

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์	การประเมินฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ
ผู้เขียน	นายโชคพงศ์ พงศ์ศรีวัฒน์
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต(วิศวกรรมไฟฟ้า)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ในระบบจำหน่ายแรงต่ำ เพื่อประเมินผลของการติดตั้งคาปาซิเตอร์ตามมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคซึ่งกำหนดให้ติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 30% ของพิกัดหม้อแปลง ที่มีต่อฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์รวมทั้งการติดตั้งวงจรกรองเพื่อลดผลของฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์

การประเมินฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ที่เสนอ ได้แก่ การประเมินขีดจำกัดของคาปาซิเตอร์ การประเมินค่าตัวประกอบกำลัง ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งกับระยะเวลาคืนทุน การประเมินกำลังสูญเสียของหม้อแปลงที่ลดลงจากการติดตั้งคาปาซิเตอร์และการประเมินขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิก ตลอดจนวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์และผลของวงจรกรองคิจุนที่มีต่อฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์

งานวิจัยนี้ศึกษาและประเมินฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ในระบบจำหน่ายแรงต่ำ โดยเลือกสถานีไฟฟ้าลำพูน 2 เป็นสถานีไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา เนื่องจากจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับภาระไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ โดยพิจารณาผลของคาปาซิเตอร์ขนาด 30% ของพิกัดหม้อแปลงของหม้อแปลงแต่ละขนาด ผลของคาปาซิเตอร์ขนาด 30% 20% 10% และการติดตั้งวงจรกรองคิจุนที่มีต่อฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์

จากผลการศึกษา พบว่าการติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 30% ของพิกัดหม้อแปลง ส่งผลดีในเรื่องการลดกำลังสูญเสียของหม้อแปลงและปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง แต่มีผลต่อฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นด้วย โดยเฉพาะในระบบที่มีแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกอยู่ การใช้วงจรกรองคิจุนให้ผลดีเช่นเดียวกับคาปาซิเตอร์ และสามารถลดผลของการขยายฮาร์มอนิกของระบบ อีกทั้งยังปรับเปลี่ยนตำแหน่งการเกิดฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ของระบบได้ แต่ทั้งนี้ต้องพิจารณาถึงระยะเวลาคืนทุนด้วยว่าเหมาะสมต่อการติดตั้งใช้งานหรือไม่

Thesis Title	Harmonic Resonance Assessment in Low Voltage Distribution System
Author	Mr. Chotepong Pongsriwat
Degree	Master of Engineering(Electrical Engineering)
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Suttichai Premrudeepreechacharn

ABSTRACT

This thesis presents an assessment and study of harmonic resonance effect on low voltage capacitor equal to 30% of transformer size according to Provincial Electricity Authority's rule. The detune filter installation is also studied for harmonic resonance reduction.

The proposed assessments are assessment of the capacitor limitation, power factor, installation cost, payback period, reduced transformer loss and total harmonic distortion. Moreover, the effect of detune filter influencing on the harmonic resonance are also analyzed.

Lamphun 2 substation of Provincial Electricity Authority is selected as a system source which dispatch to most industrial loads. By consideration of each transformer size, capacitor on secondary side of distribution transformer at reactive power rating equal to 30% of transformer size are considered. The effect of capacitor at reactive power rating equal to 30%, 20% and 10% as well as detune filter installation are also studied.

From the studies, capacitor installation at the reactive power rating equal to 30% of transformation size has an advantage of power factor correction and reduced transformer loss, the more reactive power size of capacitor, the less resonance frequency becomes. However, it affects directly to resonance frequency of the system, especially in the harmonic environment. Detune filter is the useful method for using in harmonic environment and power factor correction but it also has high investment and long term to return.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การเกิดแรงดันฮาร์มอนิกและกระแสฮาร์มอนิก	6
2.2 คอนเวอร์เตอร์กำลังแบบสถิตย์	7
2.3 เรโซแนนซ์ขนาน	8
2.4 ซีดจำกัดของคาปาซิเตอร์	12
2.5 ซีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิก	14
2.6 การประเมินกำลังสูญเสียในหม้อแปลงที่ลดลงจากการติดตั้งคาปาซิเตอร์	14
2.7 วงจรกรองพาสซีฟ	15
2.7.1 วงจรกรองดีจูน	16
2.8 การใช้วงจรกรองดีจูนในการลดผลของฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์	16
2.9 โปรแกรม DIGSILENT PowerFactory	19
บทที่ 3 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา	
3.1 แบบจำลองของระบบและอุปกรณ์ต่าง ๆ	21
3.1.1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า	22
3.1.2 หม้อแปลงไฟฟ้า	23
3.1.3 ภาระไฟฟ้าแบบไม่เป็นเชิงเส้น	24
3.1.4 คาปาซิเตอร์	25
3.1.5 วงจรกรองดีจูน	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์	28
3.2.1 กรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาดเท่ากับ 30% ของพิกัดหม้อแปลง	28
3.2.2 กรณีติดตั้งวงจรกรองคลื่น	
บทที่ 4 ผลการจำลอง	
4.1 อันดับฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ของหม้อแปลง	34
4.2 ผลของคาปาซิเตอร์	35
4.2.1 การประเมินขีดจำกัดคาปาซิเตอร์	37
4.2.2 การประเมินค่าตัวประกอบกำลัง ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง คาปาซิเตอร์ และ ระยะเวลาคืนทุน	41
4.2.3 การประเมินกำลังสูญเสียของหม้อแปลงที่ลดลงจากการ ติดตั้งคาปาซิเตอร์	43
4.2.4 การประเมินขีดจำกัดความถี่ฮาร์มอนิก	44
4.3 ผลของการใช้วงจรกรองคลื่น	44
บทที่ 5 วิเคราะห์ผล	
5.1 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์	47
5.2 การวิเคราะห์ผลของการติดตั้งคาปาซิเตอร์ที่ 30% ของพิกัดหม้อแปลง	48
5.3 การเปรียบเทียบค่าขีดจำกัดของการติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาดต่าง ๆ กับวงจรกรองคลื่น	49
5.4 การเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย ระยะเวลาคืนทุน กำลังสูญเสียของ หม้อแปลงที่ลดลง และ ความถี่ฮาร์มอนิกรวมของการติดตั้ง คาปาซิเตอร์ขนาดต่าง ๆ กับวงจรกรองคลื่น	51
5.5 การวิเคราะห์ผลของวงจรกรองคลื่นที่มีต่อฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์	53
บทที่ 6 สรุป	
6.1 สรุป	54
6.2 ข้อเสนอแนะ	54
บรรณานุกรม	56
ประวัติผู้เขียน	58

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 ข้อมูลแหล่งจ่ายไฟสถานีไฟฟ้าลำพูน 2	23
3.2 มาตรฐานกำลังสูญเสียของหม้อแปลง 3 เฟส (22 กิโลโวลต์) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	24
3.3 การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกของคอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์	24
3.4 ขนาดของคาปาซิเตอร์ (μF) ที่มีค่าเป็น 30% ของพิกัดหม้อแปลงขนาดต่าง ๆ	26
3.5 ราคามาตรฐานคาปาซิเตอร์แต่ละหน่วยย่อย	26
3.6 ข้อมูลค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการติดตั้งคาปาซิเตอร์สำหรับหม้อแปลงแต่ละขนาด	27
3.7 ราคาของรีแอกแตนซ์	27
4.1 อันดับฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์จากการคำนวณและการจำลองหม้อแปลง แต่ละขนาดซึ่งติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 30% ของพิกัดหม้อแปลง	34
4.2 อันดับฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์จากการคำนวณและการจำลองของหม้อแปลง ขนาด 2000 kVA เมื่อติดตั้งคาปาซิเตอร์ที่ขนาดต่าง ๆ	37
4.3 ผลการศึกษาที่อันดับฮาร์มอนิกต่าง ๆ ในกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 30%	37
4.4 ผลการศึกษาที่อันดับฮาร์มอนิกต่าง ๆ ในกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 20%	38
4.5 ผลการศึกษาที่อันดับฮาร์มอนิกต่าง ๆ ในกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 10%	38
4.6 ค่ากระแส แรงดัน และ กำลัง ไฟฟ้ารีแอกทีฟ กรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 30%	40
4.7 ค่ากระแส แรงดัน และ กำลัง ไฟฟ้ารีแอกทีฟ กรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 20%	40
4.8 ค่ากระแส แรงดัน และ กำลัง ไฟฟ้ารีแอกทีฟ กรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 10%	41
4.9 ตัวประกอบกำลังและค่าใช้จ่ายในการติดตั้งคาปาซิเตอร์	41
4.10 ระยะเวลาการคืนทุนของการติดตั้งคาปาซิเตอร์ในแต่ละกรณีเทียบกับ กรณีที่ไม่ได้ติดตั้งคาปาซิเตอร์	43
4.11 ค่ากำลังสูญเสียที่ลดลงเนื่องจากติดตั้งคาปาซิเตอร์ในแต่ละกรณี	43
4.12 ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันบัส (%)	44
4.13 ผลการศึกษาที่อันดับฮาร์มอนิกต่าง ๆ ในกรณีตัดแปลงคาปาซิเตอร์ ขนาด 30% เป็นวงจรกรองคลื่น	45
4.14 ค่ากระแส แรงดัน และ กำลัง ไฟฟ้ารีแอกทีฟ กรณีตัดแปลงคาปาซิเตอร์ ขนาด 30% เป็นวงจรกรองคลื่น	46

สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์	7
2.2 รูปคลื่นกระแสฮาร์มอนิกของคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์	8
2.3 สเปกตรัมของกระแสคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์	8
2.4 ระบบที่เกิดสถานะเรโซแนนซ์ขนาน	9
2.5 วงจรเทียบเท่าของระบบในรูปที่ 2.4	9
2.6 ตัวอย่างผลตอบสนองความถี่ของระบบที่เกิดเรโซแนนซ์ขนาน	11
2.7 ตัวอย่างวงจรกรองคัตจูน	16
2.8 การติดตั้งวงจรกรองคัตจูน	17
2.9 วงจรเทียบเท่าของระบบในรูปที่ 2.7	17
2.10 ตัวอย่างผลตอบสนองของระบบเมื่อติดตั้งวงจรกรองคัตจูน	19
3.1 การเชื่อมต่อของระบบที่ใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์	21
3.2 แบบจำลองอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายแรงดันสามมูล	22
3.3 แบบจำลองอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง	23
3.4 แบบจำลองอิมพีแดนซ์ของคาปาซิเตอร์	25
3.5 คาปาซิเตอร์เชื่อมต่อแบบเดลตา ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง	25
3.6 แบบจำลองของวงจรกรองคัตจูนที่ใช้ในการจำลอง	27
3.7 ระบบที่พิจารณาติดตั้งเฉพาะคาปาซิเตอร์	28
3.8 วงจรเทียบเท่าของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.7	28
3.9 วงจรเทียบเท่าใหม่จากรูปที่ 3.8	30
3.10 กราฟระหว่างความถี่กับอิมพีแดนซ์ของระบบ	31
3.11 ระบบที่พิจารณาติดตั้งวงจรกรองคัตจูน	31
3.12 วงจรเทียบเท่าของระบบในรูปที่ 3.11	32
3.13 วงจรเทียบเท่าใหม่จากรูปที่ 3.12	32
3.14 กราฟระหว่างความถี่กับอิมพีแดนซ์ของระบบกรณีติดตั้งวงจรกรองคัตจูน	33
4.1 อิมพีแดนซ์ขณะเกิดเรโซแนนซ์ขนานของหม้อแปลงแต่ละขนาดซึ่งติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 30%ของพิกัดหม้อแปลง	35
4.2 กราฟระหว่างความถี่กับอิมพีแดนซ์ของระบบ ในกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 30%	35

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
4.3 กราฟระหว่างความถี่กับอิมพีแดนซ์ของระบบ ในกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 20 %	36
4.4 กราฟระหว่างความถี่กับอิมพีแดนซ์ของระบบ ในกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 10 %	36
4.5 อัตราการขยายกระแสเข้าสู่คาปาซิเตอร์ (M_c) และ อัตราการขยายกระแส ฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้า (M_s) ในกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 30%	39
4.6 อัตราการขยายกระแสเข้าสู่คาปาซิเตอร์ (M_c) และ อัตราการขยายกระแส ฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้า (M_s) ในกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 20%	39
4.7 อัตราการขยายกระแสเข้าสู่คาปาซิเตอร์ (M_c) และ อัตราการขยายกระแส ฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้า (M_s) ในกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 10%	40
4.8 กราฟระหว่างความถี่กับอิมพีแดนซ์ของระบบในกรณีคัดแปลง คาปาซิเตอร์ขนาด 30% เป็นวงจรกรองคลื่น	44
4.9 อัตราการขยายกระแสเข้าสู่คาปาซิเตอร์ (M_c) และ อัตราการขยายกระแส ฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้า (M_s) ในกรณีคัดแปลงคาปาซิเตอร์ขนาด 30% เป็นวงจรกรองคลื่น	45
5.1 อันดับของฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์สำหรับหม้อแปลงที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 30%	48
5.2 ซิดจัมกักกระแสและค่ากระแสอาร์เอ็มเอสที่ได้จากการจำลองในแต่ละกรณี	49
5.3 ซิดจัมกักแรงดันและค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสที่ได้จากการจำลองในแต่ละกรณี	50
5.4 ซิดจัมกักกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ได้ จากการจำลองในแต่ละกรณี	50
5.5 ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งของแต่ละกรณี	51
5.6 ระยะเวลาคืนทุนของแต่ละกรณีเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งคาปาซิเตอร์	51
5.7 ค่ากำลังสูญเสียของหม้อแปลงที่ลดลงในแต่ละกรณีเทียบกับกรณีที่ ไม่ติดตั้งคาปาซิเตอร์	52
5.8 ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแต่ละกรณี	52

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ได้ให้บริการกระแสไฟฟ้าแก่ทั้งชุมชนที่อยู่อาศัย ย่านธุรกิจ ตลอดจนภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ สำหรับการใช้ไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรมในปัจจุบันได้มีการนำเอาอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ หรืออุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังชนิดที่สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วรอบได้มาใช้งานเพิ่มมากขึ้น ส่งผลกระทบให้เกิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้าตามมา คือ ปัญหาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากการนำอุปกรณ์ไฟฟ้าดังกล่าวข้างต้นมาติดตั้งใช้งาน [1] กระแสและแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนี้ อาจทำให้เกิดความเสียหายหรือเกิดการทำงานผิดปกติของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การชำรุดเสียหายของคาปาซิเตอร์ และเกิดความร้อนสูงเกินขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้าหรือตัวนำนิวทริล ตลอดจนกลจักรไฟฟ้ากระแสสลับได้ [2]

โดยปกติ ผู้ใช้ไฟอุตสาหกรรมจะทำการติดตั้งคาปาซิเตอร์เข้ากับระบบไฟฟ้า เพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้เหมาะสม ส่งผลดีคือ ช่วยลดค่าความสูญเสียและเพิ่มความสามารถในการจ่ายกระแสในสายป้อนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เมื่อมีการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สร้างฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าจำนวนเพิ่มมากขึ้น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกต่าง ๆ ได้บ่อยครั้งขึ้น จนทำให้คาปาซิเตอร์ชำรุดจากผลของความร้อนสูงเกินและความเครียดไดอิเล็กตริกของคาปาซิเตอร์ที่สูงขึ้นได้ [3] สำหรับวิธีการลดผลของฮาร์มอนิกที่มีประสิทธิภาพ 3 วิธี ได้แก่ การติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิก การหักล้างของฮาร์มอนิกโดยอาศัยหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีการต่อเชื่อมแบบเดลตา-เดลตา หรือเดลตา-วาย และการปรับเปลี่ยนขนาดของคาปาซิเตอร์ด้านแรงต่ำ [4]

อุปกรณ์ที่ช่วยลดผลของฮาร์มอนิกชนิดหนึ่ง ซึ่งมีประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลาย คือ วงจรกรองฮาร์มอนิกชนิดแอกทีฟ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรกรองชนิดพาสซีฟ (Passive Filter) แล้ว จะไม่ทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ เพราะอาศัยหลักการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า แต่ในปัจจุบันวงจรกรองแอกทีฟดังกล่าวยังคงมีราคาแพงมาก และส่วนใหญ่ในการติดตั้งใช้งานจะทำการติดตั้งเฉพาะในบริเวณที่มีโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ตั้งอยู่เท่านั้น [5] เนื่องจาก อิมพีแดนซ์ฮาร์มอนิกแบบขนาน มีประสิทธิภาพในการลดผลของฮาร์มอนิกได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของการเกิดฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ [6] ซึ่งจะทำการติดตั้งในลักษณะขนานกับระบบและมีพฤติกรรมเป็นอิมพีแดนซ์แบบความต้านทานเชิงเส้นกับฮาร์มอนิก ซึ่งข้อดีของวิธีการนี้คือ เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งใช้งานได้ง่าย สามารถติดตั้งใช้งานในตำแหน่งต่าง ๆ ได้เพื่อลดผลของฮาร์มอนิก โดยไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์วัดกระแสฮาร์มอนิก ตลอดจนช่วย

ปรับปรุงส่วนเพื่อเสถียรภาพ (Stability margin) เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการใช้งานวงจรกรอง แยกที่พชคเขยฮาร์โมนิกที่วัดได้ [7]

เนื่องจากในปัจจุบันมาตรฐานของกฟภ. ได้กำหนดให้ทำการติดตั้งคาปาซิเตอร์แรงต่ำขนาด 30% ของพิกัดหม้อแปลง เพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง จากการที่มีการใช้ภาระไฟฟ้าที่สร้าง ฮาร์โมนิกดังกล่าวเพิ่มขึ้น ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดภาวะฮาร์โมนิกเรโซแนนซ์ขึ้นกับ ระบบได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ของระบบ เช่น ขนาดของหม้อแปลง, ขนาดของคาปาซิเตอร์ แรงต่ำและชนิดของภาระไฟฟ้าฮาร์โมนิกได้แก่คอนเวอร์เตอร์ โดยที่ผลกระทบของการติดตั้ง คาปาซิเตอร์ดังกล่าวที่มีต่อฮาร์โมนิกเรโซแนนซ์นั้นยังไม่ได้มีการศึกษาและวิเคราะห์อย่างละเอียด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของฮาร์โมนิกและฮาร์โมนิกเรโซแนนซ์ที่มีต่อระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

