

การวิเคราะห์ทางเลือกในการกรองกระแสฮาร์มอนิก



นายนิติ วันทอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

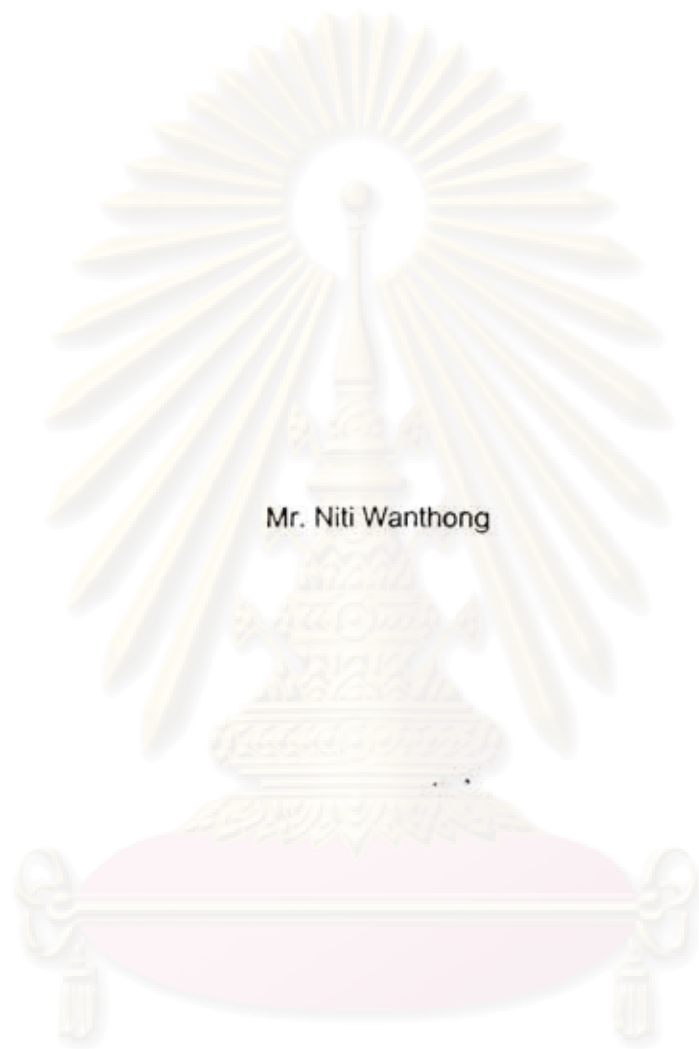
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OPTIONAL ANALYSIS IN HARMONIC CURRENT FILTERING



Mr. Niti Wanthong

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 2008

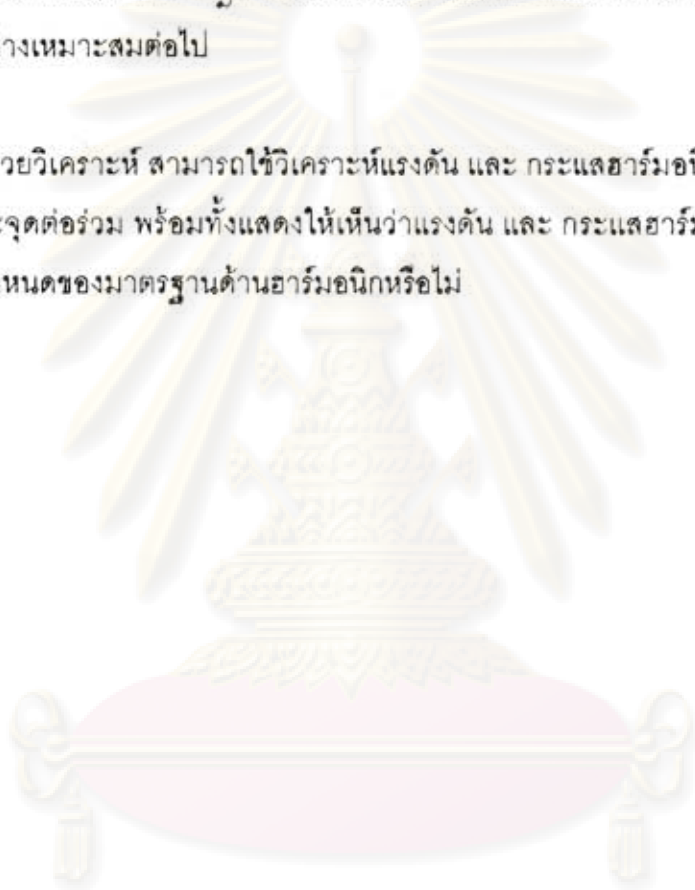
Copyright of Chulalongkorn University

511918

นิติ วันทอง : การวิเคราะห์ทางเลือกในการกรองกระแสฮาร์มอนิก.(OPTIONAL ANALYSIS IN HARMONIC CURRENT FILTERING) อ. ที่ปรึกษา : อ.ไชยะ แซ่ม้า้อย, 118หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอแนวทางการวิเคราะห์ทางเลือกในการกรองกระแสฮาร์มอนิกจากการประยุกต์ใช้งานตัวกรองชนิดต่างๆ ทั้งตัวกรองชนิดดีจูน ตัวกรองชนิดจูน และตัวกรองชนิดแอดคทีฟ ทั้งใช้ชนิดเดียวหรือใช้ผสมกัน รวมถึงการใช้งานร่วมกับชุดตัวเก็บประจุเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังด้วย ทั้งนี้เพื่อให้ผู้ใช้เห็นถึงผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ และสภาพโหลดเกินที่ตัวเก็บประจุ เพื่อให้สามารถตัดสินใจเลือกใช้ได้อย่างเหมาะสมต่อไป

โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ สามารถใช้วิเคราะห์แรงดัน และ กระแสฮาร์มอนิกอันดับต่างๆ ที่ไหลผ่านไป ยังแต่ละอุปกรณ์ และจุดต่อร่วม พร้อมทั้งแสดงให้เห็นว่าแรงดัน และ กระแสฮาร์มอนิกส์ที่อันดับต่างๆเหล่านี้ เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดของมาตรฐานด้านฮาร์มอนิกหรือไม่



ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา :วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิติ *นิติ วันทอง*
 สาขาวิชา :วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก *[Signature]*
 ปีการศึกษา..... 2551.....

4970388021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

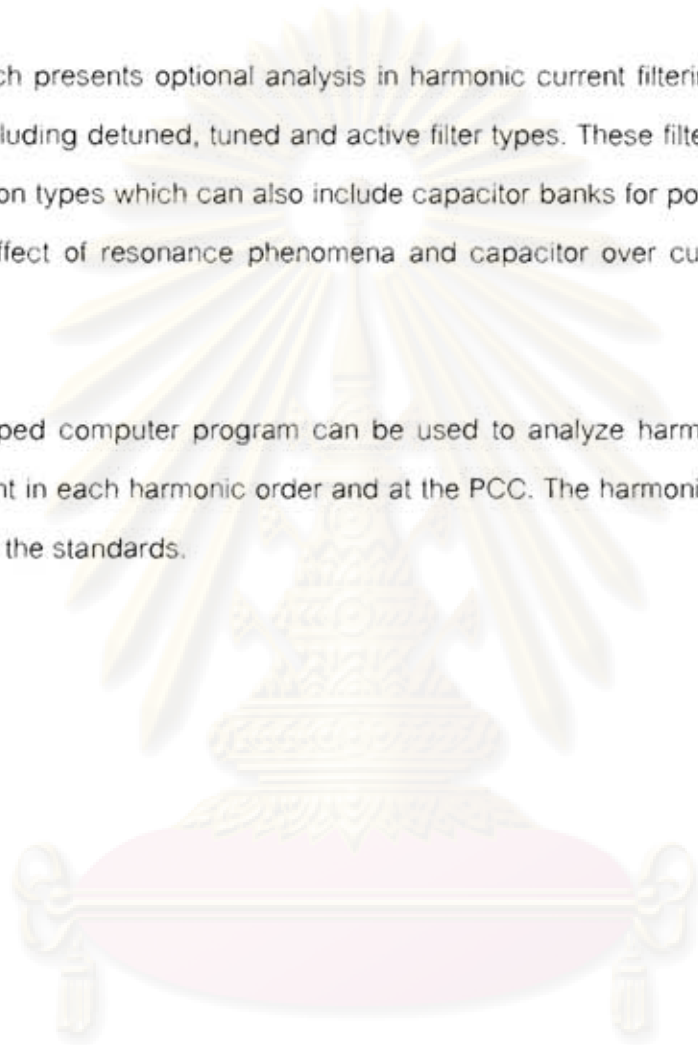
KEY WORD: HARMONIC CURRENT FILTERING, POWER FACTOR, RESONANCE

NITI WANTHONG : OPTIONAL ANALYSIS IN HARMONIC CURRENT FILTERING. THESIS

PRINCIPAL ADVISOR : CHAIYA CHAMCHOY, 118 pp.

This research presents optional analysis in harmonic current filtering using various types of harmonic filters, including detuned, tuned and active filter types. These filters can be selected either one or in combination types which can also include capacitor banks for power factor correction. The results show the effect of resonance phenomena and capacitor over current loading for suitable filters selection.

The developed computer program can be used to analyze harmonic voltage and current flowing to equipment in each harmonic order and at the PCC. The harmonic voltage and current are also compared with the standards.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department :..... Electrical Engineering..... Student's signature :..... Niti Wanthong.....

Field of study :..... Electrical Engineering..... Thesis Principal Advisor's signature :..... Chaiya Chamchoy.....

Academic year :..... 2008.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ ไชยะ แซ่มซ้อย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบ แก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ อาจารย์ ดร.ธวัชชัย เดชสุนันต์ และ ผศ.ดร.ปฐมทัศน์ จิระเดชะ ที่ได้เสียสละเวลาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และ คุณยาย ที่ให้กำลังใจตลอดมา รวมถึง พี่ น้อง และเพื่อนๆ ทุกคน ที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



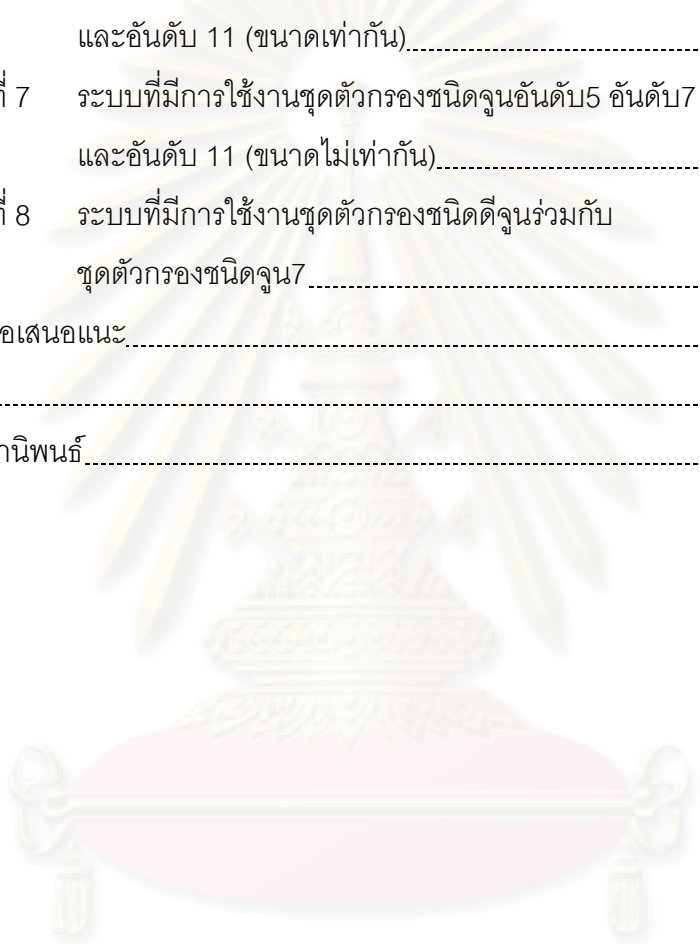
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 แนวเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ และ ประเมินกระแสฮาร์มอนิก.....	4
2.1 พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์และประเมินกระแสฮาร์มอนิกใน ระบบไฟฟ้ากำลัง.....	4
2.1.1 เรโซแนนซ์แบบขนาน.....	6
2.1.2 เรโซแนนซ์แบบอนุกรม.....	8
2.2 การวิเคราะห์และ ประเมินกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	9
2.2.1 ระบบปกติ.....	9
2.2.2 ระบบที่มีการติดตั้งใช้งานชุดตัวเก็บประจุ.....	10
2.2.3 ระบบที่มีการติดตั้งใช้งานชุดตัวกรอง.....	12
2.3 พื้นฐานและวิธีการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก.....	15
2.3.1 ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดตัวกรองดีจูน(Detuned Filter).....	17
2.3.2 ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดตัวกรองจูน (Tuned Filter).....	20

2.3.3	ตัวกรองชนิดแอคทีฟ (Active Filter).....	21
บทที่ 3	แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง.....	23
3.1	ระบบไฟฟ้า.....	23
3.2	หม้อแปลงไฟฟ้า.....	24
3.3	โหลดแบบเชิงเส้น.....	24
3.4	แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก.....	25
3.5	ตัวเก็บประจุ (Capacitor).....	26
3.6	ตัวกรองฮาร์มอนิก.....	26
3.7	ตัวกรองชนิดแอคทีฟ.....	27
บทที่ 4	โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	28
4.1	โครงสร้างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	28
4.2	การป้อนข้อมูลเข้าสู่ระบบ.....	32
4.3	ส่วนแสดงผล.....	38
บทที่ 5	การวิเคราะห์ทางเลือก.....	40
5.1	ระบบที่มีทั้งโหลดเชิงเส้นและโหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	43
กรณีที่ 1	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (ตัวเก็บประจุมีพิกัดแรงดัน 400V).....	43
กรณีที่ 2	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (ตัวเก็บประจุมีพิกัดแรงดัน 525V).....	47
กรณีที่ 3	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน.....	51
กรณีที่ 4	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 จำนวน 2 ชุด.....	59
กรณีที่ 5	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 ร่วมกับอันดับ7.....	62
กรณีที่ 6	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11 (ขนาดเท่ากัน).....	65
กรณีที่ 7	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11 (ขนาดไม่เท่ากัน).....	70
กรณีที่ 8	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกับ ชุดตัวกรองชนิดจูน7.....	74
5.2	ระบบที่มีเฉพาะโหลดไม่เป็นเชิงเส้น.....	79
กรณีที่ 1	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (ตัวเก็บประจุมีพิกัดแรงดัน 400V).....	79

กรณีที่ 2	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (ตัวเก็บประจุมีพิกัดแรงดัน 525V).....	84
กรณีที่ 3	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน.....	88
กรณีที่ 4	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 จำนวน 2 ชุด.....	95
กรณีที่ 5	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 ร่วมกับอันดับ7	99
กรณีที่ 6	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ 11 (ขนาดเท่ากัน).....	102
กรณีที่ 7	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ 11 (ขนาดไม่เท่ากัน).....	106
กรณีที่ 8	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกับ ชุดตัวกรองชนิดจูน7	110
บทที่ 6	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	115
	รายการอ้างอิง.....	117
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	118



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความถี่ปรับคลื่นที่ %XL ต่างๆ.....	16
2.2 IEC 61000-2-2 และ ER G 5/4 ที่ระดับแรงดันฮาร์มอนิกในระบบแรงดันต่ำ 400 V.....	18
5.1 รายละเอียดของชุดตัวเก็บประจุ ชุดตัวกรองดีจูน และ ชุดตัวกรองจูน.....	42
5.2 ข้อมูลเบื้องต้น.....	43
5.3 ข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก (ใช้กับทุกกรณี).....	44
5.4 ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (400 V).....	44
5.5 ผลลัพธ์ของกระแสของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (400 V).....	45
5.6 ข้อมูลเบื้องต้น.....	47
5.7 ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (525 V).....	48
5.8 ผลลัพธ์ของกระแสของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (525 V).....	49
5.9 เปรียบเทียบภาระการทำงานของชุดตัวเก็บประจุที่กักแรงดัน 400 V และ 525 V.....	51
5.10 ข้อมูลเบื้องต้น.....	52
5.11 ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุและตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกัน (Loading ของ Cap ใน Cap Bank).....	53
5.12 ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุและตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกัน (Loading ของ Cap ใน DT).....	54
5.13 ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุและตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกัน (THDv(%) ด้านบัสแรงดันต่ำ).....	55
5.14 ผลต่าง(Different)ระหว่าง THDv(%) และ Planning Level (PL) ด้านบัสแรงดันต่ำ.....	55
5.15 ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุและตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกัน (THDv(%) ด้านบัสแรงดันสูง).....	56
5.16 ผลต่าง(Different)ระหว่าง THDv(%) และ Planning Level (PL) ด้านบัสแรงดันสูง.....	56
5.17 สภาพการทำงานของตัวเก็บประจุเมื่อใช้งานชุดตัวเก็บประจุ ร่วมกับชุดตัวกรองชนิดดีจูน.....	58
5.18 ข้อมูลเบื้องต้น.....	59

5.19	ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจุนอันดับ5 จำนวน 2 ชุด.....	60
5.20	ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจุนอันดับ5 จำนวน 2 ชุด.....	60
5.21	ข้อมูลเบื้องต้น.....	62
5.22	ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจุนอันดับ 5 ร่วมกับอันดับ 7.....	63
5.23	ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจุนอันดับ 5 ร่วมกับอันดับ 7.....	64
5.24	ข้อมูลเบื้องต้น.....	66
5.25	ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจุนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11 (ขนาดเท่ากัน).....	67
5.26	ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจุนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11 (ขนาดเท่ากัน).....	68
5.27	ข้อมูลเบื้องต้น.....	71
5.28	ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจุนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11 (ขนาดไม่เท่ากัน).....	72
5.29	ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจุนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11 (ขนาดไม่เท่ากัน).....	73
5.30	ข้อมูลเบื้องต้น.....	74
5.31	ผลลัพธ์ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจุนร่วมกับชุดตัวกรองชนิดจุนอันดับ 7.....	75
5.32	ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้งานตัวกรองจุนร่วมกับตัวกรองจุนอันดับ 7.....	75
5.33	สรุปเปรียบเทียบภาระการทำงานของตัวกรองแต่ละชุดและความสามารถในการลดค่า THDV.....	77
5.34	ข้อมูลเบื้องต้น.....	80
5.35	ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (400 V).....	80
5.36	ผลลัพธ์ของกระแสของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (400 V).....	81
5.37	ภาระการทำงานของตัวเก็บประจุ (พิกัดแรงดัน 400 V).....	83
5.38	ข้อมูลเบื้องต้น.....	85
5.39	ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (525 V).....	85
5.40	ผลลัพธ์ของกระแสของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (525 V).....	86
5.41	เปรียบเทียบภาระการทำงานของชุดตัวเก็บประจุพิกัดแรงดัน 400 V และ525 V.....	88
5.42	ภาระการทำงานของชุดตัวเก็บประจุ (พิกัดแรงดัน 525 V).....	88
5.43	ข้อมูลเบื้องต้น.....	89
5.44	ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุและตัวกรองชนิดจุนร่วมกัน	

	(Loading ของ Cap ใน Cap Bank).....	90
5.45	ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุและตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกัน (Loading ของ Cap ใน DT).....	91
5.46	ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุและตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกัน (THDv(%) ด้านบัสแรงดันต่ำ).....	92
5.47	ผลต่าง(Different)ระหว่าง THDv(%) และ Planning Level (PL) ด้านบัสแรงดันต่ำ.....	92
5.48	ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุและตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกัน (THDv(%) ด้านบัสแรงดันสูง).....	93
5.49	ผลต่าง(Different)ระหว่าง THDv(%) และ Planning Level (PL) ด้านบัสแรงดันสูง.....	93
5.50	สภาพการทำงานของตัวเก็บประจุเมื่อใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับชุดชนิดดีจูน.....	95
5.51	ข้อมูลเบื้องต้น.....	96
5.52	ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 จำนวน 2 ชุด.....	97
5.53	ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดอันดับ5 จำนวน 2 ชุด.....	98
5.54	ข้อมูลเบื้องต้น.....	99
5.55	ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 ร่วมกับอันดับ7.....	100
5.56	ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 ร่วมกับอันดับ7.....	101
5.57	ข้อมูลเบื้องต้น.....	103
5.58	ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11(ขนาดเท่ากัน).....	104
5.59	ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11(ขนาดเท่ากัน).....	105
5.60	ข้อมูลเบื้องต้น.....	107
5.61	ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11(ขนาดไม่เท่ากัน).....	108
5.62	ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11(ขนาดไม่เท่ากัน).....	109
5.63	ข้อมูลเบื้องต้น.....	110
5.64	ผลลัพธ์ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกับชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7.....	111
5.65	ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้งานตัวกรองดีจูนร่วมกับตัวกรองจูนอันดับ 7.....	111
5.66	สรุปเปรียบเทียบภาระการทำงานของตัวกรองแต่ละชุด และความสามารถในการลดค่า THDV.....	113

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ขั้นตอนอย่างย่อในการแก้ปัญหาทางด้านฮาร์มอนิก.....	4
2.2 กระแสไฟฟ้าที่มีความถี่ไม่เท่ากับ 50 Hz ปะปนมา.....	5
2.3 การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน.....	6
2.4 การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม.....	8
2.5 ผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response) เมื่อเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม.....	8
2.6 ระบบปกติ.....	9
2.7 ระบบที่มีการติดตั้งใช้งานชุดตัวเก็บประจุ.....	11
2.8 ค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h ที่ผ่านตัวเก็บประจุ และ ค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h ที่ผ่านระบบเมื่อระบบมีการติดตั้งใช้งานชุดตัวเก็บประจุ.....	11
2.9 ระบบที่มีการติดตั้งใช้งานชุดตัวกรอง.....	12
2.10 ค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h ที่ผ่านชุดตัวกรอง และ ค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h ที่ผ่านระบบเมื่อระบบมีการติดตั้งใช้งานชุดตัวกรอง.....	13
2.11 ระบบตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์และ ประเมินกระแสฮาร์มอนิก.....	14
2.12 วงจรสมมูลของระบบตัวอย่าง.....	14
2.13 ตัวกรองชนิดดีจูน และ ตัวกรองชนิดจูน.....	17
2.14 การทำงานของตัวกรองชนิดแอกทีฟ.....	22
2.15 ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้งานตัวกรองชนิดแอกทีฟ.....	22
3.1 แบบจำลองของระบบไฟฟ้า.....	23
3.2 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า.....	24
3.3 แบบจำลองของโหลดเชิงเส้นแบบขนาน.....	25
3.4 แบบจำลองแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก.....	25
3.5 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุ.....	26
3.6 วงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก.....	27
3.7 แบบจำลองตัวกรองชนิดแอกทีฟ.....	27
4.1 ระบบที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	28
4.2 ส่วนป้อนข้อมูลของโปรแกรม.....	29
4.3 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรม.....	30

4.4	ขั้นตอนการวิเคราะห์ของอุปกรณ์แต่ละชนิด.....	31
4.5	บัลลิ่งแรงดันสูง.....	32
4.6	หม้อแปลงไฟฟ้า.....	32
4.7	บัลลิ่งแรงดันต่ำ.....	33
4.8	โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น.....	33
4.9	หน้าจอข้อมูลเกี่ยวกับกระแสฮาร์มอนิก.....	33
4.10	โหลดเป็นเชิงเส้น.....	34
4.11	ตัวเก็บประจุตัวที่ 1.....	34
4.12	ตัวเก็บประจุตัวที่ 2.....	34
4.13	ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบดีจูนตัวที่ 1.....	35
4.14	ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบดีจูนตัวที่ 2.....	35
4.15	ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบจูนตัวที่ 1.....	36
4.16	ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบจูนตัวที่ 2.....	36
4.17	ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบจูนตัวที่ 3.....	37
4.18	ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบจูนตัวที่ 4.....	37
4.19	ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดแอดคทีฟ.....	38
4.20	ผลการวิเคราะห์เป็นภาพรวมในแบบเปรียบเทียบ.....	39
4.21	หน้าจอส่วนแสดงผล.....	39
5.1	ระบบที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	40
5.2	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (400 V).....	43
5.3	วงจรมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (400 V).....	43
5.4	Impedance Scanของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (400 V).....	46
5.5	การขยายกระแสฮาร์มอนิกเมื่อใช้ชุดตัวเก็บประจุ (400 V).....	46
5.6	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (525 V).....	47
5.7	วงจรมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (525 V).....	47
5.8	Impedance Scanของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (525 V).....	50
5.9	การขยายกระแสฮาร์มอนิกเมื่อใช้ชุดตัวเก็บประจุ (525 V).....	50
5.10	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน.....	51
5.11	วงจรมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน.....	51
5.12	Impedance Scanของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ ร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน.....	57

5.13	การขยายกระแสฮาร์มอนิกเมื่อใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน.....	57
5.14	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 5 จำนวน 2 ชุด.....	59
5.15	วงจรมุมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 5 จำนวน 2 ชุด.....	59
5.16	Impedance Scanของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 5 จำนวน 2 ชุด.....	61
5.17	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 ร่วมกับอันดับ7.....	62
5.18	วงจรมุมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 ร่วมกับอันดับ7.....	62
5.19	Impedance Scanของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 ร่วมกับอันดับ7.....	64
5.20	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11(ขนาดเท่ากัน).....	65
5.21	วงจรมุมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11(ขนาดเท่ากัน).....	65
5.22	Impedance Scanของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11(ขนาดเท่ากัน).....	68
5.23	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11(ขนาดไม่เท่ากัน).....	70
5.24	วงจรมุมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11(ขนาดไม่เท่ากัน).....	70
5.25	Impedance Scanของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11(ขนาดไม่เท่ากัน).....	73
5.26	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกับชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7.....	74
5.27	วงจรมุมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกับ ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7.....	74
5.28	Impedance Scanของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกับ ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7.....	76
5.29	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (400 V).....	79
5.30	วงจรมุมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (400 V).....	79
5.31	Impedance Scanของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (400 V).....	82
5.32	การขยายกระแสฮาร์มอนิกเมื่อใช้ชุดตัวเก็บประจุ (400 V).....	82
5.33	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (525 V).....	84
5.34	วงจรมุมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (525 V).....	84
5.35	Impedance Scanของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (525 V).....	87

5.36	การขยายกระแสฮาร์มอนิกเมื่อใช้ชุดตัวเก็บประจุ (525 V).....	87
5.37	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน.....	88
5.38	วงจรมวลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน.....	89
5.39	Impedance Scanของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ ร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน.....	94
5.40	การขยายกระแสฮาร์มอนิกเมื่อใช้งานชุดตัวเก็บประจุ ร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน.....	94
5.41	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 จำนวน 2 ชุด.....	95
5.42	วงจรมวลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 จำนวน 2 ชุด.....	96
5.43	Impedance Scanของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 จำนวน 2 ชุด.....	98
5.44	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 ร่วมกับอันดับ7.....	99
5.45	วงจรมวลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 ร่วมกับอันดับ7.....	99
5.46	Impedance Scanของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 ร่วมกับอันดับ7.....	101
5.47	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11(ขนาดเท่ากัน).....	102
5.48	วงจรมวลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11(ขนาดเท่ากัน).....	102
5.49	Impedance Scanของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11(ขนาดเท่ากัน).....	105
5.50	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11(ขนาดไม่เท่ากัน).....	106
5.51	วงจรมวลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11(ขนาดไม่เท่ากัน).....	106
5.52	Impedance Scanของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11(ขนาดไม่เท่ากัน).....	109
5.53	ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกับชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7.....	110
5.54	วงจรมวลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกับ ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7.....	110
5.55	Impedance Scanของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกับ ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7.....	112

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวเหตุผล

ระบบไฟฟ้ากำลังในปัจจุบัน ได้มีอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดของกระแสฮาร์มอนิกต่อเข้ากับระบบเพิ่มเป็นจำนวนมากเช่นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น(Non-Linear Load) เตาหลอมโลหะ(Arc Furnace) และ วงจรเรียงกระแส(Rectifier) เป็นต้น อุปกรณ์เหล่านี้ส่งผลกระทบต่อความมั่นคงและคุณภาพของระบบไฟฟ้า คือทำให้รูปคลื่นแรงดันมีการบิดเบี้ยว ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ตัวอื่นๆที่ต่ออยู่กับระบบ หรือตัวระบบเองให้ทำงานผิดพลาดได้ จึงได้กำหนดวิธีการในการแก้ปัญหาด้านกระแสฮาร์มอนิกมากมายหลายวิธี เช่น การประยุกต์ใช้ ตัวกรองดีจูน ตัวกรองจูน และตัวกรองชนิดแอกทีฟ เป็นต้น

เนื่องจากวิธีการในการแก้ปัญหาด้านกระแสฮาร์มอนิกที่มีมากมายหลายวิธี จึงได้จัดทำวิทยานิพนธ์นี้ขึ้นเพื่อเป็นการสร้างทางเลือกและเป็นการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นถึงผลที่จะเกิดขึ้นต่อโหลด และ ระบบไฟฟ้าเมื่อต่อตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดต่างๆเข้ากับระบบไฟฟ้า โดยการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกจะเป็นไปตามมาตรฐานด้านฮาร์มอนิกที่กำหนดไว้ เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าและเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อเป็นการวิเคราะห์ทางเลือกในการกรองกระแสฮาร์มอนิก และเปรียบเทียบการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดต่างๆ โดยการใช้ ตัวเก็บประจุ ตัวกรองดีจูน ตัวกรองจูน และตัวกรองชนิดแอกทีฟ อีกทั้งแสดงผลที่จะเกิดขึ้นต่อโหลดและระบบไฟฟ้าเมื่อต่อตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดต่างๆเข้ากับระบบไฟฟ้า
- 2) เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ และ แสดงผลที่จะเกิดขึ้นต่อโหลดและระบบไฟฟ้า เมื่อต่อตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดต่างๆเข้ากับระบบไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตโครงการวิทยานิพนธ์

เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดต่างๆ เพื่อเป็นการวิเคราะห์ทางเลือก และเป็นการเปรียบเทียบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกที่ขนาดพิกัดต่างๆ โดยการใช้ ตัวเก็บประจุ ตัวกรองดีจูน ตัวกรองจูน และตัวกรองชนิดแอกทีฟ และแสดงให้เห็นถึง ผลที่จะเกิดขึ้นต่อโหลด และระบบไฟฟ้าเมื่อต่อตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดต่างๆเข้ากับระบบ ไฟฟ้าโดยมีองค์ประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 1) ความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆที่จะทำการกรองออกจากระบบไฟฟ้า
- 2) มาตรฐานด้านฮาร์มอนิก เช่น IEEE 519-1992
- 3) แสดงผลการวิเคราะห์ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดต่างๆในรูปตารางข้อมูลและกราฟเส้น

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาผลกระทบของกระแสฮาร์มอนิก และปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 2) ศึกษาแบบจำลองฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สำคัญที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 3) ศึกษากระบวนการในการวิเคราะห์หา ตัวเก็บประจุ ตัวกรองดีจูน ตัวกรองจูน และตัวกรองชนิดแอกทีฟ พร้อมทั้งเขียนโปรแกรมในการวิเคราะห์ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดต่างๆ
- 4) ทดสอบการทำงานของโปรแกรม และทำการปรับปรุงโปรแกรม
- 5) ประเมินผลการทดสอบ และสรุปผลที่ได้จากการทดสอบ
- 6) พิมพ์วิทยานิพนธ์ และตรวจสอบแก้ไข

ศูนย์วิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบถึงผลกระทบของกระแสฮาร์มอนิกที่มีต่อระบบไฟฟ้า รวมทั้งผลกระทบของกระแสฮาร์มอนิกที่มีต่อโหลด และโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจากการวิจัย สามารถใช้วิเคราะห์ทางเลือก และเป็นการเปรียบเทียบการประยุกต์ใช้งานตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดต่างๆ ที่ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าสำหรับกรองกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลอยู่ในระบบ เพื่อความสะดวกรวดเร็วในการแก้ไขปัญหาที่เกิดจากฮาร์มอนิก ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าให้มีความมั่นคงมากขึ้น

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบทเป็นดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงพื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ และ ประเมินกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า รวมทั้งวิธีการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก

บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณ

บทที่ 4 กล่าวถึงโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โดยที่แยกออกเป็น ส่วนป้อนข้อมูลเข้า ส่วนคำนวณ และส่วนแสดงผล

บทที่ 5 แสดงผลการคำนวณและตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

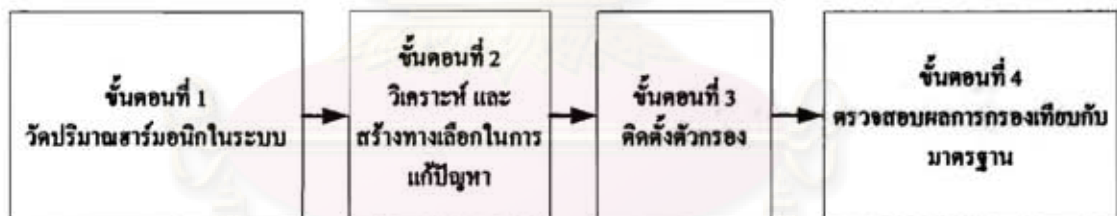
บทที่ 2

พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ และ ประเมินกระแสฮาร์มอนิก

2.1 พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ และ ประเมินกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง

ปัญหาคุณภาพไฟฟ้า คือ ปัญหาการเบี่ยงเบนของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าหรือความถี่ ที่ทำให้เกิดความเสียหายหรือความผิดพลาดของอุปกรณ์ไฟฟ้าหรืออีกนัยหนึ่งคือ ไฟฟ้าที่มีคุณภาพที่ดีจะไม่ทำให้อุปกรณ์ต่างๆ ทำงานผิดพลาดหรือเกิดความเสียหายขึ้น สาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้านั้นมีได้หลายสาเหตุ เช่น แรงดันตกชั่วขณะ (Sags หรือ Dips) แรงดันไฟฟ้าตก แรงดันไฟฟ้าเกิน แรงดันกระเพื่อม (Voltage Fluctuation) และกระแสหรือแรงดันไฟฟ้าที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล หรือ ฮาร์มอนิก (Harmonic) เป็นต้น

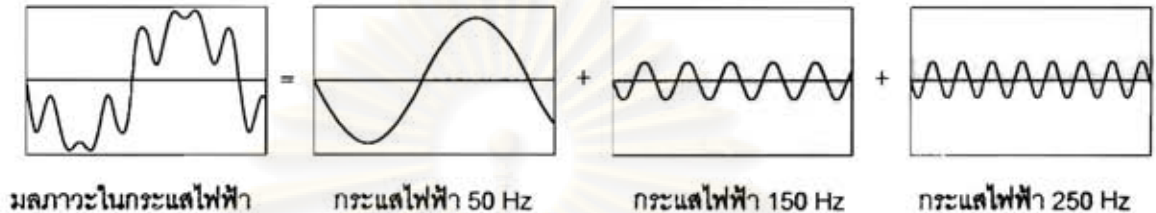
ดังนั้นในการแก้ปัญหาทางด้านฮาร์มอนิกมีขั้นตอนอย่างย่อๆแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนอย่างย่อในการแก้ปัญหาทางด้านฮาร์มอนิก

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นในเรื่องของการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกในขั้นตอนที่ 2 คือการวิเคราะห์ และ สร้างทางเลือกในการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกซึ่งเป็นปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้าที่สำคัญมากปัญหาหนึ่ง ฮาร์มอนิกหมายถึงไฟฟ้าความถี่สูงกว่าความถี่หลักมูลในรูปแบบกระแสและแรงดันที่ปะปนมากับไฟฟ้า 50 Hz ของการไฟฟ้า กล่าวคือพลังงานไฟฟ้าถูกส่งมาถึงผู้ใช้ผ่านระบบไฟฟ้าในรูปของ แรงดัน และกระแส ที่มีความถี่ 50 Hz และในระบบไฟฟ้าอาจมีแรงดันและกระแสที่มีความถี่ไม่เท่ากับ 50 Hz ปะปนมาด้วย โดยอาจจะมีความถี่ 150 Hz หรือ 250 Hz หรือมากกว่าหลายๆความถี่ปะปนมาพร้อมๆกัน โดยค่าความถี่ที่มีค่าเป็นจำนวนเท่าของ 50 Hz จะเรียกว่าเป็น

ความถี่ฮาร์มอนิก เช่น 150 Hz เรียกว่าเป็นฮาร์มอนิกที่สาม เพราะมีความถี่เป็น 3 เท่าของ 50 Hz โดย ฮาร์มอนิกนั้นมียู่ทั้งในรูปของแรงดันฮาร์มอนิกและกระแสฮาร์มอนิก



รูปที่ 2.2 กระแสไฟฟ้าที่มีความถี่ไม่เท่ากับ 50 Hz ปะปนมา

ฮาร์มอนิกเกิดจากการใช้งานอุปกรณ์บางชนิดเช่น ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ปรับความเร็วได้ เครื่องเชื่อมไฟฟ้า UPS บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ เป็นต้นและถ้าในระบบมีฮาร์มอนิกมากก็จะยิ่งทำให้รูปคลื่นไฟฟ้ามีความเพี้ยนมากขึ้นด้วยโดยค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion-THD) [1] เป็นค่าที่แสดงถึงความเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสหรือแรงดันจากรูปคลื่นไซน์ 50 Hz ตัวเลขสูงแสดงถึงความเพี้ยนมาก

