174	0.4927	3
13	0.4044	0.4831	3

ตารางที่ 5.104 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.3.4)

H order	Loss (W)		
	Unit1	Unit2	Unit 3
Fund	13,669.08	6,060.62	0.71
5	5,268.75	181.08	94.35
7	17.6	1,711.34	93.01
11	5.65	18.46	1,860.91
13	3.18	8.59	1,581.02
17	0.95	2.18	537.08
19	0.54	1.19	333.03
23	0.26	0.54	195.53
25	0.24	0.5	207.29
29	0.12	0.25	132.07
31	0.14	0.27	160.78
35	0.09	0.18	133.66
37	0.07	0.15	119.24
รวม	18,966.68	7,985.36	5,448.68

ตารางที่ 5.105 และ 5.106 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันในกรณี 5.3.1-5.3.4 และผลการเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียของแต่ละตัวกรองฮาร์มอนิก

ตารางที่ 5.105 ผลการเปรียบเทียบค่า%THDV ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.3)

Bus	%THDV			
	5.3.1 (ST)	5.3.2 (ST+2HP)	5.3.3 (ST+3HP)	5.3.4 (ST+CT)
1	0.9367	1.7909	1.7137	1.7845
2	0.9122	1.6643	1.5915	1.6588
3	1.6752	1.8089	1.8578	1.8065
4	0.8172	1.3895	1.3268	1.3854
5	0.8424	1.5647	1.4913	1.5595
6	0.3165	0.4708	0.4541	0.4696
7	1.9374	2.1679	2.2189	2.1643
8	0.3340	0.4549	0.4401	0.4540
9	0.4337	0.6631	0.6360	0.6614
10	0.3932	0.5667	0.5458	0.5654
11	0.3314	0.4296	0.4178	0.4288
12	0.2961	0.4184	0.4048	0.4174
13	0.2966	0.4052	0.3930	0.4044

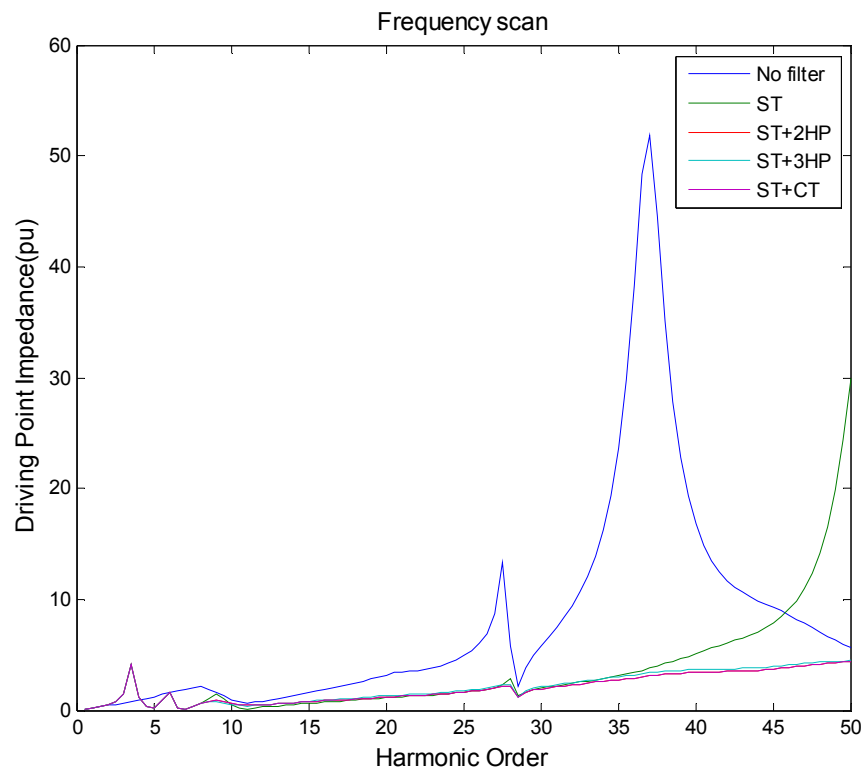
ตารางที่ 5.106 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.3)

Filter	Loss (W) at Fundamental			
	5.3.1 (ST)	5.3.2 (ST+2HP)	5.3.3 (ST+3HP)	5.3.4 (ST+CT)
1	12,876.58	12,876.58	12,876.58	13,669.08
2	6,055.91	6,055.91	6,055.91	6,060.62
3	1,775.98	455.77	16	0.71
Filter	Total Loss (W)			
Unit	5.3.1 (ST)	5.3.2 (ST+2HP)	5.3.3 (ST+3HP)	5.3.4 (ST+CT)
1	18,053.49	18,060.47	18,060.58	18,966.68
2	7,933.43	7,904.38	7,954.72	7,985.36
3	2,396.46	5,863.96	4,591.96	5,448.68

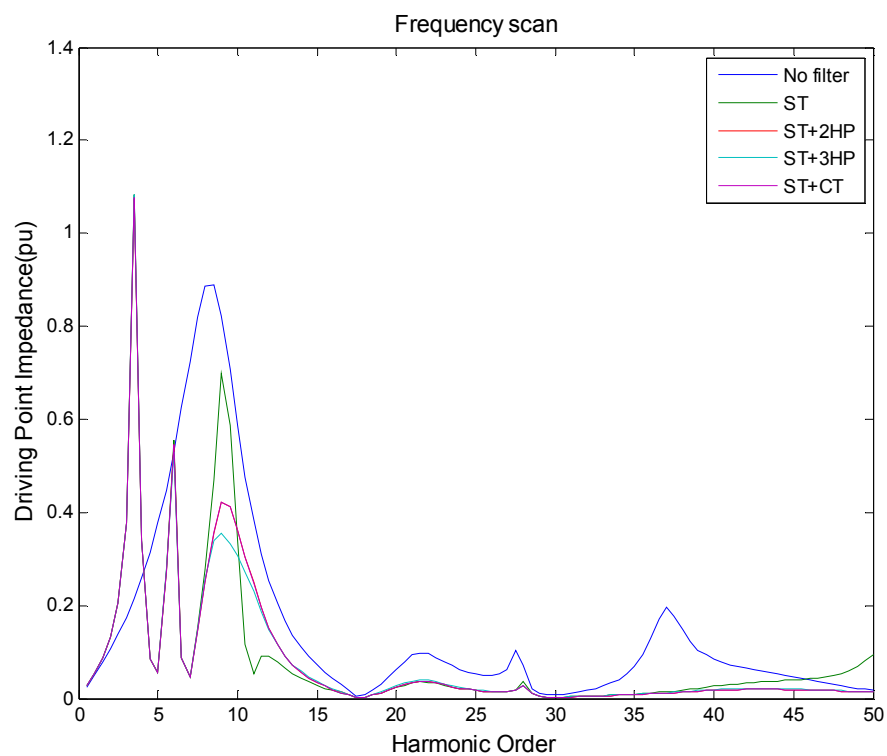
จากตารางที่ 5.105 จะเห็นว่าการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวชนิดเดียวในการกรองฮาร์มอนิกสามารถกรองฮาร์มอนิกได้ดีที่สุด ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันที่บัส 7 มีค่าต่ำสุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ๆ

จากตารางที่ 5.106 จะเห็นว่ากำลังสูญเสียที่ความถี่หลักมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกผ่านสูงชนิดซีมีค่าน้อยที่สุดเนื่องจากตัวกรองชนิดนี้มีการทำให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมที่ความถี่หลักมูลผ่านตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (C_2) ทำให้มีกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานของตัวกรองน้อยมาก เมื่อพิจารณาค่ากำลังสูญเสียรวมของตัวกรองฮาร์มอนิกจะพบว่าตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวมีค่ากำลังสูญเสียรวมน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับตัวกรองชนิดอื่น ๆ กรณีของค่ากำลังสูญเสียรวมของตัวกรองฮาร์มอนิกจะมีความมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองฮาร์มอนิกและอิมพีแดนซ์ของระบบที่ความถี่ต่าง ๆ ที่สูงมากขึ้น โดยในแต่ละความถี่ที่สูงขึ้น ถ้าอิมพีแดนซ์ของระบบมีค่ามากกว่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองฮาร์มอนิกจะทำให้มีกระแสไหลผ่านเข้าตัวกรองฮาร์มอนิกมากกว่าที่จะไหลเข้าสู่ระบบทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองมีค่ามากขึ้น โดยเฉพาะตัวกรองแบบผ่านสูงซึ่งมีค่าความต้านทานสูงเมื่อเทียบกับตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยวจึงทำให้ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองผ่านสูงมีค่ามากกว่าตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยว

รูปที่ 5.22 แสดงอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของบัสที่ 7 ซึ่งเป็นบัสที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่และรูปที่ 5.23 แสดงอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของบัสที่ 9 ซึ่งเป็นบัสที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่ โดยแต่ละรูปจะเปรียบเทียบทั้งหมด 5 กราฟคือ 1) กรณีไม่มีตัวกรองฮาร์มอนิก 2) กรณี ST 3) กรณี ST+2HP 4) กรณี ST+3HP และ 5) กรณี ST+CT โดยแต่ละกรณีจะแสดงความแตกต่างด้วยสีของเส้นแต่ละเส้น จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ที่บัส 7 จะมีค่าต่ำกว่าที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 ทำให้กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านเข้าสู่ตัวกรองมากกว่าที่จะไหลเข้าสู่ระบบ



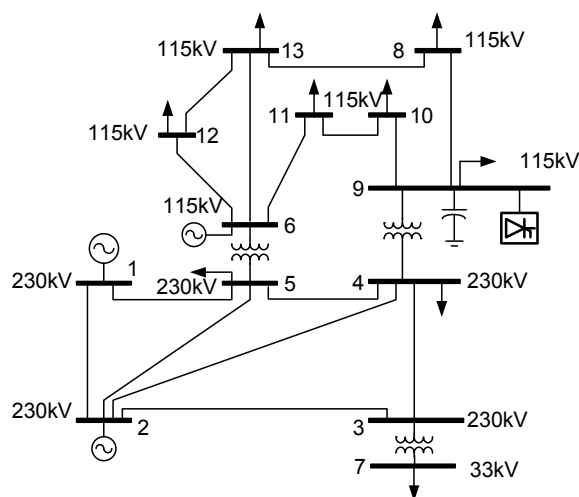
รูปที่ 5.22 อิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของบัสที่ 7 ซึ่งเป็นบัสที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่ (กรณี 5.3)



รูปที่ 5.23 อิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของบัสที่ 9 ซึ่งเป็นบัสที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่ (กรณี 5.3)

5.4. ระบบทดสอบ 13 บัส (แรงดันส่ง) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอยู่ที่บัส 9 (115 kV)

เนื่องจากโหลดที่บัส 9 มีขนาดเล็กเกินไปที่จะกำหนดให้เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ในกรณีนี้จึงกำหนดให้มีโหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกติดตั้งที่บัส 9 ซึ่งมีกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 56 MW และกำลังรีแอกทีฟเท่ากับ 30 MVar ซึ่งมีขนาดเป็น 40% ของโหลดทั้งหมด ทำให้กำลังไฟฟ้าและกำลังรีแอกทีฟรวมที่บัส 9 เป็น 85.5 MW และ 46.6 MVar



รูปที่ 5.24 แผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบ 13 บัส แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่อบัส 9 (115kV)

ผลการคำนวณและวิเคราะห์

การวิเคราะห์และการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบ่งออกเป็น 4 กรณีดังนี้

- 5.4.1 การใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวชนิดเดียวในการกรองฮาร์มอนิก
- 5.4.2 การใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงลำดับสองในการกรองฮาร์มอนิก
- 5.4.3 การใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงลำดับสามในการกรองฮาร์มอนิก
- 5.4.4 การใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงชนิดซีในการกรองฮาร์มอนิก

แต่ละกรณีจะมีการวิเคราะห์และออกแบบรวมทั้งสิ้น 4 ส่วนคือ 1. โหลดโพล์ 2. ฮาร์มอนิกโพล์ 3. การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก และ 4. การออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองฮาร์มอนิก

ในส่วนนี้เป็นการวิเคราะห์ระบบกรณีพื้นฐานโดยไม่มีการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกจึงวิเคราะห์เพียง 2 ส่วนคือ โหลดโพลาร์และฮาร์มอนิกโพลาร์เท่านั้น ส่วนหัวข้อ 5.4.1-5.4.4 จะทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 4 ส่วน ผลลัพธ์ของการหาโหลดโพลาร์ (กรณี 5.4) แสดงในตารางที่ 5.107 ส่วนผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์ (กรณี 5.4) แสดงในตารางที่ 5.108

ตารางที่ 5.107 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์ (กรณี 5.4)

Bus	Nominal V (kV)	V_{mag} (p.u.)	θ (deg)	P_{load} (MW)	Q_{load} (MVar)	P_{gen} (MW)	Q_{gen} (MVar)
1	230	1.0600	0	0	0	185.71	0.85
2	230	1.0450	-3.6899	0	0	18.3	59.32
3	230	0.9893	-7.2465	0	0	0	0
4	230	0.9874	-7.9773	27.8	16.9	0	0
5	230	1.0043	-7.7395	7.6	1.6	0	0
6	115	1.0700	-18.7985	0	0	11.2	104.80
7	33	0.9835	-7.7412	30	20	0	0
8	115	0.8926	-24.1937	14.9	5	0	0
9	115	0.8518	-26.3886	85.5	46.6	0	4.59
10	115	0.8786	-25.0917	9	5.8	0	0
11	115	0.9657	-21.7628	3.5	1.8	0	0
12	115	1.0393	-20.1430	6.1	1.6	0	0
13	115	1.0159	-20.3697	13.5	5.8	0	0

ตารางที่ 5.108 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโวลต์ (กรณี 5.4)

Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	230	1.06	0	0.014	160.7475	0.014	36.4805	0.0068	114.6188	0.0034	-6.92	2.0042	3	0.6681
2	230	1.045	-3.6899	0.015	159.8221	0.0145	35.4268	0.0065	113.3619	0.003	-8.1583	2.1135	3	0.7045
3	230	0.9892	-7.2465	0.016	150.5349	0.0142	22.664	0.0046	93.2128	0.0016	-32.4257	2.2165	3	0.7388
4	230	0.9873	-7.9773	0.0194	161.2949	0.0165	38.2462	0.004	118.4311	0.0008	-0.7952	2.6166	3	0.8722
5	230	1.0042	-7.7395	0.0188	162.0794	0.0165	39.3256	0.0049	121.9129	0.0014	6.3697	2.5412	3	0.8471
6	115	1.07	-18.7985	0.022	175.1848	0.0156	64.2212	0.0051	-133.5011	0.0037	134.4775	2.5970	3	0.8657
7	33	0.9835	-7.7412	0.0157	147.0122	0.0139	17.7382	0.0044	85.5	0.0015	-41.5191	2.1817	3	0.7272
8	115	0.8926	-24.1937	0.0412	177.7083	0.0284	74.1827	0.0138	-120.2276	0.0096	139.3445	5.9542	3	1.9847
9	115	0.8518	-26.3886	0.0623	-168.8221	0.0443	93.3505	0.0241	-95.2631	0.0171	167.1951	9.7107	3	3.2369
10	115	0.8786	-25.0917	0.0536	-173.4625	0.0378	86.4608	0.0198	-104.4351	0.014	156.8149	8.0207	3	2.6736
11	115	0.9657	-21.7628	0.0375	-178.0649	0.0262	78.2869	0.0122	-113.0095	0.0087	148.8902	5.0164	3	1.6721
12	115	1.0393	-20.143	0.0231	171.9915	0.0162	60.6997	0.0057	-139.0386	0.0041	124.8351	2.8043	3	0.9348
13	115	1.0159	-20.3697	0.0252	172.1783	0.0175	62.177	0.0066	-136.2543	0.0047	126.3926	3.1368	3	1.0456

จากตารางที่ 5.108 จะเห็นว่าบัสที่ 9 มีค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกสูงกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนดไว้คือ 3.2369 เท่า จึงจำเป็นต้องออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกติดตั้งที่บัส 9 เพื่อลดค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกให้มีค่าต่ำกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนด

โดยที่ค่ากำลังรีแอกทีฟของตัวกรองฮาร์มอนิกทั้งหมดจะใช้ค่าเดียวกันกับค่ากำลังรีแอกทีฟที่ใช้ในการปรับค่า P.F ของโหลดฮาร์มอนิกที่บัส 9 ให้เป็น 0.95 เนื่องจากค่า P.F ของบัสที่ 9 เดิมมีค่าเท่ากับ 0.88 ดังนั้นจะได้ค่ากำลังรีแอกทีฟที่จะชดเชยเข้าสู่ระบบเท่ากับ 11.6 MVar

5.4.1. ใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดียวชนิดเดียวในการกรองฮาร์มอนิก

กรณีนี้จะใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดียว (ST) จำนวนสามชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 จึงทำการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟให้กับแต่ละตัวกรองโดยแบ่งตามปริมาณกระแสฮาร์มอนิกดังนี้

ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5

$$Q_{filter,5} = \frac{18.24}{18.24+11.9+5.73} \times 11.6 = 5.8986 \text{ MVar}$$

ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7

$$Q_{filter,7} = \frac{11.9}{18.24+11.9+5.73} \times 11.6 = 3.8483 \text{ MVar}$$

ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11

$$Q_{filter,11} = \frac{5.73}{18.24+11.9+5.73} \times 11.6 = 1.853 \text{ MVar}$$

จะได้ค่ากำลังรีแอกทีฟสำหรับตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 เท่ากับ 6 MVar สำหรับตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 เท่ากับ 3.8 MVar และสำหรับตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 เท่ากับ 1.8 MVar ผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.109 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 9 แสดงในตารางที่ 5.110 และผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 9 แสดงในตารางที่ 5.111

ตารางที่ 5.109 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.4.1)

Type	Bus	kV	H	MVar	Tp (Hz)	Qf	C1(uF)	VC1(kV)	L(mH)	R(ohm)
ST	9	115	5	6	245	60	1.384	120	304.914	7.823
ST	9	115	7	3.8	345	60	0.895	117.47	237.675	8.587
ST	9	115	11	1.8	545	60	0.43	115.98	198.514	11.33

ตารางที่ 5.110 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหนดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 9 (กรณี 5.4.1)

Bus	Nominal V (kV)	V_{mag} (p.u.)	θ (deg)	P_{load} (MW)	Q_{load} (MVar)	P_{gen} (MW)	Q_{gen} (MVar)
1	230	1.0600	0	0	0	184.29	0.16
2	230	1.0450	-3.6605	0	0	18.3	55.53
3	230	0.9908	-7.2198	0	0	0	0
4	230	0.9902	-7.9657	27.8	16.9	0	0
5	230	1.0063	-7.6857	7.6	1.6	0	0
6	115	1.0700	-18.4338	0	0	11.2	94.43
7	33	0.9851	-7.7130	30	20	0	0
8	115	0.9100	-24.0391	14.9	5	0	0
9	115	0.8783	-26.0952	85.5	46.6	0	16.48
10	115	0.9007	-24.8218	9	5.8	0	0
11	115	0.9770	-21.4927	3.5	1.8	0	0
12	115	1.0414	-19.7873	6.1	1.6	0	0
13	115	1.0198	-20.0691	13.5	5.8	0	0

ตารางที่ 5.111 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโวลต์ (กรณี 5.4.1)

Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	230	1.06	0	0.0038	-172.3167	0.0029	71.0946	0.0013	154.5651	0.0032	20.5976	0.5801	3	0.1934
2	230	1.045	-3.6605	0.0041	-173.2429	0.003	70.0403	0.0012	153.3102	0.0028	19.364	0.5785	3	0.1928
3	230	0.9908	-7.2198	0.0044	177.4877	0.0029	57.3032	0.0009	133.2096	0.0015	-4.8321	0.5597	3	0.1866
4	230	0.9902	-7.9657	0.0053	-171.7853	0.0034	72.842	0.0008	158.3814	0.0008	26.8053	0.6575	3	0.2192
5	230	1.0063	-7.6857	0.0051	-170.9823	0.0034	73.942	0.0009	161.8555	0.0013	33.8753	0.6460	3	0.2153
6	115	1.07	-18.4338	0.006	-157.7957	0.0032	98.9704	0.001	-92.9544	0.0035	162.5323	0.7646	3	0.2549
7	33	0.9851	-7.713	0.0043	173.9758	0.0029	52.3925	0.0008	125.5202	0.0014	-13.8981	0.5507	3	0.1836
8	115	0.91	-24.0391	0.0113	-155.192	0.0059	109.0635	0.0026	-79.664	0.0091	167.4597	1.8704	3	0.6235
9	115	0.8783	-26.0952	0.017	-142.0543	0.0091	127.7919	0.0045	-55.3389	0.016	-165.4074	3.2072	3	1.0691
10	115	0.9007	-24.8218	0.0146	-146.5273	0.0078	121.1302	0.0037	-64.1572	0.0132	-175.3741	2.6210	3	0.8737
11	115	0.977	-21.4927	0.0102	-151.0816	0.0054	113.0083	0.0023	-72.6248	0.0082	176.8115	1.5976	3	0.5325
12	115	1.0414	-19.7873	0.0063	-160.9492	0.0033	95.5105	0.0011	-98.4256	0.0039	152.967	0.8345	3	0.2782
13	115	1.0198	-20.0691	0.0069	-160.747	0.0036	97.0138	0.0012	-95.6265	0.0045	154.5463	0.9427	3	0.3142

จากตารางที่ 5.111 จะเห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 เข้าที่บัส 9 ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 9 ลดลงเหลือ 1.0691 เท่า ซึ่งยังมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด จึงทำการเพิ่มค่ากำลังรีแอกทีฟของตัวกรองโดยใช้ค่าเดียวกันกับค่ากำลังรีแอกทีฟที่ใช้ในการปรับค่า P.F ของบัสที่ 9 ให้เป็น 1 เนื่องจากค่า P.F ของบัสที่ 9 เดิมมีค่าเท่ากับ 0.88 ดังนั้นจะได้ค่ากำลังรีแอกทีฟที่จะชดเชยเข้าสู่ระบบเท่ากับ 30 MVar โดยทำการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟให้กับแต่ละตัวกรองโดยแบ่งตามปริมาณกระแสฮาร์มอนิกดังนี้

ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5

$$Q_{filter,5} = \frac{18.24}{18.24+11.9+5.73} \times 30 = 15.2551 MVar$$

ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7

$$Q_{filter,7} = \frac{11.9}{18.24+11.9+5.73} \times 30 = 9.95261 MVar$$

ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11

$$Q_{filter,11} = \frac{5.73}{18.24+11.9+5.73} \times 30 = 4.7923 MVar$$

จะได้ค่ากำลังรีแอกทีฟสำหรับตัวกรองอันดับที่ 5 เท่ากับ 15 MVar สำหรับตัวกรองอันดับที่ 7 เท่ากับ 10 MVar และสำหรับตัวกรองอันดับที่ 11 เท่ากับ 5 MVar ซึ่งทั้งสามชุดทำการติดตั้งเข้าที่บัส 9 เนื่องจากการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟตามปริมาณกระแสฮาร์มอนิกดังที่กล่าว เมื่อทดลองออกแบบชุดตัวเก็บประจุของแต่ละตัวกรองพบว่าออกแบบได้น้อยแบบ จึงทำการปรับค่ากำลังรีแอกทีฟของตัวกรองใหม่เป็นดังนี้ ค่ากำลังรีแอกทีฟสำหรับตัวกรองอันดับที่ 5 เท่ากับ 16 MVar สำหรับตัวกรองอันดับที่ 7 เท่ากับ 10.2 MVar และสำหรับตัวกรองอันดับที่ 11 เท่ากับ 7.6 MVar ซึ่งทำให้ออกแบบชุดตัวเก็บประจุได้หลากหลายแบบมากยิ่งขึ้น

ผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.112 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 9 แสดงในตารางที่ 5.113 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 9 แสดงในตารางที่ 5.114 ผลลัพธ์การออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.115-5.117 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.118 และรูปที่ 5.25 แสดงตัวอย่างวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยว (a) ชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (b) ชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye

กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 และ (c) ชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ตามตารางที่ 5.118

ตารางที่ 5.112 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.4.1)

Type	Bus	kV	H	MVar	TP (Hz)	Qf	C1(uF)	VC1(kV)	L(mH)	R(ohm)
ST	9	115	5	16	240	60	3.684	120.218	119.375	3
ST	9	115	7	10.2	340	60	2.402	117.542	91.227	3.248
ST	9	115	11	7.6	540	60	1.814	115.994	47.899	2.709

ตารางที่ 5.113 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโฟลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 9 (กรณี 5.4.1)

Bus	Nominal V (kV)	V_{mag} (p.u.)	θ (deg)	P_{load} (MW)	Q_{load} (MVar)	P_{gen} (MW)	Q_{gen} (MVar)
1	230	1.0600	0	0	0	182.06	-1.26
2	230	1.0450	-3.6144	0	0	18.3	48.15
3	230	0.9938	-7.1868	0	0	0	0
4	230	0.9957	-7.9694	27.8	16.9	0	0
5	230	1.0104	-7.6049	7.6	1.6	0	0
6	115	1.0700	-17.7801	0	0	11.2	73.47
7	33	0.9881	-7.6770	30	20	0	0
8	115	0.9452	-23.8350	14.9	5	0	0
9	115	0.9322	-25.6401	85.5	46.6	0	39.3
10	115	0.9454	-24.4020	9	5.8	0	0
11	115	0.9999	-21.0513	3.5	1.8	0	0
12	115	1.0455	-19.1567	6.1	1.6	0	0
13	115	1.0278	-19.5536	13.5	5.8	0	0

ตารางที่ 5.114 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโวลต์ (กรณี 5.4.1)

Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	230	1.06	0	0.0032	-161.7039	0.0021	86.3758	0.0005	174.7896	0.0017	58.8797	0.4337	3	0.1446
2	230	1.045	-3.6144	0.0035	-162.6315	0.0022	85.3207	0.0005	173.5389	0.0015	57.6553	0.4338	3	0.1446
3	230	0.9938	-7.1868	0.0037	-171.8654	0.0021	72.635	0.0003	153.5341	0.0008	33.5991	0.4394	3	0.1465
4	230	0.9957	-7.9694	0.0045	-161.2029	0.0025	88.089	0.0003	178.6152	0.0004	65.2485	0.5323	3	0.1774
5	230	1.0104	-7.6049	0.0043	-160.3655	0.0025	89.2269	0.0004	-177.9287	0.0007	72.1316	0.5215	3	0.1738
6	115	1.07	-17.7801	0.0051	-147.0305	0.0023	114.4996	0.0004	-71.5871	0.0019	-158.1707	0.6093	3	0.2031
7	33	0.9881	-7.677	0.0036	-175.3561	0.0021	67.7539	0.0003	145.8907	0.0008	24.5871	0.4326	3	0.1442
8	115	0.9452	-23.835	0.0096	-144.2761	0.0043	124.8438	0.0011	-58.2598	0.005	-153.1178	1.4028	3	0.4676
9	115	0.9322	-25.6401	0.0142	-131.7648	0.0066	142.7415	0.0018	-35.1517	0.0085	-127.3559	2.3321	3	0.7774
10	115	0.9454	-24.402	0.0123	-135.9304	0.0056	136.4982	0.0015	-43.3198	0.0071	-136.5619	1.9332	3	0.6444
11	115	0.9998	-21.0513	0.0086	-140.3902	0.0039	128.4784	0.0009	-51.5788	0.0044	-144.1601	1.2174	3	0.4058
12	115	1.0455	-19.1567	0.0053	-150.1067	0.0024	111.1601	0.0004	-76.9266	0.0021	-167.5807	0.6591	3	0.2197
13	115	1.0278	-19.5536	0.0058	-149.8752	0.0026	112.713	0.0005	-74.0989	0.0024	-165.9583	0.7393	3	0.2464

ตารางที่ 5.115 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (กรณี 5.4.1)

Externally Fused : Split Wye Equal Leg										
S	Pa	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
3	10	180	23.8000	2.8701	100	18	17.0096	105.8227	0.5619	3.7463
Externally Fused : Single Wye Ground										
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
3	10	90	23.8000	2.8701	200	18	17.0096	105.8227	1.1239	3.7463
5	12	180	14.4000	3.7346	100	18	16.7273	107.6087	1.5351	3.6841
Externally Fused : Single Wye Unground										
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
3	10	90	23.8000	2.8700	200	18	17.0100	105.8200	1.1239	3.7463
5	12	180	14.4000	3.7300	100	18	16.7300	107.6100	1.5351	3.6841
Internally Fused : Split Wye Equal Leg										
S	Pa	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
7	1	42	9.9600	0.4500	400	16.8	16.6500	100.9000	12.8349	3.6671
10	1	60	7.2000	3.7300	300	18	16.7300	107.6100	18.4207	3.6841

ตารางที่ 5.115 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (ต่อ) (กรณี 5.4.1)

Internally Fused : Single Wye											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
7	2	42	9.9600	0.4500	400	16.8	16.6500	100.9000	12.8349	3.6671	
10	2	60	7.2000	3.7300	300	18	16.7300	107.6100	18.4207	3.6841	
15	2	90	4.8000	3.7300	200	18	16.7300	107.6100	27.6311	3.6841	
Fuseless : Split Wye Equal Leg											
S	Section	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
5	8	1	30	14.4000	3.7300	600	18	16.7300	107.6100	9.2104	3.6841
7	5	1	42	9.9600	0.4500	400	16.8	16.6500	100.9000	12.8349	3.6671
10	4	1	60	7.2000	3.7300	300	18	16.7300	107.6100	18.4207	3.6841
15	2	1	90	4.8000	3.7300	200	18	16.7300	107.6100	27.6311	3.6841

ตารางที่ 5.116 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 (กรณี 5.4.1)

Externally Fused : Single Wye Ground											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
3	8	72	22.8000	0.7914	150	10.8000	10.6311	101.5891	0.9185	2.4493	
Externally Fused : Single Wye Unground											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
3	12	108	22.8000	0.7900	100	10.8000	10.6300	101.5900	0.6123	2.4493	
Internally Fused : Single Wye											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
6	1	18	11.4000	0.7900	600	10.8000	10.6300	101.5900	14.6957	2.4493	
9	1	27	7.6200	1.0600	400	10.8000	10.5800	102.1200	21.9281	2.4365	
Fuseless : Single Wye											
S	Section	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
5	7	1	15	13.8000	1.6800	700	10.5000	10.1600	103.3800	11.7001	2.3400
6	6	1	18	11.4000	0.7900	600	10.8000	10.6300	101.5900	14.6957	2.4493
9	4	1	27	7.6200	1.0600	400	10.8000	10.5800	102.1200	21.9281	2.4365

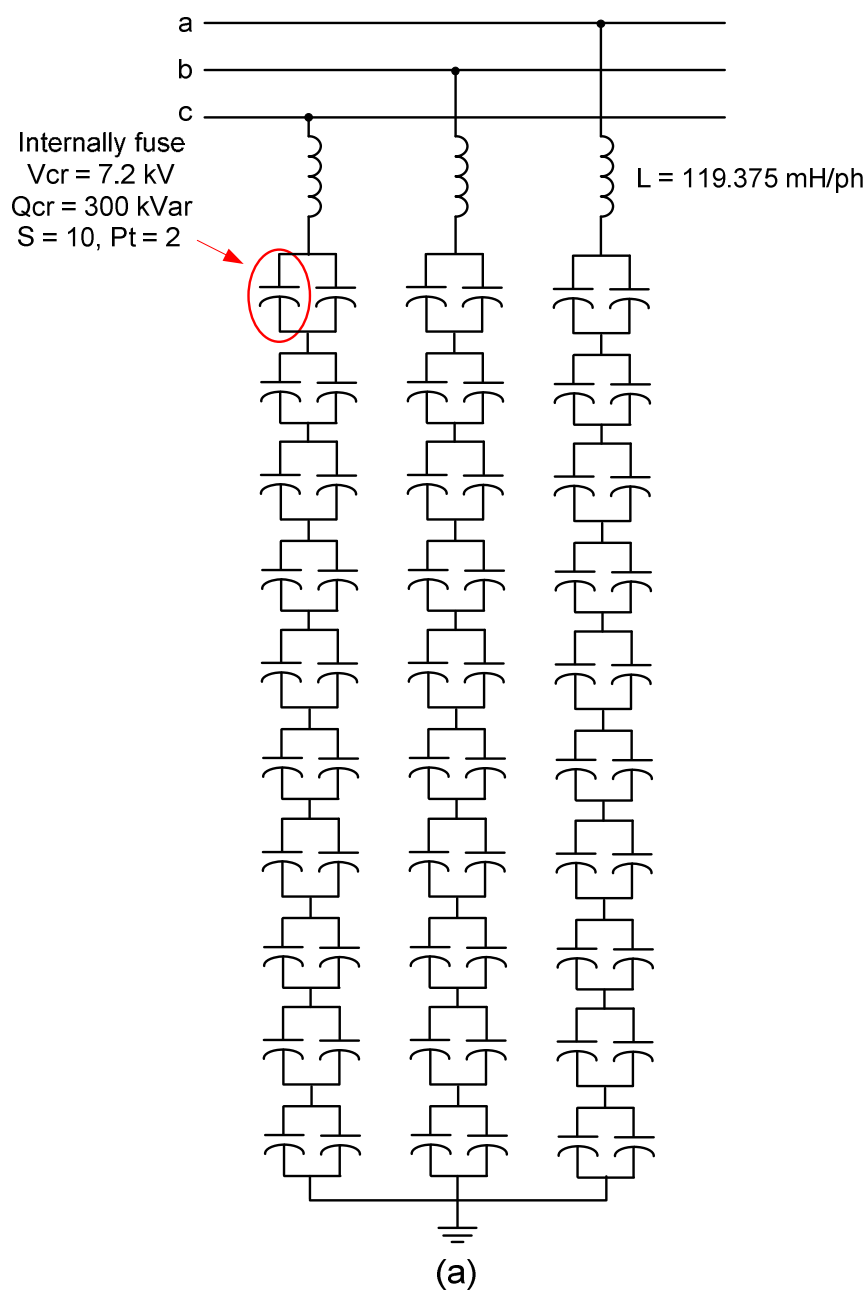
ตารางที่ 5.117 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.4.1)

Externally Fused : Single Wye Ground											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
3	9	81	22.8000	2.1366	100	8.1000	7.7647	104.3188	0.6123	1.8370	
Externally Fused : Single Wye Unground											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
3	9	81	22.8000	2.1400	100	8.1000	7.7600	104.3200	0.6123	1.8370	
Internally Fused : Single Wye											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
7	1	21	9.9600	4.1100	400	8.4000	7.7500	108.3800	12.8349	1.8336	
9	1	27	7.6200	2.4100	300	8.1000	7.7200	104.8700	16.4460	1.8273	
Fuseless : Single Wye											
S	Section	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
7	5	1	21	9.9600	4.1100	400	8.4000	7.7500	108.3800	12.8349	1.8336
9	4	1	27	7.6200	2.4100	300	8.1000	7.7200	104.8700	16.4460	1.8273

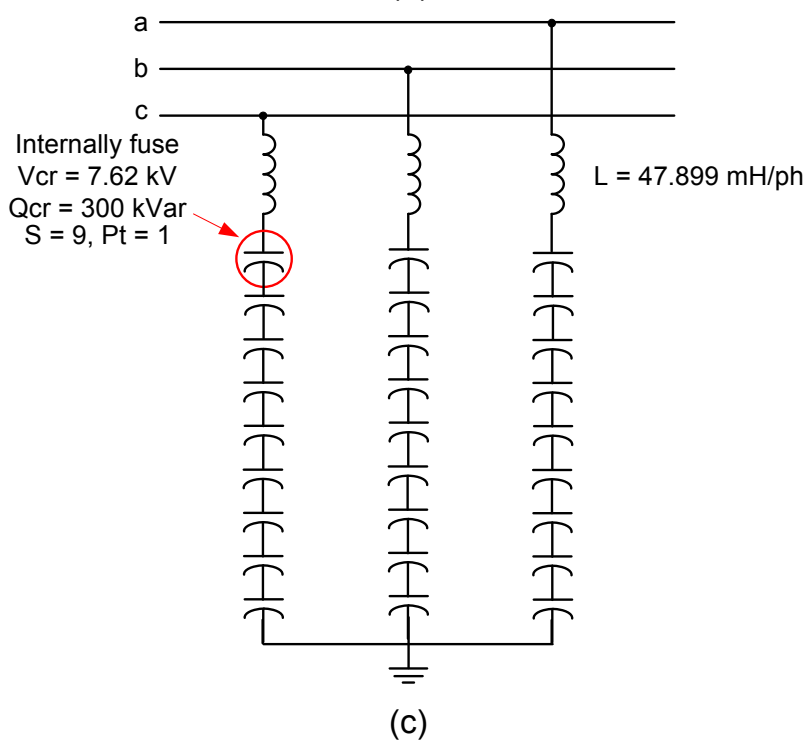
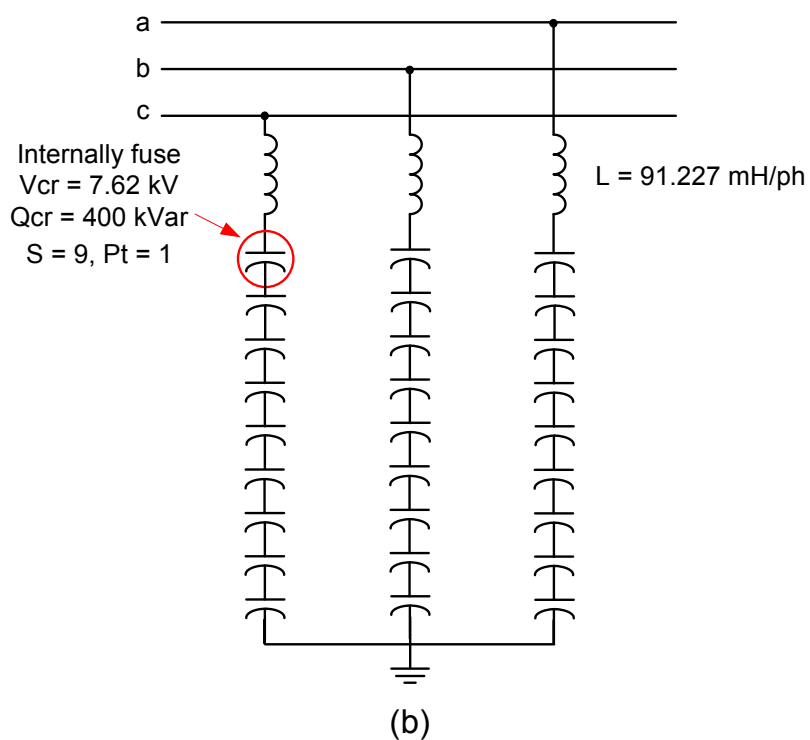
ตารางที่ 5.118 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง (กรณี 5.4.1)

Unit Filter	Type of Capacitor	Total Capacitance (uF)	C (Filter Design , uF)	Icr(A)	Ic1_rms(A)	Ic1/Icr
1 (C1)	Int : Single Wye (2)	3.6841	3.684	41.67	49.07	1.18
2 (C1)	Int : Single Wye (2)	2.4365	2.402	52.49	61.28	1.17
3 (C1)	Int : Single Wye (2)	1.8273	1.814	39.37	41.79	1.06

* (2) หมายถึงการใช้ผลลัพธ์ในบรรทัดที่ 2



รูปที่ 5.25 แสดงวงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดียวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5



รูปที่ 5.25 แสดงวงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (b) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 (c) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (ต่อ)

จากตารางที่ 5.114 จะเห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 เข้าที่บัส 9 ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 9 ลดลงเหลือ 0.7774 เท่าซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

จากตารางที่ 5.115 – 5.117 จะเห็นว่าสามารถออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับแต่ละตัวกรองฮาร์มอนิกได้หลายแบบ ซึ่งในแต่ละแบบนี้จะได้ค่าความจุไฟฟ้ารวมที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าของตัวกรองฮาร์มอนิกที่ได้ออกแบบไว้ในตารางที่ 5.112

เมื่อออกแบบชุดตัวเก็บประจุเสร็จสิ้น จากนั้นทดลองนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุทดลองใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองเพื่อทดสอบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุกังจะทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด ในการทดลองนี้จะเลือกใช้ชุดตัวเก็บประจุเพียงหนึ่งแบบจากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุในแต่ละตัวกรองเพื่อแสดงผล โดยหลักการในการเลือกคือ เลือกชุดตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุไฟฟ้ารวมใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้ออกแบบในตารางที่ 5.112 และชุดตัวเก็บประจุนั้นจะต้องไม่เกิดภาวะโหลดเกินเมื่อติดตั้งเข้าสู่ระบบ ผลลัพธ์การเลือกชุดตัวเก็บประจุแสดงในตารางที่ 5.118 ตารางที่ 5.119 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันกรณีต่าง ๆ และ กำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.120

ตารางที่ 5.119 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.4.1)

Bus	%THDv		
	Filter Design	Capacitor Design	ER G5/4
1	0.4337	0.4560	3
2	0.4338	0.4583	3
3	0.4394	0.4642	3
4	0.5323	0.5596	3
5	0.5215	0.5488	3
6	0.6093	0.6291	3
7	0.4326	0.4570	3
8	1.4028	1.4419	3
9	2.3321	2.3890	3
10	1.9332	1.9822	3
11	1.2174	1.2506	3
12	0.6591	0.6800	3
13	0.7393	0.7622	3

ตารางที่ 5.120 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.4.1)

H order	Loss (W)		
	Unit1	Unit2	Unit 3
Fund	16,842.15	7,629.08	3,482.17
5	11,996.54	210.17	32.71
7	42.65	4,334.08	36.16
11	0.52	1.64	897.01
13	5.52	14.3	232.03
17	2.34	5.17	30.88
19	1.14	2.43	12.16
23	0.38	0.76	3.16
25	0.25	0.49	1.93
29	0.1	0.19	0.71
31	0.06	0.12	0.41
35	0.02	0.03	0.12
37	0.01	0.02	0.07
รวม	28,891.66	12,198.49	4,729.52

5.4.2. ใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองผ่านสูงอันดับสองในการกรองฮาร์มอนิก

กรณีนี้จะใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยว (ST) จำนวนสองชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 ใช้ตัวกรองแบบผ่านสูงอันดับสอง (2HP) จำนวนหนึ่งชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟให้กับแต่ละตัวกรองจะเหมือนในกรณี 5.4.1 ซึ่งตัวกรองทั้งสามชุดทำการติดตั้งเข้าที่บัส 9 ผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.121 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 9 แสดงในตารางที่ 5.122 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 9 แสดงในตารางที่ 5.123 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.124 และรูปที่ 5.26 แสดงตัวอย่างวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก โดยรูปแบบการต่อชุดตัวเก็บประจุเป็นไปตามตารางที่ 5.124

ตารางที่ 5.121 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.4.2)

Type	Bus	kV	H	MVar	TP (Hz)	Qf	C1(uF)	VC1(kV)	L(mH)	R(ohm)
ST	9	115	5	16	240	60	3.684	120.218	119.375	3
ST	9	115	7	10.2	340	60	2.402	117.542	91.227	3.248
2HP	9	115	11	7.6	540	2	1.814	115.994	47.899	325.033

ตารางที่ 5.122 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 9 (กรณี 5.4.2)

Bus	Nominal V (kV)	V _{mag} (p.u.)	θ (deg)	P _{load} (MW)	Q _{load} (MVar)	P _{gen} (MW)	Q _{gen} (MVar)
1	230	1.0600	0	0	0	182.05	-1.26
2	230	1.0450	-3.6142	0	0	18.3	48.15
3	230	0.9938	-7.1865	0	0	0	0
4	230	0.9957	-7.9690	27.8	16.9	0	0
5	230	1.0104	-7.6045	7.6	1.6	0	0
6	115	1.0700	-17.7789	0	0	11.2	73.46
7	33	0.9881	-7.6767	30	20	0	0
8	115	0.9452	-23.8334	14.9	5	0	0
9	115	0.9322	-25.6383	85.5	46.6	0	39.30
10	115	0.9455	-24.4003	9	5.8	0	0
11	115	0.9999	-21.0499	3.5	1.8	0	0
12	115	1.0455	-19.1555	6.1	1.6	0	0
13	115	1.0278	-19.5524	13.5	5.8	0	0