1.2.2 เพื่อศึกษาถึงผลการติดตั้งคาปาซิเตอร์ด้านแรงต่ำตามมาตรฐานของการไฟฟ้า ส่วนภูมิภาคซึ่งกำหนดไว้ที่ 30%ของขนาดพิกัดของหม้อแปลงที่มีต่อสภาวะฮาร์โมนิกเรโซแนนซ์ เมื่อภาระไฟฟ้านำมาใช้งานมีลักษณะเป็นภาระไฟฟ้าที่สร้างกระแสฮาร์โมนิก

1.2.3 เพื่อวิเคราะห์และนำเสนอวิธีการที่เหมาะสมในการลดผลของฮาร์โมนิก เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นดังกล่าว โดยพิจารณาจากขนาดของคาปาซิเตอร์ด้านแรงต่ำและการติดตั้ง อิมพีแดนซ์ฮาร์โมนิกแบบขนานที่เหมาะสม

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ศึกษาแบบจำลองระบบไฟฟ้าและสภาวะการเกิดฮาร์โมนิกเรโซแนนซ์ในระบบ จำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ

1.3.2 นำแบบจำลองระบบไฟฟ้ามาวิเคราะห์ฮาร์โมนิกเรโซแนนซ์

1.3.3 วิเคราะห์ผลของคาปาซิเตอร์แรงต่ำสำหรับใช้งานร่วมกับภาระไฟฟ้าที่มีลักษณะ ไม่เป็นเชิงเส้น

1.3.4 ศึกษาการติดตั้งฮาร์โมนิกอิมพีแดนซ์แบบขนานที่เหมาะสม เพื่อบรรเทาความ รุนแรงของการเกิดฮาร์โมนิกเรโซแนนซ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถวิเคราะห์ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าได้

1.4.2 สามารถนำแบบจำลองของระบบจำหน่ายไฟฟ้ามาศึกษาและวิเคราะห์ผลของฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ที่มีต่อระบบได้

1.4.3 สามารถประเมินสถานะการเกิดฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ที่มีต่อการติดตั้งคาปาซิเตอร์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำได้

1.5 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง

Wagner, et al. [2] ได้สรุปผลของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ โดยผลดังกล่าว ได้แก่ ผลทางอุณหภูมิจากการที่มีการใช้งานเกินพิกัด (Thermal overloading) ผลการชำรุดของอุปกรณ์ และ ความเครียดฉนวนไดอิเล็กตริก ซึ่งอุปกรณ์ที่พิจารณาได้แก่ ตัวขั้วมอเตอร์แบบปรับความเร็วรอบได้ คาปาซิเตอร์ เซอร์คิตเบรกเกอร์ ฟิวส์ ตัวนำ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หลอดไฟ มิเตอร์ ระบบรีเลย์ป้องกัน กลจักรไฟฟ้า โทรศัพท และ หม้อแปลงไฟฟ้า

Xu, et al.[3] ได้ศึกษาพบว่าเมื่อโหลดประเภทที่สร้างฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า มีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ความเป็นไปได้ในการเกิดเรโซแนนซ์ของคาปาซิเตอร์ในระบบก็มีบ่อยครั้งขึ้นจากการนำเอาคาปาซิเตอร์มาประยุกต์ใช้งานเพื่อแก้ปัญหาค่าตัวประกอบกำลัง และได้นำเสนอวิธีการในทางปฏิบัติ เพื่อประเมินลักษณะและผลการเรโซแนนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งใช้งานในระบบ โดยได้นำเสนอวิธีการใช้คาปาซิเตอร์ในสภาพของโหลด (Capacitor loading condition) เป็นวิธีในการประเมินความรุนแรงของฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ นอกจากนี้ยังพบว่า แรงดันใช้งานของคาปาซิเตอร์ (Capacitor operating voltage) มีผลกระทบอย่างมากต่อการเกิดเรโซแนนซ์

Tang and Wu.[4] ได้สรุปวิธีการลดฮาร์มอนิกที่มีประสิทธิภาพในระบบจำหน่ายของโรงงานอุตสาหกรรม 3 วิธีการ คือ

- การติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิก (Harmonic filter installation)
- การหลีกเลี่ยงการเกิดฮาร์มอนิกโดยอาศัย ลักษณะการเชื่อมต่อขดลวดของหม้อแปลง (Transformer configuration) แบบเดลตา-เดลตาและ แบบเดลตา-วาย
- การปรับเปลี่ยนขนาดของคาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งด้านแรงดันต่ำ

และกล่าวว่าการเกิดฮาร์มอนิกที่มีขนาดสูงในระบบจำหน่ายนั้น ส่วนใหญ่มีสาเหตุเนื่องจากการเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกของระบบ

Wouter, et al.[6] ได้กล่าวว่า ถึงแม้ว่าจะมีการติดตั้งวงจรกรองแอกทีฟ (Active filter) เพื่อลดผลของฮาร์มอนิกในระบบ แต่พบว่า อิมพีแดนซ์ฮาร์มอนิกแบบขนาน สามารถช่วยลดผลของการแพร่กระจายของฮาร์มอนิกได้เป็นอย่างมาก และ ได้ทำการศึกษาอิมพีแดนซ์ฮาร์มอนิกแบบขนาน ในลักษณะการลดผลของฮาร์มอนิกที่แตกต่างกันไปในแต่ละค่าพิกัด (VA-Rating) ของ

อิมพีแดนซ์ฮาร์มอนิกแบบขนาน โดยพบว่าอิมพีแดนซ์ความต้านทานที่มีขนาด 1 เปรอร์ยูนิต ของทุก ๆ ความถี่ฮาร์มอนิกจะมีประสิทธิภาพมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของการเกิดเรโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้า โดยใช้การจำลอง(Simulation) กับภาระไฟฟ้าชนิดไม่เป็นเชิงเส้นสมจริง (Realistic non-linear load) คือ เรกติฟายเออร์ชนิดเฟสเดียว (Single phase rectifier)แทนที่จะใช้วิธีการสร้างแบบจำลองแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก

Bridgeman, et al.[8] ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ฮาร์มอนิกพบว่า โดยปกติในระบบไฟฟ้ากำลังที่เกิดความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกนั้น จะทำให้เกิดปัญหาขึ้นกับคาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งในระบบได้ กล่าวคือ คาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งในระบบดังกล่าว นอกจากจะถูกใช้งานเพื่อแก้ไขปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังแล้ว ยังสามารถขยายค่าความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกนี้ได้โดยอาศัยการเกิดเรโซแนนซ์ขึ้นกับค่าอินดักแตนซ์ของแหล่งจ่ายอีกด้วย และได้นำเสนอวิธีการแก้ไขโดยทั่วไปของปัญหานี้ก็คือ การติดตั้งดีจูนรีแอกแตนซ์ (Detune reactance) เพื่อให้วงจรที่นำมาแก้ไขปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังนี้ยังคงคุณสมบัติของความเหนี่ยวนำ (Inductive) ที่ทุก ๆ ระดับฮาร์มอนิกสำคัญ ของแรงดันระบบ

Lemieux[9] ได้สรุปว่าการเกิดฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้น จะเกิดขึ้นได้เมื่อความถี่ในระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าตอบสนองตรงกับความถี่ของแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก โดยได้ทำการศึกษาถึงการเกิดฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งส่งผลให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์สวิตช์เกียร์ระบบ 13.8 กิโลโวลต์และส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อระบบไฟฟ้าของโรงงานตามมาด้วย โดยที่ในการศึกษานี้ได้ทำการคำนวณความถี่ธรรมชาติ(Natural frequencies) ของระบบไฟฟ้ากำลัง ที่มีลักษณะการต่อเชื่อมของระบบ(System configuration) ที่แตกต่างกันออกไปโดยได้ทำการเปลี่ยนแปลงลักษณะของ รีแอกแตนซ์ของแหล่งจ่าย, รีแอกแตนซ์ของมอเตอร์และค่าคาปาซิแตนซ์ของระบบ นอกจากนี้ ได้ทำการระบุและกำหนดแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก, อธิบายวิธีการวัดกระแสฮาร์มอนิกกับระดับแรงดันทั้งระบบ และผลของกระแสฮาร์มอนิกกับแรงดันที่เกิดขึ้น ตลอดจนวิธีการแก้ไขเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิด ฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ขึ้นอีก

Currence, et al.[10] ได้ทำการวัดค่าฮาร์มอนิกด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ฮาร์มอนิก (Harmonic analyzer) ในตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบจำหน่ายภายในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อหาค่าของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิก และ ใช้แผนภาพอิมพีแดนซ์ของระบบ(System impedance diagram) เป็นแบบจำลองระบบไฟฟ้า ตลอดจนคำนวณหาความถี่ธรรมชาติของระบบ โดยพบว่า จะเกิดฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ขึ้นที่ค่าใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และ 7 ทั้งนี้ขึ้นกับลักษณะการต่อเชื่อมของระบบไฟฟ้าด้วย อีกทั้งยังได้นำเสนอวงจรสมมูลของโรงงานที่ทำการศึกษา เพื่อแสดงให้เห็นถึงการขยายขนาดของกระแสและแรงดันไฟฟ้า อันเนื่องมาจากผลของฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์

Bridgeman, et al.[11] ได้เสนอวิธีการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ฮาร์มอนิกของระบบไฟฟ้าที่มีการใช้งานสวิตชิงคาปาซิเตอร์ และได้สรุปว่า คอนเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดฮาร์มอนิกแล้วส่งผลให้เกิดรีโซแนนซ์ได้ แต่อย่างไรก็ตาม คอนเวอร์เตอร์ก็อาจช่วยให้เกิดการหน่วง(Damping) ของรีโซแนนซ์ได้ด้วยเช่นกัน โดยผลของการหน่วงที่พบนั้น เกิดจากโหลดแบบเชิงเส้นและคอนเวอร์เตอร์

Ashari , et al.[13] ได้เสนอวิธีการในการลดผลของกระแสฮาร์มอนิก และการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบจำหน่ายแรงดัน 3 เฟส 4 สาย ซึ่งมีภาระไฟฟ้าเป็นคอนเวอร์เตอร์แบบมอดูเลชันความกว้างของพัลส์ 2 ทิศทาง (Bidirectional PWM converter) และมีเบตเตอร์ติดตั้งใช้งานด้วย และพบว่า การลดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในกระแสที่จ่ายเข้ามาในระบบ ยังส่งผลให้กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในตัวนำนิวทรัลมีค่าลดลงมากอีกด้วย โดยใช้โปรแกรม PSCAD/EMTDC เป็นโปรแกรมช่วยในการจำลอง

Lundquist and Bollen [14] ได้เสนอหลักการการไหลของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิกในระบบจำหน่ายแรงดันและปานกลางโดยปรับเปลี่ยนค่าโหลดของระบบไฟฟ้ากำลังและค่านึงถึงผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายซึ่งมีสาเหตุมาจากวงจรกรอง คาปาซิเตอร์เบงก์ โหลดเชิงเส้นและโหลดไม่เป็นเชิงเส้น พบว่าการไหลของกำลังไฟฟ้าแอกทีฟฮาร์มอนิกเป็นเพียงกำลังไฟฟ้าบางส่วนซึ่งไม่ได้แทนการไหลที่แท้จริงทั้งหมดไปยังภาระไฟฟ้า

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ระดับของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกที่เพิ่มขึ้นในระบบไฟฟ้า ส่วนใหญ่แล้วเกิดจากการนำอุปกรณ์ซึ่งสามารถสร้างฮาร์มอนิกมาต่อใช้งาน อุปกรณ์เหล่านี้ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในทางอุตสาหกรรม พาณิชยกรรมและตามบ้านเรือน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมแรงดัน ความเร็วรอบ เปลี่ยนค่าความถี่ และแปลงผันกำลังไฟฟ้า เป็นต้น การนำคาปาซิเตอร์มาใช้งานนั้นส่งผลให้ช่วยปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มมากขึ้น แต่ก็ส่งผลกระทบต่อระดับของฮาร์มอนิกด้วยเช่นกัน กล่าวคือ แม้ว่าคาปาซิเตอร์จะไม่ได้เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้กำเนิดฮาร์มอนิกขึ้นก็ตามแต่จะทำให้เกิดลักษณะหรือเส้นทางของวงจรที่ซึ่งอาจทำให้เกิดภาวะเรโซแนนซ์ขึ้นได้ นอกจากนี้คาปาซิเตอร์ยังมีผลต่อขนาดของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกซึ่งเกิดขึ้นในระบบของการไฟฟ้าตลอดจนภาระไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟอีกด้วย การแก้ปัญหาฮาร์มอนิกโดยทั่วไป ได้แก่ การใช้คาปาซิเตอร์แบบวอยโดยไม่ต่อลงดิน, การเปลี่ยนขนาดหรือตำแหน่งติดตั้งคาปาซิเตอร์, การเพิ่ม รีแอกเตอร์เข้ากับคาปาซิเตอร์เดิมที่ใช้งาน, การเพิ่มคาปาซิเตอร์ที่เป็นวงจรกรองเข้าไป ตลอดจนการควบคุมการปลดสับคาปาซิเตอร์เพื่อหลีกเลี่ยงภาวะเรโซแนนซ์

2.1 การเกิดแรงดันฮาร์มอนิกและกระแสฮาร์มอนิก

โดยปกติ เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์ให้ตกรวมภาระไฟฟ้าที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น จะส่งผลให้เกิดกระแสที่มีรูปคลื่นไม่เป็นไซน์ไหลผ่านภาระไฟฟ้างกล่าวได้ ในทางกลับกัน เมื่อมีกระแสที่มีรูปคลื่นเป็นไซน์จ่ายให้กับภาระไฟฟ้าที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นก็จะส่งผลให้มีแรงดันที่มีรูปคลื่นไม่เป็นไซน์ตกรวมภาระไฟฟ้าดังกล่าวด้วยเช่นกัน

คอนเวอร์เตอร์ เป็นภาระไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีอิมพีแดนซ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น และเมื่อมีการติดตั้งคาปาซิเตอร์ เพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังกับระบบไฟฟ้าที่มีการใช้งานคอนเวอร์เตอร์ดังกล่าว จึงมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดภาวะเรโซแนนซ์ขึ้นที่ค่าความถี่ใดความถี่หนึ่งได้

ถึงแม้ว่าคาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งใช้งานจะไม่ได้เป็นอุปกรณ์ที่สร้างฮาร์มอนิก แต่ผลของคาปาซิเตอร์ที่มีต่ออิมพีแดนซ์ของวงจร จะส่งผลให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกขึ้นซึ่งเป็นไปได้ทั้งสองกรณีคือ มีแรงดันฮาร์มอนิกลดลงหรือเพิ่มขึ้น

2.2 คอนเวอร์เตอร์กำลังแบบสถิตย์ (Static Power Converter)

การศึกษาและทำความเข้าใจในทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบสถิตย์นั้น มีวัตถุประสงค์ เพื่อให้ทราบว่ากระแสที่มีลักษณะรูปคลื่นไม่เป็นไซน์นี้ ก่อให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกได้อย่างไร จากรูปที่ 2.1 เป็นรูปตัวอย่างคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบสถิตย์ 6 พัลส์ ซึ่งจ่ายภาระไฟฟ้ากระแสตรง (DC load) ด้วยค่ากระแสคงที่ สวิตช์แต่ละสวิตช์ในคอนเวอร์เตอร์จะทำงานเพื่อให้ได้กระแสที่โดยเรียงลำดับกันไปจนครบทั้งสามเฟส ในทางอุดมคติแล้ว กระแสที่คงที่นี้จะส่งผลให้เกิดกระแสที่มีลักษณะรูปคลื่นเป็นสี่เหลี่ยมไหลในระบบไฟฟ้าสามเฟส ซึ่งจากการวิเคราะห์ของฟูริเยร์ได้ระบุถึงกระแสฮาร์มอนิกที่อันดับและขนาดต่าง ๆ ดังสมการที่ (2.1)

$$\begin{aligned} h &= pn \pm 1 \\ I_h &= I_1 / h \end{aligned} \quad (2.1)$$

โดยที่

h คือ อันดับของฮาร์มอนิก

p คือ จำนวนนับ ได้แก่ 1, 2 ...