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad (2.1)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (2.2)$$

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (2.3)$$

$$\text{หรือ } THD_v = \sqrt{\left(\frac{V_{rms}}{V_1}\right)^2 - 1} \quad (2.4)$$

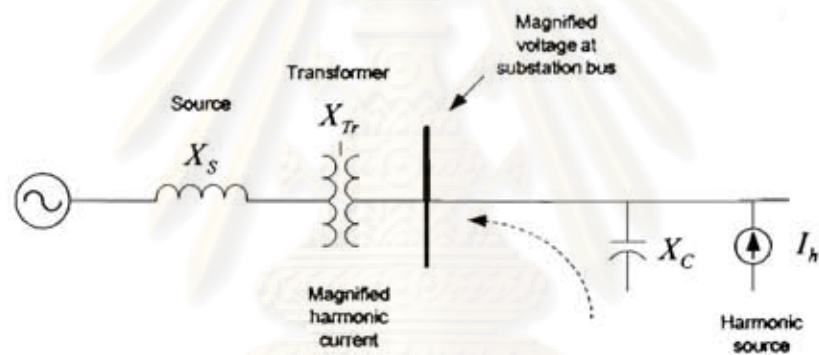
$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (2.5)$$

$$\text{หรือ } THD_i = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (2.6)$$

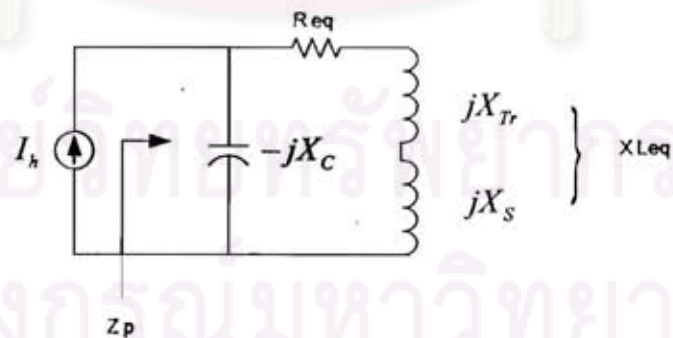
เมื่อ	V_{rms}	คือ ค่าแรงดันอาร์เอ็มเอส
	V_1	คือ ค่าแรงดันความถี่หลักมูล
	V_h	คือ ค่าแรงดันที่ฮาร์มอนิกอันดับ h

THD_v	คือ ค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวมของแรงดัน
I_{rms}	คือ ค่ากระแสอาร์เอ็มเอส
I_1	คือ ค่ากระแสความถี่หลักมูล
I_h	คือ ค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับ h
THD_i	คือ ค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวมของกระแส
h	คือ อันดับของฮาร์มอนิก

2.1.1 เรโซแนนซ์แบบขนาน [2]



(ก) วงจรอย่างง่ายของระบบไฟฟ้า



(ข) วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้า

รูปที่ 2.3 การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน

เมื่อเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานขึ้นทำให้ $|X_{Lq}| = |X_C|$

$$Z_p = \frac{-jX_C(jX_{Lq} + R_{eq})}{-jX_C + jX_{Lq} + R_{eq}} = \frac{-jX_C(jX_{Lq} + R_{eq})}{R_{eq}} \approx \frac{X_{Lq}^2}{R_{eq}} = \frac{X_C^2}{R_{eq}} \quad (2.7)$$

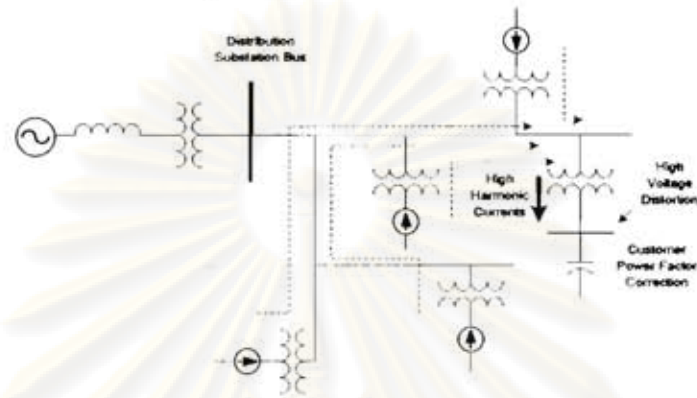
$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{eq}C} - \frac{R_{eq}^2}{4L_{eq}^2}} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{eq}C}} \quad (2.8)$$

$$h_p = \sqrt{\frac{X_C}{X_{sc}}} = \sqrt{\frac{MVA_{sc}}{MVAR_{cap}}} = \sqrt{\frac{kVA_{Tr} \times 100}{kVAR_{cap} \times Z_{Tr}(\%)}} \quad (2.9)$$

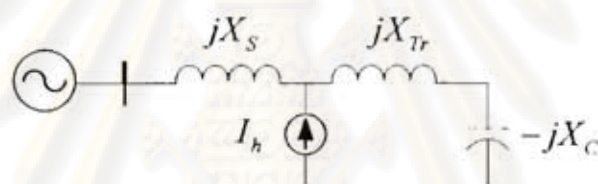
$$\text{หรือ} \quad h_p = \sqrt{\frac{X_C}{X_{Tr} + X_S}} \quad (2.10)$$

เมื่อ	R_{eq}	คือ ค่าความต้านทานรวมของหม้อแปลง และ ระบบ
	X_{Lq}	คือ ค่ารีแอกแตนซ์ (Reactance) รวมของหม้อแปลง และ ระบบ
	X_{Tr}	คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงที่ความถี่หลักมูล
	X_S	คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของระบบที่ความถี่หลักมูล
	I_h	คือ ค่ากระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ h จากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น
	Z_p	คือ ค่าอิมพีแดนซ์อันดับที่ h ที่ I_h มองเห็น
	f_p	คือ ความถี่ที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน
	h_p	คือ อันดับฮาร์โมนิกที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน
	X_C	คือ ค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ที่ฮาร์โมนิกอันดับที่ h
	C	คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ของตัวเก็บประจุ
	L_{eq}	คือ ค่าอินดักแตนซ์รวมของหม้อแปลง และ ระบบ
	X_{sc}	คือ ค่ารีแอกแตนซ์ลัดวงจรของระบบไฟฟ้า
	MVA_{sc}	คือ ค่ากำลังลัดวงจรของระบบไฟฟ้า
	$MVAR_{cap}$	คือ ขนาดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของตัวเก็บประจุ
	$kVAR_{cap}$	คือ ขนาดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของตัวเก็บประจุ
	kVA_{Tr}	คือ ขนาดกำลังไฟฟ้าพิคคของหม้อแปลง
	Z_{Tr}	คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง

2.1.2 เรโซแนนซ์แบบอนุกรม [2]



(ก) วงจรอย่างง่ายของระบบไฟฟ้า

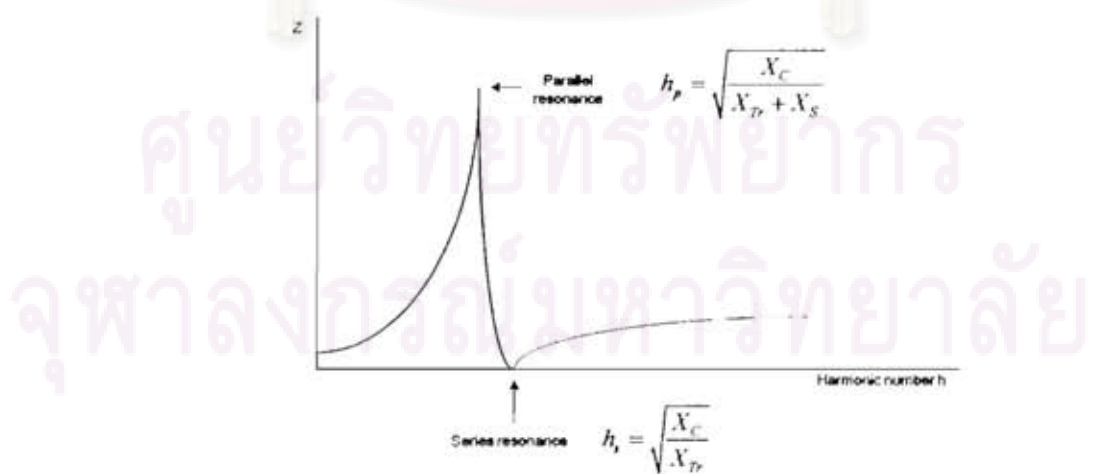


(ข) วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้า

รูปที่ 2.4 การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

$$h_r = \sqrt{\frac{X_c}{X_r}} \tag{2.11}$$

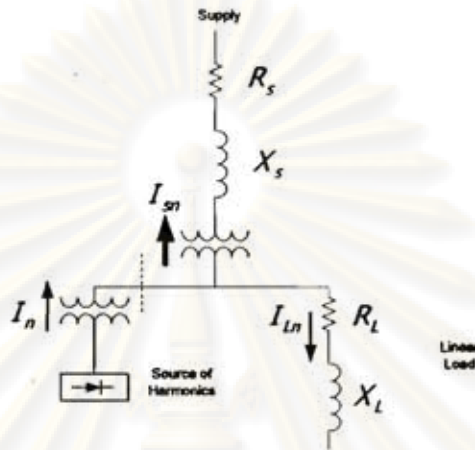
เมื่อ $h_s =$ อันดับฮาร์มอนิกที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม



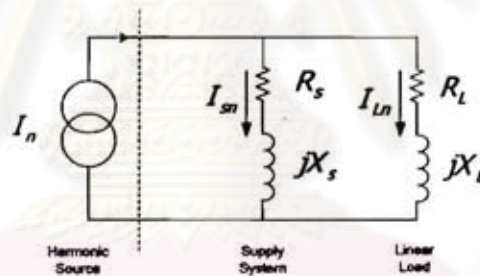
รูปที่ 2.5 ผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response) เมื่อเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

2.2 การวิเคราะห์ และ ประเมินกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง

2.2.1 ระบบปกติ



(ก) วงจรอย่างง่ายของระบบไฟฟ้า



(ข) วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้า

รูปที่ 2.6 ระบบปกติ

$$I_n = I_m + I_{Lm} \tag{2.12}$$

$$I_m = \frac{(R_L + jX_L)}{(R_L + jX_L) + (R_s + jX_s)} \cdot I_n \tag{2.13}$$

$$I_{Lm} = \frac{(R_s + jX_s)}{(R_L + jX_L) + (R_s + jX_s)} \cdot I_n \tag{2.14}$$

Load Impedance	>	Source Impedance
$(R_L + jX_L)$	>	$(R_s + jX_s)$

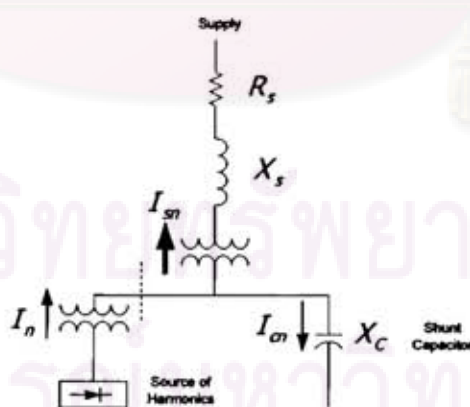
$$\frac{(R_L + jX_L)}{(R_L + jX_L) + (R_s + jX_s)} > \frac{(R_s + jX_s)}{(R_L + jX_L) + (R_s + jX_s)}$$

$$\Rightarrow I_{sn} > I_{Ln}$$

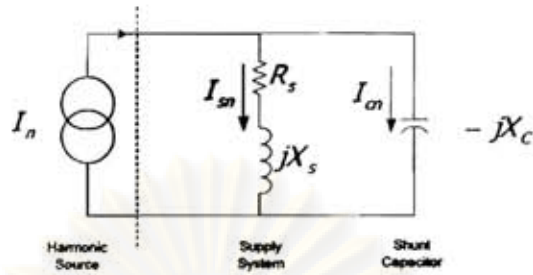
เมื่อ	R_L	คือ ค่าความต้านทานสมมูลของโหลด
	X_L	คือ ค่ารีแอกแตนซ์สมมูลของโหลด
	R_s	คือ ค่าความต้านทานของระบบ
	X_s	คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของระบบที่ความถี่หลักมูล
	I_n	คือ ค่ากระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ h จากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น
	I_{sn}	คือ ค่ากระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ h ที่ผ่านระบบ
	I_{Ln}	คือ ค่ากระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ h ที่ผ่านโหลด

จะเห็นได้ว่า Load Impedance มีค่ามากกว่า Source Impedance ดังนั้น กระแสฮาร์โมนิกส่วนใหญ่จะไหลไปหา ระบบไฟฟ้า โหลดจึงไม่ค่อยเกิดปัญหาสามารถทำงานต่อไปได้

2.2.2 ระบบที่มีการติดตั้งใช้งานชุดตัวเก็บประจุ



(ก) วงจรอย่างง่ายของระบบไฟฟ้า



(ข) วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้า
รูปที่ 2.7 ระบบที่มีการติดตั้งใช้งานชุดตัวเก็บประจุ

$$Z_{total} = \frac{(R_s + jX_s)(-jX_c)}{R_s + jX_s - jX_c} \tag{2.15}$$

เมื่อเกิด Parallel resonance ขึ้นทำให้ $|X_s| = |X_c|$

$$I_n = I_m + I_{cm} \tag{2.16}$$

$$I_{cm} = \frac{R_s + jX_s}{R_s + jX_s - jX_c} \cdot I_n \tag{2.17}$$

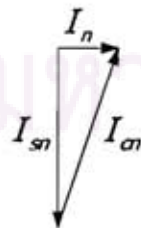
$$I_m = \frac{-jX_c}{R_s + jX_s - jX_c} \cdot I_n \tag{2.18}$$

At resonance

$$I_{cm} = \frac{R_s + jX_s}{R_s} \cdot I_n \gg I_n$$

$$I_m = \frac{-jX_c}{R_s} \cdot I_n \gg I_n$$

⇒ Harmonic current amplification

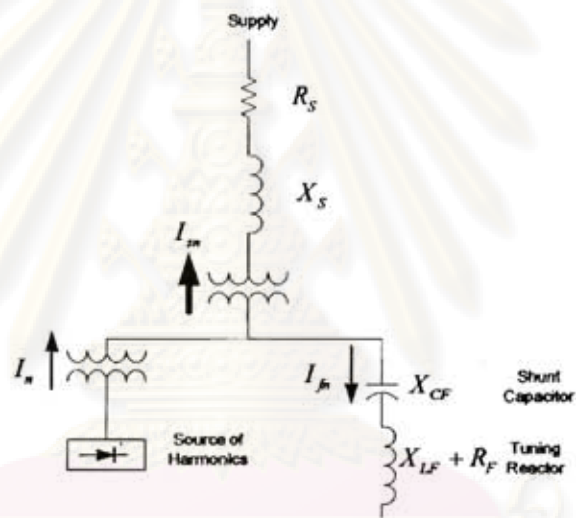


รูปที่ 2.8 ค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h ที่ผ่านตัวเก็บประจุ และ ค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h ที่ผ่านระบบเมื่อระบบมีการติดตั้งใช้งานชุดตัวเก็บประจุ

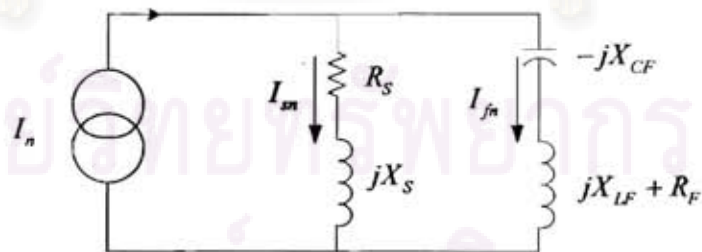
เมื่อ X_c คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ
 I_m คือ ค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h ที่ผ่านตัวเก็บประจุ

จะเห็นได้ว่า ค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h ที่ผ่านตัวเก็บประจุ และ ค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h ที่ผ่านระบบ มีค่าใกล้เคียงกัน และจะเกิดการขยายของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h ที่ผ่านตัวเก็บประจุ และ กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h ที่ผ่านระบบ ดังนั้นตัวเก็บประจุ และ ระบบอาจเกิดความเสียหายได้

2.2.3 ระบบที่มีการติดตั้งใช้งานชุดตัวกรอง



(ก) วงจรอย่างง่ายของระบบไฟฟ้า



(ข) วงจรสมมูลอย่างง่ายของระบบไฟฟ้า

รูปที่ 2.9 ระบบที่มีการติดตั้งใช้งานชุดตัวกรอง

$$I_n = I_m + I_f \tag{2.19}$$

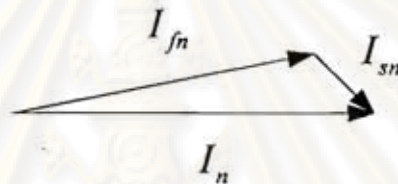
$$I_m = \frac{R_s + jX_s}{R_s + jX_s + R_f + jX_{Lf} - jX_{Cf}} \cdot I_n \quad (2.20)$$

$$I_m = \frac{R_s + jX_s - jX_{Cf}}{R_s + jX_s + R_f + jX_{Lf} - jX_{Cf}} \cdot I_n \quad (2.21)$$

Tuned Filter: set $|X_{Lf}| = |X_{Cf}|$ และ R_f มีค่าน้อยมาก

$$I_m = \frac{R_s + jX_s}{R_s + jX_s + R_f} \cdot I_n \approx I_n$$

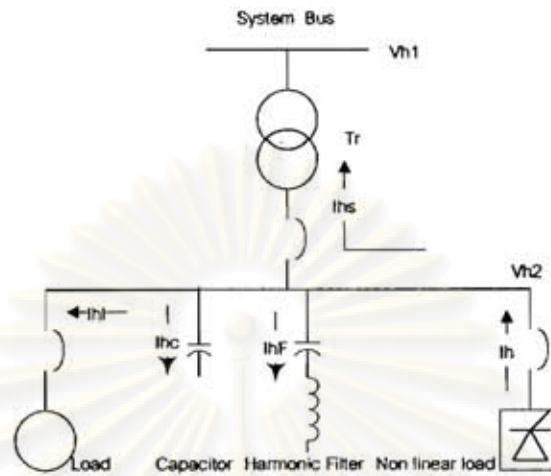
$$I_m = \frac{R_f}{R_s + jX_s + R_f} \cdot I_n \approx 0$$



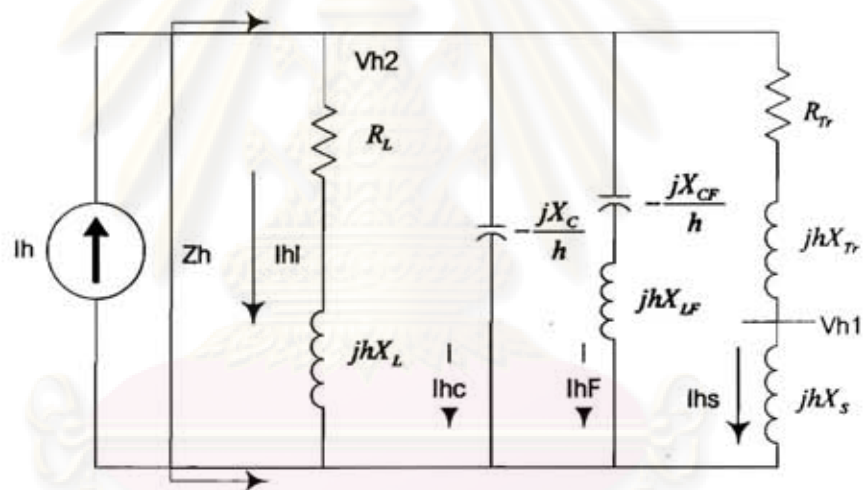
รูปที่ 2.10 ค่ากระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ h ที่ผ่านชุดตัวกรอง และ ค่ากระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ h ที่ผ่านระบบเมื่อระบบมีการติดตั้งใช้งานชุดตัวกรอง

- เมื่อ R_f คือ ค่าความต้านทานของ Tuning Reactor
 X_{Lf} คือ ค่ารีแอคแตนซ์ของ Tuning Reactor
 X_{Cf} คือ ค่ารีแอคแตนซ์ตัวเก็บประจุของชุดตัวกรอง
 I_m คือ ค่ากระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ h ที่ผ่านชุดตัวกรอง

จะเห็นว่าเมื่อมีการต่อตัวรีแอคแตนซ์ของ Tuning Reactor เข้ามายังค่ากระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ h ที่ผ่านระบบมีค่าน้อยมาก และกระแสฮาร์โมนิกจะไหลไปผ่านชุดตัวกรองแทน การวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์โมนิกในลักษณะนี้จะใช้ได้กับระบบไฟฟ้าที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากการหาค่าอิมพีแดนซ์ Z_h จากการยุบวงจรในกรณีนี้ที่ระบบมีขนาดใหญ่หรือมีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิก หลายจุดจะทำให้ลำบาก และเกิดความไม่สะดวกอย่างมาก ดังนั้น จึงควรใช้การวิเคราะห์โดยใช้เมตริกซ์ความนำแทน (Admittance Matrix : Y_{bus})



รูปที่ 2.11 ระบบตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์และ ประเมินกระแสฮาร์มอนิก



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของระบบตัวอย่าง

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} \frac{1}{j h X_s} + \frac{1}{R_{Tr} + j h X_{Tr}} & -\frac{1}{R_{Tr} + j h X_{Tr}} \\ -\frac{1}{R_{Tr} + j h X_{Tr}} & \frac{1}{R_{Tr} + j h X_{Tr}} + \frac{1}{R_L + j h X_L} + \frac{1}{-j X_C / h} + \frac{1}{-j X_{CF} / h + j h X_{LF}} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ I_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{j h X_s} + \frac{1}{R_{Tr} + j h X_{Tr}} & -\frac{1}{R_{Tr} + j h X_{Tr}} \\ -\frac{1}{R_{Tr} + j h X_{Tr}} & \frac{1}{R_{Tr} + j h X_{Tr}} + \frac{1}{R_L + j h X_L} + \frac{1}{-j X_C / h} + \frac{1}{-j X_{CF} / h + j h X_{LF}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{h1} \\ V_{h2} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

เมื่อ	X_C	คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของชุดตัวเก็บประจุที่ความถี่หลักมูล
	R_T	คือ ค่าความต้านทานของหม้อแปลง
	X_T	คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงที่ความถี่หลักมูล
	R_L	คือ ค่าความต้านทานของโหลด
	X_L	คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของโหลดที่ความถี่หลักมูล
	X_s	คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของระบบที่ความถี่หลักมูล
	X_{LF}	คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของรีแอกเตอร์ของตัวกรองที่ความถี่หลักมูล
	X_{CF}	คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุของตัวกรองที่ความถี่หลักมูล
	lh	คือ ค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h จากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น
	lhc	คือ ค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h ที่ไหลเข้าตัวเก็บประจุ
	lht	คือ ค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h ที่ไหลผ่านหม้อแปลง
	lhs	คือ ค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h ที่ไหลเข้าระบบ
	lhF	คือ ค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h ที่เข้าตัวกรองฮาร์มอนิก
	Vh1	คือ ค่าแรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ h ที่บัสที่ 1
	Vh2	คือ ค่าแรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ h ที่บัสที่ 2

2.3 พื้นฐานและวิธีการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก

ปัญหาฮาร์มอนิกนี้มีวิธีการแก้ไขอยู่หลายวิธี โดยวิธีที่จะนำเสนอมีดังต่อไปนี้

ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก หมายถึงชุดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้าแล้วสามารถกรองฮาร์มอนิกออกจากระบบไฟฟ้าได้โดยการให้กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านตัวมัน [2] หรือ สร้างกระแสไฟฟ้าชดเชยจนกระแสฮาร์มอนิกหายไป

1) ตัวกรองชนิดพาสซีฟ (Passive Filter)

หมายถึง อุปกรณ์กรองกระแสฮาร์มอนิกที่ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ ตัวต้านทาน รีแอกเตอร์ และ ตัวเก็บประจุ ที่ออกแบบให้มีค่าตัวต้านทาน รีแอกเตอร์ และ ตัวเก็บประจุ ประพฤติตัวเหมือนลัดวงจรสำหรับความถี่ฮาร์มอนิก แต่เป็นเพียงโหลดธรรมดาตัวหนึ่งสำหรับไฟฟ้าที่ความถี่ 50 Hz ดังนั้นกระแสฮาร์มอนิกในระบบจะเห็นตัวกรองชนิดพาสซีฟเป็นเสมือนลัดวงจร และไหลผ่านตัวกรองชนิดพาสซีฟโดยกระแสฮาร์มอนิกจะไปรบกวนระบบไฟฟ้าน้อยมาก ตัวกรองชนิดพาสซีฟมีหลายชนิดทั้งแบบกรองเดี่ยว แบบกรองคู่ แบบโลพาส แบบไฮพาส และแบบแบนด์พาส เป็นต้นโดยวิทยานิพนธ์นี้จะเน้นศึกษาตัวกรองชนิดพาสซีฟ แบบกรองเดี่ยว

ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว (Single Tuned)

(1) ตัวกรองชนิดดีจูน (Detuned Filter)

ตัวกรองชนิดนี้จะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ำที่สุดที่ความถี่เรโซแนนซ์หรือความถี่ปรับคลื่น (Tuning Frequency) ซึ่งเรียกว่าเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม โดยการหาค่าความถี่ปรับคลื่นนั้นต้องอยู่ต่ำกว่าความถี่ฮาร์มอนิกที่คำนึงถึง 10 % เช่น ตัวกรองชนิดดีจูนใช้กรองกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ดังนั้นต้องมีความถี่ปรับคลื่นเท่ากับ 225 Hz เป็นต้น

$n_k < 0.9 \times 5 = 4.5 (225 \text{ Hz})$ คือมีการตั้งค่าความถี่ปรับคลื่นให้ต่ำกว่า 90 % ของฮาร์มอนิกอันดับที่ 5

$$\text{จาก } n_k = \sqrt{\frac{X_{CF}}{X_{LF}}} = \sqrt{\frac{100}{\%X_{LF}}} \quad (2.24)$$

$$\text{ดังนั้น } \%X_{LF} > \frac{100}{n_k^2} > 4.94\%$$

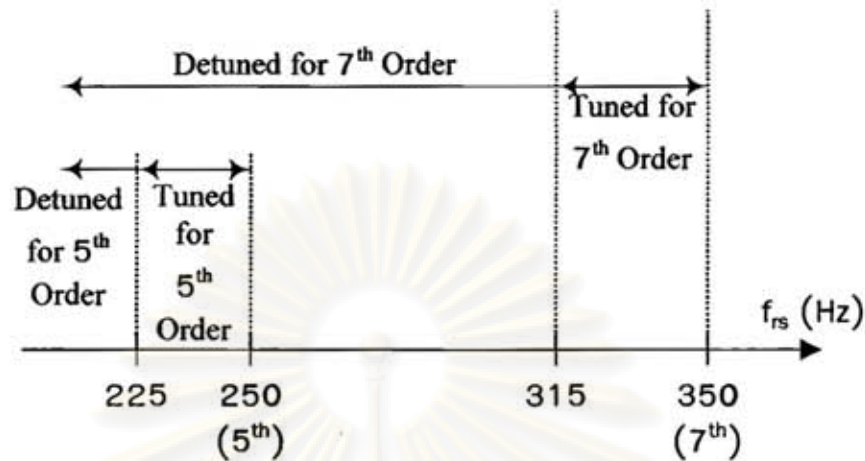
เมื่อ n_k คือ ค่าจุดปรับคลื่นของตัวกรอง
 f_n คือ ความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Hz)

ตารางที่ 2.1 ความถี่ปรับคลื่นที่ %XL ต่างๆ

$\%X_{LF}$	n_k	$f_n (\text{Hz})$
5.67	4.20	210
6	4.08	204
7	3.78	189

(2) ตัวกรองชนิดจูน (Tuned Filter)

ตัวกรองชนิดนี้จะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่ำที่สุดที่ความถี่เรโซแนนซ์หรือความถี่ปรับคลื่นซึ่งเรียกว่าเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม โดยค่าความถี่ปรับคลื่นนั้นต้องมีความแตกต่างกับความถี่ฮาร์มอนิกที่คำนึงถึงไม่เกิน 10 % ส่วนมากนิยมให้มีค่าความถี่ปรับคลื่นห่าง 10 Hz เช่น ตัวกรองชนิดจูนใช้กรองกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ดังนั้นต้องมีความถี่ปรับคลื่นเท่ากับ 240 Hz เป็นต้น



รูปที่ 2.13 ตัวกรองชนิดดีจูน และ ตัวกรองชนิดจูน

2) ตัวกรองชนิดแอคทีฟ (Active Filter)

ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งทำหน้าที่สร้างกระแสฮาร์มอนิกขึ้นมาหักล้างกับกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อไม่ให้กระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าไปในระบบไฟฟ้า

2.3.1 ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดตัวกรองดีจูน (Detuned Filter)

เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สามารถแก้ไขปัญหาระโซ่แรงดันและแบบอนุกรมในระบบไฟฟ้าที่มีปริมาณฮาร์มอนิกอยู่ปริมาณหนึ่งแต่ยังไม่เกิดปัญหาฮาร์มอนิกขึ้น เมื่อได้มีการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุจำนวนหนึ่งเพื่อปรับค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์จะทำให้เกิดการเรโซแนนซ์แบบขนานซึ่งมีความถี่เรโซแนนซ์ตรงกับฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้าจึงเกิดการขยายปริมาณฮาร์มอนิกให้มีปริมาณสูงขึ้นอย่างมากจนทำให้เกิดความเสียหายในระบบไฟฟ้างั้นจึงใช้ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกแทนตัวเก็บประจุ การทำงานของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดดีจูนจะเหมือนกับชุดตัวเก็บประจุทุกประการโดยมีหน้าที่หลักในการปรับค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์เสริมด้วยความสามารถพิเศษในการแก้ปัญหาระโซ่แรงดันแบบขนาน

การออกแบบตัวกรองแบบดีจูน [3]

1. ข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้เพื่อออกแบบมีดังนี้

- 1) ความถี่ของระบบไฟฟ้า (f_1) เช่น 50 Hz
- 2) แรงดันของระบบ (V_r) ที่จะนำตัวกรองดีจูนต่อใช้งาน เช่น 400 V
- 3) กำลังงานรีแอคทีฟ (Q_{comp}) ที่จะตัวกรองดีจูนแต่ละชุดย่อยชดเชย เช่น 25 kVAr 50 kVAr
- 4) $\%X_L$ ที่ใช้ เช่น 6% 7%
- 5) แรงดันเพิ่มของระบบ ($+\Delta V_r$) ที่ยอมให้ตัวกรองดีจูนใช้งานได้โดยไม่เสียหายเช่น +10%

- 6) แรงดันฮาร์มอนิกสูงสุดแต่ละอันดับ เช่น V_3 , V_5 , V_7 , V_{11} , V_{13} ที่ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านตัวกรองดีจูน กำหนดให้ใช้ค่า CL ในการเลือกขนาดของส่วนประกอบ

ตารางที่ 2.2 IEC 61000-2-2 และ ER G 5/4 ที่ระดับแรงดันฮาร์มอนิกในระบบแรงดันต่ำ 400 V

Compatibility Level (CL)	Planning Level (PL)
[IEC 61000-2-2]	[ER G 5/4]
$V_3 = 5.0\%$	$V_3 = 4.0\%$
$V_5 = 6.0\%$	$V_5 = 4.0\%$
$V_7 = 5.0\%$	$V_7 = 4.0\%$
$V_{11} = 3.5\%$	$V_{11} = 3.0\%$
$V_{13} = 3.0\%$	$V_{13} = 2.5\%$
THD = 8.0%	THD = 5.0%

2. การกำหนดขนาดพิกัดของส่วนประกอบ

1) ตัวเก็บประจุ

1.1) กำลังงานรีแอกทีฟพิกัด (Q_c : kVAR)

1.2) แรงดันพิกัด (V_c : V)

1.3) กระแสพิกัด (I_c : A)

2) รีแอกเตอร์

2.1) ค่าอินดักแตนซ์ (L : mH)

2.2) กระแสพิกัดเชิงความร้อน (I_{th} : A)

2.3) กระแสสูงสุดที่ยังทำให้ค่า L ไม่เปลี่ยนค่า (I_{Lm} : A)

การกำหนดกระแสพิกัดเชิงความร้อน (I_{th} : A) มีเงื่อนไขดังนี้

(1) ให้ V_1 (50 Hz) เกินได้ 10% เป็น 110%

(2) ให้ V_3 (150 Hz) มีค่าได้ไม่เกิน 0.5% ของ V_1

(3) ให้ V_5 (250 Hz) มีค่าได้ไม่เกิน 6% ของ V_1

(4) ให้ V_7 (350 Hz) มีค่าได้ไม่เกิน 5% ของ V_1

(5) ให้ V_{11} (550 Hz) มีค่าได้ไม่เกิน 3.5% ของ V_1

(6) ให้ V_{13} (650 Hz) มีค่าได้ไม่เกิน 3.0% ของ V_1

สมการที่ใช้ในการออกแบบมีดังนี้

$$I_{\sigma} = \frac{Q_{\sigma} \times 1000}{\sqrt{3} \times V_{\sigma}} \quad (2.25)$$

$$X_{C,F} = \frac{V_{\sigma}^2}{Q_{\sigma} \times 1000} \quad (2.26)$$

$$X_{Total} = \left[1 - \frac{\%X_{LF}}{100} \right] \frac{V_{\sigma}^2}{Q_{\sigma} \times 1000} \quad (2.27)$$

$$I_1 = \frac{V_s}{\sqrt{3}} \cdot \frac{100}{100 - \%X_{LF}} \cdot \frac{Q_{\sigma} \times 1000}{V_{\sigma}^2} \quad (2.28)$$

$$Q_{comp} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_s \cdot I_1}{1000} = \left[\frac{100}{100 - \%X_{LF}} \right] \left[\frac{V_s}{V_{\sigma}} \right]^2 \times Q_{\sigma} \quad (2.29)$$

$$Q_{\sigma} = \left[\frac{100 - \%X_L}{100} \right] \left[\frac{V_{\sigma}}{V_s} \right]^2 \times Q_{comp} \quad (2.30)$$

$$Q_{comp} = P \left[\tan(\cos^{-1} PF_{old}) - \tan(\cos^{-1} PF_{new}) \right] \quad (2.31)$$

$$\frac{Q_{\sigma}}{P} = \left[\frac{100 - \%X_{LF}}{100} \right] \left[\frac{V_{\sigma}}{V_s} \right]^2 \left[\tan(\cos^{-1} PF_{old}) - \tan(\cos^{-1} PF_{new}) \right] \quad (2.32)$$

$$V_{\sigma} \geq \frac{V_s}{1 - \frac{\%X_{LF}}{100}} \quad (2.33)$$

เมื่อ	I_{σ}	คือ กระแสฟลักซ์ของตัวเก็บประจุ
	V_s	คือ แรงดันระบบที่ตัวกรองต่ออยู่ (V)
	$X_{C,F}$	คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ
	Q_{comp}	คือ กำลังงานรีแอกทีฟชดเชยที่ตัวกรองจ่ายให้ระบบ (kVar)
	P	คือ กำลังงานจริงของโหลดรวมทั้งหมด (W)

Q_c	คือ กำลังงานรีแอกทีฟที่กักของตัวเก็บประจุ (kVAR)
V_c	คือ แรงดันที่กักของตัวเก็บประจุ (V)
PF_{old}	คือ ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเดิม
PF_{new}	คือ ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใหม่ที่ต้องการ

2.3.2 ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดตัวกรองจูน (Tuned Filter) [4,5]

วงจรตัวกรองจูนคือวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมที่ประกอบด้วย L และ C ต่ออนุกรมกัน ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดตัวกรองจูน ทำหน้าที่กรองกระแสฮาร์มอนิกที่กำหนด และยังช่วยแก้ปัญหาเรื่องเพาเวอร์แฟกเตอร์เสริมอีกด้วย และมีข้อแตกต่างจากตัวกรองดีจูน คือตัวกรองจูนมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถแบ่งเป็นวงจรร้อยได้เหมือนวงจรชุดตัวเก็บประจุ และ ตัวกรองดีจูน จึงทำให้ความสามารถในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของโหลดด้อยกว่า

1. การออกแบบตัวกรองแบบจูน

- 1) กำหนดค่าแรงดันของระบบ V_s
- 2) กำหนดค่ากำลังรีแอกทีฟ Q_r (kVAR) ที่ต้องการ
- 3) กำหนดจำนวนชุดของ Filter ที่จะใช้ เช่น
 1. ชุด 5th Filter
 2. ชุด 5th + 7th Filter
 3. ชุด 5th × 2 + 7th Filter
 4. ชุด 5th + 7th + 11th Filter
- 4) แบ่ง Q_r ออกเป็นส่วนๆ ตามจำนวนชุดของตัวกรองโดยใช้สัดส่วนของกระแสฮาร์มอนิก
- 5) กำหนดจุดปรับคลื่น n_h ของตัวกรองแต่ละชุด
- 6) ตรวจสอบแรงดันที่จะปรากฏคร่อมตัว C และเลือกแรงดันที่กัก V_c ของ C

$$V_c \geq V_r = \frac{n_h^2}{n_h^2 - 1} \times V_s \quad (2.34)$$

- 7) กำหนดขนาดกำลังรีแอกทีฟที่กัก Q_c (kVAR) ของตัว C ในตัวกรองแต่ละชุด

$$Q_c = Q_r \left(\frac{V_c}{V_s} \right)^2 \times \frac{n_h^2 - 1}{n_h^2} \quad (2.35)$$