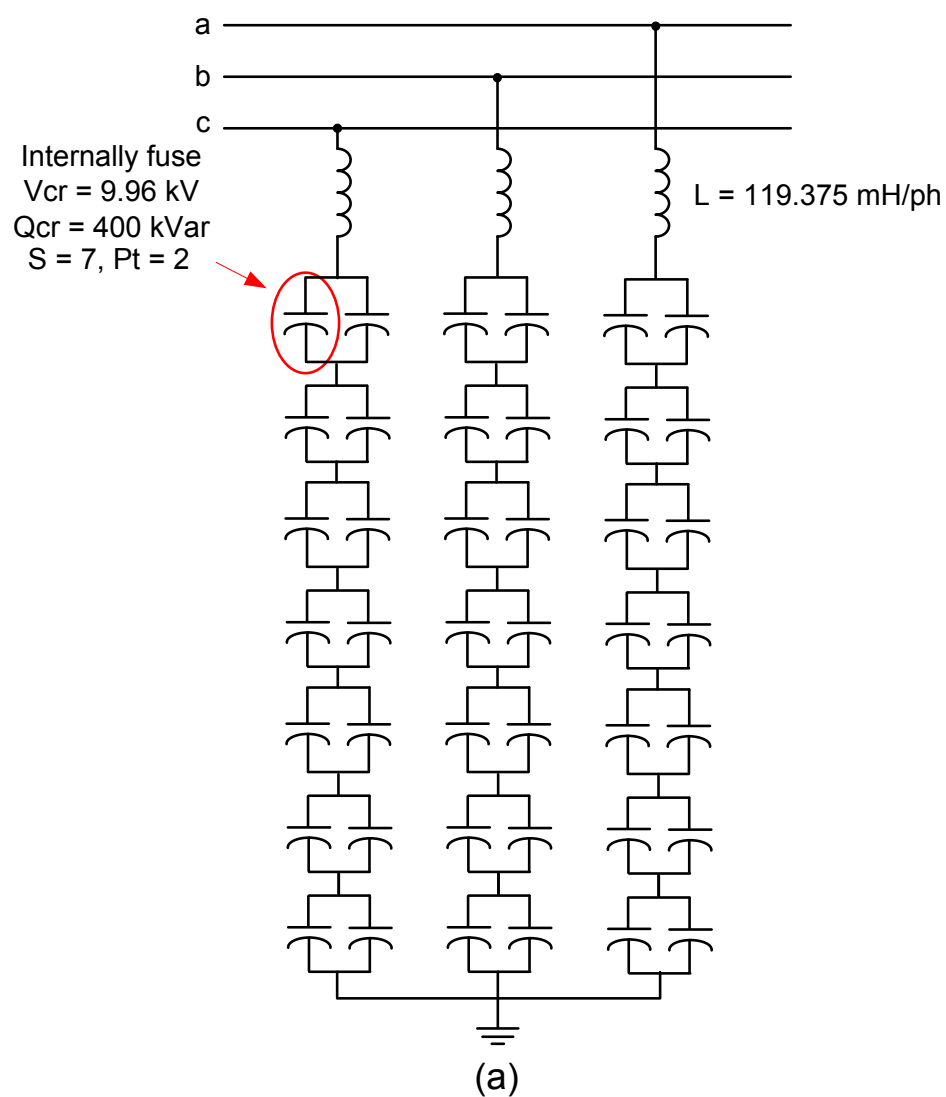
ตารางที่ 5.123 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโวลต์ (กรณี 5.4.2)

Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	230	1.06	0	0.0032	-161.822	0.0021	85.9202	0.0035	118.9193	0.0018	12.6157	0.5282	3	0.1761
2	230	1.045	-3.6142	0.0034	-162.7496	0.0022	84.8651	0.0033	117.6685	0.0016	11.3913	0.5284	3	0.1761
3	230	0.9938	-7.1865	0.0037	-171.9835	0.0021	72.1795	0.0023	97.6637	0.0008	-12.6649	0.4953	3	0.1651
4	230	0.9957	-7.969	0.0045	-161.3209	0.0025	87.6334	0.0021	122.7449	0.0004	18.9846	0.5612	3	0.1871
5	230	1.0104	-7.6045	0.0043	-160.4836	0.0025	88.7713	0.0025	126.2009	0.0007	25.8675	0.5633	3	0.1878
6	115	1.07	-17.7789	0.0051	-147.1489	0.0023	114.0436	0.0026	-127.4569	0.0019	155.5656	0.6286	3	0.2095
7	33	0.9881	-7.6767	0.0036	-175.4742	0.0021	67.2983	0.0023	90.0204	0.0008	-21.6769	0.4870	3	0.1623
8	115	0.9452	-23.8334	0.0095	-144.3944	0.0043	124.3878	0.0071	-114.1294	0.0051	160.6186	1.5194	3	0.5065
9	115	0.9322	-25.6383	0.0142	-131.8834	0.0065	142.2853	0.0121	-91.0217	0.0088	-173.6199	2.5054	3	0.8351
10	115	0.9455	-24.4003	0.0123	-136.0489	0.0056	136.0422	0.01	-99.1896	0.0073	177.1743	2.0782	3	0.6927
11	115	0.9999	-21.0499	0.0086	-140.5086	0.0039	128.0224	0.0062	-107.4486	0.0046	169.5762	1.2944	3	0.4315
12	115	1.0455	-19.1555	0.0053	-150.2251	0.0024	110.7042	0.0029	-132.7963	0.0022	146.1557	0.6879	3	0.2293
13	115	1.0278	-19.5524	0.0058	-149.9936	0.0026	112.257	0.0034	-129.9686	0.0025	147.778	0.7767	3	0.2589

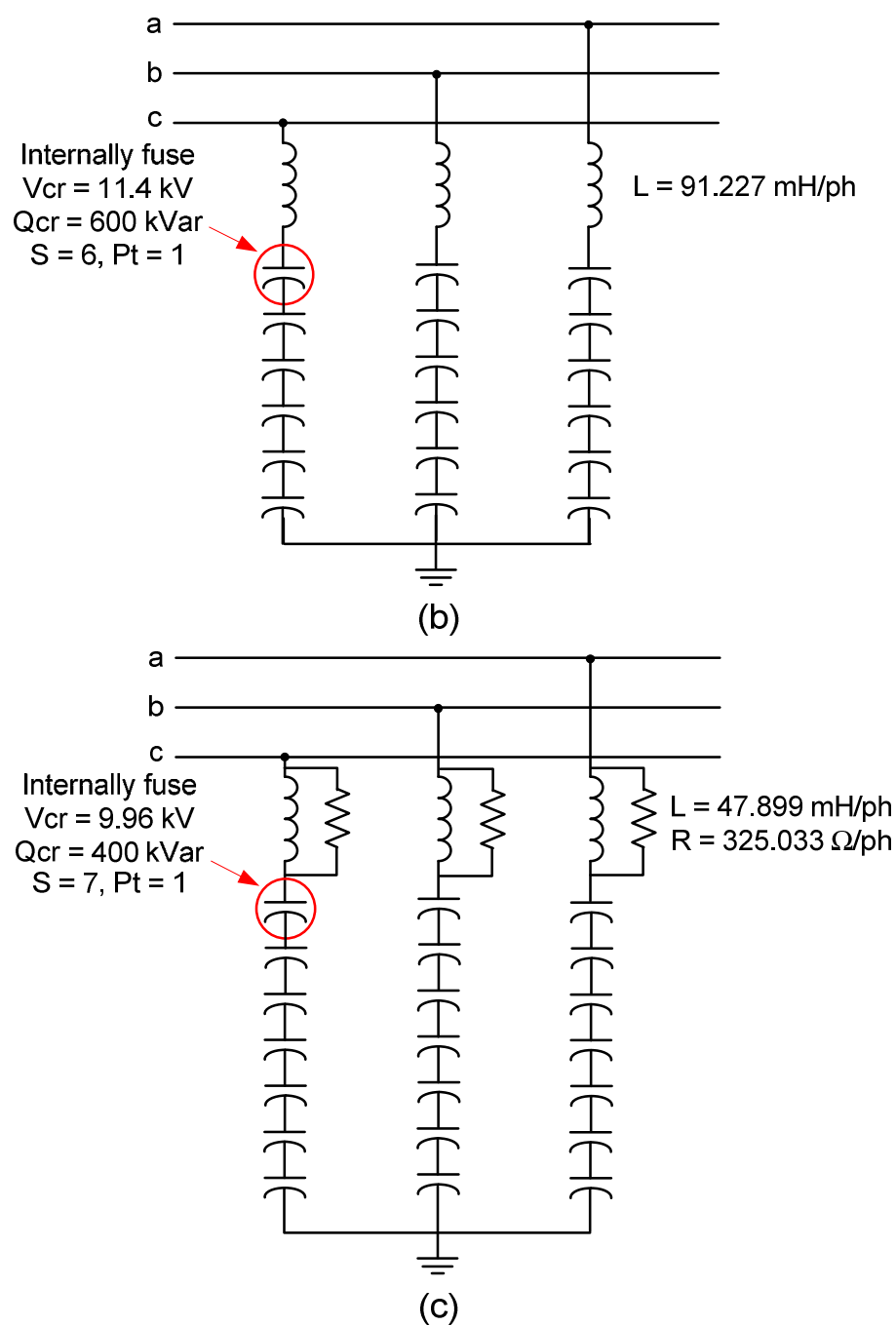
ตารางที่ 5.124 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง (กรณี 5.4.2)

Unit Filter	Type of Capacitor	Total Capacitance (uF)	C (Filter Design , uF)	Icr(A)	Ic1_rms(A)	Ic1/Icr
1 (C1)	Int : Single Wye (1)	3.6671	3.684	40.16	48.87	1.22
2 (C1)	Int : Single Wye (1)	2.4493	2.402	52.63	61.25	1.16
3 (C1)	Int : Single Wye (1)	1.8336	1.814	40.16	38.72	0.96

* (1) หมายถึงการใช้ผลลัพธ์ในบรรทัดที่ 1



รูปที่ 5.26 แสดงวงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดียวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5



รูปที่ 5.26 แสดงวงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (b) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 (c) แบบผ่านสูงอันดับสองโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (ต่อ)

จากตารางที่ 5.123 จะเห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 เข้าที่บัส 9 ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 9 ลดลงเหลือ 0.8351 เท่าซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

จากตารางที่ 5.121 จะเห็นว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองมีค่าเหมือนกับพารามิเตอร์ในตารางที่ 5.112 (กรณีที่ 5.4.1) ยกเว้นค่าความต้านทานของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ซึ่งทำให้การออกแบบชุดตัวเก็บประจุสามารถออกแบบได้เหมือนกับตารางที่ 5.115-5.117

เมื่อออกแบบตัวเก็บประจุเสร็จสิ้น จากนั้นทดลองนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุทดลองใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองเพื่อทดสอบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุยังคงทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด โดยในส่วนนี้จะทำการเลือกใช้ชุดตัวเก็บประจุเพียงหนึ่งแบบจากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุในแต่ละตัวกรองเพื่อแสดงผล โดยหลักการในการเลือกคือ เลือกชุดตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุไฟฟ้าวรวมใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้ออกแบบในตารางที่ 5.121 และชุดตัวเก็บประจุนั้นจะต้องไม่เกิดภาวะโหลดเกินเมื่อติดตั้งเข้าสู่ระบบ ผลลัพธ์การเลือกชุดตัวเก็บประจุแสดงในตารางที่ 5.124 ตารางที่ 5.125 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันกรณีต่าง ๆ และ กำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.126

ตารางที่ 5.125 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.4.2)

Bus	%THDv		
	Filter Design	Capacitor Design	ER G5/4
1	0.5282	0.5404	3
2	0.5284	0.5418	3
3	0.4953	0.5092	3
4	0.5612	0.5767	3
5	0.5633	0.5792	3
6	0.6286	0.6339	3
7	0.4870	0.5006	3
8	1.5194	1.5249	3
9	2.5054	2.5138	3
10	2.0782	2.0855	3
11	1.2944	1.3001	3
12	0.6879	0.6928	3
13	0.7767	0.7816	3

ตารางที่ 5.126 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.4.2)

H order	Loss (W)		
	Unit1	Unit2	Unit 3
Fund	16,683.67	7,712.92	900.55
5	11,902.39	191.72	174.03
7	47.46	4,207.85	386.71
11	17.11	53.05	8,206.79
13	5.78	14.92	3,896.71
17	1.16	2.57	892.63
19	0.55	1.17	462.76
23	0.19	0.38	195.94
25	0.13	0.25	149.68
29	0.06	0.11	84.35
31	0.04	0.07	60.91
35	0.01	0.02	23.15
37	0.01	0.01	15.79
รวม	28,658.55	12,185.04	15,450.01

5.4.3. ใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองผ่านสูงอันดับสามในการกรองฮาร์มอนิก

กรณีนี้จะใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยว (ST) จำนวนสองชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 ใช้ตัวกรองแบบผ่านสูงอันดับสาม (3HP) จำนวนหนึ่งชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟให้กับแต่ละตัวกรองจะเหมือนกับกรณี 5.4.1 ซึ่งทั้งสามชุดทำการติดตั้งเข้าที่บัส 9 ผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.127 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ที่โหลดโพล์และฮาร์มอนิกโพล์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 9 แสดงในตารางที่ 5.128 และ 5.129 ผลลัพธ์การออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองอันดับที่ 11 แสดงในตารางที่ 5.130-5.131 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.132 และรูปที่ 5.27 แสดงตัวอย่างวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกโดยรูปแบบการต่อชุดตัวเก็บประจุเป็นไปตามตารางที่ 5.132

ตารางที่ 5.127 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.4.3)

Type	h	MVar	TP (Hz)	Qf	C1(uF)	VC1(kV)	C2(uF)	VC2(kV)	L(mH)	R(ohm)
ST	5	16	240	60	3.684	120.218	-	-	119.375	3
ST	7	10.2	340	60	2.402	117.542	-	-	91.227	3.248
3HP	11	7.6	540	2	1.813	116.003	1.813	0.986	47.902	325.058

ตารางที่ 5.128 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ที่โหลดโพล์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 9 (กรณี 5.4.3)

Bus	Nominal V (kV)	V _{mag} (p.u.)	θ (deg)	P _{load} (MW)	Q _{load} (MVar)	P _{gen} (MW)	Q _{gen} (MVar)
1	230	1.0600	0	0	0	182.05	-1.26
2	230	1.0450	-3.6141	0	0	18.3	48.15
3	230	0.9938	-7.1864	0	0	0	0
4	230	0.9957	-7.9689	27.8	16.9	0	0
5	230	1.0104	-7.6044	7.6	1.6	0	0
6	115	1.0700	-17.7786	0	0	11.2	73.46
7	33	0.9881	-7.6766	30	20	0	0
8	115	0.9452	-23.8329	14.9	5	0	0
9	115	0.9322	-25.6376	85.5	46.6	0	39.3
10	115	0.9455	-24.3997	9	5.8	0	0
11	115	0.9999	-21.0494	3.5	1.8	0	0
12	115	1.0455	-19.1552	6.1	1.6	0	0
13	115	1.0278	-19.5520	13.5	5.8	0	0

ตารางที่ 5.129 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโวลต์ (กรณี 5.4.3)

Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	230	1.06	0	0.0032	-161.8253	0.0021	85.4999	0.0034	132.8069	0.002	19.3908	0.5347	3	0.1782
2	230	1.045	-3.6141	0.0035	-162.7528	0.0022	84.4448	0.0032	131.5561	0.0018	18.1664	0.5326	3	0.1775
3	230	0.9938	-7.1864	0.0037	-171.9867	0.0021	71.7591	0.0023	111.5514	0.001	-5.8898	0.4963	3	0.1654
4	230	0.9957	-7.9689	0.0045	-161.3242	0.0025	87.2131	0.002	136.6325	0.0005	25.7597	0.5627	3	0.1876
5	230	1.0104	-7.6044	0.0043	-160.4868	0.0025	88.351	0.0024	140.0886	0.0008	32.6426	0.5648	3	0.1883
6	115	1.07	-17.7786	0.0051	-147.1521	0.0023	113.6234	0.0025	-113.5692	0.0022	162.3408	0.6405	3	0.2135
7	33	0.9881	-7.6766	0.0036	-175.4774	0.0021	66.8779	0.0022	103.908	0.0009	-14.9018	0.4880	3	0.1627
8	115	0.9452	-23.8329	0.0096	-144.3977	0.0043	123.9675	0.0069	-100.2418	0.0059	167.3937	1.5546	3	0.5182
9	115	0.9322	-25.6376	0.0142	-131.8867	0.0066	141.8649	0.0118	-77.1341	0.0101	-166.8448	2.5729	3	0.8576
10	115	0.9455	-24.3997	0.0123	-136.0522	0.0056	135.6218	0.0098	-85.302	0.0084	-176.0506	2.1325	3	0.7108
11	115	0.9999	-21.0494	0.0086	-140.5119	0.0039	127.6021	0.006	-93.561	0.0052	176.3513	1.3258	3	0.4419
12	115	1.0455	-19.1552	0.0053	-150.2283	0.0024	110.2839	0.0029	-118.9085	0.0025	152.931	0.7012	3	0.2337
13	115	1.0278	-19.552	0.0058	-149.9968	0.0026	111.8368	0.0033	-116.0808	0.0029	154.5533	0.7923	3	0.2641

ตารางที่ 5.130 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.4.3)

Externally Fused : Single Wye Ground											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
3	9	81	22.8000	2.1286	100	8.1000	7.7659	104.3026	0.6123	1.8370	
Externally Fused : Single Wye Unground											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
3	9	81	22.8000	2.1300	100	8.1000	7.7700	104.3000	0.6123	1.8370	
Internally Fused : Single Wye											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
7	1	21	9.9600	4.1000	400	8.4000	7.7500	108.3700	12.8349	1.8336	
9	1	27	7.6200	2.4000	300	8.1000	7.7300	104.8500	16.4460	1.8273	
Fuseless : Single Wye											
S	Section	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
7	5	1	21	9.9600	4.1000	400	8.4000	7.7500	108.3700	12.8349	1.8336
9	4	1	27	7.6200	2.4000	300	8.1000	7.7300	104.8500	16.4460	1.8273

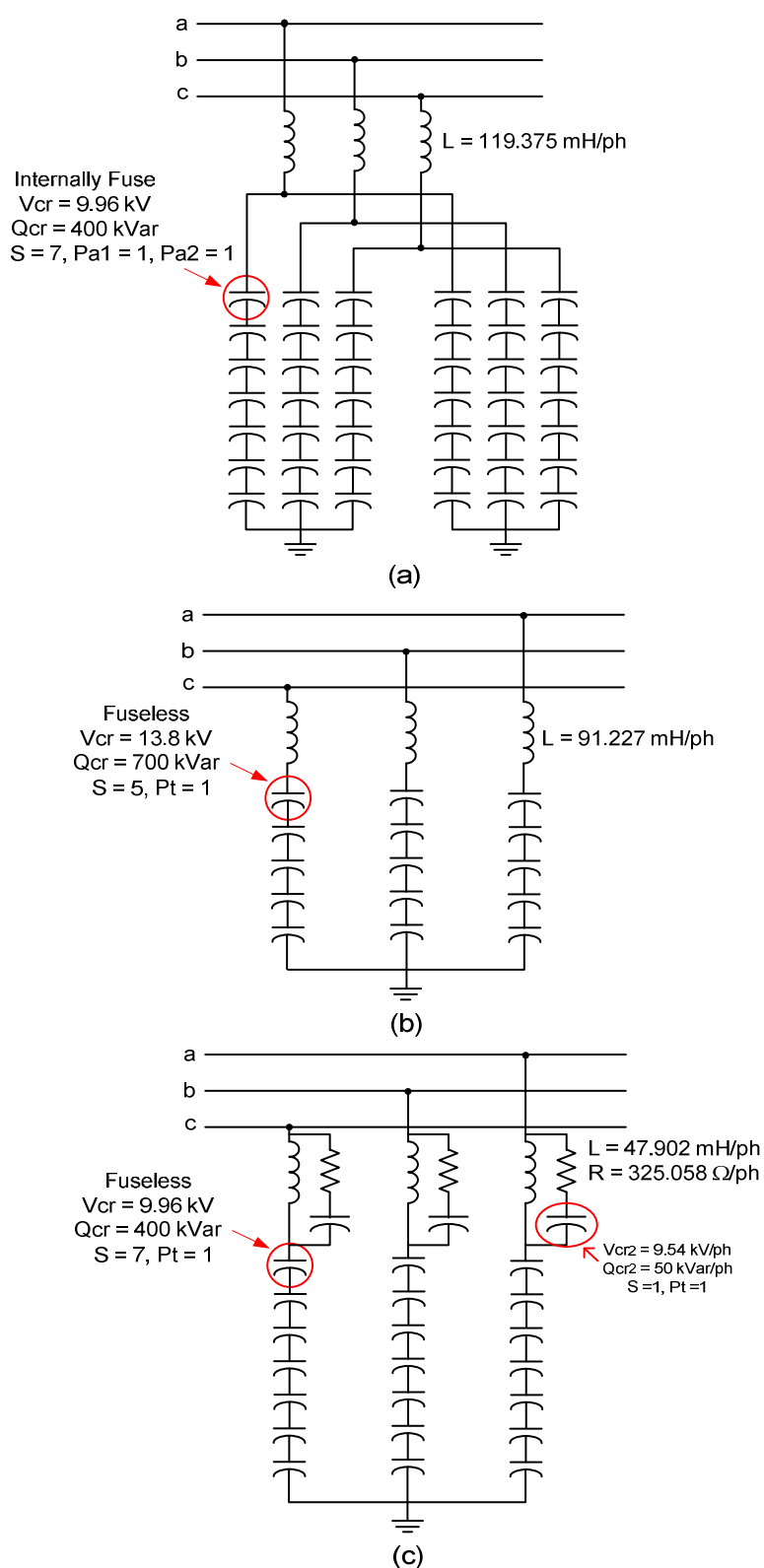
ตารางที่ 5.131 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C2) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.4.3)

Single Wye										
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
1	1	3	9.5400	1,575	50	0.1500	0.0005	2.8084x10 ⁴	1.7487	1.7487

ตารางที่ 5.132 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง (กรณี 5.4.3)

Unit Filter	Type of Capacitor	Total Capacitance (uF)	C (Filter Design , uF)	Icr(A)	Ic_rms(A)	Ic/Icr
1 (C1)	Int : Split Wye Equal Leg (1)	3.6671	3.684	40.16	48.65	1.21
2 (C1)	Fuseless : Single Wye (1)	2.3400	2.402	50.72	60.31	1.19
3 (C1)	Fuseless : Single Wye (1)	1.8336	1.813	40.16	37.84	0.94
3 (C2)	Single Wye	1.7487	1.813	5.24	6.23	1.19

* (1) หมายถึงการใช้ผลลัพธ์ในบรรทัดที่ 1



รูปที่ 5.27 แสดงวงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดียวโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Split Wye Equal Leg (b) แบบปรับคลื่นเดียวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิก อันดับี่ 7 (c) แบบผ่านสูงอันดับสามโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิก

จากตารางที่ 5.129 จะเห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 เข้าที่บัส 9 ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 9 ลดลงเหลือ 0.8576 เท่าซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

จากตารางที่ 5.127 จะเห็นว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองมีค่าเหมือนกับพารามิเตอร์ในตารางที่ 5.112 (กรณีที่ 5.4.1) ยกเว้นพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ซึ่งทำให้การออกแบบชุดตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 5 สามารถใช้ตารางที่ 5.115 ได้ การออกแบบชุดตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 7 สามารถใช้การออกแบบในตารางที่ 5.116 ได้ ส่วนชุดตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 11 จะทำการออกแบบใหม่ ผลลัพธ์การออกแบบชุดตัวเก็บประจุแสดงในตารางที่ 5.130-5.131 และรูปที่ 5.27 แสดงตัวอย่างวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Split Wye Equal Leg (b) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye (c) แบบผ่านสูงอันดับสามโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye เป็นไปตามตารางที่ 5.132