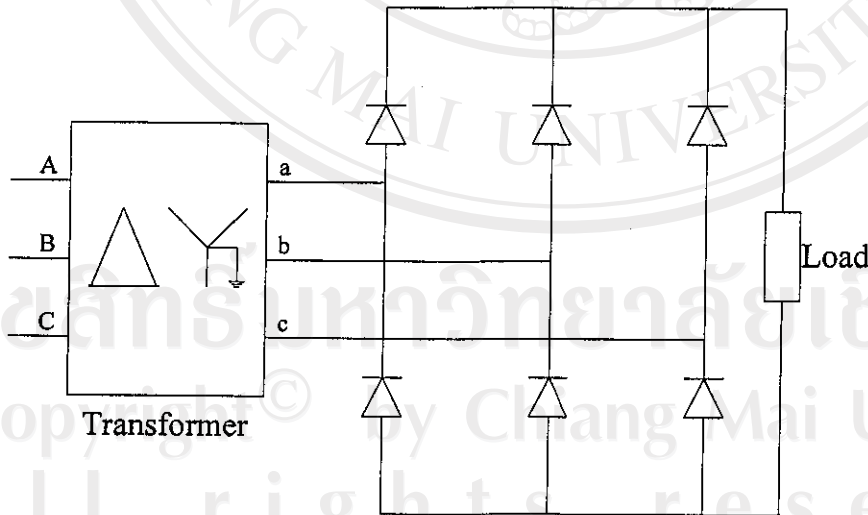
n คือ จำนวนของพัลส์ที่เกิดขึ้นกับกระแสของเรกติฟายเออร์ (Rectifier)

I_1 คือ ขนาดของกระแสที่ความถี่มูลฐาน

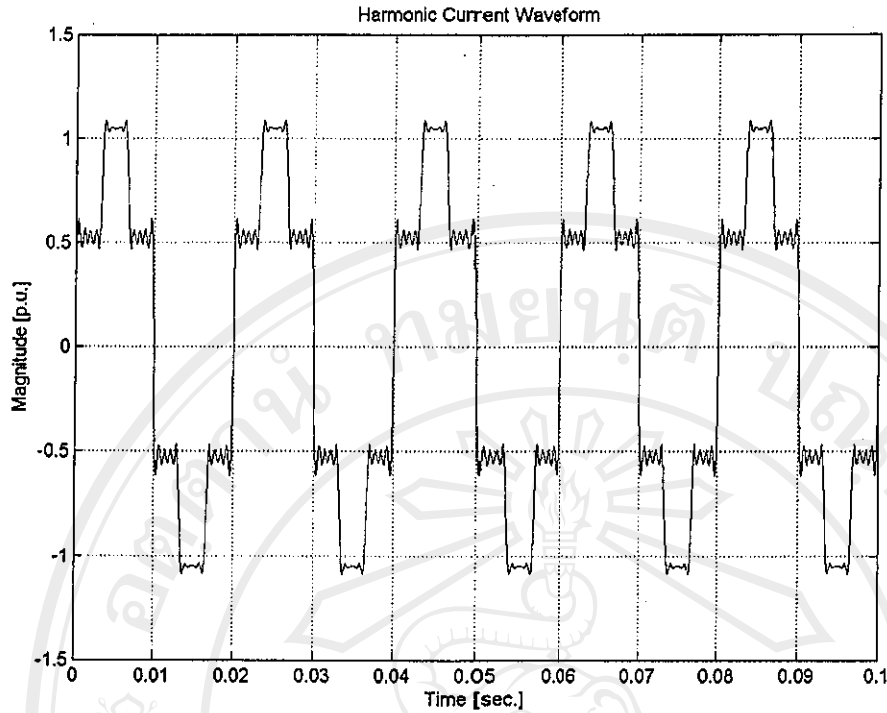
I_h คือ ขนาดของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h

ดังนั้น ตัวเรียงกระแสชนิด 6 พัลส์ จะสร้างความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5, 7, 11, 13, 17, ...

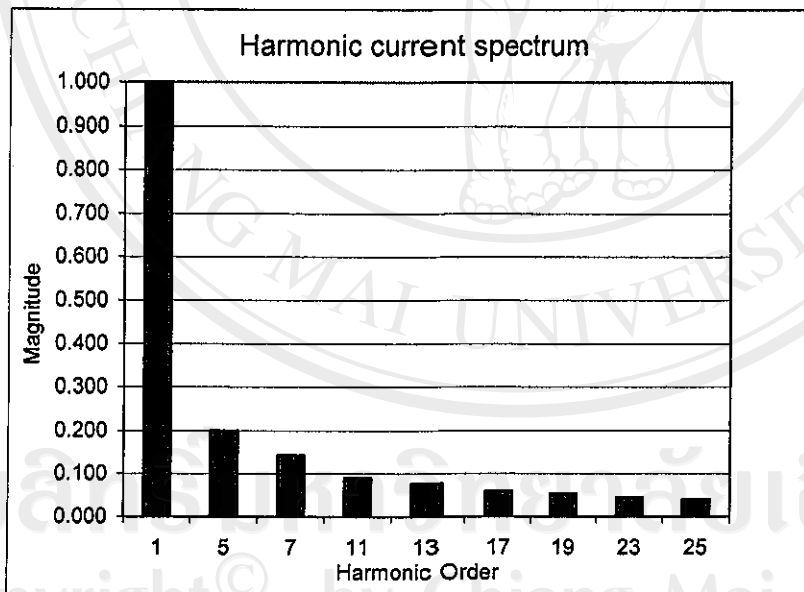
เป็นต้น โดยมีตัวอย่างของรูปคลื่นและสเปกตรัมของกระแสดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์



รูปที่ 2.2 รูปคลื่นกระแสของคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์

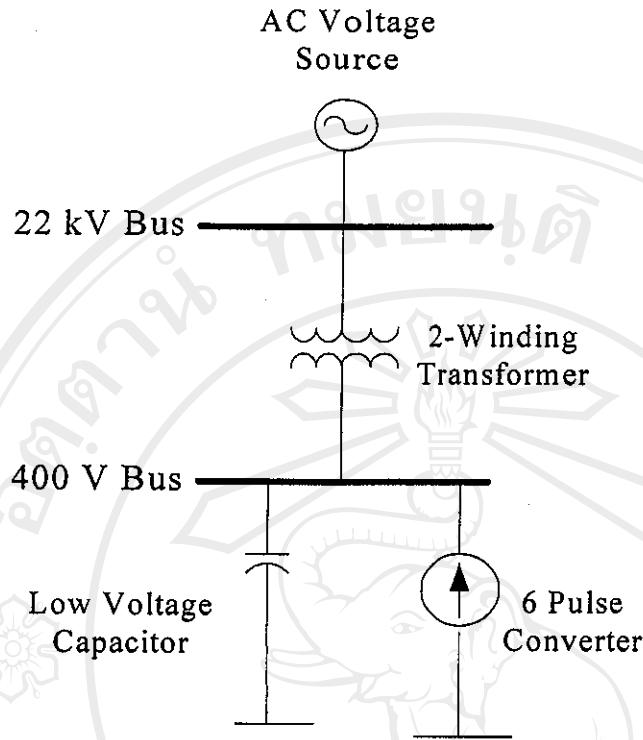


รูปที่ 2.3 สเปกตรัมของกระแสคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์

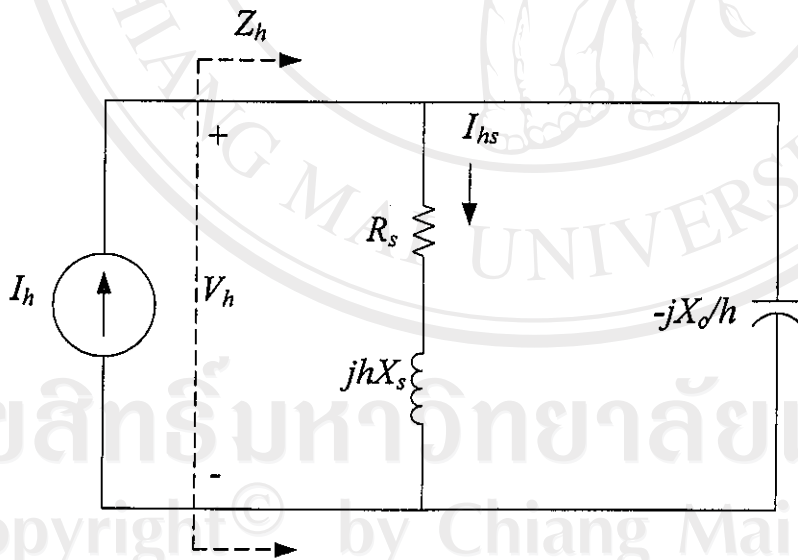
2.3 เรโซแนนซ์ขนาน (Parallel resonance)

โดยปกติในวงจรไฟฟ้าใด ๆ จะประกอบด้วยทั้งส่วนประกอบของวงจรที่เป็นคาปาซิแตนซ์และอินดักแตนซ์ ซึ่งจะมีค่าความถี่ธรรมชาติค่าหนึ่ง และเมื่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในวงจรซึ่งให้กำเนิดความถี่ที่มีค่าตรงกับหรือใกล้เคียงกับค่าความถี่ธรรมชาติดังกล่าว จะเกิดภาวะเรโซแนนซ์ขึ้น ทำให้

เกิดค่ากระแสหรือแรงดันที่มีค่าสูงขึ้นได้ ดังรูปที่ 2.4 เป็นระบบที่อาจเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ขนานได้ และสามารถเขียนเป็นวงจรเทียบเท่าได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 ระบบที่เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ขนาน



รูปที่ 2.5 วงจรเทียบเท่าของระบบในรูปที่ 2.4

โดยที่ h คือ อันดับของฮาร์โมนิก

I_h คือ กระแสที่ไหลจากแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิก(คอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์)

I_{hs} และ I_{hc} คือ กระแสฮาร์โมนิกที่ไหลสู่ระบบและคาปาซิเตอร์ตามลำดับ

Z_h คือ อิมพีแดนซ์เทวินินฮาร์โมนิกอันดับที่ h

V_h คือ แรงดันฮาร์มอนิกที่ตกคร่อม Z_h

R_s และ X_s คือ ความต้านทานและรีแอกแตนซ์ของระบบ ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า กับแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ

X_c คือ รีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ซึ่งต่อกับบัส 400 โวลต์

จากรูปที่ 2.5 เมื่อพิจารณาจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ที่ค่าความถี่ฮาร์มอนิกค่าหนึ่ง คาปาซิเตอร์ที่ต่อเชื่อมอยู่นั้น จะอยู่ในลักษณะการต่อขนานกับอินดักแตนซ์เทียบเท่าของระบบ (ซึ่งประกอบด้วยอินดักแตนซ์ของหม้อแปลงและแหล่งจ่ายไฟ) ที่สภาวะเรโซแนนซ์ ค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ (X_c) มีค่าเท่ากับค่ารีแอกแตนซ์ของระบบ ส่งผลให้อิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นเมื่อพิจารณาจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกนั้นมีค่าสูงมาก ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.6 เป็นตัวอย่างของผลตอบสนองความถี่ของระบบที่เกิดเรโซแนนซ์ขนาน ซึ่งจากรูปที่ 2.6 จุดที่เกิดเรโซแนนซ์ตรงกับฮาร์มอนิกอันดับที่ 12.9 โดยที่ฮาร์มอนิกอันดับนี้จะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงมาก ๆ และถ้าหากว่าภายในระบบมีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกจ่ายกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 13 เข้ามาจะส่งผลให้เกิดความผิดเพี้ยนของแรงดันที่บัสแรงต่ำเพิ่มมากขึ้น ทำให้กระแสที่ไหลภายในวงรอบ (loop) ของคาปาซิเตอร์กับรีแอกแตนซ์ของระบบและหม้อแปลงมีค่าเพิ่มขึ้นมาก ถึงแม้ว่าแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจะมีขนาดน้อยก็ตาม

จากรูปที่ 2.4 มีคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก (I_h) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้าเป็น I_{hs} และกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่คาปาซิเตอร์เป็น I_{hc} โดยที่ R_s กับ $j\omega X_s$ เป็นค่าความต้านทานและรีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงรวมทั้งระบบไฟฟ้า และคาปาซิเตอร์มีขนาด $-jX_c/h$ ติดตั้งอยู่ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง เมื่อพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์โดยมองจากแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก (Z_h) ออกไป จะได้ว่า

$$Z_h = \frac{(R_s + j\omega X_s) \left(\frac{-jX_c}{h} \right)}{R_s + j \left(\omega X_s - \frac{X_c}{h} \right)} \quad (2.2)$$

จากวงจรดังกล่าวจะเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ขึ้นได้ ถ้าหากว่า

$$\omega X_s = \frac{X_c}{h} \quad (2.3)$$

ดังนั้นอันดับของฮาร์มอนิกที่เกิดเรโซแนนซ์มีค่าเป็น

$$h = \sqrt{\frac{X_c}{X_s}} \quad (2.4)$$

กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านคาปาซิเตอร์และกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้าคำนวณได้จาก

$$I_{hc} = \frac{V_h}{(-jX_c / h)} = \frac{(R_s + jhX_s) \cdot I_h}{R_s + j(hX_s - \frac{X_c}{h})} \quad (2.5)$$

$$I_{hs} = \frac{V_h}{R_s + jhX_s} = \frac{(-jX_c / h) \cdot I_h}{R_s + j(hX_s - \frac{X_c}{h})} \quad (2.6)$$

โดยที่สภาวะเรโซแนนซ์ จะได้ว่า

$$I_{hc} = \left(1 + \frac{jhX_s}{R_s}\right) \cdot I_h \quad (2.7)$$

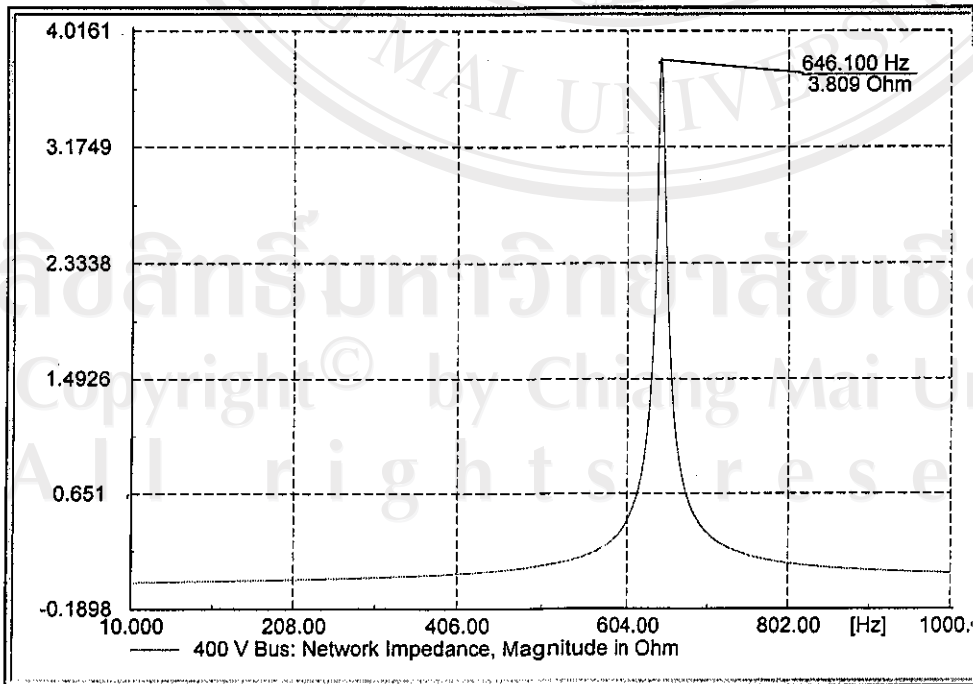
$$I_{hs} = \left(\frac{-jX_c / h}{R_s}\right) \cdot I_h \quad (2.8)$$

ถ้ากำหนดให้ที่ความถี่ฮาร์มอนิกใด ๆ มีอัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่คาปาซิเตอร์เป็น M_c และ อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้าเป็น M_s จะได้ว่า

$$M_c = \frac{I_{hc}}{I_h} = \left(\frac{R_s + jhX_s}{R_s + j(hX_s - \frac{X_c}{h})}\right) \quad (2.9)$$

$$M_s = \frac{I_{hs}}{I_h} = \left(\frac{-jX_c / h}{R_s + j(hX_s - \frac{X_c}{h})}\right) \quad (2.10)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (2.9) และ (2.10) พบว่า อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่คาปาซิเตอร์ และ ระบบไฟฟ้านั้น จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามค่าฮาร์มอนิก (h)



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างผลตอบสนองความถี่ของระบบที่เกิดเรโซแนนซ์ขนาน

ความถี่เรโซแนนซ์ (f) สามารถคำนวณหาจาก

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.11)$$

ในบางครั้งการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังนั้น อาจไม่สามารถแทนค่าของ L และ C โดยตรงได้ สามารถอาศัยความสัมพันธ์อื่นมาช่วยในการคำนวณหาความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งคำนวณหาได้จาก

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_{SC}}} = \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{MVAR_C}} \quad (2.12)$$

เมื่อ h คือ อันดับฮาร์โมนิกเรโซแนนซ์

X_{SC} คือ ค่ารีแอกแตนซ์ลัดวงจรของระบบ

X_C คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์

MVA_{SC} คือ ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าลัดวงจรของระบบ [MVA]

$MVAR_C$ คือ ค่าพิกัดของคาปาซิเตอร์ [MVAR]

สำหรับมาตรฐาน ซึ่งนำมาใช้ในการประเมินคาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งใช้งานในสภาวะของระบบที่มีฮาร์โมนิกนั้น ได้แก่

1. มาตรฐาน IEEE Std 1036-1992 : IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors กล่าวถึงข้อแนะนำในการใช้งานคาปาซิเตอร์
2. มาตรฐาน IEEE Std 519-1992 : IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems กล่าวถึงข้อแนะนำในการควบคุมฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้า

2.4 ข้อจำกัดของคาปาซิเตอร์ (Capacitor limitation)

ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อคาปาซิเตอร์ที่เกิดขึ้น ได้แก่ ความร้อนสูงเกิน และ ความเครียดไดอิเล็กตริกที่เพิ่มมากขึ้นต่อตัวคาปาซิเตอร์ จากมาตรฐาน IEEE Std 1036-1992 ได้กำหนดค่าขีดจำกัดของแรงดัน กระแสและกำลังไฟฟารีแอกทีฟของคาปาซิเตอร์ เพื่อใช้กำหนดระดับฮาร์โมนิกสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ โดยกำหนดไว้ว่า คาปาซิเตอร์สามารถใช้งานอย่างต่อเนื่องในสภาวะที่มีฮาร์โมนิกได้ ภายใต้ขีดจำกัดของค่าต่าง ๆ ดังนี้

1. ที่ 110% ของแรงดันพิกัดอาร์เอ็มเอส
2. ที่ 120% ของแรงดันค่ายอด
3. ที่ 180% ของกระแสอาร์เอ็มเอส
4. ที่ 135% ของกำลังไฟฟารีแอกทีฟพิกัด

โดยการประเมินค่าขีดจำกัดต่าง ๆ ดังกล่าวนี้ สามารถคำนวณหาจาก

1. ค่ากระแส

ทำการคำนวณหากระแสอาร์เอ็มเอสที่ไหลเข้าสู่คาปาซิเตอร์ จาก

$$I_{c(rms)} = \sqrt{I_{c1}^2 + \dots + I_{ch}^2} \quad (2.13)$$

เมื่อ $I_{c(rms)}$ คือ กระแสรวมซึ่งไหลเข้าสู่คาปาซิเตอร์

I_{ch} คือ กระแสฮาร์โมนิกอาร์เอ็มเอสอันดับที่ h ที่ไหลเข้าสู่คาปาซิเตอร์

โดยจากมาตรฐาน IEEE Std 1036-1992 ได้กำหนดไว้ว่าคาปาซิเตอร์สามารถใช้งานได้ ตามปกติถ้าหากว่ากระแสอาร์เอ็มเอสมีขนาดไม่เกิน 180% ของพิกัดกระแสอาร์เอ็มเอสของ คาปาซิเตอร์