- 8) หาค่า C และ L ที่จะใช้

$$C = \frac{Q_{\sigma} \times 10^9}{2\pi f V_{\sigma}^2} \quad (\mu F) \quad (2.36)$$

$$L = \frac{10^9}{(2\pi f \cdot n_h)^2 C} \quad (\text{mH}) \quad (2.37)$$

9) กำหนดค่า Q-Factor ของตัวรีแอกเตอร์ และหาค่า R

$$R = \frac{2\pi f L \times n_h}{Q_{\text{Factor}}} \quad (2.38)$$

10) วิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิก

11) ตรวจสอบสภาพการทำงานของตัวเก็บประจุ

12) กำหนดขนาดกระแสพิคคของตัว L

$$I_L = \sqrt{(I_{L1})^2 + \sum I_k^2} \quad (2.39)$$

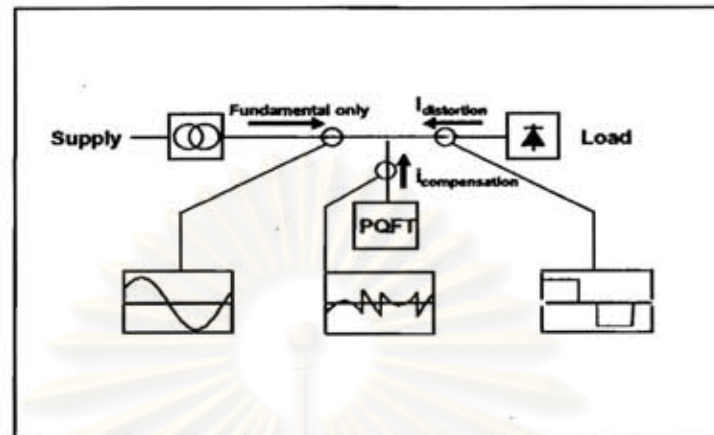
เมื่อ Q_F	คือ	กำลังรีแอกติฟที่แบ่งออกเป็นส่วนๆ ตามจำนวนชุดของตัวกรอง
Q_{Factor}	คือ	ตัวประกอบคุณภาพของตัวกรอง
n_h	คือ	ค่าจุดปรับคลื่นของตัวกรอง
V_{σ}	คือ	แรงดันของระบบที่ตัวกรองต่ออยู่

2.3.3 ตัวกรองชนิดแอกทีฟ (Active Filter)

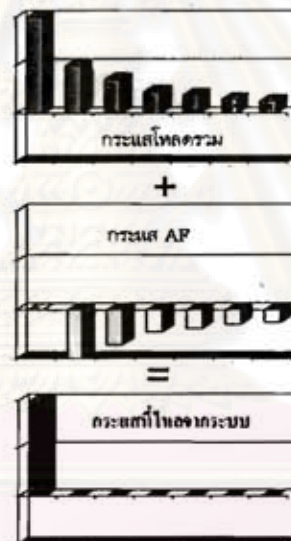
เป็นชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ควบคุมการทำงานด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ มีหน้าที่หลักในการกรองฮาร์มอนิกปริมาณมากๆ ออกจากระบบ โดยตัวกรองชนิดแอกทีฟจะสร้างกระแสฮาร์มอนิกขึ้นมาจำนวนหนึ่งให้มีปริมาณเท่ากับกระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจวัดได้ แล้วจ่ายกระแสฮาร์มอนิกเหล่านี้เข้าสู่ระบบไฟฟ้าโดยให้มีมุมเฟสต่างกัน 180 องศา [6] กระแสฮาร์มอนิกที่ตัวกรองชนิดแอกทีฟจ่ายเข้าไปในระบบไฟฟ้าจะไปหักล้างกับกระแสฮาร์มอนิกที่มีในระบบไฟฟ้าได้พอดี และ มีความสามารถเสริมในการปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ ตัวกรองชนิดแอกทีฟสามารถกรองฮาร์มอนิกได้ตั้งแต่ฮาร์มอนิกที่ 2 ถึง 50 และยังสามารถกรองได้ 15-20 อันดับพร้อมๆกัน

หลักการการทำงานของตัวกรองชนิดแอกทีฟมีดังนี้

- 1) วัดและวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบ
- 2) กรองฮาร์มอนิกออกจากระบบไฟฟ้าโดยตรง
- 3) ตรวจสอบผลการกรองฮาร์มอนิกให้อยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการตลอดเวลา



รูปที่ 2.14 การทำงานของตัวกรองชนิดแอกทีฟ



รูปที่ 2.15 ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้งานตัวกรองชนิดแอกทีฟ

การที่มีทางเลือกในการกรองกระแสฮาร์มอนิกที่หลากหลายนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการวิเคราะห์ว่าการใช้งานตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดใดเหมาะสมกับระบบที่ใช้ในการวิเคราะห์มากที่สุด สามารถที่จะแก้ปัญหาด้านฮาร์มอนิกได้อย่างเหมาะสม และอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในระบบสามารถทำงานได้โดยที่ไม่เกิดปัญหาหรือเกิดความเสียหาย

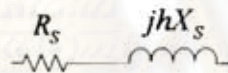
บทที่ 3

แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้ากำลัง

แบบจำลองของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลังประกอบด้วยอะไรบ้าง ในวิทยานิพนธ์นี้จะคิดค่าต่างๆ เป็นค่าต่อเฟสทั้งหมด ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ [7]

3.1 ระบบไฟฟ้า

แบบจำลองนี้จะพิจารณาจากจุดต่อร่วม(PCC)เข้าไปในระบบไฟฟ้าซึ่งจะแทนแบบจำลองนี้ด้วยค่าอิมพีแดนซ์ที่มีค่าความต้านทานต่ออนุกรมกับค่ารีแอกแตนซ์ โดยที่ค่าความต้านทานมีความสัมพันธ์กับค่ารีแอกแตนซ์ในรูปของอัตราส่วน X/R



รูปที่ 3.1 แบบจำลองของระบบไฟฟ้า

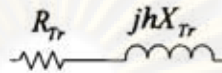
$$Z_s = \frac{V_s^2}{MVA_{sc}} \quad (3.1)$$

$$Z_{sh} = R_s + jhX_s \quad (3.2)$$

เมื่อ	Z_s	คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล (โอห์ม)
	Z_{sh}	คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าที่อันดับฮาร์โมนิก h (โอห์ม)
	R_s	คือ ค่าความต้านทานของระบบ (โอห์ม)
	X_s	คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของระบบที่ความถี่หลักมูล (โอห์ม)
	V_s	คือ ค่าแรงดันที่ระบุของระบบไฟฟ้า (kV)
	MVA_{sc}	คือ ค่ากำลังลัดวงจรของระบบไฟฟ้า (MVA)
	h	คือ อันดับของฮาร์โมนิก

3.2 หม้อแปลงไฟฟ้า

แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์ที่มีค่าความต้านทานต่ออนุกรมกับค่ารีแอกแตนซ์ซึ่งแปรผันตามอันดับของฮาร์โมนิก ดังนั้นที่อันดับฮาร์โมนิกต่างๆสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า

$$Z_{Tr} = \frac{\%Z V^2}{100 S_{Tr}} \quad (3.3)$$

$$R_{Tr} = P_k \times \frac{V^2}{(S_{Tr})^2} \quad (3.4)$$

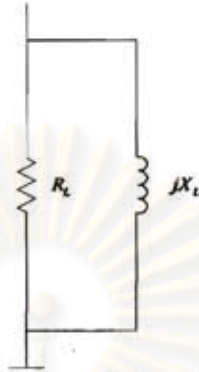
$$Z_{Trh} = R_{Tr} + jhX_{Tr} \quad (3.5)$$

เมื่อ	V	คือ	ค่าแรงดันพิกัดของหม้อแปลง (V)
	Z_{Tr}	คือ	ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่หลักมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า (โอห์ม)
	Z_{Trh}	คือ	ค่าอิมพีแดนซ์ที่ฮาร์โมนิกอันดับที่ h ของหม้อแปลงไฟฟ้า (โอห์ม)
	R_{Tr}	คือ	ค่าความต้านทานของหม้อแปลงไฟฟ้า (โอห์ม)
	X_{Tr}	คือ	ค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล (โอห์ม)
	P_k	คือ	กำลังสูญเสียทั้งหมดในขดลวดของหม้อแปลงที่กระแสพิกัด (W)
	$\%Z$	คือ	ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าคิดเป็นร้อยละ
	S_{Tr}	คือ	กำลังปรากฏของหม้อแปลงไฟฟ้า (VA)

3.3 โหลดแบบเชิงเส้น

ข้อมูลของโหลดเชิงเส้นโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของกำลังงานจริง (P) และกำลังงานรีแอกทีฟ (Q) ซึ่งใช้สำหรับการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ ค่าอิมพีแดนซ์จะประกอบด้วย ค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ ซึ่งจะต่ออนุกรม หรือ ขนานกันนั้น ขึ้นกับข้อมูลของโหลดนั้นๆ ในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้แบบจำลองของโหลดเชิงเส้นเป็นแบบขนาน โดยค่าความต้านทาน และค่ารีแอกแตนซ์หาได้จากกำลังงานจริง (P) และ กำลังงานรีแอกทีฟ (Q) ของโหลดนั้นๆ ตามสมการที่ 3.6 และ สมการที่

3.7



รูปที่ 3.3 แบบจำลองของโหลดเชิงเส้นแบบขนาน

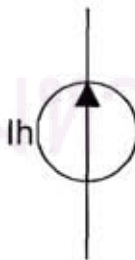
$$R_L = \frac{V_S^2}{P_1} \quad (3.6)$$

$$X_L = h \cdot \frac{V_S^2}{Q_1} \quad (3.7)$$

เมื่อ V_S	คือ	ค่าแรงดันที่ระบุของระบบไฟฟ้า (V)
R_L	คือ	ค่าความต้านทานของโหลด (โอห์ม)
X_L	คือ	ค่ารีแอกแตนซ์ของโหลดที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ h (โอห์ม)
P_1	คือ	กำลังงานจริงของโหลดในสภาวะแรงดันปกติ (W)
Q_1	คือ	กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของโหลดในสภาวะแรงดันปกติ (VAR)

3.4 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกคือโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, เต้าหลอมโลหะ และ วงจรเรียงกระแส เป็นต้น ซึ่งแบบจำลองแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกจะถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แบบจำลองแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก

ข้อมูลของความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆ อันเนื่องมาจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ต่ออยู่ภายในโรงงานอุตสาหกรรม สามารถหาได้จากการตรวจวัดฮาร์มอนิกภายในโรงงาน ก่อนนำข้อมูลมาวิเคราะห์ หรือ อาจเป็นค่าที่ประเมินจากข้อมูลรายละเอียดของโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นจากผู้ผลิต

3.5 ตัวเก็บประจุ (Capacitor)

วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุสามารถแทนได้ด้วยค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ X_C โดยไม่คิดค่าความต้านทาน ดังนั้นจะได้



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุ

$$X_C = -j \frac{V_\sigma^2}{hQ_\sigma} \quad (3.8)$$

เมื่อ X_C	คือ ค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ h (โอห์ม)
V_σ	คือ ค่าแรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ (V)
Q_σ	คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของตัวเก็บประจุ (VAR)
h	คือ อันดับฮาร์มอนิก

3.6 ตัวกรองฮาร์มอนิก

ในกรณีที่เกิดปัญหาเรโซแนนซ์ระหว่างระบบกับตัวเก็บประจุที่อันดับฮาร์มอนิกใกล้กับอันดับฮาร์มอนิกที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกผลิตออกมามาก (ตามปกติคืออันดับฮาร์มอนิกที่ 5 , 7 , 11 , 13 เป็นต้น) ทำให้เกิดภาวะโหลดเกินทั้งกระแสและแรงดันที่ตัวเก็บประจุ การแก้ปัญหาวิธีหนึ่งที่ได้ผลแน่นอนคือการเปลี่ยนเป็นตัวกรองฮาร์มอนิก ตัวกรองฮาร์มอนิกนี้ทำได้โดยการนำตัวเหนี่ยวนำหรือรีแอกเตอร์ (Reactor) ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ

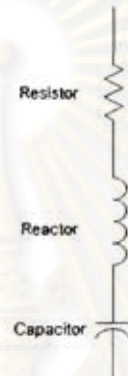
ตัวกรองฮาร์มอนิกจะทำหน้าที่ 2 ประการคือ

- 1) ให้กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ความถี่หลักมูลสำหรับการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง
- 2) ลดหรือกรองกระแสฮาร์มอนิก

ตัวกรองฮาร์มอนิกแบ่งเป็น 2 แบบ ตามความถี่ที่ปรับตั้ง (Tuned) ไว้คือ

- ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบดีจูน (Detuned Filter)
- ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบจูน (Tuned Filter)

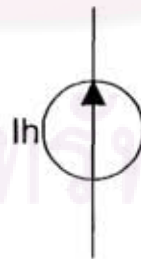
ขั้นตอนการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกทั้งชนิดดีจูน และ ชนิดจูนได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3.1 และ หัวข้อ 2.3.2 ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูลของตัวกรองฮาร์มอนิก

3.7 ตัวกรองชนิดแอกทีฟ

เป็นชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ควบคุมการทำงานด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ มีหน้าที่หลักในการกรองฮาร์มอนิกปริมาณมากๆ ออกจากระบบ โดยตัวกรองชนิดแอกทีฟจะสร้างกระแสฮาร์มอนิกขึ้นมาจำนวนหนึ่งให้มีปริมาณเท่ากับกระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจวัดได้ แล้วจ่ายกระแสฮาร์มอนิกเหล่านี้เข้าสู่ระบบไฟฟ้าโดยให้มีมุมเฟสต่างกัน 180 องศา ดังนั้นแบบจำลองตัวกรองชนิดแอกทีฟจึงมีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายกระแส



รูปที่ 3.7 แบบจำลองตัวกรองชนิดแอกทีฟ

แบบจำลองต่างๆ เหล่านี้จะถูกใช้ในการวิเคราะห์หาก็ต่อเมื่อผู้ใช้งานได้เลือกใช้อุปกรณ์เหล่านี้ในการแก้ปัญหาด้านฮาร์มอนิก

บทที่ 4

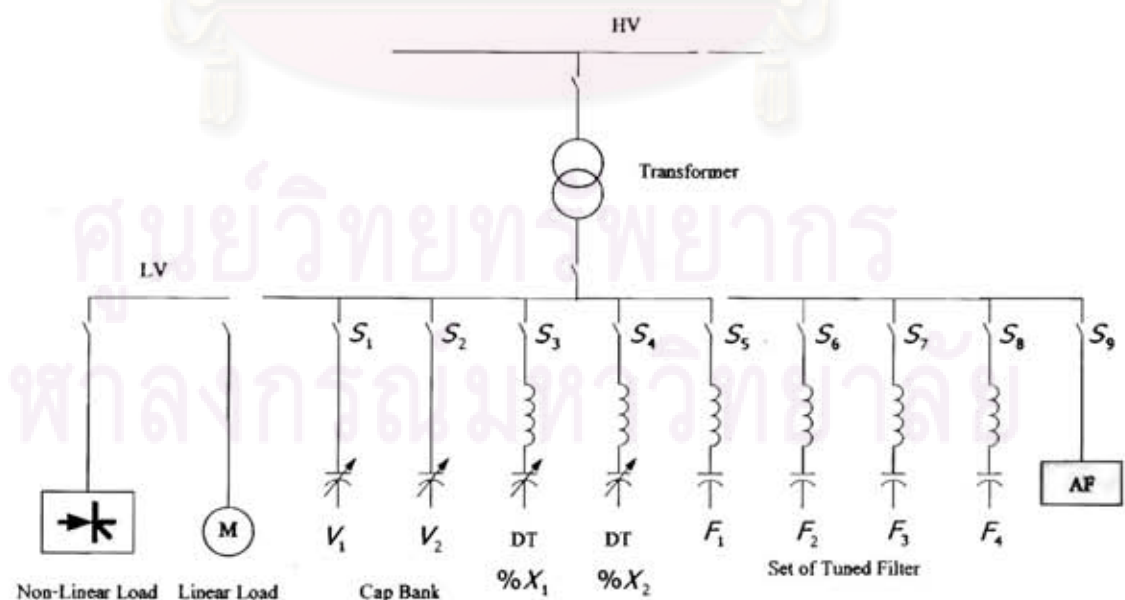
โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการวิเคราะห์ และ ประเมินกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าโดยการทำให้เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อให้เกิดความสะดวกแก่ผู้ใช้งาน โดยได้ใช้โปรแกรม เดลไฟ รุ่น 7 (Delphi 7) เป็นเครื่องมือในการพัฒนา ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ และ ประเมินกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า และการพัฒนาขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีความสามารถดังนี้

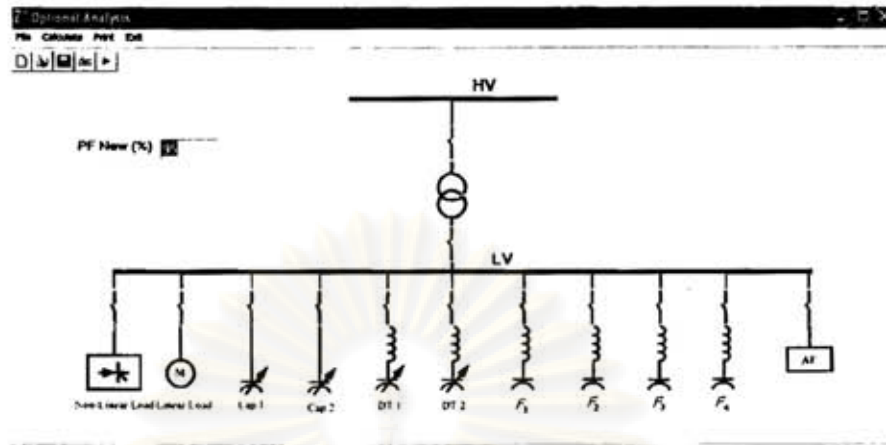
1) สามารถวิเคราะห์หาขนาดของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลไปยังอุปกรณ์ต่างๆที่ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก เช่น ตัวกรองดีจัน ตัวกรองจูน โหลด หม้อแปลง เป็นต้น [4]

2) สามารถวิเคราะห์หาค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวม (THD) ที่บัสต่างๆ ทำให้สามารถวิเคราะห์สมรรถนะของระบบไฟฟ้าในเรื่องฮาร์มอนิก เปรียบเทียบกับมาตรฐานต่างๆ ได้ โดยโครงสร้างการทำงานของโปรแกรมเป็นดังรูปที่ 4.3

4.1 โครงสร้างของโปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.1 ระบบที่ใช้ในการวิเคราะห์



นาย นศิ วันทอง 4970388021



อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ โรยะ แฉนหรือ

รูปที่ 4.2 ส่วนป้อนข้อมูลของโปรแกรม

มี Combination ในการเลือกใช้อุปกรณ์ต่างๆให้เลือกได้ทั้งหมด $2^9 = 512$ รายการ

$$S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9 = 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0$$

⋮

$$S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9 = 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1$$

โดยที่ 1=ON และ 0=OFF

ตัวอย่างการทำงาน

1. ใ้ Cap Bank 400 V
2. ใ้ Cap Bank 525 V
3. ใ้ Detuned 400 V
4. ใ้ Tuned 400 V
5. ใ้ Active Filter
6. ใ้ Cap Bank + Detuned
7. ใ้ Cap Bank + Tuned
8. ใ้ Detuned + Tuned
9. ใ้ Detuned + Active Filter
10. อื่นๆ

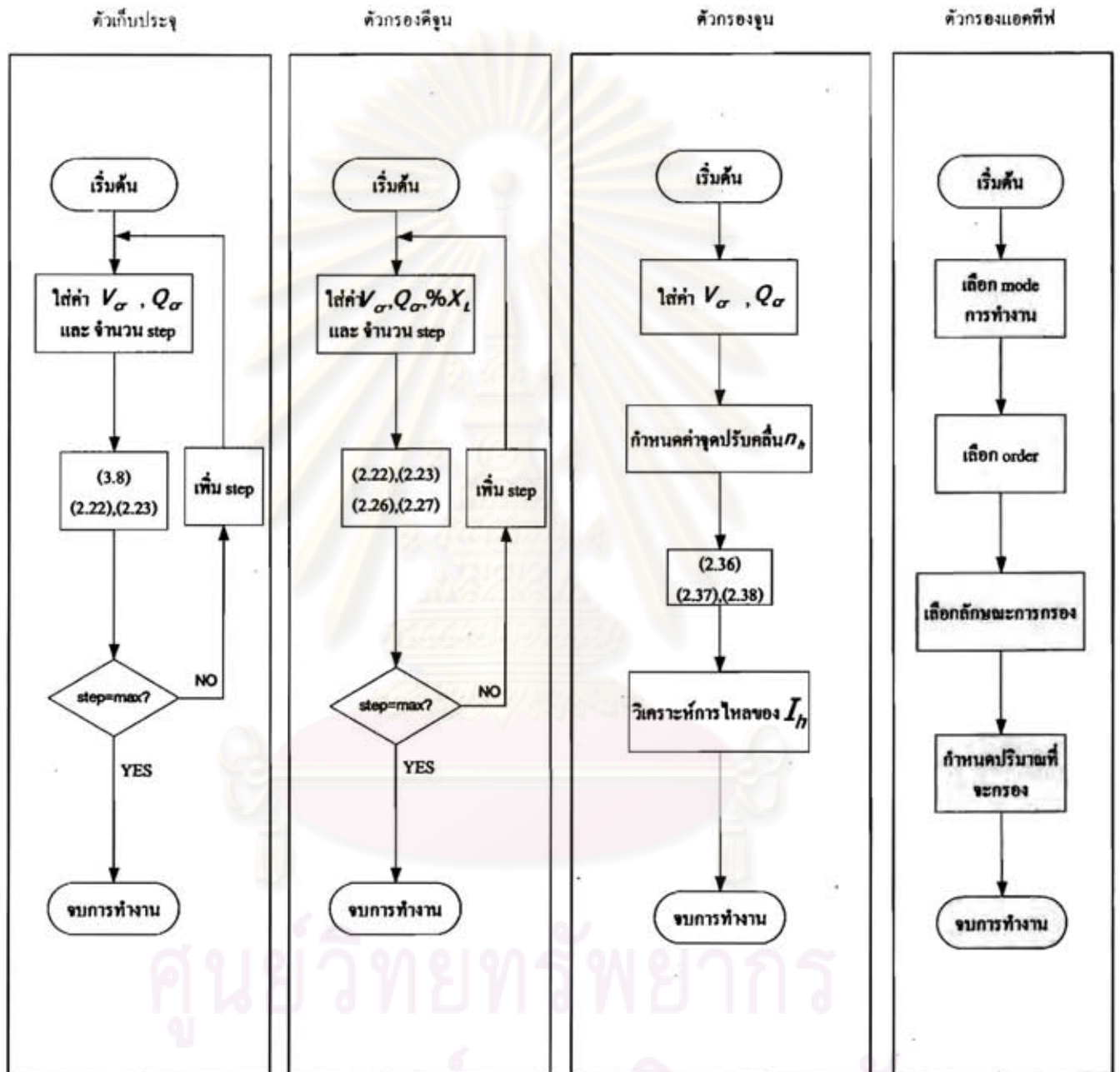
เป็นต้น

สามารถแสดงการทำงานได้ดังแผนภาพต่อไปนี้



รูปที่ 4.3 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรม

ในขั้นตอนการคำนวณหาขนาดของส่วนประกอบของอุปกรณ์แต่ละชนิดแสดงดังแผนภาพต่อไปนี้



รูปที่ 4.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ของอุปกรณ์แต่ละชนิด

4.2 การป้อนข้อมูลเข้าสู่ระบบ

บัสแรงดันสูง ต้องการข้อมูลดังนี้

- 1) ค่ากำลังลัดวงจรของระบบไฟฟ้า (MVA)
- 2) ค่าแรงดันของระบบไฟฟ้า (kV)
- 3) ความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานกับค่ารีแอกแตนซ์ในรูปของอัตราส่วน X/R

HV Bus |

MVA s/c (MVA)	<input type="text"/>
System Voltage (kV)	<input type="text"/>
X/R Ratio	<input type="text"/>

รูปที่ 4.5 บัสแรงดันสูง

หม้อแปลงไฟฟ้า ต้องการข้อมูลดังนี้

- 1) ขนาดกำลังไฟฟ้าพิกัดเป็นกิโลโวลท์ -แอมป์ (kVA)
- 2) ขนาดแรงดันพิกัดด้านแรงสูง เป็นกิโลโวลท์
- 3) ขนาดแรงดันพิกัดด้านแรงต่ำ เป็นโวลท์
- 4) ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงคิดเป็นร้อยละ
- 5) กำลังสูญเสียทั้งหมดในขดลวดของหม้อแปลงที่กระแสพิกัด เป็นกิโลวัตต์

Transformer |

Rating (kVA)	<input type="text"/>
Primary Voltage (kV)	<input type="text"/>
Secondary Voltage (V)	<input type="text"/>
%Z	<input type="text"/>
Load Loss(kW)	<input type="text"/>

รูปที่ 4.6 หม้อแปลงไฟฟ้า

บัสแรงดันต่ำ ต้องการข้อมูลดังนี้

- 1) ค่าแรงดันของระบบไฟฟ้า (V)

LV Bus |

Operating Voltage (V)

รูปที่ 4.7 บัสแรงดันต่ำ

โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น ต้องการข้อมูลดังนี้

- 1) ขนาดกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ เป็นเมกกะวัตต์
- 2) ตัวประกอบกำลัง

Non Linear Load |

P (kW)

PF(%)

h	Ih(%I1)
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0

Harmonic Order

ODD

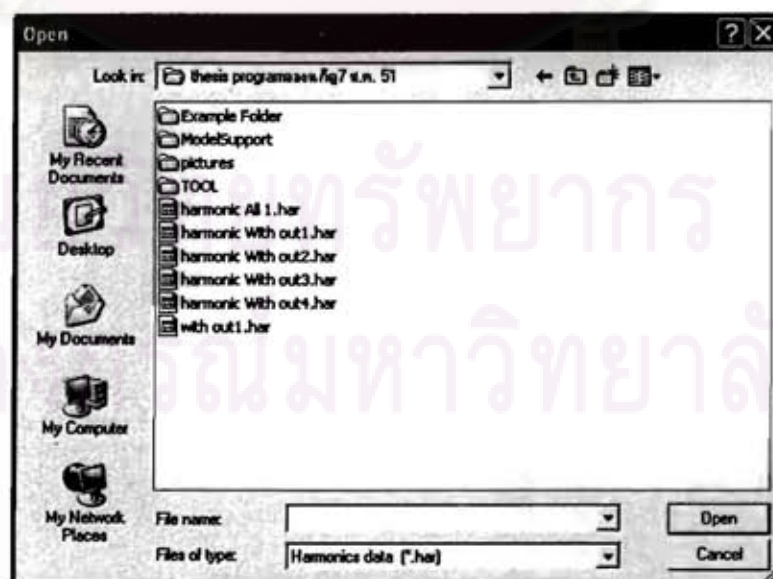
With out Tripen

ALL

Open Harmonic Data

Save Harmonic Data

รูปที่ 4.8 โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 4.9 หน้าจอข้อมูลเกี่ยวกับกระแสฮาร์มอนิก

โหลดเป็นเชิงเส้น ต้องการข้อมูลดังนี้

- 1) ขนาดกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ เป็นเมกกะวัตต์
- 2) ตัวประกอบกำลัง

Linear Load |

P(kW)	<input type="text"/>
PF(%)	<input type="text"/>

รูปที่ 4.10 โหลดเป็นเชิงเส้น

ชุดตัวเก็บประจุตัวที่ 1 ต้องการข้อมูลดังนี้

- 1) ขนาดแรงดัน เป็นโวลท์
- 2) ขนาดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟต่อชุด เป็นกิโลวาร์/ชุด
- 3) จำนวนชุดของตัวเก็บประจุ

Capacitor Bank 1 |

Vcr (V)	<input type="text"/>
kVar/Step	<input type="text"/>
No. of Step	<input type="text"/>

รูปที่ 4.11 ตัวเก็บประจุตัวที่ 1

ชุดตัวเก็บประจุตัวที่ 2 ต้องการข้อมูลดังนี้

1. ขนาดแรงดัน เป็นโวลท์
2. ขนาดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟต่อชุด เป็นกิโลวาร์/ชุด
3. จำนวนชุดของตัวเก็บประจุ

Capacitor Bank 2 |

Vcr (V)	<input type="text"/>
kVar/Step	<input type="text"/>
No. of Step	<input type="text"/>

รูปที่ 4.12 ตัวเก็บประจุตัวที่ 2

ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบคิจนตัวที่ 1 ต้องการข้อมูลดังนี้

- 1) ขนาดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟต่อชุด เป็นกิโลวาร์/ชุด
- 2) จำนวนชุดของตัวเก็บประจุ
- 3) % XL
- 4) ค่า Q Factor
- 5) ขนาดแรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ เป็นโวลท์

Detmed 1 |

kVA/Step	<input type="text"/>	v_1 (%) ¹⁰	v_3 (%) ^{8.5}	v_5 (%) ^{6.8}	v_7 (%) ^{5.8}	v_{11} (%) ^{3.5}	v_{13} (%) ^{3.0}
No. of Step	<input type="text"/>						
%XL	<input type="text"/>						
Q-Factor	<input type="text"/>						
Vcr (V)	<input type="text"/>						

รูปที่ 4.13 ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบคิจนตัวที่ 1

ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบคิจนตัวที่ 2 ต้องการข้อมูลดังนี้

1. ขนาดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟต่อชุด เป็นกิโลวาร์/ชุด
2. จำนวนชุดของตัวเก็บประจุ
3. % XL
4. ค่า Q Factor
5. ขนาดแรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ เป็นโวลท์

Detmed 2 |

kVA/Step	<input type="text"/>	v_1 (%) ¹⁰	v_3 (%) ^{8.5}	v_5 (%) ^{6.8}	v_7 (%) ^{5.8}	v_{11} (%) ^{3.5}	v_{13} (%) ^{3.0}
No. of Step	<input type="text"/>						
%XL	<input type="text"/>						
Q-Factor	<input type="text"/>						
Vcr (V)	<input type="text"/>						

รูปที่ 4.14 ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบคิจนตัวที่ 2

ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบจูนตัวที่ 1 ต้องการข้อมูลดังนี้

- 1) ความถี่ที่ต้องการกรอง (Tuning Point)
- 2) ขนาดกำลังไฟฟ้าพิกัดของตัวเก็บประจุ เป็นกิโลวาร์
- 3) ขนาดแรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ เป็นโวลท์
- 4) ค่า Q Factor

Filter 1 |

Tuning Point	<input type="text"/>
Q (kVAr)	<input type="text"/>
Vcr (Volts)	<input type="text"/>
Q-Factor	<input type="text"/>

รูปที่ 4.15 ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบจูนตัวที่ 1

ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบจูนตัวที่ 2 ต้องการข้อมูลดังนี้

1. ความถี่ที่ต้องการกรอง (Tuning Point)
2. ขนาดกำลังไฟฟ้าพิกัดของตัวเก็บประจุ เป็นกิโลวาร์
3. ขนาดแรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ เป็นโวลท์
4. ค่า Q Factor

Filter 2 |

Tuning Point	<input type="text"/>
Q (kVAr)	<input type="text"/>
Vcr (Volts)	<input type="text"/>
Q-Factor	<input type="text"/>

รูปที่ 4.16 ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบจูนตัวที่ 2

ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบจูนตัวที่ 3 ต้องการข้อมูลดังนี้

1. ความถี่ที่ต้องการกรอง (Tuning Point)
2. ขนาดกำลังไฟฟ้าที่กักของตัวเก็บประจุ เป็นกิโลวัตต์
3. ขนาดแรงดันที่กักของตัวเก็บประจุ เป็นโวลต์
4. ค่า Q Factor

Filter 3 |

Tuning Point	<input type="text"/>
Q (kVAr)	<input type="text"/>
Vcr (Volts)	<input type="text"/>
Q-Factor	<input type="text"/>

รูปที่ 4.17 ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบจูนตัวที่ 3

ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบจูนตัวที่ 4 ต้องการข้อมูลดังนี้

1. ความถี่ที่ต้องการกรอง (Tuning Point)
2. ขนาดกำลังไฟฟ้าที่กักของตัวเก็บประจุ เป็นกิโลวัตต์
3. ขนาดแรงดันที่กักของตัวเก็บประจุ เป็นโวลต์
4. ค่า Q Factor

Filter 4 |

Tuning Point	<input type="text"/>
Q (kVAr)	<input type="text"/>
Vcr (Volts)	<input type="text"/>
Q-Factor	<input type="text"/>

รูปที่ 4.18 ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบจูนตัวที่ 4

ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดแอกทีฟ

ผู้ใช้จะเป็นผู้กำหนดว่าจะให้ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดแอกทีฟกรองฮาร์มอนิกที่ลำดับใด และกรองในปริมาณเท่าใด(Amp)

Active Filter |

HARMONICS	
h	Ih(A)
2	0.00
3	0.00
4	0.00
5	0.00
6	0.00
7	0.00
8	0.00

รูปที่ 4.19 ตัวกรองฮาร์มอนิกชนิดแอกทีฟ

4.3 ส่วนแสดงผล

การนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลมี 3 ลักษณะดังต่อไปนี้

1.) ผลกระทบที่มีต่อระบบนำเสนอนในแบบตารางข้อมูล และ กราฟเส้น แบ่งออกเป็น 2 ส่วน

- ผลกระทบที่มีต่อระบบทางด้านแรงดันสูง

- V_h

- I_{hs}

- ผลกระทบที่มีต่อระบบทางด้านแรงดันต่ำ

- V_h

- I_h

- I_{ks}

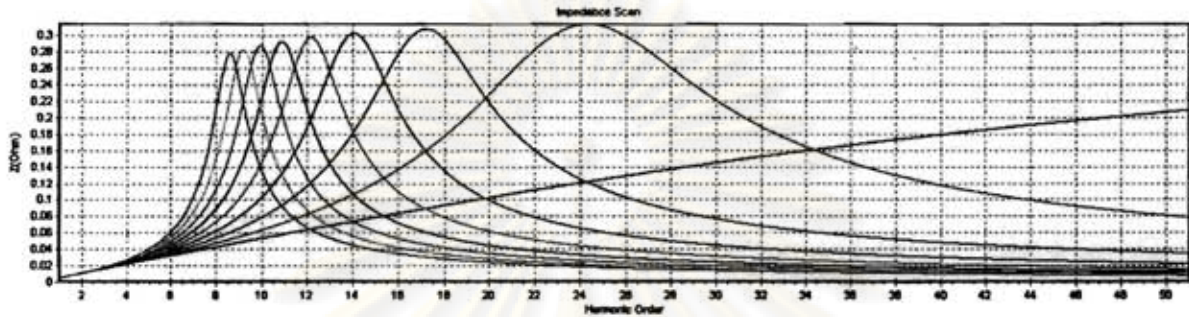
- I_{ML}

2.) ความเสียหายที่จะเกิดขึ้นเมื่อเทียบกับกฎระเบียบ และ มาตรฐานต่างๆ

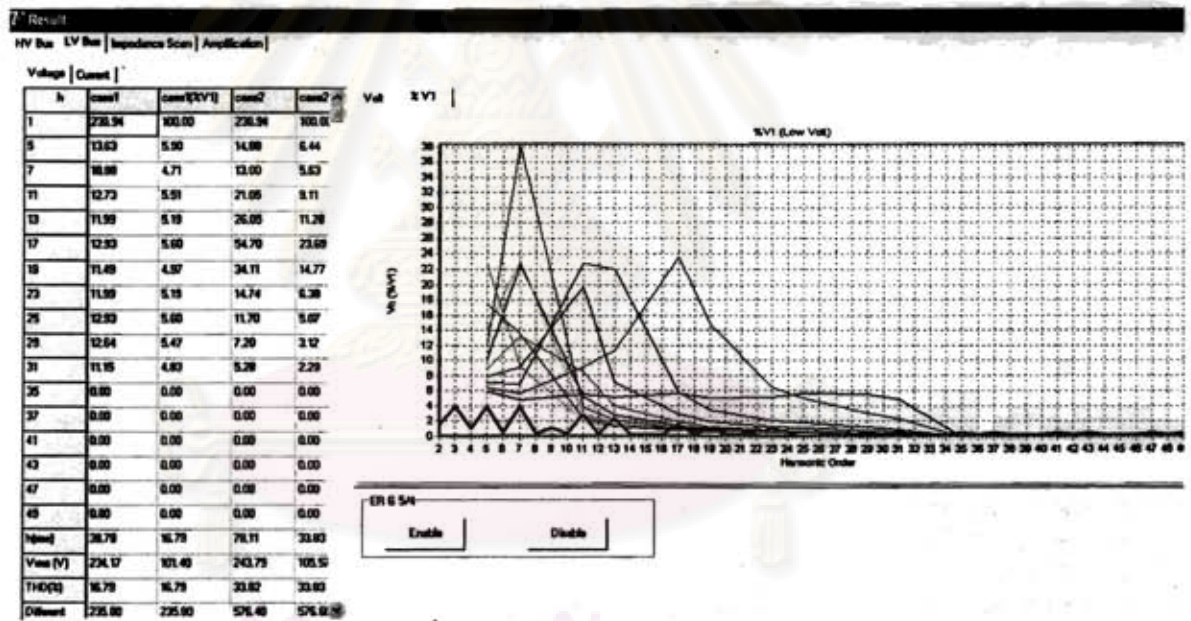
- V_h เมื่อเทียบกับเกณฑ์ของการไฟฟ้า

- I_{kc} เทียบกับความสามารถของตัวเก็บประจุเพื่อดูว่าทำงานได้หรือไม่

3.) ผลการวิเคราะห์เป็นภาพรวมในแบบเปรียบเทียบ เช่น เมื่อเลือกให้ตัวเก็บประจุทำงานก็สามารถแสดงให้เห็นถึงลักษณะการทำงานตั้งแต่ตัวเก็บประจุยังไม่เริ่มทำงาน ไปจนถึงทำงานครบทุกชั้นได้ [8]