เมื่อออกแบบชุดตัวเก็บประจุเสร็จสิ้น จากนั้นทดลองนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุทดลองใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองเพื่อทดสอบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุนั้นจะทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด โดยในส่วนนี้จะทำการเลือกใช้ชุดตัวเก็บประจุเพียงหนึ่งแบบจากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุในแต่ละตัวกรองเพื่อแสดงผล โดยหลักการในการเลือกคือ เลือกชุดตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุไฟฟ้ารวมใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้ออกแบบในตารางที่ 5.127 และชุดตัวเก็บประจุนั้นจะต้องไม่เกิดภาวะโหลดเกินเมื่อติดตั้งเข้าสู่ระบบ ผลลัพธ์การเลือกชุดตัวเก็บประจุแสดงในตารางที่ 5.132 ตารางที่ 5.133 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันกรณีต่าง ๆ และ กำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.134

ตารางที่ 5.133 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.4.3)

Bus	%THDv		
	Filter Design	Capacitor Design	ER G5/4
1	0.5347	0.5006	3
2	0.5326	0.4936	3
3	0.4963	0.4492	3
4	0.5627	0.5053	3
5	0.5648	0.5107	3
6	0.6405	0.5963	3
7	0.4880	0.4415	3
8	1.5546	1.4749	3
9	2.5729	2.4621	3
10	2.1325	2.0358	3
11	1.3258	1.2574	3
12	0.7012	0.6552	3
13	0.7923	0.7424	3

ตารางที่ 5.134 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.4.3)

H order	Loss (W)		
	Unit1	Unit2	Unit 3
Fund	16,640.77	7,007.69	28.28
5	11,726.71	154.97	110.98
7	11.02	4,571.15	112.03
11	16.26	53.38	7,100.64
13	7.77	20.75	3,522.92
17	1.48	3.32	836.44
19	0.63	1.35	412.88
23	0.2	0.41	175.77
25	0.14	0.27	138.74
29	0.06	0.11	75.65
31	0.04	0.07	55.37
35	0.01	0.02	21.48
37	0.01	0.01	14.76
รวม	28,405.09	11,813.52	12,605.92

5.4.4. ใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองผ่านสูงชนิดซีในการกรองฮาร์มอนิก

กรณีนี้จะใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยว (ST) จำนวนสองชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 ใช้ตัวกรองแบบผ่านสูงชนิดซี (CT) จำนวนหนึ่งชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟให้กับแต่ละตัวกรองจะเหมือนกรณี 5.4.1 ซึ่งทั้งสามชุดทำการติดตั้งเข้าที่บัส 9 ผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.135 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดไฟฟ้และฮาร์มอนิกไฟฟ้เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 9 แสดงในตารางที่ 5.136 และ 5.137 ผลลัพธ์การออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองอันดับที่ 11 แสดงในตารางที่ 5.138-5.139 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.140 และรูปที่ 5.28 แสดงตัวอย่างวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกโดยรูปแบบการต่อชุดตัวเก็บประจุเป็นไปตามตารางที่ 5.140

ตารางที่ 5.135 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.4.4)

Type	h	MVar	TP (Hz)	Qf	C1(uF)	VC1(kV)	C2(uF)	VC2(kV)	L(mH)	R(ohm)
ST	5	16	240	60	3.684	120.218	-	-	119.375	3
ST	7	10.2	340	60	2.402	117.542	-	-	91.227	3.248
CT	11	7.6	540	2	1.829	115.000	211.532	0.994	47.899	325.033

ตารางที่ 5.136 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดไฟฟ้เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 9 (กรณี 5.4.4)

Bus	Nominal V (kV)	V _{mag} (p.u.)	θ (deg)	P _{load} (MW)	Q _{load} (MVar)	P _{gen} (MW)	Q _{gen} (MVar)
1	230	1.0600	0	0	0	182.05	-1.26
2	230	1.0450	-3.6141	0	0	18.3	48.15
3	230	0.9938	-7.1864	0	0	0	0
4	230	0.9957	-7.9689	27.8	16.9	0	0
5	230	1.0104	-7.6044	7.6	1.6	0	0
6	115	1.0700	-17.7786	0	0	11.2	73.46
7	33	0.9881	-7.6766	30	20	0	0
8	115	0.9452	-23.8329	14.9	5	0	0
9	115	0.9322	-25.6376	85.5	46.6	0	39.30
10	115	0.9455	-24.3997	9	5.8	0	0
11	115	0.9999	-21.0494	3.5	1.8	0	0
12	115	1.0455	-19.1551	6.1	1.6	0	0
13	115	1.0278	-19.5520	13.5	5.8	0	0

ตารางที่ 5.137 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโวลต์ (กรณี 5.4.4)

Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	230	1.06	0	0.0032	-161.8122	0.0021	85.9308	0.0034	118.7808	0.0018	12.8441	0.5263	3	0.1754
2	230	1.045	-3.6141	0.0034	-162.7397	0.0022	84.8757	0.0033	117.5301	0.0016	11.6197	0.5266	3	0.1755
3	230	0.9938	-7.1864	0.0037	-171.9736	0.0021	72.1901	0.0023	97.5253	0.0008	-12.4364	0.4943	3	0.1648
4	230	0.9957	-7.9689	0.0045	-161.3111	0.0025	87.644	0.002	122.6064	0.0004	19.2131	0.5606	3	0.1869
5	230	1.0104	-7.6044	0.0043	-160.4737	0.0025	88.7819	0.0024	126.0625	0.0007	26.096	0.5624	3	0.1875
6	115	1.07	-17.7786	0.0051	-147.139	0.0023	114.0543	0.0026	-127.5952	0.0019	155.7942	0.6277	3	0.2092
7	33	0.9881	-7.6766	0.0036	-175.4643	0.0021	67.3089	0.0022	89.8819	0.0008	-21.4484	0.4861	3	0.1620
8	115	0.9452	-23.8329	0.0095	-144.3846	0.0043	124.3984	0.007	-114.2679	0.0051	160.8471	1.5155	3	0.5052
9	115	0.9322	-25.6376	0.0142	-131.8735	0.0065	142.2958	0.012	-91.1602	0.0088	-173.3914	2.4983	3	0.8328
10	115	0.9455	-24.3997	0.0123	-136.0391	0.0056	136.0527	0.0099	-99.3281	0.0073	177.4028	2.0725	3	0.6908
11	115	0.9999	-21.0494	0.0086	-140.4987	0.0039	128.033	0.0061	-107.5871	0.0046	169.8047	1.2913	3	0.4304
12	115	1.0455	-19.1551	0.0053	-150.2152	0.0024	110.7148	0.0029	-132.9346	0.0022	146.3843	0.6867	3	0.2289
13	115	1.0278	-19.552	0.0058	-149.9837	0.0026	112.2677	0.0034	-130.1069	0.0025	148.0067	0.7752	3	0.2584

ตารางที่ 5.138 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.4.4)

Externally Fused : Single Wye Ground											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
3	9	81	22.8000	3.0194	100	8.1000	7.6322	106.1299	0.6123	1.8370	
Externally Fused : Single Wye Unground											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
3	9	81	22.8000	3.0200	100	8.1000	7.6300	106.1300	0.6123	1.8370	
Internally Fused : Single Wye											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
9	1	27	7.6200	3.2900	300	8.1000	7.5900	106.6900	16.4460	1.8273	
Fuseless : Single Wye											
S	Section	Pa	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
5	7	1	15	13.2800	0.0100	500	7.5000	7.5000	100.0100	9.0245	1.8049
9	4	1	27	7.6200	3.2900	300	8.1000	7.5900	106.6900	16.4460	1.8273

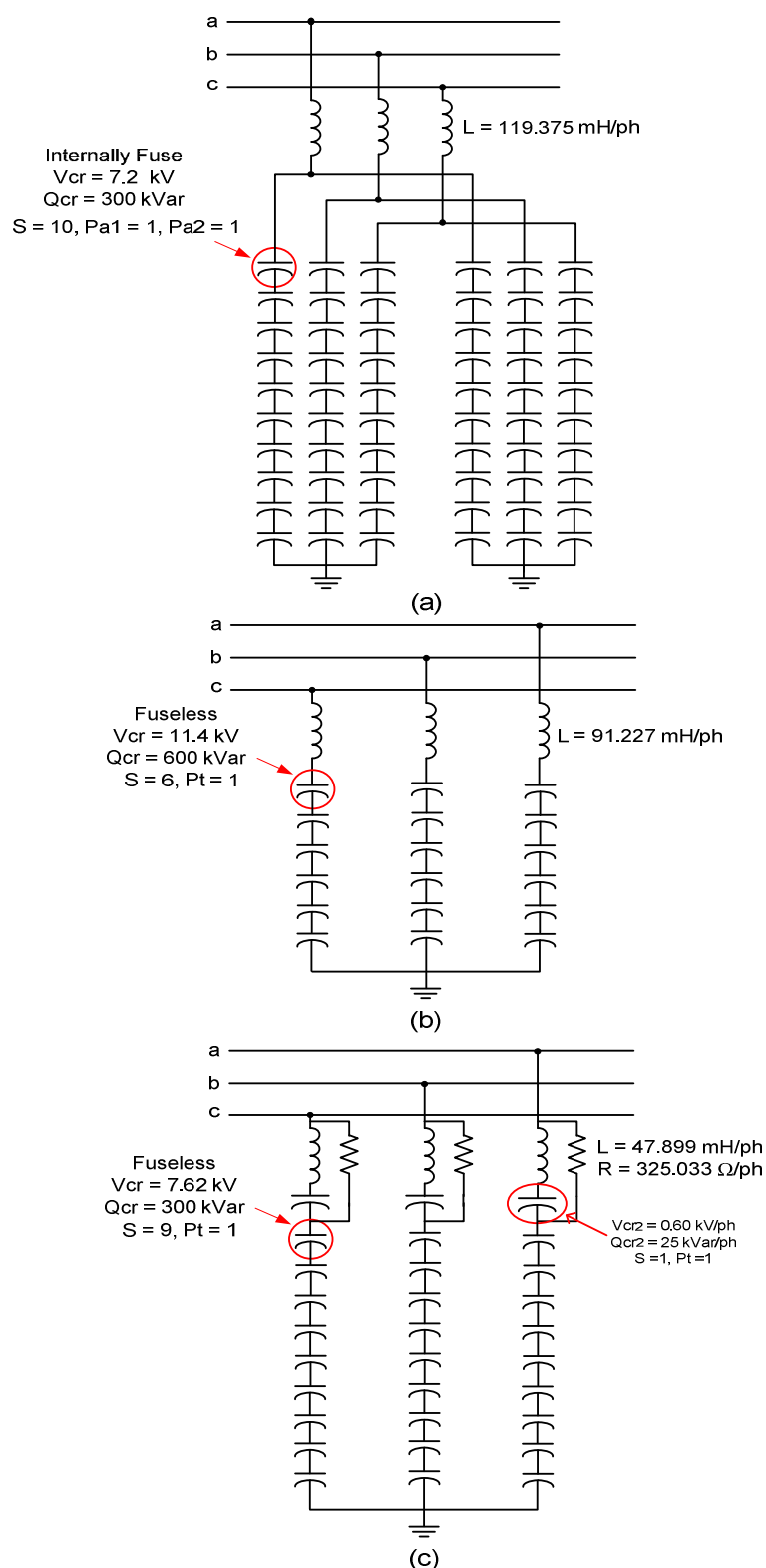
ตารางที่ 5.139 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C2) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.4.4)

Single Wye										
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
1	1	3	0.6000	4.5504	25	0.0750	0.006861	109.3078	221.0485	221.0485

ตารางที่ 5.140 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง (กรณี 5.4.4)

Unit Filter	Type of Capacitor	Total Capacitance (uF)	C (Filter Design , uF)	Icr(A)	Ic_rms(A)	Ic/Icr
1 (C1)	Int : Split Wye Equal Leg (2)	3.6841	3.684	41.67	49.08	1.18
2 (C1)	Fuseless : Single Wye (2)	2.4493	2.402	52.63	60.30	1.16
3 (C1)	Fuseless : Single Wye (2)	1.8273	1.829	39.37	38.36	0.97
3 (C2)	Single Wye	221.0485	211.532	41.67	37.77	0.91

* (2) หมายถึงการใช้ผลลัพธ์ในบรรทัดที่ 2



รูปที่ 5.28 แสดงวงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Split Wye Equal Leg (b) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 (c) แบบผ่านสูงชนิดซีโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11

จากตารางที่ 5.137 จะเห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 เข้าที่บัส 9 ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 9 ลดลงเหลือ 0.8328 เท่าซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

จากตารางที่ 5.135 จะเห็นว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองมีค่าเหมือนกับพารามิเตอร์ในตารางที่ 5.112 (กรณี 5.4.1) ยกเว้นพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ซึ่งทำให้การออกแบบชุดตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 5 สามารถใช้ตารางที่ 5.115 ได้ การออกแบบชุดตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 7 สามารถใช้การออกแบบในตารางที่ 5.116 ได้ ส่วนชุดตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 11 จะทำการออกแบบใหม่ ผลลัพธ์การออกแบบชุดตัวเก็บประจุแสดงในตารางที่ 5.138-5.139 และรูปที่ 5.28 แสดงตัวอย่างวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดียวโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Split Wye Equal Leg (b) แบบปรับคลื่นเดียวโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye (c) แบบผ่านสูงชนิดซีโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye เป็นไปตามตารางที่ 5.140

เมื่อออกแบบชุดตัวเก็บประจุเสร็จสิ้น จากนั้นทดลองนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุทดลองใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองเพื่อทดสอบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุยังคงทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด โดยในตอนนี้จะทำการเลือกใช้ชุดตัวเก็บประจุเพียงหนึ่งแบบจากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุในแต่ละตัวกรองเพื่อแสดงผล โดยหลักการในการเลือกคือ เลือกชุดตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุไฟฟ้ารวมใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้ออกแบบในตารางที่ 5.135 และชุดตัวเก็บประจุนั้นจะต้องไม่เกิดภาวะโหลดเกินเมื่อติดตั้งเข้าสู่ระบบ ผลลัพธ์การเลือกชุดตัวเก็บประจุแสดงในตารางที่ 5.140 ตารางที่ 5.141 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันกรณีต่าง ๆ และ กำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.142

ตารางที่ 5.141 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.4.4)

Bus	%THDv		
	Filter Design	Capacitor Design	ER G5/4
1	0.5263	0.5495	3
2	0.5266	0.5525	3
3	0.4943	0.5234	3
4	0.5606	0.5949	3
5	0.5624	0.5957	3
6	0.6277	0.6521	3
7	0.4861	0.5147	3
8	1.5155	1.5595	3
9	2.4983	2.5616	3
10	2.0725	2.1273	3
11	1.2913	1.3295	3
12	0.6867	0.7121	3
13	0.7752	0.8028	3

ตารางที่ 5.142 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.4.4)

H order	Loss (W)		
	Unit1	Unit2	Unit 3
Fund	16,842.15	7,711.26	1.63
5	11,996.54	215.12	176.62
7	47.07	4,207.85	363.11
11	17.07	53.05	8,184.69
13	5.78	14.92	3,937.48
17	1.16	2.57	897.45
19	0.55	1.17	464.44
23	0.19	0.38	196.3
25	0.13	0.25	149.88
29	0.06	0.11	84.42
31	0.04	0.07	60.95
35	0.01	0.02	23.16
37	0.01	0.01	15.79
รวม	28,910.75	12,206.79	14,555.91

ตารางที่ 5.143 และ 5.144 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันในกรณี 5.4.1-5.4.4 และผลการเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียของแต่ละตัวกรองฮาร์มอนิก

ตารางที่ 5.143 แสดงผลการเปรียบเทียบค่า %THDV ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.4)

Bus	%THDV			
	5.4.1 (ST)	5.4.2 (ST+2HP)	5.4.3 (ST+3HP)	5.4.4 (ST+CT)
1	0.4337	0.5282	0.5347	0.5263
2	0.4338	0.5284	0.5326	0.5266
3	0.4394	0.4953	0.4963	0.4943
4	0.5323	0.5612	0.5627	0.5606
5	0.5215	0.5633	0.5648	0.5624
6	0.6093	0.6286	0.6405	0.6277
7	0.4326	0.4870	0.4880	0.4861
8	1.4028	1.5194	1.5546	1.5155
9	2.3321	2.5054	2.5729	2.4983
10	1.9332	2.0782	2.1325	2.0725
11	1.2174	1.2944	1.3258	1.2913
12	0.6591	0.6879	0.7012	0.6867
13	0.7393	0.7767	0.7923	0.7752

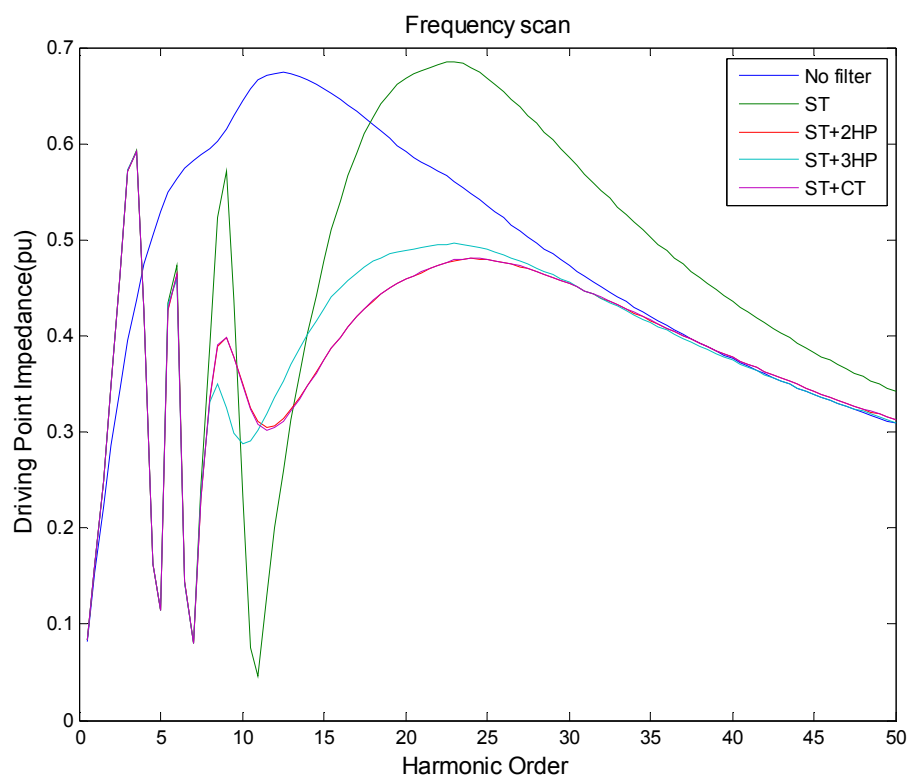
ตารางที่ 5.144 แสดงผลการเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.4)

Filter Unit	Loss (W) at Fundamental			
	5.4.1 (ST)	5.4.2 (ST+2HP)	5.4.3 (ST+3HP)	5.4.4 (ST+CT)
1	16,842.15	16,683.67	16,640.77	16,842.15
2	7,629.08	7,712.92	7,007.69	7,711.26
3	3,482.17	900.55	28.28	1.63
Filter Unit	Total Loss (W)			
	5.4.1 (ST)	5.4.2 (ST+2HP)	5.4.3 (ST+3HP)	5.4.4 (ST+CT)
1	28,891.66	28,658.55	28,405.09	28,910.75
2	12,198.49	12,185.04	11,813.52	12,206.79
3	4,729.52	15,450.01	12,605.92	14,555.91

จากตารางที่ 5.143 จะเห็นว่าการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวชนิดเดียวในการกรองฮาร์มอนิกสามารถกรองฮาร์มอนิกได้ดีที่สุด ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันที่บัส 9 มีค่าต่ำสุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ๆ

จากตารางที่ 5.144 จะเห็นว่ากำลังสูญเสียที่ความถี่หลักมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกผ่านสูงชนิดซีมีค่าน้อยที่สุดเนื่องจากตัวกรองชนิดนี้มีการทำให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมที่ความถี่หลักมูลผ่านตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (C_2) ทำให้มีกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานของตัวกรองน้อยมาก เมื่อพิจารณาค่ากำลังสูญเสียรวมของตัวกรองฮาร์มอนิกจะพบว่าตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวมีค่ากำลังสูญเสียที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับตัวกรองชนิดอื่น ๆ กรณีของค่ากำลังสูญเสียรวมของตัวกรองฮาร์มอนิกจะมีความมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองฮาร์มอนิกและอิมพีแดนซ์ของระบบที่ความถี่ต่าง ๆ ที่สูงมากขึ้น โดยในแต่ละความถี่ที่สูงขึ้น ถ้าอิมพีแดนซ์ของระบบมีค่ามากกว่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองฮาร์มอนิกจะทำให้มีกระแสไหลผ่านเข้าตัวกรองฮาร์มอนิกมากกว่าที่จะไหลเข้าสู่ระบบทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองมีค่ามากขึ้น โดยเฉพาะตัวกรองแบบผ่านสูงซึ่งมีค่าความต้านทานสูงเมื่อเทียบกับตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยวจึงทำให้ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองผ่านสูงมีค่ามากกว่าตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยว

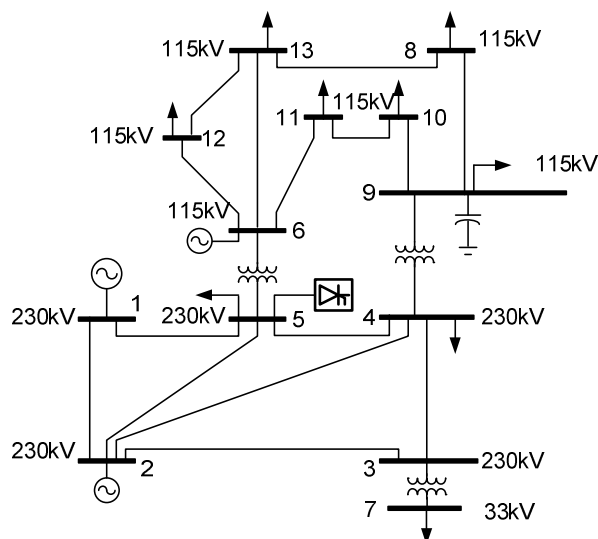
รูปที่ 5.29 แสดงอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของบัสที่ 9 ซึ่งเป็นบัสที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่และมีตัวเก็บประจุต่ออยู่ โดยแต่ละรูปจะเปรียบเทียบทั้งหมด 5 กราฟ คือ 1) กรณีไม่มีตัวกรองฮาร์มอนิก 2) กรณี ST 3) กรณี ST+2HP 4) กรณี ST+3HP และ 5) กรณี ST+CT โดยแต่ละกรณีจะแสดงความแตกต่างด้วยสีของเส้นแต่ละเส้น จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ที่บัส 9 จะมีค่าต่ำมากที่สุดที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 ทำให้กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านเข้าสู่ตัวกรองมากกว่าที่จะไหลเข้าสู่ระบบ



รูปที่ 5.29 อิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของบัสที่ 9 ซึ่งเป็นบัสที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกและตัวเก็บประจุต่ออยู่ (กรณี 5.4)