2. ค่าแรงดัน

2.1 แรงดันอาร์เอ็มเอส (RMS Voltage)

ค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสที่ตกคร่อมคาปาซิเตอร์คำนวณหาได้จาก

$$V_{rms} = \sqrt{V_1^2 + V_3^2 + V_5^2 + V_7^2 + \dots + V_h^2} \quad (2.14)$$

โดยที่ V_{rms}

คือ ค่าแรงดันฮาร์โมนิกอาร์เอ็มเอส

V_1

คือ ค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสที่ความถี่มูลฐาน

V_3, V_5, \dots, V_h

คือ ค่าแรงดันฮาร์โมนิกอาร์เอ็มเอสที่อันดับต่าง ๆ

2.2 แรงดันค่ายอด (Peak Voltage)

โดยปกติ คาปาซิเตอร์จะต้องมีค่าความตงทนไดอิเล็กตริก (Dielectric Stress) ต่อค่าแรงดันค่ายอดซึ่งเกิดจากความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์โมนิกได้ โดยค่าแรงดันค่ายอดของคาปาซิเตอร์คำนวณหาจาก

$$V_{peak} = \sqrt{2} \cdot V_{rms} \quad (2.15)$$

โดยที่ V_{peak} คือ ค่าแรงดันค่ายอด

V_{rms}

คือ ค่าแรงดันฮาร์โมนิกอาร์เอ็มเอส

3. ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ

กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของภาระไฟฟ้าคาปาซิเตอร์ คำนวณได้จาก ผลบวกของ กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (kVAR) ที่ความถี่มูลฐานและความถี่ฮาร์โมนิกต่าง ๆ

$$kVAR = \sum_h (V_h I_h) = \sum_h \left(\frac{V_h^2}{X_h} \right) \quad (2.16)$$

การใช้งานคาปาซิเตอร์ในสภาวะที่มีฮาร์โมนิกเกินกว่าค่าขีดจำกัดนี้ ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อคาปาซิเตอร์ได้ เช่น การไหม้ขั้วรูดของฟิวส์ หรือ การขั้วรูดของคาปาซิเตอร์ โดยสาเหตุ

ของการชำรุดเนื่องจากว่า คาปาซิเตอร์อยู่ในส่วนของวงจรเรโซแนนซ์ ทำให้เกิดการขยายของฮาร์มอนิกบางลำดับ อาจเกิดแรงดันหรือกระแสค่าสูง ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์ได้

2.5 ข้อจำกัดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก (Harmonic distortion limitation)

ค่าขีดจำกัดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน IEEE Std 519-1992 สรุปได้ดังตารางที่ 2.1 โดยปกติแล้วจะใช้ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion: THD) เป็นค่าที่อธิบายความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นว่ามีมากน้อยเพียงใด โดยมีนิยามดังนี้

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (2.17)$$

ตารางที่ 2.1 ค่าขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของแรงดันสำหรับระบบไฟฟ้า

ระดับแรงดันของระบบ (kV)	Total Voltage THD (%)
≤ 69	5.0
69 – 161	2.5
≥ 161	1.5

2.6 การประเมินกำลังสูญเสียในหม้อแปลงที่ลดลงจากการติดตั้งคาปาซิเตอร์

กำลังสูญเสียภายในหม้อแปลงไฟฟ้า แบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก (Core loss) และกำลังสูญเสียในขดลวด (Copper loss) โดยปกติกำลังสูญเสียในแกนเหล็กจะมีค่าโดยประมาณเท่ากับกำลังที่หม้อแปลงดึงจากแหล่งจ่ายขณะที่ไม่มีภาระไฟฟ้าต่ออยู่ ซึ่งจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ส่วนกำลังสูญเสียในขดลวดจะแปรผันตรงกับค่ากระแสไฟฟ้าของภาระไฟฟ้ายกกำลังสอง จึงมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อค่าตัวประกอบกำลัง กล่าวคือ เมื่อทำการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้สูงขึ้น กระแสในสายลดลง ความสูญเสียในขดลวดหม้อแปลงก็จะลดลงด้วย โดยสามารถหา กำลังสูญเสียที่ลดลงได้จาก

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta \quad (2.18)$$

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3} V_L \cos \theta} \quad (2.19)$$

ค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลง ก่อนติดตั้งคาปาซิเตอร์ มีค่าเป็น

$$\begin{aligned}
 P_{loss 1} &= 3I_L^2 R \\
 &= 3 \left(\frac{P}{\sqrt{3}V_L \cos \theta_1} \right)^2 R \\
 &= \frac{P^2 R}{V_L^2 (\cos \theta_1)^2}
 \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกัน ค่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลง หลังทำการติดตั้งคาปาซิเตอร์ มีค่าเป็น

$$P_{loss 2} = \frac{P^2 R}{V_L^2 (\cos \theta_2)^2}$$

ดังนั้น สามารถหาค่าเปอร์เซ็นต์กำลังสูญเสียในหม้อแปลงที่ลดลงได้จาก

$$\begin{aligned}
 \% \Delta P_{loss} &= \frac{\Delta P_{loss}}{P_{loss 1}} \times 100 \\
 &= \frac{P_{loss 1} - P_{loss 2}}{P_{loss 1}} \times 100 \\
 &= \frac{\frac{P^2 R}{V_L^2} \left(\frac{1}{(\cos \theta_1)^2} - \frac{1}{(\cos \theta_2)^2} \right)}{\frac{P^2 R}{V_L^2 (\cos \theta_1)^2}} \times 100 \\
 &= (\cos \theta_1)^2 \left(\frac{1}{(\cos \theta_1)^2} - \frac{1}{(\cos \theta_2)^2} \right) \\
 \% \Delta P_{loss} &= \left(1 - \left(\frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} \right)^2 \right) \times 100 \quad (2.20)
 \end{aligned}$$

โดยที่ $\cos \theta_1$ เป็นค่าตัวประกอบกำลังก่อนติดตั้งคาปาซิเตอร์
 $\cos \theta_2$ เป็นค่าตัวประกอบกำลังหลังติดตั้งคาปาซิเตอร์

2.7 วงจรกรองพาสซีฟ (Passive Filter)

วงจรกรองพาสซีฟ หมายถึง อุปกรณ์กรองฮาร์มอนิกที่ประกอบด้วยอุปกรณ์คือ ตัวต้านทาน(R) รีแอคเตอร์(L) และ คาปาซิเตอร์(C) ซึ่งได้รับการออกแบบให้มีค่า R, L และ C ที่สัมพันธ์กัน มีคุณลักษณะเหมือนสถานะที่อิมพีแดนซ์ต่ำมากหรือลัดวงจร (Low impedance / Short circuit) สำหรับที่ฮาร์มอนิกใด ๆ ตลอดจนติดตั้งเป็นภาระไฟฟ้าตัวหนึ่งสำหรับระบบไฟฟ้า ดังนั้น กระแสฮาร์มอนิกในระบบจะมองเห็นวงจรกรองพาสซีฟเป็นเสมือนการลัดวงจรและไหลผ่านวงจรกรองพาสซีฟโดยแทบจะไม่รบกวนระบบไฟฟ้าเลย

2.7.1 วงจรกรองดีจูน (Detune filter)

วงจรกรองดีจูน หมายถึง วงจรกรองพาสซีฟประเภทหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดจากสถานะเรโซแนนซ์ขนานระหว่างหม้อแปลงและคาปาซิเตอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้าได้ โดยทำหน้าที่ที่เปลี่ยนค่าความถี่เรโซแนนซ์ระหว่างหม้อแปลงและคาปาซิเตอร์ให้อยู่ต่ำกว่าทุกอันดับฮาร์มอนิกที่ปะปนอยู่ในระบบไฟฟ้า จึงเป็นการหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดเรโซแนนซ์ขนานขึ้นที่ความถี่ฮาร์มอนิกต่าง ๆ โดยปกติ วงจรกรองดีจูนถูกนำไปใช้ในระบบที่มีปริมาณฮาร์มอนิกไม่มากแต่เกิดปัญหาเรโซแนนซ์ขนานเมื่อติดตั้งคาปาซิเตอร์ในระบบไฟฟ้า โดยวงจรกรองดีจูนที่ใช้งานทั่วไปจะมีขนาดของอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ประมาณ 5-7% ของคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์

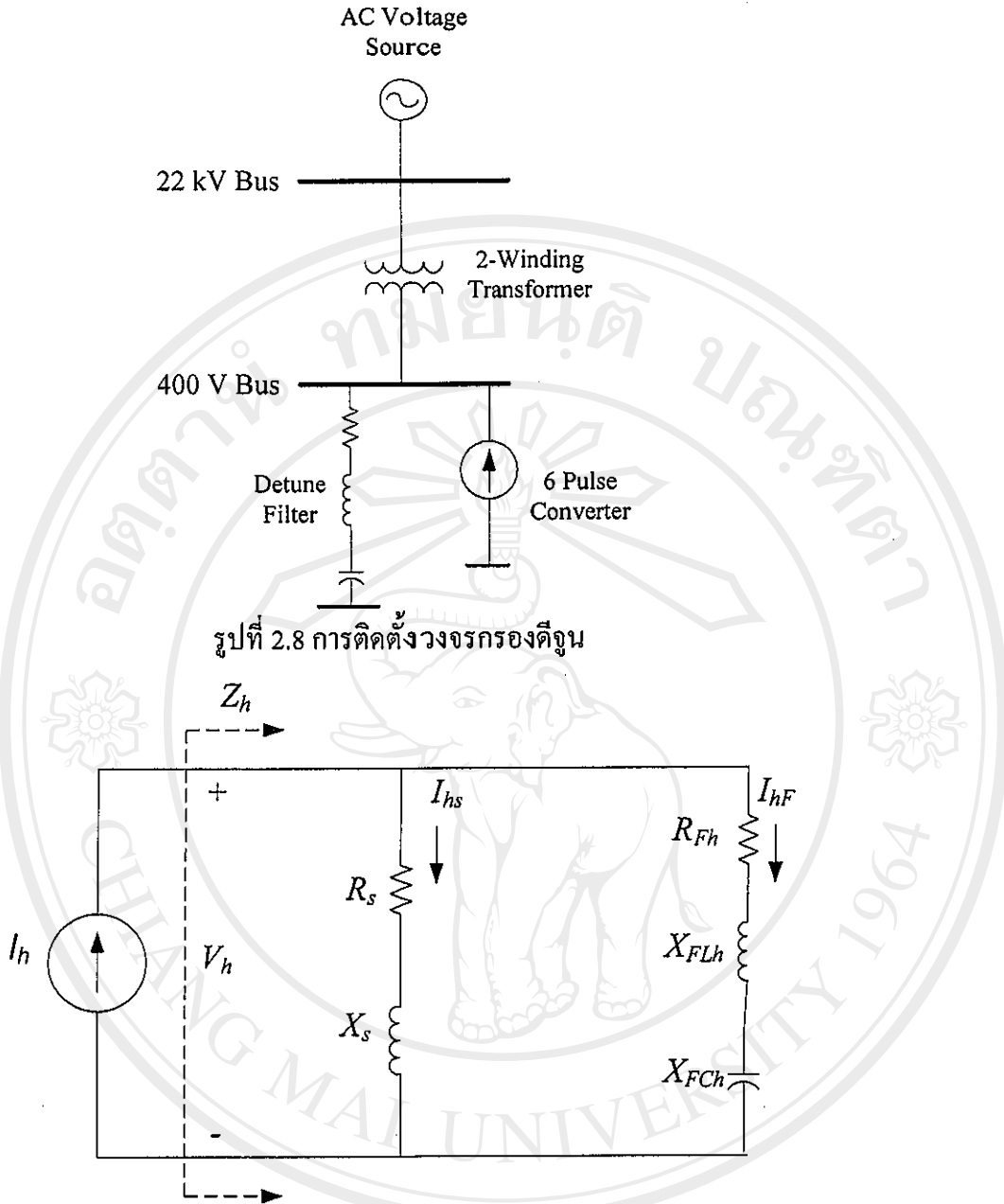
ในการศึกษานี้ ได้ทำการดัดแปลงคาปาซิเตอร์ให้เป็นวงจรกรองดีจูน โดยการต่อรีแอคแตนซ์ขนาด 7% ของคาปาซิทีฟรีแอคแตนซ์และต่ออนุกรมเข้ากับคาปาซิเตอร์ จะทำให้เกิดวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานและอนุกรมพร้อม ๆ กัน โดยวงจรเรโซแนนซ์ขนานที่เกิดขึ้นนั้น จะมีค่าความถี่เรโซแนนซ์ขนานอยู่ต่ำกว่าความถี่ฮาร์มอนิกของระบบไฟฟ้า

2.8 การใช้วงจรกรองดีจูนในการลดผลของฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์

คาปาซิเตอร์ซึ่งติดตั้งเพื่อใช้ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้านั้น จะทำให้เกิดปัญหาของการเรโซแนนซ์ขึ้นเมื่อมีภาระไฟฟ้าที่จ่ายฮาร์มอนิกเข้ามาในระบบ โดยส่วนใหญ่ในระบบไฟฟ้า 3 เฟส ฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 เป็นฮาร์มอนิกอันดับต่ำสุดที่พิจารณา ดังนั้นจึงเป็นอันดับฮาร์มอนิกที่ต่ำที่สุดที่อาจจะมีผลต่อฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ได้ แนวทางในการแก้ไขปัญหานี้ คือ ทำการเปลี่ยนแปลงคาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งโดยเพิ่มอินดักเตอร์(L) หรือความต้านทาน(R) อนุกรมเข้ากับคาปาซิเตอร์ดังกล่าว แล้วปรับจูนไปยังฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ภายใต้ลักษณะเช่นนี้ วงจรอนุกรมระหว่างคาปาซิเตอร์กับอินดักเตอร์ จะทำให้เกิดค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ (low impedance) สำหรับฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 ดังนั้นกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 จะไหลผ่านวงจรกรองนี้ แทนที่จะไหลไปยังส่วนอื่น ๆ ของวงจร โดยลักษณะของวงจรกรองดีจูน การต่อเชื่อมกับระบบ และ วงจรเทียบเท่าในการต่อเชื่อมกับระบบ แสดงดังรูปที่ 2.7, 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างวงจรกรองดีจูน



รูปที่ 2.9 วงจรเทียบเท่าของระบบในรูปที่ 2.8

โดยที่ h คือ อันดับของฮาร์มอนิก

I_h คือ กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h ที่ไหลจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

I_{hs} และ I_{hF} คือ กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลสู่ระบบและวงจรกรองดีจูน ตามลำดับ

Z_h คือ อิมพีแดนซ์เทวินินฮาร์มอนิกอันดับที่ h

V_h คือ แรงดันฮาร์มอนิกที่ตกคร่อม Z_h

R_s และ X_s คือ ความต้านทานและรีแอกแตนซ์ของระบบ

R_{Fh} , X_{FLh} และ X_{FCh} คือ ความต้านทาน รีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ และ

รีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ ตามลำดับ ที่ฮาร์มอนิกที่ h

จากรูปที่ 2.9 Z_h มีค่าดังสมการที่ (2.21)

$$Z_h = \frac{(R_s + jX_s)(R_{Fh} + j(X_{FLh} - X_{FCh}))}{(R_s + R_{Fh}) + j(X_s + (X_{FLh} - X_{FCh}))} \quad (2.21)$$

จากสมการที่ (2.21) พบว่า มีค่าความถี่อยู่ 2 ค่า คือ

1. f_{rs} เป็นค่าความถี่ที่ทำให้เกิดสถานะเรโซแนนซ์อนุกรมระหว่าง X_{FLh} กับ X_{FCh} โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์อนุกรมมีค่าดังนี้

$$f_{rs} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_F C_F}} \quad (2.22)$$

ณ จุดนี้ทำให้ค่าของอิมพีแดนซ์รวม (Z_h) มีค่าเป็น

$$Z_h = \frac{(R_s + jX_s)R_{Fh}}{(R_s + R_{Fh}) + jX_s} \approx R_{Fh} \quad (2.23)$$

ทำให้กระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่ f_{rs} นี้ ไหลเข้าสู่วงจรอนุกรม RLC เกือบทั้งหมด โดยไหลเข้าระบบไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

2. f_{rp} เป็นค่าความถี่ที่ทำให้เกิดสถานะเรโซแนนซ์ขนานระหว่าง X_s กับ $(X_{FLh} - X_{FCh})$ โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์ขนานมีค่าดังนี้

$$f_{rp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_s + L_F)C_F}} \quad (2.24)$$

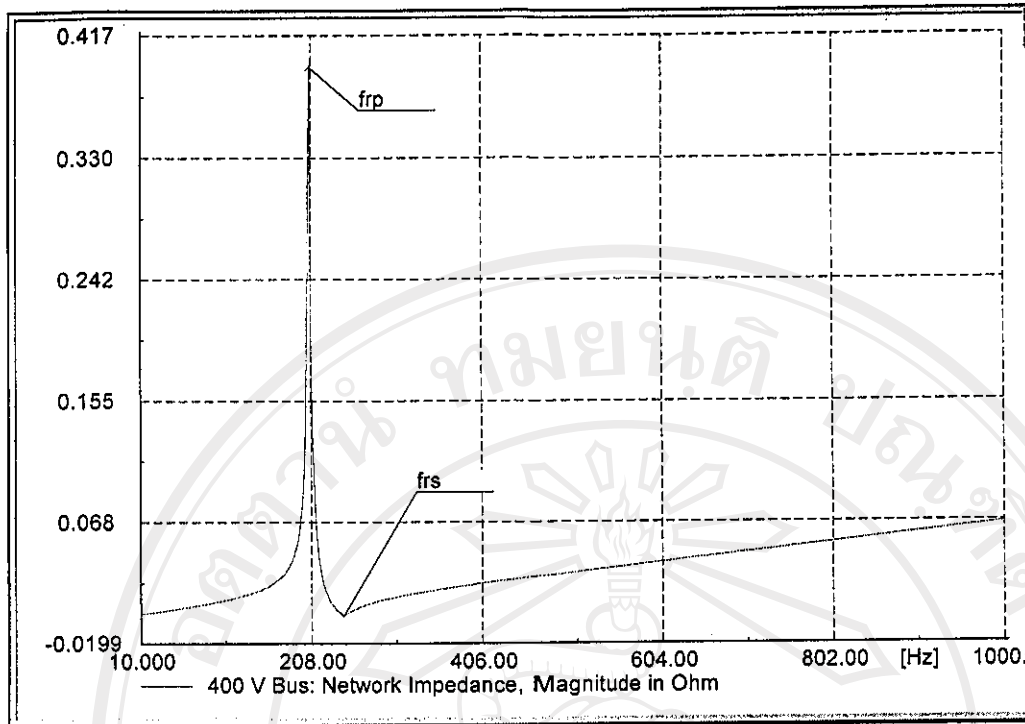
ณ จุดนี้ทำให้ค่าของอิมพีแดนซ์รวม (Z_h) มีค่าเป็น

$$Z_h = \frac{(R_s + jX_s)(R_{Fh} - jX_{Fh})}{(R_s + R_{Fh})} \quad (2.25)$$

กระแสที่ไหลเข้าสู่วงจรกรอง (I_{hF}) จะมีค่าสูง เนื่องจากเกิดการขยายกระแสจากผลของสถานะเรโซแนนซ์ขนานดังกล่าว เนื่องจากค่าความถี่เรโซแนนซ์ขนานมีค่าน้อยกว่าค่าความถี่เรโซแนนซ์อนุกรม

$$f_{rp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_s + L_F)C_F}} < f_{rs} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_F C_F}} \quad (2.26)$$