รูปที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์เป็นภาพรวมในแบบเปรียบเทียบ



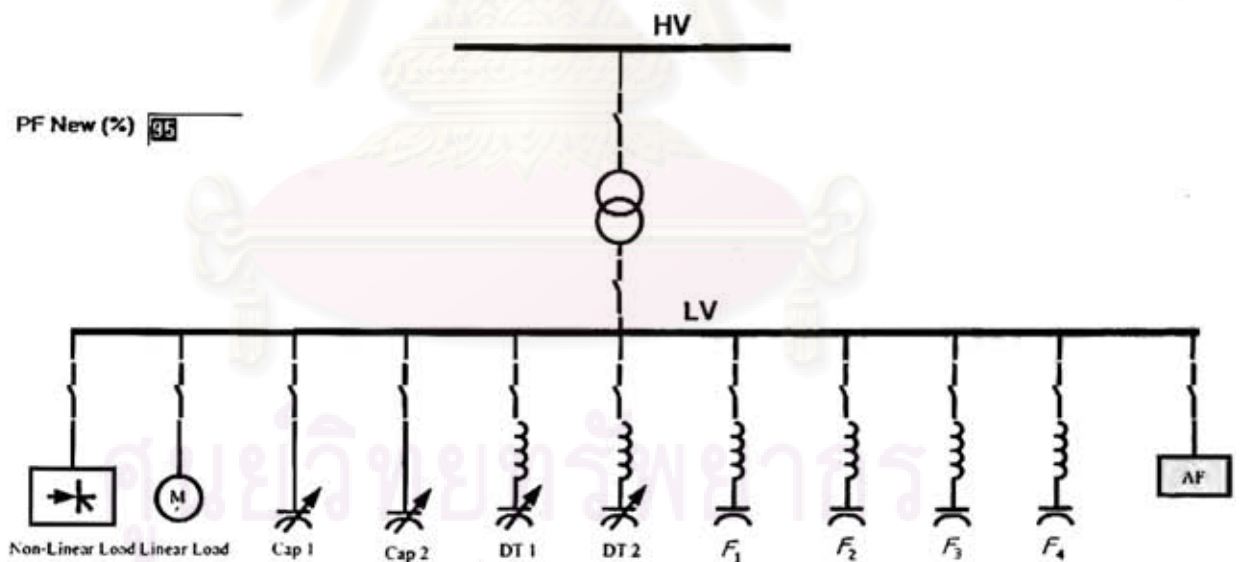
รูปที่ 4.21 หน้าจอส่วนแสดงผล

ศูนย์วิจัยทีวทีไพกร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การวิเคราะห์ทางเลือก

ในบทนี้จะนำเสนอตัวอย่างของระบบที่ใช้วิเคราะห์หาขนาดของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลไปยังอุปกรณ์ต่างๆที่ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก อุปกรณ์ต่างๆเช่น ตัวกรอง ดีจูน ตัวกรองจูน โหลด หม้อแปลง เป็นต้น และวิเคราะห์หาค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวม (THD) ที่บัสต่างๆ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์สมรรถนะของระบบไฟฟ้าในเรื่องฮาร์มอนิก เปรียบเทียบกับมาตรฐาน โดยมี Combination ในการเลือกใช้อุปกรณ์ต่างๆให้เลือกได้ทั้งหมด $2^9 = 512$ รายการ โดยจะนำเสนอการเลือกใช้อุปกรณ์ที่น่าสนใจให้เป็นระบบตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ เช่น ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกับตัวกรองชนิดจูน ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูน แต่ละระบบที่ทดสอบจะดูผลของการไหลของกระแสฮาร์มอนิกไปยังอุปกรณ์ต่างๆที่ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า และแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสแรงต่ำและบัสแรงสูง



รูปที่ 5.1 ระบบที่ใช้ในการวิเคราะห์

การวิเคราะห์จะทำกับระบบที่มีทั้งโหลดเชิงเส้นและโหลดไม่เป็นเชิงเส้น กับระบบที่มีเฉพาะโหลดไม่เป็นเชิงเส้นอย่างเดียว เพื่อดูผลของการลดทอนความรุนแรงของฮาร์มอนิกจากผลของโหลดเชิงเส้น ในการวิเคราะห์ทั้ง 2 ระบบจะมีกรณีต่างๆดังต่อไปนี้

1. การใช้ชุดตัวเก็บประจุพิกัดแรงดัน 400 V เพื่อยืนยันว่าไม่สามารถใช้งานได้จากผลของการขยายกระแสฮาร์มอนิก

2. การใช้ชุดตัวเก็บประจุพิกัดแรงดัน 525 V เพื่อยืนยันว่าไม่สามารถใช้งานได้จากผลของการขยายกระแสฮาร์มอนิก ถึงแม้จะเพิ่มความสามารถในการรับกระแสฮาร์มอนิกของตัวเก็บประจุแล้ว

3. การใช้ชุดตัวเก็บประจุพิกัดแรงดัน 525 V ร่วมกับชุดตัวกรองชนิดดีจูน เพื่อยืนยันว่าไม่สามารถใช้งานชุดตัวเก็บประจุได้ แต่สามารถให้ชุดตัวกรองชนิดดีจูนได้โดยขึ้นอยู่กับขนาดของโหลดแบบเชิงเส้น

4. การใช้ชุดตัวกรองชนิดดีจูน เพื่อยืนยันว่าสามารถใช้งานได้ตามปกติ

5. การใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 5 จำนวน 2 ชุด ขนาดเท่ากันเพื่อดูความสามารถในการกรองกระแสฮาร์มอนิก

6. การใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 5 และ อันดับ 7 จำนวนอย่างละ 1 ชุด เพื่อดูความสามารถในการกรองกระแสฮาร์มอนิก

7. การใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 5 อันดับ 7 และ อันดับ 11 จำนวนอย่างละ 1 ชุด ขนาดเท่ากัน เพื่อดูความสามารถในการกรองกระแสฮาร์มอนิก

8. การใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 5 อันดับ 7 และ อันดับ 11 จำนวนอย่างละ 1 ชุด ขนาดไม่เท่ากัน เพื่อดูความสามารถในการกรองกระแสฮาร์มอนิก

9. การใช้ชุดตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกับชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7 เพื่อดูความสามารถในการกรองกระแสฮาร์มอนิกและการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง

การวิเคราะห์ผลดังกล่าวข้างต้นจะดำเนินการที่ค่าตัวประกอบกำลังเป้าหมาย 95% และ 100% โดยความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ฟาร์แอกทีฟของชุดตัวเก็บประจุ และ ตัวกรองแสดงในตารางที่ 5.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

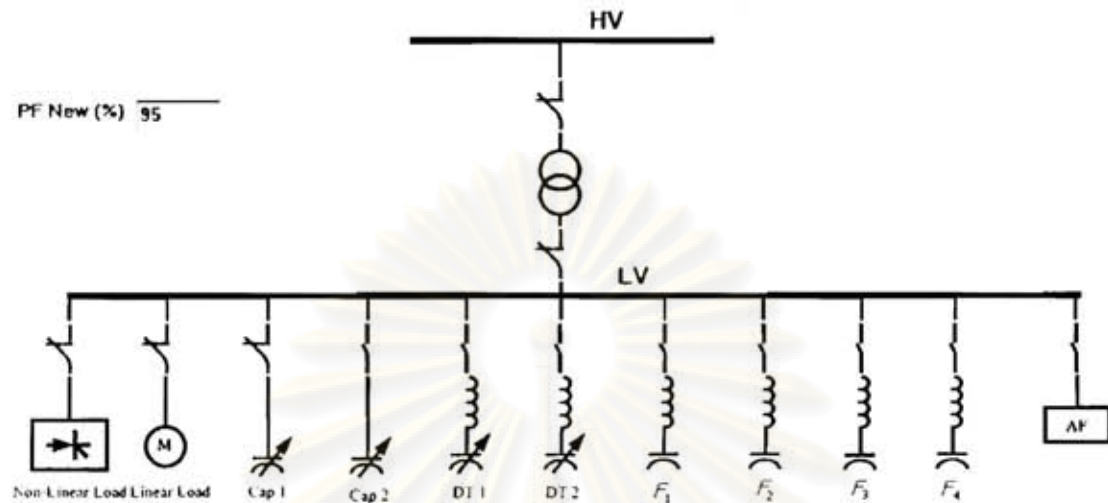
ตารางที่ 5.1 รายละเอียดของชุดตัวเก็บประจุ ชุดตัวกรองดีจูน และ ชุดตัวกรองจูน

ชนิด	แรงดันใช้งาน (V)	แรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ (V)	Q พิกัดของตัวเก็บประจุ (kVAR)	Tuning point	$Q_{Compensate}$ (kVAR)
ชุดตัวเก็บประจุ	400	400	50	-	50
ชุดตัวเก็บประจุ	400	525	80	-	46.44
ชุดตัวกรองชนิดดีจูน	400	525	80	3.78 (7 %XL)	49.94
ตัวกรองชนิดจูน	400	525	400	4.8 (4.34 %XL)	242.73
ตัวกรองชนิดจูน	400	525	350	6.8 (2.16%XL)	207.67
ตัวกรองชนิดจูน	400	525	250	4.8	151.70
ตัวกรองชนิดจูน	400	525	250	6.8 (0.86%XL)	148.33
ตัวกรองชนิดจูน	400	525	250	10.8	146.38
ตัวกรองชนิดจูน	400	525	175	10.8	102.47

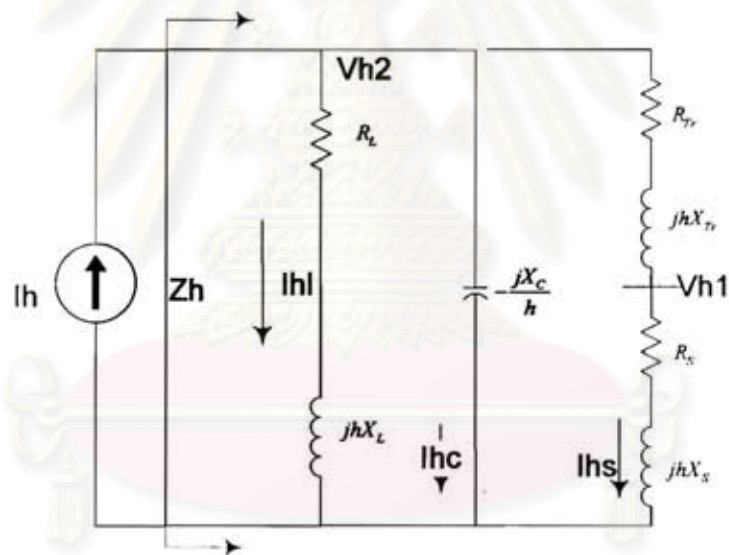
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.1 ระบบที่มีทั้งโหลดเชิงเส้นและโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

กรณีที่ 1 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (ตัวเก็บประจุมีพิกัดแรงดัน 400V)



รูปที่ 5.2 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (400 V)



รูปที่ 5.3 วงจรสมมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (400 V)

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลเบื้องต้น

System	Transformer	LV Bus	Non-Linear Load	Linear Load	Capacitor
200 MVA _{sc}	1000 kVA	400 V	400 kW	200 kW	9 × 50 kVAR
22 kV	22 kV/400V		PF = 80 %	PF = 75 %	Vcr 400 V
X/R 1	%Z = 6.5 Pk = 13.5 kW				

ตารางที่ 5.3 ข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก (ใช้กับทุกกรณี)

h	5	7	11	13	17	19	23	25	29	31
Ih(%I1)	35	20	15	12	10	8	7	7	6	5
Ih(A)	252.59	144.34	108.25	86.60	72.17	57.74	50.52	50.52	43.30	36.08

หมายเหตุ : ให้เฉพาะขนาดเพราะไม่ได้ใช้ผลลัพธ์ในการเขียนรูปคลื่น

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

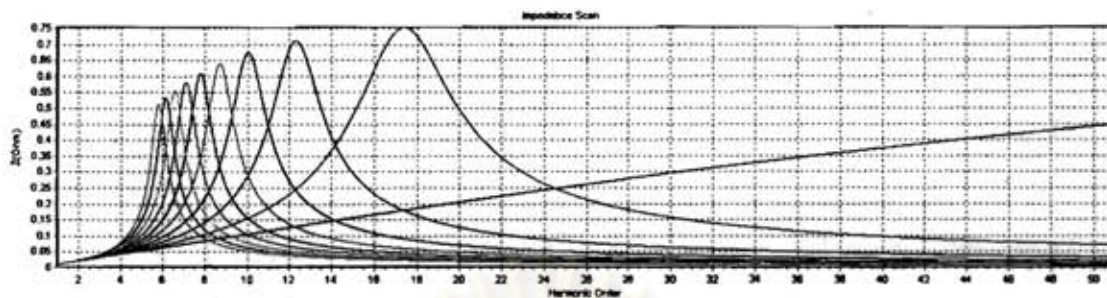
ตารางที่ 5.4 ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (400 V)

Cap Step	PF(%)	Low Voltage Side THDv (%)			High Voltage Side THDv (%)		
		Results	PL (ERG5/4)	Different (%)	Results	PL (ERG5/4)	Different (%)
0	78.32	16.46	5	229.20	0.87	3	-71.00
1	81.51	33.40	5	568.00	1.76	3	-41.33
2	84.71	33.43	5	568.60	1.77	3	-41.00
3	87.84	25.14	5	402.80	1.33	3	-55.67
4	90.83	18.17	5	263.40	0.97	3	-67.67
5	93.56	23.62	5	372.40	1.26	3	-58.00
6	95.94	37.56	5	651.20	2.00	3	-33.33
7	97.85	28.20	5	464.00	1.50	3	-50.00
8	99.20	21.90	5	338.00	1.17	3	-61.00
9	99.90	23.23	5	364.60	1.24	3	-58.67

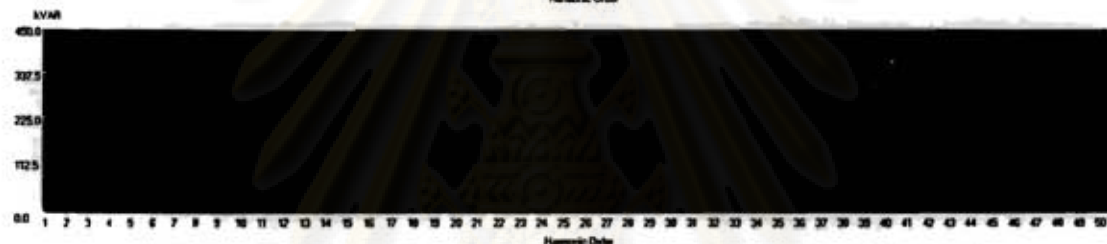
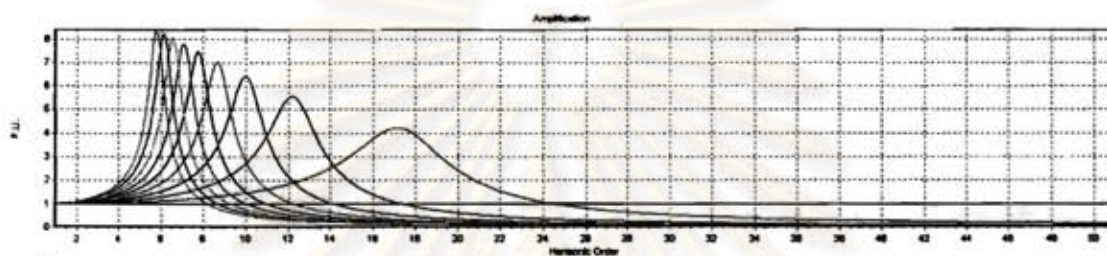
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.5 ผลลัพธ์ของกระแสของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (400 V)

Cap Step	PF(%)	Low Voltage Side								High Voltage Side
		I_c				I_s		I_L		I_s
		I(A)	I _{rms} (A)	I _{rms} (A)	I _{rms} /I _c	I _{rms} (A)	THD (%)	I _{rms} (A)	THD (%)	THD (%)
0	78.32	0	0	0	0	1095.69	32.53	387.84	12.39	32.52
1	81.51	72.17	409.93	416.23	5.77	1157.14	51.98	396.84	25.10	52.00
2	84.71	144.34	589.15	606.58	4.20	1218.50	66.13	396.89	25.15	66.15
3	87.84	216.51	581.84	620.82	2.87	1176.12	59.42	391.75	18.95	59.45
4	90.83	288.68	452.37	536.63	1.86	1157.49	55.76	388.51	13.74	55.76
5	93.56	360.84	621.30	718.48	1.99	1272.32	75.39	391.00	17.87	75.43
6	95.94	433.01	1135.70	1214.85	2.81	1575.99	116.60	400.13	28.41	116.64
7	97.85	505.18	963.95	1088.30	2.15	1409.50	91.29	393.58	21.35	91.28
8	99.20	577.35	780.65	970.96	1.68	1346.79	78.25	390.18	16.62	78.27
9	99.90	649.52	842.41	1063.73	1.64	1441.41	87.49	390.86	17.67	87.49



รูปที่ 5.4 Impedance Scanของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (400 V)



+8.4 +7.6 +6.9 +6.2 +5.4 +4.7 +4.0 +3.2 +2.5 +1.8 +1.0 1.0 +0.9 +0.8 +0.7 +0.6 +0.5 +0.4 +0.3 +0.2 +0.1 +0.0

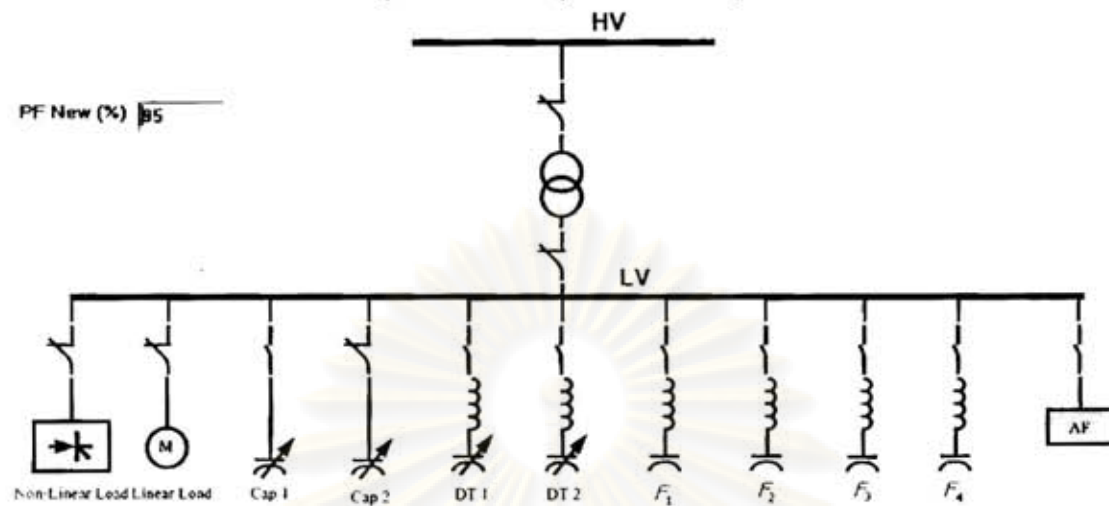
Amplification

รูปที่ 5.5 การขยายกระแสฮาร์มอนิกเมื่อใช้ชุดตัวเก็บประจุ (400 V)

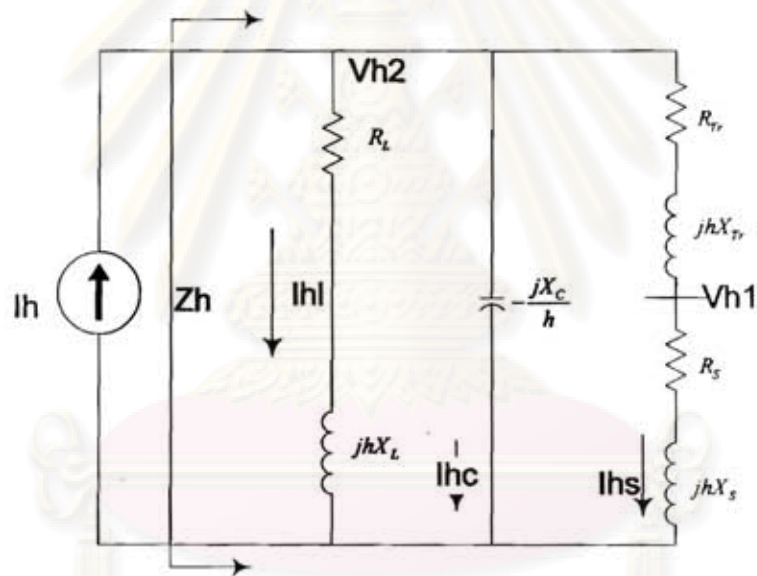
สรุปผลการวิเคราะห์

จากตารางที่ 5.5 พบว่าเมื่อมีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุเพื่อการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบที่มีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกสูง ชุดตัวเก็บประจุไม่สามารถทำงานได้ตั้งแต่การเปิดใช้งานเพียง 1 ตัว จนถึง 9 ตัว เนื่องจากกระแสอาร์เอ็มเอสมีค่าสูงกว่า 130 % ของค่ากระแสพิกัดของตัวเก็บประจุ เนื่องจากการใช้งานตัวเก็บประจุส่งผลให้เกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกใน ความถี่ฮาร์มอนิกบางอันดับดังรายละเอียดในรูปที่ 5.5 และ ค่า THD ของแรงดัน ณ บัสแรงต่ำ 400 V มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานอย่างเห็นได้ชัดจากตารางที่ 5.4 อย่างไรก็ตามเหตุการณ์นี้จะไม่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติเนื่องจากฟิวส์ที่ใช้ป้องกันตัวเก็บประจุจะขาดทั้งหมด

กรณีศึกษาที่ 2 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (ตัวเก็บประจุมีพิกัดแรงดัน 525V)



รูปที่ 5.6 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (525 V)



รูปที่ 5.7 วงจรสมมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (525 V)

ตารางที่ 5.6 ข้อมูลเบื้องต้น

System	Transformer	LV Bus	Non-Linear Load	Linear Load	Capacitor
200 MVA _{sc}	1000 kVA	400 V	400 kW	200 kW	9 × 80 kVAR
22 kV	22 kV/400V		PF = 80 %	PF = 75 %	Vcr 525 V
X/R 1	%Z = 6.5 Pk = 13.5 kW				

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

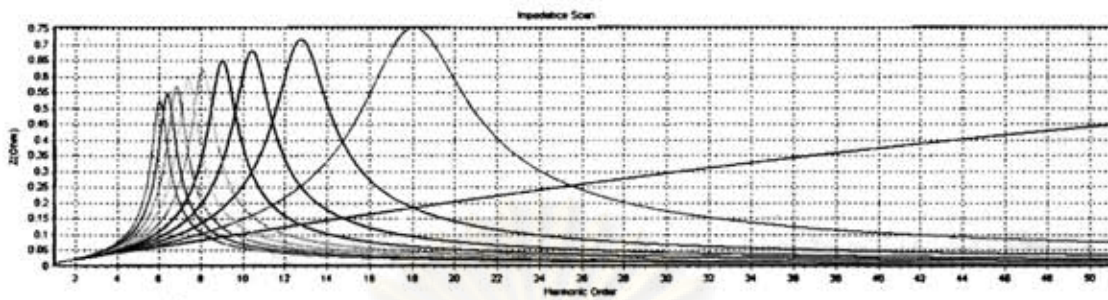
ตารางที่ 5.7 ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (525 V)

Cap Step	PF (%)	Low Voltage Side THDv (%)			High Voltage Side THDv (%)		
		Results	PL (ERG5/4)	Different (%)	Results	PL (ERG5/4)	Different (%)
0	78.32	16.46	5	229.20	0.87	3	-71.00
1	81.29	33.37	5	567.40	1.76	3	-41.33
2	84.26	34.40	5	588.00	1.82	3	-39.33
3	87.18	30.40	5	508.00	1.61	3	-46.33
4	90.00	18.34	5	266.80	0.97	3	-67.67
5	92.62	20.60	5	312.00	1.10	3	-63.33
6	94.97	31.56	5	531.20	1.68	3	-44.00
7	96.96	35.38	5	607.60	1.88	3	-37.33
8	98.51	24.13	5	382.60	1.29	3	-57.00
9	99.53	21.76	5	335.20	1.16	3	-61.33

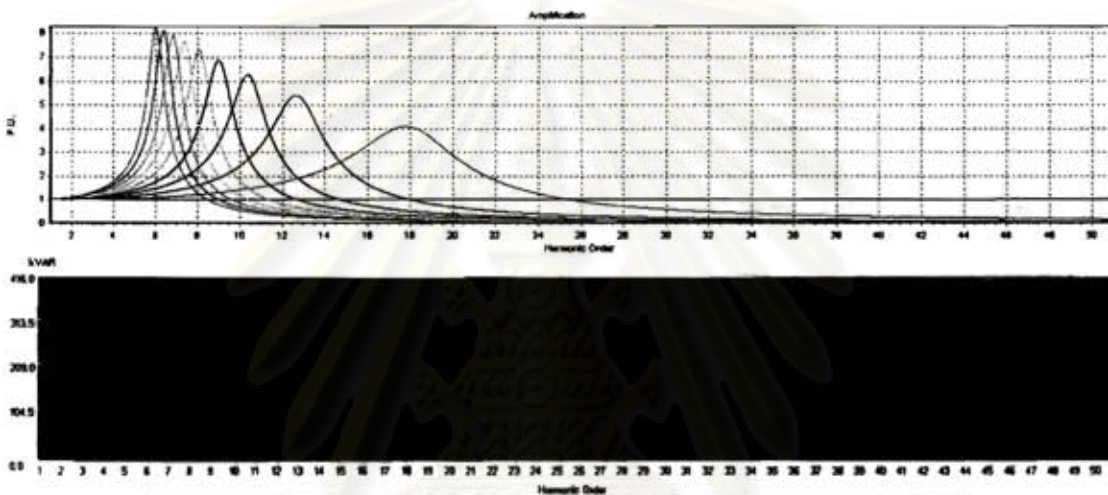
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.8 ผลลัพธ์ของกระแสของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (525 V)

Cap Step	PF (%)	Low Voltage Side								High Voltage Side
		I_C				I_S		I_L		I_S
		I1(A)	Ihrms(A)	Irms(A)	Irms/Icr	Irms(A)	THD (%)	Irms(A)	THD (%)	THD (%)
0	78.32	0	0	0	0	1095.69	32.53	387.84	12.39	32.52
1	81.29	67.03	390.36	396.08	4.50	1153.81	51.06	396.82	25.08	51.08
2	84.26	134.06	580.41	595.69	3.39	1218.78	65.93	397.58	25.88	65.94
3	87.18	201.09	668.49	698.08	2.64	1218.17	67.05	394.86	22.90	67.06
4	90.00	268.12	453.90	527.17	1.50	1146.99	53.71	388.58	13.85	53.70
5	92.62	335.15	525.41	623.20	1.42	1213.53	65.84	389.55	15.58	65.84
6	94.97	402.18	894.01	980.31	1.86	1437.11	99.04	395.72	23.87	99.03
7	96.96	469.21	1147.78	1239.98	2.01	1539.98	110.58	398.45	26.76	110.59
8	98.51	536.24	846.85	1002.35	1.42	1353.79	81.60	391.28	18.29	81.62
9	99.53	603.27	779.70	985.84	1.25	1367.41	79.79	390.12	16.53	79.79



รูปที่ 5.8 Impedance Scanของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (525 V)



รูปที่ 5.9 การขยายกระแสฮาร์มอนิกเมื่อใช้ชุดตัวเก็บประจุ (525 V)

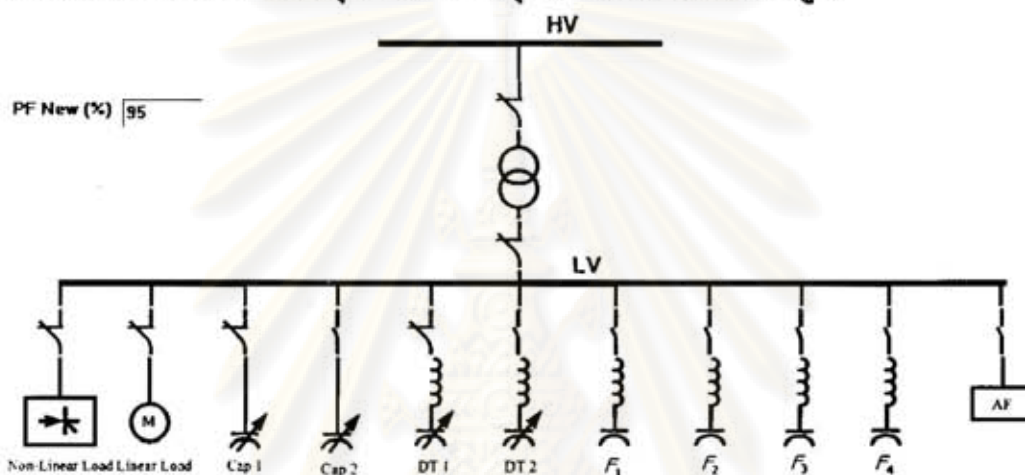
สรุปผลการวิเคราะห์

กรณีนี้ 2 นี้ได้เพิ่มพิกัดแรงดันของชุดตัวเก็บประจุ เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับกระแสฮาร์มอนิกของชุดตัวเก็บประจุ (กระแสพิกัดของตัวเก็บประจุ 400 V คือ $1.44 A/kVAR_{compensate}$ และกระแสพิกัดของตัวเก็บประจุ 525 V คือ $1.89 A/kVAR_{compensate}$) แต่ตัวเก็บประจุก็น่าจะทำงานเกินพิกัด เพราะยังเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิก ในความถี่ฮาร์มอนิกบางอันดับ ดังรายละเอียดในรูปที่ 5.9 อย่างไรก็ตามหากเปรียบเทียบผลการทำงานของชุดตัวเก็บประจุทั้ง 2 กรณีนี้ดังรายละเอียดในตารางที่ 5.9 พบว่าการะการทำงานของตัวเก็บประจุพิกัดแรงดัน 525 V จะต่ำกว่าตัวเก็บประจุพิกัดแรงดัน 400 V

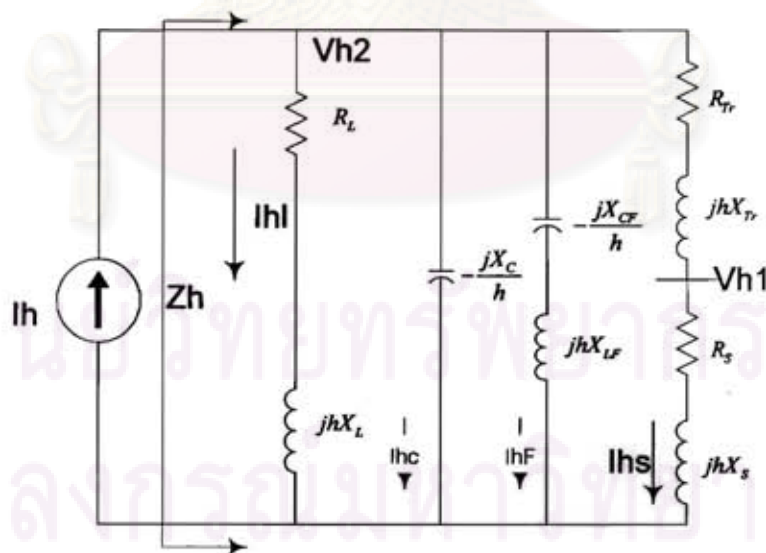
ตารางที่ 5.9 เปรียบเทียบภาระการทำงานของชุดตัวเก็บประจุพิกัดแรงดัน 400 V และ 525 V

พิกัดแรงดัน (V)	I _{rms} /I _{cr} ที่ step ที่								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
400	5.77	4.20	2.87	1.86	1.99	2.81	2.15	1.68	1.64
525	4.50	3.39	2.64	1.50	1.42	1.86	2.01	1.42	1.25

กรณีที่ 3 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน



รูปที่ 5.10 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน



รูปที่ 5.11 วงจรสมมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน

ตารางที่ 5.10 ข้อมูลเบื้องต้น

System	Transformer	LV Bus	Non-Linear Load	Linear Load	Capacitor	Detuned Filter
200 MVA_{sc}	1000 kVA	400 V	400 kW	200 kW	9× 80 kVAR	9× 80 kVAR
22 kV	22 kV/400V		PF = 80 %	PF = 75 %	Vcr 525 V	7% X_L
X/R 1	%Z = 6.5 Pk = 13.5 kW					Vcr 525V Q-Factor 50

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ตารางที่ 5.11 ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดคิจุณ

(Loading ของ Cap ใน Cap Bank)

DT Cap	I rms/lcr (%PF)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0 (78.32)	0 (81.51)	0 (84.70)	0 (87.83)	0 (90.81)	0 (93.55)	0 (95.92)	0 (97.84)	0 (99.19)	0 (99.90)
1	4.50 (81.29)	4.47 (84.48)	4.42 (87.62)	4.34 (90.61)	4.26 (93.36)	4.17 (95.77)	4.09 (97.72)	4.05 (99.11)	4.04 (99.87)	4.07 (-99.95)
2	3.39 (84.26)	3.37 (87.40)	3.25 (90.41)	3.06 (93.18)	2.87 (95.62)	2.71 (97.60)	2.60 (99.04)	2.55 (99.84)	2.53 (-99.96)	2.56 (-99.40)
3	2.64 (87.17)	2.91 (90.20)	3.08 (93.00)	3.09 (95.46)	2.94 (97.48)	2.77 (98.96)	2.64 (99.81)	2.61 (-99.98)	2.65 (-99.46)	2.76 (-98.29)
4	1.50 (90.00)	1.52 (92.81)	1.58 (95.30)	1.66 (97.35)	1.78 (98.87)	1.93 (99.77)	2.13 (-99.99)	2.37 (-99.52)	2.64 (-98.39)	2.86 (-96.67)
5	1.42 (92.62)	1.33 (95.14)	1.28 (97.23)	1.26 (98.79)	1.25 (99.73)	1.26 (-99.99)	1.29 (-99.58)	1.32 (-98.49)	1.37 (-96.81)	1.44 (-94.62)
6	1.86 (94.97)	1.58 (97.10)	1.39 (98.70)	1.27 (99.68)	1.20 (-99.99)	1.15 (-99.63)	1.13 (-98.59)	1.12 (-96.95)	1.11 (-94.79)	1.12 (-92.22)
7	2.01 (96.96)	2.13 (98.60)	1.93 (99.63)	1.64 (100)	1.41 (-99.68)	1.26 (-98.68)	1.17 (-97.08)	1.11 (-94.95)	1.07 (-92.41)	1.05 (-89.56)
8	1.42 (98.51)	1.58 (99.58)	1.84 (100)	2.06 (-99.72)	2.00 (-98.77)	1.72 (-97.21)	1.46 (-95.12)	1.29 (-92.60)	1.17 (-89.76)	1.10 (-86.72)
9	1.25 (99.53)	1.24 (99.99)	1.30 (-99.76)	1.45 (-98.86)	1.68 (-97.34)	1.95 (-95.28)	2.03 (-92.78)	1.82 (-89.97)	1.54 (-86.94)	1.33 (-83.78)

หมายเหตุ : PF มีค่าติดลบหมายถึงเป็น Leading PF

ตารางที่ 5.12 ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน
(Loading ของ Cap ใน DT)