5.5. ระบบทดสอบ 13 บัส (แรงดันส่ง) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกอยู่ที่บัส 5 (230 kV)

เนื่องจากโหลดที่บัส 5 มีขนาดเล็กเกินไปที่จะกำหนดให้เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ในกรณีนี้กำหนดให้มีโหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกติดตั้งที่บัส 5 ซึ่งมีกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 70 MW และกำลังรีแอกทีฟเท่ากับ 37.5 MVar ซึ่งมีขนาดเป็น 50% ของโหลดทั้งหมดทำให้กำลังไฟฟ้าและกำลังรีแอกทีฟรวมที่บัส 5 เป็น 77.6 MW และ 39.1 MVar



รูปที่ 5.30 แผนภาพเส้นเดียวของระบบทดสอบ 13 บัส แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่อบัส 5 (230kV)

ผลการคำนวณและวิเคราะห์

การวิเคราะห์และการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบ่งออกเป็น 4 กรณีดังนี้

- 5.5.1 การใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวชนิดเดียวในการกรองฮาร์มอนิก
- 5.5.2 การใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงลำดับสองในการกรองฮาร์มอนิก
- 5.5.3 การใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงลำดับสามในการกรองฮาร์มอนิก
- 5.5.4 การใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองฮาร์มอนิกแบบผ่านสูงชนิดซีในการกรองฮาร์มอนิก

แต่ละกรณีจะมีการวิเคราะห์และออกแบบรวมทั้งสิ้น 4 ส่วนคือ 1. โหลดโพล์ 2. ฮาร์มอนิกโพล์ 3. การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก และ 4. การออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองฮาร์มอนิก

ในส่วนนี้เป็นการวิเคราะห์ระบบกรณีพื้นฐานโดยไม่มีการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกจึงวิเคราะห์เพียง 2 ส่วนคือ โหลดไฟลว์และฮาร์มอนิกไฟลว์เท่านั้น ส่วนหัวข้อ 5.5.1-5.5.4 จะทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 4 ส่วน ผลลัพธ์ของการหาโหลดไฟลว์ (กรณี 5.5) แสดงในตารางที่ 5.145 ส่วนผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกไฟลว์ (กรณี 5.5) แสดงในตารางที่ 5.146

ตารางที่ 5.145 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดไฟลว์ (กรณี 5.5)

Bus	Nominal V (kV)	V_{mag} (p.u.)	θ (deg)	P_{load} (MW)	Q_{load} (MVar)	P_{gen} (MW)	Q_{gen} (MVar)
1	230	1.0600	0	0	0	193.17	3.18
2	230	1.0450	-3.8044	0	0	18.3	59.89
3	230	0.9921	-7.3482	0	0	0	0
4	230	0.9926	-8.0898	27.8	16.9	0	0
5	230	0.9965	-8.1964	77.6	39.1	0	0
6	115	1.0700	-13.8556	0	0	11.2	67.31
7	33	0.9864	-7.8400	30	20	0	0
8	115	0.9866	-16.7212	14.9	5	0	0
9	115	0.9779	-16.3834	29.5	16.6	0	6.05
10	115	0.9856	-16.1923	9	5.8	0	0
11	115	1.0228	-15.1018	3.5	1.8	0	0
12	115	1.0498	-14.8699	6.1	1.6	0	0
13	115	1.0387	-14.9919	13.5	5.8	0	0

ตารางที่ 5.146 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโวลต์ (กรณี 5.5)

Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	230	1.06	0	0.0413	-155.8859	0.0383	99.166	0.0325	-122.0961	0.0261	118.7022	6.7878	3	2.2626
2	230	1.045	-3.8044	0.0434	-157.497	0.0395	97.1565	0.0314	-124.3523	0.024	116.6744	6.8665	3	2.2888
3	230	0.9921	-7.3482	0.0442	-168.825	0.0376	81.5804	0.0237	-147.4393	0.015	90.5043	6.5059	3	2.1686
4	230	0.9926	-8.0898	0.0518	-159.5186	0.0427	94.8786	0.0228	-126.3791	0.0113	115.8278	7.3083	3	2.4361
5	230	0.9965	-8.1964	0.0587	-152.7174	0.0472	104.9067	0.0217	-108.6761	0.0082	145.947	8.0268	3	2.6756
6	115	1.07	-13.8556	0.0255	-171.9351	0.0181	77.547	0.0055	-134.988	0.0018	129.003	2.9980	3	0.9993
7	33	0.9864	-7.84	0.0433	-172.3277	0.0368	76.6825	0.0231	-155.1087	0.0145	81.4617	6.3969	3	2.1323
8	115	0.9866	-16.7212	0.0249	160.9081	0.0187	34.2054	0.0053	129.4795	0.0015	-4.9909	3.2043	3	1.0681
9	115	0.9779	-16.3834	0.0305	161.5103	0.025	34.5474	0.0092	128.1592	0.0032	-3.2103	4.1526	3	1.3842
10	115	0.9856	-16.1923	0.0286	162.5685	0.0225	35.9348	0.0074	129.4093	0.0023	-4.4644	3.7733	3	1.2578
11	115	1.0228	-15.1018	0.0261	173.2114	0.0188	52.3732	0.0043	164.5784	0.0009	41.3436	3.1829	3	1.0610
12	115	1.0498	-14.8699	0.0239	-178.8665	0.0167	66.9757	0.0045	-151.111	0.0014	114.4439	2.8228	3	0.9409
13	115	1.0387	-14.9919	0.0238	178.4353	0.0165	62.5617	0.0041	-159.529	0.0012	107.4827	2.8318	3	0.9439

จากตารางที่ 5.146 จะเห็นว่าบัสที่ 5 มีค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกสูงกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนดไว้อยู่ 2.6756 เท่า จึงจำเป็นต้องออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกติดตั้งที่บัส 5 เพื่อลดค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกให้มีค่าต่ำกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนด

โดยที่ค่ากำลังรีแอกทีฟของตัวกรองฮาร์มอนิกทั้งหมดจะใช้ค่าเดียวกันกับค่ากำลังรีแอกทีฟที่ใช้ในการปรับค่า P.F ของโหลดฮาร์มอนิกที่บัส 5 ให้เป็น 1 เนื่องจากค่า P.F ของบัสที่ 5 เดิมมีค่าเท่ากับ 0.88 ดังนั้นจะได้ค่ากำลังรีแอกทีฟที่จะชดเชยเข้าสู่ระบบเท่ากับ 37.5 MVar

5.5.1. ใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดียวชนิดเดียวในการกรองฮาร์มอนิก

กรณีนี้จะใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดียว (ST) จำนวนสามชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5, 7 และ 11 จึงทำการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟให้กับแต่ละตัวกรองโดยแบ่งตามปริมาณกระแสฮาร์มอนิกดังนี้

ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5

$$Q_{filter,5} = \frac{18.24}{18.24+11.9+5.73} \times 37.5 = 19.0689 MVar$$

ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7

$$Q_{filter,7} = \frac{11.9}{18.24+11.9+5.73} \times 37.5 = 12.4408 MVar$$

ตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11

$$Q_{filter,11} = \frac{5.73}{18.24+11.9+5.73} \times 37.5 = 5.9904 MVar$$

จะได้ค่ากำลังรีแอกทีฟสำหรับตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 เท่ากับ 19 MVar สำหรับตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 เท่ากับ 12.5 MVar และสำหรับตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 เท่ากับ 6 MVar เนื่องจากการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟตามปริมาณกระแสฮาร์มอนิกดังที่กล่าวมาเมื่อทดลองออกแบบชุดตัวเก็บประจุของแต่ละตัวกรองพบว่ารูปแบบการต่อชุดตัวเก็บประจุออกแบบได้น้อยแบบ จึงทำการปรับค่ากำลังรีแอกทีฟของตัวกรองใหม่ดังนี้ ค่ากำลังรีแอกทีฟสำหรับตัวกรองอันดับที่ 5 เป็น 18.3 MVar สำหรับตัวกรองอันดับที่ 7 เป็น 11.8 MVar และสำหรับตัวกรองอันดับที่ 11 เป็น 7.5 MVar ซึ่งทำให้ออกแบบได้หลากหลายแบบมากขึ้น

ผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.147 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดไฟลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 9 แสดงในตารางที่ 5.148 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกไฟลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 9 แสดงในตารางที่ 5.149 ผลลัพธ์การ

ออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.150-5.152 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.153 และรูปที่ 5.31 แสดงตัวอย่างวงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดียว (a) ชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (b) ชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 และ (c) ชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ตามตารางที่ 5.153

ตารางที่ 5.147 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.5.1)

Type	Bus	kV	H	MVar	Tp (Hz)	Qf	C1(uF)	VC1(kV)	L(mH)	R(ohm)
ST	5	230	5	18.3	245	60	1.055	239.996	399.888	10.26
ST	5	230	7	11.8	340	60	0.695	235.084	315.429	11.231
ST	5	230	11	7.5	545	60	0.447	231.952	190.573	10.876

ตารางที่ 5.148 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 5 (กรณี 5.5.1)

Bus	Nominal V (kV)	V _{mag} (p.u.)	θ (deg)	P _{load} (MW)	Q _{load} (MVar)	P _{gen} (MW)	Q _{gen} (MVar)
1	230	1.0600	0	0	0	192.82	-5.39
2	230	1.0450	-3.7693	0	0	18.3	36.81
3	230	0.9995	-7.3605	0	0	0	0
4	230	1.0062	-8.2055	27.8	16.9	0	0
5	230	1.0154	-8.3839	77.6	39.1	0	37.6
6	115	1.0700	-13.8806	0	0	11.2	57.35
7	33	0.9939	-7.8450	30	20	0	0
8	115	0.9900	-16.7929	14.9	5	0	0
9	115	0.9832	-16.4458	29.5	16.6	0	6.12
10	115	0.9900	-16.2501	9	5.8	0	0
11	115	1.0250	-15.1476	3.5	1.8	0	0
12	115	1.0502	-14.8967	6.1	1.6	0	0
13	115	1.0395	-15.0296	13.5	5.8	0	0

ตารางที่ 5.149 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโวลต์ (กรณี 5.5.1)

Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	230	1.06	0	0.0049	-137.5301	0.0052	140.5711	0.0019	-64.1316	0.0274	168.5666	2.8664	3	0.9555
2	230	1.045	-3.7693	0.0051	-139.122	0.0053	138.5844	0.0018	-66.3645	0.0252	166.5567	2.6510	3	0.8837
3	230	0.9995	-7.3605	0.0053	-150.2988	0.0051	123.2095	0.0014	-89.1771	0.0158	140.6728	1.7805	3	0.5935
4	230	1.0062	-8.2055	0.0061	-141.1057	0.0058	136.3594	0.0013	-68.284	0.0119	165.8555	1.7281	3	0.5760
5	230	1.0154	-8.3839	0.007	-134.4114	0.0064	146.2493	0.0013	-50.7932	0.0086	-164.2106	1.6443	3	0.5481
6	115	1.07	-13.8806	0.003	-153.6181	0.0025	118.7827	0.0003	-77.3251	0.0019	178.7864	0.4909	3	0.1636
7	33	0.9938	-7.845	0.0051	-153.75	0.005	118.3833	0.0013	-96.7349	0.0153	131.7613	1.7381	3	0.5794
8	115	0.99	-16.7929	0.003	179.4084	0.0026	75.6837	0.0003	-172.8528	0.0015	44.4687	0.4287	3	0.1429
9	115	0.9832	-16.4458	0.0036	-179.9427	0.0034	76.0939	0.0005	-174.0397	0.0033	46.4663	0.6190	3	0.2063
10	115	0.99	-16.2501	0.0034	-178.906	0.0031	77.4518	0.0004	-172.8311	0.0025	45.1664	0.5294	3	0.1765
11	115	1.025	-15.1476	0.0031	-168.3772	0.0026	93.7142	0.0003	-138.0674	0.0009	90.0372	0.4244	3	0.1415
12	115	1.0502	-14.8967	0.0028	-160.5347	0.0023	108.2144	0.0003	-93.5424	0.0014	164.1738	0.4332	3	0.1444
13	115	1.0395	-15.0296	0.0028	-163.2212	0.0022	103.8083	0.0002	-102.0572	0.0012	157.0977	0.4182	3	0.1394

ตารางที่ 5.150 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (กรณี 5.5.1)

Externally Fused : Single Wye Ground										
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
6	11	198	23.8000	3.0587	100	19.8000	18.6421	106.2110	0.5619	1.0302
Externally Fused : Single Wye Unground										
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
6	11	198	23.8000	3.0600	100	19.8000	18.6400	106.2100	0.5619	1.0302
Internally Fused : Single Wye										
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
17	1	51	8.3200	2.0800	400	20.4000	19.5800	104.2000	18.3935	1.0820
21	1	63	6.6400	0.6300	300	18.9000	18.6600	101.2700	21.6588	1.0314
34	1	102	4.1600	2.0800	200	20.4000	19.5800	104.2000	36.7869	1.0820

ตารางที่ 5.150 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (ต่อ) (กรณี 5.5.1)

Fuseless: Single Wye											
S	Section	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
10	8	1	30	14.4000	3.9200	700	21	19.4400	108	10.7454	1.0745
17	4	1	51	8.3200	2.0800	400	20.4	19.5800	104.2000	18.3935	1.0820
21	3	1	63	6.6400	0.6300	300	18.9	18.6600	101.2700	21.6588	1.0314
34	2	1	102	4.1600	2.0800	200	20.4	19.5800	104.2000	36.7869	1.0820

ตารางที่ 5.151 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 (กรณี 5.5.1)

Internally Fused : Single Wye											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
14	1	42	9.9600	2.7400	300	12.6000	11.9400	105.5500	9.6262	0.6876	
21	1	63	6.6400	2.7400	200	12.6000	11.9400	105.5500	14.4392	0.6876	
Fuseless : Single Wye											
S	Section	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	ΔV_s (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
7	11	1	21	19.9200	2.7400	600	12.6000	11.9400	105.5500	4.8131	0.6876
14	5	1	42	9.9600	2.7400	300	12.6000	11.9400	105.5500	9.6262	0.6876
21	3	1	63	6.6400	2.7400	200	12.6000	11.9400	105.5500	14.4392	0.6876
29	2	1	87	4.8000	2.5600	150	13.0500	12.4100	105.1800	20.7233	0.7146

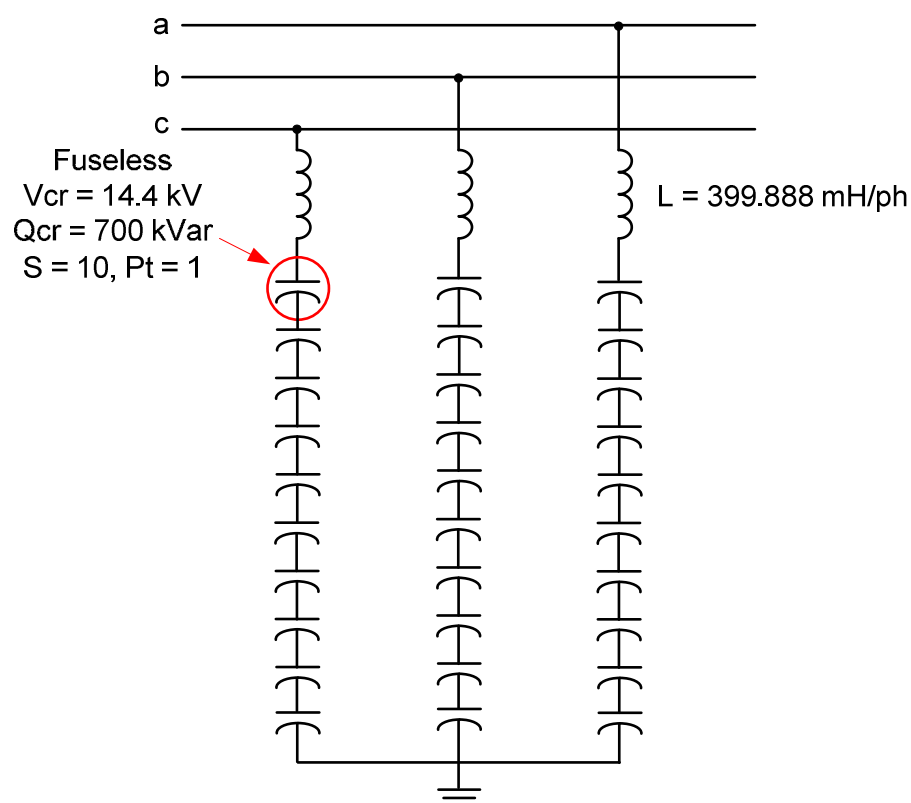
ตารางที่ 5.152 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.5.1)

Internally Fused : Single Wye											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	Δ Vs (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
14	1	42	9.9600	4.1200	200	8.4000	7.7500	108.4200	6.4174	0.4584	
Fuseless : Single Wye											
S	Section	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	Δ Vs (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
7	11	1	21	19.9200	4.1200	400	8.4000	7.7500	108.4200	3.2087	0.4584
14	5	1	42	9.9600	4.1200	200	8.4000	7.7500	108.4200	6.4174	0.4584
17	4	1	51	7.9600	1.0500	150	7.6500	7.4900	102.1100	7.5356	0.4433
18	4	1	54	7.6200	2.4200	150	8.1000	7.7200	104.9000	8.2230	0.4568

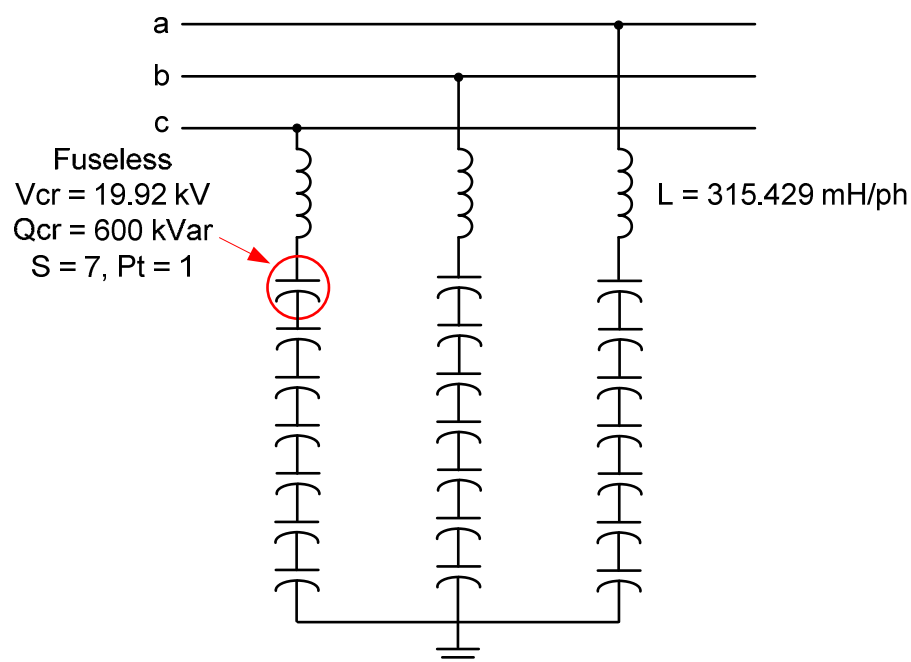
ตารางที่ 5.153 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง (กรณี 5.5.1)

Unit Filter	Type of Capacitor	Total Capacitance (uF)	C (Filter Design , uF)	Icr(A)	Ic1_rms(A)	Ic1/Icr
1 (C1)	Fuseless : Single Wye (1)	1.0745	1.053	48.61	58.68	1.21
2 (C1)	Fuseless : Single Wye (1)	0.6876	0.695	30.12	36.55	1.21
3 (C1)	Fuseless : Single Wye (1)	0.4584	0.447	20.08	22.79	1.13

* (1) หมายถึงการใช้ผลลัพธ์ในบรรทัดที่ 1

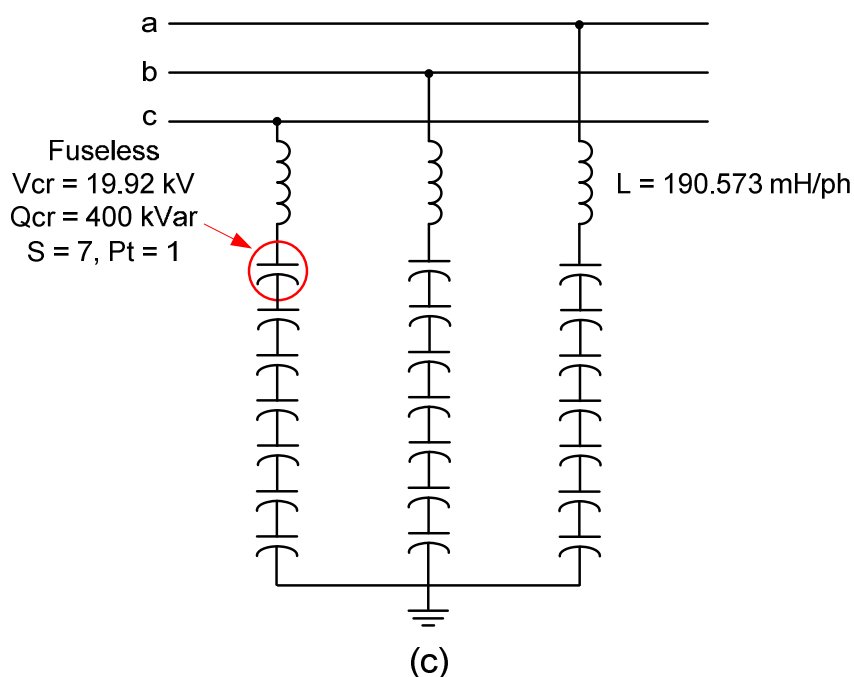


(a)



(b)

รูปที่ 5.31 แสดงวงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (b) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7



รูปที่ 5.31 แสดงวงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (c) แบบปรับคลื่นเดียวโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (ต่อ)

จากตารางที่ 5.149 จะเห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 เข้าที่บัส 5 ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 5 ลดลงเหลือ 0.5481 เท่าซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

จากตารางที่ 5.150–5.152 จะเห็นว่าสามารถออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับแต่ละตัวกรองฮาร์มอนิกได้หลายแบบ ซึ่งในแต่ละแบบนั้นจะได้ค่าความจุไฟฟ้ารวมที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าของตัวกรองฮาร์มอนิกที่ได้ออกแบบไว้ในตารางที่ 5.147

เมื่อออกแบบชุดตัวเก็บประจุเสร็จสิ้น จากนั้นทดลองนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุทดลองใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองเพื่อทดสอบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุยังคงทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด ในการทดลองนี้จะเลือกใช้ชุดตัวเก็บประจุเพียงหนึ่งแบบจากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุในแต่ละตัวกรองเพื่อแสดงผล โดยหลักการในการเลือกคือ เลือกชุดตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุไฟฟ้ารวมใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้ออกแบบในตารางที่ 5.147 และชุดตัวเก็บประจุนั้นจะต้องไม่เกิดภาวะไหลดเกินเมื่อติดตั้งเข้าสู่ระบบ ผลลัพธ์การเลือกชุดตัวเก็บประจุแสดงในตารางที่ 5.153 ตารางที่ 5.154 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันกรณีต่าง ๆ และ กำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.155