ดังรูปที่ 2.10 แสดงค่าความถี่เรโซแนนซ์ขนานและอนุกรม ในกราฟอิมพีแดนซ์รวมของระบบเทียบกับความถี่



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างผลตอบสนองของระบบเมื่อติดตั้งวงจรกรองคลื่น

จากรูปที่ 2.10 พบว่า หากกำหนดให้ความถี่เรโซแนนซ์อนุกรม (f_{rs}) มีค่าต่ำกว่าค่าความถี่ฮาร์มอนิกต่ำสุดที่ปรากฏในระบบไฟฟ้า เช่นความถี่ฮาร์มอนิกที่ต่ำที่สุดในระบบเป็น 250 เฮิร์ตซ์ (หรือฮาร์มอนิกที่ 5) ทำการปรับค่า f_{rs} ให้ต่ำกว่าฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาจากสถานะเรโซแนนซ์ขนานในระบบไฟฟ้าได้ ทำให้คาปาซิเตอร์ไม่ได้รับความเสียหายจากกระแสฮาร์มอนิก ยกตัวอย่างเช่น ปรับค่าของ f_{rs} ไปที่ 245 เฮิร์ตซ์ (คิดเป็น 4.9 เท่าของ 50 เฮิร์ตซ์)

2.9 โปรแกรม DIGSILENT PowerFactory (Version 13.0.22)

DIGSILENT (Digital SimuLator for Electrical NeTwork) เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งเริ่มต้นพัฒนาใช้งานตั้งแต่ปี ค.ศ. 1976 และถูกนำไปใช้งานทั้งในด้าน การวางแผน การปฏิบัติงาน ตลอดจนการบำรุงรักษาระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองด้วยภาพหรือทำการป้อนข้อมูลผ่านไฟล์อักษร (Text file) ตลอดจนสามารถวิเคราะห์ระบบผลิตรบบส่ง ระบบจำหน่ายไฟฟ้ารวมทั้งระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรม

ในส่วนของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกด้วยโปรแกรม DIGSILENT PowerFactory นั้น สามารถใช้วิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังได้โดยอาศัย 2 ฟังก์ชันหลักได้แก่

1. การวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิก (Harmonic load flow analysis)

โปรแกรมมีความสามารถในการคำนวณแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกที่บัสต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้าได้โดยสามารถสร้างแบบจำลองและกำหนดค่าของแรงดันฮาร์มอนิกหรือ

แหล่งกำเนิดกระแส โดยที่สามารถกำหนดตำแหน่งของแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกในจุดต่าง ๆ ของระบบได้

2. การวิเคราะห์ด้วยการสแกนความถี่ (Frequency scan analysis)

สามารถทำการวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องในโดเมนความถี่ได้ เพื่อวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ของวงจรตลอดจนจุดที่เกิดเรโซแนนซ์ของวงจรได้

นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งฮาร์โมนิกที่ไม่เป็นจำนวนเต็ม (inter-harmonic) หรือ แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกแบบไม่สมดุลย์ (Unbalanced harmonic source) ได้อีกด้วย



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

บทที่ 3

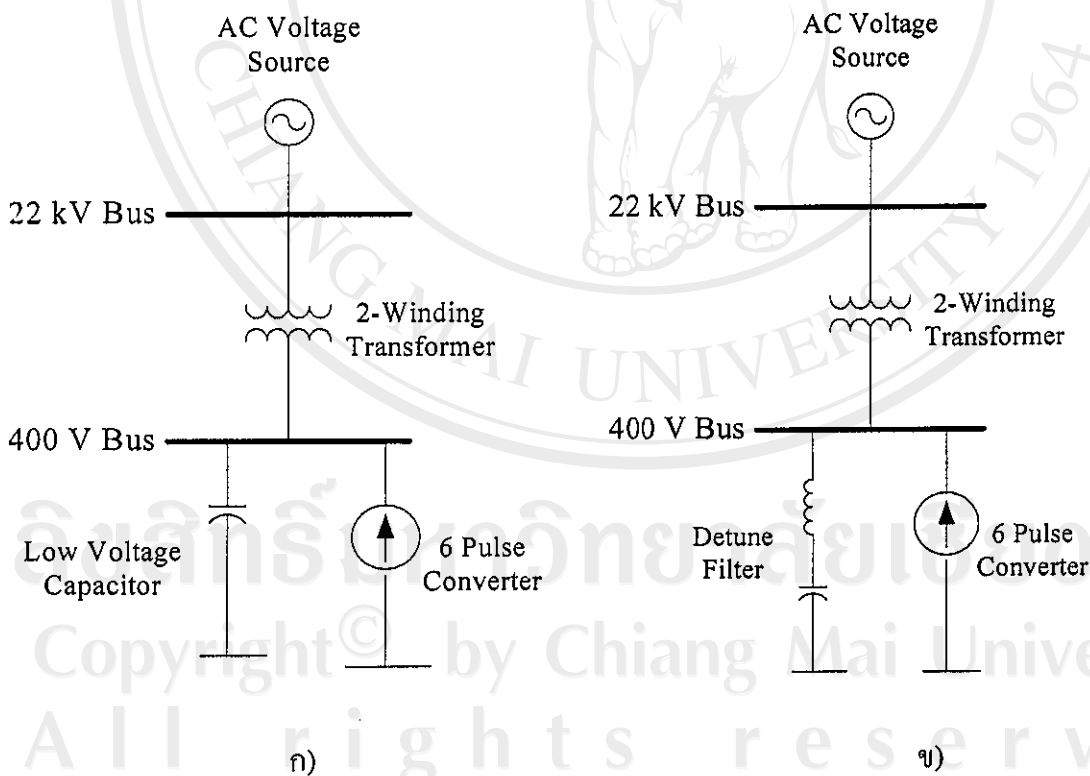
แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

3.1 แบบจำลองของระบบและอุปกรณ์ต่าง ๆ

แบบจำลองที่เกี่ยวข้องในการศึกษาปรากฏการณ์ฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์นี้ ได้แก่ แบบจำลองของ

1. แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Voltage Source)
2. หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)
3. ภาระไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Load)
4. คาปาซิเตอร์ (Capacitor Bank)
5. วงจรกรองคลื่น (Detune Filter)

โดยมีลักษณะการเชื่อมต่อของระบบ (System Configuration) ดังรูปที่ 3.1



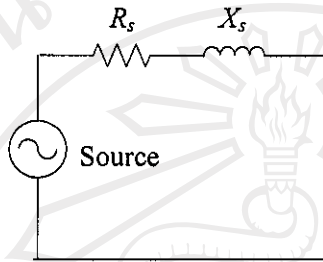
รูปที่ 3.1 การเชื่อมต่อของระบบที่ใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์

ก) กรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ ข) กรณีติดตั้งวงจรกรองคลื่น

โดยมีรายละเอียดของแบบจำลองต่าง ๆ ดังนี้

3.1.1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (AC Voltage Source)

แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ต่อเชื่อมเข้ากับระบบ แทนด้วยแหล่งจ่ายแรงดันสมมูลเทวินิน ต่ออนุกรมกับค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายซึ่งประกอบด้วยค่าความต้านทานลำดับบวกและค่ารีแอกแตนซ์ลำดับบวกต่ออนุกรมกัน ดังรูปที่ 3.2 โดยที่อิมพีแดนซ์สมมูลนี้เป็นอิมพีแดนซ์สมมูลที่มองย้อนกลับไปยังระบบ สำหรับการแทนส่วนที่เหลือของวงจรจ่าย คำนวณได้โดยใช้หลักการของอิมพีแดนซ์สมมูลลัดวงจร (Short circuit equivalent impedance)



รูปที่ 3.2 แบบจำลองอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายแรงดันสมมูล

โดยหาค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายแรงดันสมมูลได้จาก

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

$$R_s = \frac{Z_s}{\sqrt{(X/R)^2 + 1}} \quad (3.2)$$

$$X_s = (X/R) \times R_s \quad (3.3)$$

โดยที่ Z_s คือ อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายแรงดันสมมูล

MVA_{sc} คือ ค่า Short circuit capacity

kV คือ ค่าระดับแรงดันของระบบ (กิโลโวลต์)

R_s คือ ค่าความต้านทานของแหล่งจ่ายแรงดันสมมูล

X_s คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของแหล่งจ่ายแรงดันสมมูล

X/R คือ ค่าอัตราส่วนลัดวงจรของรีแอกแตนซ์ต่อความต้านทาน (Short circuit ratio)

ในการคำนวณหาอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายแรงดันสมมูล ต้องใช้ข้อมูลระดับแรงดัน ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าลัดวงจรของระบบจำหน่าย และ อัตราส่วนลัดวงจรของรีแอกแตนซ์ต่อความต้านทาน

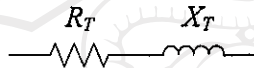
สำหรับข้อมูลแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ ใช้ข้อมูลของสถานีไฟฟ้าย่อยลำพูน 2 ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลแหล่งจ่ายไฟสถานีไฟฟ้าลำพูน 2

พารามิเตอร์	ข้อมูล
แรงดันไฟฟ้า [kV]	22
ค่ากระแสลัดวงจร 3 เฟส [A]	8,458.4
พิกัดกำลังไฟฟ้าลัดวงจร [MVA]	322.3
อัตราส่วนลัดวงจรของรีแอกแตนซ์ต่อความต้านทาน [X/R ratio]	7.2506

3.1.2 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าที่พิจารณาแทนด้วยอิมพีแดนซ์ลำดับบวก ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แบบจำลองอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง

โดยหาค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่หลักมูลได้จาก

$$Z_T = \frac{\%Z}{100} \times \frac{kV_{rated}^2}{MVA_{rated}} \quad (3.4)$$

$$R_T = \frac{kW_{loss} \times 10^3 (kV \times 10^3)^2}{(MVA_{rated} \times 10^6)^2} \quad (3.5)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (3.6)$$

เมื่อ

- Z_T คือ อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง
- R_T คือ ค่าความต้านทานของหม้อแปลง
- X_T คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลง
- $\%Z$ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง
- kV_{rated} คือ ค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง
- MVA_{rated} คือ ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง
- kW_{loss} คือ ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของหม้อแปลง

หม้อแปลงที่ใช้ในการศึกษาเป็นหม้อแปลงแบบ 2 ขดลวดมีการเชื่อมต่อของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิเป็นแบบเคลตา-วาย และมีการต่อลงดินทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง

โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์และกำลังสูญเสียซึ่งอ้างอิงจากมาตรฐานกำลังสูญเสียในหม้อแปลงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 มาตรฐานกำลังสูญเสียของหม้อแปลง 3 เฟส (22 กิโลโวลต์) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ขนาดหม้อแปลง [kVA]	%Z	No-Load Loss[W]	Load Loss[W]
100	4	350	1,750
160	4	500	2,350
250	4	700	3,250
315	4	850	3,900
400	4	1,000	4,600
500	4	1,200	5,500
630	4	1,400	6,500
800	6	1,700	11,000
1000	6	2,000	13,500
1500	6	2,850	19,800
2000	6	3,300	24,000

3.3.3 ภาระไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear load)

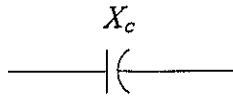
ในการศึกษานี้ ภาระไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งต่อเชื่อมกับระบบ คือ คอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ มีตัวประกอบกำลังเท่ากับ 0.8 ซึ่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกของคอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ ที่ใช้ในการศึกษา

ฮาร์มอนิกอันดับที่	กระแสฮาร์มอนิก [%]
1	100
5	20
7	12
11	8
13	7
17	4.5
19	4
23	3
25	3

3.1.4 คาปาซิเตอร์

แบบจำลองของคาปาซิเตอร์แทนด้วยอิมพีแดนซ์ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แบบจำลองอิมพีแดนซ์ของคาปาซิเตอร์

โดยหาค่ารีแอกแตนซ์ที่ความถี่หลักมูลได้จาก

$$X_c = \frac{(kV_{rated} \times 10^3)^2}{kVAR \times 10^3} \quad (3.7)$$

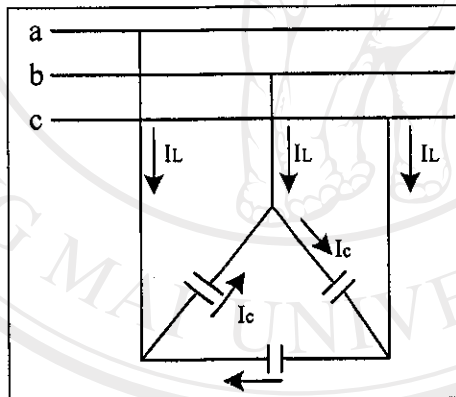
เมื่อ

X_c คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์

kV_{rated} คือ ค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้าของคาปาซิเตอร์

$kVAR$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของคาปาซิเตอร์

ในการคำนวณหาค่าคาปาซิแตนซ์ของคาปาซิเตอร์แต่ละชุด ในการศึกษาี้ เมื่อพิจารณาการติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 30 % ของพิกัดหม้อแปลง โดยที่คาปาซิเตอร์มีการเชื่อมต่อแบบเดลตาทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง โดยทำการคำนวณหาค่าคาปาซิแตนซ์ของคาปาซิเตอร์แต่ละชุดนั้นเป็นไปดังตัวอย่างต่อไปนี้ หม้อแปลงขนาด 500 kVA คาปาซิเตอร์ขนาด 30% (150 kVAR)



รูปที่ 3.5 คาปาซิเตอร์เชื่อมต่อแบบเดลตา ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง

คำนวณหากระแสที่ไหล (I_L)

$$I_L = \frac{Q_c}{\sqrt{3} \times V_{L-L}} = \frac{150 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 400} = 216.506 \text{ A.} \quad (3.8)$$

ดังนั้น

$$I_c = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{216.506}{\sqrt{3}} = 125 \text{ A.} \quad (3.9)$$

จะได้ค่ารีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์แต่ละชุด (X_c) มีค่าเป็น

$$X_c = \frac{V_{L-L}}{I_c} = \frac{400}{125} = 3.2 \ \Omega \quad (3.10)$$

ดังนั้น ค่าคาปาซิแตนซ์ของคาปาซิเตอร์แต่ละชุด จะมีขนาดเป็น

$$C = \frac{10^6}{\omega \times X_c} = \frac{10^6}{2\pi \times 50 \times 3.2} = 994.718 \mu F \quad (3.11)$$

ดังนั้นจึงได้ค่าคาปาซิแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งขนาดเท่ากับ 30% ของค่าพิกัด(kVA)

หม้อแปลงขนาดต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ขนาดของคาปาซิเตอร์ (μF) ที่มีค่าเป็น 30%ของพิกัดหม้อแปลงขนาดต่าง ๆ

ขนาดหม้อแปลง [kVA]	ขนาดคาปาซิเตอร์ [kVAR]	I_L [A]	I_c [A]	X_c [Ω]	C [μF]
100	30	43.30	25	16.00	198.864
160	48	69.28	40	10.00	318.182
250	75	108.25	62.5	6.40	497.159
315	95	137.12	79.2	5.05	629.735
400	120	173.21	100	4.00	795.455
500	150	216.51	125	3.20	994.318
630	189	272.80	157.5	2.54	1,252.841
800	240	346.41	200	2.00	1,590.909
1000	300	433.01	250	1.60	1,988.64
1500	450	649.52	375	1.07	2,982.955
2000	600	866.03	500	0.80	3,977.273

โดยที่คาปาซิเตอร์แต่ละหน่วยย่อยมีราคามาตรฐานพัสดุ(การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค) ดังตารางที่

3.5 (อ้างอิงจากราคามาตรฐานประจำงวดวันที่ 1 ต.ค. 46 – 31 มี.ค. 47)

ตารางที่ 3.5 ราคามาตรฐานคาปาซิเตอร์แต่ละหน่วยย่อย

ขนาดคาปาซิเตอร์ [kVAR]	ราคาต่อหน่วย [บาท]
10	1,294
20	1,818
45	3,796
75	6,060

ดังนั้น สำหรับหม้อแปลงแต่ละขนาดที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 30% ของพิกัดหม้อแปลงสามารถแสดงค่าใช้จ่ายทั้งหมดของการติดตั้งคาปาซิเตอร์ (ซึ่งรวมค่าแรง, ค่าควบคุมงาน, ค่าขนส่ง, ค่าเบ็ดเตล็ดและค่าดำเนินการ) ได้ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ข้อมูลค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการติดตั้งคาปาซิเตอร์สำหรับหม้อแปลงแต่ละขนาด

ขนาดหม้อแปลง [kVA]	ขนาดคาปาซิเตอร์ ที่ติดตั้ง [kVAR]	จำนวนที่ใช้				ราคา [บาท]
		10 kVAR	20 kVAR	45 kVAR	75 kVAR	
100	30	1	1	0	0	3,112
160	50	1	2	0	0	4,930
250	75	1	1	1	0	6,908
315	95	1	2	1	0	8,726
400	120	1	1	2	0	10,704
500	150	0	3	2	0	13,046
630	190	0	2	0	2	15,756
800	240	0	0	2	2	19,712
1000	300	0	0	0	4	24,240
1500	450	0	0	0	6	36,360
2000	600	0	0	0	8	48,480