DT Cap	I rms/I cr (%PF)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0 (78.32)	0.87 (81.51)	0.86 (84.70)	0.86 (87.83)	0.85 (90.81)	0.85 (93.55)	0.85 (95.92)	0.84 (97.84)	0.84 (99.19)	0.84 (99.90)
1	0 (81.29)	0.90 (84.48)	0.89 (87.62)	0.88 (90.61)	0.87 (93.36)	0.87 (95.77)	0.86 (97.72)	0.86 (99.11)	0.85 (99.87)	0.85 (-99.95)
2	0 (84.26)	0.94 (87.40)	0.92 (90.41)	0.91 (93.18)	0.89 (95.62)	0.88 (97.60)	0.87 (99.04)	0.87 (99.84)	0.86 (-99.96)	0.86 (-99.40)
3	0 (87.17)	0.97 (90.20)	0.96 (93.00)	0.95 (95.46)	0.93 (97.48)	0.91 (98.96)	0.90 (99.81)	0.89 (-99.98)	0.88 (-99.46)	0.88 (-98.29)
4	0 (90.00)	0.93 (92.81)	0.91 (95.30)	0.90 (97.35)	0.90 (98.87)	0.89 (99.77)	0.89 (-99.99)	0.90 (-99.52)	0.91 (-98.39)	0.92 (-96.67)
5	0 (92.62)	0.97 (95.14)	0.93 (97.23)	0.91 (98.79)	0.90 (99.73)	0.88 (-99.99)	0.88 (-99.58)	0.87 (-98.49)	0.87 (-96.81)	0.86 (-94.62)
6	0 (94.97)	1.07 (97.10)	1.00 (98.70)	0.95 (99.68)	0.92 (-99.99)	0.90 (-99.63)	0.89 (-98.59)	0.88 (-96.95)	0.87 (-94.79)	0.86 (-92.22)
7	0 (96.96)	1.25 (98.60)	1.16 (99.63)	1.06 (100)	0.99 (-99.68)	0.94 (-98.68)	0.91 (-97.08)	0.89 (-94.95)	0.88 (-92.41)	0.87 (-89.56)
8	0 (98.51)	1.14 (99.58)	1.16 (100)	1.20 (-99.72)	1.16 (-98.77)	1.07 (-97.21)	0.99 (-95.12)	0.95 (-92.60)	0.91 (-89.76)	0.89 (-86.72)
9	0 (99.53)	1.12 (99.99)	1.06 (-99.76)	1.06 (-98.86)	1.09 (-97.34)	1.15 (-95.28)	1.16 (-92.78)	1.09 (-89.97)	1.01 (-86.94)	0.95 (-83.78)

หมายเหตุ : PF มีค่าติดลบหมายถึงเป็น Leading PF

ศูนย์วิทยุโทรพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.13 ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน
(THDv(%) ด้านบัสแรงดันต่ำ)

DT Step \ Cap Step	Low Voltage Side									
	THDv (%)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	16.46	15.66	14.95	14.30	13.72	13.18	12.69	12.23	11.81	11.42
1	33.37	32.45	31.47	30.41	29.26	28.10	27.04	26.17	25.57	25.24
2	34.40	33.61	31.90	29.52	27.06	24.91	23.22	22.02	21.29	20.98
3	30.40	33.28	35.19	34.95	32.84	30.20	28.13	27.03	26.94	27.69
4	18.34	17.76	17.81	18.41	19.55	21.28	23.64	26.59	29.85	32.53
5	20.60	17.85	16.01	14.80	14.04	13.64	13.54	13.71	14.14	14.85
6	31.56	25.26	20.69	17.54	15.35	13.80	12.71	11.94	11.42	11.11
7	35.38	37.46	33.15	26.74	21.59	17.95	15.41	13.58	12.26	11.28
8	24.13	26.65	31.58	35.97	34.57	28.68	23.01	18.84	15.89	13.79
9	21.76	20.02	20.71	23.47	28.17	33.55	35.13	30.73	24.81	20.07

ตารางที่ 5.14 ผลต่าง(Different)ระหว่าง THDv(%) และ Planning Level (PL) ด้านบัสแรงดันต่ำ

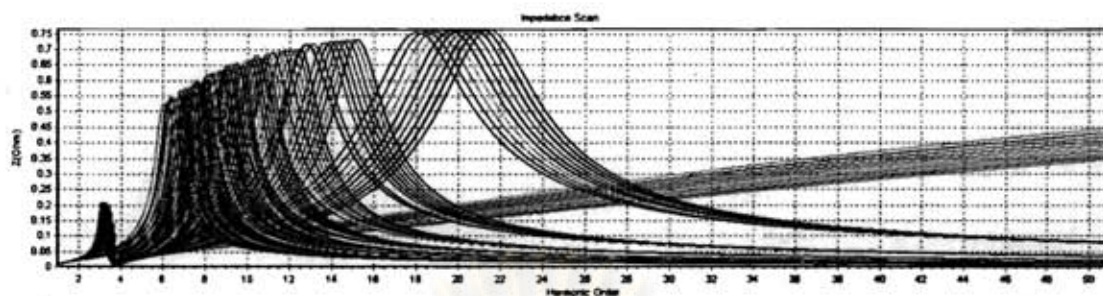
DT Step \ Cap Step	Low Voltage Side									
	Different ($\frac{THD_v - PL}{PL} \times 100$) (%)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	229.20	213.20	199.00	186.00	174.40	163.60	153.80	144.60	136.20	128.40
1	567.40	549.00	529.40	508.20	485.20	462.00	440.80	423.40	411.40	404.80
2	588.00	572.20	538.00	490.40	441.20	398.20	364.40	340.40	325.80	319.60
3	508.00	565.60	603.80	599.00	556.80	504.00	462.60	440.60	438.80	453.80
4	266.80	255.20	256.20	268.20	291.00	325.60	372.80	431.80	497.00	550.60
5	312.00	257.00	220.20	196.00	180.80	172.80	170.80	174.20	182.80	197.00
6	531.20	405.20	313.80	250.80	207.00	176.00	154.20	138.80	128.40	122.20
7	607.60	649.20	563.00	434.80	331.80	259.00	208.20	171.60	145.20	125.60
8	382.60	433.00	531.60	619.40	591.40	473.60	360.20	276.80	217.80	175.80
9	335.20	300.40	314.20	369.40	463.60	571.00	602.60	514.60	396.20	301.40

ตารางที่ 5.15 ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน
(THDv(%) ด้านบัสแรงดันสูง)

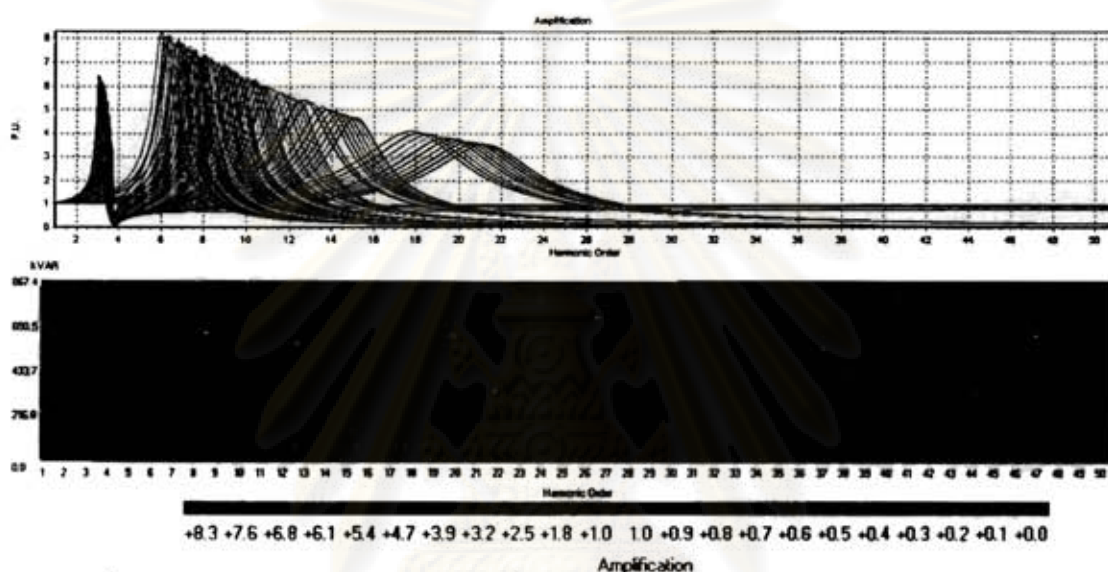
DT Step \ Cap Step	High Voltage Side									
	THDv (%)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.87	0.83	0.79	0.76	0.73	0.70	0.67	0.65	0.62	0.60
1	1.76	1.71	1.66	1.16	1.54	1.48	1.43	1.38	1.35	1.33
2	1.82	1.78	1.69	1.56	1.43	1.32	1.23	1.16	1.12	1.11
3	1.61	1.76	1.86	1.85	1.74	1.60	1.49	1.43	1.42	1.46
4	0.97	0.94	0.94	0.98	1.04	1.13	1.25	1.41	1.58	1.72
5	1.10	0.95	0.85	0.79	0.75	0.72	0.72	0.73	0.75	0.79
6	1.68	1.34	1.10	0.93	0.82	0.73	0.68	0.63	0.61	0.59
7	1.88	1.99	1.76	1.42	1.15	0.96	0.82	0.72	0.65	0.60
8	1.29	1.42	1.68	1.91	1.84	1.53	1.22	1.00	0.85	0.73
9	1.16	1.07	1.10	1.25	1.50	1.78	1.87	1.63	1.32	1.07

ตารางที่ 5.16 ผลต่าง(Different)ระหว่าง THDv(%) และ Planning Level (PL) ด้านบัสแรงดันสูง

DT Step \ Cap Step	High Voltage Side									
	Different ($\frac{THD_v - PL}{PL} \times 100$) (%)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-71.00	-72.33	-73.67	-74.67	-75.67	-76.67	-77.67	-78.33	-79.33	-80.00
1	-41.33	-43.00	-44.67	-46.33	-48.67	-50.67	-52.33	-54.00	-55.00	-55.67
2	-39.33	-40.67	-43.67	-48.00	-52.33	-56.00	-59.00	-61.33	-62.67	-63.00
3	-46.33	-41.33	-38.00	-38.33	-42.00	-46.67	-50.33	-52.33	-52.67	-51.33
4	-67.67	-68.67	-68.67	-67.33	-65.33	-62.33	-58.33	-53.00	-47.33	-42.67
5	-63.33	-68.33	-71.67	-73.67	-75.00	-76.00	-76.00	-75.67	-75.00	-73.67
6	-44.00	-55.33	-63.33	-69.00	-72.67	-75.67	-77.33	-79.00	-79.67	-80.33
7	-37.33	-33.67	-41.33	-52.67	-61.67	-68.00	-72.67	-76.00	-78.33	-80.00
8	-57.00	-52.67	-44.00	-36.33	-38.67	-49.00	-59.33	-66.67	-71.67	-75.67
9	-61.33	-64.33	-63.33	-58.33	-50.00	-40.67	-37.67	-45.67	-56.00	-64.33



รูปที่ 5.12 Impedance Scan ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน



รูปที่ 5.13 การขยายกระแสฮาร์มอนิกเมื่อใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน

สรุปผลการวิเคราะห์

การสรุปผลในกรณีนี้ 3 นี้ สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 ข้อดังนี้

1. หากใช้ชุดตัวกรองชนิดดีจูนอย่างเดียว (step การเปิดใช้งานของชุดตัวเก็บประจุเป็นศูนย์) จากตารางที่ 5.12 พบว่าชุดตัวกรองชนิดดีจูนสามารถทำงานได้ตามปกติทุก step ตั้งแต่ step ที่ 1 ได้ค่าตัวประกอบกำลัง 81.51% มีภาระการทำงานที่ 0.87 หรือ 87% ของค่ากระแสกีดของตัวเก็บประจุ จนถึง step ที่ 9 ได้ค่าตัวประกอบกำลัง 99.90% และมีภาระการทำงานที่ 0.84 หรือ 84% อย่างไรก็ตามการใช้ชุดตัวกรองชนิดดีจูนจะให้ผลลัพธ์หลักในด้านการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังของระบบ และจะให้ผลในการลดแรงดันฮาร์มอนิกได้น้อย ดังผลลัพธ์ในตารางที่ 5.13 ซึ่งเป็นค่า THD ของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสแรงต่ำ 400 V ที่มีค่าลดลงจาก 16.46% ลงเหลือ 11.42% เมื่อใช้งานทั้ง 9 step แต่ยังมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐาน 5% อยู่มาก
2. เมื่อมีการใช้งานตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน ตัวเก็บประจุยังทำให้เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ทำให้เกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกดังรูปที่ 5.13 เมื่อพิจารณาผลการใช้งานร่วมกันเพื่อให้ได้ค่าตัวประกอบกำลังไม่เกิน 95% และไม่เกิน 100% จะได้ผลสรุปด้านภาระ

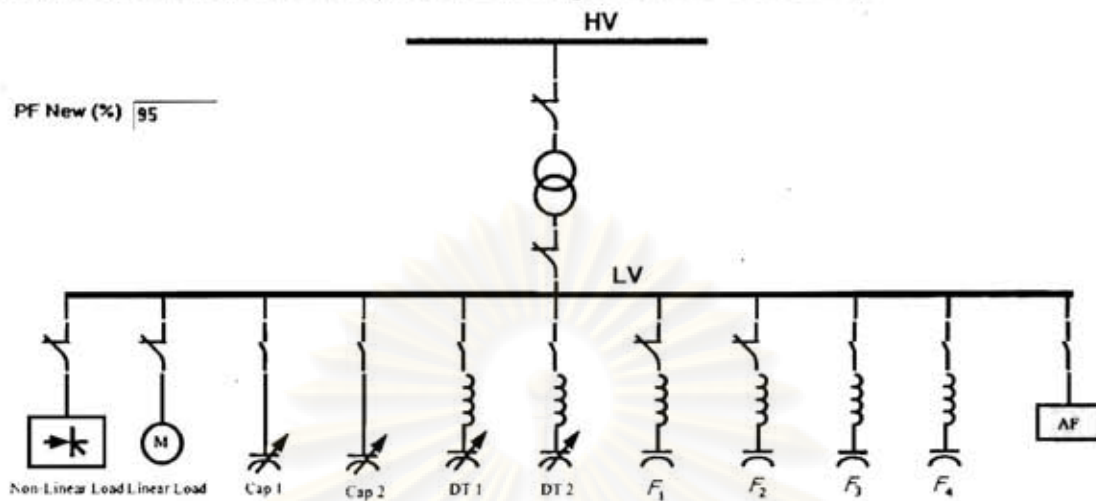
การทำงานของตัวเก็บประจุในชุดตัวเก็บประจุและชุดตัวกรองชนิดดีจูน ดังแสดงในตารางที่ 5.17 พบว่าชุดตัวเก็บประจุไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากส่วนใหญ่มีภาระการทำงานเกิน 130% ของค่ากระแสที่กัก แต่ชุดตัวกรองชนิดดีจูนสามารถใช้งานได้ตามปกติ เนื่องจากส่วนใหญ่มีภาระการทำงานต่ำกว่า 100% และกรณีร้ายแรงสุดทำงานที่ 112% แต่ยังไม่เกิน 130% อย่างไรก็ตามค่า THD ของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสแรงต่ำ 400 V จะมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานมาก และสูงกว่ากรณีที่ใช้แต่ตัวกรองชนิดดีจูนเพียงอย่างเดียว ส่วนค่า THD ของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสแรงสูงยังมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 3%

ตารางที่ 5.17 สภาพการทำงานของตัวเก็บประจุเมื่อใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับชุดตัวกรองชนิดดีจูน

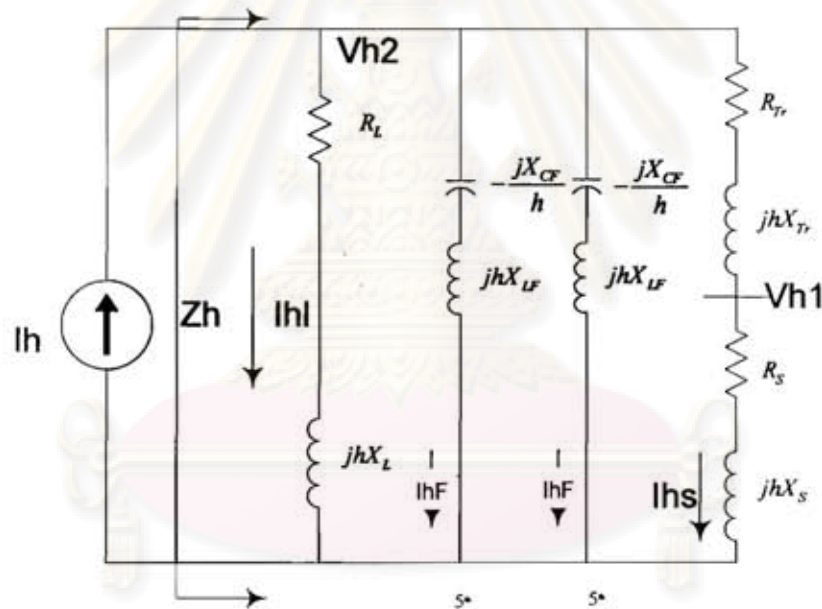
PF (%)	No. of Step		Irms/Icr ของ Cap ใน		THDV (%) at 400 V Bus
	Cap	DT	Cap Bank	DT	
≤ 95	4	1	1.52	0.93	17.76
	3	2	3.08	0.96	35.19
	2	3	3.06	0.91	29.52
	1	4	4.26	0.87	29.26
≤ 100	9	1	1.24	1.12	20.02
	8	2	1.84	1.16	31.58
	7	3	1.64	1.06	26.74
	5	4	1.25	0.90	14.04
	4	5	1.93	0.89	21.28
	3	6	2.64	0.90	28.13
	2	7	2.55	0.87	22.02
	1	8	4.04	0.85	25.57

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรณีที่ 4 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 5 จำนวน 2 ชุด



รูปที่ 5.14 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 5 จำนวน 2 ชุด



รูปที่ 5.15 วงจรสมมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 5 จำนวน 2 ชุด

ตารางที่ 5.18 ข้อมูลเบื้องต้น

System	Transformer	LV Bus	Non-Linear Load	Linear Load	Tuned Filter 5 th ตัวที่ 1	Tuned Filter 5 th ตัวที่ 2
200 MVA _{sc}	1000 kVA	400 V	400 kW	200 kW	400 kVAR	400 kVAR
22 kV	22 kV/400V		PF = 80 %	PF = 75 %	Vcr 525V	Vcr 525V
X/R 1	%Z = 6.5				Tuning Point 4.8	Tuning Point 4.8
	Pk = 13.5 kW				Q-Factor 60	Q-Factor 60

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

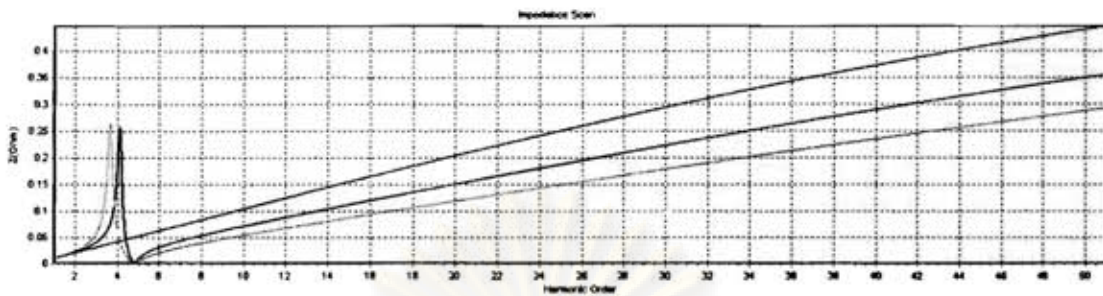
ตารางที่ 5.19 ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 5 จำนวน 2 ชุด

Tuned 5 th , 5 th	PF(%)	Low Voltage Side												High Voltage Side
		5 th				5 th				I_S		I_L		I_S
		I1(A)	Ihrms(A)	Irms(A)	Irms/Icr	I1(A)	Ihrms(A)	Irms(A)	Irms/Icr	Irms(A)	THD (%)	Irms(A)	THD (%)	THD (%)
OFF OFF	78.32	0	0	0	0	0	0	0	0	1095.69	32.53	387.84	12.39	32.52
ON OFF	93.18	350.36	220.66	414.06	0.94	0	0	0	0	1029.21	16.08	386.27	8.44	16.06
OFF ON	93.18	0	0	0	0	350.36	220.66	414.06	0.94	1029.21	16.08	386.27	8.44	16.06
ON ON	-99.99	350.36	127.84	372.95	0.85	350.36	127.84	372.95	0.85	1113.53	11.04	385.74	6.61	11.05

หมายเหตุ : PF มีค่าติดลบหมายถึงเป็น Leading PF

ตารางที่ 5.20 ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 5 จำนวน 2 ชุด

Tuned 5 th , 5 th	PF(%)	Low Voltage Side THDv (%)			High Voltage Side THDv (%)		
		Results	PL (ERG5/4)	Different $\frac{THD_v - PL}{PL} \times 100$	Results	PL (ERG5/4)	Different $\frac{THD_v - PL}{PL} \times 100$
OFF OFF	78.32	16.46	5	229.20	0.87	3	-71.00
ON OFF	93.18	11.23	5	124.60	0.59	3	-80.33
OFF ON	93.18	11.23	5	124.60	0.59	3	-80.33
ON ON	-99.99	8.80	5	76.00	0.46	3	-84.67



รูปที่ 5.16 Impedance Scan ของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 5 จำนวน 2 ชุด

สรุปผลการวิเคราะห์

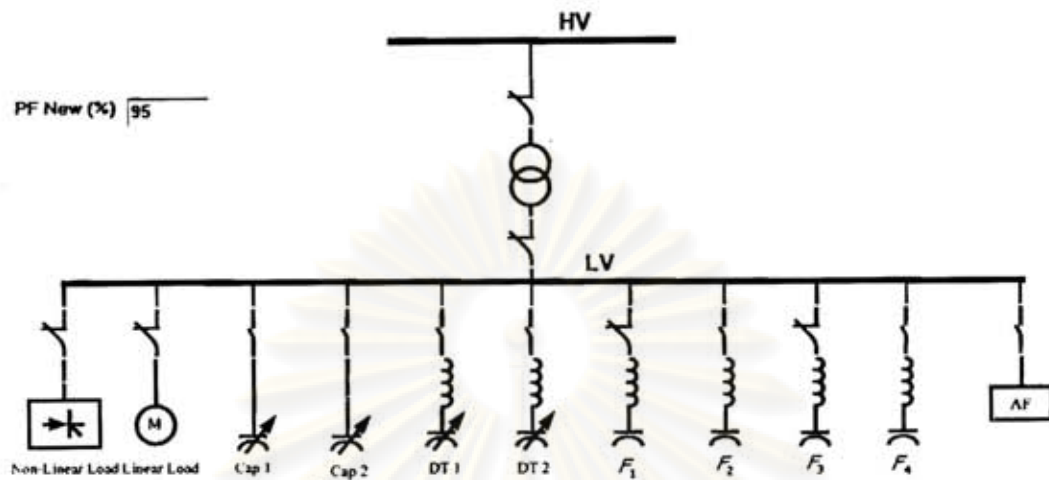
กรณีที่ 4 นี้ กำหนดให้ใช้ตัวกรองชนิดจูนเฉพาะอันดับ 5 เท่านั้นแต่แบ่งออกเป็น 2 ตัว เพื่อให้สามารถใช้งานกับโหลดที่เปลี่ยนแปลงขึ้นลงได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งในกรณีนี้หากใช้เพียง 1 ตัว จะได้ตัวประกอบกำลัง 93.18% และเมื่อใช้ทั้ง 2 ตัว จะได้ตัวประกอบกำลังเป็น 100%

เมื่อใช้งาน 1 ตัว THD ของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสแรงต่ำ 400 V จะลดลงจาก 16.46% เหลือ 11.23% และภาระการทำงานของตัวเก็บประจุในตัวกรองอยู่ที่ระดับ 94% ต่ำกว่า 130% ตามที่ระบุในมาตรฐาน IEC

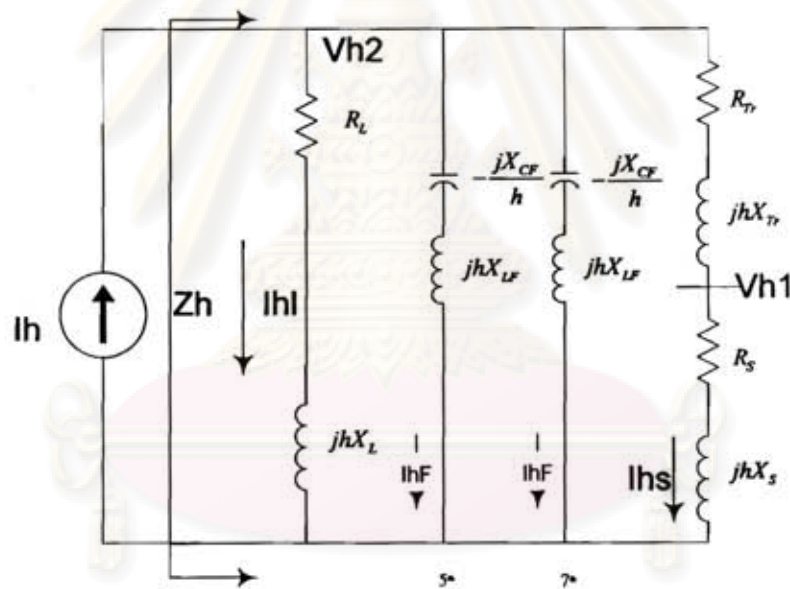
เมื่อใช้งาน 2 ตัว THD ของแรงดันฮาร์มอนิก จะลดลงเหลือ 8.80% คือลดลงไปประมาณ 46.5% จากค่าที่ยังไม่ได้ใช้งานตัวกรอง และภาระการทำงานของตัวเก็บประจุในตัวกรองอยู่ที่ระดับ 85%

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรณีศึกษาที่ 5 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 5 ร่วมกับอันดับ 7



รูปที่ 5.17 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 5 ร่วมกับอันดับ 7



รูปที่ 5.18 วงจรสมมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 5 ร่วมกับอันดับ 7

ตารางที่ 5.21 ข้อมูลเบื้องต้น

System	Transformer	LV Bus	Non-Linear Load	Linear Load	Tuned Filter 5 th	Tuned Filter 7 th
200 MVA _{sc}	1000 kVA	400 V	400 kW	200 kW	400 kVAR	350 kVAR
22 kV	22 kV/400V		PF = 80 %	PF = 75 %	Vcr 525V	Vcr 525V
X/R 1	%Z = 6.5				Tuning Point 4.8	Tuning Point 6.8
	Pk = 13.5 kW				Q-Factor 60	Q-Factor 60

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

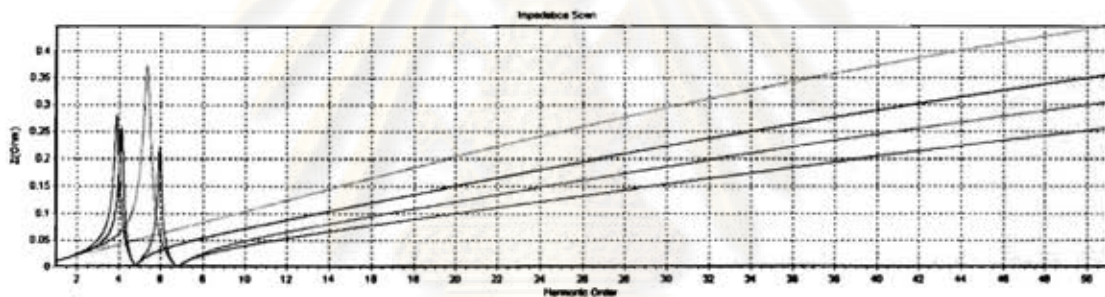
ตารางที่ 5.22 ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานจุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 5 ร่วมกับอันดับ 7

Tuned 5 th , 7 th	PF(%)	Low Voltage Side												High Voltage Side	
		5 th				7 th				I_s		I_L			I_s
		I1(A)	Ihrms(A)	Irms(A)	Irms/Icr	I1(A)	Ihrms(A)	Irms(A)	Irms/Icr	Irms(A)	THD (%)	Irms(A)	THD (%)		THD (%)
OFF OFF	78.32	0	0	0	0	0	0	0	0	1095.69	32.53	387.84	12.39	32.52	
ON OFF	93.18	350.36	220.66	414.06	0.94	0	0	0	0	1029.21	16.08	386.27	8.44	16.06	
OFF ON	91.26	0	0	0	0	299.74	642.36	708.85	1.84	1318.28	83.46	389.94	16.24	83.45	
ON ON	99.91	350.06	239.79	424.56	0.97	299.74	148.59	334.55	0.87	1091.47	9.18	385.47	5.46	9.18	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.23 ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 5 ร่วมกับอันดับ 7

Tuned 5 th , 7 th	PF(%)	Low Voltage Side THDv (%)			High Voltage Side THDv (%)		
		Results	PL(ERG5/4)	Different $\frac{THD_v - PL}{PL} \times 100$	Results	PL(ERG5/4)	Different $\frac{THD_v - PL}{PL} \times 100$
OFF OFF	78.32	16.46	5	229.20	0.87	3	-71.00
ON OFF	93.18	11.23	5	124.60	0.59	3	-80.33
OFF ON	91.26	21.37	5	327.40	1.14	3	-62.00
ON ON	99.91	7.28	5	45.60	0.38	3	-87.33



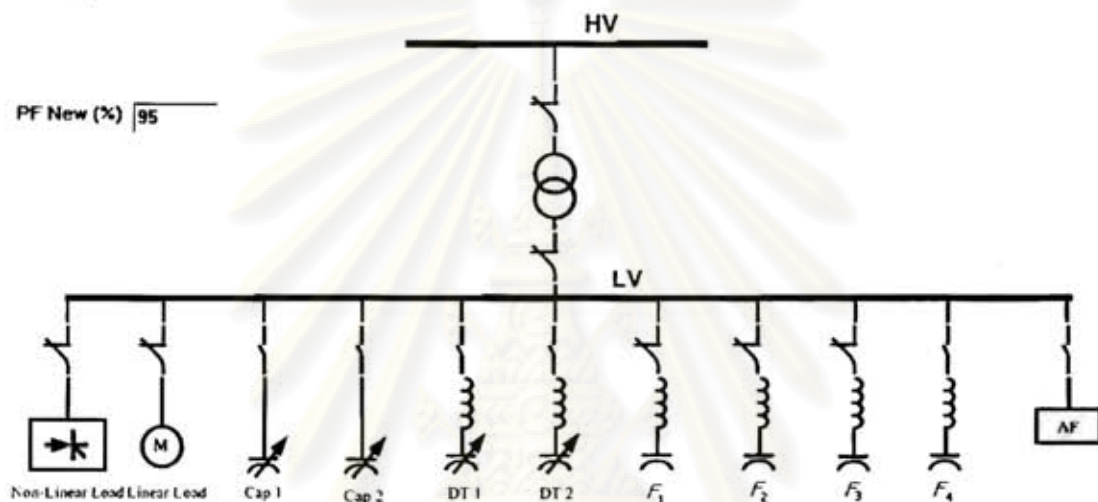
รูปที่ 5.19 Impedance Scan ของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 5 ร่วมกับอันดับ 7

สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูล

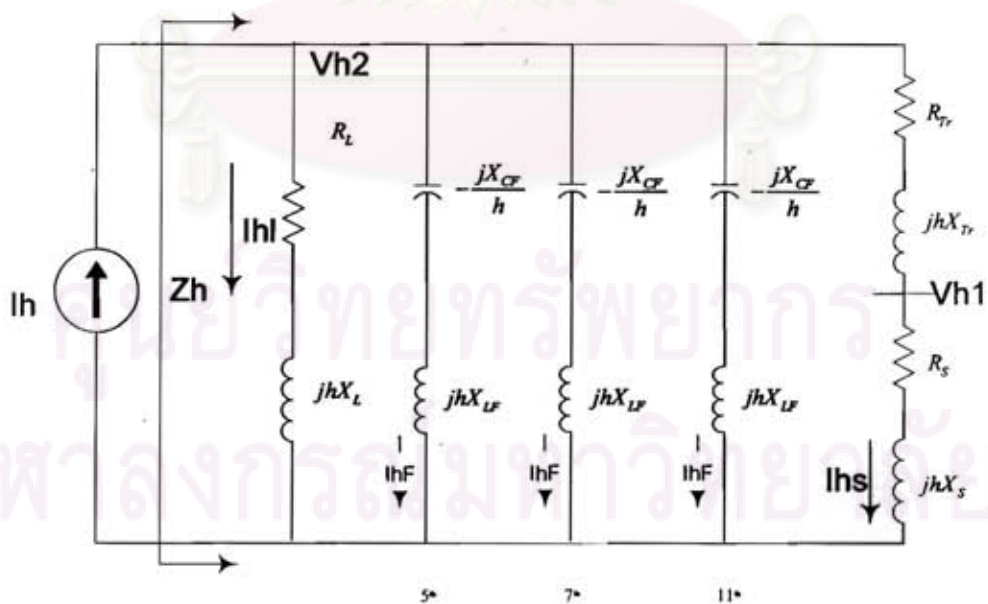
กรณีนี้เป็นการประยุกต์ใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 5 ร่วมกับอันดับ 7 โดยให้ตัวกรองอันดับ 5 มีพิคกัด kVAR ใหญ่กว่า อันดับ 7 แต่ยังมีขนาดเท่ากับกรณีที่ 4 จากผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อใช้งานตัวกรองอันดับ 5 เพียง 1 ตัว จะให้ผลเหมือนกับกรณีที่ 4 แต่ถ้าใช้งานตัวกรองอันดับ 7 เพียง 1 ตัว จะให้ค่าตัวประกอบกำลัง 91.26% แต่เกิดผลเสียตามมาคือมีการขยายกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 (พิจารณารูปที่ 5.19 ประกอบ) ทำให้ค่า THD ของแรงดันฮาร์มอนิกเพิ่มสูงขึ้นจาก 16.46% ก่อนใช้งานตัวกรอง เป็น 21.37% หรือหากเทียบกับการใช้งานตัวกรองอันดับ 5 จะเพิ่มขึ้นจาก 11.23% เป็น 21.37% เพิ่มขึ้น 90.3% นอกจากนี้ตัวกรองอันดับ 7 ไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากตัวเก็บประจุในชุดตัวกรองจะมีภาระการทำงานที่ 184% สูงกว่า 130% ที่สามารถใช้งานได้ตามปกติ

เมื่อใช้งานพร้อมกันทั้ง 2 ชุดจะได้ตัวประกอบกำลังเป็น 99.91% THD ของแรงดันฮาร์มอนิก ลดลงไปเหลืออยู่ที่ระดับ 7.28% ต่ำกว่าค่า Compatibility Level 8% ที่กำหนดโดยมาตรฐาน IEC แต่ยังคงสูงกว่าค่า Planning Level 5% ที่กำหนดโดย ER G5/4 ภาระการทำงานของตัวเก็บประจุในตัวกรองอันดับ 5 และอันดับ 7 อยู่ที่ระดับ 97% และ 87% ตามลำดับสามารถใช้งานได้ตามปกติอย่างปลอดภัย

กรณีที่ 6 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 5 อันดับ 7 และอันดับ 11 (ขนาดเท่ากัน)



รูปที่ 5.20 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 5 อันดับ 7 และอันดับ 11 (ขนาดเท่ากัน)



รูปที่ 5.21 วงจรสมมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 5 อันดับ 7 และอันดับ 11 (ขนาดเท่ากัน)

ตารางที่ 5.24 ข้อมูลเบื้องต้น

System	Transformer	LV Bus	Non-Linear Load	Linear Load	Tuned Filter 5 th	Tuned Filter 7 th	Tuned Filter 11 th
200 MVA _{ac} 22 kV X/R 1	1000 kVA 22 kV/400V %Z = 6.5 Pk = 13.5 kW	400 V	400 kW PF = 80 %	200 kW PF = 75 %	250 kVAR Vcr 525V Tuning Point 4.8 Q-Factor 60	250 kVAR Vcr 525V Tuning Point 6.8 Q-Factor 60	250 kVAR Vcr 525V Tuning Point 10.8 Q-Factor 60

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

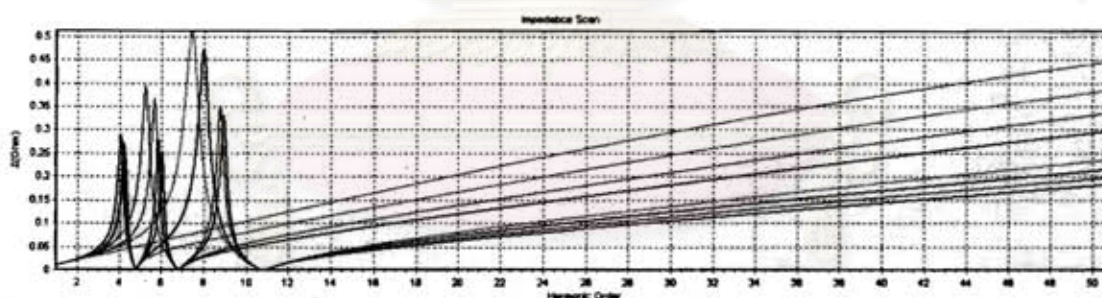
ตารางที่ 5.25 ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11 (ขนาดเท่ากัน)