ตารางที่ 5.154 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.5.1)

Bus	%THDv		
	Filter Design	Capacitor Design	ER G5/4
1	2.8664	2.9354	3
2	2.6510	2.7236	3
3	1.7805	1.8618	3
4	1.7281	1.8211	3
5	1.6443	1.7551	3
6	0.4909	0.5504	3
7	1.7381	1.8185	3
8	0.4287	0.5000	3
9	0.6190	0.6964	3
10	0.5294	0.6065	3
11	0.4244	0.4984	3
12	0.4332	0.4933	3
13	0.4182	0.4808	3

ตารางที่ 5.155 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.5.1)

H order	Loss (W)		
	Unit1	Unit2	Unit 3
Fund	23,194	9,948.3	4,178.82
5	12,110.16	98.42	14.91
7	25.34	4,926.04	17.05
11	0.77	2.34	1,175.28
13	6.94	17.24	243.28
17	0.87	1.83	9.56
19	0.77	1.56	6.81
23	0.52	1.01	3.67
25	0.38	0.73	2.5
29	0.27	0.5	1.58
31	0.13	0.24	0.74
35	0.04	0.06	0.19
37	0.02	0.04	0.12
รวม	35,340.21	14,998.3	5,654.52

5.5.2. ใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองผ่านสูงลำดับสองในการกรองฮาร์มอนิก

กรณีนี้จะใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยว (ST) จำนวนสองชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 ใช้ตัวกรองแบบผ่านสูงอันดับสอง (2HP) จำนวนหนึ่งชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟให้กับแต่ละตัวกรองจะเหมือนกรณี 5.5.1 ซึ่งทั้งสามชุดทำการติดตั้งเข้าที่บัส 5 ผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.156 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์และฮาร์มอนิกโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 5 แสดงในตารางที่ 5.157 และ 5.158 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.159 และรูปที่ 5.32 แสดงตัวอย่างวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกโดยรูปแบบการต่อชุดตัวเก็บประจุเป็นไปตามตารางที่ 5.159

ตารางที่ 5.156 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.5.2)

Type	Bus	kV	H	MVar	TP (Hz)	Qf	C1(uF)	VC1(kV)	L(mH)	R(ohm)
ST	5	230	5	18.3	245	60	1.055	239.996	399.888	10.26
ST	5	230	7	11.8	340	60	0.695	235.084	315.429	11.231
2HP	5	230	11	7.5	545	2	0.447	231.952	190.573	1305.18

ตารางที่ 5.157 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 5 (กรณี 5.5.2)

Bus	Nominal V (kV)	V _{mag} (p.u.)	θ (deg)	P _{load} (MW)	Q _{load} (MVar)	P _{gen} (MW)	Q _{gen} (MVar)
1	230	1.0600	0	0	0	192.81	-5.39
2	230	1.0450	-3.7691	0	0	18.3	36.81
3	230	0.9995	-7.3602	0	0	0	0
4	230	1.0062	-8.2052	27.8	16.9	0	0
5	230	1.0154	-8.3835	77.6	39.1	0	37.6
6	115	1.0700	-13.8801	0	0	11.2	57.35
7	33	0.9939	-7.8447	30	20	0	0
8	115	0.9900	-16.7924	14.9	5	0	0
9	115	0.9832	-16.4454	29.5	16.6	0	6.12
10	115	0.9900	-16.2497	9	5.8	0	0
11	115	1.0250	-15.1471	3.5	1.8	0	0
12	115	1.0502	-14.8962	6.1	1.6	0	0
13	115	1.0395	-15.0291	13.50	5.8	0	0

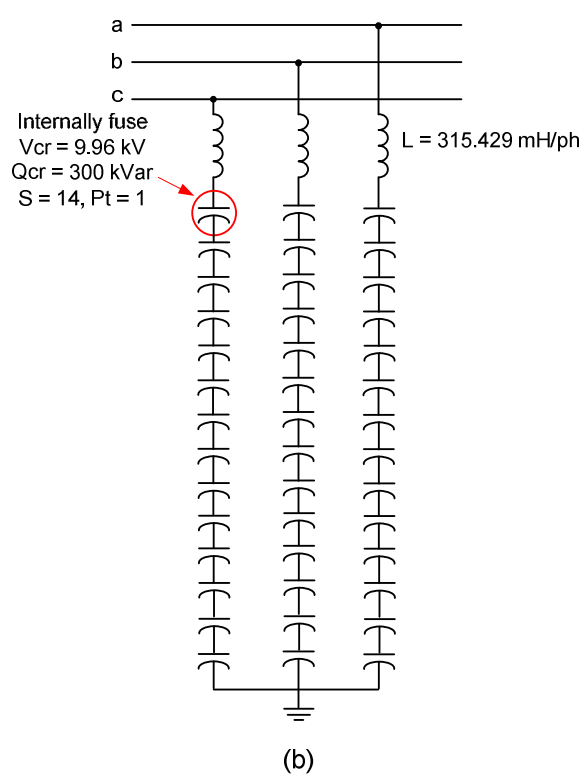
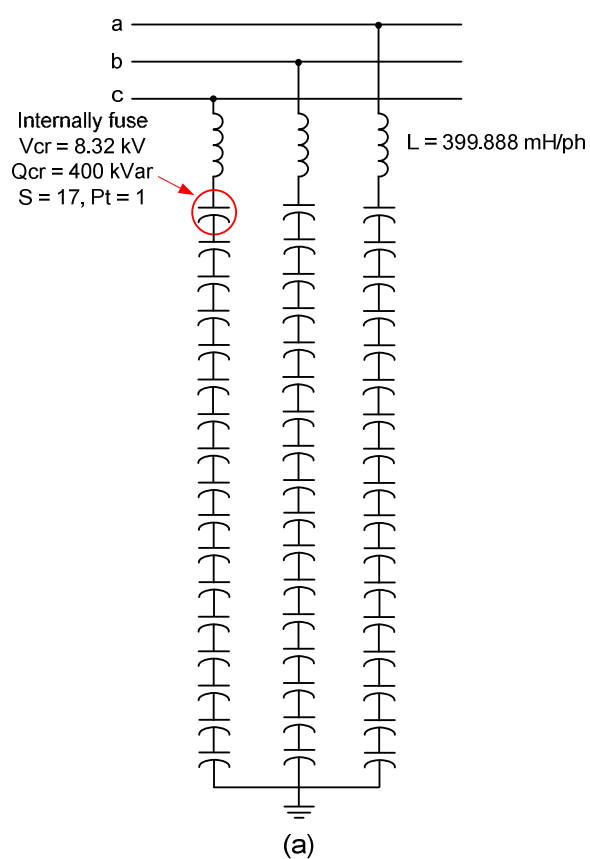
ตารางที่ 5.158 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโวลต์ (กรณี 5.5.2)

Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	230	1.06	0	0.0049	-137.5748	0.0051	140.1926	0.0184	-108.6996	0.0202	138.0537	2.8207	3	0.9402
2	230	1.045	-3.7691	0.0051	-139.1668	0.0053	138.2059	0.0177	-110.9325	0.0186	136.0438	2.6603	3	0.8868
3	230	0.9995	-7.3602	0.0052	-150.3435	0.005	122.831	0.0135	-133.7451	0.0117	110.1598	1.9443	3	0.6481
4	230	1.0062	-8.2052	0.0061	-141.1504	0.0057	135.9809	0.0129	-112.852	0.0088	135.3426	1.9048	3	0.6349
5	230	1.0154	-8.3835	0.007	-134.4561	0.0063	145.8708	0.0122	-95.3612	0.0063	165.2764	1.8568	3	0.6189
6	115	1.07	-13.8801	0.003	-153.6628	0.0024	118.4042	0.0031	-121.8931	0.0014	148.2734	0.5335	3	0.1778
7	33	0.9938	-7.8447	0.0051	-153.7948	0.0049	118.0049	0.0131	-141.3029	0.0113	101.2483	1.9015	3	0.6338
8	115	0.99	-16.7924	0.003	179.3636	0.0025	75.3052	0.003	142.5792	0.0011	13.9557	0.5116	3	0.1705
9	115	0.9832	-16.4454	0.0036	-179.9874	0.0034	75.7155	0.0052	141.3923	0.0025	15.9534	0.7785	3	0.2595
10	115	0.99	-16.2497	0.0034	-178.9508	0.003	77.0734	0.0042	142.6009	0.0018	14.6534	0.6530	3	0.2177
11	115	1.025	-15.1471	0.0031	-168.422	0.0025	93.3358	0.0025	177.3646	0.0007	59.5243	0.4762	3	0.1587
12	115	1.0502	-14.8962	0.0028	-160.5794	0.0022	107.836	0.0025	-138.1104	0.0011	133.6608	0.4692	3	0.1564
13	115	1.0395	-15.0291	0.0028	-163.266	0.0022	103.4298	0.0023	-146.6253	0.0009	126.5847	0.4517	3	0.1506

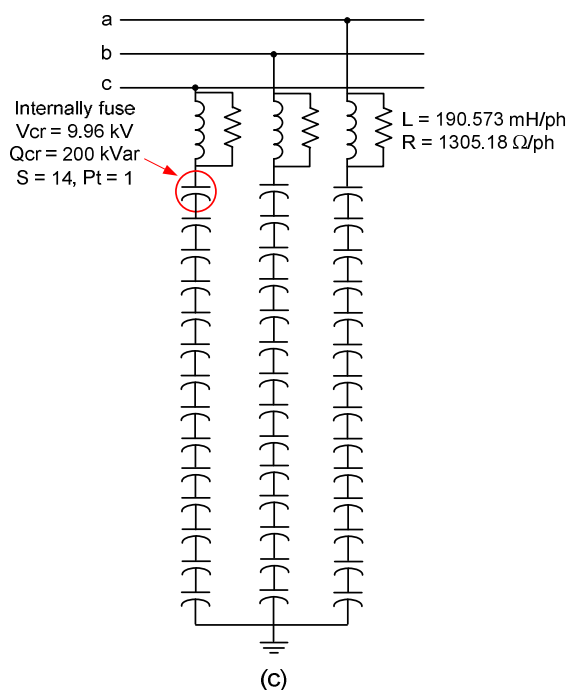
ตารางที่ 5.159 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง (กรณี 5.5.2)

Unit Filter	Type of Capacitor	Total Capacitance (uF)	C (Filter Design , uF)	Icr(A)	Ic1_rms(A)	Ic1/Icr
1 (C1)	Int : Single Wye (1)	1.0820	1.053	48.08	58.93	1.23
2 (C1)	Int : Single Wye (1)	0.6876	0.695	30.12	36.64	1.22
3 (C1)	Int : Single Wye (1)	0.4584	0.447	20.08	20.66	1.03

* (1) หมายถึงการใช้ผลลัพธ์ในบรรทัดที่ 1



รูปที่ 5.32 แสดงวงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (b) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7



รูปที่ 5.32 แสดงวงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (c) แบบผ่านสูงอันดับสองโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (ต่อ)

จากตารางที่ 5.158 จะเห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 เข้าที่บัส 5 ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 5 ลดลงเหลือ 0.6189 เท่าซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

จากตารางที่ 5.156 จะเห็นว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองมีค่าเหมือนกับพารามิเตอร์ในตารางที่ 5.147 (กรณีที่ 5.5.1) ยกเว้นค่าความต้านทานของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ซึ่งทำให้การออกแบบชุดตัวเก็บประจุสามารถออกแบบได้เหมือนกับตารางที่ 5.150-5.152

เมื่อออกแบบตัวเก็บประจุเสร็จสิ้น จากนั้นทดลองนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุทดลองใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองเพื่อทดสอบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจื่อยังคงทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด โดยในตอนนี้จะทำการเลือกให้ชุดตัวเก็บประจุเพียงหนึ่งแบบจากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุในแต่ละตัวกรองเพื่อแสดงผล โดยหลักการในการเลือกคือ เลือกชุดตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุไฟฟ้าวรวมใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้ออกแบบในตารางที่ 5.147 และชุดตัวเก็บประจุนั้นจะต้องไม่เกิดภาวะโหลดเกินเมื่อติดตั้งเข้าสู่ระบบ ผลลัพธ์การเลือกชุดตัวเก็บประจุแสดงในตารางที่ 5.159 ตารางที่ 5.160 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันกรณีต่าง ๆ และ กำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.161

ตารางที่ 5.160 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.5.2)

Bus	%THDv		
	Filter Design	Capacitor Design	ER G5/4
1	2.8207	2.8441	3
2	2.6603	2.6913	3
3	1.9443	2.0040	3
4	1.9048	1.9940	3
5	1.8568	1.9772	3
6	0.5335	0.6117	3
7	1.9015	1.9611	3
8	0.5116	0.5994	3
9	0.7785	0.8629	3
10	0.6530	0.7423	3
11	0.4762	0.5745	3
12	0.4692	0.5498	3
13	0.4517	0.5366	3

ตารางที่ 5.161 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.5.2)

H order	Loss (W)		
	Unit1	Unit2	Unit 3
Fund	23,538.1	9,950.26	1,050.81
5	12,053.15	119.99	105.49
7	25.02	4,926.04	160.95
11	20.98	63.63	8,264.76
13	3.63	9.04	2017.19
17	0.83	1.75	521.9
19	0.64	1.3	441.76
23	0.31	0.59	263.82
25	0.22	0.41	207.44
29	0.14	0.26	166.96
31	0.07	0.13	96.86
35	0.02	0.04	36.03
37	0.01	0.03	26.57
รวม	35,643.12	15,073.47	13,360.54

5.5.3. ใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองผ่านสูงอันดับสามในการกรองฮาร์มอนิก

กรณีนี้จะใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยว (ST) จำนวนสองชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 ใช้ตัวกรองแบบผ่านสูงอันดับสาม (3HP) จำนวนหนึ่งชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟให้กับแต่ละตัวกรองจะเหมือนกับกรณี 5.4.1 ซึ่งทั้งสามชุดทำการติดตั้งเข้าที่บัส 5 ผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.162 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์และฮาร์มอนิกโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 5 แสดงในตารางที่ 5.163 และ 5.164 ผลลัพธ์การออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองอันดับที่ 11 แสดงในตารางที่ 5.165-5.166 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.167 และรูปที่ 5.33 แสดงตัวอย่างวงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกโดยรูปแบบการต่อชุดตัวเก็บประจุเป็นไปตามตารางที่ 5.167

ตารางที่ 5.162 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.5.3)

Type	h	MVar	TP (Hz)	Qf	C1(uF)	VC1(kV)	C2(uF)	VC2(kV)	L(mH)	R(ohm)
ST	5	18.3	245	60	1.055	239.996	-	-	399.888	10.26
ST	7	11.8	340	60	0.695	235.084	-	-	315.429	11.231
3HP	11	7.5	545	2	0.447	231.969	0.447	1.937	190.587	1305.27

ตารางที่ 5.163 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดโพลาร์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 5 (กรณี 5.5.3)

Bus	Nominal V (kV)	V _{mag} (p.u.)	θ (deg)	P _{load} (MW)	Q _{load} (MVar)	P _{gen} (MW)	Q _{gen} (MVar)
1	230	1.0600	0	0	0	192.81	-5.39
2	230	1.0450	-3.7690	0	0	18.3	36.8
3	230	0.9995	-7.3601	0	0	0	0
4	230	1.0062	-8.2050	27.8	16.9	0	0
5	230	1.0154	-8.3833	77.6	39.1	0	37.6
6	115	1.0700	-13.8800	0	0	11.2	57.35
7	33	0.9939	-7.8446	30	20	0	0
8	115	0.9900	-16.7923	14.9	5	0	0
9	115	0.9832	-16.4453	29.5	16.6	0	6.12
10	115	0.9900	-16.2495	9	5.8	0	0
11	115	1.0250	-15.1470	3.5	1.8	0	0
12	115	1.0502	-14.8961	6.1	1.6	0	0
13	115	1.0395	-15.0290	13.5	5.8	0	0

ตารางที่ 5.164 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโวลต์ (กรณี 5.5.3)

Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	230	1.06	0	0.0049	-137.5801	0.0052	139.879	0.0182	-96.1883	0.0225	139.859	2.9851	3	0.9950
2	230	1.045	-3.769	0.0051	-139.1721	0.0053	137.8922	0.0176	-98.4213	0.0207	137.8491	2.8052	3	0.9351
3	230	0.9995	-7.3601	0.0053	-150.3488	0.0051	122.5174	0.0134	-121.2338	0.013	111.9652	2.0236	3	0.6745
4	230	1.0062	-8.205	0.0061	-141.1557	0.0058	135.6673	0.0128	-100.3408	0.0098	137.1479	1.9596	3	0.6532
5	230	1.0154	-8.3833	0.007	-134.4614	0.0064	145.5571	0.0121	-82.85	0.007	167.0817	1.8999	3	0.6333
6	115	1.07	-13.88	0.003	-153.6681	0.0024	118.0906	0.0031	-109.3818	0.0016	150.0787	0.5425	3	0.1808
7	33	0.9938	-7.8446	0.0051	-153.8001	0.005	117.6912	0.013	-128.7916	0.0126	103.0536	1.9786	3	0.6595
8	115	0.99	-16.7923	0.003	179.3583	0.0025	74.9915	0.003	155.0904	0.0013	15.7611	0.5146	3	0.1715
9	115	0.9832	-16.4453	0.0036	-179.9927	0.0034	75.4018	0.0052	153.9036	0.0028	17.7587	0.7872	3	0.2624
10	115	0.99	-16.2495	0.0034	-178.9561	0.0031	76.7597	0.0042	155.1121	0.002	16.4587	0.6585	3	0.2195
11	115	1.025	-15.147	0.0031	-168.4273	0.0026	93.0221	0.0024	-170.1242	0.0007	61.3296	0.4787	3	0.1596
12	115	1.0502	-14.8961	0.0028	-160.5847	0.0023	107.5223	0.0025	-125.5991	0.0012	135.4661	0.4758	3	0.1586
13	115	1.0395	-15.029	0.0028	-163.2713	0.0022	103.1162	0.0023	-134.114	0.001	128.39	0.4572	3	0.1524

ตารางที่ 5.165 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.5.3)

Internally Fused : Single Wye											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	Δ Vs (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
14	1	42	9.9600	4.1200	200	8.4000	7.7500	108.4000	6.4174	0.4584	
Fuseless : Single Wye											
S	section	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	Δ Vs (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
7	11	1	21	19.9200	4.1200	400	8.4000	7.7500	108.4000	3.2087	0.4584
14	5	1	42	9.9600	4.1200	200	8.4000	7.7500	108.4000	6.4174	0.4584
17	4	1	51	7.9600	1.0400	150	7.6500	7.4900	102.0900	7.5356	0.4433
18	4	1	54	7.6200	2.4100	150	8.1000	7.7200	104.8900	8.2230	0.4568

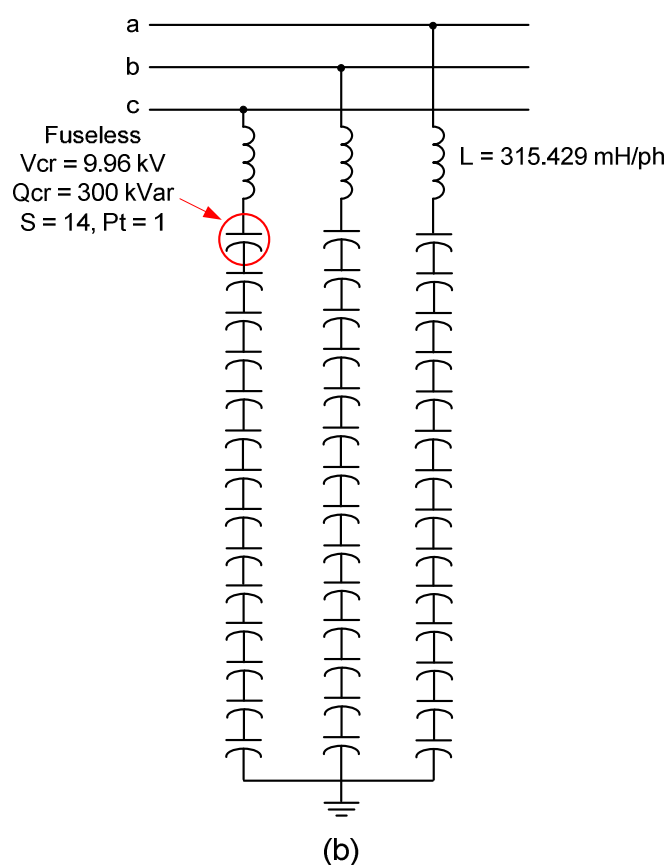
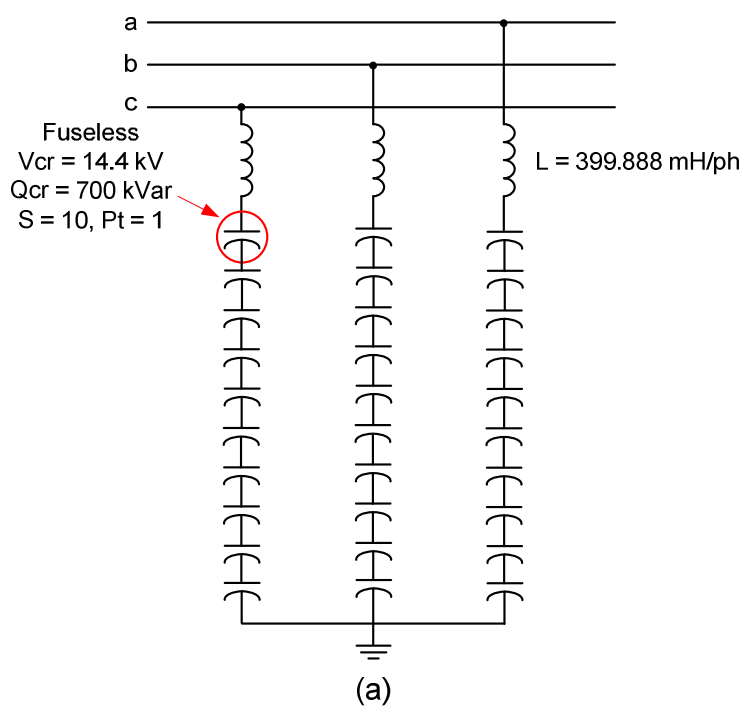
ตารางที่ 5.166 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C2) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.5.3)

Single Wye										
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	Δ Vs (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
2	1	6	13.2700	1,086	50	0.3000	0.000533	56,320	0.9038	0.4519