3.1.5 วงจรกรองดีจูน

วงจรกรองดีจูนที่ใช้ในการจำลอง คัดแปลงจากคาปาซิเตอร์ขนาด 30 % ของหม้อแปลง (600 กิโลวัตต์) โดยเพิ่มค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์ขนาด 7% ของคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์เข้าไป โดยมีลักษณะการเชื่อมต่อดังรูปที่ 3.6 สำหรับรีแอกแตนซ์ที่นำมาใช้ในวงจรกรองดีจูน มีราคาดังตารางที่ 3.7



รูปที่ 3.6 แบบจำลองของวงจรกรองดีจูนที่ใช้ในการจำลอง

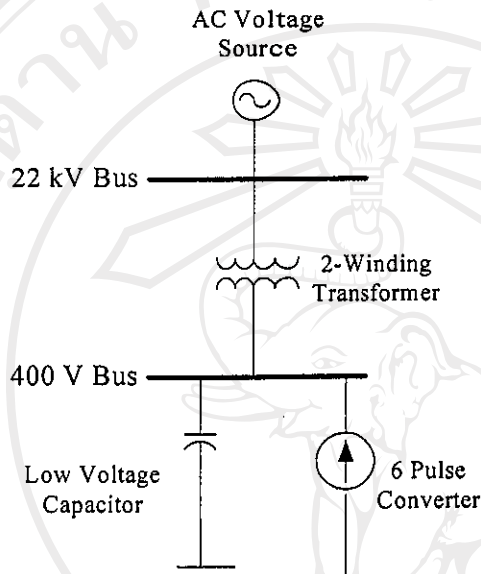
ตารางที่ 3.7 ราคาของรีแอกแตนซ์

ติดตั้งกับคาปาซิเตอร์ขนาด	ราคา [บาท]
25 kVAR	15,000
50 kVAR	19,000
100 kVAR	43,000

3.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์

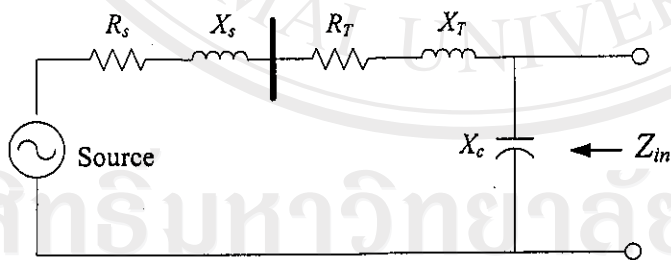
3.2.1 กรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาดเท่ากับ 30% ของพิกัดหม้อแปลง

ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นระบบที่รับไฟจากสถานีไฟฟ้าล้าพูน 2 มีค่ากระแสลัดวงจร 3 เฟสทางด้าน 22 กิโลโวลต์ เท่ากับ 8,458.4 แอมป์ จ่ายไฟให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 2.0 MVA มีภาระไฟฟ้าเป็นคอนเวอร์เตอร์ชนิด 6 พัลส์ขนาด 1000 กิโลวัตต์ที่ค่าตัวประกอบกำลัง 0.8 และติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 600 kVAR (30% ของขนาดพิกัดหม้อแปลง) ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ระบบที่พิจารณาติดตั้งเฉพาะคาปาซิเตอร์

จากรูปที่ 3.7 สามารถเขียนเป็นวงจรเทียบเท่าได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรเทียบเท่าของระบบไฟฟ้าในรูปที่ 3.7

จากรูปที่ 3.8 ทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

พิจารณาที่สถานีไฟฟ้าล้าพูน 2 มีค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าลัดวงจร 322.3 MVA และมีอัตราส่วนลัดวงจรของรีแอกแตนซ์ต่อความต้านทานเท่ากับ 7.2506 ดังนั้นสามารถหาค่าของอิมพีแดนซ์แหล่งจ่ายแรงดันสมมูลได้ ดังนี้

$$Z_s = \frac{kV^2}{MVA_{sc}} = \frac{(22 \times 10^3)^2}{322.3} = 1.5017 \Omega$$

$$R_s = \frac{Z_s}{\sqrt{(X/R)^2 + 1}} = \frac{1.5017}{\sqrt{1 + 7.2506^2}} = 0.20517 \Omega$$

$$X_s = (X/R) \times R_s = 7.2506 \times 0.20517 = 1.4876 \Omega$$

แปลงค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ไปเป็นค่าทางด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง

จะได้ว่า

$$R'_s = \frac{R_s}{a^2} = \frac{0.20517}{(22/0.4)^2} = 0.0000678 \Omega$$

$$X'_s = \frac{X_s}{a^2} = \frac{1.4876}{(22/0.4)^2} = 0.000491 \Omega$$

โดยที่ a คือ อัตราส่วนระหว่างแรงดันด้านปฐมภูมิต่อแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง

R'_s คือ ค่าความต้านทานของแหล่งจ่ายทางด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง

X'_s คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของแหล่งจ่ายทางด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง

พิจารณาหม้อแปลงขนาด 2000 kVA มีค่าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเท่ากับ 6% มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะไม่จ่ายภาระไฟฟ้า (No load loss) และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะจ่ายภาระไฟฟ้า (Load loss) เท่ากับ 3.3 กิโลวัตต์ และ 24 กิโลวัตต์ ตามลำดับ

$$Z_T = \frac{6}{100} \times \frac{22^2}{2} = 14.52 \Omega$$

$$R_T = \frac{[3.3 + 24] \times 10^3 \times (0.4 \times 10^3)^2}{(2 \times 10^6)^2} = 3.3033 \Omega$$

$$X_T = \sqrt{14.52^2 - 3.3033^2} = 14.139 \Omega$$

แปลงค่าความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ไปเป็นค่าทางด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง

จะได้ว่า

$$R'_T = \frac{R_T}{a^2} = \frac{3.3033}{(22/0.4)^2} = 0.001092 \Omega$$

$$X'_T = \frac{X_T}{a^2} = \frac{14.139}{(22/0.4)^2} = 0.004674 \Omega$$

โดยที่ R'_T คือ ค่าความต้านทานทางด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง

X'_T คือ ค่ารีแอกแตนซ์ทางด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง

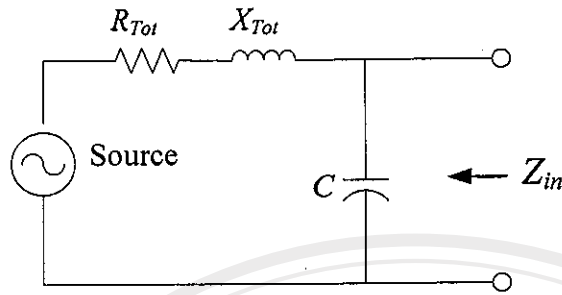
พิจารณาคาปาซิเตอร์ขนาด 600 kVAR จะได้ว่า

$$X_c = \frac{(0.4 \times 10^3)^2}{600 \times 1000} = 0.2667 \Omega$$

และหาค่า คาปาซิแตนซ์(C) ของคาปาซิเตอร์ได้จาก

$$C = \frac{1}{\omega \times X_c} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 0.2667} = 0.011935 F.$$

สามารถเขียนวงจรเทียบเท่าใหม่ได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 วงจรเทียบเท่าใหม่จากรูปที่ 3.8

โดยที่ R_{Tot} คือ ค่าความต้านทานรวมระหว่างแหล่งจ่ายไฟกับหม้อแปลงทางด้านแรงดันต่ำ
 X_{Tot} คือ ค่ารีแอกแตนซ์รวมระหว่างแหล่งจ่ายไฟกับหม้อแปลงทางด้านแรงดันต่ำ
 ดังนั้น

$$R_{Tot} = R'_s + R'_T = 0.000067 + 0.001092 = 0.001159 \Omega$$

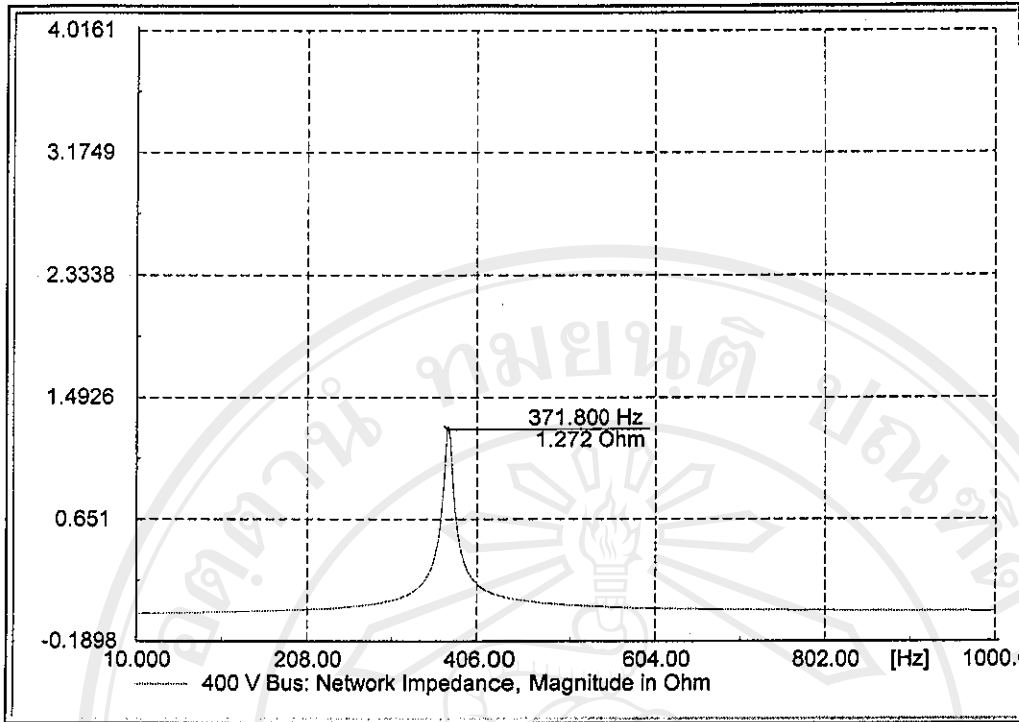
$$X_{Tot} = X'_s + X'_T = 0.000491 + 0.004674 = 0.005165 \Omega$$

$$L_{Tot} = \frac{X_{Tot}}{2\pi f} = \frac{0.005165}{2\pi \times 50} = 0.00001644 H$$

จากรูปที่ 3.9 สถานะเรโซแนนซ์ขนานจะเกิดขึ้นเมื่อค่ารีแอกแตนซ์ของอินดักแตนซ์รวมมีค่าเท่ากับค่ารีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์ ดังนั้นสามารถหาค่าความถี่เรโซแนนซ์ได้จาก

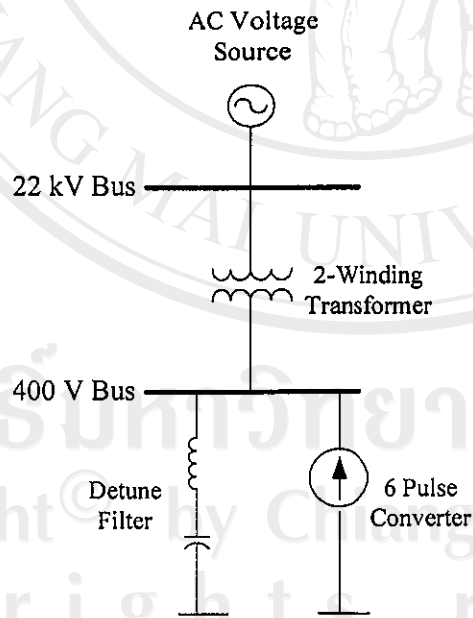
$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Tot}C}} \\ &= \frac{1}{2\pi\sqrt{0.00001644 \times 0.011935}} \\ &= 359.3 \text{ Hz.} \end{aligned}$$

จากค่าความถี่เรโซแนนซ์ดังกล่าว ตรงกับฮาร์มอนิกอันดับที่ 7.18 ซึ่งจะทำให้เกิดสถานะเรโซแนนซ์ขนานขึ้นได้ และจากการจำลองโดยใช้โปรแกรมDIGSILENT PowerFactory โดยใช้ค่าพารามิเตอร์เดียวกัน จะได้กราฟของอิมพีแดนซ์กับความถี่ดังรูปที่ 3.10 โดยในแกนนอนเป็นแกนของความถี่และแกนตั้งเป็นขนาดของอิมพีแดนซ์ พบว่าความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์ที่ได้จากการจำลองคือ 371.4 Hz. ตรงกับอันดับฮาร์มอนิกที่ 7.4

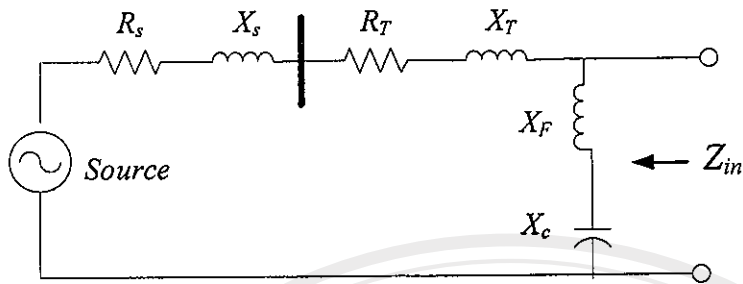


รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับอิมพีแดนซ์ของระบบ

3.2.2 กรณีติดตั้งวงจรกรองดีจูน



รูปที่ 3.11 ระบบที่พิจารณาติดตั้งวงจรกรองดีจูน



รูปที่ 3.12 วงจรเทียบเท่าของระบบในรูปที่ 3.11

ทำการติดตั้งรีแอกเตอร์กับคาปาซิเตอร์ในแต่ละเฟส ของคาปาซิเตอร์ขนาด 600 kVAR จากตารางที่ 3.4 จะได้ว่า $X_C = 0.8 \Omega$ และมีค่า $C = 3977.373 \mu F$

ใช้รีแอกเตอร์ขนาด 7% ติดตั้งกับคาปาซิเตอร์เป็นวงจรกรองคลื่น ดังนั้นค่าอินดักทีฟรีแอกเตอร์และอินดักแทนซ์ของวงจรกรองมีขนาดเท่ากับ

$$X_L = \frac{7}{100} \times 0.8 = 0.056 \Omega$$

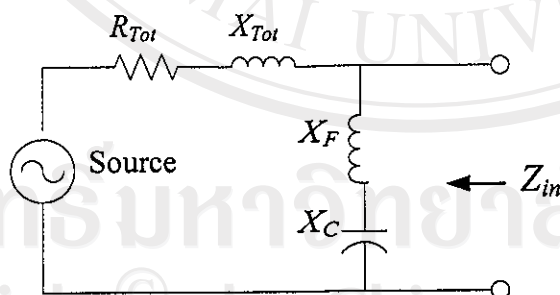
$$L_f = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{0.056}{2\pi \times 50} = 0.0001783 H$$

หาค่าความถี่เรโซแนนซ์อนุกรม (f_{rs}) และความถี่เรโซแนนซ์ขนาน (f_{rp}) ของวงจรกรอง

$$f_{rs} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0.0001783 \times 0.003977373}} = 188.99 Hz.$$

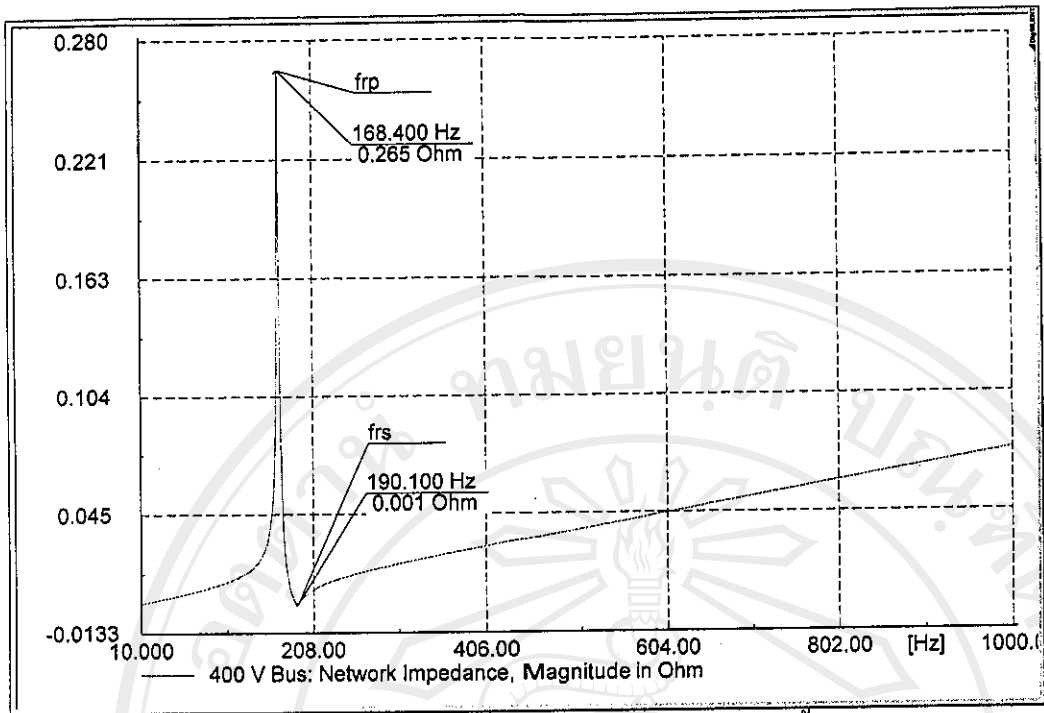
$$f_{rp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_f + L_{Tot})C}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(0.0001783 + 0.00001644) \times 0.003977373}} = 180.83 Hz.$$

ได้ออก



รูปที่ 3.13 วงจรเทียบเท่าใหม่จากรูปที่ 3.12

เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการจำลองพบว่า ความถี่เรโซแนนซ์อนุกรมจากการคำนวณและการจำลองมีค่าเป็น 188.99 กับ 190.1 เฮิรตซ์ตามลำดับ และสำหรับความถี่เรโซแนนซ์ขนานจากการคำนวณและการจำลองมีค่าเป็น 180.83 กับ 168.4 เฮิรตซ์ตามลำดับ