Tuned 5 th , 7 th , 11 th	PF (%)	Low Voltage Side										High Voltage Side	
		5 th		7 th		11 th		I_s		I_L			I_s
		Irms(A)	Irms/lcr	Irms(A)	Irms/lcr	Irms(A)	Irms/lcr	Irms(A)	THD (%)	Irms(A)	THD (%)		Irms(A)
OFF OFF OFF	78.32	0	0	0	0	0	0	1095.69	32.53	387.84	12.39	32.52	
ON OFF OFF	87.95	292.55	1.06	0	0	0	0	1029.41	18.75	386.61	9.43	18.73	
OFF ON OFF	87.74	0	0	373.45	1.36	0	0	1137.86	51.47	387.50	11.65	51.47	
ON ON OFF	95.94	307.75	1.12	256.89	0.93	0	0	1035.22	12.43	385.73	6.57	12.45	
OFF OFF ON	87.62	0	0	0	0	573.17	2.08	1233.40	69.75	390.26	16.74	69.76	
ON OFF ON	95.86	313.26	1.14	0	0	317.36	1.15	1055.40	23.84	385.82	6.90	23.84	
OFF ON ON	95.71	0	0	669.00	2.43	440.17	1.60	1552.10	113.60	393.24	20.93	113.56	
ON ON ON	99.88	322.32	1.17	257.11	0.94	250.68	0.91	1088.68	8.81	385.14	3.57	8.82	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.26 ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และ อันดับ11 (ขนาดเท่ากัน)

Tuned 5 th , 7 th , 11 th	PF (%)	Low Voltage Side THDv (%)			High Voltage Side THDv (%)		
		Results	PL (ERG5/4)	Different $\frac{THD_v - PL}{PL} \times 100$	Results	PL (ERG5/4)	Different $\frac{THD_v - PL}{PL} \times 100$
OFF OFF OFF	78.32	16.46	5	229.20	0.87	3	-71.00
ON OFF OFF	87.95	12.55	5	151.00	0.66	3	-78.00
OFF ON OFF	87.74	15.38	5	207.60	0.82	3	-72.67
ON ON OFF	95.94	8.75	5	75.00	0.46	3	-84.67
OFF OFF ON	87.62	22.13	5	342.60	1.18	3	-60.67
ON OFF ON	95.86	9.15	5	83.00	0.49	3	-83.67
OFF ON ON	95.71	27.49	5	449.80	1.47	3	-51.00
ON ON ON	99.88	4.74	5	-5.20	0.25	3	-91.67



รูปที่ 5.22 Impedance Scan ของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11 (ขนาดเท่ากัน)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สรุปผลการวิเคราะห์

กรณีนี้ได้กำหนดให้ตัวกรองทั้ง 3 ชุดมีขนาดเท่ากันเพื่อต้องการวิเคราะห์ว่าตัวกรองอันดับที่ 5 จะสามารถทำงานได้ตามปกติหรือไม่ เนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 มีค่าสูงที่สุด

ก) เมื่อใช้งานเพียง 1 ชุด

ใช้งานตัวกรองอันดับที่ 5 เกิดภาวะการทำงาน 106% THDV 12.55% และ PF 87.95% ใช้งานได้

ใช้งานตัวกรองอันดับที่ 7 เกิดภาวะการทำงาน 136% (เกิน130%) THDV 15.38% และ PF 87.74% ใช้งานไม่ได้

ใช้งานตัวกรองอันดับที่ 11 เกิดภาวะการทำงาน 208% (เกิน130%) THDV 22.13% และ PF 87.62% ใช้งานไม่ได้

ข) เมื่อใช้งาน 2 ชุด

ใช้งานตัวกรองอันดับที่ 5 ร่วมกับอันดับที่ 7 เกิดภาวะการทำงาน 112% และ 93% ตามลำดับ THDV 8.75% และ PF 95.94% ใช้งานได้

ใช้งานตัวกรองอันดับที่ 5 ร่วมกับอันดับที่ 11 เกิดภาวะการทำงาน 114% และ 115% ตามลำดับ THDV 9.15% และ PF 95.86% ใช้งานได้แต่มีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายหากเงื่อนไขของระบบเปลี่ยนแปลงไป

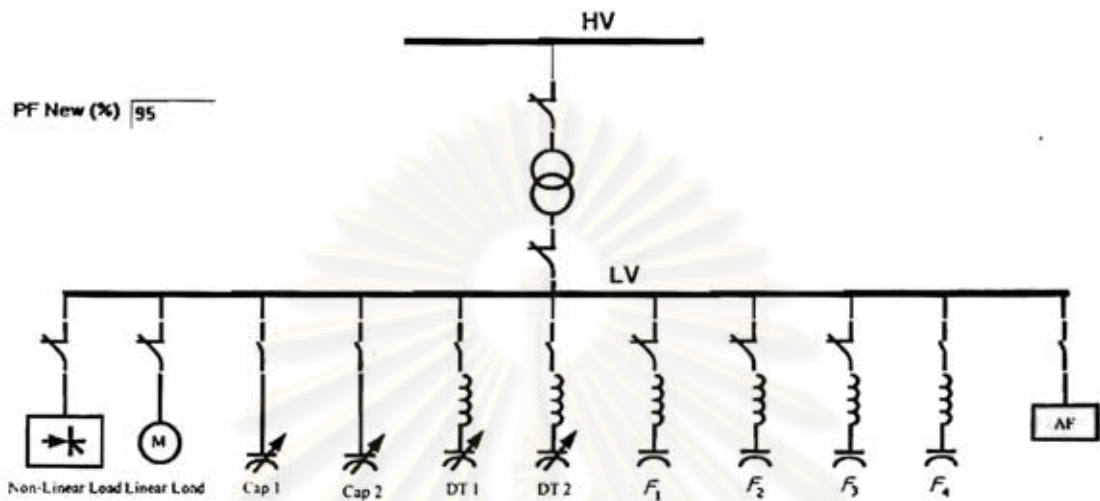
ใช้งานตัวกรองอันดับที่ 7 ร่วมกับอันดับที่ 11 เกิดภาวะการทำงาน 243% และ 160% ตามลำดับ THDV 27.49% และ PF 95.71% ใช้งานไม่ได้ทั้ง 2 ชุด

ค) เมื่อใช้ร่วมกันทั้ง 3 ชุด

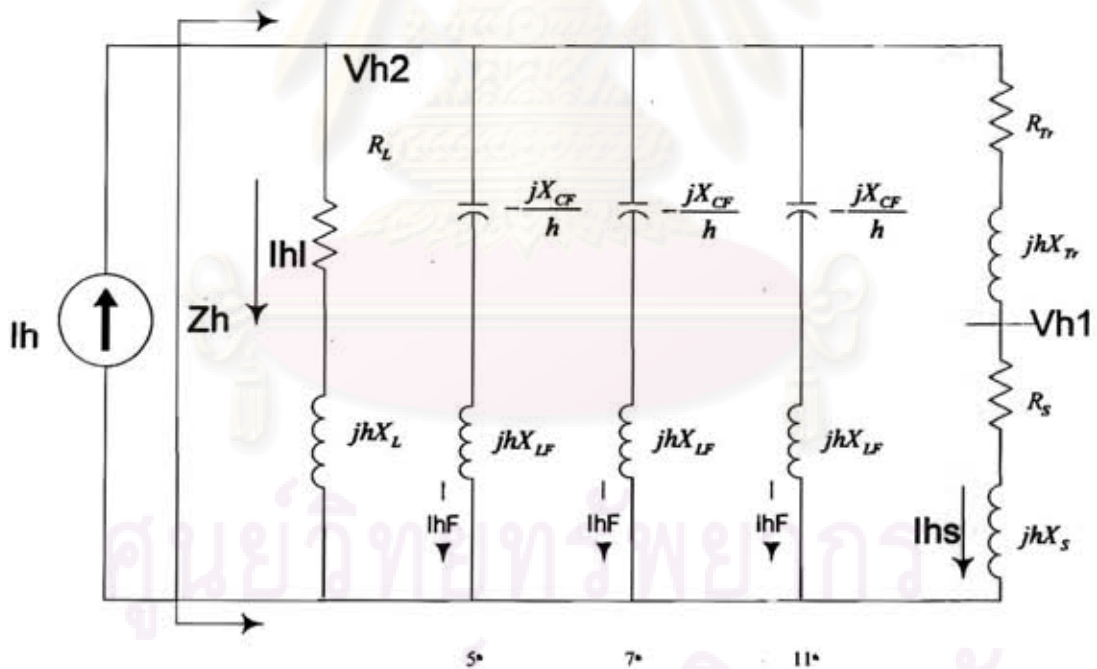
เกิดภาวะการทำงาน 117%, 94% และ 91% ตามลำดับ สามารถใช้งานได้ตามปกติ และค่า THDV ลดลงเหลือเพียง 4.74% ซึ่งต่ำกว่าค่า PL ที่กำหนดไว้ที่ 5% และได้ค่าตัวประกอบกำลัง 99.88%

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรณีที่ 7 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11 (ขนาดไม่เท่ากัน)



รูปที่ 5.23 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11 (ขนาดไม่เท่ากัน)



รูปที่ 5.24 วงจรสมมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11 (ขนาดไม่เท่ากัน)

ตารางที่ 5.27 ข้อมูลเบื้องต้น

System	Transformer	LV Bus	Non-Linear Load	Linear Load	Tuned Filter 5 th	Tuned Filter 7 th	Tuned Filter 11 th
200 MVA_{sc} 22 kV X/R 1	1000 kVA 22 kV/400V %Z = 6.5 Pk = 13.5 kW	400 V	400 kW PF = 80 %	200 kW PF = 75 %	400 kVAR Vcr 525V Tuning Point 4.8 Q-Factor 60	250 kVAR Vcr 525V Tuning Point 6.8 Q-Factor 60	175 kVAR Vcr 525V Tuning Point 10.8 Q-Factor 60

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ตารางที่ 5.28 ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจุนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11 (ขนาดไม่เท่ากัน)

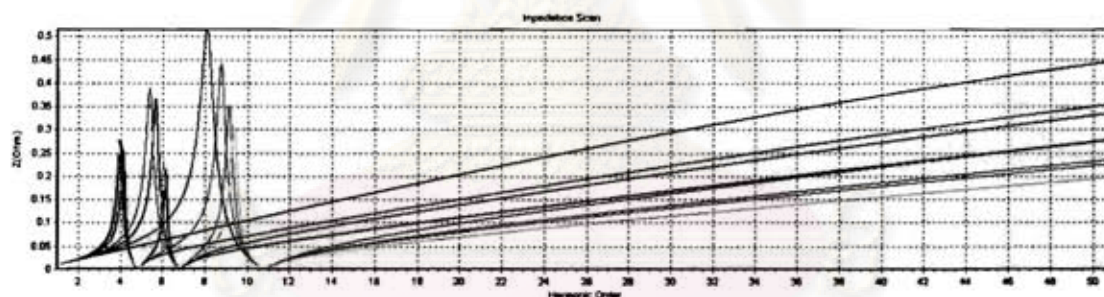
Tuned 5 th , 7 th , 11 th	PF (%)	Low Voltage Side										High Voltage Side	
		5 th		7 th		11 th		I_s		I_L			I_s
		Irms(A)	Irms/lcr	Irms(A)	Irms/lcr	Irms(A)	Irms/lcr	Irms(A)	THD (%)	Irms(A)	THD (%)		
OFF OFF OFF	78.32	0	0	0	0	0	0	1095.69	32.53	387.84	12.39	32.52	
ON OFF OFF	93.18	414.06	0.94	0	0	0	0	1029.21	16.08	386.27	8.44	16.06	
OFF ON OFF	87.74	0	0	373.45	1.36	0	0	1137.86	51.47	387.50	11.65	51.47	
ON ON OFF	99.00	419.56	0.95	252.53	0.92	0	0	1063.98	10.15	385.60	6.03	10.14	
OFF OFF ON	84.87	0	0	0	0	280.47	1.46	1111.64	44.34	387.14	10.80	44.32	
ON OFF ON	97.69	420.42	0.96	0	0	209.92	1.09	1051.27	14.23	385.45	5.37	14.25	
OFF ON ON	93.60	0	0	520.93	1.89	268.87	1.40	1330.18	84.34	389.62	15.71	84.33	
ON ON ON	-99.96	423.82	0.96	251.27	0.91	190.57	0.99	1113.45	6.54	385.16	3.70	6.53	

หมายเหตุ : PF มีค่าติดลบหมายถึงเป็น Leading PF

ตารางที่ 5.29 ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11 (ขนาดไม่เท่ากัน)

Tuned 5 th , 7 th , 11 th	PF (%)	Low Voltage Side THDv (%)			High Voltage Side THDv (%)		
		Results	PL (ERG5/4)	Different $\frac{THD_v - PL}{PL} \times 100$	Results	PL (ERG5/4)	Different $\frac{THD_v - PL}{PL} \times 100$
OFF OFF OFF	78.32	16.46	5	229.20	0.87	3	-71.00
ON OFF OFF	93.18	11.23	5	124.60	0.59	3	-80.33
OFF ON OFF	87.74	15.38	5	207.60	0.82	3	-72.67
ON ON OFF	99.00	8.03	5	60.60	0.42	3	-86.00
OFF OFF ON	84.87	14.28	5	185.60	0.76	3	-74.67
ON OFF ON	97.69	7.14	5	42.80	0.38	3	-87.33
OFF ON ON	93.60	20.65	5	313.00	1.11	3	-63.00
ON ON ON	-99.96	4.92	5	-1.60	0.26	3	-91.33

หมายเหตุ : PF มีค่าติดลบหมายถึงเป็น Leading PF

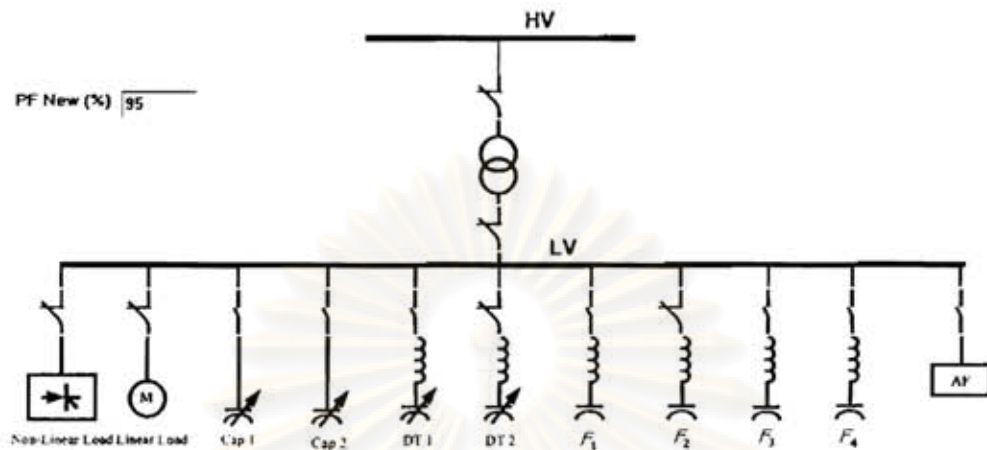


รูปที่ 5.25 Impedance Scanของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11 (ขนาดไม่เท่ากัน)

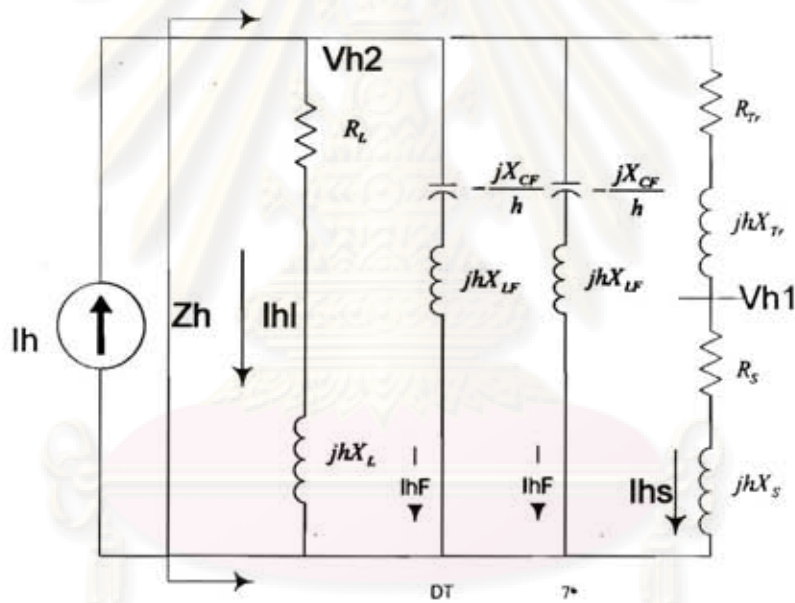
สรุปผลการวิเคราะห์

กรณีนี้กำหนดให้ขนาดของตัวกรองแต่ละชุดมีขนาดลดหลั่นกันตามปริมาณกระแสฮาร์มอนิก โดยกำหนดให้ตัวกรองอันดับที่ 5 มีขนาดใหญ่ที่สุด และอันดับ 11 มีขนาดเล็กที่สุดได้ผลสรุปในแนวเดียวกับกรณีที่ 6 แต่ภาระการทำงานของตัวกรองทั้ง 3 ชุดมีสภาพดีกว่ากรณีที่ 6 คือมีภาระการทำงานไม่เกิน 100% ทั้งการใช้งานชุดเดียว (อันดับ 5) 2 ชุดร่วมกัน (อันดับ 5 ร่วมกับอันดับ 7) และ 3 ชุดร่วมกัน

กรณีศึกษาที่ 8 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกับชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7



รูปที่ 5.26 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกับชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7



รูปที่ 5.27 วงจรสมมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกับชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7

ตารางที่ 5.30 ข้อมูลเบื้องต้น

System	Transformer	LV Bus	Non-Linear Load	Linear Load	Detuned Filter	Tuned Filter 7 th
200 MVA _{sc}	1000 kVA	400 V	400 kW	200 kW	9 × 80 kVAR	250 kVAR
22 kV	22 kV/400V		PF = 80 %	PF = 75 %	7% X _L	Vcr 525V
X/R 1	%Z = 6.5				Vcr 525V	Tuning Point 6.8
	Pk = 13.5 kW				Q-Factor 50	Q-Factor 60

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

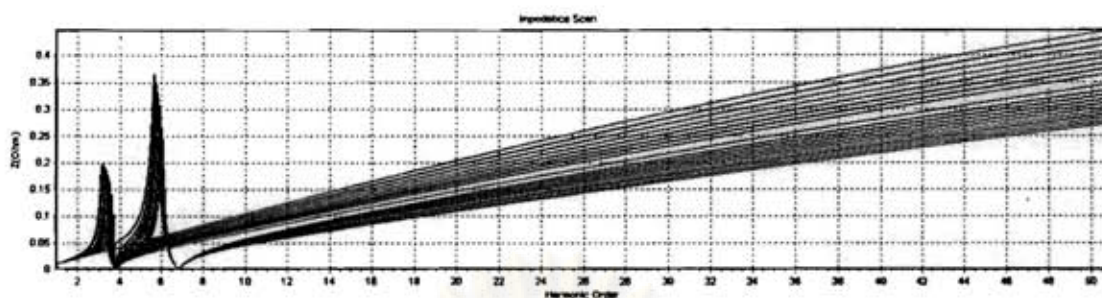
ตารางที่ 5.31 ผลลัพธ์ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกับชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7

DT Step	PF (%)	I _{rms} /I _{cr} ของ Cap ใน	
		DT	7 th Filter
0	87.74	-	1.36
1	90.73	0.96	1.24
2	93.47	0.93	1.16
3	95.86	0.90	1.11
4	97.79	0.88	1.07
5	99.16	0.87	1.04
6	99.89	0.86	1.02
7	-99.94	0.86	1.00
8	-99.30	0.85	0.99
9	-98.01	0.85	0.98

ตารางที่ 5.32 ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้งานตัวกรองดีจูนร่วมกับตัวกรองจูนอันดับ 7

7 th Filter ทำงานร่วมกับ DT Step ที่	PF (%)	Low Voltage Side THD _v (%)			High Voltage Side THD _v (%)		
		Results	PL (ERG5/4)	Different $\frac{THD_v - PL}{PL} \times 100$	Results	PL (ERG5/4)	Different $\frac{THD_v - PL}{PL} \times 100$
0	87.74	15.38	5	207.60	0.82	3	-72.67
1	90.73	13.71	5	174.20	0.73	3	-75.67
2	93.47	12.53	5	150.60	0.67	3	-77.67
3	95.86	11.65	5	133.00	0.62	3	-79.33
4	97.79	10.95	5	119.00	0.58	3	-80.67
5	99.16	10.39	5	107.80	0.55	3	-81.67
6	99.89	9.92	5	98.40	0.53	3	-82.33
7	-99.94	9.51	5	90.20	0.50	3	-83.33
8	-99.30	9.16	5	83.20	0.48	3	-84.00
9	-98.01	8.84	5	76.80	0.47	3	-84.33

หมายเหตุ : PF มีค่าติดลบหมายถึงเป็น Leading PF



รูปที่ 5.28 Impedance Scan ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกับชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7

สรุปผลการวิเคราะห์

1. เมื่อใช้งานเฉพาะตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7 ตัวเก็บประจุในชุดตัวกรองมีภาระการทำงานที่ระดับ 136% (เกิน 130%) จึงใช้งานไม่ได้
2. เมื่อเปิดใช้งานชุดตัวกรองชนิดดีจูนเพื่อจุดประสงค์ในการป้องกันการเกิดเรโซแนนซ์ที่ฮาร์มอนิกอันดับ 5 จากการใช้งานตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7 และเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังเพื่อให้ได้ค่าตัวประกอบกำลังไม่เกิน 95% และไม่เกิน 100% จะต้องใช้ชุดตัวกรองชนิดดีจูนจำนวน 2 ตัว และ 6 ตัวตามลำดับ
3. เมื่อใช้งานชุดตัวกรองชนิดดีจูนจำนวน 2 ตัวร่วมกับตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7 ตัวเก็บประจุในชุดตัวกรองชนิดดีจูนและชนิดจูนจะมีภาระการทำงานที่ 93% และ 116% จึงใช้งานได้ตามปกติ และค่า THD ของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสแรงต่ำ 400 V ลดลงเหลือ 12.53%
4. เมื่อใช้งานชุดตัวกรองชนิดดีจูนจำนวน 6 ตัวร่วมกับตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7 ตัวเก็บประจุในชุดตัวกรองชนิดดีจูนและชนิดจูนจะมีภาระการทำงานที่ 86% และ 102% จึงใช้งานได้ตามปกติ และค่า THD ของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสแรงต่ำ 400 V ลดลงเหลือ 9.92%

สรุปผลการวิเคราะห์ในภาพรวม

1. ในระบบที่มีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกสูงไม่สามารถใช้งานชุดตัวเก็บประจุได้ ทั้งในรูปแบบของ ใช้เพียงลำพัง หรือใช้งานร่วมกับชุดตัวกรองชนิดดีจูน
2. การใช้งานชุดตัวกรองชนิดดีจูนสามารถใช้งานได้ตามปกติ แต่ให้ผลในการลดค่า THD ของแรงดันฮาร์มอนิกไม่มากเหมือนการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูน
3. การใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนหลายอันดับร่วมกันโดยมีขนาดลดหลั่นกันตามปริมาณกระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับ จะให้ผลลัพธ์ในการลดค่า THD ของแรงดันฮาร์มอนิกได้ดี และตัวเก็บประจุในตัวกรองแต่ละชุดจะมีภาระการทำงานต่ำ

การเปรียบเทียบผลในภาพรวมแสดงดังในตารางที่ 5.33

ตารางที่ 5.33 สรุปเปรียบเทียบภาระการทำงานของตัวกรองแต่ละชุดและความสามารถในการลดค่า THDV

กรณีที่	Tuning point	Qcomp (kVAR)	I _{rms} /I _{cr} (%THDV at 400 V)		
			1 ชุด	2 ชุด	3 ชุด
3 (ใช้เฉพาะDT)	3.78	49.94	0.87 (15.66)	-	
		449.96	0.84 (1) (11.42)	-	
4	4.8	242.73	0.94 (11.23)	0.85 (8.80)	
	4.8	242.73	-	0.85 (8.80)	
5	4.8	242.73	0.94 (11.23)	0.97 (7.28)	
	6.8	207.67	-	0.87 (7.28)	

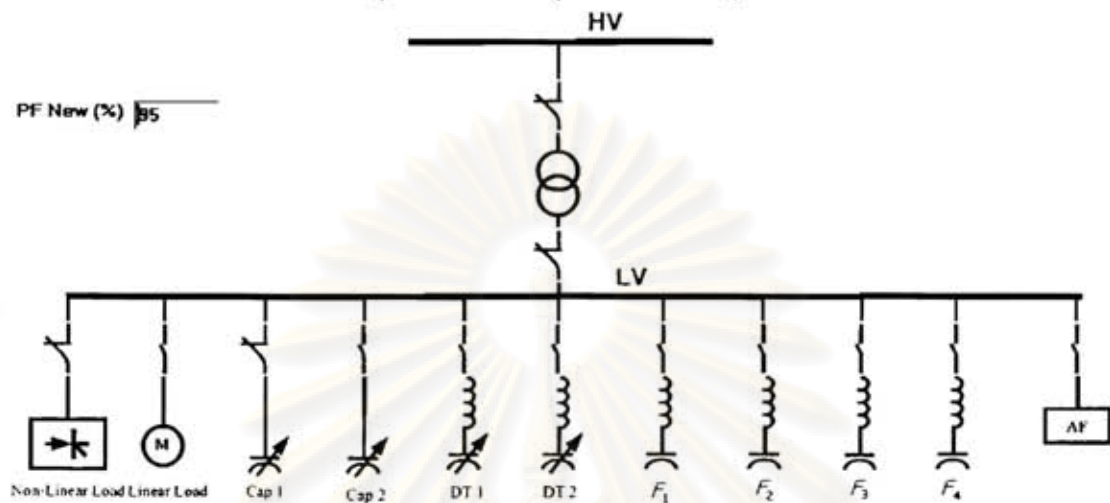
ตารางที่ 5.33 (ต่อ)

กรณี	Tuning point	Qcomp (kVAR)	I _{rms} /I _{cr} (%THDV at 400 V)		
			1 ชุด	2 ชุด	3 ชุด
6	4.8	151.70	1.06 (12.55)	1.12 (8.75)	1.17 (4.74)
	6.8	148.33	-	0.93 (8.75)	0.94 (4.74)
	10.8	146.38	-	-	0.91 (4.74)
7	4.8	242.73	0.94 (11.23)	0.95 (8.03)	0.96 (4.92)
	6.8	148.73	-	0.92 (8.03)	0.91 (4.92)
	10.8	102.47	-	-	0.99 (4.92)
8	3.78	49.94	-	0.93 (2) (12.53) 0.86 (3) (9.92)	-
	6.8	148.73	-	1.16 (2) (12.53) 1.02 (3) (9.92)	-

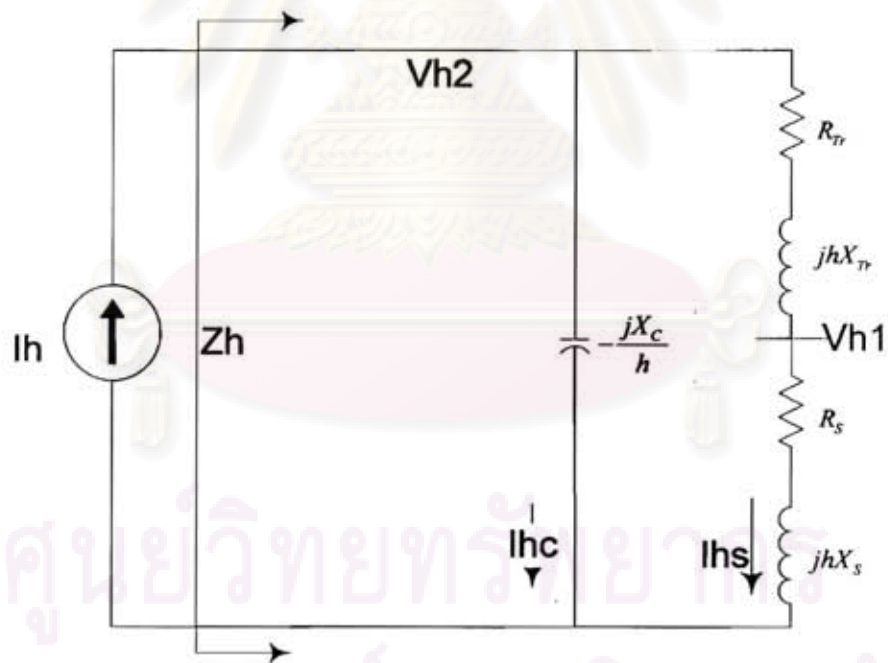
หมายเหตุ (1) ON DT จำนวน 9 ชุด
(2) ON DT จำนวน 2 ชุด
(3) ON DT จำนวน 6 ชุด

5.2 ระบบที่มีเฉพาะโหลดไม่เป็นเชิงเส้น

กรณีที่ 1 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (ตัวเก็บประจุมีพิกัดแรงดัน 400V)



รูปที่ 5.29 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (400 V)



รูปที่ 5.30 วงจรสมมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (400 V)

ตารางที่ 5.34 ข้อมูลเบื้องต้น

System	Transformer	LV Bus	Non-Linear Load	Capacitor
200 MVA_{sc} 22 kV X/R 1	1000 kVA 22 kV/400V %Z = 6.5 Pk = 13.5 kW	400 V	400 kW PF = 80 %	9 × 50 kVAR Vcr 400 V

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ตารางที่ 5.35 ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (400 V)

Cap Step	PF (%)	Low Voltage Side THDv (%)			High Voltage Side THDv (%)		
		Results	PL(ERG5/4)	Different	Results	PL(ERG5/4)	Different
0	80.00	17.27	5	245.40	0.91	3	-69.67
1	84.80	173.47	5	3369..40	9.15	3	205.00
2	89.44	50.00	5	900.00	2.64	3	-12.00
3	93.63	29.22	5	484.40	1.55	3	-48.33
4	97.01	19.21	5	284.20	1.02	3	-66.00
5	99.23	28.70	5	474.00	1.53	3	-49.00
6	100.00	123.77	5	2375.40	6.58	3	119.33
7	-99.23	33.40	5	568.00	1.78	3	-40.67
8	-97.01	23.31	5	366.20	1.25	3	-58.33
9	-93.63	25.78	5	415.60	1.38	3	-54.00

หมายเหตุ : PF มีค่าติดลบหมายถึงเป็น Leading PF

ตารางที่ 5.36 ผลลัพธ์ของกระแสของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (400 V)

Cap Step	PF (%)	Low Voltage Side						High Voltage Side
		I_C				I_S		I_S
		I1(A)	Ihrms(A)	Irms(A)	Irms/lcr	Irms(A)	THD (%)	THD (%)
0	80.00	0	0	0	0	800.95	48.14	48.11
1	84.80	72.17	2130.85	2132.07	29.54	2333.26	305.76	305.70
2	89.44	144.34	889.58	901.22	6.24	1192.42	127.48	127.49
3	93.63	216.51	678.57	712.27	3.29	1011.02	89.47	89.51
4	97.01	288.68	470.45	551.96	1.91	980.42	76.88	76.90
5	99.23	360.84	744.06	826.94	2.29	1222.66	113.85	113.89
6	100.00	433.01	3749.75	3774.67	8.72	3906.31	453.24	453.31
7	-99.23	505.18	1147.26	1253.56	2.48	1414.67	125.65	125.61
8	-97.01	577.35	821.78	1004.32	1.74	1282.84	96.26	96.26
9	-93.63	649.52	918.15	1124.67	1.73	1439.60	109.47	109.51

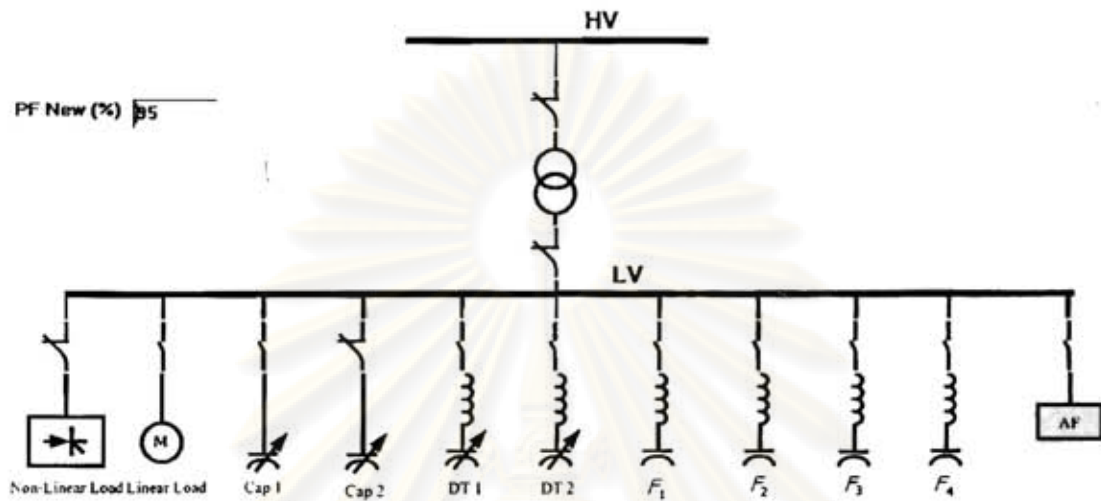
หมายเหตุ : PF มีค่าติดลบหมายถึงเป็น Leading PF

ตารางที่ 5.37 ภาระการทำงานของตัวเก็บประจุ (พิกัดแรงดัน 400 V)

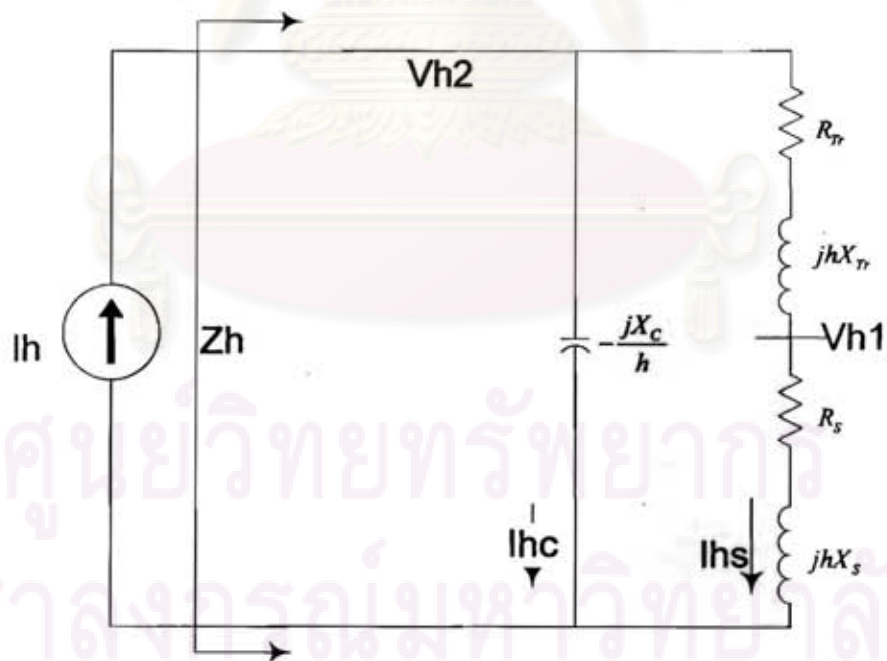
หัวข้อ	I _{rms} /I _{cr} (%PF) เมื่อเปิดใช้งานชุดตัวเก็บประจุจำนวน (ตัว)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
5.1	5.77 (81.51)	4.20 (84.71)	2.87 (87.84)	1.86 (90.83)	1.99 (93.56)	2.81 (95.94)	2.15 (97.85)	1.68 (99.20)	1.64 (99.20)
5.2	29.54 (84.80)	6.24 (89.44)	3.29 (93.63)	1.91 (97.01)	2.29 (99.23)	8.72 (100.00)	-	-	-

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรณีศึกษาที่ 2 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ(ตัวเก็บประจุมีพิกัดแรงดัน 525V)



รูปที่ 5.33 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (525 V)



รูปที่ 5.34 วงจรสมมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (525 V)

ตารางที่ 5.38 ข้อมูลเบื้องต้น

System	Transformer	LV Bus	Non-Linear Load	Capacitor
200 MVA _{sc} 22 kV X/R 1	1000 kVA 22 kV/400V %Z = 6.5 Pk = 13.5 kW	400 V	400 kW PF = 80 %	9 × 80 kVAR Vcr 525 V

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ตารางที่ 5.39 ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (525 V)

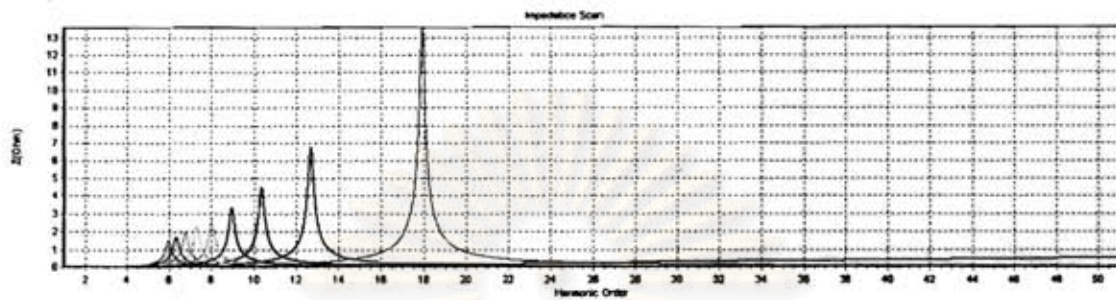
Cap Step	PF (%)	Low Voltage Side THDv (%)			High Voltage Side THDv (%)		
		Results	PL(ERG5/4)	Different	Results	PL(ERG5/4)	Different
0	80.00	17.27	5	245.40	0.91	3	-69.67
1	84.46	72.70	5	1354.00	3.84	3	28.00
2	88.80	94.95	5	1799.00	5.02	3	67.33
3	92.79	44.09	5	781.80	2.33	3	-22.33
4	96.16	19.18	5	283.60	1.02	3	-66.00
5	98.59	23.19	5	363.80	1.23	3	-59.00
6	99.86	53.67	5	973.40	2.85	3	-5.00
7	-99.80	60.86	5	1117.20	3.24	3	8.00
8	-98.44	26.19	5	423.80	1.40	3	-53.33
9	-95.92	23.36	5	367.20	1.25	3	-58.33