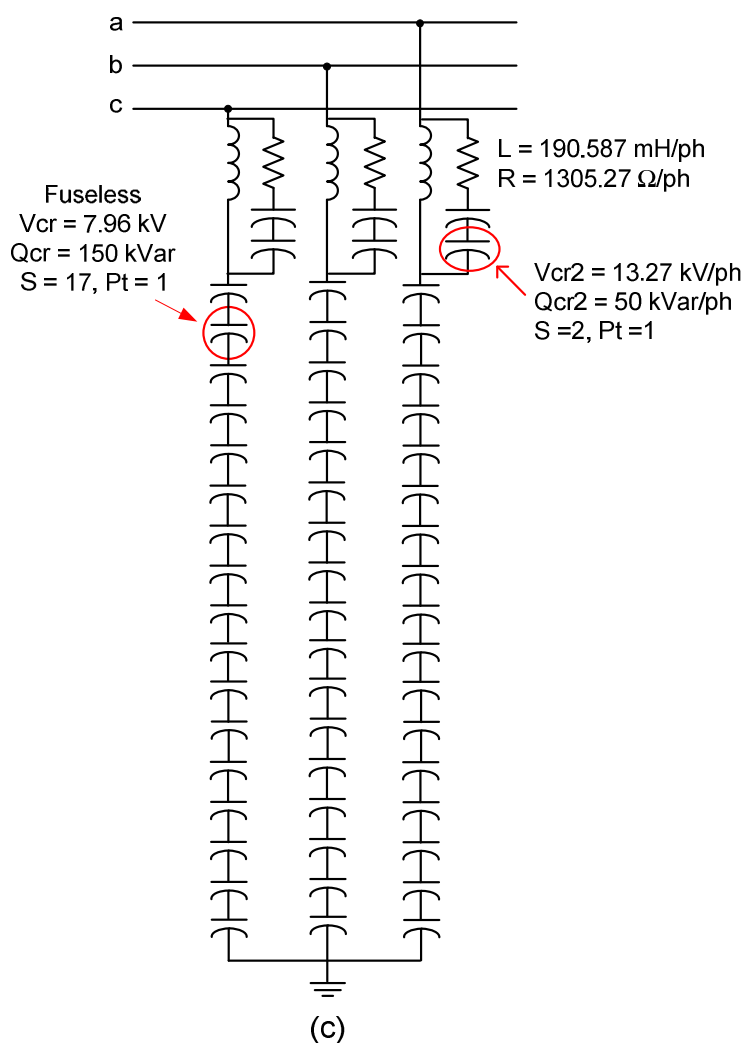
ตารางที่ 5.167 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง (กรณี 5.5.3)

Unit Filter	Type of Capacitor	Total Capacitance (uF)	C (Filter Design , uF)	Icr(A)	Ic_rms(A)	Ic/Icr
1 (C1)	Fuseless : Single Wye (1)	1.0745	1.053	48.61	58.69	1.21
2 (C1)	Fuseless : Single Wye (2)	0.6876	0.695	30.12	36.62	1.22
3 (C1)	Fuseless : Single Wye (3)	0.4433	0.447	18.84	19.77	1.05
3 (C2)	Single Wye	0.4519	0.447	3.77	2.96	0.78

* (2) หมายถึงการใช้ผลลัพธ์ในบรรทัดที่ 2



รูปที่ 5.33 แสดงวงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (b) แบบปรับคลื่นเดี่ยวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7



รูปที่ 5.33 แสดงวงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (c) แบบผ่านสูงอันดับสามโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (ต่อ)

จากตารางที่ 5.164 จะเห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 เข้าที่บัส 5 ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 5 ลดลงเหลือ 0.6333 เท่าซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

จากตารางที่ 5.162 จะเห็นว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองมีค่าเหมือนกับพารามิเตอร์ในตารางที่ 5.147 (กรณีนี้ที่ 5.5.1) ยกเว้นพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ซึ่งทำให้การออกแบบชุดตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 5 สามารถใช้ตารางที่ 5.150 ได้ การออกแบบชุดตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 7 สามารถใช้การออกแบบในตารางที่ 5.151 ได้ ส่วนชุดตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 11 จะทำการออกแบบใหม่

ผลลัพธ์การออกแบบชุดตัวเก็บประจุแสดงในตารางที่ 5.165-5.166 และรูปที่ 5.33 แสดงตัวอย่างวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดียวโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye (b) แบบปรับคลื่นเดียวโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye (c) แบบผ่านสูงอันดับสามโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye เป็นไปตามตารางที่ 5.167

เมื่อออกแบบชุดตัวเก็บประจุเสร็จสิ้น จากนั้นทดลองนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุทดลองใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองเพื่อทดสอบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจยังคงทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด โดยในส่วนนี้จะทำการเลือกใช้ชุดตัวเก็บประจุเพียงหนึ่งแบบจากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุในแต่ละตัวกรองเพื่อแสดงผล โดยหลักการในการเลือกคือ เลือกชุดตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุไฟฟ้ารวมใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้ออกแบบในตารางที่ 5.162 และชุดตัวเก็บประจุนั้นจะต้องไม่เกิดภาวะโหลดเกินเมื่อติดตั้งเข้าสู่ระบบ ผลลัพธ์การเลือกชุดตัวเก็บประจุแสดงในตารางที่ 5.167 ตารางที่ 5.168 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันกรณีต่าง ๆ และ กำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.169

ตารางที่ 5.168 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.5.3)

Bus	%THDv		
	Filter Design	Capacitor Design	ER G5/4
1	2.9851	3.0034	3
2	2.8052	2.8288	3
3	2.0236	2.0660	3
4	1.9596	2.0211	3
5	1.8999	1.9811	3
6	0.5425	0.5938	3
7	1.9786	2.0207	3
8	0.5146	0.5725	3
9	0.7872	0.8430	3
10	0.6585	0.7173	3
11	0.4787	0.5436	3
12	0.4758	0.5288	3
13	0.4572	0.5131	3

ตารางที่ 5.169 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.5.3)

H order	Loss (W)		
	Unit1	Unit2	Unit 3
Fund	23,189.44	9,946.34	33.28
5	12,110.16	98.42	53.18
7	25.34	4,926.04	178.57
11	21.4	64.7	7,777.84
13	4.49	11.16	1,743.26
17	0.95	2.01	454.62
19	0.74	1.49	404.79
23	0.34	0.66	251.6
25	0.24	0.46	204.51
29	0.15	0.28	161.28
31	0.07	0.13	88.89
35	0.02	0.04	33.69
37	0.01	0.03	25.02
รวม	35,353.36	15,051.75	11,410.52

5.5.4. ใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยวร่วมกับตัวกรองผ่านสูงชนิดซีในการกรองฮาร์มอนิก

กรณีนี้จะใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยว (ST) จำนวนสองชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 ใช้ตัวกรองแบบผ่านสูงชนิดซี (CT) จำนวนหนึ่งชุดเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 โดยการแบ่งค่ากำลังรีแอกทีฟให้กับแต่ละตัวกรองจะเหมือนกรณี 5.5.1 ซึ่งทั้งสามชุดทำการติดตั้งเข้าที่บัส 5 ผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.170 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดไฟลว์และฮาร์มอนิกไฟลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองทั้งหมดที่บัส 5 แสดงในตารางที่ 5.171 และ 5.172 ผลลัพธ์การออกแบบชุดตัวเก็บประจุสำหรับตัวกรองอันดับที่ 11 แสดงในตารางที่ 5.173-5.174 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.175 และรูปที่ 5.34 แสดงตัวอย่างวงจรมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกโดยรูปแบบการต่อชุดตัวเก็บประจุเป็นไปตามตารางที่ 5.175

ตารางที่ 5.170 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 (กรณี 5.5.4)

Type	h	MVar	TP (Hz)	Qf	C1(uF)	VC1(kV)	C2(uF)	VC2(kV)	L(mH)	R(ohm)
ST	5	18.3	245	60	1.055	239.996	-	-	399.888	10.26
ST	7	11.8	340	60	0.695	235.084	-	-	315.429	11.231
CT	11	7.5	545	2	0.451	230.000	53.166	1.952	190.573	1305.18

ตารางที่ 5.171 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์โหลดไฟลว์เมื่อติดตั้งตัวกรองจำนวน 3 ชุดที่บัส 5 (กรณี 5.5.4)

Bus	Nominal V (kV)	V _{mag} (p.u.)	θ (deg)	P _{load} (MW)	Q _{load} (MVar)	P _{gen} (MW)	Q _{gen} (MVar)
1	230	1.0600	0	0	0	192.81	-5.39
2	230	1.0450	-3.7690	0	0	18.3	36.8
3	230	0.9995	-7.3601	0	0	0	0
4	230	1.0062	-8.2050	27.8	16.9	0	0
5	230	1.0154	-8.3833	77.6	39.1	0	37.6
6	115	1.0700	-13.8800	0	0	11.2	57.35
7	33	0.9939	-7.8446	30	20	0	0
8	115	0.9900	-16.7923	14.9	5	0	0
9	115	0.9832	-16.4453	29.5	16.6	0	6.12
10	115	0.9900	-16.2495	9	5.8	0	0
11	115	1.0250	-15.1470	3.5	1.8	0	0
12	115	1.0502	-14.8961	6.1	1.6	0	0
13	115	1.0395	-15.0290	13.5	5.8	0	0

ตารางที่ 5.172 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโพลาร์ (กรณี 5.5.4)

Bus	kV	V_1	θ_1	V_5	θ_5	V_7	θ_7	V_{11}	θ_{11}	V_{13}	θ_{13}	%THDv	ER G5/4	%THDv/(G5/4)
1	230	1.06	0	0.0049	-137.5713	0.0051	140.2005	0.0182	-108.7515	0.0202	138.2555	2.8108	3	0.9369
2	230	1.045	-3.769	0.0051	-139.1633	0.0053	138.2138	0.0176	-110.9845	0.0185	136.2456	2.6505	3	0.8835
3	230	0.9995	-7.3601	0.0052	-150.34	0.0051	122.8389	0.0134	-133.7971	0.0116	110.3616	1.9364	3	0.6455
4	230	1.0062	-8.205	0.0061	-141.1469	0.0057	135.9888	0.0128	-112.904	0.0088	135.5444	1.8979	3	0.6326
5	230	1.0154	-8.3833	0.007	-134.4526	0.0063	145.8787	0.0121	-95.4132	0.0063	165.4782	1.8506	3	0.6169
6	115	1.07	-13.88	0.003	-153.6594	0.0024	118.4121	0.0031	-121.9451	0.0014	148.4752	0.5323	3	0.1774
7	33	0.9938	-7.8446	0.0051	-153.7913	0.0049	118.0128	0.013	-141.3549	0.0113	101.4501	1.8937	3	0.6312
8	115	0.99	-16.7923	0.003	179.3671	0.0025	75.3131	0.003	142.5272	0.0011	14.1575	0.5103	3	0.1701
9	115	0.9832	-16.4453	0.0036	-179.9839	0.0034	75.7234	0.0052	141.3403	0.0025	16.1552	0.7757	3	0.2586
10	115	0.99	-16.2495	0.0034	-178.9473	0.003	77.0813	0.0042	142.5489	0.0018	14.8552	0.6509	3	0.2170
11	115	1.025	-15.147	0.0031	-168.4185	0.0025	93.3436	0.0024	177.3126	0.0007	59.7261	0.4753	3	0.1584
12	115	1.0502	-14.8961	0.0028	-160.5759	0.0022	107.8438	0.0025	-138.1623	0.0011	133.8626	0.4682	3	0.1561
13	115	1.0395	-15.029	0.0028	-163.2625	0.0022	103.4377	0.0023	-146.6772	0.0009	126.7865	0.4509	3	0.1503

ตารางที่ 5.173 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C1) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.5.4)

Fuseless : Single Wye											
S	section	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	Δ Vs (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)
17	4	1	51	7.9600	1.9000	150	7.6500	7.3700	103.8500	7.5356	0.4433
18	4	1	54	7.6200	3.2900	150	8.1000	7.5900	106.6900	8.2230	0.4568

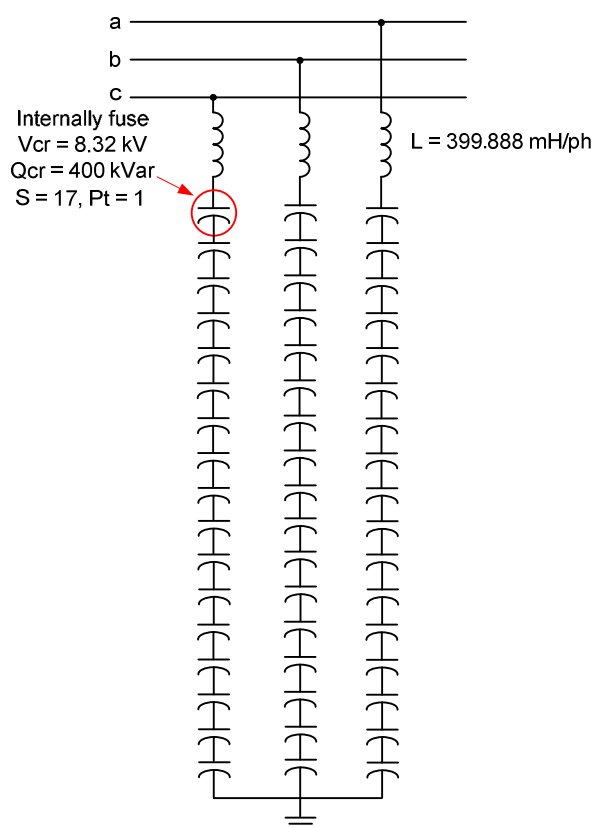
ตารางที่ 5.174 ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง (C2) ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (กรณี 5.5.4)

Single Wye											
S	Pt	Total Cap	Vcr (kV)	Δ Vs (%)	Qcr (kVar)	Qcr_t (MVar)	Qcomp (MVar)	Qcr_t/Qcomp (%)	C_unit (uF)	C_total (uF)	
1	1	3	2.4000	112.96	100	0.3000	0.066151	453.5071	55.2621	55.2621	

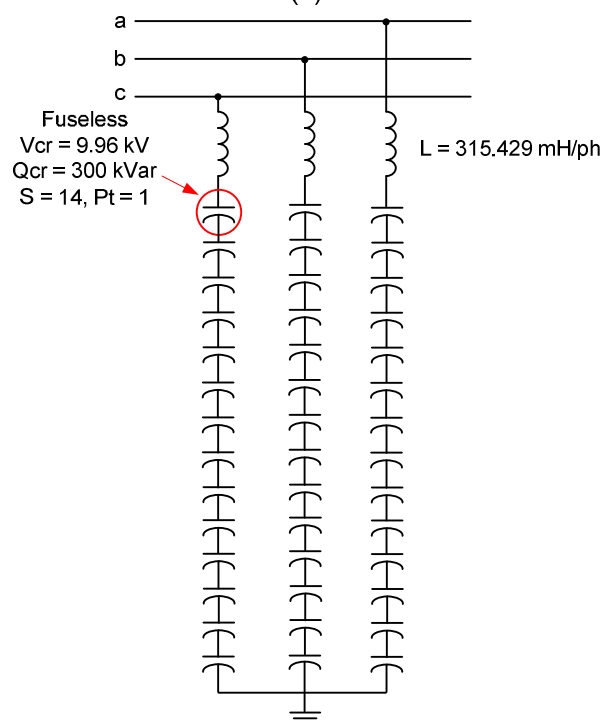
ตารางที่ 5.175 ผลลัพธ์การตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่นำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรอง (กรณี 5.5.4)

Unit Filter	Type of Capacitor	Total Capacitance (uF)	C (Filter Design , uF)	Icr(A)	Ic_rms(A)	Ic/Icr
1 (C1)	Int : Single Wye (1)	1.0820	1.053	48.08	58.93	1.23
2 (C1)	Fuseless : Single Wye (2)	0.6876	0.695	30.12	36.64	1.22
3 (C1)	Fuseless : Single Wye (2)	0.4568	0.451	19.68	20.45	1.04
3 (C2)	Single Wye	55.2621	53.166	41.67	20.22	0.49

* (2) หมายถึงการใช้ผลลัพธ์ในบรรทัดที่ 2

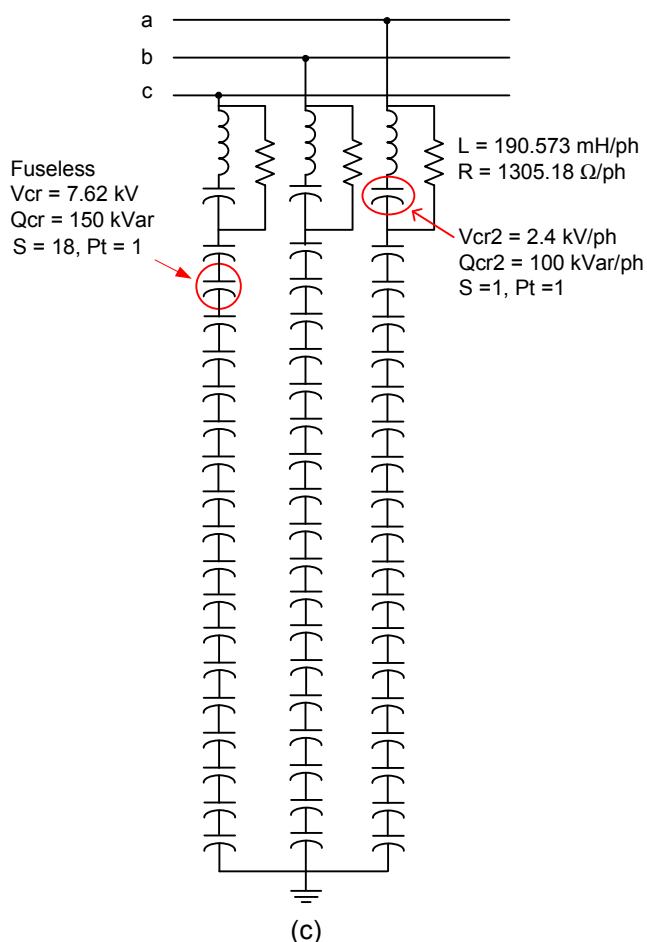


(a)



(b)

รูปที่ 5.34 แสดงวงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดียวโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (b) แบบปรับคลื่นเดียวโดยชุดตัวเก็บประจุต่อแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 7



รูปที่ 5.34 แสดงวงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (c) แบบผ่านสูงชนิดซีโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye กรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 (ต่อ)

จากตารางที่ 5.172 จะเห็นว่าเมื่อทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 เข้าที่บัส 5 ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัส 5 ลดลงเหลือ 0.6169 เท่าซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

จากตารางที่ 5.170 จะเห็นว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวกรองมีค่าเหมือนกับพารามิเตอร์ในตารางที่ 5.147 (กรณีนี้ที่ 5.5.1) ยกเว้นพารามิเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกอันดับที่ 11 ซึ่งทำให้การออกแบบชุดตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 5 สามารถใช้ตารางที่ 5.150 ได้ การออกแบบชุดตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 7 สามารถใช้การออกแบบในตารางที่ 5.151 ได้ ส่วนชุดตัวเก็บประจุของตัวกรองอันดับที่ 11 จะทำการออกแบบใหม่

ผลลัพธ์การออกแบบชุดตัวเก็บประจุแสดงในตารางที่ 5.173-5.174 และรูปที่ 5.34 แสดงตัวอย่างวงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก (a) แบบปรับคลื่นเดียวโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye (b) แบบปรับคลื่นเดียวโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye (c) แบบผ่านสูงชนิดซีโดยต่อชุดตัวเก็บประจุแบบ Single Wye เป็นไปตามตารางที่ 5.175

เมื่อออกแบบชุดตัวเก็บประจุเสร็จสิ้น จากนั้นทดลองนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุทดลองใช้เป็นพารามิเตอร์ของตัวกรองเพื่อทดสอบว่าค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุนั้นจะทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าไม่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนด โดยในส่วนนี้จะทำการเลือกใช้ชุดตัวเก็บประจุเพียงหนึ่งแบบจากการออกแบบชุดตัวเก็บประจุในแต่ละตัวกรองเพื่อแสดงผล โดยหลักการในการเลือกคือ เลือกชุดตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุไฟฟ้ารวมใกล้เคียงกับค่าความจุไฟฟ้าที่ได้ออกแบบในตารางที่ 5.170 และชุดตัวเก็บประจุนั้นจะต้องไม่เกิดภาวะโหลดเกินเมื่อติดตั้งเข้าสู่ระบบ ผลลัพธ์การเลือกชุดตัวเก็บประจุแสดงในตารางที่ 5.175 ตารางที่ 5.176 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันกรณีต่าง ๆ และ กำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิกแสดงในตารางที่ 5.177

ตารางที่ 5.176 ผลการเปรียบเทียบ %THDv ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.5.4)

Bus	%THDv		
	Filter Design	Capacitor Design	ER G5/4
1	2.8108	2.8416	3
2	2.6505	2.6892	3
3	1.9364	2.0034	3
4	1.8979	1.9941	3
5	1.8506	1.9777	3
6	0.5323	0.6117	3
7	1.8937	1.9605	3
8	0.5103	0.5995	3
9	0.7757	0.8632	3
10	0.6509	0.7425	3
11	0.4753	0.5745	3
12	0.4682	0.5498	3
13	0.4509	0.5366	3

ตารางที่ 5.177 ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.5.4)

H order	Loss (W)		
	Unit1	Unit2	Unit 3
Fund	23,533.46	9,948.3	1.48
5	12,053.15	119.99	95.42
7	25.02	4,926.04	151.11
11	20.98	63.63	8231.52
13	3.63	9.04	2,038.19
17	0.83	1.75	525.03
19	0.64	1.3	443.66
23	0.31	0.59	264.5
25	0.22	0.41	207.87
29	0.14	0.26	167.22
31	0.07	0.13	96.99
35	0.02	0.04	36.07
37	0.01	0.03	26.6
รวม	35,638.48	15,071.51	12,285.65

ตารางที่ 5.178 และ 5.179 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันในกรณี 5.5.1-5.5.4 และผลการเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียของแต่ละตัวกรองฮาร์มอนิก

ตารางที่ 5.178 ผลการเปรียบเทียบค่า %THDV ในกรณีต่าง ๆ (กรณี 5.5)

Bus	%THDV			
	5.5.1 (ST)	5.5.2 (ST+2HP)	5.5.3 (ST+3HP)	5.5.4 (ST+CT)
1	2.8664	2.8207	2.9851	2.8108
2	2.6510	2.6603	2.8052	2.6505
3	1.7805	1.9443	2.0236	1.9364
4	1.7281	1.9048	1.9596	1.8979
5	1.6443	1.8568	1.8999	1.8506
6	0.4909	0.5335	0.5425	0.5323
7	1.7381	1.9015	1.9786	1.8937
8	0.4287	0.5116	0.5146	0.5103
9	0.6190	0.7785	0.7872	0.7757
10	0.5294	0.6530	0.6585	0.6509
11	0.4244	0.4762	0.4787	0.4753
12	0.4332	0.4692	0.4758	0.4682
13	0.4182	0.4517	0.4572	0.4509