รูปที่ 3.14 กราฟระหว่างความถี่กับอิมพีแดนซ์ของระบบกรณีติดตั้งวงจรกรองดีจูน

จากรูปที่ 3.14 พบว่าความถี่เรโซแนนซ์ขนานมีค่าเท่ากับ 168.4 เฮิรตซ์ (ตรงกับฮาร์มอนิกอันดับที่ 3.3) และมีความถี่เรโซแนนซ์อนุกรมเท่ากับ 190.1 เฮิรตซ์ (ตรงกับฮาร์มอนิกอันดับที่ 3.8) ซึ่งอันดับฮาร์มอนิกของความถี่เรโซแนนซ์ทั้งสองดังกล่าวนี้ มีค่าต่ำกว่าความถี่ฮาร์มอนิกอันดับต่ำที่สุดของระบบ (อันดับที่ 5) ดังนั้นการติดตั้งวงจรกรองดีจูนจึงสามารถหลีกเลี่ยงการเกิดฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ของระบบได้

บทที่ 4

ผลการจำลอง

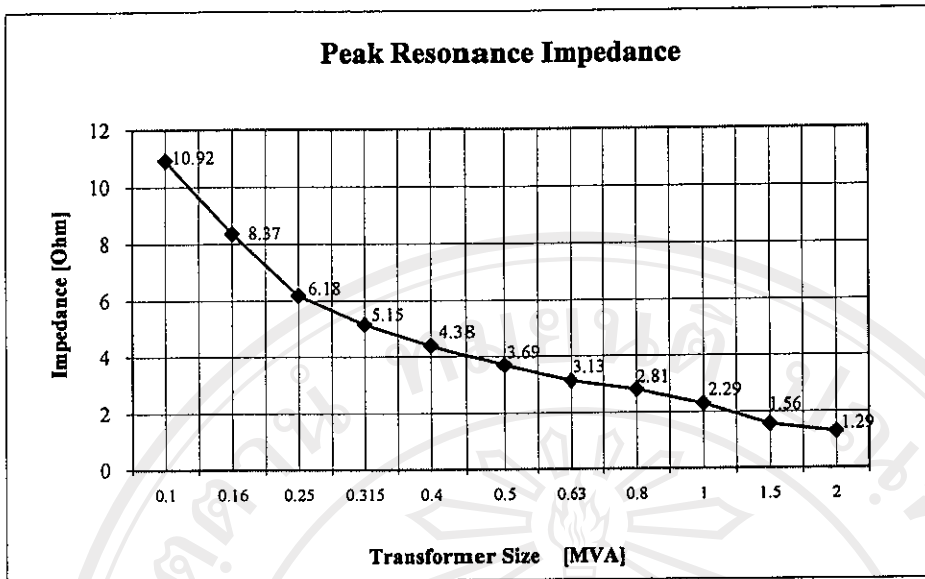
4.1 อันดับฮาร์โมนิกเรโซแนนซ์ของหม้อแปลง

สำหรับหม้อแปลงแต่ละขนาดที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 30% ของพิกัดหม้อแปลงนั้น จะมีผลตอบสนองความถี่ของระบบตลอดจนอันดับฮาร์โมนิกเรโซแนนซ์ที่แตกต่างกัน ในการศึกษาได้ทำการคำนวณและจำลองหาอันดับฮาร์โมนิกเรโซแนนซ์ของหม้อแปลงแต่ละขนาด ดังตารางที่ 4.1 ตารางที่ 4.1 อันดับฮาร์โมนิกเรโซแนนซ์สำหรับหม้อแปลงแต่ละขนาดซึ่งติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 30% ของพิกัดหม้อแปลง

ขนาดของหม้อแปลง [MVA]	ขนาดของ คาปาซิเตอร์ [MVAR]	ค่าพิกัดกำลัง ไฟฟ้า ลัดวงจร ที่บัส 400 โวลต์ [MVA]	อันดับฮาร์โมนิกเรโซแนนซ์	
			จากการคำนวณ	จากการจำลอง
0.1	0.0300	2.48	9.1	9.6
0.16	0.0480	3.95	9.1	9.5
0.25	0.0750	6.13	9.0	9.4
0.315	0.0945	7.69	9.0	9.3
0.4	0.1200	9.70	9.0	9.3
0.5	0.1500	12.03	9.0	9.3
0.63	0.1890	15.02	8.9	9.2
0.8	0.2400	12.80	7.3	7.5
1	0.3000	15.85	7.3	7.5
1.5	0.4500	23.20	7.2	7.5
2	0.60	30.21	7.1	7.4

หมายเหตุ : คำนวณจากค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าลัดวงจรของสถานีไฟฟ้าลำพูน 2 ณ ระดับแรงดันไฟฟ้า 22 kV = 322.31 MVA

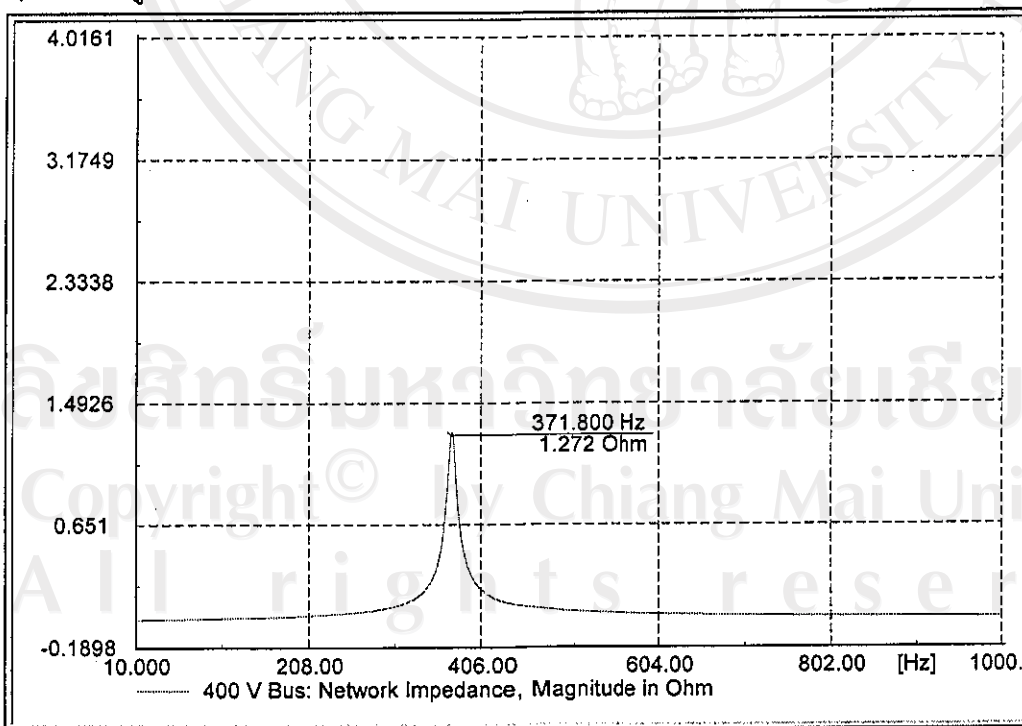
จากผลการจำลองได้ค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดในขณะที่เกิดเรโซแนนซ์ (Peak resonance impedance) ของระบบ ดังรูปที่ 4.1 จะเห็นว่า เมื่อขนาดพิกัดของหม้อแปลงเพิ่มสูงขึ้น ค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดขณะที่เรโซแนนซ์จะมีค่าลดลงด้วย กล่าวคือจากสมการที่ (3.4) เมื่อขนาดพิกัดหม้อแปลงเพิ่มขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงจะลดลงส่งผลให้อิมพีแดนซ์สูงสุดขณะที่เรโซแนนซ์ลดลงด้วย



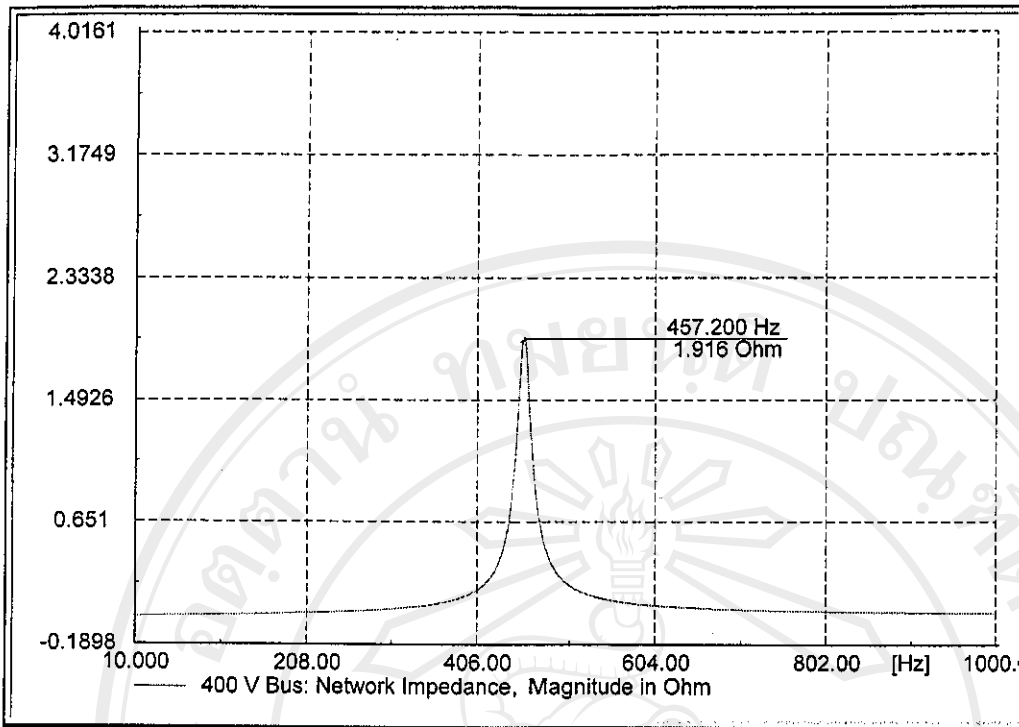
รูปที่ 4.1 อิมพีแดนซ์ขณะเกิดเรโซแนนซ์ขนาน ของระบบสำหรับหม้อแปลงแต่ละขนาดซึ่งติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 30% ของพิกัดหม้อแปลง

4.2 ผลของคาปาซิเตอร์ที่มีต่อฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์

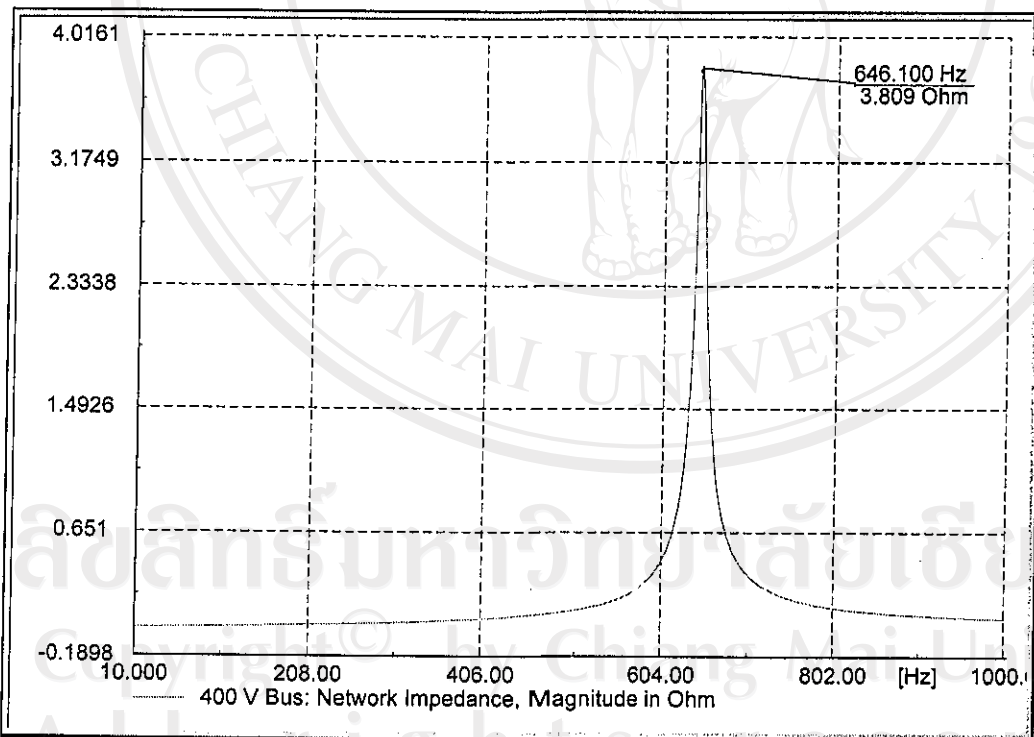
ในการศึกษาผลของคาปาซิเตอร์ที่มีต่อฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์นั้น ได้ทำการศึกษาแบ่งออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ กรณีที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 30%, 20% และ 10% ตามลำดับ โดยใช้หม้อแปลงขนาด 2000 kVA และ ทำการหาผลตอบสนองความถี่ในกรณีที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาดต่าง ๆ ได้ผลดังรูปที่ 4.2 - 4.4



รูปที่ 4.2 กราฟระหว่างความถี่กับอิมพีแดนซ์ของระบบ ในกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 30%



รูปที่ 4.3 กราฟระหว่างความถี่กับอิมพีแดนซ์ของระบบ ในกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 20%



รูปที่ 4.4 กราฟระหว่างความถี่กับอิมพีแดนซ์ของระบบ ในกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 10%

โดยสามารถสรุปเป็นตารางอันดับฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ของกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 30%, 20% และ 10% ของพิกัดหม้อแปลง ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อันดับฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์จากการคำนวณและการจำลองของหม้อแปลงขนาด 2000 kVA เมื่อติดตั้งคาปาซิเตอร์ที่ขนาดต่าง ๆ

ขนาดของหม้อแปลง [kVA]	ขนาดคาปาซิเตอร์คิดเป็น % ของพิกัดหม้อแปลง	kVAR	คาปาซิแตนซ์ [μF]	อันดับของเรโซแนนซ์		อิมพีแดนซ์ [Ohm]
				จากการคำนวณ	จากการจำลอง	
2000	30	600	3977.273	7.33	7.45	1.292
	20	400	2651.515	8.98	9.13	1.931
	10	200	1325.758	12.69	12.93	3.815

จากตารางที่ 4.2 พบว่า ขนาดของคาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งส่งผลโดยตรงต่อทั้งอันดับการเกิดเรโซแนนซ์และขนาดของอิมพีแดนซ์ที่เกิดเรโซแนนซ์ กล่าวคือ ถ้าหากว่าขนาดของคาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งมีค่าลดลง อันดับฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกับกับค่าอิมพีแดนซ์ที่เพิ่มขึ้นด้วย

4.2.1 การประเมินขีดจำกัดของคาปาซิเตอร์

จากทั้ง 3 กรณีดังกล่าวข้างต้น ได้ผลการศึกษาที่แต่ละอันดับฮาร์มอนิกดังตารางที่ 4.3 – 4.5 ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาที่อันดับฮาร์มอนิกต่าง ๆ ในกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 30%

Order	I_c	V_c (pu)	V_c (V)	kVAR	I_h	I_{hs}	M_c	M_s
1	860.873	0.994	397.6	342.2831	1451.428	1161.19	0.593121	0.800033
5	237.41	0.137	54.8	13.01007	725.714	1318.33	0.32714	1.816597
7	1268.091	0.209	83.6	106.0124	174.171	1437.66	7.280724	8.254302
11	214.659	0.023	9.2	1.974863	116.114	98.58	1.848692	0.848993
13	151.359	0.013	5.2	0.787067	101.6	49.77	1.489754	0.489862
17	80.862	0.005	2	0.161724	65.314	15.55	1.23805	0.238081
19	68.62	0.004	1.6	0.109792	58.057	10.56	1.181942	0.18189
23	48.654	0.002	0.8	0.038923	43.543	5.11	1.117378	0.117355
25	47.792	0.002	0.8	0.038234	43.543	4.25	1.097582	0.097605
ค่า rms	1578.10	1.03	410.12	464.42	1642.82	2272.84		

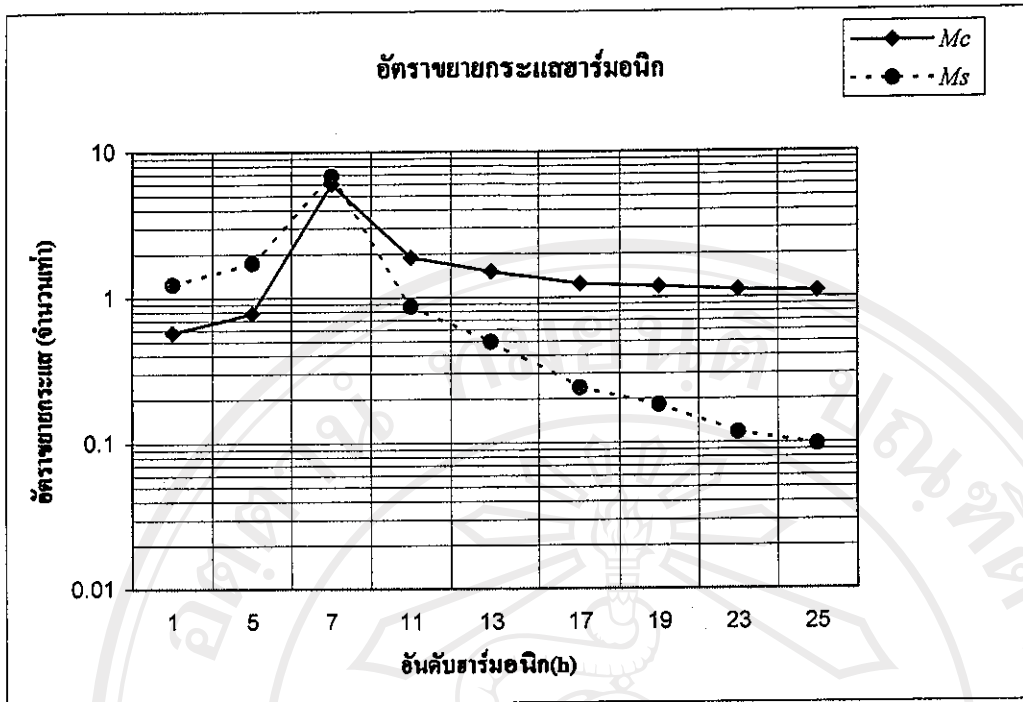
ตารางที่ 4.4 ผลการศึกษาที่อันดับฮาร์มอนิกต่าง ๆ ในกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 20%

Order	I_c	$V_c (pu)$	$V_c (V)$	$kVAR$	I_h	I_{hs}	M_c	M_s
1	570.363	0.988	395.2	225.4075	1460.469	1207.76	0.390534	0.826967
5	125.202	0.043	17.2	2.153474	292.094	417.74	0.428636	1.430156
7	249.783	0.062	24.8	6.194618	175.256	424.78	1.425246	2.423769
11	375.015	0.059	23.6	8.850354	116.837	258.33	3.209728	2.211029
13	201.679	0.027	10.8	2.178133	102.233	99.47	1.972739	0.972974
17	92.357	0.009	3.6	0.332485	65.721	26.64	1.405289	0.40535
19	75.957	0.007	2.8	0.21268	58.419	17.54	1.300211	0.300245
23	52.009	0.004	1.6	0.083214	43.814	8.2	1.187041	0.187155
25	50.557	0.004	1.6	0.080891	43.814	6.74	1.153901	0.153832
ค่า rms	777.34	0.99	397.23	245.49	1511.51	1375.28		

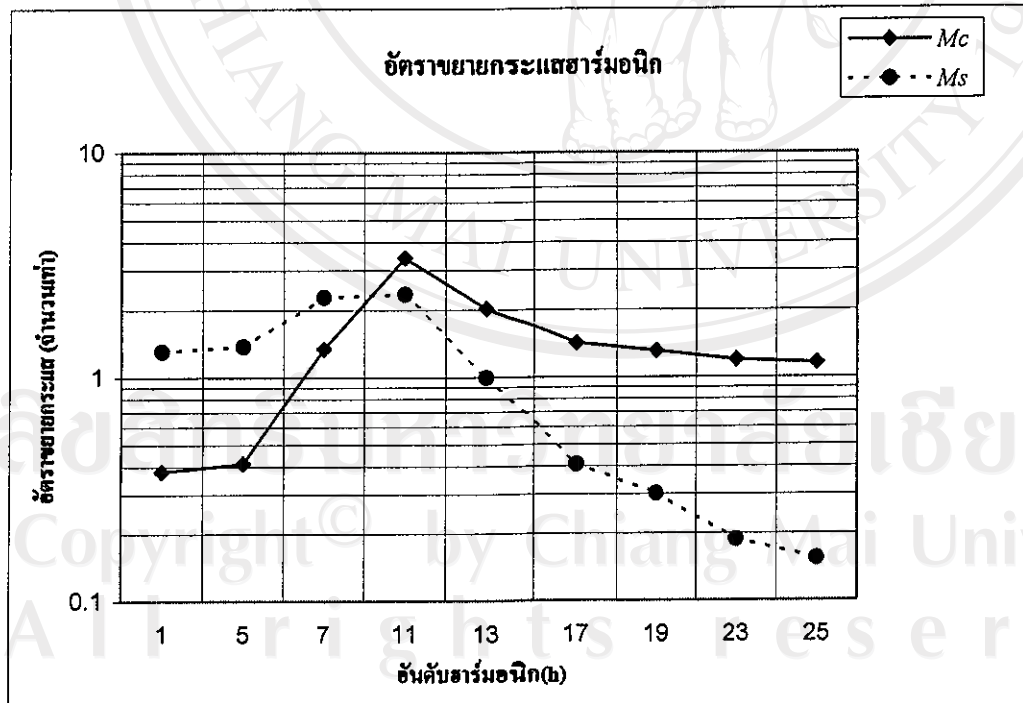
ตารางที่ 4.5 ผลการศึกษาที่อันดับฮาร์มอนิกต่าง ๆ ในกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 10%

Order	I_c	$V_c (pu)$	$V_c (V)$	$kVAR$	I_h	I_{hs}	M_c	M_s
1	283.426	0.982	392.8	111.3297	1469.512	1319.09	0.192871	0.897638
5	51.885	0.036	14.4	0.747144	293.903	345.74	0.176538	1.176375
7	73.421	0.036	14.4	1.057262	176.342	249.72	0.416356	1.416112
11	310.734	0.098	39.2	12.18077	117.561	428.09	2.643172	3.641429
13	4905.764	1.308	523.2	2566.696	102.866	4839.22	47.69082	47.04392
17	156.245	0.032	12.8	1.999936	66.128	90.13	2.362766	1.362963
19	109.211	0.02	8	0.873688	58.781	50.44	1.85793	0.8581
23	64.372	0.01	4	0.257488	44.085	20.29	1.460179	0.460247
25	60.123	0.008	3.2	0.192394	44.085	16.04	1.363797	0.363843
ค่า rms	4929.06	1.64	655.92	2695.33	1520.87	5053.17		

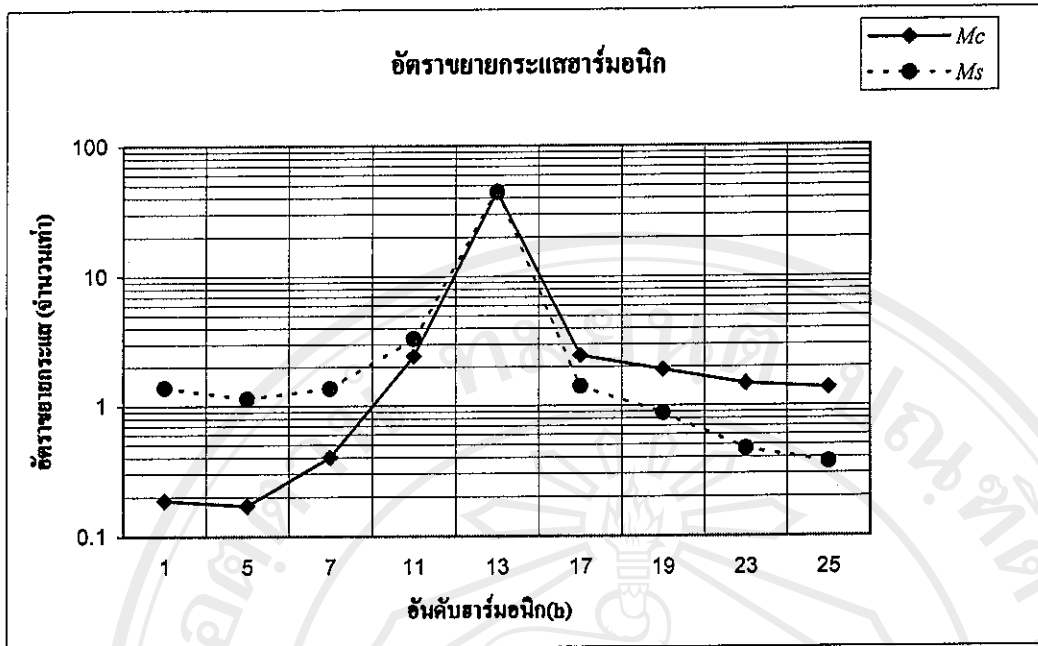
จากตารางที่ 4.3 - 4.5 สามารถเขียนกราฟอัตราขยายกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่คาปาซิเตอร์ (M_c) และ อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้า (M_s) ได้ดังรูปที่ 4.5 - 4.7



รูปที่ 4.5 อัตราการขยายกระแสเข้าสู่คาปาซิเตอร์ (M_c) และ
อัตราขยายกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้า (M_s)
ในกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 30%



รูปที่ 4.6 อัตราการขยายกระแสเข้าสู่คาปาซิเตอร์ (M_c) และ
อัตราขยายกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้า (M_s)
ในกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 20%



รูปที่ 4.7 อัตราการขยายกระแสเข้าสู่คาปาซิเตอร์ (M_c) และ อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้า (M_s) ในกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 10%

เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองกับค่าขีดจำกัดตามมาตรฐาน IEEE Std 1036-1992 ซึ่งได้กำหนดค่าขีดจำกัดของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของคาปาซิเตอร์ ในกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 30%, 20% และ 10% ได้ผลดังตารางที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ ตารางที่ 4.6 ค่ากระแส แรงดัน และ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ กรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 30%

ค่า	I_{rms} [A]	V_{rms} [V]	V_{peak} [V]	kVAR
ค่าพิกัด	866.03	400	565.6	600
ค่าขีดจำกัด	1558.85	440	678.8	810
ค่าที่ได้จากการจำลอง	1578.10	410.12	580.0	464.42

ตารางที่ 4.7 ค่ากระแส แรงดัน และ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ กรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 20%

ค่า	I_{rms} [A]	V_{rms} [V]	V_{peak} [V]	kVAR
ค่าพิกัด	577.35	400	565.6	400
ค่าขีดจำกัด	1039.23	440	678.8	540
ค่าที่ได้จากการจำลอง	777.34	397.23	561.77	245.49

ตารางที่ 4.8 ค่ากระแส แรงดัน และ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ กรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 10%

ค่า	I_{rms} [A]	V_{rms} [V]	V_{peak} [V]	kVAR
ค่าพิกัด	288.68	400	565.6	200
ค่าขีดจำกัด	519.62	440	678.8	270
ค่าที่ได้จากการจำลอง	4929.06	655.2	926.59	2695.33

จากการจำลองทั้ง 3 กรณีพบว่า ในกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 30% จะเกิดเรโซแนนซ์ที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7.4 โดยอัตราการขยายกระแสจะมีค่าสูงถึง 7 - 8 เท่า ที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 (ดังรูปที่ 4.5) และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าต่าง ๆ กับมาตรฐานการใช้งานของคาปาซิเตอร์พบว่ากระแสอาร์เอ็มเอสมีค่าสูงเกินกว่าค่าขีดจำกัดที่กำหนดไว้ ในกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 20% จะเกิดเรโซแนนซ์ที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 9.1 และมีอัตราการขยายกระแสที่ 2 และ 3 เท่าโดยประมาณ ที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 และ 11 ตามลำดับ ในกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 10% พบว่าจะเกิดเรโซแนนซ์ที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 12.9 ในกรณีนี้ พบว่าอัตราการขยายกระแสที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงมาก ๆ เนื่องจากเกิดภาวะเรโซแนนซ์ของฮาร์มอนิกอันดับที่ 13 ซึ่งใกล้เคียงกับอันดับฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ของระบบดังกล่าวที่ฮาร์มอนิกอันดับที่ 12.9 ส่งผลให้ค่ากระแส แรงดัน และพิกัดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าเกินขีดจำกัดการทำงานของคาปาซิเตอร์ (ดังตารางที่ 4.8)

4.2.2 การประเมินค่าตัวประกอบกำลัง ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งคาปาซิเตอร์ และ ระยะเวลาคืนทุน

จากกรณีศึกษา หม้อแปลงขนาด 2000 kVA จ่ายไฟให้กับโหลดไม่เชิงเส้นขนาด 1000 kVA ที่ค่าตัวประกอบกำลัง 0.8 ได้ผลดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ตัวประกอบกำลังและค่าใช้จ่ายในการติดตั้งคาปาซิเตอร์

	กรณี			
	30% Capacitor	20% Capacitor	10% Capacitor	PF = 0.85
ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ใช้ชดเชย [kVAR]	600	400	200	312.6
ตัวประกอบกำลัง	0.89	0.86	0.83	0.85
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งคาปาซิเตอร์ [บาท]	48,480	32,320	16,160	26,058

จากข้อกำหนดของการไฟฟ้า ได้กำหนดอัตราการคิดค่าธรรมเนียมสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทธุรกิจอุตสาหกรรมที่มีค่าตัวประกอบกำลังต่ำดังนี้

“สำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีค่าตัวประกอบกำลัง (ล้าหลัง) ถ้าในรอบเดือนใดผู้ใช้ไฟฟ้าใช้กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเฉลี่ยใน 15 นาทีที่สูงสุด เมื่อคิดเป็นกิโลวาร์ เกินกว่าร้อยละ 61.97 ของความต้องการพลังไฟฟ้าแอกทีฟเฉลี่ยใน 15 นาทีที่สูงสุด เมื่อคิดเป็นกิโลวัตต์แล้ว เฉพาะส่วนที่เกินจะต้องเสียค่าตัวประกอบกำลังในอัตรา กิโลวาร์ละ 14.02 บาท สำหรับการเรียกเก็บเงินค่าไฟฟ้าในรอบเดือนนั้น เศษของกิโลวาร์ ถ้าไม่ถึง 0.5 กิโลวาร์ตัดทิ้ง ตั้งแต่ 0.5 กิโลวาร์ขึ้นไปคิดเป็น 1 กิโลวาร์”

จากข้อกำหนดดังกล่าว หมายความว่า ถ้าหากพิจารณาที่ค่ากำลังไฟฟ้าจริง 100 กิโลวัตต์ (คิดเป็น 100%) ดังนั้นระบบไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ได้ไม่เกิน 61.97 กิโลวาร์ เท่านั้น ถ้าหากผู้ใช้ไฟรายใดทำให้ระบบไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเกินกว่าค่านี้ จะต้องเสียค่าปรับในอัตรา 14.02 บาท/กิโลวาร์ สามารถเขียนใหม่ในรูปของตัวประกอบกำลัง ดังนี้

$$\text{ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (P)} = 100 \text{ กิโลวัตต์}$$

$$\text{ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q)} = 61.97 \text{ กิโลวาร์}$$

$$\tan \theta = \frac{Q}{P} = \frac{61.97}{100}$$

$$\theta = \tan^{-1} 0.6197 = 31.78^\circ$$

$$pf = \cos \theta = \cos(31.78^\circ) = 0.85$$

ดังนั้น สำหรับระบบไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟรายใดที่มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสูงกว่า 0.85 ขึ้นไป จะไม่ต้องเสียค่าปรับรายเดือนในส่วนดังกล่าว

การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน(Payback period)

ระยะเวลาคืนทุน คือ ระยะเวลาที่โครงการใช้ในการจ่ายคืนเงินลงทุนเริ่มต้นของโครงการ ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน(ปี)} = \text{เงินลงทุนเริ่มต้น} / \text{ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้สุทธิเฉลี่ยต่อปี}$$

โดยที่ เงินเริ่มต้นลงทุนประกอบด้วย ค่าอุปกรณ์ ค่าติดตั้งและค่าบริหารโครงการ เป็นต้น

ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้สุทธิเฉลี่ยต่อปี คือ ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้เฉลี่ยต่อปี หลังจากหักค่าใช้จ่ายจากการดำเนินการและการบำรุงรักษาแล้ว(ถ้ามี)

กรณีที่ไม่ติดตั้งคาปาซิเตอร์

สำหรับกรณีระบบที่พิจารณาไม่ได้ติดตั้งคาปาซิเตอร์ จะมีค่าตัวประกอบกำลังเป็น 0.80 พบว่า ถ้าต้องการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังให้มีค่าเท่ากับ 0.85 จะต้องชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเท่ากับ 313 กิโลวาร์ โดยใช้เงินลงทุนเริ่มต้นในการติดตั้งคาปาซิเตอร์เป็นเงิน 26,058 บาท

ในกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งคาปาซิเตอร์จะเสียค่าปรับเป็นจำนวนเงิน $313 \times 14.02 = 4,388.26$ บาท/เดือน และ คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้สุทธิเฉลี่ยต่อปี $= 4,388.26 \times 12 = 52,659.12$ บาท/ปี

เพราะฉะนั้น ระยะเวลาคืนทุนสำหรับการติดตั้งคาปาซิเตอร์เพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังจาก 0.8 เป็น 0.85 คือ

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = 26,058 / 52,659.12 = 0.49 \text{ ปี}$$

สำหรับกรณีติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 10% ของพิกัดหม้อแปลง จะชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบเท่ากับ 200 กิโลวาร์ ทำให้ตัวประกอบกำลังมีค่าเป็น 0.83 โดยเสียค่าใช้จ่ายในการลงทุนติดตั้งคาปาซิเตอร์เป็นเงิน 16,160 บาท และคิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้เทียบกับกรณีที่ไม่ติดตั้งคาปาซิเตอร์เป็นจำนวนเงิน $200 \times 14.02 = 2,804$ บาท/เดือนและคิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้สุทธิเฉลี่ยต่อปี $= 2,804 \times 12 = 33,648$ บาท/ปี มีระยะเวลาคืนทุน เป็น

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = 16,160 / 33,648 = 0.48 \text{ ปี}$$

อย่างไรก็ตามในกรณีที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์ขนาด 10% นี้ ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าเป็น 0.83 กล่าวคือตัวประกอบกำลังยังไม่ถึง 0.85 ยังคงต้องเสียค่าปรับเป็นเงิน $113 \times 14.02 = 1,584.26$ บาท/เดือน ดังนั้น สามารถคำนวณระยะเวลาคืนทุนของการติดตั้งคาปาซิเตอร์เทียบกับกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งคาปาซิเตอร์ได้ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ระยะเวลาคืนทุนของการติดตั้งคาปาซิเตอร์ในแต่ละกรณีเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งคาปาซิเตอร์

	กรณี				ติดตั้งวงจรกรองดีจูน
	30% Capacitor	20% Capacitor	10% Capacitor	PF = 0.85	
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งคาปาซิเตอร์ [บาท]	48,480	32,320	16,160	26,058	258,000
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)	0.92	0.61	0.48	0.49	4.9

4.2.3 การประเมินกำลังสูญเสียของหม้อแปลงที่ลดลงจากการติดตั้งคาปาซิเตอร์

จากกรณีศึกษาสามารถคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียที่ลดลงได้เทียบกับกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งคาปาซิเตอร์ โดยใช้สมการที่(2.10) ได้ผลดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่ากำลังสูญเสียที่ลดลงเนื่องจากติดตั้งคาปาซิเตอร์ในแต่ละกรณี

	กรณี				ติดตั้งวงจรกรองดีจูน
	30% Capacitor	20% Capacitor	10% Capacitor	PF = 0.85	
ค่ากำลังสูญเสียของหม้อแปลงที่ลดลง[%]	20	14.22	7.56	11.42	20