หมายเหตุ : PF มีค่าติดลบหมายถึงเป็น Leading PF

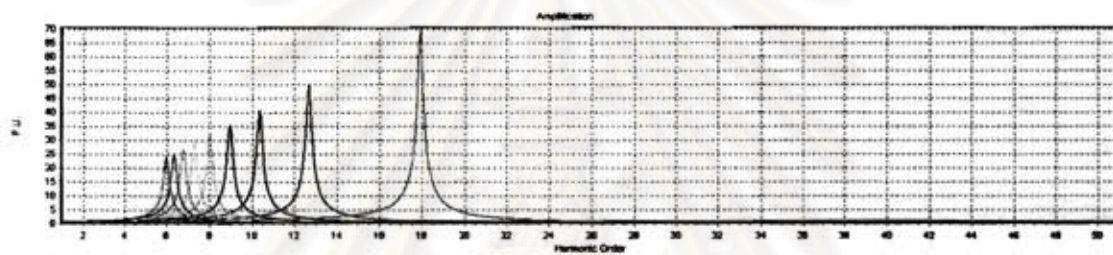
ตารางที่ 5.40 ผลลัพธ์ของกระแสของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (525 V)

Cap Step	PF (%)	Low Voltage Side						High Voltage Side
		I_c				I_s		I_s
		I1(A)	Ihrms(A)	Irms(A)	Irms/Icr	Irms(A)	THD (%)	THD (%)
0	80.00	0	0	0	0	800.95	48.14	48.11
1	84.46	67.03	858.52	861.13	9.79	1196.80	131.40	131.39
2	88.80	134.06	1643.10	1648.56	9.37	1776.54	220.40	220.37
3	92.79	201.09	971.40	992.00	3.76	1190.84	123.56	123.59
4	96.16	268.12	469.49	540.65	1.54	957.55	73.96	73.92
5	98.59	335.15	580.58	670.37	1.52	1091.12	93.83	93.82
6	99.86	402.18	1513.00	1565.54	2.97	1868.20	202.81	202.85
7	-99.80	469.21	1988.59	2043.20	3.32	2090.91	221.36	221.41
8	-98.44	536.24	917.76	1062.94	1.51	1290.72	103.00	102.97
9	-95.92	603.27	824.31	1021.48	1.29	1318.55	98.23	98.25

หมายเหตุ : PF มีค่าติดลบหมายถึงเป็น Leading PF



รูปที่ 5.35 Impedance Scan ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ (525 V)



+70.6+63.6+56.7+49.7+42.6+35.6+28.5+21.5+15.0+8.0 +1.1 1.0 +0.9 +0.8 +0.7 +0.6 +0.5 +0.4 +0.3 +0.2 +0.1 +0.0

Amplification

รูปที่ 5.36 การขยายกระแสฮาร์มอนิกเมื่อใช้ชุดตัวเก็บประจุ (525 V)

สรุปผลการวิเคราะห์

ตัวเก็บประจุไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากมีภาระการทำงานเกิน 130% ดังผลลัพธ์ในตารางที่ 5.40 แต่มีภาระการทำงานต่ำกว่าของชุดตัวเก็บประจุที่กักแรงดัน 400 V ดังรายละเอียดในตารางที่ 5.41 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดเรโซแนนซ์ของชุดตัวเก็บประจุ และเมื่อเปรียบเทียบผลการทำงานตามหัวข้อ 5.1 และหัวข้อ 5.2 พบว่าภาระการทำงานของตัวเก็บประจุตามหัวข้อ 5.2 จะสูงกว่าหัวข้อ 5.1 ดังรายละเอียดเปรียบเทียบในตารางที่ 5.42

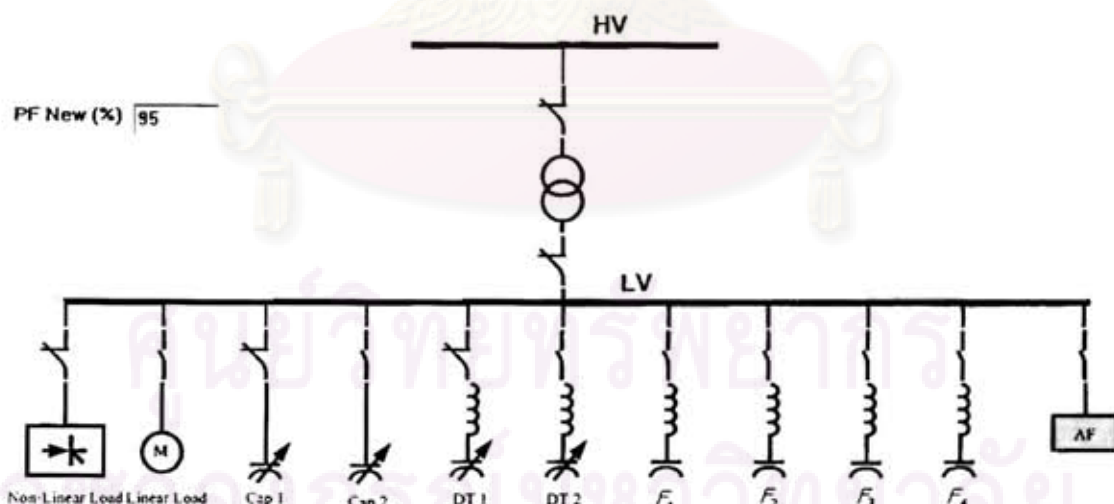
ตารางที่ 5.41 เปรียบเทียบภาระการทำงานของชุดตัวเก็บประจุที่กักแรงดัน 400 V และ 525 V

พิกัดแรงดัน (V)	Irms/lcr ที่ Step ที่					
	1	2	3	4	5	6
400	29.54	6.24	3.29	1.91	2.29	8.72
525	9.79	9.37	3.76	1.54	1.52	2.97

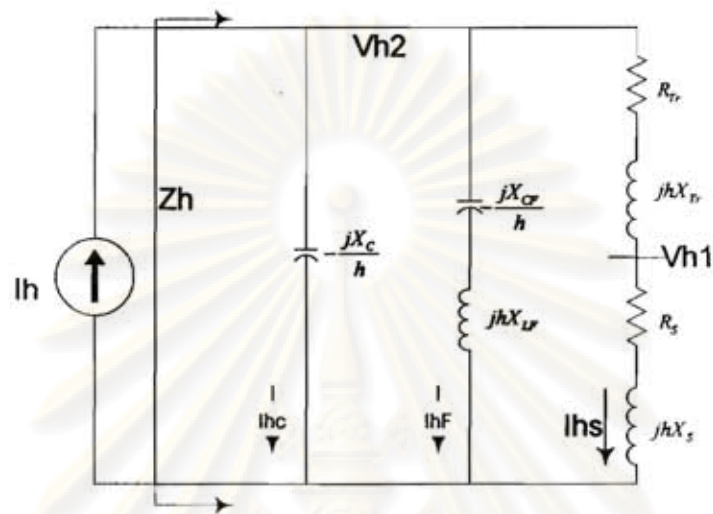
ตารางที่ 5.42 ภาระการทำงานของชุดตัวเก็บประจุ (พิกัดแรงดัน 525 V)

หัวข้อ	Irms/lcr (%PF) เมื่อเปิดใช้งานชุดตัวเก็บประจุจำนวน (ตัว)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
5.1	4.50 (81.29)	3.39 (84.26)	2.64 (87.18)	1.50 (90.00)	1.42 (92.62)	1.86 (94.97)	2.01 (96.96)	1.42 (98.51)	1.25 (99.53)
5.2	9.79 (84.46)	9.37 (88.80)	3.76 (92.79)	1.54 (96.16)	1.52 (98.59)	2.97 (99.86)	-	-	-

กรณีที่ 3 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน



รูปที่ 5.37 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน



รูปที่ 5.38 วงจรสมมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน

ตารางที่ 5.43 ข้อมูลเบื้องต้น

System	Transformer	LV Bus	Non-Linear Load	Capacitor	Detuned Filter
200 MVA _{sc}	1000 kVA	400 V	400 kW	9 × 80 kVAR	9 × 80 kVAR
22 kV	22 kV/400V		PF = 80 %	V _{cr} 525 V	7% X _L
X/R 1	%Z = 6.5				V _{cr} 525V
	P _k = 13.5 kW				Q-Factor 50

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ตารางที่ 5.44 ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดคัตจูน
(Loading ของ Cap ใน Cap Bank)

DT Cap	I rms/lcr (%PF)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0 (80.00)	0 (84.79)	0 (89.43)	0 (93.62)	0 (97.00)	0 (99.22)	0 (100)	0 (-99.24)	0 (-97.04)	0 (-93.68)
1	9.79 (84.46)	10.84 (89.12)	21.36 (93.35)	38.05 (96.80)	12.61 (99.11)	7.91 (100)	6.23 (-99.34)	5.56 (-97.24)	5.40 (-93.94)	5.61 (-89.81)
2	9.37 (88.00)	25.37 (93.07)	11.05 (96.59)	5.88 (98.99)	4.19 (99.98)	3.42 (-99.44)	3.04 (-97.43)	2.86 (-94.21)	2.80 (-90.12)	2.84 (-85.53)
3	3.76 (92.79)	5.67 (96.37)	11.96 (98.86)	15.01 (99.96)	6.50 (-99.53)	4.22 (-97.61)	3.42 (-94.46)	3.20 (-90.43)	3.38 (-85.86)	4.03 (-81.08)
4	1.54 (96.16)	1.56 (98.73)	1.63 (99.94)	1.74 (-99.61)	1.90 (-97.79)	2.14 (-94.72)	2.52 (-90.73)	3.17 (-86.19)	4.45 (-81.42)	7.72 (-76.65)
5	1.52 (98.59)	1.38 (99.90)	1.31 (-99.68)	1.28 (-97.96)	1.27 (-94.97)	1.28 (-91.03)	1.30 (-86.52)	1.34 (-81.76)	1.40 (-76.98)	1.48 (-72.35)
6	2.97 (99.86)	1.95 (-99.75)	1.54 (-98.13)	1.35 (-95.21)	1.24 (-91.33)	1.18 (-86.85)	1.14 (-82.09)	1.13 (-77.31)	1.12 (-72.67)	1.12 (-68.28)
7	3.32 (-99.80)	6.67 (-98.29)	3.85 (-95.45)	2.22 (-91.63)	1.64 (-87.17)	1.37 (-82.43)	1.23 (-77.64)	1.14 (-72.99)	1.09 (-68.57)	1.06 (-64.45)
8	1.51 (-98.44)	1.80 (-95.69)	2.57 (-91.92)	4.88 (-87.50)	5.19 (-82.76)	2.66 (-77.97)	1.80 (-73.31)	1.14 (-68.87)	1.25 (-64.73)	1.14 (-60.90)
9	1.29 (-95.92)	1.27 (-92.21)	1.36 (-87.82)	1.59 (-83.10)	2.11 (-78.31)	3.49 (-73.63)	6.03 (-69.17)	3.36 (-65.01)	2.05 (-61.13)	1.54 (-57.62)

ตารางที่ 5.45 ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจัน
(Loading ของ Cap ใน DT)

DT Cap	I rms/I cr (%PF)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0 (80.00)	0.87 (84.79)	0.87 (89.43)	0.86 (93.62)	0.85 (97.00)	0.85 (99.22)	0.85 (100)	0.84 (-99.24)	0.84 (-97.04)	0.84 (-93.68)
1	0 (84.46)	1.00 (89.12)	1.24 (93.35)	1.79 (96.80)	1.00 (99.11)	0.91 (100)	0.88 (-99.34)	0.87 (-97.24)	0.86 (-93.94)	0.86 (-89.81)
2	0 (88.00)	2.51 (93.07)	1.34 (96.59)	1.02 (98.99)	0.94 (99.98)	0.90 (-99.44)	0.88 (-97.43)	0.87 (-94.21)	0.87 (-90.12)	0.86 (-85.53)
3	0 (92.79)	1.17 (96.37)	1.82 (98.86)	2.18 (99.96)	1.21 (-99.53)	1.01 (-97.61)	0.94 (-94.46)	0.92 (-90.43)	0.91 (-85.86)	0.93 (-81.08)
4	0 (96.16)	0.94 (98.73)	0.92 (99.94)	0.91 (-99.61)	0.90 (-97.79)	0.90 (-94.72)	0.91 (-90.73)	0.94 (-86.19)	1.03 (-81.42)	1.33 (-76.65)
5	0 (98.59)	0.98 (99.90)	0.94 (-99.68)	0.92 (-97.96)	0.90 (-94.97)	0.89 (-91.03)	0.88 (-86.52)	0.87 (-81.76)	0.87 (-76.98)	0.86 (-72.35)
6	0 (99.86)	1.17 (-99.75)	1.04 (-98.13)	0.97 (-95.21)	0.93 (-91.33)	0.91 (-86.85)	0.89 (-82.09)	0.88 (-77.31)	0.87 (-72.67)	0.86 (-68.28)
7	0 (-99.80)	2.89 (-98.29)	1.80 (-95.45)	1.23 (-91.63)	1.05 (-87.17)	0.97 (-82.43)	0.93 (-77.64)	0.90 (-72.99)	0.89 (-68.57)	0.87 (-64.45)
8	0 (-98.44)	1.20 (-95.69)	1.38 (-91.92)	2.18 (-87.50)	2.29 (-82.76)	1.36 (-77.97)	1.09 (-73.31)	0.98 (-68.87)	0.93 (-64.73)	0.90 (-60.90)
9	0 (-95.92)	1.15 (-92.21)	1.09 (-87.82)	1.10 (-83.10)	1.21 (-78.31)	1.66 (-73.63)	2.61 (-69.17)	1.60 (-65.01)	1.15 (-61.13)	1.01 (-57.62)

ตารางที่ 5.46 ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน
(THDv(%) ด้านบัสแรงดันต่ำ)

DT Step Cap Step	Low Voltage Side THDv (%)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	17.27	16.38	15.59	14.88	14.24	13.66	13.12	12.62	12.16	11.74
1	72.70	77.02	148.11	262.98	87.16	54.17	41.88	36.29	34.08	34.29
2	94.95	256.18	111.39	58.68	40.98	32.56	27.94	25.29	23.91	23.50
3	44.09	66.98	142.32	178.76	76.43	48.40	37.74	33.99	34.81	40.80
4	19.18	18.50	18.61	19.47	21.17	24.01	28.64	36.57	52.09	91.55
5	23.19	19.31	16.92	15.41	14.48	14.00	13.87	14.06	14.57	15.43
6	53.67	33.15	24.28	19.45	16.48	14.53	13.21	12.30	11.70	11.33
7	60.86	124.37	70.69	38.81	26.65	20.51	16.87	14.50	12.87	11.71
8	26.19	31.25	46.14	90.43	96.30	47.67	30.30	22.29	17.79	14.94
9	23.36	21.04	22.09	26.55	36.98	63.91	112.16	61.35	35.56	24.82

ตารางที่ 5.47 ผลต่าง (Different) ระหว่าง THDv(%) และ Planning Level (PL) ด้านบัสแรงดันต่ำ

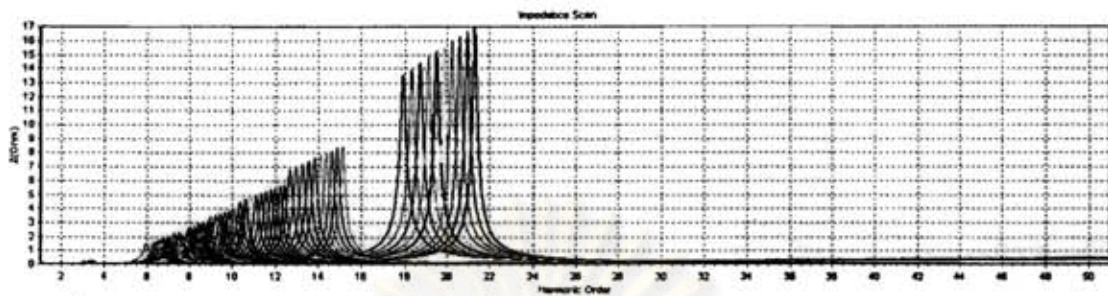
DT Step Cap Step	Low Voltage Side Different ($\frac{THD_v - PL}{PL} \times 100$)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	245.40	227.60	211.80	197.60	184.80	173.20	162.40	152.40	143.20	134.80
1	1354.00	1440.40	2862.20	5159.60	1643.20	983.40	737.60	625.80	581.60	585.80
2	1799.00	5023.40	2127.80	1073.60	719.60	551.20	458.80	405.80	378.20	370.00
3	781.80	1239.60	2746.40	3475.20	1428.60	868.00	654.80	579.80	596.0	716.00
4	283.60	270.00	272.20	289.40	323.40	380.20	472.80	631.40	941.80	1731.00
5	363.80	286.20	238.40	208.20	189.60	180.00	177.40	181.20	191.40	208.60
6	973.40	563.00	385.60	289.00	229.80	190.60	164.20	146.00	134.00	126.60
7	1117.20	2387.40	1313.80	676.20	433.00	310.20	237.40	190.00	157.40	134.20
8	423.80	525.00	822.80	1708.60	1826.00	853.40	506.00	345.80	255.80	198.80
9	367.20	320.80	341.80	431.00	639.60	1178.20	2143.20	1127.00	611.20	396.40

ตารางที่ 5.48 ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน
(THDv(%) ด้านบัสแรงดันสูง)

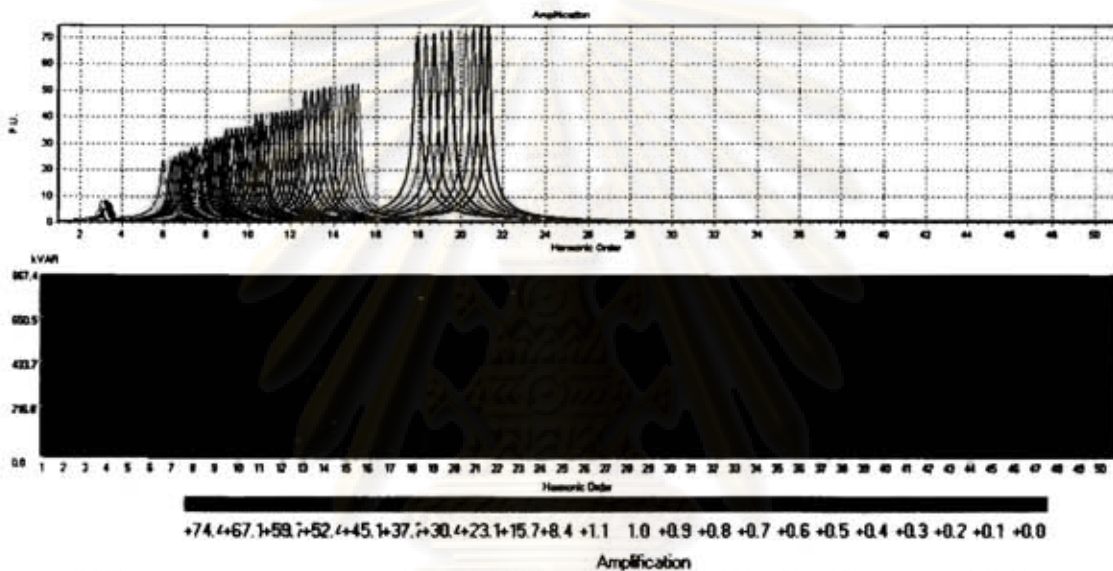
DT Step Cap Step	High Voltage Side THDv (%)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.91	0.87	0.82	0.79	0.75	0.72	0.69	0.67	0.64	0.62
1	3.84	4.06	7.81	13.87	4.60	2.86	2.21	1.91	1.80	1.81
2	5.02	13.53	5.88	3.10	2.17	1.72	1.48	1.34	1.26	1.24
3	2.33	3.54	7.53	9.45	4.04	2.56	2.00	1.80	1.84	2.16
4	1.02	0.98	0.99	1.03	1.12	1.27	1.52	1.93	2.75	4.84
5	1.23	1.03	0.90	0.82	0.77	0.74	0.74	0.75	0.77	0.82
6	2.85	1.76	1.29	1.04	0.88	0.77	0.70	0.65	0.62	0.60
7	3.24	6.61	3.76	2.06	1.42	1.09	0.90	0.77	0.68	0.62
8	1.40	1.66	2.45	4.81	5.12	2.54	1.61	1.19	0.95	0.79
9	1.25	1.12	1.18	1.41	1.97	3.40	5.96	3.26	1.89	1.32

ตารางที่ 5.49 ผลต่าง(Different)ระหว่าง THDv(%) และ Planning Level (PL) ด้านบัสแรงดันสูง

DT Step Cap Step	High Voltage Side Different ($\frac{THD_v - PL}{PL} \times 100$)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-69.67	-71.00	-72.67	-73.67	-75.00	-76.00	-77.00	-77.67	-78.67	-79.33
1	28.00	35.33	160.33	362.33	53.33	-4.67	-26.33	-36.33	-40.00	-39.67
2	67.33	351.00	96.00	3.33	-27.67	-42.67	-50.67	-55.33	-58.00	-58.67
3	-22.33	18.00	151.00	215.00	34.67	-14.67	-33.33	-40.00	-38.67	-28.00
4	-66.00	-67.33	-67.00	-65.67	-62.67	-57.67	-49.33	-35.67	-8.33	61.33
5	-59.00	-65.67	-70.00	-72.67	-74.33	-75.33	-75.33	-75.00	-74.33	-72.67
6	-5.00	-41.33	-57.00	-65.33	-70.67	-74.33	-76.67	-78.33	-79.33	-80.00
7	8.00	120.33	25.33	-31.33	-52.67	-63.67	-70.00	-74.33	-77.33	-79.33
8	-53.33	-44.67	-18.33	60.33	70.67	-15.33	-46.33	-60.33	-68.33	-73.67
9	-58.33	-62.67	-60.67	-53.00	-34.33	13.33	98.67	8.67	-37.00	-56.00



รูปที่ 5.39 Impedance Scanของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน



รูปที่ 5.40 การขยายกระแสฮาร์มอนิกเมื่อใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน

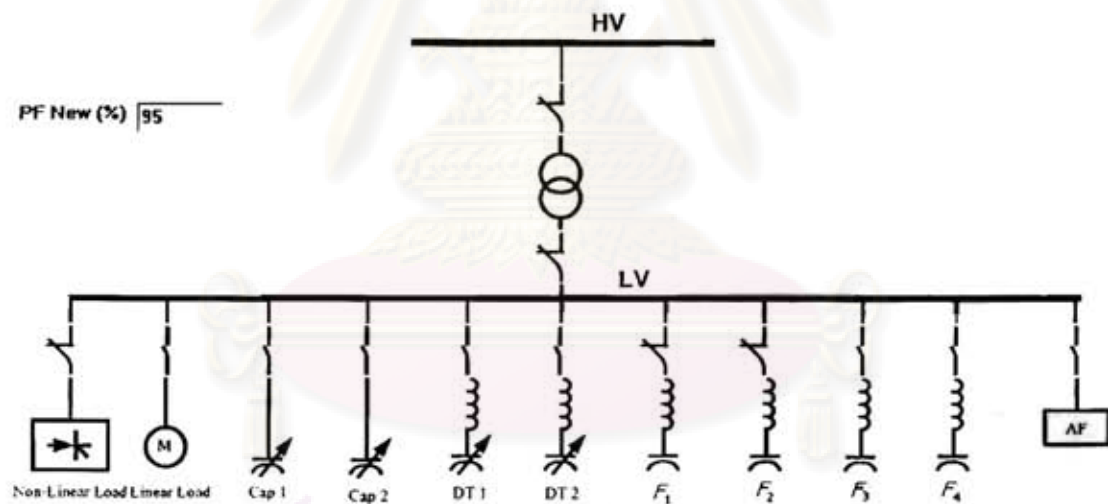
สรุปผลการวิเคราะห์

- ถึงแม้จะไม่มีโหลดเชิงเส้นช่วยหน่วงผลของฮาร์มอนิกการใช้งานชุดตัวกรองดีจูนเพียงอย่างเดียวสามารถใช้งานได้ตามปรกติตามผลลัพธ์ในตารางที่ 5.45 (กรณีที่ใช้ Cap Step เป็นศูนย์) ภาระการทำงานของตัวเก็บประจุในตัวกรองเป็น 87% เปิดใช้งาน 1 ตัว และเป็น 85% เมื่อเปิดใช้งาน 6 ตัว ได้ตัวประกอบกำลังรวมเป็น 100% ค่า THD ของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสแรงต่ำ 400 V ลดลงจาก 17.27% เหลือ 13.12% ซึ่งยังคงสูงกว่าค่า 5% ที่เป็นค่า Planning Level ที่กำหนดโดย ER G5/4
- เมื่อใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับชุดตัวกรองชนิดดีจูนเพื่อให้ได้ค่าตัวประกอบกำลังไม่เกิน 95% และไม่เกิน 100% จะได้ภาระการทำงานของตัวเก็บประจุในชุดตัวเก็บประจุและในตัวกรองดีจูน ดังแสดงในตารางที่ 5.50 พบว่าไม่สามารถใช้งานชุดตัวเก็บประจุได้เพราะมีภาระการทำงานเกิน 130% ส่วนชุดตัวกรองชนิดดีจูนก็มีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายได้ในบางเงื่อนไข

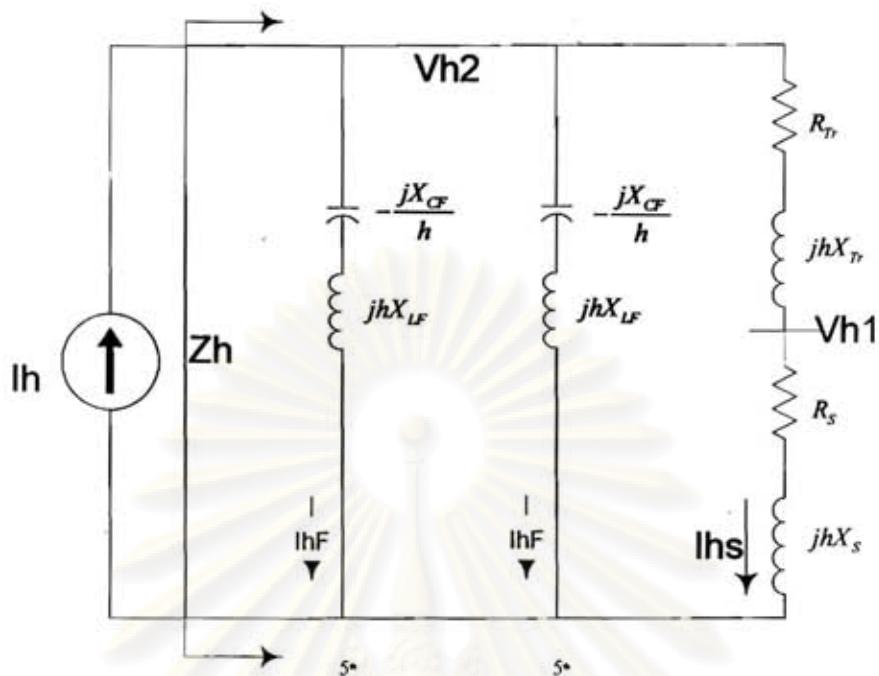
ตารางที่ 5.50 สภาพการทำงานของตัวเก็บประจุเมื่อใช้งานชุดตัวเก็บประจุร่วมกับชุดชนิดดีจูน

PF(%)	No. of Step		Irms/lcr ของ Cap ใน		THDV (%) at 400 V Bus
	Cap	DT	Cap Bank	DT	
≤95	2	1	25.37	2.51	256.18
	1	2	21.36	1.24	148.11
≤100	5	1	1.38	0.98	19.31
	4	2	1.63	0.92	18.61
	3	3	15.01	2.18	178.76
	2	4	4.19	0.94	40.98
	1	5	7.91	0.91	54.17

กรณีที่ 4 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5จำนวน 2 ชุด



รูปที่ 5.41 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 จำนวน 2 ชุด



รูปที่ 5.42 วงจรสมมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 5 จำนวน 2 ชุด

ตารางที่ 5.51 ข้อมูลเบื้องต้น

System	Transformer	LV Bus	Non-Linear Load	Tuned Filter 5 th ตัวที่ 1	Tuned Filter 5 th ตัวที่ 2
200 MVA _{sc}	1000 kVA	400 V	400 kW	400 kVAR	400 kVAR
22 kV	22 kV/400V		PF = 80 %	Vcr 525V	Vcr 525V
X/R 1	%Z = 6.5			Tuning Point 4.8	Tuning Point 4.8
	Pk = 13.5 kW			Q-Factor 60	Q-Factor 60

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ตารางที่ 5.52 ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจุนอันดับ 5 จำนวน 2 ชุด

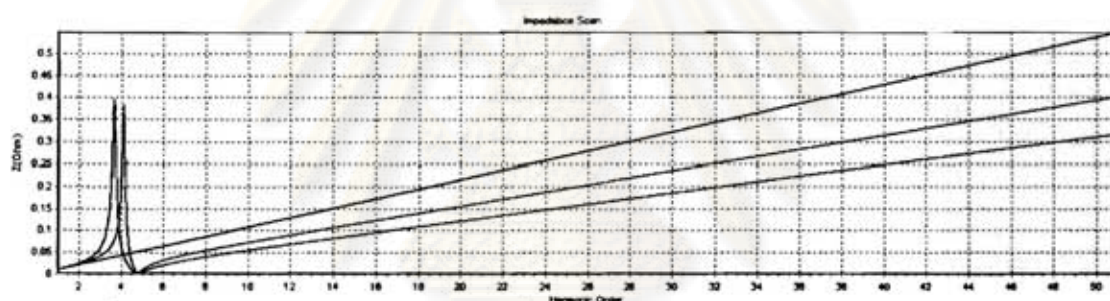
Tuned 5 th , 5 th	PF(%)	Low Voltage Side								High Voltage Side		
		5 th				5 th				I _s		I _s
		I _l (A)	I _{hrms} (A)	I _{rms} (A)	I _{rms} /I _{cr}	I _l (A)	I _{hrms} (A)	I _{rms} (A)	I _{rms} /I _{cr}	I _{rms} (A)	THD (%)	THD (%)
OFF OFF	80.00	0	0	0	0	0	0	0	0	800.95	48.14	48.11
ON OFF	98.99	350.36	221.95	414.75	0.94	0	0	0	0	820.45	20.72	20.69
OFF ON	98.99	0	0	0	0	350.95	221.95	414.75	0.94	820.45	20.72	20.69
ON ON	-90.72	350.36	128.40	373.15	0.85	350.36	128.90	373.15	0.85	1015.31	12.30	12.28

หมายเหตุ : PF มีค่าติดลบหมายถึงเป็น Leading PF

ตารางที่ 5.53 ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 จำนวน 2 ชุด

Tuned 5 th , 5 th	PF(%)	Low Voltage Side THDv (%)			High Voltage Side THDv (%)		
		Results	PL(ERG5/4)	Different $\frac{THD_v - PL}{PL} \times 100$	Results	PL(ERG5/4)	Different $\frac{THD_v - PL}{PL} \times 100$
OFF OFF	80.00	17.27	5	245.40	0.91	3	-69.67
ON OFF	98.99	11.59	5	131.80	0.61	3	-79.67
OFF ON	98.99	11.59	5	131.80	0.61	3	-79.67
ON ON	-90.72	8.99	5	79.80	0.47	3	-84.33

หมายเหตุ : PF มีค่าติดลบหมายถึงเป็น Leading PF

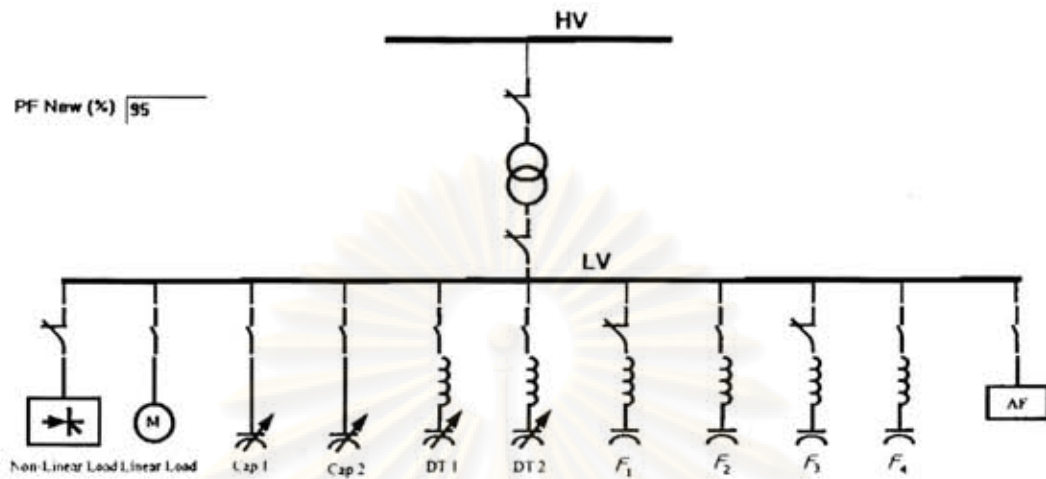


รูปที่ 5.43 Impedance Scanของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 จำนวน 2 ชุด

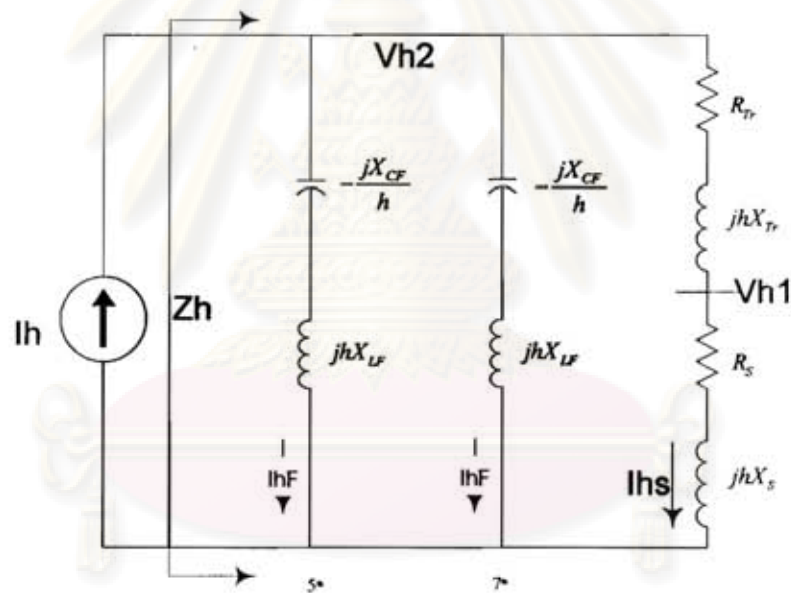
สรุปผลการวิเคราะห์

- เมื่อใช้งานตัวกรอง 1 ตัว THD ของแรงดันฮาร์มอนิกที่บัสแรงต่ำ 400 V จะลดลงจาก 17.27% ลงเหลือ 11.59% ได้ค่าตัวประกอบกำลัง 98.99% และภาระการทำงานที่ระดับ 94% จึงสามารถทำงานได้ตามปกติ
- เมื่อใช้งานตัวกรอง 2 ตัว THD จะลดลงเหลือ 8.99% และมีภาระการทำงานที่ระดับ 85% ได้ค่าตัวประกอบกำลัง 90.72% แบบนำหน้า
- เมื่อเปรียบเทียบกับหัวข้อ 5.1 พบว่าตัวกรองมีภาระการทำงานเท่ากัน

กรณีศึกษาที่ 5 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 ร่วมกับอันดับ7



รูปที่ 5.44 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 ร่วมกับอันดับ7



รูปที่ 5.45 วงจรสมมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 ร่วมกับอันดับ7

ตารางที่ 5.54 ข้อมูลเบื้องต้น

System	Transformer	LV Bus	Non-Linear Load	Tuned Filter 5 th	Tuned Filter 7 th
200 MVA _{sc}	1000 kVA	400 V	400 kW	400 kVAR	350 kVAR
22 kV	22 kV/400V		PF = 80 %	Vcr 525V	Vcr 525V
X/R 1	%Z = 6.5			Tuning Point 4.8	Tuning Point 6.8
	Pk = 13.5 kW			Q-Factor 60	Q-Factor 60

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ตารางที่ 5.55 ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 ร่วมกับอันดับ7