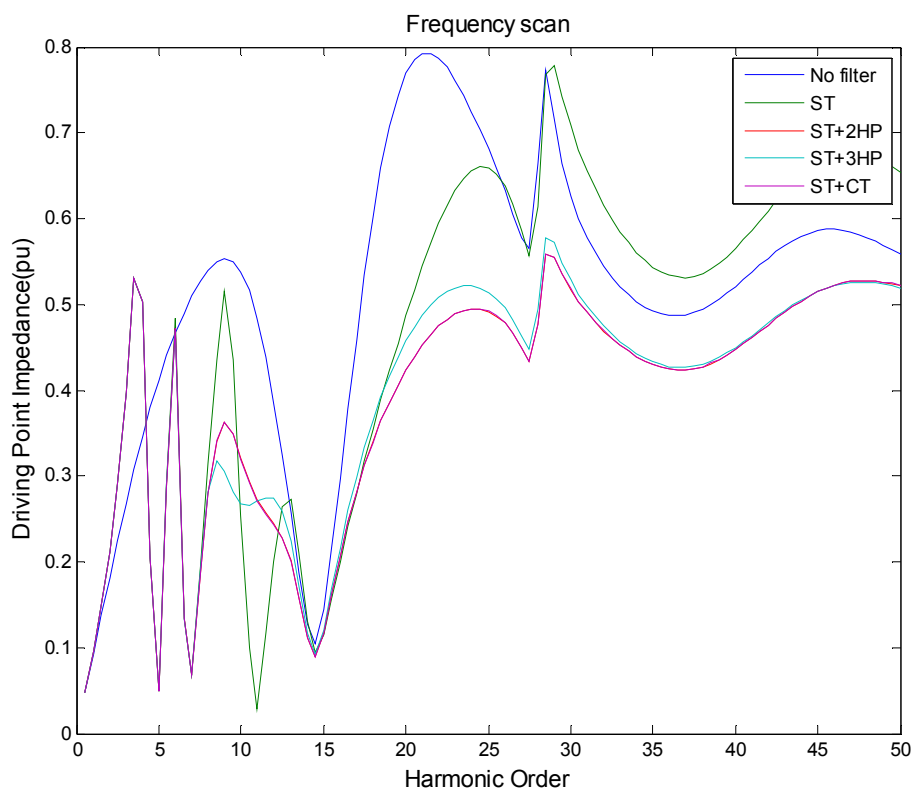
ตารางที่ 5.179 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิก (กรณี 5.5)

Filter Unit	Loss (W) at Fundamental			
	5.5.1 (ST)	5.5.2 (ST+2HP)	5.5.3 (ST+3HP)	5.5.4 (ST+CT)
1	23,194	23,538.1	23,189.44	23,533.46
2	9,948.3	9,950.26	9,946.34	9,948.3
3	4,178.82	1,050.81	33.28	1.48
Filter Unit	Total Loss (W)			
	5.5.1 (ST)	5.5.2 (ST+2HP)	5.5.3 (ST+3HP)	5.5.4 (ST+CT)
1	35,340.21	35,643.12	35,353.36	35,638.48
2	14,998.3	15,073.47	15,051.75	15,071.51
3	5,654.52	13,360.54	11,410.52	12,285.65

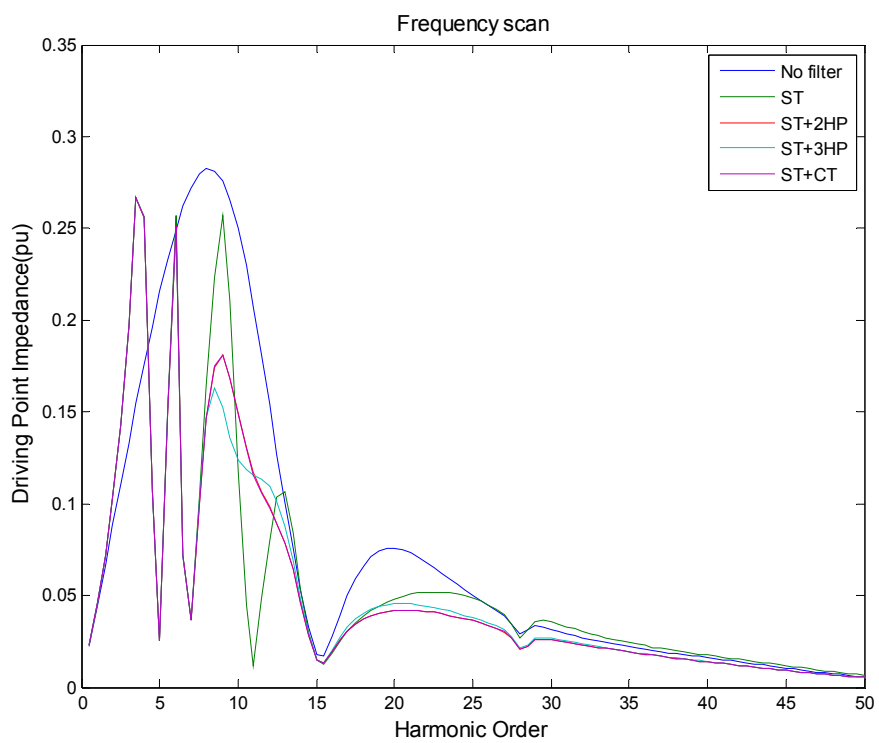
จากตารางที่ 5.178 จะเห็นว่าการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวชนิดเดียวในการกรองฮาร์มอนิกสามารถกรองฮาร์มอนิกได้ดีที่สุด ทำให้ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันที่บัส 5 มีค่าต่ำสุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ๆ

จากตารางที่ 5.179 จะเห็นว่ากำลังสูญเสียที่ความถี่หลักมูลของตัวกรองฮาร์มอนิกผ่านสูงชนิดซีมีค่าน้อยที่สุดเนื่องจากตัวกรองชนิดนี้มีการทำให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมที่ความถี่หลักมูลผ่านตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (C_2) ทำให้มีกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานของตัวกรองน้อยมาก เมื่อพิจารณาค่ากำลังสูญเสียรวมของตัวกรองฮาร์มอนิกจะพบว่าตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดี่ยวมีค่ากำลังสูญเสียรวมน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับตัวกรองชนิดอื่น ๆ กรณีของค่ากำลังสูญเสียรวมของตัวกรองฮาร์มอนิกจะมีความมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองฮาร์มอนิกและอิมพีแดนซ์ของระบบที่ความถี่ต่าง ๆ ที่สูงมากขึ้น โดยในแต่ละความถี่ที่สูงขึ้น ถ้าอิมพีแดนซ์ของระบบมีค่ามากกว่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองฮาร์มอนิกจะทำให้มีกระแสไหลผ่านเข้าตัวกรองฮาร์มอนิกมากกว่าที่จะไหลเข้าสู่ระบบทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองมีค่ามากขึ้น โดยเฉพาะตัวกรองแบบผ่านสูงซึ่งมีค่าความต้านทานสูงเมื่อเทียบกับตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยวจึงทำให้ค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองผ่านสูงมีค่ามากกว่าตัวกรองแบบปรับคลื่นเดี่ยว

รูปที่ 5.35 แสดงอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของบัสที่ 5 ซึ่งเป็นบัสที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่และรูปที่ 5.36 แสดงอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของบัสที่ 9 ซึ่งเป็นบัสที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่ โดยแต่ละรูปจะเปรียบเทียบทั้งหมด 5 กราฟคือ 1) กรณีไม่มีตัวกรองฮาร์มอนิก 2) กรณี ST 3) กรณี ST+2HP 4) กรณี ST+3HP และ 5) กรณี ST+CT โดยแต่ละกรณีจะแสดงความแตกต่างด้วยสีของเส้นแต่ละเส้น จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ที่บัส 5 จะมีค่าต่ำมากที่สุดที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 ทำให้กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านเข้าสู่ตัวกรองมากกว่าที่จะไหลเข้าสู่ระบบ



รูป 5.35 อิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของบัสที่ 5 ซึ่งเป็นบัสที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่ (กรณี 5.5)



รูป 5.36 อิมพีแดนซ์เทียบกับความถี่ของบัสที่ 9 ซึ่งเป็นบัสที่มีตัวเก็บประจุต่ออยู่ (กรณี 5.5)

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแพสซีฟในระบบไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งใช้งานในสภาวะปกติและพิจารณาการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูงที่ใช้กับตัวกรองฮาร์มอนิก ผลการศึกษาได้นำมาสู่การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกชนิด ตัวกรองปรับคลื่นเดียว ตัวกรองผ่านสูงอันดับสอง ตัวกรองผ่านสูงอันดับสาม และ ตัวกรองผ่านสูงชนิดซี พร้อมทั้งพิจารณาถึงการต่อใช้งานของชุดตัวเก็บประจุแรงสูงในรูปแบบต่าง ๆ เช่น Split Wye Equal Leg, Split Wye Unequal Leg และ Single Wye เป็นต้น โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถวิเคราะห์โหลดโพลาร์ที่ความถี่หลักมูลและที่ความถี่ฮาร์มอนิกได้ สามารถเขียนกราฟความผิดเพี้ยนรวมของแรงดัน และสามารถศึกษาการสแกนความถี่ได้

จากการวิเคราะห์และออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าแรงสูงในบทที่ 5 พบว่าในการออกแบบเริ่มจากการหาโหลดโพลาร์ที่ความถี่หลักมูล จากนั้นหาฮาร์มอนิกโพลาร์เพื่อทำการพิจารณาค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันของบัสที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่ว่ามีค่าเกินค่าที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่ ถ้าค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันของบัสที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่มีค่าเกินค่าที่มาตรฐานกำหนดจะทำการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกเพื่อกรองฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ เพื่อลดค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันของบัสนั้นให้มีค่าน้อยกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนด เมื่อทำการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกเสร็จสิ้นจะทำการทดลองติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบโดยส่วนใหญ่จะติดตั้งที่บัสที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่ จากนั้นทำการหาโหลดโพลาร์และฮาร์มอนิกโพลาร์อีกครั้งเพื่อเปรียบเทียบค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันที่บัสนั้นกับค่ามาตรฐาน กรณีที่ทำการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกและติดตั้งเข้าสู่ระบบแล้ว แต่ค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันที่บัสนั้นยังคงมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานกำหนด อาจมีสาเหตุมาจากตัวกรองฮาร์มอนิกที่ออกแบบไว้มีขนาดเล็กเกินไปทำให้ไม่สามารถกรองฮาร์มอนิกได้มากพอที่จะทำให้ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันที่บัสนั้นมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐาน จำเป็นต้องออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกใหม่อีกครั้งโดยจะทำการเพิ่มค่ากำลังรีแอกทีฟหรือแรงดันของตัวเก็บประจุให้สูงขึ้นแล้วทำการออกแบบใหม่ จากนั้นทำการติดตั้งตัวกรองเข้าสู่ระบบและหาโหลดโพลาร์และฮาร์มอนิกโพลาร์ เมื่อค่าความผิดเพี้ยนรวมของแรงดันที่บัสนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนดจะถือว่าการออกแบบพาราเมเตอร์ของตัวกรองฮาร์มอนิกเสร็จสิ้น จากนั้นจะทำการออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูงสำหรับตัวกรองฮาร์มอนิกโดยการออกแบบนี้จะออกแบบตามค่ากำลังรีแอกทีฟและค่าแรงดันของชุดตัวเก็บประจุของแต่ละตัวกรอง ในการออกแบบชุดตัวเก็บประจุนี้บางครั้งสามารถ

ออกแบบได้หลากหลายรูปแบบของการต่อชุดตัวเก็บประจุ ในกรณีออกแบบแล้วได้ผลลัพธ์การต่อชุดตัวเก็บประจุที่ไม่หลากหลายหรือน้อยแบบเกินไป เราสามารถปรับเปลี่ยนค่ากำลังรีแอกทีฟและแรงดันของแต่ละตัวกรองแล้วทดลองออกแบบชุดตัวเก็บประจุอีกครั้ง โดยในการปรับเปลี่ยนค่ากำลังรีแอกทีฟนั้นจะต้องไม่ทำให้ค่าความผิดพลาดที่บัสที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่เกินค่าที่มาตรฐานกำหนดเมื่อออกแบบชุดตัวเก็บประจุเสร็จสิ้นจะถือว่าการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกเป็นการเสร็จสิ้น

ผลลัพธ์การกรองฮาร์มอนิกที่ได้จากการทดลองในบทที่ 5 จะเห็นว่าการใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดียวในการกรองฮาร์มอนิกนั้นจะทำให้สามารถกรองฮาร์มอนิกได้ดีที่สุด ผลการทดลองนี้จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของระบบ พฤติกรรมการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก คือเมื่อทำการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกเสร็จสิ้น แล้วนำไปติดตั้งเข้าระบบ ซึ่งในการติดตั้งนี้จะเป็นการขนานตัวกรองฮาร์มอนิกเข้ากับระบบ ถ้าอิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าน้อยกว่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองฮาร์มอนิกที่ความถี่ใด ๆ จะทำให้กระแสไหลเข้าสู่ตัวกรองฮาร์มอนิกน้อยกว่าไหลเข้าสู่ระบบอาจจะทำให้ประสิทธิภาพการกรองฮาร์มอนิกเปลี่ยนไปได้ ส่วนผลของพฤติกรรมจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจะมีผลต่อผลลัพธ์การกรองฮาร์มอนิกคือ จากการทดลองนี้ใช้แหล่งจ่ายฮาร์มอนิกที่จ่ายกระแสฮาร์มอนิกออกมาเป็นแบบเฉพาะเจาะจงความถี่เช่นจ่ายฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 7 และ 11 เป็นต้น เมื่อใช้ตัวกรองแบบปรับคลื่นเดียวซึ่งเป็นตัวกรองฮาร์มอนิกที่กรองแบบเฉพาะเจาะจงอันดับฮาร์มอนิก ทำให้กรองฮาร์มอนิกได้ดีกว่าตัวกรองฮาร์มอนิกแบบอื่น ๆ ถ้าพฤติกรรมจ่ายกระแสฮาร์มอนิกของฮาร์มอนิกมีจ่ายทั้งฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิก การกรองฮาร์มอนิกโดยใช้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดียวอาจจะไม่ทำให้ผลลัพธ์การกรองออกมาดีที่สุด แต่ในโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้ไม่พิจารณาถึงอินเตอร์ฮาร์มอนิก

ผลลัพธ์ของค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองฮาร์มอนิกจากการทดลองแบ่งได้เป็นสองส่วนคือ กำลังสูญเสียที่ความถี่หลักมูลและกำลังสูญเสียรวม จากการทดลองพบว่าค่ากำลังสูญเสียที่ความถี่หลักมูลของตัวกรองผ่านสูงชนิดซีมีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากตัวกรองชนิดนี้มีการทำให้เกิดเรโซแนนซ์อนุกรมที่ความถี่หลักมูลผ่านตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (C_2) ทำให้มีกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานของตัวกรองน้อยมาก ส่วนค่ากำลังสูญเสียรวมของตัวกรองฮาร์มอนิกจะพบว่าส่วนใหญ่ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบปรับคลื่นเดียวมีค่ากำลังสูญเสียน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับตัวกรองชนิดอื่น ๆ กรณีของค่ากำลังสูญเสียรวมของตัวกรองฮาร์มอนิกจะมีค่ามากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองฮาร์มอนิกและอิมพีแดนซ์ของระบบที่ความถี่ต่าง ๆ ที่สูงมากขึ้น โดยในแต่ละความถี่ที่สูงขึ้น ถ้าอิมพีแดนซ์ของระบบมีค่ามากกว่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองฮาร์มอนิกจะทำให้มีกระแสไหลผ่านเข้าตัวกรองฮาร์มอนิกมากกว่าที่จะไหลเข้าสู่ระบบทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสีย

ของตัวกรองมีค่ามากขึ้น แต่ถ้าอิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าน้อยกว่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรอง ฮาร์มอนิกจะทำให้มีกระแสไหลผ่านเข้าตัวกรองฮาร์มอนิกน้อยกว่าที่จะไหลเข้าสู่ระบบทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียของตัวกรองมีค่าไม่สูงมาก

ในการคำนวณการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดต่าง ๆ และการออกแบบการต่อชุดตัวเก็บประจุแรงสูง อาจทำให้ต้องใช้เวลายาวนานพอสมควรในการออกแบบ โปรแกรมการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแพสซีฟในระบบไฟฟ้าแรงสูงนี้ สามารถช่วยอำนวยความสะดวกและลดระยะเวลาสำหรับการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก การออกแบบชุดตัวเก็บประจุแรงสูง รวมถึงลดเวลาในการวิเคราะห์โหลดโพลาร์ที่ความถี่หลักมูล การวิเคราะห์โหลดโพลาร์ที่ความถี่ฮาร์มอนิก และรวมถึงการศึกษาการสแกนความถี่ พร้อมทั้งยังสามารถจำลองการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกที่ออกแบบเข้าสู่ระบบได้ สามารถตรวจสอบภาวะโหลดเกินของชุดตัวเก็บประจุที่ออกแบบได้ ทำให้เห็นว่าโปรแกรมนี้ใช้เป็นแนวทางในการศึกษา วิเคราะห์ และ แก้ไขปัญหาฮาร์มอนิก

สำหรับข้อเสนอแนะที่กล่าวไว้ ณ ที่นี้จะช่วยทำให้โปรแกรมมีประสิทธิภาพและนำใช้งานมากยิ่งขึ้น

- 1) ทำให้โปรแกรมสามารถวาดแผนภาพของระบบทดสอบด้วยวิธีลากและวาง ซึ่งจะช่วยให้ผู้ใช้งานเห็นภาพของระบบทดสอบได้ชัดเจนยิ่งขึ้นและจะทำให้เกิดความเข้าใจในการใช้งานมากยิ่งขึ้น
- 2) สามารถแสดงผลลัพธ์เป็นรูปภาพประกอบสำหรับการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก และการออกแบบชุดตัวเก็บประจุ โดยแสดงถึงชนิดของตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดต่างๆ รวมถึงแสดงจำนวนและรูปแบบการต่อชุดตัวเก็บประจุแรงสูงซึ่งจะทำให้เห็นภาพชัดเจนมากขึ้นและเกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้น
- 3) ทำให้โปรแกรมสามารถคำนวณในระบบไฟฟ้าที่ไม่สมดุลได้ ซึ่งจะช่วยให้โปรแกรมสามารถวิเคราะห์ระบบที่ต้องการพิจารณาการเชื่อมต่อหม้อแปลงแบบต่างๆ ได้
- 4) ทำให้โปรแกรมสามารถวิเคราะห์ระบบที่มีอินเตอร์ฮาร์มอนิกได้ ซึ่งจะช่วยให้โปรแกรมสามารถวิเคราะห์ปัญหาฮาร์มอนิกได้ครอบคลุมได้มากยิ่งขึ้น ทำให้ผู้ใช้งานเกิดความรู้และความเข้าใจมากยิ่งขึ้น
- 5) ทำให้โปรแกรมสามารถวิเคราะห์ระบบทดสอบ โดยใช้แบบจำลองของส่วนประกอบในระบบที่แตกต่างกันได้ ซึ่งจะช่วยให้สามารถศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกที่เป็นผลจากการใช้แบบจำลองของส่วนประกอบในระบบที่แตกต่างกัน

รายการอ้างอิง

- [1] Arrillaga, J., and Neville, R.W. Power System Harmonics. 2nd ed. New York: Wiley, 2003.
- [2] Francisco C. De La Rosa. Harmonics and Power Systems. Taylor & Francis Group, 2006.
- [3] Alexandre, B. An Investigation on the Selection of Filter Topologies for Passive Filter Applications. IEEE Trans On Power Delivery 24, 3 (July 2009) : 1710-1718.
- [4] Dos, J.C. Passive Filter-Potentialities and limitation. IEEE Trans. On Industry Application 40, 1 (Jan./Feb. 2004) : 232-241.
- [5] ไชยะ แซ่มซ้อย. การออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก. เทคนิคไฟฟ้า ชุดที่ 7 เรื่องนำรู้ไฟฟ้าทั่วไป ต่อดลงดิน ฮาร์มอนิก 2546 : 239-240.
- [6] Turkay, B. Harmonic filter design and power factor correction in a cement factory. IEEE Porto power tech conference (Sep. 2001).
- [7] Joorabian, M., Seifossadat, S.GH., and Zamani, M.A. An algorithm to design harmonic filters based on power factor correction for HVDC systems. Proc. IEEE International Conference on Industrial Technology (Dec. 2006) : 2978-2983.
- [8] Xia Yao. The Method for Designing the Third Order Filter. IEEE International conference on Harmonic and Quality of Power (Oct. 1998) : 139-142.
- [9] Xia Yao, Jio ZHAO, Shijie MAO. Theory for the Design of C-type Filter. International Conference on Harmonic and Quality of Power 2004 : 11-15.
- [10] Mohseni, M., and Zamani, M.A. Damped-Type Double Tuned Filter Design for HVDC Systems. 9th International Conference Electrical Power Quality and Utilisation (October 2007).
- [11] IEEE Std 1531-2003. IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filter, 2003.
- [12] IEEE Std 519-1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 1993.
- [13] IEEE Std C37.99-2000. IEEE Guide for the Protection of Shunt Capacitor Banks, 2000.
- [14] IEEE Std 1036-1992. IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors, 1992.

- [15] IEEE Std 18-2002. IEEE Standard for Shunt Power Capacitor, 2002.
- [16] Acting Sub.Lt.Nuttavut Muangsiri. Capacitor Bank Design in High Voltage Systems. Master's Thesis, Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering Chulalongkorn University, 2005.
- [17] Somphorn Hawangju. Optimum Design of a Single-tune Harmonic current filter. Master's Thesis, Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering Chulalongkorn University, 1999.
- [18] Sangpetch Loharamthaweethong. Analysis of Power Flow and Harmonic current Flow in 3-phase Power System under Unbalance Conditions. Master's Thesis, Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering Chulalongkorn University, 2000.
- [19] WASON U-YAISOM. Analysis of Harmonic Control and Power Factor Improvement by Passive Filter. Master's Thesis, Faculty of Electrical Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2002.
- [20] Task Force on Harmonic Modeling and Simulation Transmission & Distribution Committee IEEE Power Engineering Society. Test System for Harmonics Modeling and Simulation. IEEE Transaction on Power Delivery 14, 2 (April 1999) : 579-587.
- [21] Peter H. Thiel (A), John E. Harder (F), and George R. Taylor. Fuseless Capacitor Banks. IEEE Transaction on Power Delivery 7, 2 (April 1992) : 1009-1015.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจักรพงษ์ ทัพสอาด เกิดวันที่ 27 เมษายน 2530 ที่อำเภอเมือง จังหวัดสระบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ในปีการศึกษา 2551 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 2552