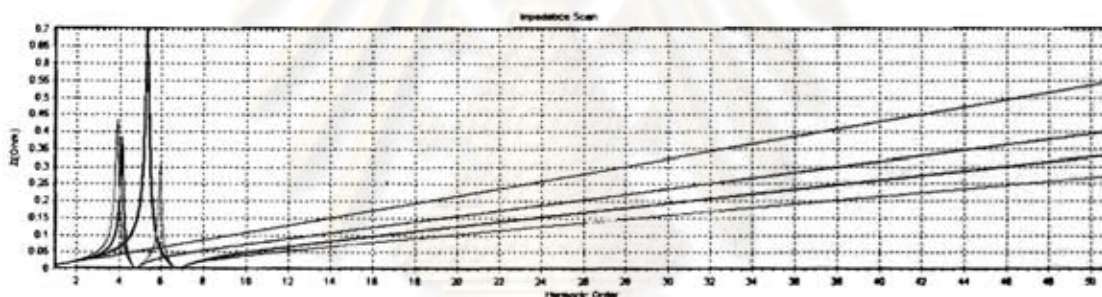
Tuned 5 th , 7 th	PF(%)	Low Voltage Side										High Voltage Side	
		5 th				7 th				I_s		I_s	
		I1(A)	Ihrms(A)	Irms(A)	Irms/Icr	I1(A)	Ihrms(A)	Irms(A)	Irms/Icr	Irms(A)	THD (%)	THD (%)	
OFF OFF	80.00	0	0	0	0	0	0	0	0	800.95	48.14	48.11	
ON OFF	98.99	350.36	221.95	414.75	0.94	0	0	0	0	820.45	20.72	20.69	
OFF ON	97.44	0	0	0	0	299.74	723.91	783.51	2.04	1235.69	122.31	122.32	
ON ON	-93.60	350.36	241.12	425.31	0.97	299.74	149.32	334.87	0.87	978.04	10.37	10.38	

หมายเหตุ : PF มีค่าติดลบหมายถึงเป็น Leading PF

ตารางที่ 5.56 ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 ร่วมกับอันดับ7

Tuned 5 th , 7 th	PF(%)	Low Voltage Side THDv (%)			High Voltage Side THDv (%)		
		Results	PL(ERG5/4)	Different $\frac{THD_v - PL}{PL} \times 100$	Results	PL(ERG5/4)	Different $\frac{THD_v - PL}{PL} \times 100$
OFF OFF	80.00	17.27	5	245.40	0.91	3	-69.67
ON OFF	98.99	11.59	5	131.80	0.61	3	-79.67
OFF ON	97.44	23.86	5	377.20	1.28	3	-57.33
ON ON	-93.60	7.40	5	48.00	0.39	3	-87.00

หมายเหตุ : PF มีค่าติดลบหมายถึงเป็น Leading PF

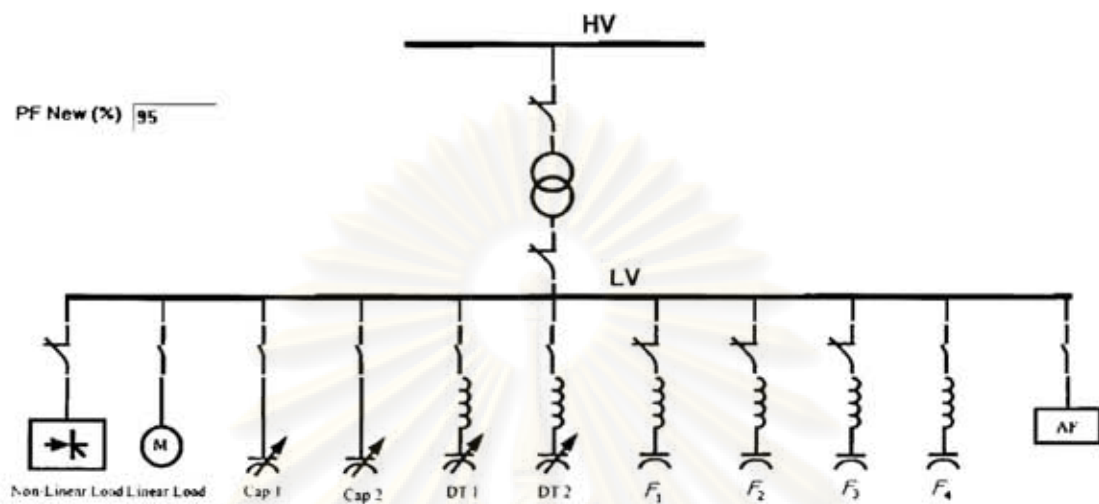


รูปที่ 5.46 Impedance Scan ของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 ร่วมกับอันดับ7

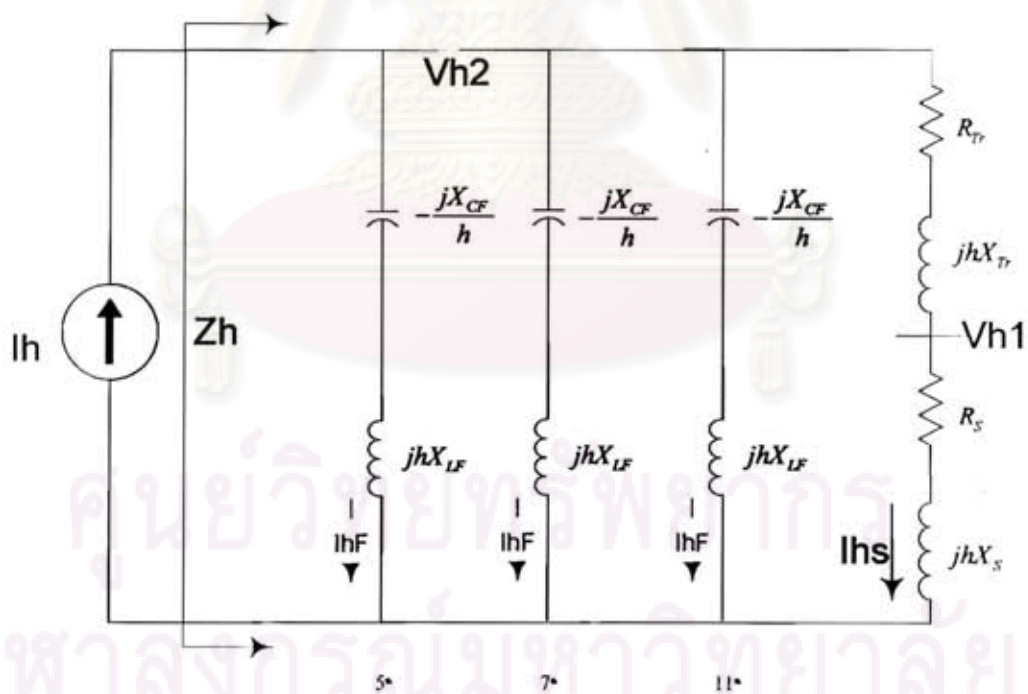
สรุปผลการวิเคราะห์

เมื่อมีการใช้งานตามปกติคือใช้งานตัวกรองอันดับ 5 เพียงตัวเดียว หรือใช้งานตัวกรองอันดับ 5 ร่วมกับอันดับ 7 พบว่าภาระการทำงานของตัวกรองเหมือนกับหัวข้อ 5.1 กล่าวคือ เมื่อใช้งานตัวกรองอันดับ 5 ตัวเดียวจะมีภาระการทำงานที่ระดับ 94% หากใช้งานพร้อมกัน 2 ตัว จะมีภาระการทำงานเป็น 97% และ 87% ตามลำดับ

กรณีที่ 6 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11
(ขนาดเท่ากัน)



รูปที่ 5.47 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11(ขนาดเท่ากัน)



รูปที่ 5.48 วงจรสมมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7
และอันดับ11(ขนาดเท่ากัน)

ตารางที่ 5.57 ข้อมูลเบื้องต้น

System	Transformer	LV Bus	Non-Linear Load	Tuned Filter 5 th	Tuned Filter 7 th	Tuned Filter 11 th
200 MVA_{sc} 22 kV X/R 1	1000 kVA 22 kV/400V %Z = 6.5 Pk = 13.5 kW	400 V	400 kW PF = 80 %	250 kVAR Vcr 525V Tuning Point 4.8 Q-Factor 60	250 kVAR Vcr 525V Tuning Point 6.8 Q-Factor 60	250 kVAR Vcr 525V Tuning Point 10.8 Q-Factor 60

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ตารางที่ 5.58 ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11(ขนาดเท่ากัน)

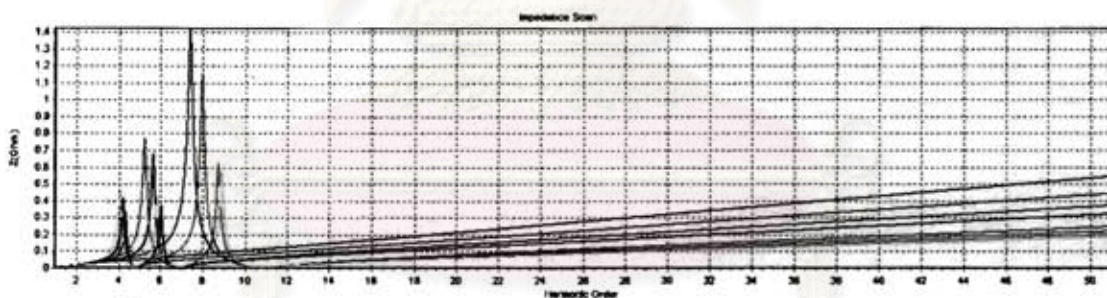
Tuned 5 th , 7 th , 11 th	PF(%)	Low Voltage Side								High Voltage Side
		5 th		7 th		11 th		I_s		I_s
		Irms(A)	Irms/lcr	Irms(A)	Irms/lcr	Irms(A)	Irms/lcr	Irms(A)	THD (%)	Irms(A)
OFF OFF OFF	80.00	0	0	0	0	0	0	800.95	48.14	48.11
ON OFF OFF	93.76	293.48	1.07	0	0	0	0	779.44	25.68	25.64
OFF ON OFF	93.50	0	0	384.35	1.40	0	0	931.34	72.70	72.65
ON ON OFF	100	308.93	1.12	257.38	0.94	0	0	852.68	15.36	15.37
OFF OFF ON	93.35	0	0	0	0	706.59	2.57	1149.68	115.56	115.57
ON OFF ON	100	315.58	1.15	0	0	322.97	1.17	878.97	30.31	30.29
OFF ON ON	99.99	0	0	820.95	2.99	520.84	1.89	1692.23	175.31	175.36
ON ON ON	-93.91	323.86	1.18	257.50	0.94	250.98	0.91	973.50	9.95	9.94

หมายเหตุ : PF มีค่าติดลบหมายถึงเป็น Leading PF

ตารางที่ 5.59 ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11(ขนาดเท่ากัน)

Tuned 5 th , 7 th , 11 th	PF(%)	Low Voltage Side THDv (%)			High Voltage Side THDv (%)		
		Results	PL (ERG5/4)	Different $\frac{THD_v - PL}{PL} \times 100$	Results	PL (ERG5/4)	Different $\frac{THD_v - PL}{PL} \times 100$
OFF OFF OFF	80.00	17.27	5	245.40	0.91	3	-69.67
ON OFF OFF	93.76	13.02	5	160.40	0.69	3	-77.00
OFF ON OFF	93.50	16.05	5	221.00	0.86	3	-71.33
ON ON OFF	100	8.95	5	79.00	0.47	3	-84.33
OFF OFF ON	93.35	27.58	5	451.60	1.47	3	-51.00
ON OFF ON	100	9.47	5	89.40	0.50	3	-83.33
OFF ON ON	99.99	34.52	5	590.40	1.85	3	-38.33
ON ON ON	-93.91	4.79	5	-4.20	0.25	3	-91.67

หมายเหตุ : PF มีค่าติดลบหมายถึงเป็น Leading PF



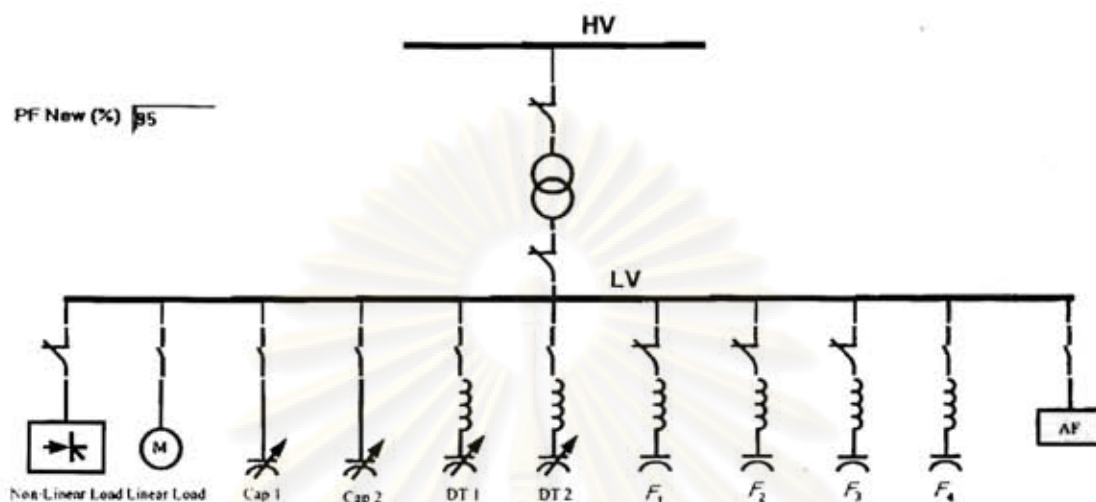
รูปที่ 5.49 Impedance Scanของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7

และอันดับ11(ขนาดเท่ากัน)

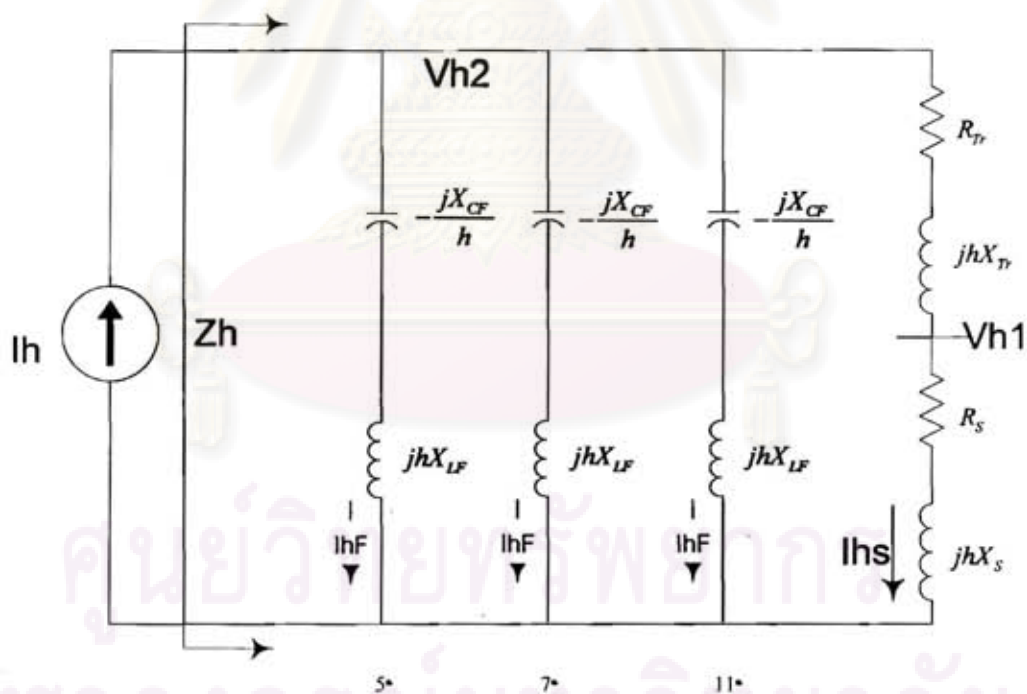
สรุปผลการวิเคราะห์

เมื่อมีการใช้งานตามปกติคือใช้งานตัวกรองอันดับ 5 เพียงตัวเดียว ใช้งานตัวกรองอันดับ 5 และอันดับ 7 ร่วมกัน 2 ตัว หรือใช้งานตัวกรองอันดับ 5 อันดับ 7 และอันดับ 11 ร่วมกันทั้ง 3 ตัว พบว่าภาระการทำงานของตัวกรองเหมือนกับหัวข้อ 5.1 โดยมีกระแสอาร์เอ็มเอสไหลผ่านตัวกรองต่างกันไม่เกิน 1.5 แอมแปร์ (ตามตารางที่ 5.25 และตารางที่ 5.58)

กรณีที่ 7 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11 (ขนาดไม่เท่ากัน)



รูปที่ 5.50 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11(ขนาดไม่เท่ากัน)



รูปที่ 5.51 วงจรสมมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11(ขนาดไม่เท่ากัน)

ตารางที่ 5.60 ข้อมูลเบื้องต้น

System	Transformer	LV Bus	Non-Linear Load	Tuned Filter 5 th	Tuned Filter 7 th	Tuned Filter 11 th
200 MVA _{sc} 22 kV X/R 1	1000 kVA 22 kV/400V %Z = 6.5 Pk = 13.5 kW	400 V	400 kW PF = 80 %	400 kVAR Vcr 525V Tuning Point 4.8 Q-Factor 60	250 kVAR Vcr 525V Tuning Point 6.8 Q-Factor 60	175 kVAR Vcr 525V Tuning Point 10.8 Q-Factor 60

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ตารางที่ 5.61 ผลลัพธ์ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11(ขนาดไม่เท่ากัน)

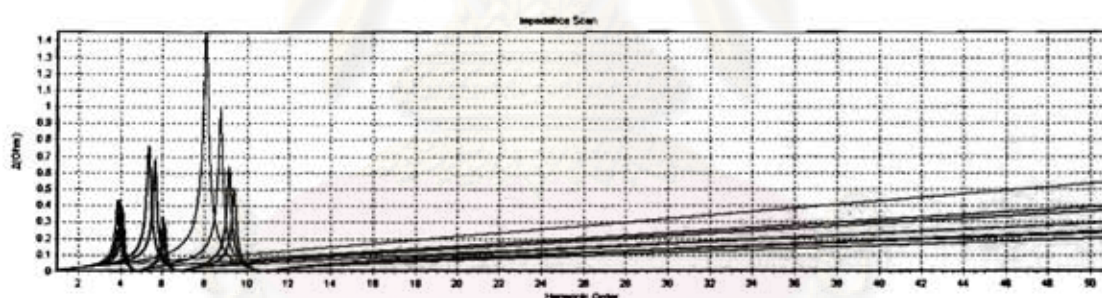
Tuned 5 th , 7 th , 11 th	PF(%)	Low Voltage Side								High Voltage Side
		5 th		7 th		11 th		I_s		I_s
		Irms(A)	Irms/lcr	Irms(A)	Irms/lcr	Irms(A)	Irms/lcr	Irms(A)	THD (%)	Irms(A)
OFF OFF OFF	80.00	0	0	0	0	0	0	800.95	48.14	48.11
ON OFF OFF	98.99	414.75	0.94	0	0	0	0	820.45	20.72	20.69
OFF ON OFF	93.50	0	0	384.35	1.40	0	0	931.34	72.70	72.65
ON ON OFF	-97.50	420.23	0.96	252.91	0.92	0	0	924.06	11.86	11.85
OFF OFF ON	89.66	0	0	0	0	290.27	1.51	875.47	64.14	64.13
ON OFF ON	-99.37	421.28	0.96	0	0	210.86	1.10	891.02	17.14	17.13
OFF ON ON	99.25	0	0	575.72	2.09	287.21	1.49	1265.38	120.51	120.49
ON ON ON	-90.02	424.54	0.97	251.57	0.92	190.90	0.99	1018.12	7.21	7.21

หมายเหตุ : PF มีค่าติดลบหมายถึงเป็น Leading PF

ตารางที่ 5.62 ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11 (ขนาดไม่เท่ากัน)

Tuned 5 th , 7 th , 11 th	PF(%)	Low Voltage Side THDv (%)			High Voltage Side THDv (%)		
		Results	PL (ERG5/4)	Different $\frac{THD_v - PL}{PL} \times 100$	Results	PL (ERG5/4)	Different $\frac{THD_v - PL}{PL} \times 100$
OFF OFF OFF	80.00	17.27	5	245.40	0.91	3	-69.67
ON OFF OFF	98.99	11.59	5	131.80	0.61	3	-79.67
OFF ON OFF	93.50	16.05	5	221.00	0.86	3	-71.33
ON ON OFF	-97.50	8.19	5	63.80	0.43	3	-85.67
OFF OFF ON	89.66	14.99	5	199.80	0.80	3	-73.33
ON OFF ON	-99.37	7.26	5	45.20	0.38	3	-87.33
OFF ON ON	99.25	23.29	5	365.80	1.25	3	-58.33
ON ON ON	-90.02	4.98	5	-0.40	0.26	3	-91.33

หมายเหตุ : PF มีค่าติดลบหมายถึงเป็น Leading PF

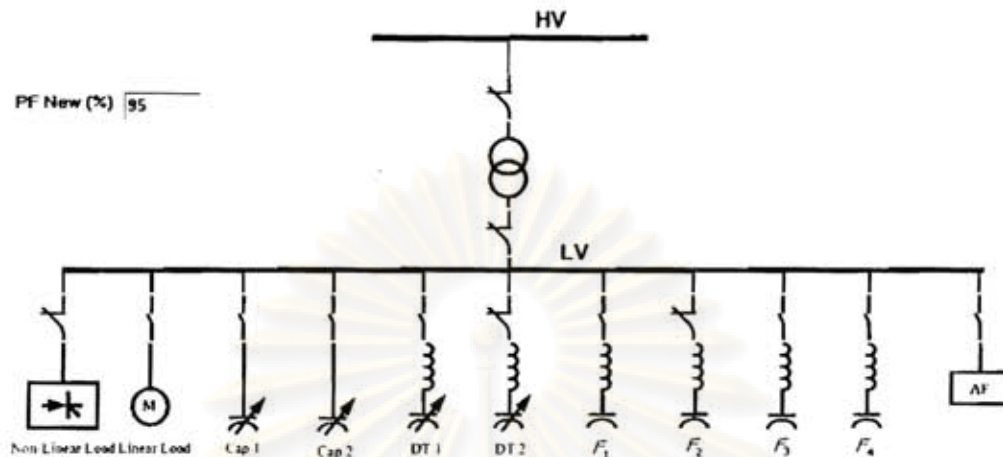


รูปที่ 5.52 Impedance Scanของระบบที่มีการใช้ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ5 อันดับ7 และอันดับ11(ขนาดไม่เท่ากัน)

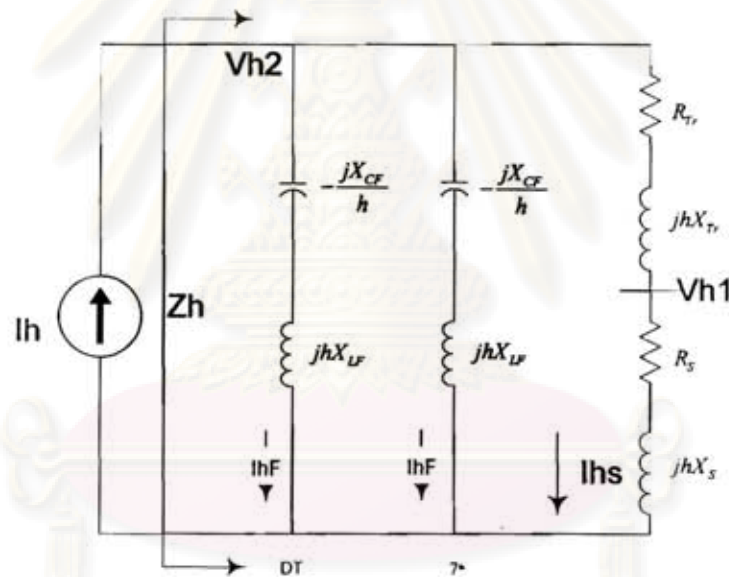
สรุปผลการวิเคราะห์

เมื่อมีการใช้งานตามปกติคือใช้งานตัวกรองอันดับ 5 เพียงตัวเดียว ใช้งานตัวกรองอันดับ 5 และอันดับ 7 ร่วมกัน 2 ตัว หรือใช้งานตัวกรองอันดับ 5 อันดับ 7 และอันดับ 11 ร่วมกันทั้ง 3 ตัว พบว่าภาระการทำงานของตัวกรองเหมือนกับหัวข้อ 5.1 โดยมีกระแสอาร์เอ็มเอสไหลผ่านตัวกรองต่างกันไม่เกิน 1.0 แอมแปร์ (ตามตารางที่ 5.28 และตารางที่ 5.61)

กรณีศึกษาที่ 8 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกับชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7



รูปที่ 5.53 ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกับชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7



รูปที่ 5.54 วงจรสมมูลของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกับชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7

ตารางที่ 5.63 ข้อมูลเบื้องต้น

System	Transformer	LV Bus	Non-Linear Load	Detuned Filter	Tuned Filter 7 th
200 MVA _{sc}	1000 kVA	400 V	400 kW	9 × 80 kVAR	250 kVAR
22 kV	22 kV/400V		PF = 80 %	7% X _L	V _{cr} 525V
X/R 1	%Z = 6.5			V _{cr} 525V	Tuning Point 6.8
	Pk = 13.5 kW			Q-Factor 50	Q-Factor 60

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

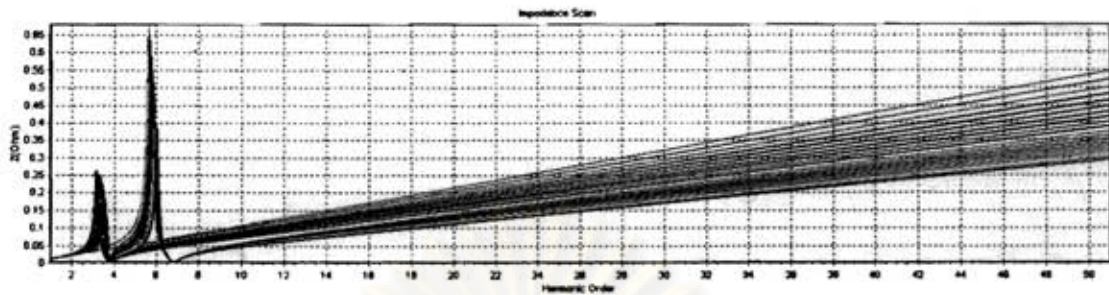
ตารางที่ 5.64 ผลลัพธ์ระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกับชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7

DT Step	PF (%)	I _{rms} /I _{cr} ของ Cap ใน	
		DT	7 th Filter
0	93.50	-	1.40
1	96.91	0.97	1.26
2	99.17	0.93	1.18
3	100	0.91	1.12
4	-99.29	0.89	1.08
5	-97.13	0.87	1.05
6	-93.79	0.87	1.03
7	-89.63	0.86	1.01
8	-85.01	0.85	0.99
9	-80.22	0.85	0.98

หมายเหตุ : PF มีค่าติดลบหมายถึงเป็น Leading PF

ตารางที่ 5.65 ผลลัพธ์ของแรงดันของระบบที่มีการใช้งานตัวกรองดีจูนร่วมกับตัวกรองจูนอันดับ 7

7 th Filter ทำงานร่วมกับ DT Step ที่	PF (%)	Low Voltage Side THD _v (%)			High Voltage Side THD _v (%)		
		Results	PL (ERG5/4)	Different $\frac{THD_v - PL}{PL} \times 100$	Results	PL (ERG5/4)	Different $\frac{THD_v - PL}{PL} \times 100$
0	93.50	16.05	5	221.00	0.86	3	-71.33
1	96.91	14.18	5	183.60	0.75	3	-75.00
2	99.17	12.89	5	157.80	0.69	3	-77.00
3	100	11.95	5	139.00	0.63	3	-79.00
4	-99.29	11.21	5	124.20	0.60	3	-80.00
5	-97.13	10.62	5	112.40	0.56	3	-81.33
6	-93.79	10.12	5	102.40	0.54	3	-82.00
7	-89.63	9.70	5	94.00	0.51	3	-83.00
8	-85.01	9.33	5	86.60	0.49	3	-83.67
9	-80.22	9.00	5	80.00	0.48	3	-84.00



รูปที่ 5.55 Impedance Scan ของระบบที่มีการใช้งานชุดตัวกรองชนิดดีจูนร่วมกับ
ชุดตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7

สรุปผลการวิเคราะห์

1. ไม่สามารถใช้งานตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7 เพียงตัวเดียวได้เพราะเกิดภาระการทำงานที่ 140% เกิน 130%
2. เมื่อใช้งานตัวกรองชนิดดีจูน 1 ตัวร่วมกับตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7 จะได้ตัวประกอบกำลัง 96.91% ภาระการทำงานของตัวเก็บประจุในชุดตัวกรองชนิดดีจูนและชนิดจูนอันดับ 7 จะเป็น 97% และ 126% ตามลำดับ ถึงแม้ว่าภาระการทำงานของตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7 จะไม่เกิน 130% แต่มีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายได้ง่าย
3. เมื่อใช้งานตัวกรองชนิดดีจูน 3 ตัวร่วมกับตัวกรองชนิดจูนอันดับ 7 จะได้ตัวประกอบกำลัง 100% ภาระการทำงานของตัวเก็บประจุในชุดตัวกรองชนิดดีจูนและชนิดจูนอันดับ 7 จะเป็น 91% และ 112% ตามลำดับ สามารถทำงานได้ตามปกติ

การเปรียบเทียบผลในภาพรวมแสดงดังในตารางที่ 5.66 เมื่อเปรียบเทียบตารางที่ 5.33 กับตารางที่ 5.66 พบว่าโหลดเชิงเส้นมีผลต่อภาระการทำงานของตัวเก็บประจุในตัวกรองทั้งชนิดดีจูนและชนิดจูนเพียงเล็กน้อยยกเว้นกรณีที่ 8 เนื่องจากต้องลดจำนวนตัวกรองชนิดดีจูนลงเพื่อให้ได้ค่าตัวประกอบกำลังตามที่กำหนดคือไม่เกิน 95% และ 100%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.66 สรุปเปรียบเทียบภาระการทำงานของตัวกรองแต่ละชุดและความสามารถในการลดค่า THDV ($PF \leq 100\%$)

กรณีที	Tuning point	Qcomp (kVAR)	I _{rms} /I _{cr} (%THDV at 400 V)		
			1 ชุด	2 ชุด	3 ชุด
3 (ใช้เฉพาะDT)	3.78	49.94	0.87 (16.38)	-	
		299.64	0.85 (1) (13.12)	-	
4	4.8	242.73	0.94 (11.59)	-	
	4.8	242.73		-	
5	4.8	242.73	0.94 (11.59)	-	
	6.8	207.67	-	-	
6	4.8	151.70	1.07 (13.02)	1.12 (8.95)	-
	6.8	148.33	-	0.94 (8.95)	-
	10.8	146.38	-	-	-
7	4.8	242.73	0.94 (11.59)	-	-
	6.8	148.73	-	-	-
	10.8	102.47	-	-	-

ตารางที่ 5.66 (ต่อ)

กรณีที่	Tuning point	Qcomp (kVAR)	I _{rms} /I _{cr} (%THDV at 400 V)		
			1 ชุด	2 ชุด	3 ชุด
8	3.78	49.94	-	0.97 (2)	-
				(14.18)	
				0.91 (3)	
				(11.95)	
	6.8	148.73	-	1.26 (2)	-
				(14.18)	
				1.12 (3)	
				(11.95)	

หมายเหตุ (1) ON DT จำนวน 6 ชุด
 (2) ON DT จำนวน 1 ชุด
 (3) ON DT จำนวน 3 ชุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบการใช้งานชุดตัวกรองชนิดต่างๆ ทั้งตัวกรองชนิดดีจูน ตัวกรองชนิดจูน ทั้งใช้ชนิดเดียวหรือใช้ผสมกันเพื่อช่วยในการแก้ปัญหาทางด้านฮาร์มอนิก รวมถึงการใส่ชุดตัวเก็บประจุเพื่อปรับรูปร่างค่าตัวประกอบกำลังด้วย โดยในการวิเคราะห์นั้นจะทำการหาขนาดของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านไปยังแต่ละอุปกรณ์ที่ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าที่มีแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกอยู่ และวิเคราะห์หาค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวม (THD) ที่巴士ต่างๆ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์สมรรถนะของระบบไฟฟ้าในเรื่องของฮาร์มอนิกเปรียบเทียบกับมาตรฐาน การวิเคราะห์จะทำกับระบบที่มีทั้งโหลดเชิงเส้นและโหลดไม่เชิงเส้น และระบบที่มีเฉพาะโหลดไม่เชิงเส้นอย่างเดียว โดยกำหนดให้โหลดไม่เชิงเส้นนั้นจ่ายกระแสฮาร์มอนิกออกมาเป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน

เมื่อทำการวิเคราะห์จะพบว่าการใช้งานชุดตัวเก็บประจุไม่ว่าจะใช้ชนิดเดียว หรือใช้ร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูน ชุดตัวเก็บประจุไม่สามารถที่จะทำงานได้เนื่องจากเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกในย่านความถี่ฮาร์มอนิกที่มีกระแสฮาร์มอนิกอยู่ทำให้กระแสอาร์เอ็มเอสมีค่าสูงกว่า 130 % ของค่ากระแสปกติของตัวเก็บประจุ สำหรับตัวกรองชนิดดีจูนสามารถที่จะใช้งานได้แต่ช่วยแก้ปัญหาทางด้าน THD ที่巴士แรงต่ำ 400 V ได้น้อยเนื่องจากตัวกรองชนิดดีจูนช่วยแก้ปัญหาได้เฉพาะฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 เท่านั้น ตัวกรองชนิดพาสซีฟแบบกรองเดียวในวิทยานิพนธ์นี้ที่สามารถแก้ปัญหาได้ดีที่สุดเมื่อระบบมีปริมาณกระแสฮาร์มอนิกปริมาณมากคือการใส่ตัวกรองชนิดจูนหลายๆอันดับร่วมกันแต่ทั้งนี้ต้องพิจารณาถึงการเลือกใช้ตัวกรองชนิดจูนในอันดับฮาร์มอนิกที่เหมาะสม รวมถึงขนาดพิกัด kVAR ของตัวกรองชนิดจูนนั้นๆด้วย เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างระบบที่มีทั้งโหลดเชิงเส้นและโหลดไม่เชิงเส้น กับระบบที่มีเฉพาะโหลดไม่เชิงเส้นอย่างเดียว พบว่าเมื่อใส่ชุดตัวกรองชนิดต่างๆรวมทั้งชุดตัวเก็บประจุกับระบบที่ไม่มีโหลดเชิงเส้นต่ออยู่กระแสฮาร์มอนิกจะทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ต่างๆจะสูงกว่าตอนที่ระบบมีโหลดเชิงเส้นต่ออยู่ด้วย

สำหรับข้อเสนอแนะที่จะเสนอไว้ ณ ที่นี้หากได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้นจะทำให้สมรรถนะของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นดียิ่งขึ้นไปอีก ได้แก่

1. เนื่องจากโปรแกรมเตรียมระบบจำลองไว้ให้ผู้ใช้งานแล้ว ซึ่งอาจไม่ตรงกับระบบที่ผู้ใช้งานต้องการที่จะทำการวิเคราะห์ ดังนั้นจึงควรพัฒนาในส่วนนี้ให้ผู้ใช้งานสามารถสร้างระบบจำลองได้เอง
2. การเลื่อนเฟสของหม้อแปลงระหว่างด้านปฐมภูมิกับด้านทุติยภูมิ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ ยังไม่ได้คำนึงถึงเนื่องจากไม่ได้นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไปเขียนรูปคลื่นของแรงดันหรือ กระแส



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. ANSI/IEEE Standard IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems : Std. 519-1992. USA:IEEE,1993
2. Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso and H. Wayne Beaty. Electrical Power Systems Quality . second edition. McGraw-Hill,1996
3. A. F. Zobaa. Harmonic Problems Produced from the Use of Adjustable Speed Drives in Industrial Plants: Case Study 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power IEEE,2004 12-15 Sept.2004 Page(s):6-10
4. Jen-Hao Teng, Tain-Syh Luor, Wen-Kao Hsieh and Chih-Hsin Chen.Design Harmonic Filter for Industrial Distribution System on WWW IEEE, 2000 Volume 1, 1-4 Oct. 2000 Page(s):142-147vol.1 .
5. MarkF.McGranaghan , David R.Mueller. Designing Harmonic Filters for Adjustable-Speed Drives to Comply with IEEE-519 Harmonic Limits IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL.35, NO.2, MARCH/APRIL1999 Volume 35, Issue 2, March-April 1999 Page(s):312 - 318.
6. Fang Zheng Peng. Application issues of active power filters Industry Applications Magazine, IEEE Volume 4, Issue 5, Sept.-Oct. 1998 Page(s):21 - 30.
7. Task Force on Harmonic Modeling and Simulation, IEEE Power Eng. Soc. T&D Committee Impact of Aggregate Linear Load Modeling on Harmonic Analysis : A Comparison of Common Practice and Analytical Models IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY,VOL.18,NO.2,APRIL 2003.
8. Task Force on Harmonic Modeling and Simulation Modeling and Simulation of The Propagation of Harmonics in Electric Power Networks Part I : Concepts, Models, and Simulation Techniques IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, January 1996.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย นิติ วันทอง เกิดวันที่ 12 กันยายน พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดขอนแก่นสำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล เมื่อปี พ.ศ. 2549 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย