การวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์มอนิกเพื่อแก้ปัญหาเศรษฐศาสตร์ในระบบไฟฟ้ากำลัง
Analysis of Impacts Harmonic to Solve Economics in Power System

นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ
อรุณ ชลังสุทธิ์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อเรื่อง : การวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์มอนิกเพื่อแก้ปัญหาเศรษฐศาสตร์ในระบบไฟฟ้ากำลัง
ผู้วิจัย : ผศ.ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร
ผศ.อรุณ ชลังสุทธิ์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร
พ.ศ. : 2559

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประเมินประสิทธิภาพเชิงเทคนิคและความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์สำหรับการผสมผสานอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม จากสภาพการณ์ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ถูกนำมาใช้งานในระบบไฟฟ้าอย่างกว้างขวาง เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงกว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าในอดีต แต่อย่างไรก็ตามผลของการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ก็ได้สร้างปัญหาให้กับระบบไฟฟ้าเช่นกัน โดยปัญหาที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์คือการสร้างกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบไฟฟ้าซึ่งนำไปสู่ความเสียหายกับอุปกรณ์ไฟฟ้ารวมไปถึงเสถียรภาพของระบบ สำหรับแนวทางการแก้ไขปัญหาในปัจจุบันมีด้วยกันหลายวิธีซึ่งใช้งบประมาณในการลงทุนแตกต่างกันไป เพราะฉะนั้นการกำหนดแนวในทางการแก้ไขปัญหาจะต้องคำนึงถึงความถูกต้องทางด้านวิศวกรรม และความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อหาแนวทางการแก้ไขปัญหาที่สามารถตอบโจทย์ได้ตามเงื่อนไขดังกล่าว จึงได้จัดทำวิทยานิพนธ์นี้ขึ้นโดยจะจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแต่ละชนิดในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิกด้วยวิธีการผสมผสานอุปกรณ์ในรูปแบบต่าง ๆ โดยประยุกต์สมการพื้นฐานทางไฟฟ้า คณิตศาสตร์ และการวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุน มาพัฒนาโปรแกรมพื้นฐานเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการประเมิน โดยผลที่ได้จากการประเมินจะชี้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการแก้ไขปัญหาการรบกวนฮาร์มอนิกของอุปกรณ์แต่ละชนิดที่ถูกติดตั้งด้วยรูปแบบต่าง ๆ รวมไปถึงจุดคุ้มทุนสำหรับการลงทุนซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการลงทุนได้

Title : Analysis of Impacts Harmonic to Solve Economics in Power System
Researcher : Assistant Professor Dr.Nattachote Rugthaicharoencheep,
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, RMUTP
Assistant Professor Aroon Chalangsut, Department of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering, RMUTP
Year : 2016

Abstract

This research proposes technical performance evaluation and economic decence for the combination of harmonic correction devices in Industry. Currently, an electronic device is popularly applied in power network. Although, it is a higher performance device than the existing device, it still causes the power quality issues and then network failure. Especially, harmonic disturbance in the network, it is a harmonic source that generates harmonic current into the network. Many types and solutions are available in the present time, therefore the suitable and optimal financial solution must be considered. A network model for the analysis of harmonic correction devices, suitable solutions and optimal financial has been established in the simulation software that bases on the power and Break Even Point (BEP) equations. The results of analysis shown that the performance of harmonic correction devices, suitable solution and BEP of investment in match to the using of a detuned filter bank and an active harmonic filter (case 8), thus these information will be valued for the end-user.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการวิเคราะห์ผลกระทบของฮาร์มอนิกเพื่อแก้ปัญหาเศรษฐศาสตร์ในระบบไฟฟ้ากำลังนี้ ได้รับทุนอุดหนุน จากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณผู้เกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวนามในที่นี้ ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดมา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยในครั้งนี้ ล้วนเป็นผลมาจากความกรุณาทุกท่าน คณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบบูชาแด่คณาจารย์ทุกท่านที่ประสาทวิชาความรู้แก่คณะผู้วิจัย

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	5
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	6
1.4 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย	7
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 บทนำ	9
2.2 ผลกระทบและแนวทางแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง	9
2.3 อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน	12
2.4 อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูน	20
2.5 อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ	30
2.6 กรณีศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังของ IEEE (IEEE node test feeder)	40
2.7 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับการลงทุนในงานวิศวกรรมไฟฟ้า	41
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 บทนำ	44
3.2 เครื่องมือที่ใช้	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 กรณีศึกษาและการวิเคราะห์	
4.1 บทนำ	55
4.2 คุณสมบัติของอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้า	55
4.3 กรณีศึกษาสำหรับการวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรม และด้านเศรษฐศาสตร์	57
บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	
5.1 บทนำ	93
5.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	93
5.3 การอภิปรายผล	97
5.4 ข้อเสนอแนะ	99
บรรณานุกรม	101
ภาคผนวก	105
คณะผู้วิจัย	115

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิก	31
3.1	ข้อมูลจากกรณีศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังของ IEEE จำนวน 13 โนด	51
3.2	ข้อมูลพิกัดของอุปกรณ์ และภาระทางไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการศึกษา	51
4.1	เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำงานของอุปกรณ์แต่ละชนิด	56
4.2	กรณีศึกษาสำหรับการวิเคราะห์การแก้ไขปัญหาการรบกวนฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง	57
5.1	สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านวิศวกรรม และด้านเศรษฐศาสตร์สำหรับอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแต่ละชนิด	96

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	รายได้เฉลี่ยของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ทั่วโลก	1
1.2	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาประยุกต์ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง	2
1.3	รูปคลื่นสัญญาณของอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ขนาด 1.1 กิโลวัตต์ ที่กระแสโหลดเต็มพิกัด โดยตรวจวัดจากเครื่องมือวัด HIOKI 3169	3
1.4	ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง	4
1.5	อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิก	5
1.6	กรอบแนวความคิดของวิทยานิพนธ์	7
2.1	รูปคลื่นสัญญาณของฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ	9
2.2	รูปคลื่นสัญญาณของอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์	10
2.3	ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง	11
2.4	อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง	11
2.5	อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูน	12
2.6	ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงดันต่ำ	14
2.7	ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ	14
2.8	ความต้านทานรวมในระบบไฟฟ้ากำลัง	15
2.9	อุปกรณ์ตัดต่อวงจร	16
2.10	อุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจร	16
2.11	ระบบไฟฟ้ากำลังตัวอย่าง	17
2.12	กระแสฮาร์มอนิกเมื่อต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้า 9 ชุดย่อย	18
2.13	กระแสฮาร์มอนิกเมื่อต่อตัวกรองดีจูน 9 ชุดย่อย	18
2.14	กระแสฮาร์มอนิกเมื่อต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้า 3 ชุดย่อย	19
2.15	กระแสฮาร์มอนิกเมื่อต่อตัวกรองดีจูน 3 ชุดย่อย	19
2.16	อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูน	21
2.17	ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงดันต่ำ	23
2.18	ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ	23
2.19	เปรียบเทียบความต้านทานรวมของระบบที่มีตัวกรองดีจูน และจูน	24
2.20	อุปกรณ์ตัดต่อวงจร	25
2.21	อุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจร	25
2.22	ระบบไฟฟ้ากำลังตัวอย่าง	26
2.23	กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านตัวกรองจูนแต่ละชุด สำหรับกรณีที่ 1	27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.24	แรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับกรณีที่ 1	27
2.25	กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านตัวกรองจูนแต่ละชุด สำหรับกรณีที่ 2	28
2.26	แรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับกรณีที่ 2	28
2.27	กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านตัวกรองจูนลำดับที่ 5 สำหรับกรณีที่ 3	29
2.28	แรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับกรณีที่ 3	29
2.29	อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ	31
2.30	การชดเชยกระแสฮาร์มอนิก	32
2.31	ตัวเก็บประจุไฟฟ้า	33
2.32	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง	34
2.33	ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ	34
2.34	ชุดตัวกรอง	35
2.35	อุปกรณ์ควบคุม	35
2.36	หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า	36
2.37	รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ	37
2.38	ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษา	38
2.39	ผลการตรวจวัดแรงดัน และกระแสไฟฟ้าของระบบ กรณีก่อนติดตั้งอุปกรณ์	38
2.40	ระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ	39
2.41	ผลการตรวจวัดแรงดัน และกระแสไฟฟ้าของระบบ กรณีหลังติดตั้ง	39
2.42	กรณีศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังของ IEEE 13 โนด	41
2.43	สรุปข้อมูลการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของโครงการ	43
3.1	อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	45
3.2	อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน	46
3.3	อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูน	48
3.4	อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ	50
3.5	กรณีศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังของ IEEE จำนวน 13 โนด	50
3.6	ภาระทางไฟฟ้าในแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลัง	52
3.7	กราฟผลการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของโครงการ	53
4.1	ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 1	58
4.2	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับกรณีศึกษาที่ 1	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.3	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ สำหรับกรณีศึกษาที่ 1	59
4.4	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า สำหรับกรณีศึกษาที่ 1	59
4.5	จุดคุ้มทุนสำหรับการลงทุนในกรณีศึกษาที่ 1	60
4.6	ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 2	61
4.7	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับกรณีศึกษาที่ 2	61
4.8	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ สำหรับกรณีศึกษาที่ 2	62
4.9	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน สำหรับกรณีศึกษาที่ 2	62
4.10	จุดคุ้มทุนสำหรับการลงทุนในกรณีศึกษาที่ 2	63
4.11	ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 3	64
4.12	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับกรณีศึกษาที่ 3	64
4.13	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ สำหรับกรณีศึกษาที่ 3	65
4.14	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูน สำหรับกรณีศึกษาที่ 3	65
4.15	จุดคุ้มทุนสำหรับการลงทุนในกรณีศึกษาที่ 3	66
4.16	ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 4	67
4.17	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับกรณีศึกษาที่ 4	67
4.18	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ สำหรับกรณีศึกษา สำหรับกรณีศึกษาที่ 4	68
4.19	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ สำหรับกรณีศึกษาที่ 4	68
4.20	จุดคุ้มทุนสำหรับการลงทุนในกรณีศึกษาที่ 4	69
4.21	ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 5	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.22	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับกรณีศึกษาที่ 5	71
4.23	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ สำหรับกรณีศึกษาที่ 5	71
4.24	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า สำหรับกรณีศึกษาที่ 5	72
4.25	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน สำหรับกรณีศึกษาที่ 5	72
4.26	จุดคุ้มทุนสำหรับการลงทุนในกรณีศึกษาที่ 5	73
4.27	ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 6	74
4.28	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับกรณีศึกษาที่ 6	74
4.29	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ สำหรับกรณีศึกษาที่ 6	75
4.30	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า สำหรับกรณีศึกษาที่ 6	75
4.31	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูน สำหรับกรณีศึกษาที่ 6	76
4.32	จุดคุ้มทุนสำหรับการลงทุนในกรณีศึกษาที่ 6	76
4.33	ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 7	77
4.34	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับกรณีศึกษาที่ 7	78
4.35	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ สำหรับกรณีศึกษาที่ 7	78
4.36	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้า สำหรับกรณีศึกษาที่ 7	79
4.37	จุดคุ้มทุนสำหรับการลงทุนในกรณีศึกษาที่ 7	80
4.38	ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 8	81
4.39	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับกรณีศึกษาที่ 8	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.40	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ สำหรับกรณีศึกษาที่ 8	82
4.41	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน สำหรับกรณีศึกษาที่ 8	82
4.42	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพสำหรับกรณีศึกษาที่ 8	83
4.43	จุดคุ้มทุนสำหรับการลงทุนในกรณีศึกษาที่ 8	83
4.44	ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 9	85
4.45	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับกรณีศึกษาที่ 9	85
4.46	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ สำหรับกรณีศึกษาที่ 9	86
4.47	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสำหรับกรณีศึกษาที่ 9	86
4.48	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน สำหรับกรณีศึกษาที่ 9	87
4.49	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูน สำหรับกรณีศึกษาที่ 9	87
4.50	จุดคุ้มทุนสำหรับการลงทุนในกรณีศึกษาที่ 9	88
4.51	ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 10	89
4.52	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับกรณีศึกษาที่ 10	89
4.53	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ สำหรับกรณีศึกษาที่ 10	90
4.54	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสำหรับกรณีศึกษาที่ 10	90
4.55	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน สำหรับกรณีศึกษาที่ 10	91
4.56	รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพสำหรับกรณีศึกษาที่ 10	91

สารบัญรูป (ต่อ)

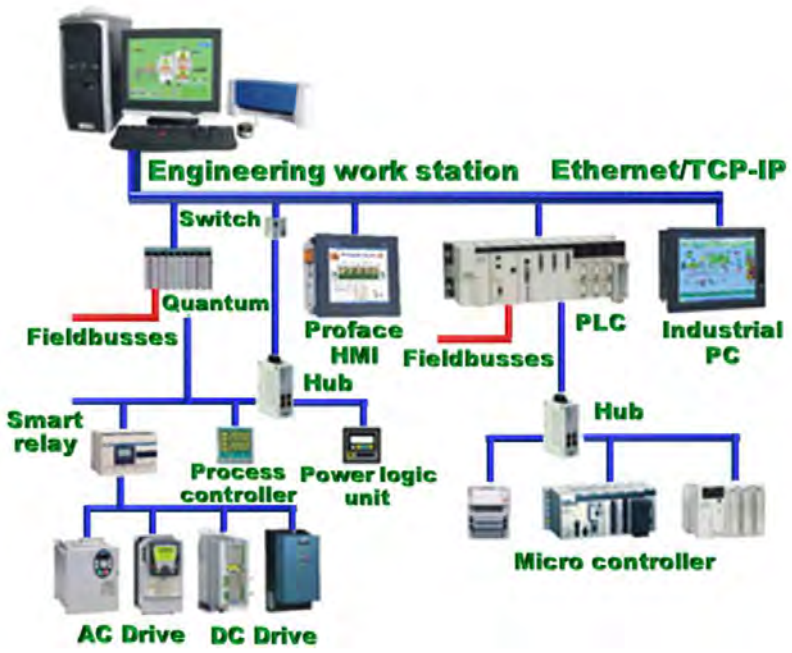
รูปที่		หน้า
4.57	จุดคุ้มทุนสำหรับการลงทุนในกรณีศึกษาที่ 10	92
5.1	การประเมินผลทางด้านวิศวกรรม	94
5.2	การประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ กรณีลงทุนโดยตรง	95
5.3	การประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ กรณีลงทุนผ่านสินเชื่อ	95

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา

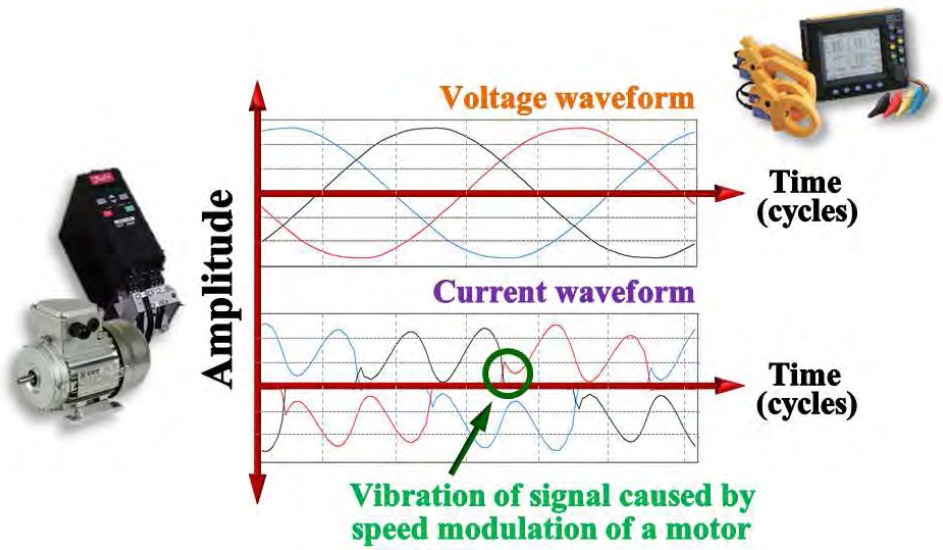
ปัจจุบันแนวโน้มในการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังมีทิศทางที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีความสามารถที่มากกว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าในอดีตหลายอย่างด้วยกัน ยกตัวอย่าง เช่น มีความรวดเร็ว ความถูกต้อง และความแม่นยำในการทำงาน เป็นต้น ซึ่งกล่าวได้ว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงมากกว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าในอดีต อีกทั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยังมีขนาดเล็ก และใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับการควบคุมทำงานของอุปกรณ์น้อยมากเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในอดีต ด้วยเหตุนี้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อทดแทนอุปกรณ์ไฟฟ้าเดิมทั้งในภาคครัวเรือน และภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการทำงานภายในโรงงานอุตสาหกรรม รวมไปถึงบทบาทสำคัญในการบริหารจัดการพลังงานในด้านของ การลดปริมาณการใช้พลังงาน การใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพ แนวโน้มในการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถพิจารณาได้จากข้อมูลรายได้เฉลี่ยของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ทั่วโลกตามที่แสดงใน รูปที่ 1.1

รูปที่ 1.1 รายได้เฉลี่ยของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ทั่วโลก



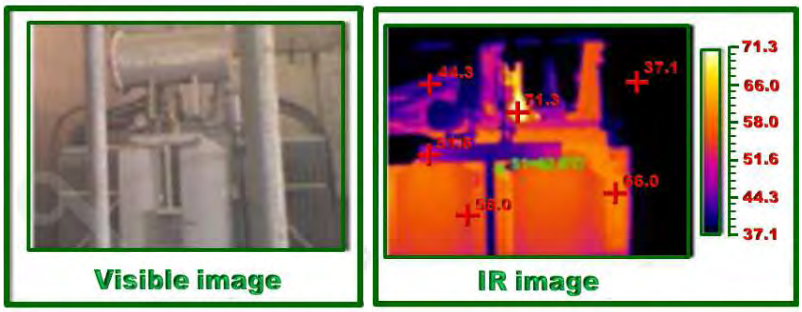
รูปที่ 1.2 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาประยุกต์ใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง

นอกจากประสิทธิภาพในการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และประโยชน์ที่ได้รับจากการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังตามที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ในทางกลับกันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังด้วย เนื่องจากลักษณะการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นกล่าวคือ มีลักษณะรูปคลื่นสัญญาณของกระแส และแรงดันไฟฟ้าที่ไม่เป็นสัดส่วนกันตามที่แสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณเช่นนี้จะก่อให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 1.3 รูปคลื่นสัญญาณของอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ขนาด 1.1 กิโลวัตต์ ที่กระแสโหลดเต็มพิกัด โดยตรวจวัดจากเครื่องมือวัด HIOKI 3169

เมื่อกระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีค่าความต้านทานรวมของระบบอยู่ จะทำให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งเป็นไปตามกฎของโอห์ม โดยแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมของระบบเกิดความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณ ทำให้เกิดการขยายตัวของกระแส และแรงดันฮาร์มอนิกไปยังอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่อร่วมอยู่ภายในระบบไฟฟ้ากำลัง ส่งผลให้เกิดกำลังสูญเสีย ความผิดพลาดในการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือเกิดความเสียหายขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบยกตัวอย่างเช่น การคลาดเคลื่อนในการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง เครื่องจักรกลไฟฟ้า และสายตัวนำไฟฟ้าเกิดความร้อนสูง การระเบิดของชุดตัวเก็บประจุในอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า นอกจากนี้ผลกระทบจากการรบกวนฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังยังอาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพ และคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังอีกด้วย ตัวอย่างของผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการรบกวนฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังต่ออุปกรณ์ที่ต่อร่วมอยู่ในระบบตามที่แสดงในรูปที่ 1.4

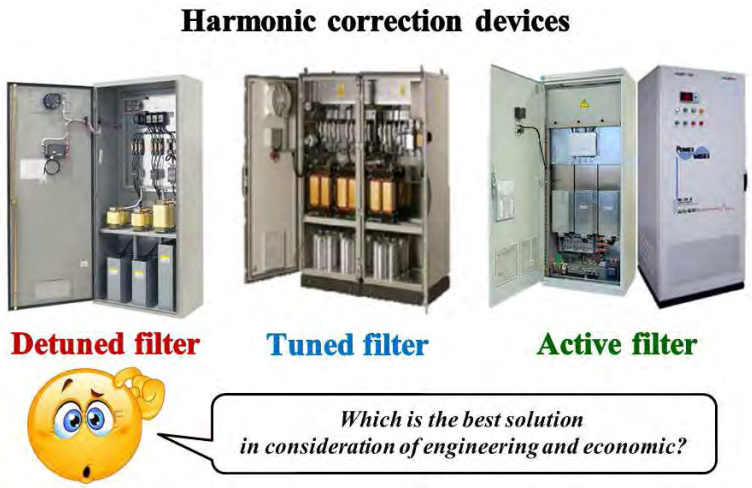


ก) การเกิดความร้อนสูงที่หม้อแปลงกำลังไฟฟ้า

ข) การระเบิดของตัวเก็บประจุในอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

รูปที่ 1.4 ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในปัจจุบันแนวทางการแก้ไขปัญหาการรบกวนฮาร์มอนิกมีมากมายหลากหลายวิธี เช่น การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบปรับจูนคลื่นเดียว (Single Tuned Filter) โดยจำแนกออกได้สองชนิด คือ ตัวกรองชนิดดีจูน (Detuned Filter) และตัวกรองชนิดจูน (Tuned Filter) รวมไปถึงการประยุกต์นำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้ในการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อช่วยลดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบเรียกว่าอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ (Active Filter) รูปแบบ และโครงสร้างของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิก ชนิดต่าง ๆ ที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันสามารถพิจารณาได้ตามที่แสดงในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิก

เนื่องจากวิธีการแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีตามที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ดังนั้นเพื่อเป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแต่ละชนิด และแสดงผลที่เกิดขึ้นต่อระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีการต่ออุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกชนิดต่าง ๆ เข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง รวมไปถึงการวิเคราะเชิงเศรษฐศาสตร์ในการพิจารณาเลือกใช้อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแต่ละชนิด จึงได้จัดทำงานวิจัยนี้ขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกให้มีความเหมาะสมกับการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ทั้งเชิงวิศวกรรม และเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยการออกแบบจะเป็นไปตามมาตรฐานทางด้านฮาร์มอนิกที่กำหนดไว้ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง และปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นการศึกษา และวิเคราะห์ผลกระทบของการรบกวนฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง
2. เพื่อวิเคราะห์ผลของการแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง จากการใช้อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบปรับจูนคลื่นเดียวชนิดดีจูน (Detuned Filter) และจูน (Tuned Filter) รวมไปถึงอุปกรณ์กรองกระแสฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ (Active Filter)
3. เพื่อวิเคราะห์ และประเมินหาความเหมาะสมทางด้านทางวิศวกรรมประกอบด้วย ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และการรบกวนฮาร์มอนิก และทางด้านเศรษฐศาสตร์ จะพิจารณาค่าปรับจากค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบต่ำกว่าเกณฑ์ที่การไฟฟ้ากำหนด เป็นแนวทางสำหรับการเลือกใช้อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิก
4. เป็นการนำเอาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปมาปรับปรุง ประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อมีการรบกวนฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง และผลจากการเชื่อมต่ออุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกชนิดต่างๆ เข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนของฮาร์มอนิก

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ทำการวิเคราะห์ผลกระทบของการรบกวนฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 400 โวลต์

2. ระบบไฟฟ้ากำลังที่ทำการวิเคราะห์จะพิจารณาเฉพาะระบบไฟฟ้ากำลังในฝั่งทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลังไฟฟ้าจำนวนหนึ่งลูก ภายในโรงงานอุตสาหกรรมหนึ่งแห่งเท่านั้น โดยไม่พิจารณาผลกระทบจากหม้อแปลงกำลังไฟฟ้า หรือโรงงานอุตสาหกรรมอื่น

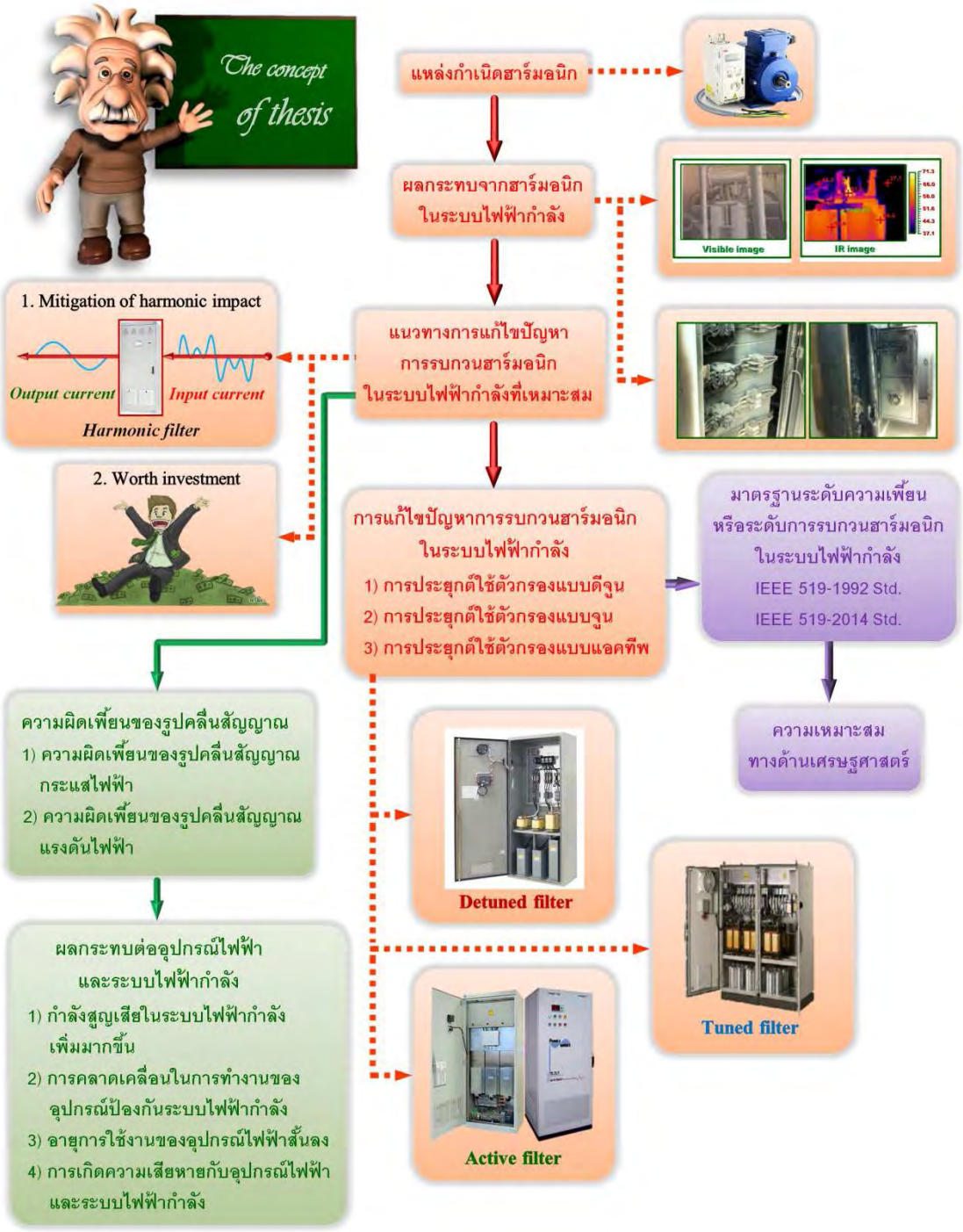
3. อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกภายในระบบไฟฟ้ากำลังที่ทำการวิเคราะห์ จะพิจารณาเป็นอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์สามเฟสชนิดไฟฟ้ากระแสสลับที่มีการควบคุมแบบ 6 พัลส์

4. ลำดับของฮาร์มอนิกที่ทำการวิเคราะห์จะพิจารณาลำดับของฮาร์มอนิกที่เป็นเลขคี่ โดยเริ่มจากลำดับที่ 3 จนถึงลำดับที่ 19 เพื่อให้สอดคล้องกับข้อกำหนดของการไฟฟ้า

5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพ และประเมินความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรมประกอบด้วย ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และการรบกวนฮาร์มอนิก และทางด้านเศรษฐศาสตร์ จะพิจารณาค่าปรับจากค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบต่ำกว่าเกณฑ์ ในการแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกในระบบด้วยอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบปรับจูนคลื่นเดียวชนิดดีจูน และจูน รวมไปถึงอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ

6. ในการวิเคราะห์จะทำการสร้างแบบจำลองขึ้นในโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป เพื่อใช้ในการประมวลผล รวมไปถึงการแสดงผลของการวิเคราะห์ในรูปแบบของตารางข้อมูล และกราฟเส้น

1.4 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย



รูปที่ 1.6 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงผลกระทบของการรบกวนฮาร์มอนิกที่มีต่อระบบไฟฟ้ากำลัง
2. มีความรู้ความเข้าใจถึงประสิทธิภาพในการแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกชนิดต่าง ๆ และสามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแต่ละชนิดได้
3. สามารถเลือกใช้อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกชนิดต่าง ๆ ให้มีความเหมาะสมทางด้านทางวิศวกรรม และทางด้านเศรษฐศาสตร์ ในการแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังได้
4. ได้แบบจำลองที่สร้างขึ้นในโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษา รวมถึงการวิเคราะห์ผลกระทบของการรบกวนฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง และใช้เป็นแนวทางในการศึกษาเพื่อเลือกใช้อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกให้มีความเหมาะสมกับการแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังได้

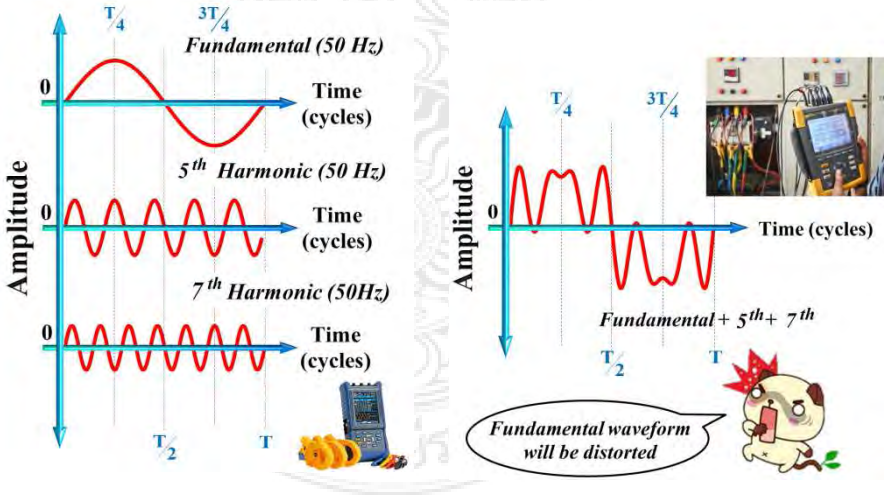
บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทที่ 2 ของวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบด้วย เนื้อหาทั้งหมด 6 ส่วนด้วยกันคือ ผลกระทบ และแนวทางการแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูน และจูน อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ กรณีศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังของ IEEE จำนวน 13 โนด (IEEE 13 Node Test Feeder) การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับการลงทุนในงานวิศวกรรมไฟฟ้า โดยมีรายละเอียด ของเนื้อหาดังนี้

2.2 ผลกระทบและแนวทางแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง

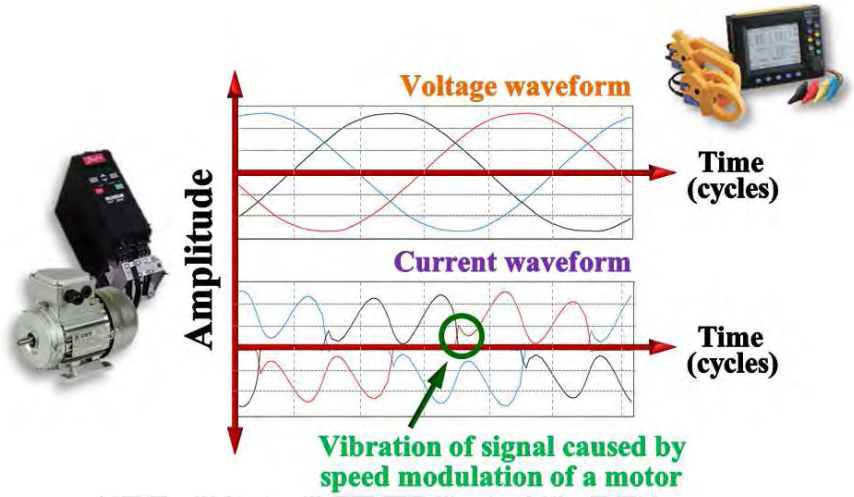
(วิบูลย์ 2539, ไชยยะ 2554) ฮาร์มอนิก คือ ส่วนประกอบของสัญญาณ หรือปริมาณรายคาบใด ๆ มีความถี่มากกว่าความถี่มูลฐานของระบบเป็นจำนวนทวีคูณ โดยฮาร์มอนิกถือเป็นปรากฏการณ์ทางด้านคุณรูปที่กำลังไฟฟ้ารูปแบบหนึ่ง ที่ถูกจัดให้อยู่ในปรากฏการณ์ทางด้านความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณ รูปคลื่นสัญญาณของฮาร์มอนิกตามที่แสดงในรูปที่ 2.1



(ก) (ข)

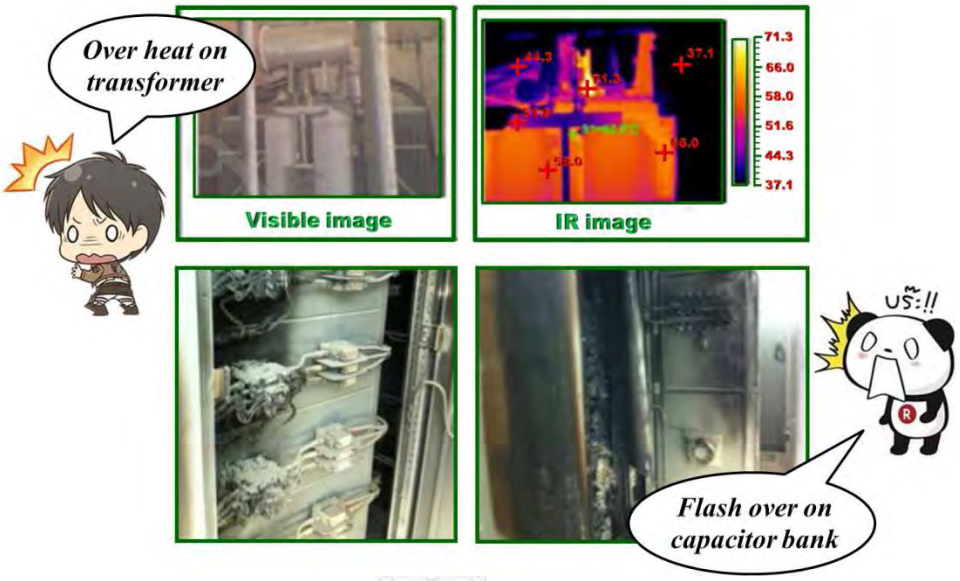
รูปที่ 2.1 รูปคลื่นสัญญาณของฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ

จากรูปคลื่นสัญญาณฮาร์มอนิกที่แสดงในรูปที่ 2.1 (ก) เมื่อรวมเข้ากับสัญญาณที่ความถี่มูลฐานแล้ว จะทำให้รูปคลื่นสัญญาณที่ความถี่มูลฐานมีความผิดเพี้ยนไปจากเดิม และความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณจะขึ้นอยู่กับปริมาณของฮาร์มอนิกที่มีในระบบไฟฟ้ากำลัง รูปคลื่น สัญญาณที่มีความผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากการรบกวนฮาร์มอนิกสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2.1 (ข) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง คือ อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำงานในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นยกตัวอย่างเช่น บัลลาสต์อิเลิกทรอนิกส์ สวิตซ์ชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย เครื่องปรับอากาศชนิดอินเวอร์เตอร์ และอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ เป็นต้น รูปคลื่นสัญญาณของอุปกรณ์ไฟฟ้า ที่ทำงานในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นพิจารณาได้ตามที่แสดงรูปที่ 2.2



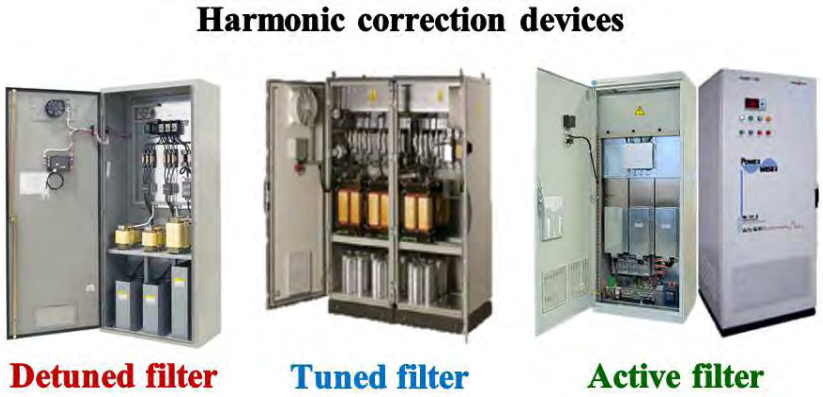
รูปที่ 2.2 รูปคลื่นสัญญาณของอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์

ลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณที่ไม่เป็นเชิงเส้นนี้ จะก่อให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง ทำให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมของระบบเกิดความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณ ทำให้เกิดการขยายตัวของกระแส และแรงดันฮาร์มอนิกไปยังอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่อร่วมอยู่ภายในระบบไฟฟ้ากำลัง ส่งผลให้เกิดกำลังสูญเสีย ความผิดพลาดในการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือเกิดความเสียหายขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบยกตัวอย่างเช่น การคลาดเคลื่อนในการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้ากำลัง เครื่องจักรกลไฟฟ้า และสายตัวนำไฟฟ้าเกิดความร้อนสูง การระเบิดของชุดตัวเก็บประจุในอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า นอกจากนี้ผลกระทบจากการรบกวนฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังยังอาจส่งผลกระทบต่อเสถียรรูปที่ของระบบไฟฟ้ากำลังอีกด้วย



รูปที่ 2.3 ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

แนวทางสำหรับการแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกในปัจจุบันมีมากมายหลากหลายวิธี เช่น การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบปรับจูนคลื่นเดียวโดยจำแนกออกได้สองชนิด คือ ตัวกรองดีจูนและตัวกรองจูน รวมไปถึงการประยุกต์นำเอาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมาใช้ในการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อช่วยลดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบเรียกว่าอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีฟ โครงสร้างของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกชนิดต่าง ๆ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.4

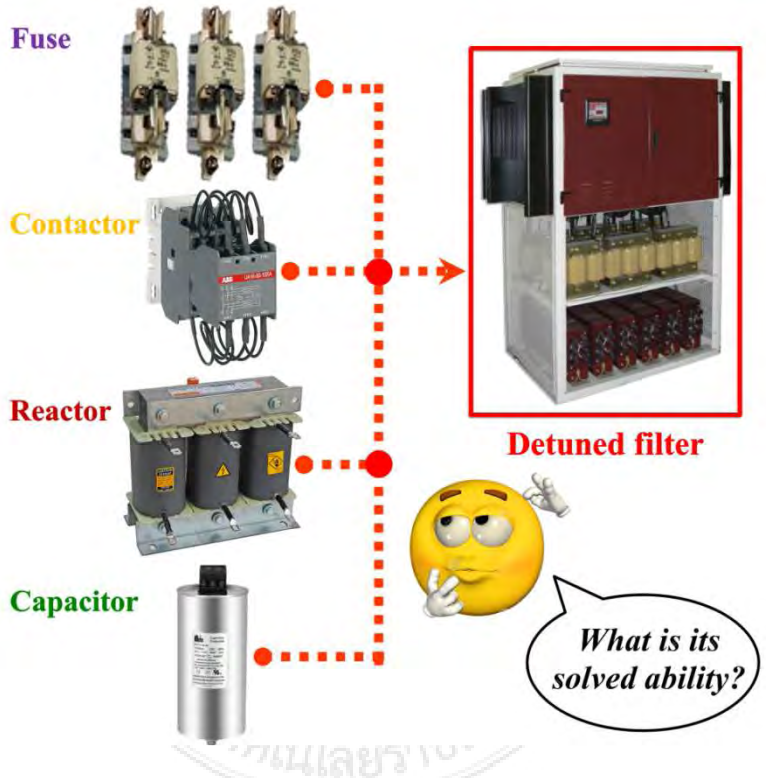


รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง

2.3 อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูน (Detuned Filter)

2.3.1 หลักการ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

(IEC Standard 61642 - 1997, ไชยยะ 2554, Dugan 2002) อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูน (Detuned Filter) คืออุปกรณ์ที่ใช้ในแก้ไขปัญหาเรโซแนนซ์ (Resonance) ในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งถือว่าเป็นวิธีการที่มีประสิทธิรูปที่ในการแก้ไขปัญหาได้ในระดับหนึ่ง และหากพิจารณาในเชิงเศรษฐศาสตร์จะพบว่ามีค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำ เนื่องจากอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูนใช้เพียงตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ (Reactor) ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitor) แต่ละชุดย่อย (Step) ที่อยู่ในอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor Correction Device) ตามที่แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูน

จากรูปที่ 2.5 จะพบว่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เป็นส่วนประกอบภายในอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณ ฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูนมีลักษณะคล้ายกันกับอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ทุกประการเพียงแต่จะมีการเพิ่มตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับต่ออนุกรมเข้าไปกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าเพื่อทำให้อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสามารถทำงานได้ในสภาวะที่มีการรบกวนฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิก แบบตัวกรองดีจูนมีดังต่อไปนี้

2.3.1.1 หน้าที่การทำงานของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูน จะมีหน้าที่การทำงานเช่นเดียวกันกับอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าทุกประการ เพียงแต่จะมีความสามารถในการใช้งานกับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิกได้ดีในระดับหนึ่ง หน้าที่ของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูนสามารถสรุปได้ดังนี้

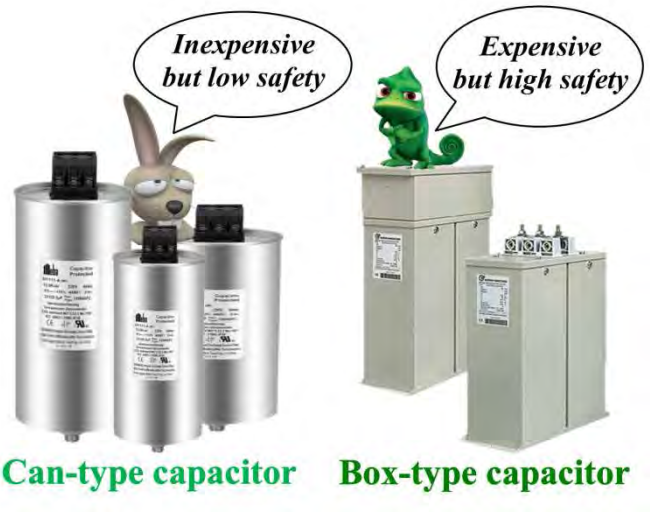
1. ชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับ (Reactive Power Compensation) ให้กับระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) ในระบบไฟฟ้ากำลัง ลดกำลังสูญเสีย (Power Loss) ที่เกิดขึ้นในระบบ เพิ่มความสามารถในการจ่ายโหลดของหม้อแปลงไฟฟ้า รวมไปถึงการลดค่าปรับจากการไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นจากการที่ในระบบมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าเกณฑ์

2. หลีกเลี่ยงการเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์แบบขนาน (Avoidance of The Parallel Resonance) ที่เกิดขึ้นจาการขนานตัวเก็บประจุไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความเพี้ยนฮาร์มอนิก ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการขยายตัวของแรงดัน และกระแสฮาร์มอนิก ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์และเสถียรรูปที่ของระบบไฟฟ้ากำลัง

3. ลดระดับความเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิก (Reducing Harmonic Voltage Disturbance) ที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลัง (Common Coupling Point ; CCP) โดยการกรองเอากระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่สูงกว่าจุดปรับจูนฮาร์มอนิกบางส่วนออกจากระบบไฟฟ้ากำลังมากักไว้ที่ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับแล้วเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อนออกไป

2.3.1.2 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูนจะมีอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ประกอบอยู่ภายในคล้ายกันกับอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าทุกประการ แต่จะมีการเพิ่มตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าตามที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น โดยข้อมูลของส่วนประกอบต่าง ๆ ในอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูน มีรายละเอียดดังนี้

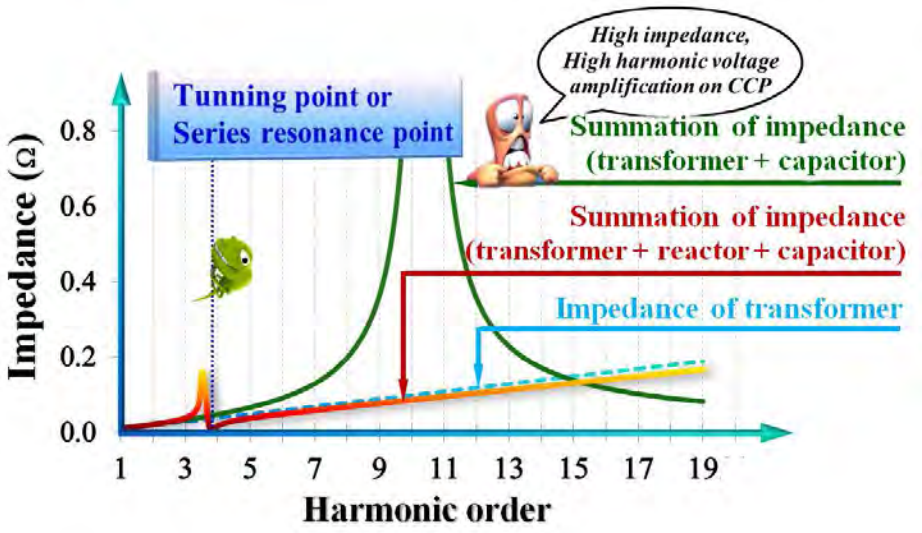
1. ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบพื้นฐานของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณ ฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูนซึ่งควรจะต้องมีการศึกษาอย่างละเอียดสำหรับการออกแบบเพื่อให้มีความเหมาะสม และปลอดภัยในการใช้งาน เช่น พิกัดแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้าต้องคำนึงถึงผลของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งทำให้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าได้รับแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น และกระแสไฟฟ้าใช้งานของตัวเก็บประจุไฟฟ้าซึ่งมักจะประกอบด้วยกระแสไฟฟ้าใช้งานที่ความถี่มูลฐาน (Fundamental) และกระแสฮาร์มอนิกบางส่วนในระบบที่ไหลเข้าสู่ตัวเก็บประจุไฟฟ้าในกรณีที่ในระบบมีกระแสฮาร์มอนิกสูงมาก



รูปที่ 2.6 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงดันต่ำ

2. ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยน แปลงของค่าความต้านรวม (Impedance) ในระบบ ซึ่งจะช่วยหลีกเลี่ยงการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานที่ความถี่ฮาร์มอนิกระหว่าง หม้อแปลงไฟฟ้า และตัวเก็บประจุไฟฟ้า โดยจะย้ายจุดที่ขยายค่าความต้านรวมสูงสุดในระบบจากความถี่ หรือลำดับฮาร์มอนิกที่นัยยะสำคัญมาอยู่ในช่วงความถี่ หรือลำดับฮาร์มอนิกที่ไม่มีนัยยะสำคัญ และสร้างจุดเรโซแนนซ์อนุกรมขึ้นมาซึ่งจะช่วยกรองกระแสฮาร์มอนิกส่วนหนึ่งออกจากระบบ ลักษณะของตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ และของค่าความต้านรวมในระบบที่มีการต่อตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับอนุกรมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้ตามที่แสดงรูปที่ 2.7 และ 2.8

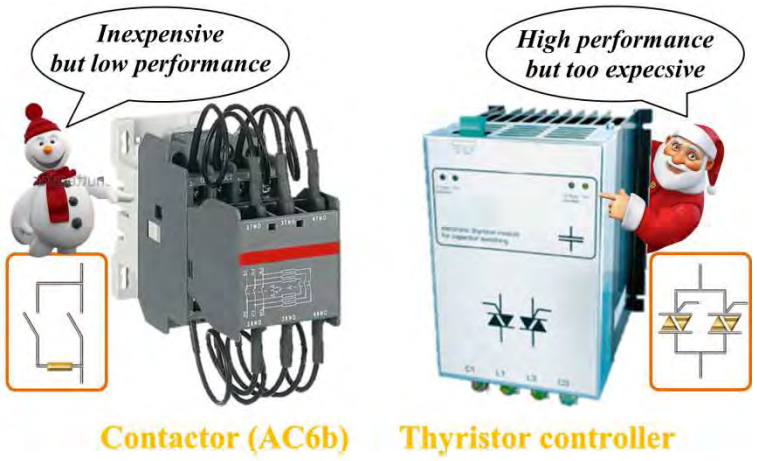
รูปที่ 2.7 ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 2.8 ความต้านทานรวมในระบบไฟฟ้ากำลัง

เนื่องจากกระแสใช้งานของตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับจะประกอบด้วยกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน และกระแสฮาร์มอนิก การออกแบบจึงต้องคำนึงถึงผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการใช้งาน และยังต้องสามารถทนต่อกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นรวมทั้งกระแส และแรงดันไฟฟ้าจากการตัดต่อวงจรอีกด้วย สำหรับค่าความต้านทานการเหนี่ยวนำ (Inductive Reactance) จะต้องมีค่ามากกว่าร้อยละ 5 ของค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้ตำแหน่งปรับจูนฮาร์มอนิก อยู่ห่างจากความถี่ 250 รอบต่อนาที มากกว่าร้อยละสิบของความถี่มูลฐาน หรือฮาร์มอนิกลำดับ 5 ซึ่งเป็นฮาร์มอนิกลำดับที่ต่ำที่สุดที่พิจารณา และตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ในอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูนชุดเดียวกันจะมีตำแหน่งปรับจูนฮาร์มอนิกเพียงลำดับเดียวเท่านั้น เนื่องจากหากจุดปรับจูนสัญญาณฮาร์มอนิกในตัวกรองดีจูนแต่ละชุดมีความแตกต่างกันจะทำให้เกิดการแชร์โหลดฮาร์มอนิกไม่เท่ากัน และทำให้เกิดสภาวะโหลดเกินขึ้นกับ ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับตัวใดตัวหนึ่งได้

3. อุปกรณ์ตัดต่อวงจร (Switching Device) ทำหน้าที่ตัดต่อวงจรแต่ละชุดย่อยของ ตัวกรองดีจูน เพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับ ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นไปตามที่ต้องการ โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดต่อวงจรของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูน คือ คอนเทคเตอร์ที่เป็นชนิด AC6b ซึ่งจะมีขดลวด Damping เพื่อลดกระแสพุ่งเข้าที่เกิดจากการตัดต่อวงจร และการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจำพวก ไทริสเตอร์ (Thyrister) หรือ เอสซีอาร์ (Silicon Control Rectifier ; SCR) ในการตัดต่อวงจรซึ่งจะไม่ทำให้เกิดกระแสพุ่งเข้าในขณะที่ทำการตัดต่อวงจร และมีความไวในการตามโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ โดยอุปกรณ์ตัดต่อวงจรดังกล่าวสามารถพิจารณาได้ตามที่แสดงรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 อุปกรณ์ตัดต่อวงจร

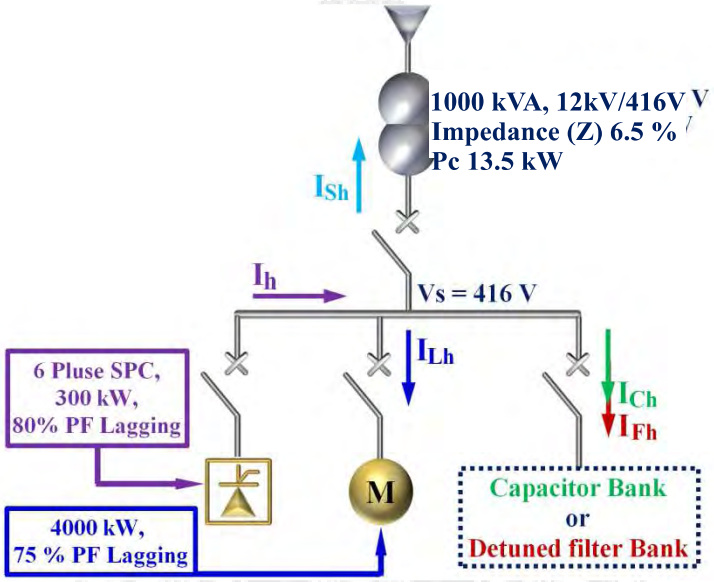
4. อุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจร (Short - Circuit Protective Device) ทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงรที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ภายในอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูน โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดต่อวงจร คือ ฟิวส์ (High Rupturing Capacity Fuse ; HRC Fuse) และอุปกรณ์ตัดตอนวงจร (Circuit Breaker) ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองนี้มีความแตกต่างกันทั้งราคา และความสามารถในการทำงาน ลักษณะของฟิวส์ และอุปกรณ์ตัดตอนวงจรสามารถพิจารณาได้ตามที่แสดงในรูปที่ 2.10

รูปที่ 2.10 อุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจร

2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ไชยยะ (ม.ป.ป.) การเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้กับระบบไฟฟ้ากำลังมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากเป็นการลดกำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลัง และเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิรูปที่สูงสุด โดยการเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าให้กับระบบ แต่หากในระบบไฟฟ้ากำลังมีภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่สร้างกระแสฮาร์มอนิกออกมาจำเป็นจะต้องดัดแปลงชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าให้เป็นอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูน

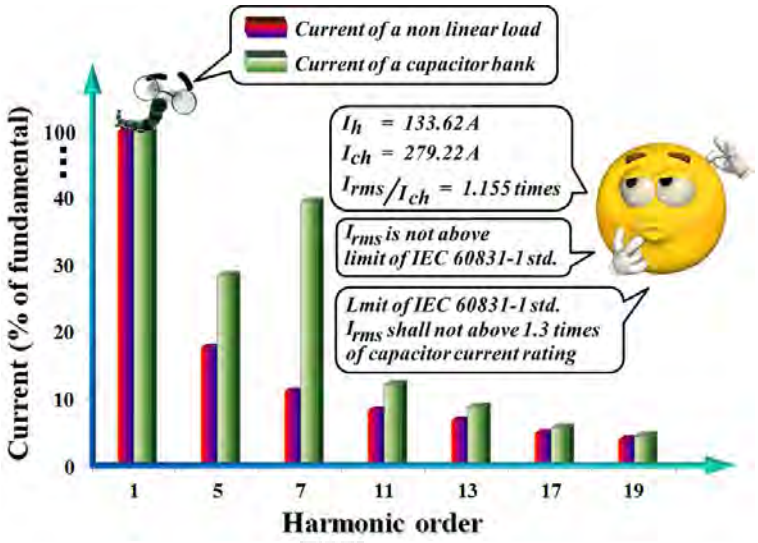
การสร้างอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูนสามารถทำได้โดยใช้ตัวต้านทานกระแสสลับต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งตัวต้านทานกระแสสลับจะทำหน้าที่กันกระแสฮาร์มอนิกไม่ให้กระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าสู่ตัวเก็บประจุไฟฟ้า ดังนั้นอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูนจึงไม่ได้ทำหน้าที่กรองกระแสฮาร์มอนิก แต่ทำหน้าที่ชดเชยกำลังฟ้าต้านกลับให้กับระบบไฟฟ้าเพื่อเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเช่นเดียวกันกับ ชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า เพียงแต่จะทำให้อุปกรณ์สามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับให้กับระบบไฟฟ้าที่มีการรบกวนฮาร์มอนิกได้ สำหรับการออกแบบอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูนจะออกแบบให้ใช้สำหรับหลบกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เท่านั้น ซึ่งจะตั้งความถี่ในการปรับจูนสัญญาณ อยู่ที่ 189 – 204 รอบต่อวินาที การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิก แบบตัวกรองดีจูนสามารถพิจารณาจากแบบจำลองตัวอย่างดังต่อไปนี้



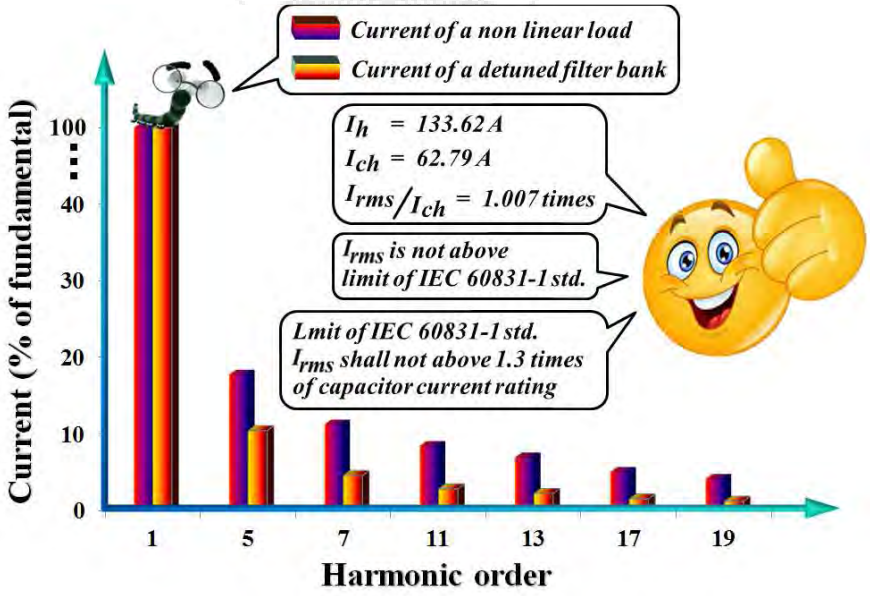
รูปที่ 2.11 ระบบไฟฟ้ากำลังตัวอย่าง

ระบบไฟฟ้ากำลังตัวอย่างมีทั้งโหลดแบบเป็นเชิงเส้น และไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลของการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูน จึงได้กำหนดกรณีศึกษาไว้ 2 กรณีดังนี้

1. ใช้ภาระทางไฟฟ้าเต็มพิกัดโดยต้องใช้ชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า หรือชุดตัวกรองดีจูน ทั้งหมด 9 ชุด ซึ่งจะได้ผลตามที่แสดงในรูปที่ 2.12 และ 2.13

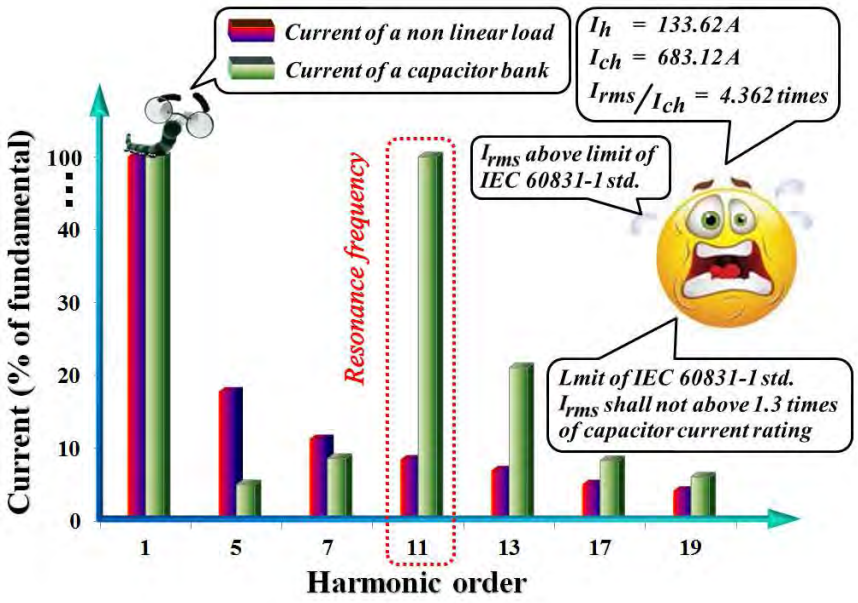


รูปที่ 2.12 กระแสฮาร์มอนิกเมื่อต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้า 9 ชุดย่อย

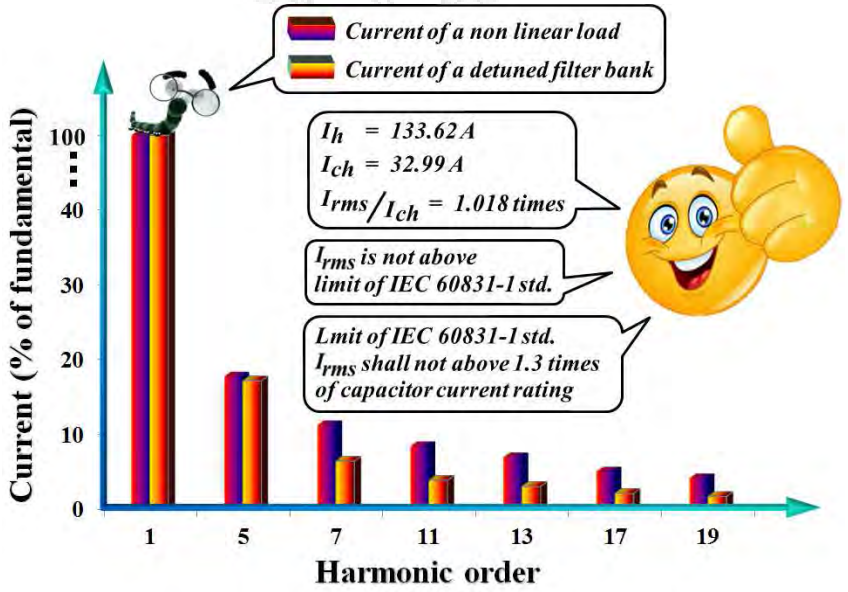


รูปที่ 2.13 กระแสฮาร์มอนิกเมื่อต่อตัวกรองดีจูน 9 ชุดย่อย

2. ใช้เฉพาะภาระทางไฟฟ้าแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยใช้ชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า หรือชุดตัวกรองดีจูน ทั้งหมด 3 ชุด ซึ่งจะได้ผลตามที่แสดงในรูปที่ 2.14 และ 2.15



รูปที่ 2.14 กระแสฮาร์มอนิกเมื่อต่อตัวเก็บประจุไฟฟ้า 3 ชุดย่อย



รูปที่ 2.15 กระแสฮาร์มอนิกเมื่อต่อตัวกรองดีจูน 3 ชุดย่อย

จากผลการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิก สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. จากรูปที่ 2.12 เมื่อใช้ชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าจำนวน 9 ชุดย่อย ต่อเข้าสู่ระบบพบว่าจะเกิดเรโซแนซ์แบบขนานขึ้นที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 และเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ตัวเก็บประจุไฟฟ้า แต่ระดับของกระแสอาร์เอ็มเอสของชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้ายังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน IEC60831-1 ซึ่งถือว่าสามารถใช้งานได้แต่อาจมีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของตัวเก็บประจุไฟฟ้าทำให้อายุการใช้งานสั้นลง

2. จากรูปที่ 2.13 เมื่อใช้ชุดตัวกรองดีจูนจำนวน 9 ชุดย่อย ตัวต้านทานกระแสสลับสามารถจำกัดกระแสฮาร์มอนิกให้ไหลผ่านตัวเก็บประจุไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งกระแสฮาร์เอ็มเอสของชุดตัวกรองแบบดีจูนมีค่าเพียง 1.007 เท่า ของกระแสที่ความถี่มูลฐานชุดตัวกรองแบบดีจูน ทำให้ชุดตัวกรองแบบดีจูนสามารถทำงานเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับ และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ตามปกติ

3. จากรูปที่ 2.14 เมื่อใช้ชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าจำนวน 3 ชุดย่อย และในระบบมีเพียงภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นเท่านั้น เมื่อต่อชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าเข้าระบบพบว่าจะเกิดเรโซแนซ์แบบขนานขึ้นที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 11 และเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าสู่ตัวเก็บประจุไฟฟ้าสูงมากจากที่แสดงในรูปที่ 2.14 พบว่ากระแสอาร์เอ็มเอสของชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าถูกขยายขึ้นถึง 4.362 เท่า ของกระแสที่ความถี่มูลฐานชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งตัวเก็บประจุไฟฟ้าจะเกิดความเสียหายทันทีเนื่องจากกระแสใช้งานเกินพิกัด และอาจทำให้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าภายในอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าอาจเกิดระเบิดขึ้นได้ โดยสาเหตุที่อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกเพิ่มสูงขึ้นส่วนหนึ่งมาจากการที่ระบบไม่มีภาระทางไฟฟ้าแบบเชิงเส้นเป็นตัวหน่วงให้อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกลดลง

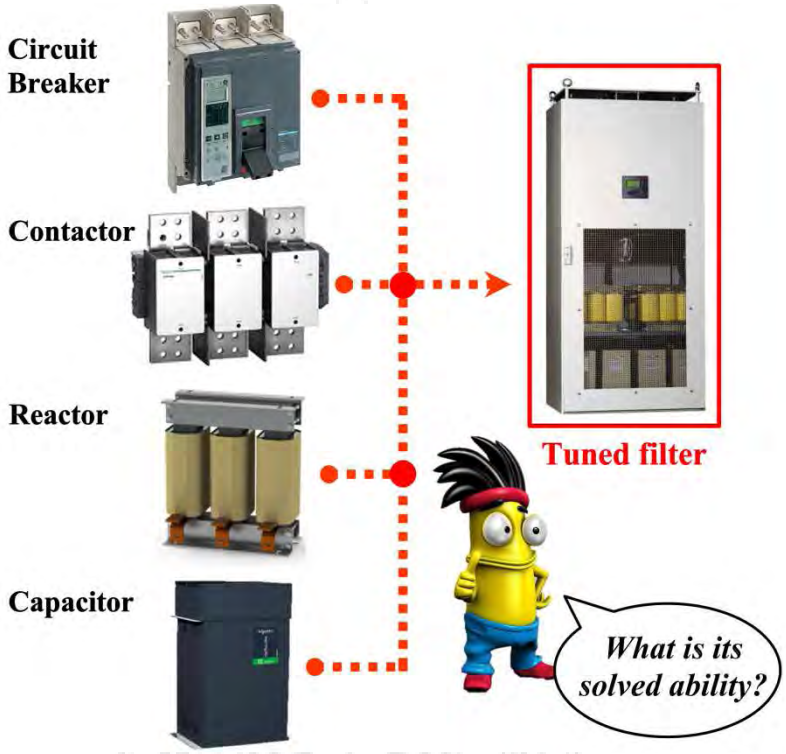
4. จากรูปที่ 2.15 เมื่อใช้ชุดตัวกรองดีจูนจำนวน 3 ชุดย่อย ตัวต้านทานกระแสสลับสามารถจำกัดกระแสฮาร์มอนิกให้ไหลผ่านตัวเก็บประจุไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งกระแสฮาร์เอ็มเอสของชุดตัวกรองแบบดีจูนมีค่าเพียง 1.018 เท่า ของกระแสที่ความถี่มูลฐานชุดตัวกรองแบบดีจูน ทำให้ชุดตัวกรองแบบดีจูนสามารถทำงานเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับ และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ตามปกติ

2.4 อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูน (Tuned Filter)

2.4.1 หลักการ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

(IEC Standard 61642 - 1997, ไชยยะ 2554, Dugan 2002) อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูน (Tuned Filter) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในกรองกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งถือว่าเป็นวิธีการที่มีประสิทธิรูปที่ในการแก้ไขปัญหาได้ในระดับหนึ่ง อีกทั้งยังช่วยชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง และมีโครงสร้างที่ง่ายเนื่องจากอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูนจะใช้เพียงตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับต่ออนุกรมเข้ากับ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าทำให้ใช้ค่าใช้จ่ายในการลงทุนไม่มาก แต่อย่างไรก็ดีอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูนจะสามารถกรองกระแส

ฮาร์มอนิกได้เพียงลำดับเดียวเท่านั้น หากในระบบมีฮาร์มอนิกที่มีนัยยะสำคัญมากกว่าหนึ่งลำดับ และเลือกใช้อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูน ก็จะต้องทำการติดตั้งตัวกรองจูนหลายตัว อีกทั้งการควบคุมจะต้องมีการออกแบบการตัดต่อวงจรของตัวกรองจูนแต่ละลำดับให้สอดคล้องกับหลักการทางด้านวิศวกรรมด้วย หลักการตัดต่อวงจรของตัวกรองจูนที่ถูกต้องคือ ต้องต่อจูนลำดับที่ต่ำกว่าเข้าสู่ระบบแล้วไล่ขึ้นไปหาลำดับที่สูงกว่า ขณะเดียวกันการปลดวงจรต้องปลดจูนลำดับสูงสุดในระบบไล่ลงมาหาตัวกรองจูนลำดับต่ำเรียงลำดับลงมา ด้วยเหตุนี้จึงอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ค่าใช้จ่ายในการแก้ไขปัญหาด้วยวิธีนี้ใช้งบประมาณสูงขึ้น ลักษณะของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิก แบบจูนตามที่แสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูน

จากรูปที่ 2.16 จะพบว่าอุปกรณ์ต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบภายในอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูนจะมีลักษณะคล้ายกันกับอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูนเพียงแต่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูนจะไม่มีการแบ่งชุดตัวกรองเป็นชุดย่อย ๆ เหมือนอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูน เนื่องจากอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูนไม่ได้มีหน้าที่การทำงานเช่นเดียวกันกับอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกตัวกรองแบบดีจูน ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูนมีดังต่อไปนี้

2.4.1.1 หน้าที่การทำงานของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูน จะมีหน้าที่การทำงานต่างกับอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกตัวกรองแบบดีจูน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. กรองกระแสฮาร์มอนิก (Filtering Harmonic Current) ตามลำดับที่กำหนด หรือออกแบบไว้ ยกตัวอย่างเช่น อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูนลำดับที่ 5 จะกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เป็นหลัก หากเป็นอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูนลำดับที่ 7 ก็จะกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 เป็นหลัก โดยประสิทธิรูปที่ในการกรองกระแสฮาร์มอนิกของตัวกรองจะขึ้นอยู่กับสมรรถนะของตัวกรองที่ได้ออกแบบไว้

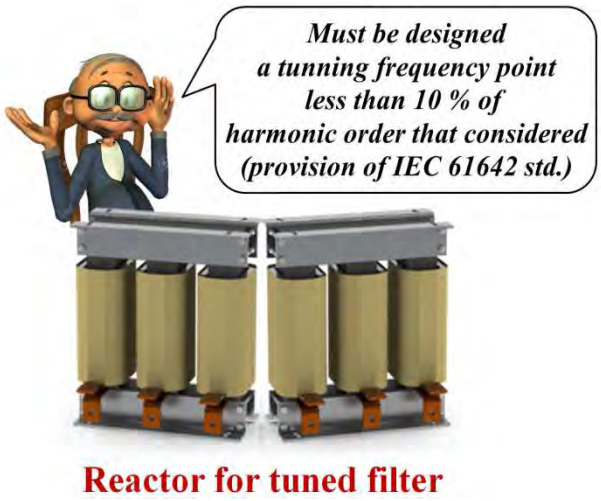
2. ชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับ (Compensation of Reactive Power) ให้กับระบบไฟฟ้ากำลัง ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ดีอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูนจะไม่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเป็นหลัก เนื่องจากอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูนจะถูกออกแบบเป็นชุดตัวกรองขนาดใหญ่ที่มีชุดย่อย ๆ ภายในเพียง 1 หรือ 2 ชุดเท่านั้น จึงไม่เหมาะกับการตัดต่อวงจรเข้า และออกตามค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบที่มีการเปลี่ยนแปลง ตลอดเวลา

2.4.1.2 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูนจะมีอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ประกอบอยู่ภายในคล้ายกันกับอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูนทุกประการ เพียงแต่จะมีขนาดที่ใหญ่กว่ามาก และไม่มีการแบ่งชุดตัวกรองภายในเป็นชุดย่อย ๆ เหมือนอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูน โดยข้อมูลของส่วนประกอบต่าง ๆ ในอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูน มีรายละเอียดดังนี้

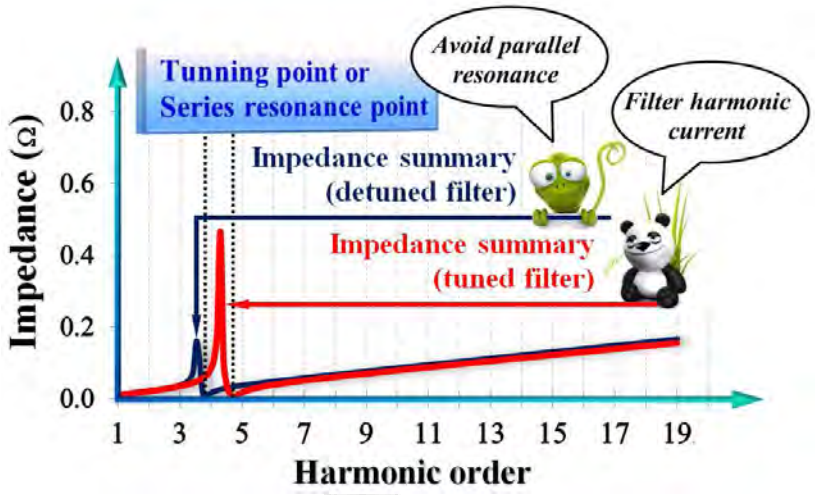
1. ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบพื้นฐานของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูนซึ่งควรจะต้องมีการศึกษาอย่างละเอียดสำหรับการออกแบบเพื่อให้มีความเหมาะสม และปลอดภัยในการใช้งาน เช่น พิกัดแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้าต้องคำนึงถึงผลของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งทำให้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าได้รับแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น ความสามารถในการรับกระแสพุ่งเข้าเนื่องจากตัวกรองจูนมีขนาดใหญ่ขณะทำการตัดต่อวงจรจะเกิดกระแสพุ่งเข้าในระดับที่สูงมาก และกระแสไฟฟ้าใช้งานของอุปกรณ์เพราะตัวกรองจูนจะถูกออกแบบให้กรองกระแสฮาร์มอนิกซึ่งทำให้ชุดตัวกรองจะต้องรับกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่พิจารณา หรือออกแบบไว้ในระดับที่สูง และเป็นระยะเวลานานตลอดเวลาที่ตัวกรองยังถูกต่อเข้ากับระบบอยู่ ลักษณะของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ใช้ในอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูนตามที่แสดงในรูปที่ 2.17

รูปที่ 2.17 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแรงดันต่ำ

2. ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้เกิด เรโซแนนซ์แบบอนุกรมขึ้น ระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้า และตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งตำแหน่ง เรโซแนนซ์แบบอนุกรมที่ถูกสร้างขึ้นนี้ จะเป็นตัวที่ทำให้เกิดการกรองกระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่พิจารณา หรือออกแบบไว้ ลักษณะของตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ และค่าของความต้านรวม ในระบบที่มีการต่อตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับอนุกรมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้ตามที่แสดงในรูปที่ 2.18 และ 2.19



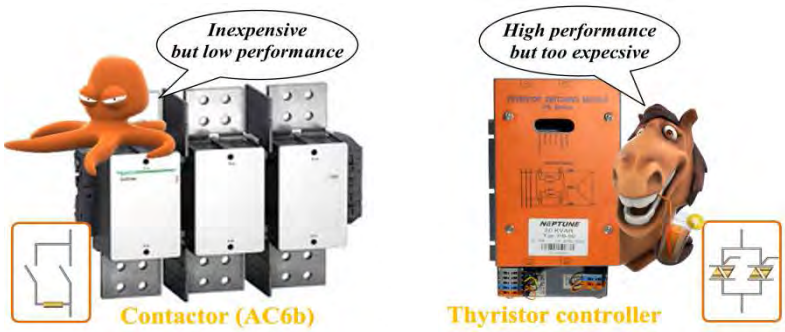
รูปที่ 2.18 ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 2.19 เปรียบเทียบความต้านทานรวมของระบบที่มีตัวกรองดีจูน และจูน

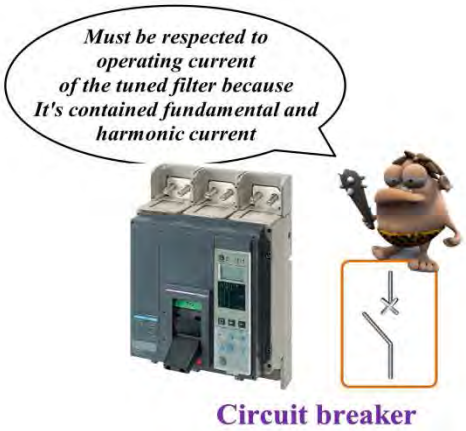
เนื่องจากกระแสใช้งานของตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับจะประกอบด้วยกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน และกระแสฮาร์มอนิกในปริมาณที่สูงมาก การออกแบบจึงต้องคำนึงถึงผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการใช้งาน และยังต้องสามารถทนต่อกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นรวมทั้งกระแส และแรงดันไฟฟ้าจากการตัดต่อวงจรอีกด้วย โดยปกติแล้วตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูนจะต้องมีอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินด้วยเพราะตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับมีโอกาสที่จะเกิดกระแสใช้งานเกินพิกัดได้อันเนื่องมาจากกระแสฮาร์มอนิกที่ตัวต้านทานกระแสสลับรับมาจากระบบไฟฟ้า สำหรับค่าความต้านทานการเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับลำดับของฮาร์มอนิกที่พิจารณา เช่น อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูนลำดับที่ 5 จะมีค่าความต้านทานการเหนี่ยวนำอยู่ที่ร้อยละ 4.16 ถึง 4.53 ของค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้ตำแหน่งปรับจูนฮาร์มอนิกอยู่ที่ความถี่ใกล้เคียงกับ ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 มากกว่าร้อยละสิบของค่าความถี่ 250 รอบต่อนาที หรือฮาร์มอนิกลำดับ 5 ที่พิจารณา และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูนลำดับที่ 7 จะมีค่าความต้านทานการเหนี่ยวนำอยู่ที่ร้อยละ 2.13 ถึง 2.23 ของค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้ตำแหน่งปรับจูนฮาร์มอนิกอยู่ที่ความถี่ใกล้เคียงกับฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 มากกว่าร้อยละสิบของค่าความถี่ 350 รอบต่อนาที หรือฮาร์มอนิกลำดับ 7 ที่พิจารณา เป็นต้น

3. อุปกรณ์ตัดต่อวงจรทำหน้าที่ตัดต่อวงจรของตัวกรองจูนเพื่อกรองกระแส ฮาร์มอนิกออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งการออกแบบ หรือเลือกใช้อุปกรณ์จะต้องคำนึงถึงกระแสใช้งานที่ประกอบด้วยกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน และกระแสฮาร์มอนิกในปริมาณที่สูงมาก โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดต่อวงจรของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูน จะมีสองชนิด คือ คอนเทคเตอร์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจำพวกเอสซีอาร์ หรือไทริสเตอร์ โดยอุปกรณ์ตัดต่อวงจรดังกล่าวสามารถพิจารณา ได้ตามที่แสดงรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 อุปกรณ์ตัดต่อวงจร

4. อุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจรทำหน้าที่ป้องกันการลัดวงรที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ภายในอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูน โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ที่ใช้ในการป้องกันการลัดวงจร คือ อุปกรณ์ตัดตอนวงจรเพราะอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูนแต่ละชุดจะถูกออกแบบให้มีขนาดใหญ่ ซึ่งขนาดของฟิวส์อาจไม่เพียงพอต่อการรับกระแสใช้งานของชุดตัวกรองจูน อุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจรสำหรับอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณ ฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูน สามารถพิจารณาได้ตามที่แสดงในรูปที่ 2.21



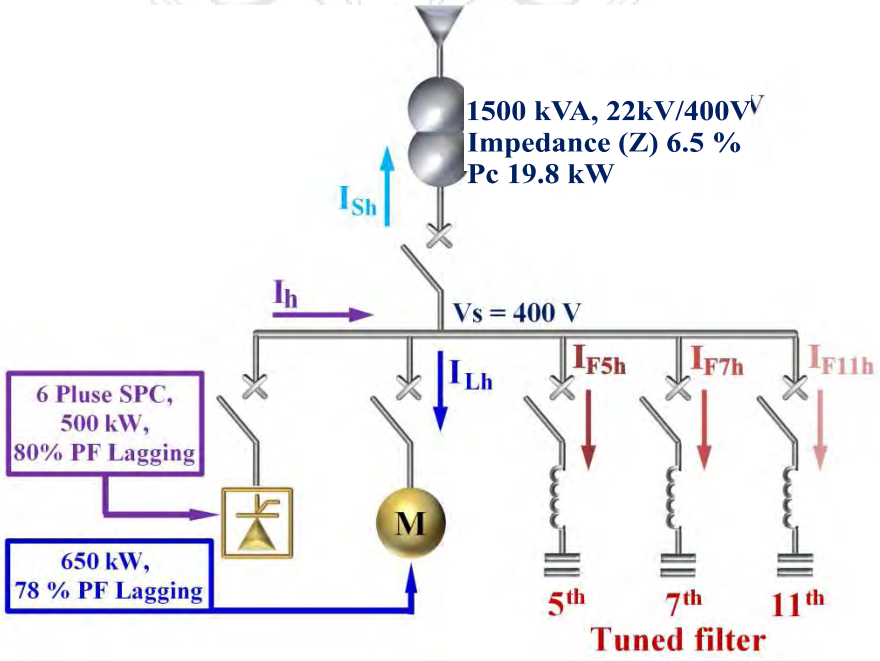
รูปที่ 2.21 อุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจร

2.4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ไชยยะ (ม.ป.ป.) กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากการใช้ภาระทางไฟฟ้าที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น นั้นจำเป็นจะต้องถูกจำกัดปริมาณให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ เพื่อลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้ากำลังของผู้ใช้ไฟเอง และผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นๆ การเลือกใช้อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณ ฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูนก็ถือได้ว่าเป็นวิธีการแก้ไขปัญหาที่ง่าย ลงทุนน้อย และมีประสิทธิรูปที่ในระดับหนึ่ง ซึ่งจะเหมาะกับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิกในลำดับซึ่งมีนัยยะสำคัญที่เด่นชัด ยกตัวอย่างเช่น ระบบไฟฟ้ากำลังที่

มีการรบกวนฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 7 หรือ 11 ในปริมาณสูง จะเหมาะสมกับการใช้อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูน เนื่องจากตัวกรองจูน 1 ชุด จะถูกออกแบบให้กรองกระแสฮาร์มอนิกได้เพียงลำดับใดลำดับหนึ่งเท่านั้น

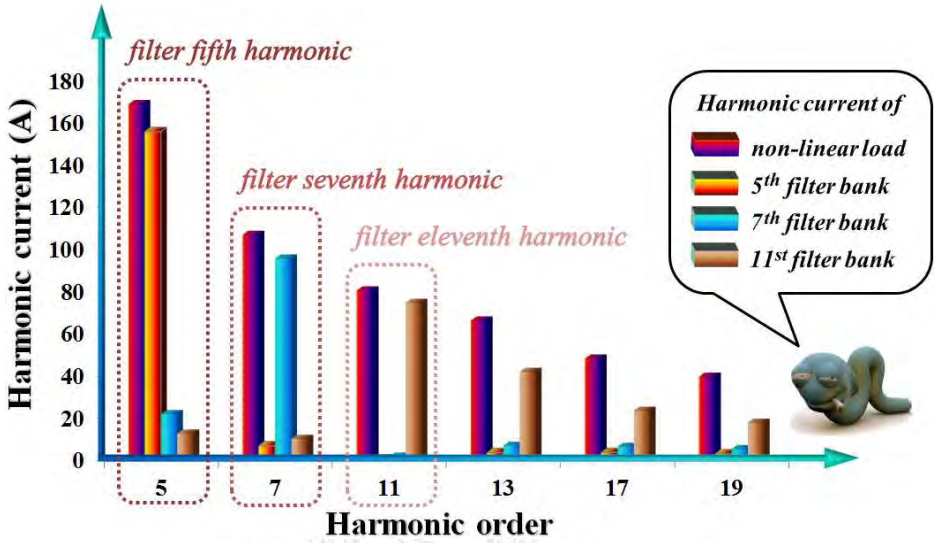
เนื่องจากเป็นตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าพื้นฐานคือ ตัวเก็บประจุไฟฟ้า ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ อุปกรณ์ตัดต่อ และอุปกรณ์ตัดตอน ทำให้อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูนสามารถประกอบสร้างขึ้นได้ง่าย และใช้งบประมาณในการลงทุนไม่มากเมื่อพิจารณาเทียบกับอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับกรองกระแสฮาร์มอนิกอื่นๆ แต่อย่างไรก็ดีอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูน ก็ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายอย่าง เช่น ตัวกรอง 1 ชุดใช้กรองกระแสฮาร์มอนิกได้เพียงลำดับเดียวเท่านั้น การนำตัวกรองจูนเข้าสู่ระบบจะต้องมีการเรียงลำดับเข้าก่อนออกหลังหากเรียงลำดับการเข้าออกของตัวกรองจูนผิดลำดับ เช่น นำตัวกรองฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 หรือ 11 เข้าก่อนลำดับที่ 5 ก็จะให้เกิดความเสียหายต่อระบบอย่างรุนแรงได้เนื่องจากจะเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ซึ่งถูกต่อข้ามลำดับไป ในปริมาณที่สูงมาก และไม่สามารถที่เปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าในระบบได้ภายหลังจากมีการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูนแล้ว ซึ่งหากมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าในระบบ จะต้องทำการออกแบบตัวกรองจูนแต่ละลำดับใหม่ เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลของการต่ออุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูนในการกรองกระแสฮาร์มอนิกออกจากระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิก จึงได้จำลองระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งมีอุปกรณ์ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.22



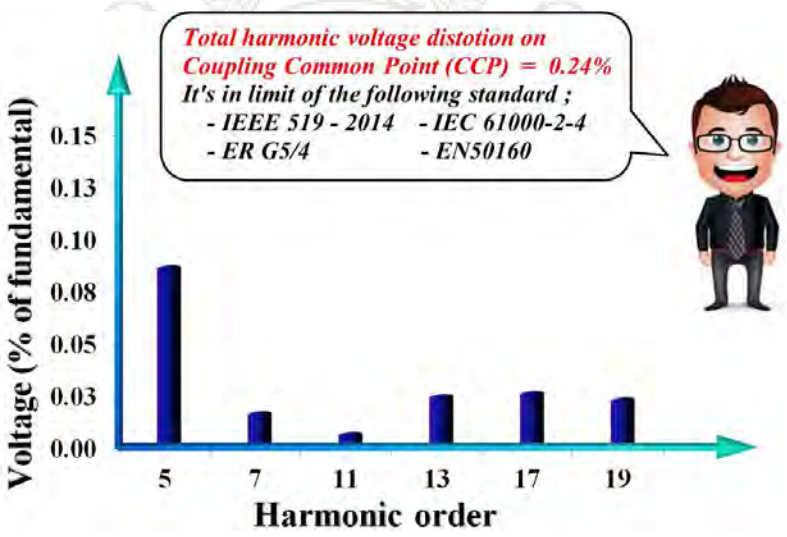
รูปที่ 2.22 ระบบไฟฟ้ากำลังตัวอย่าง

การวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกได้แบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 3 กรณีดังนี้

1. ใช้ภาระทางไฟฟ้าทั้งหมดเต็มพิกัด และใช้ตัวกรองจูนครบทั้ง 3 ชุดประกอบด้วย ตัวกรองจูนลำดับที่ 5 ตัวกรองจูนลำดับที่ 7 และตัวกรองจูนลำดับที่ 11 ได้ผลการวิเคราะห์ตามที่แสดงในรูปที่ 2.23 และ 2.24

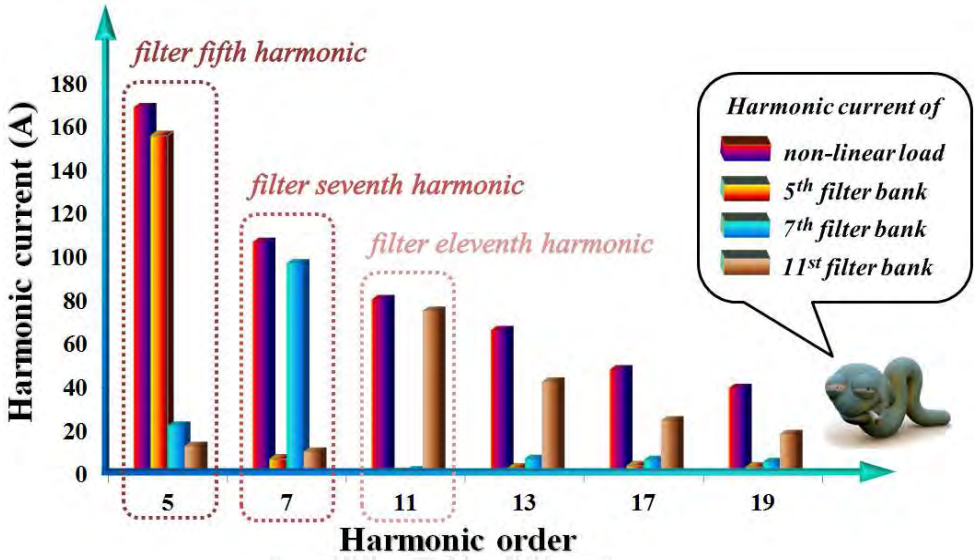


รูปที่ 2.23 กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านตัวกรองจูนแต่ละชุด สำหรับกรณีที่ 1

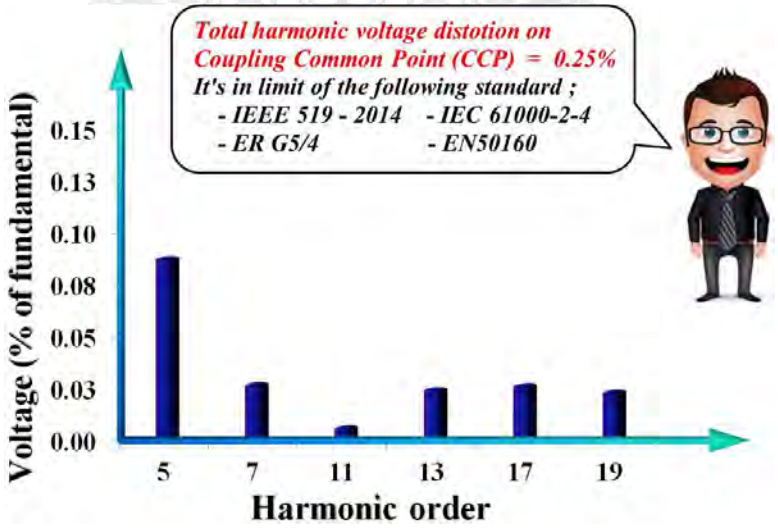


รูปที่ 2.24 แรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับกรณีที่ 1

2. ใช้ภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นในระบบเต็มพิกัด และใช้ตัวกรองจูนครบทั้ง 3 ชุด ประกอบด้วยตัวกรองจูนลำดับที่ 5 ตัวกรองจูนลำดับที่ 7 และตัวกรองจูนลำดับที่ 11 ได้ผลการวิเคราะห์ตามที่แสดงในรูปที่ 2.25 และ 2.26

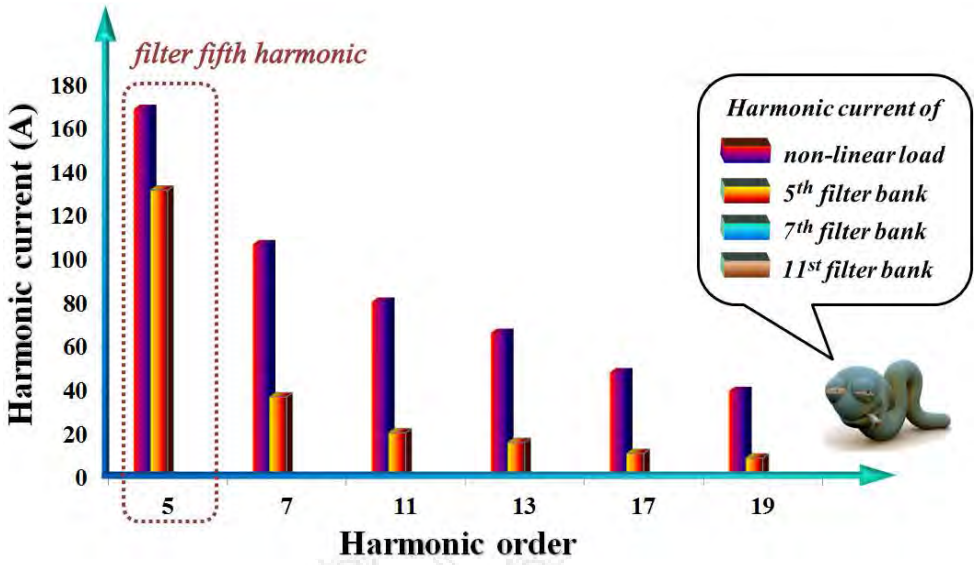


รูปที่ 2.25 กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านตัวกรองจูนแต่ละชุด สำหรับกรณีที่ 2

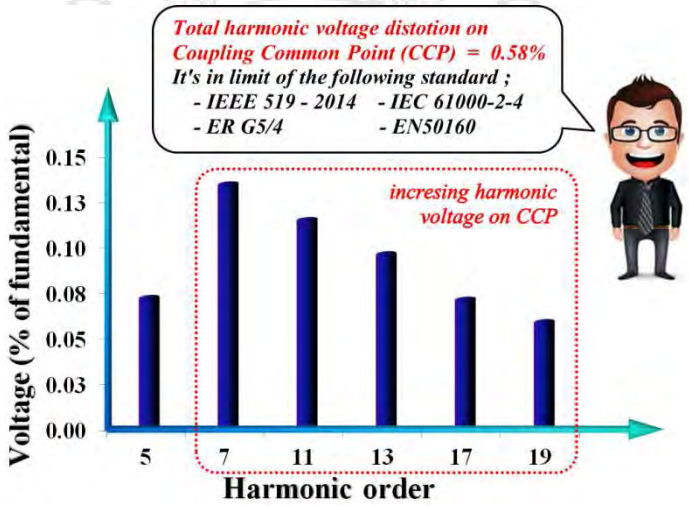


รูปที่ 2.26 แรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับกรณีที่ 2

3. ใช้ภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นเต็มพิกัด และใช้ตัวกรองจูนลำดับที่ 5 เพียงหนึ่งชุด ได้ผลการวิเคราะห์ตามที่แสดงในรูปที่ 2.27 และ 2.28



รูปที่ 2.27 กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านตัวกรองจูนลำดับที่ 5 สำหรับกรณีที่ 3



รูปที่ 2.28 แรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับกรณีที่ 3

จากการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิก สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. สำหรับกรณีที่ 1 เมื่อใช้ภาระทางไฟฟ้าเต็มพิกัดทั้งระบบแล้วต่ออุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูนเข้าสู่ระบบทั้งสามลำดับ จากรูปที่ 2.23 จะพบว่าตัวกรองจูนลำดับที่ 5 นั้นจะมีปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 สูงสุดแสดงให้เห็นว่าตัวกรองจูนลำดับ 5 จะกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เป็นหลัก ส่วนตัวกรองจูนลำดับที่ 7 จะมีปริมาณกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 สูงสุดแสดงให้เห็นว่าตัวกรองจูนลำดับ 7 จะกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 เป็นหลัก และสุดท้ายคือตัวกรองจูนลำดับที่ 11 จะพบว่ากระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่ตัวกรองจูนลำดับที่ 11 ซึ่งจะประกอบด้วย กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 11 17 และ 19 แสดงให้เห็นว่านอกจากจะกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 11 แล้ว ตัวกรองจูนลำดับที่ 11 ยังสามารถช่วยกรองกระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่สูงกว่าตำแหน่งปรับจูนได้ ในส่วนของระดับความเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลังพบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 0.24 ของแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐานซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ากำลังเนื่องจากมีปริมาณน้อยมาก และมีระดับปริมาณของแรงดันฮาร์มอนิกเป็นไปตามมาตรฐานต่างๆ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.24

2. กรณีที่ 2 เมื่อทำการปลดภาระทางไฟฟ้าแบบเชิงเส้นออกจากระบบไฟฟ้า ระดับแรงดันฮาร์มอนิกจะมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยจากที่แสดงในรูปที่ 2.25 ระดับความเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลังพบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 0.25 ของแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นหนึ่งเท่าตัวแต่ยังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ และเป็นไปตามมาตรฐาน ที่กำหนดไว้

3. กรณีที่ 3 เมื่อทำการปลดภาระทางไฟฟ้าแบบเชิงเส้น และตัวกรองจูนลำดับที่ 7 และลำดับที่ 11 ออกจากระบบไฟฟ้า ระดับแรงดันฮาร์มอนิกจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย โดยมีระดับ ความเพี้ยนรวมของแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลังเท่ากับร้อยละ 0.58 ของแรงดัน ไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน

จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าหากในระบบไฟฟ้ากำลังมีกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่เป็น เลขคี่ซึ่งไม่ใช่ฮาร์มอนิกลำดับที่หารด้วยสามลงตัว และมีปริมาณฮาร์มอนิกที่เด่นชัดเหมือนกันระบบไฟฟ้าตัวอย่างคือ มีฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 7 และ 11 การแก้ปัญหาด้วยอุปกรณ์กรองสัญญาณแบบตัวกรองจูนก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาได้ และยังมีความง่ายในการออกแบบประกอบสร้างรวมไปถึงการบำรุงรักษา อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำ

2.5 อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ (Active Filter)

2.5.1 หลักการ และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

(Schneider Electric 2000, ABB ม.ป.ป., ABB 2548, Danfoss 2009) อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพคือ อุปกรณ์ที่สามารถลดปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังได้โดยการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบ โครงสร้างหลักของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพจะประกอบด้วย อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ลักษณะของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพสามารถพิจารณาได้ตามที่แสดงในรูปที่ 2.29

รูปที่ 2.29 อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ

จากรูปที่ 2.29 จะพบว่าอุปกรณ์ภายในอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพจะมีความแตกต่างกับอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูน และจูน เพราะอุปกรณ์ภายในอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นหลัก ซึ่งทำให้มีหน้าที่ และคุณสมบัติแตกต่างจากอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณ ฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูน และจูน โดยสามารถพิจารณาได้ตามที่แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิก

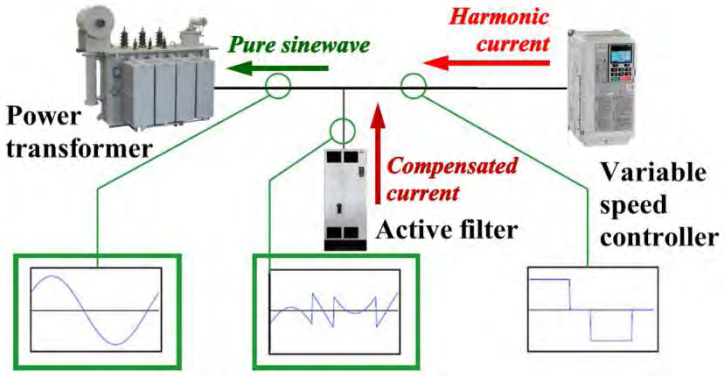
คุณสมบัติ	**อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณ ฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูน**	**อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณ ฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ**
การกำจัดฮาร์มอนิก	สามารถแยกกำจัดแต่ละลำดับได้ แต่ต้องเรียงลำดับการต่อเข้าระบบจากลำดับต่ำไปสูง	สามารถแยกกำจัดแต่ละลำดับได้ โดยไม่ต้องคำนึงลำดับการต่อ
ขนาด	ใหญ่	เล็ก
ความสามารถในการกำจัดฮาร์มอนิก	ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานรวมแหล่งจ่าย	ไม่ขึ้นกับค่าความต้านทานรวมแหล่งจ่าย
การเพิ่มขึ้นของปริมาณฮาร์มอนิก	สามารถเกิดสภาวะเกินพิกัด ทำให้เกิดความร้อน และความเสียหาย การเพิ่มขนาดต้องระวังเรื่องการแบ่งโหลด	ไม่มีสภาวะเกินพิกัด สามารถเพิ่มขนาดได้ง่าย
ปริมาณกำลังไฟฟ้าต้านกลับ	จ่ายกำลังไฟฟ้าต้านกลับตลอดเวลาขณะต่อเข้าระบบ อาจเกินความต้องการของระบบไฟ	เลือกจ่าย หรือไม่จ่ายกำลัง ไฟฟ้าต้านกลับได้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

คุณสมบัติ	อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูน	อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ
ราคาต่อหน่วย	ถูก	แพง
ปัญหาเรโซแนนซ์กับความต้านทานรวมของแหล่งจ่าย	อาจเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานหรือเรโซแนนซ์แบบอนุกรมได้	ไม่มี
การวิเคราะห์ความต้านทานรวมของระบบ	ต้องวิเคราะห์อย่างละเอียด	โดยทั่วไปไม่จำเป็น
การออกแบบ	เป็นเฉพาะกรณี	ใช้ได้ในทันทีไม่ต้องออกแบบ

จากตารางที่ 2.1 ทำให้สามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติ และประสิทธิรูปที่สำหรับการเลือกใช้อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแต่ละชนิดได้ แต่ข้อมูลดังกล่าวนี้จะพิจารณาเฉพาะข้อมูลเชิงวิศวกรรมเท่านั้น ซึ่งในการนำมาใช้จริงนั้นจะมีปัจจัยเพิ่มเติมในส่วนของความคุ้มค่าในการลงทุนด้วย เพราะฉะนั้นการพิจารณาจะต้องพิจารณาข้อมูลทั้งทางด้านวิศวกรรม และเศรษฐศาสตร์ควบคู่กันไป สำหรับข้อมูลเบื้องต้นในส่วนของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิก แบบแอคทีพ สามารถพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

2.5.1.1 หน้าที่การทำงานของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพคือ การลดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งการลดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกนั้นจะทำโดยการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบ เพื่อให้กระแสฮาร์มอนิกที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพสร้างขึ้นไปลดทอนปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง ตามที่แสดงในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 การชดเชยกระแสฮาร์มอนิก

2.5.1.2 หลักการทำงานของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ

1. ตรวจวัดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในระบบ

2. เปลี่ยนแปลงค่าฮาร์มอนิกที่วัดได้ให้เป็นสัญญาณดิจิตอล เพื่อใช้ในการประมวล ผลด้วยระบบดีเอสพี (Digital Signal Processor ; DSP) ซึ่งจะมีความแม่นยำ และเชื่อถือได้สูง

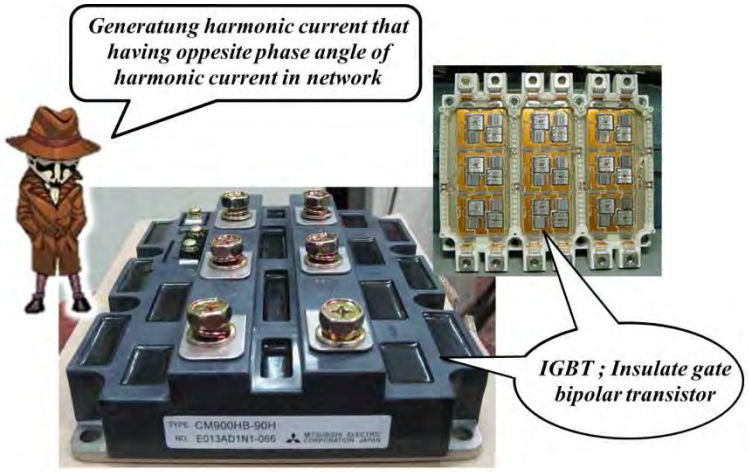
3. ส่งสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Insulate Gate Bipolar Transistor ; IGBT) เพื่อจ่ายกระแสฮาร์มอนิกที่มีปริมาณ และลำดับเท่ากันกับฮาร์มอนิกที่มีในระบบ แต่จะมีมุมเฟสในทิศทางตรงกันข้ามคือ มีมุมเฟสต่างกันอยู่ 180 องศาทางไฟฟ้า (°e)

2.5.1.3 โครงสร้างของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพโดยทั่วไป แล้วจะประกอบด้วย

1. ตัวเก็บประจุไฟฟ้า ทำหน้าที่สร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จุด DC Bus เพื่อใช้เป็นระดับไฟฟ้ากระแสตรงอ้างอิงสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ลักษณะของตัวเก็บประจุไฟฟ้าตามที่แสดงในรูปที่ 2.31

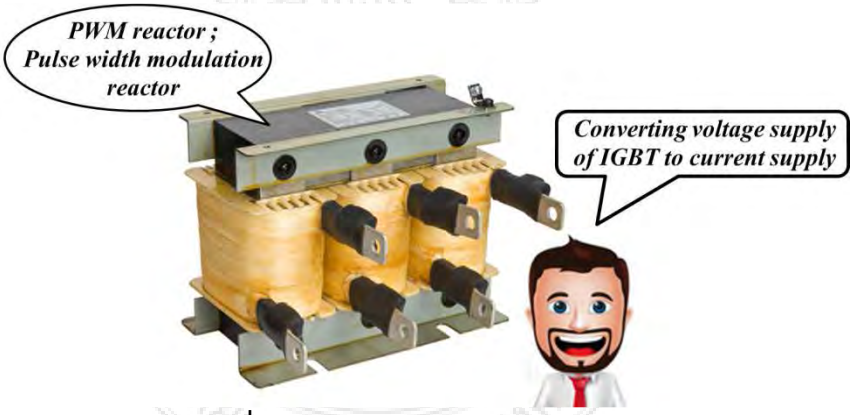
รูปที่ 2.31 ตัวเก็บประจุไฟฟ้า

2. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นอุปกรณ์หลักที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรงที่รับมาจากตัวเก็บประจุไฟฟ้าในตำแหน่ง DC Bus ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง ซึ่งจะสามารถปรับขนาด ความถี่ และมุมเฟส ตามที่ต้องการได้ตามการประมวลผลของอุปกรณ์ควบคุม ลักษณะของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังตามที่แสดงในรูปที่ 2.32



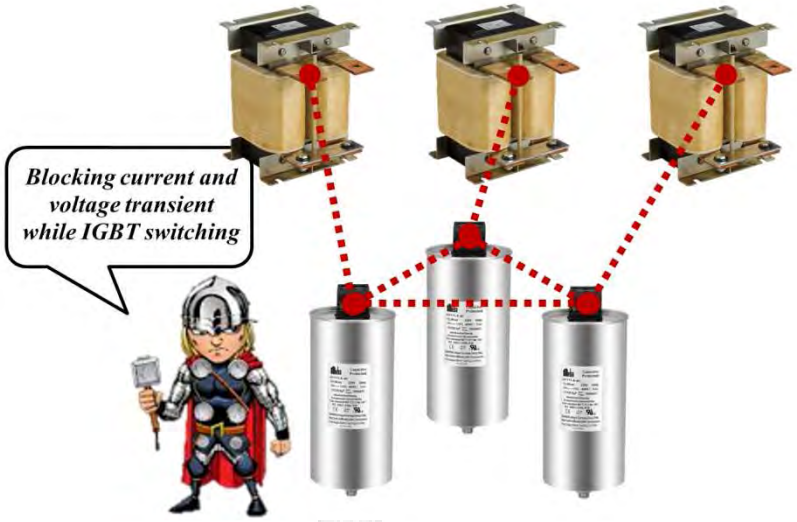
รูปที่ 2.32 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

3. ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ (PWM Reactor) ทำหน้าที่เปรียบเสมือนอุปกรณ์ แปลงแหล่งจ่ายจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่สามารถควบคุมได้ให้เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่สามารถควบคุมปริมาณ และความถี่ได้ ลักษณะของตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับตามที่แสดงในรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ

4. ชุดตัวกรองประกอบด้วย ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ และตัวเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งจะทำหน้าที่ในการกรองกระแส และแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการตัดต่อของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ลักษณะชุดตัวกรองตามที่แสดงในรูปที่ 2.34

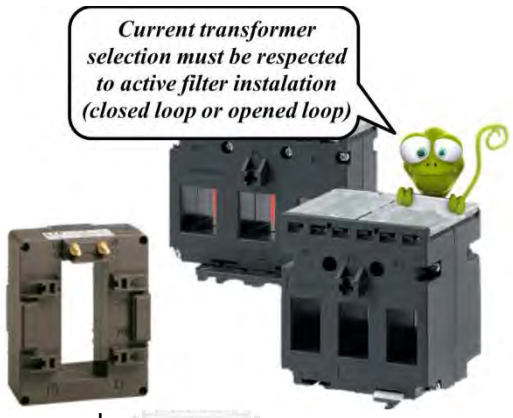


รูปที่ 2.34 ชุดตัวกรอง

5. อุปกรณ์ควบคุมมีสองส่วนด้วยกัน ส่วนแรกคือ Digital Signal Processor (DSP) ทำหน้าที่วิเคราะห์สัญญาณฮาร์มอนิกที่ตรวจวัดได้โดยใช้หลักการ Fast Fourier Transform (FFT) เพื่อวิเคราะห์ลำดับ และปริมาณของฮาร์มอนิกที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพจะต้องสร้างขึ้นเพื่อชดเชยเข้าสู่ระบบ ส่วนที่สองคือ Microcontroller ทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อการทำงานรวมไปถึงการแสดงผลระหว่างผู้ใช้ และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ ลักษณะอุปกรณ์ควบคุมตามที่แสดงในรูปที่ 2.35

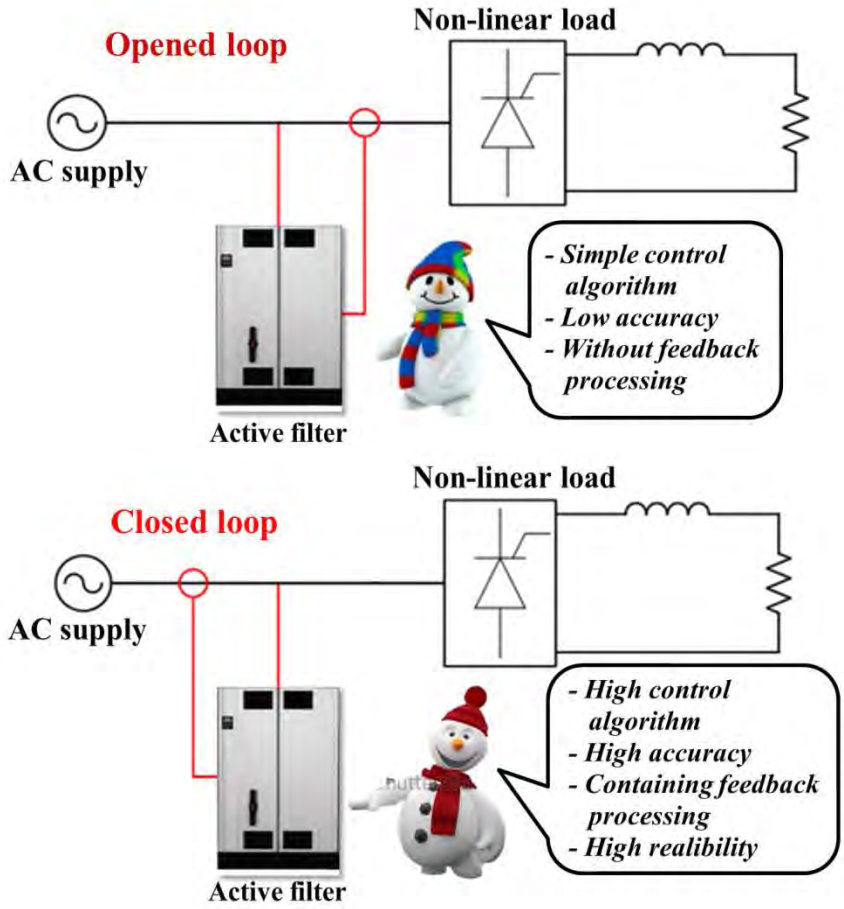
รูปที่ 2.35 อุปกรณ์ควบคุม

6. หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แปลงกระแสไฟฟ้าที่มีปริมาณสูงให้ลดลง เพื่อให้เหมาะสมกับภาครับสัญญาณของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพลักษณะของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าตามที่แสดงในรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 หม้อแปลงกระแสไฟฟ้า

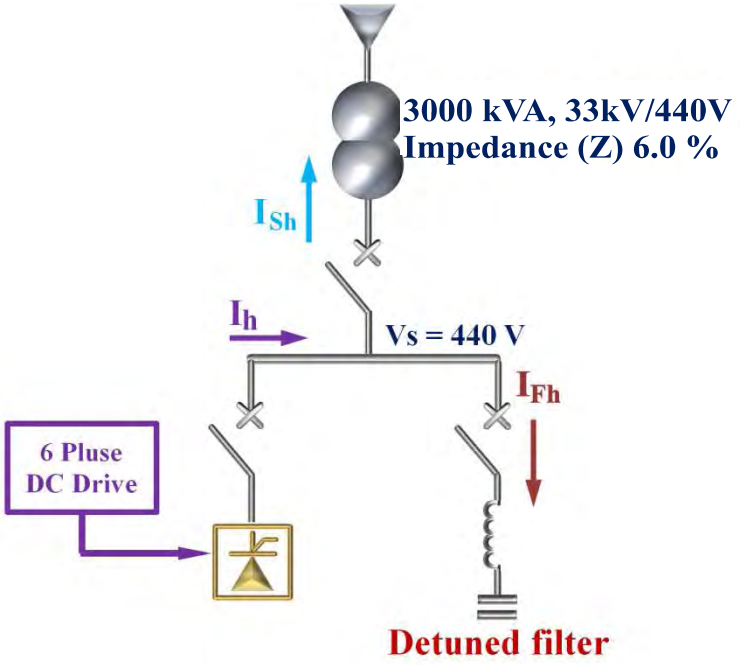
การเลือกใช้หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพจะต้องคำนึงถึงรูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ด้วย หากติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณ ฮาร์มอนิกแบบแอคทีพในลักษณะการทำงานแบบลูปเปิดนั้นมีข้อดีคือสามารถใช้หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าที่มีใช้งานทั่วไปตามท้องตลาดได้ การออกแบบระบบทำได้ง่าย และการควบคุมไม่ซับซ้อน ข้อเสียคือจะมีความแม่นยำต่ำ รูปแบบที่สองการติดตั้งแบบลูปปิดซึ่งมีข้อดีคือระบบจะมีความแม่นยำสูง และสามารถลดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในระบบได้อย่างมีประสิทธิรูปที่เพราะมีการตรวจสอบผลการทำงานอยู่ตลอดเวลา แต่จะต้องใช้หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าที่มีความแม่นยำสูง และมีความยุ่งยากในการออกแบบระบบ อีกทั้งยังต้องใช้อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพที่มีประสิทธิรูปที่สูง รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ตามที่แสดงในรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ

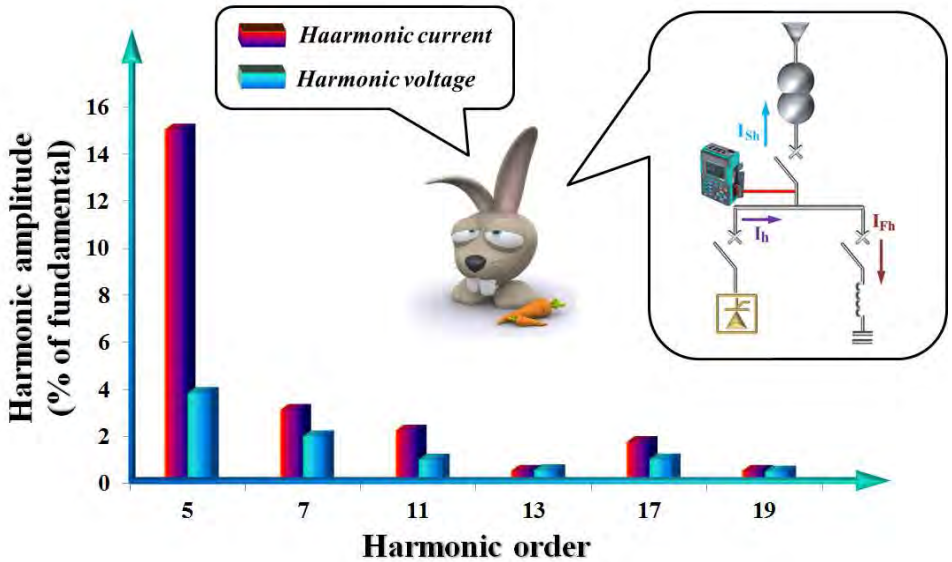
2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(ABB ม.ป.ป.) กรณีศึกษานี้ได้นำเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับโรงงานกระดาษที่มีการใช้อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ชนิดไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์นี้ถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกในระบบ โดยวิธีการที่นำเสนอสำหรับการแก้ไขปัญหาคือ การติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพเพื่อลดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง และยังมีการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูนเพื่อเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบ ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษานี้สามารถพิจารณาได้ตามที่แสดงรูปที่ 2.38



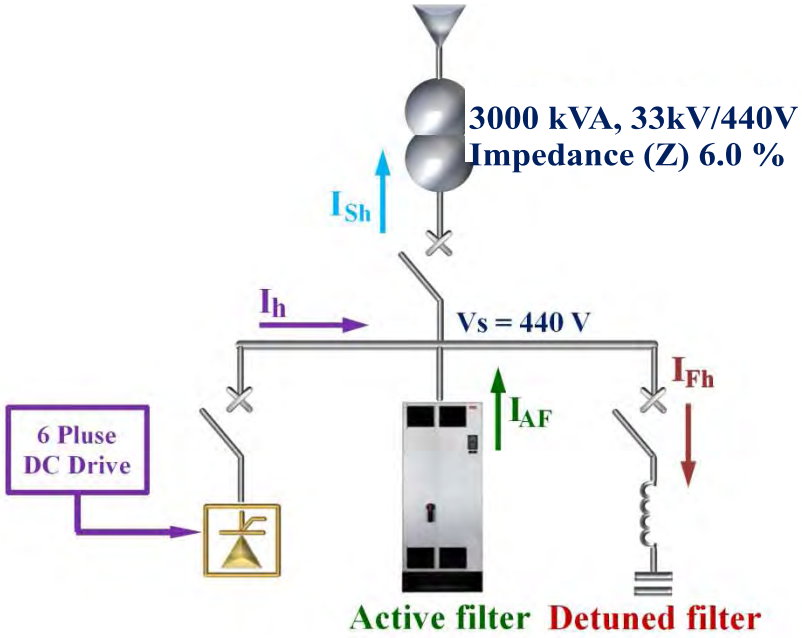
รูปที่ 2.38 ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษา

ผลจากการตรวจวัดแรงดัน และกระแสไฟฟ้าของระบบในรูปที่ 2.38 ขณะที่ยังไม่มีการติดตั้ง หรือเชื่อมต่ออุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพเข้าสู่ระบบ สามารถพิจารณาได้ตาม ที่แสดงรูปที่ 2.39

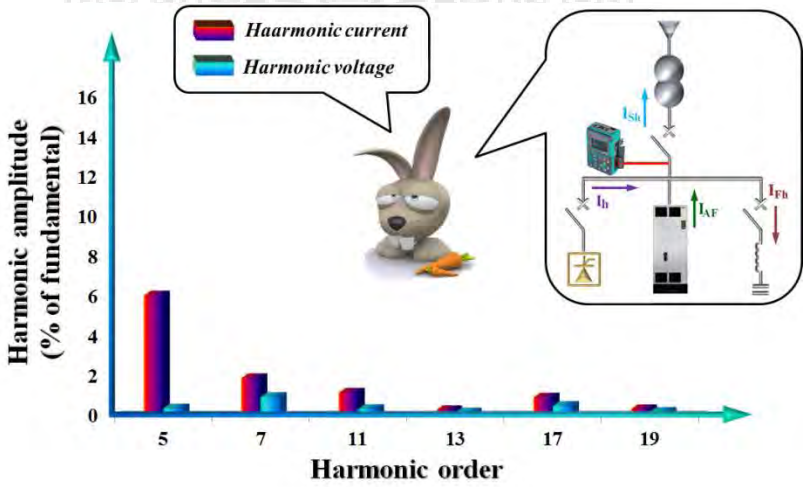


รูปที่ 2.39 ผลการตรวจวัดแรงดัน และกระแสไฟฟ้าของระบบก่อนติดตั้งอุปกรณ์

หลังจากนั้นทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพขนาด 323 แอมป์เข้าสู่ระบบตามที่แสดงในรูปที่ 2.40 แล้วทำการตรวจวัดแรงดัน และกระแสไฟฟ้าของระบบซ้ำอีกครั้งจะได้ผลการตรวจวัดใหม่ตามที่แสดงในรูปที่ 2.41



รูปที่ 2.40 ระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ



รูปที่ 2.41 ผลการตรวจวัดแรงดัน และกระแสไฟฟ้าของระบบหลังติดตั้ง

สรุปหลังจากทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพเข้าสู่ระบบแล้ว สามารถที่จะลดระดับความเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิกลงจากร้อยละ 4.65 ของแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน เหลือร้อยละ 1.31 ของแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน นอกจากนี้อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพเพียงหนึ่งชุดสามารถที่จะกรองกระแสฮาร์มอนิกได้หลายลำดับ ซึ่งมีความเหมาะสมกับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีกระแสฮาร์มอนิกหลายลำดับมากกว่าอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูน

2.6 กรณีศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังของ IEEE (IEEE Node Test Feeder)

(IEEE 1992) ปัจจุบันโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำนวนมากได้ถูกพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ระบบสายป้อนจำหน่ายสามเฟส ในงานวิจัยนี้จึงได้รวบรวมข้อมูลของระบบสายป้อนจำหน่ายสามเฟสสี่สาย หนึ่งเฟสสามสาย แบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าสามเฟส แบบจำลองภาระทางไฟฟ้าต่าง ๆ รวมไปถึงชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า

2.6.1 The IEEE 13 Node Test Feeder

แบบจำลองระบบสายป้อนนี้ถือได้ว่ามีขนาดเล็กมาก และยังมีคุณสมบัติ หรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ที่น่าสนใจซึ่งเหมาะสมกับการนำมาวิเคราะห์ โดยข้อมูลต่าง ๆ มีดังนี้

2.6.1.1 สายป้อน 416 โวลต์ มีระยะสั้น และมีภาระทางไฟฟ้าค่อนข้างสูง

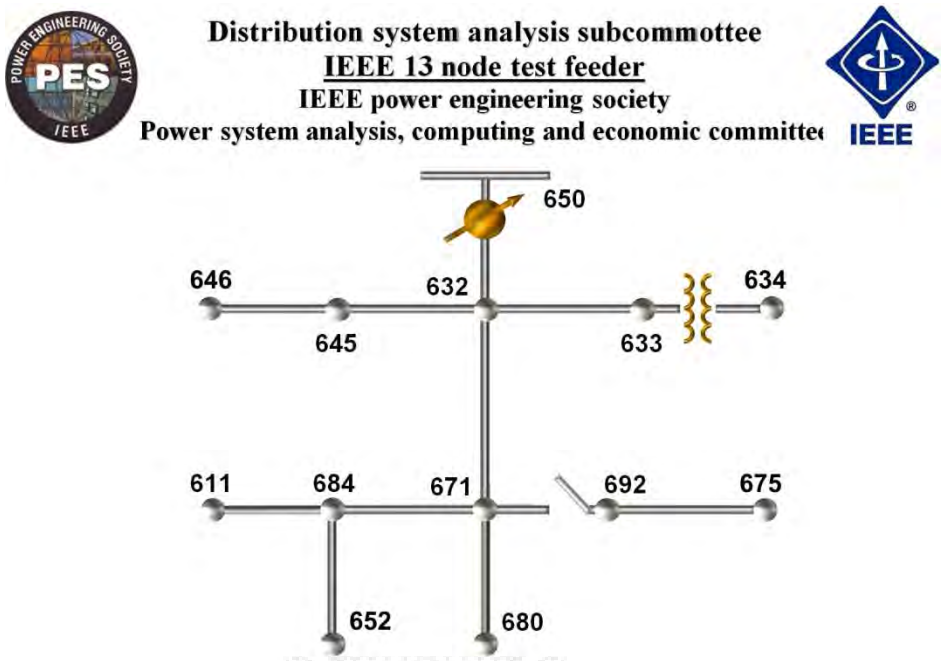
2.6.1.2 สถานีย่อยควบคุมแรงดันไฟฟ้าประกอบด้วย หน่วยควบคุมย่อยๆ สามเฟส และหนึ่งเฟสที่ต่อด้วยกันในรูปแบบสตาร์

2.6.1.3 สายป้อนเหนือหัว และสายป้อนใต้ดินมีหลายระยะ

2.6.1.4 ชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า

2.6.1.5 หม้อแปลงไฟฟ้า

2.6.1.6 จุดภาระทางไฟฟ้าต่าง ๆ ทั้งแบบสมดุล และไม่สมดุล



รูปที่ 2.42 กรณีศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังของ IEEE 13 โนด

2.7 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับการลงทุนในงานวิศวกรรมไฟฟ้า

2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(ปัทมา 2556) งานวิจัยนี้นำเสนอกลยุทธ์การวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนกับการวางแผนกำไรในการลงทุนซื้ออุปกรณ์ประหยัดพลังงาน โดยใช้กลยุทธ์การบัญชีกำหนดเป้าหมาย และกำไร ซึ่งมีวัตถุประสงค์ของการวิจัยเพื่อวิเคราะห์การใช้สินทรัพย์ และเงินทุนในการดำเนินงานสำหรับการตัดสินใจในการลงทุนทำธุรกิจ เพื่อให้ได้ผลตอบแทนที่คุ้มกับการดำเนินธุรกิจในการลงทุนซื้ออุปกรณ์ประหยัดพลังงาน สำหรับการประเมินผู้วิจัยเลือกวิธีการวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุน (Break Even Point; BEP) ในการประเมินความสัมพันธ์ของราคาขาย ปริมาณการขาย ต้นทุน และกำไร สำหรับข้อมูล วิธีการ และผลการวิจัยที่ผู้ทำการวิจัยนำเสนอมีดังนี้

2.7.1.1 ความหมายของจุดคุ้มทุน

จุดคุ้มทุน หมายถึง ระดับการผลิต หรือการขายในระดับใดระดับหนึ่งที่ก่อให้เกิดรายได้รวม (Total Revenue ; TR) เท่ากับต้นทุนรวม (Total Cost ; TC)

2.7.1.2 เงื่อนไขของการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน

ข้อจำกัดที่จะทำให้การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนให้ผลในการวิเคราะห์ได้ดี คือรูปแบบการผลิต และการขายสินค้า โดยรายได้รวมของโครงการจะต้องมาจากการผลิต และการขายสินค้าเพียงชนิดเดียวเท่านั้น สำหรับเงื่อนไข หรือปัจจัยโดยทั่วไปของการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนประกอบด้วย

1. ราคาขายกำหนดให้มีราคาเดียวไม่ว่าปริมาณในการขายจะมาก หรือน้อย
2. ต้นทุนคงที่ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงไม่ว่าปริมาณการผลิตจะเพิ่มขึ้น หรือลดลง
3. ต้นทุนแปรผันต่อหน่วยคงที่

การคำนวณหาจำนวนหน่วยขายที่จุดคุ้มทุน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$BEP = \frac{(F)}{(P\text{-}V)} \qquad (2.1)$$

กำหนดให้

BEP = จุดคุ้มทุน (Break Even Point) มีหน่วยเป็น ปี
F = ต้นทุนคงที่ (Fixed Cost) มีหน่วยเป็น บาท
P = รายได้รวม (Total Revenue) มีหน่วยเป็น บาท
V = ต้นทุนผันแปร (Variable Cost) มีหน่วยเป็น บาท

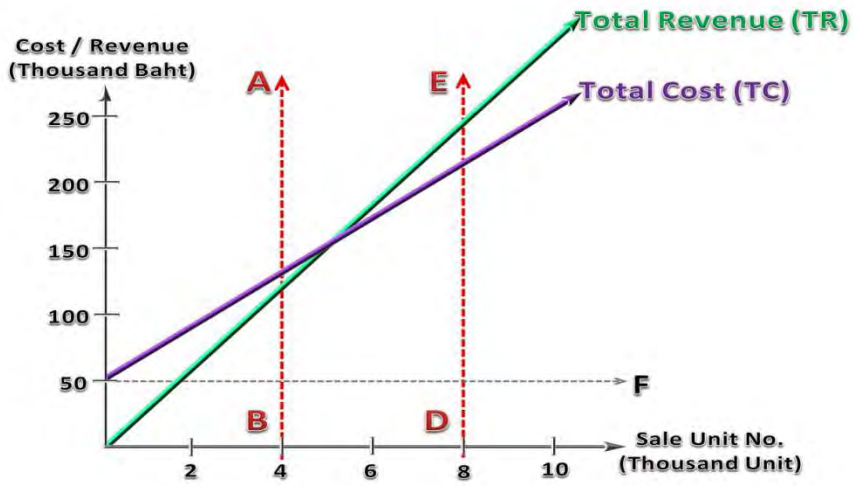
2.7.1.3 วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีวิจัยเชิงปริมาณ ซึ่งเป็นการสำรวจอาคาร หรือโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อนำไปสู่การศึกษาข้อมูล ออกแบบ จัดซื้อ ติดตั้ง และบำรุงรักษาอุปกรณ์ประหยัดพลังงาน สำหรับขั้นตอนในการดำเนินงานของการวิจัยมีดังนี้

1. สำรวจ และวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าเบื้องต้นของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ
2. ทำรายงานนำเสนอการวางแผนกำไรเบื้องต้นให้กับเจ้าของกิจการ
3. เมื่อได้รับความเห็นชอบจากเจ้าของกิจการแล้ว จึงดำเนินการคำนวณการประหยัด พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนของโครงการ
4. ทำการติดตั้งอุปกรณ์ จากนั้นจึงดำเนินการติดตาม และประเมินผล พร้อมทั้งจัด ทำแผนการและดำเนินการบำรุงรักษาอุปกรณ์ไฟฟ้าตลอดอายุการใช้งาน

2.7.1.4 ผลการวิจัย

จากผลการดำเนินงานในหัวข้อที่ผ่านมา ทางคณะผู้ทำการวิจัยได้ทำการติดตาม และประเมินผลของการติดตั้งอุปกรณ์ประหยัดพลังงาน โดยมีการสรุปผลในส่วนของการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของโครงการไว้ตามที่แสดงในรูปที่ 2.43



รูปที่ 2.43 สรุปข้อมูลการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของโครงการ

ผลของการวิเคราะห์ข้อมูลจากรูปที่ 2.43 พบว่าจุดคุ้มทุนของโครงการอยู่ที่ปริมาณสินค้าที่ขายไปจำนวน 5,000 หน่วย นั่นคือจุดที่การลงทุนจะไม่ขาดทุน และได้กำไร หากผู้ประกอบการ ผลิตสินค้าน้อยกว่านี้ผลการลงทุนของโครงการจะอยู่ในสภาวะขาดทุน เช่นการผลิต หรือขายที่ 4,000 หน่วย ตามเส้นตรง (AB) ซึ่งจะพบว่าเส้นตรง (TC) จะอยู่เหนือเส้นตรง (TR) อยู่ประมาณ 10,000 บาท แสดงให้เห็นว่าที่การผลิตและขายสินค้าที่ปริมาณ 4,000 หน่วยจะทำให้ผลการลงทุน ของโครงการขาดทุนอยู่ 10,000 บาท

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

เนื้อหาในบทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย จะนำเสนอเครื่องมือที่ใช้สำหรับการประเมิน หรือวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรม และด้านเศรษฐศาสตร์สำหรับการแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยข้อมูลที่นำเสนอประกอบด้วยข้อมูลของอุปกรณ์ปรับปรุงคุณรูปที่กำลังไฟฟ้า ซึ่งแยกเป็นสองส่วนคือ อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกโดยมี อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูน อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิก แบบตัวกรองจูน และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ ข้อมูลของระบบไฟฟ้ากำลังจะกล่าวถึงที่มาของรูปแบบระบบไฟฟ้ากำลังที่มานำประยุกต์ใช้โดยมีการปรับเปลี่ยนข้อมูลเพื่อให้สอดคล้องกับการจำลองตัวอย่างระบบไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทย ซึ่งจะมีข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า ภาระทางไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้น และไม่เป็นเชิงเส้น สุดท้ายจะเป็นวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ หรือประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยจะกล่าวถึงวิธีการที่นิยมใช้สำหรับการประเมินความเหมาะสมในการลงทุน รวมไปถึงวิธีการที่เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

3.2 เครื่องมือที่ใช้

เป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจากโปรแกรมสำเร็จรูปโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูน อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูน อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ และข้อมูลของระบบไฟฟ้ากำลังมาคำนวณ และวิเคราะห์โดยใช้สมการทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า และสมการทางด้านคณิตศาสตร์แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีดังนี้

3.2.1 แบบจำลองของอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่นำมาใช้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์หลักในการชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบ ลักษณะของอุปกรณ์ตามที่แสดงในรูปที่ 3.1

ลักษณะของอุปกรณ์

สัญลักษณ์

รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์มีดังนี้

1. ค่าความต้านทานการเก็บประจุไฟฟ้า

$$X_C = \frac{(V_C)^2}{(Q_C)} \tag{3.1}$$

2. กระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐาน

$$I_C = \frac{\left(\frac{[V_{ph}]}{[\sqrt{3}]}\right)}{(X_C)} \tag{3.2}$$

3. มุมเฟส

$$\theta_C = sin^{-1}\left(\frac{[Q_C]}{[\sqrt{3}][V_{Ph}][I_C]}\right) \tag{3.3}$$

กำหนดให้

Q_C = ขนาดของอุปกรณ์เป็นกำลังไฟฟ้าต้านกลับ มีหน่วยเป็น วาร์ (VAr)

V_C = พิกัดแรงดันของอุปกรณ์ มีหน่วยเป็น โวลท์ (Volt)

V_{Ph} = พิกัดแรงดันใช้งานในระบบเป็นแรงดันเฟส มีหน่วยเป็น โวลท์ (Volt)

I_C = กระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐานของอุปกรณ์ มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (Ampere)

X_C = ค่าความต้านทานการเก็บประจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ohm, Ω)

θ_C = มุมเฟสของอุปกรณ์ มีหน่วยเป็น องศาทางไฟฟ้า (^{o}e)

3.2.2 แบบจำลองของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูน

อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูนมีส่วนประกอบคล้ายคลึงกับอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า แต่จะมีการติดตั้งตัวต้านทานการเหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับอนุกรมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้า ลักษณะของอุปกรณ์ตามที่แสดงในรูปที่ 3.2

ลักษณะของอุปกรณ์

สัญลักษณ์

รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูน

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์มีดังนี้

1. ค่าความต้านทานการเก็บประจุไฟฟ้า

$$X_{C(DF)} = \frac{\left(V_{C(DF)}\right)^2}{\left(Q_{C(DF)}\right)} \tag{3.4}$$

2. ค่าความต้านทานการเนี่ยวนำ

$$X_{L(DF)} = \frac{\left(V_{C(DF)}\right)^2}{\left(Q_{C(DF)}\right)}\left(\%X_{L(DF)}\right) \tag{3.5}$$

3. ตำแหน่งการปรับจูนสัญญาณฮาร์มอนิก

$$h_{DF} = \sqrt{\frac{(100)}{\left(\%X_{L(DF)}\right)}} \tag{3.6}$$

4. ค่าความต้านทานของตัวต้านทานการเหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ

$$R_{L(DF)} = \frac{\left(X_{L(DF)}\right)\left(h_{DF}\right)}{\left(Q\text{-}Factor\right)} \tag{3.7}$$

5. กระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐาน

$$I_{DF} = \frac{\left(\frac{\left[V_{ph}\right]}{\left[\sqrt{3}\right]}\right)}{\sqrt{\left(R_{L(DF)}\right)^2 + \left(X_{L(DF)} - X_{C(DF)}\right)^2}} \quad (3.8)$$

6. มุมเฟส

$$\theta_{DF} = sin^{-1}\left(\frac{\left[Q_{C(DF)}\right]}{[\sqrt{3}][V_{Ph}][I_{DF}]}\right) \quad (3.9)$$

กำหนดให้

$Q_{C(DF)}$ = ขนาดของอุปกรณ์เป็นกำลังไฟฟ้าต้านกลับ มีหน่วยเป็น วาร์ (VAr)

V_{DF} = พิกัดแรงดันของอุปกรณ์ มีหน่วยเป็น โวลท์ (Volt)

V_{Ph} = พิกัดแรงดันใช้งานในระบบเป็นแรงดันเฟส มีหน่วยเป็น โวลท์ (Volt)

I_{DF} = กระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐานของอุปกรณ์ มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (Ampere)

$X_{C(DF)}$ = ค่าความต้านทานการเก็บประจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ohm, Ω)

$X_{L(DF)}$ = ค่าความต้านทานการเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ohm, Ω)

$R_{L(DF)}$ = ค่าความต้านทานของตัวต้านทานการเหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ohm, Ω)

$\%X_{L(DF)}$ = ค่าความต้านต้านทานการเหนี่ยวนำจากผู้ผลิต มีค่าเท่ากับร้อยละของค่าความต้านการเก็บประจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้า โดยทั่วไปมีค่า 5.67, 6, 7 และ 14 สำหรับการวิเคราะห์เลือก 5.67 เนื่องจากระบบที่พิจารณาระบบสามเฟสสมดุล แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเป็นอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ และเน้นการลดความเพี้ยนของกระแสที่จุดต่อร่วม

θ_{DF} = มุมเฟสของอุปกรณ์ มีหน่วยเป็น องศาทางไฟฟ้า (^{o}e)

h_{DF} = ตำแหน่งการปรับจูนสัญญาณฮาร์มอนิก ตามมาตรฐาน IEC Standard 61642 : 1997 ตำแหน่งในการปรับสัญญาณจะต้องอยู่ห่างจากฮาร์มอนิกลำดับที่พิจารณาไม่ต่ำกว่าร้อยละ 10 ของความถี่ที่ฮาร์มอนิกลำดับนั้น ๆ

$Q\text{-}Factor$ = ค่าตัวประกอบคุณรูปที่ โดยทั่วไปมีค่าเท่ากับ 60

3.2.3 แบบจำลองของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูน

อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูน มีส่วนประกอบคล้ายคลึงกับอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองดีจูน แต่จะไม่มีการแบ่งชุดอุปกรณ์ภายในออกเป็นชุดย่อยๆ ลักษณะการออกแบบจะออกแบบเป็นชุดใหญ่เพียงหนึ่ง หรือสองชุดเท่านั้นต่อหนึ่งอุปกรณ์ ลักษณะของอุปกรณ์ตามที่แสดงในรูปที่ 3.3

ลักษณะของอุปกรณ์

สัญลักษณ์

รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูน

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์มีดังนี้

1. ค่าความต้านทานการเก็บประจุไฟฟ้า

$$X_{C(TF)} = \frac{\left(V_{C(TF)}\right)^2}{\left(Q_{C(TF)}\right)} \tag{3.10}$$

2. ค่าความต้านทานการเนี่ยวนำ

$$X_{L(TF)} = \frac{\left(V_{C(TF)}\right)^2}{\left(Q_{C(TF)}\right)}\left(\%X_{L(TF)}\right) \tag{3.11}$$

3. ตำแหน่งการปรับจูนสัญญาณฮาร์มอนิก

$$h_{TF} = \sqrt{\frac{(100)}{\left(\%X_{L(TF)}\right)}} \tag{3.12}$$

4. ค่าความต้านทานของตัวต้านทานการเหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ

$$R_{L(TF)} = \frac{\left(X_{L(TF)}\right)\left(h_{TF}\right)}{\left(Q\text{-}Factor\right)} \tag{3.13}$$

5. กระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐาน

$$I_{TF} = \frac{\left(\frac{\left[V_{ph}\right]}{\left[\sqrt{3}\right]}\right)}{\sqrt{\left(R_{L(TF)}\right)^2 + \left(X_{L(TF)} - X_{C(TF)}\right)^2}} \tag{3.14}$$

6. มุมเฟส

$$\theta_{TF} = sin^{-1}\left(\frac{\left[Q_{C(TF)}\right]}{[\sqrt{3}][V_{Ph}][I_{TF}]}\right) \tag{3.15}$$

กำหนดให้

$Q_{C(TF)}$ = ขนาดของอุปกรณ์เป็นกำลังไฟฟ้าต้านกลับ มีหน่วยเป็น วาร์ (VAr)

V_{TF} = พิกัดแรงดันของอุปกรณ์ มีหน่วยเป็น โวลท์ (Volt)

V_{Ph} = พิกัดแรงดันใช้งานในระบบเป็นแรงดันเฟส มีหน่วยเป็น โวลท์ (Volt)

I_{TF} = กระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐานของอุปกรณ์ มีหน่วยเป็น แอมแปร์ (Ampere)

$X_{C(TF)}$ = ค่าความต้านทานการเก็บประจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ohm, Ω)

$X_{L(TF)}$ = ค่าความต้านทานการเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ohm, Ω)

$R_{L(TF)}$ = ค่าความต้านทานของตัวต้านทานการเหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ohm, Ω)

$\%X_{L(TF)}$ = ค่าความต้านต้านทานการเหนี่ยวนำจากผู้ผลิต มีค่าเท่ากับร้อยละของ

ค่าความต้านการเก็บประจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้า โดยทั่วไปจะมีค่า 4.34 สำหรับอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูนลำดับที่ 5 และ 2.18 สำหรับอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูนลำดับที่ 7 สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาจูนลำดับ 5 และ 7 เท่านั้น เนื่องจากฮาร์มอนิกที่มีนัยยะสำคัญ และมีปริมาณสูงในระบบจะมีฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และ 7

θ_{TF} = มุมเฟสของอุปกรณ์ มีหน่วยเป็น องศาทางไฟฟ้า ($^{\circ}$e)

h_{TF} = ตำแหน่งการปรับจูนสัญญาณฮาร์มอนิก ตามมาตรฐาน IEC Standard 61642 : 1997 ตำแหน่งในการปรับสัญญาณจะต้องอยู่ห่างจากฮาร์มอนิกลำดับที่พิจารณาไม่เกินร้อยละ 10 ของความถี่ที่ฮาร์มอนิกลำดับนั้น ๆ

$Q\text{-}Factor$ = ค่าตัวประกอบคุณรูปที่ โดยทั่วไปมีค่าเท่ากับ 50

3.2.4 แบบจำลองของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ

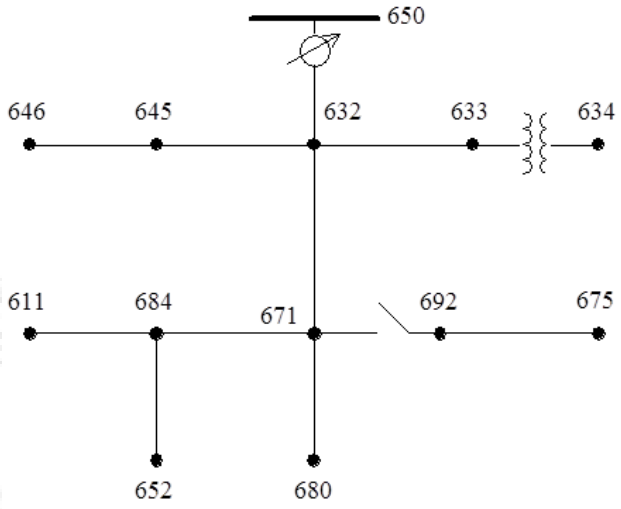
อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการของการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิก โดยกระแสฮาร์มอนิกที่ชดเชยนั้นจะมีขนาดเทียบเท่า หรือใกล้เคียงกับกระแสฮาร์มอนิกที่มีในระบบ แต่จะมีมุมเฟสตรงข้ามกันทำกระแสฮาร์มอนิกในระบบมีปริมาณลดลง สำหรับการเลือกขนาดของอุปกรณ์จะพิจารณาจากปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในระบบ ลักษณะของอุปกรณ์ตามที่แสดงในรูปที่ 3.4

ลักษณะของอุปกรณ์

สัญลักษณ์

รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ

3.2.5 แบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลัง



รูปที่ 3.5 กรณีศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังของ IEEE จำนวน 13 โนด

จากที่แสดงในรูปที่ 3.5 เป็นแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังจากข้อมูลกรณีศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังของ IEEE จำนวน 13 โนด (IEEE 13 Node Test Feeder) ซึ่งแบบจำลองของระบบดังกล่าวประกอบด้วยอุปกรณ์ และค่าพารามิเตอร์สำหรับองค์ประกอบพื้นฐานต่างๆ ที่เป็นส่วนสำคัญของระบบไฟฟ้ากำลัง โดยข้อมูลที่อ้างอิงจากกรณีศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังของ IEEE จะนำข้อมูลของภาระทางไฟฟ้า และพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้ามาใช้ ซึ่งโนดที่นำข้อมูลมาใช้คือโนดที่ 633 และ 634 เนื่องจากข้อมูลมีความสอดคล้องกับรูปแบบระบบไฟฟ้ากำลังของโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทยจำนวนหนึ่งแห่งที่จะทำการศึกษา และวิเคราะห์ตามขอบเขตของวิทยานิพนธ์ สำหรับข้อมูลของภาระทางไฟฟ้า และพิกัดของหม้อแปลงไฟฟ้าที่โนด 633 และ 634 มีดังนี้

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจากกรณีศึกษาระบบไฟฟ้ากำลังของ IEEE จำนวน 13 โนด

รายการข้อมูล	พิกัด			ระดับแรงดัน	
	kVA	kW	kVAr	High side (kV)	Low side (kV)
หม้อแปลงไฟฟ้า	500	-	-	4.16	0.48
ภาระทางไฟฟ้า	-	160	110	-	0.48

เพื่อให้ข้อมูลมีความสอดคล้องกับระบบไฟฟ้าในประเทศไทยจึงมีการปรับเปลี่ยนข้อมูลของระดับแรงดันที่ใช้ในประเทศไทย โดยพิจารณาใช้ค่าพารามิเตอร์จากระบบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และเพื่อให้แบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลังมีความสอดคล้องกับระบบที่ใช้งานจริงภายในโรงงานอุตสาหกรรม จึงมีการปรับเพิ่มพิกัดของอุปกรณ์ และภาระทางไฟฟ้าในระบบ เพราะฉะนั้นข้อมูลพิกัดของอุปกรณ์และภาระทางไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการศึกษาจะถูกปรับเปลี่ยนไป โดยสามารถพิจารณาได้ตามที่แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลพิกัดของอุปกรณ์ และภาระทางไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการศึกษา

รายการข้อมูล	พิกัด			ระดับแรงดัน	
	kVA	kW	kVAr	High side (kV)	Low side (kV)
หม้อแปลงไฟฟ้า	2,500	-	-	22	0.4
ภาระทางไฟฟ้า	-	1,100	870	-	0.4

จากพิกัดของภาระทางไฟฟ้าที่แสดงในตารางที่ 3.2 สามารถนำมาสร้างแบบจำลองภาระทางไฟฟ้าในระบบโดยจำแนกเป็นสองชนิดได้ดังนี้

1. ภาระทางไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้น กำหนดให้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 550 กิโลวัตต์ และมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 0.35

2. ภาระทางไฟฟ้าที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกกำหนด ให้เป็นอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 560 กิโลวัตต์ และมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 0.70

ภาระทางไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้น ภาระทางไฟฟ้าที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น

รูปที่ 3.6 ภาระทางไฟฟ้าในแบบจำลองของระบบไฟฟ้ากำลัง

3.2.6 วิธีการสำหรับการประเมิน หรือการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

วิธีการในการวิเคราะห์ หรือประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์สำหรับการลงทุนมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมมีวิธีการที่นิยมใช้อยู่ทั่วไป 4 วิธีด้วยกันดังนี้

1. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value ; NPV)
2. อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return ; IRR)
3. งวดเวลาคืนทุน (Payback Period ; PB)
4. จุดคุ้มทุน (Break Even Point ; BEP)

สำหรับวิธีการที่เลือกใช้ในการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของวิทยานิพนธ์คือ การวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนเนื่องจากข้อมูลที่พิจารณามีความสอดคล้องทั้งในเรื่องของผลประโยชน์ที่จะได้รับซึ่งมีทางเดียวคือค่าปรับจากการไฟฟ้าที่สามารถลดได้ การลงทุนซึ่งประกอบด้วยต้นทุนคงที่คือ ค่าจัดซื้อจัดสร้างอุปกรณ์ ค่าแรงในการติดตั้ง ทดสอบ และจ่ายไฟเข้าสู่อุปกรณ์ ต้นทุนผันแปรคือ อัตราดอกเบี้ยจากสถาบันการเงิน และค่าเสื่อมสรูปที่ของอุปกรณ์ในจะทำให้ผลการประเมินเป็นไปอย่างมีประสิทธิรูปที่ นอกจากนี้วิธีการวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนยังสามารถแสดงผล การวิเคราะห์ หรือประเมินให้อยู่ในรูปแบบของกราฟเส้นได้ ซึ่งทำให้สามารถนำข้อมูลไปใช้ประกอบการรายงานผล เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการตัดสินใจลงทุนได้ และข้อดีอีกประการหนึ่งของการวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนคือ ผู้ลงทุนสามารถเห็นผลกำไรหลังจากที่โครงการผ่านจุดคุ้มทุนไปแล้ว

สำหรับวิธีการประเมิน หรือการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ ใช้หลักการวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนในการประเมินผลการลงทุนติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงคุณรูปที่กำลังไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิก โดยมีปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ หรือประเมินดังนี้

1. งบประมาณที่ใช้สำหรับการลงทุนในการติดตั้งอุปกรณ์
2. อัตราดอกเบี้ยสินเชื่อจากสถาบันการเงิน สำหรับการลงทุนผ่านสถาบันการเงิน
3. ค่าเสื่อมสรูปที่ของอุปกรณ์
4. ค่าปรับจากการไฟฟ้ากรณีที่ในระบบมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าเกณฑ์ เป็นผลประโยชน์ที่ได้รับจากค่าใช้จ่ายเดิมที่สามารถลดได้
5. ภาษีมูลค่าเพิ่ม ณ ที่จ่าย

จากปัจจัยดังกล่าวสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อหาจุดคุ้มทุนสำหรับการลงทุนในโครงการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงคุณรูปที่กำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิกได้ตามที่แสดงในสมการที่ 3.16

$$BEP = \frac{(F)}{(p - v)} \tag{3.16}$$

กำหนดให้

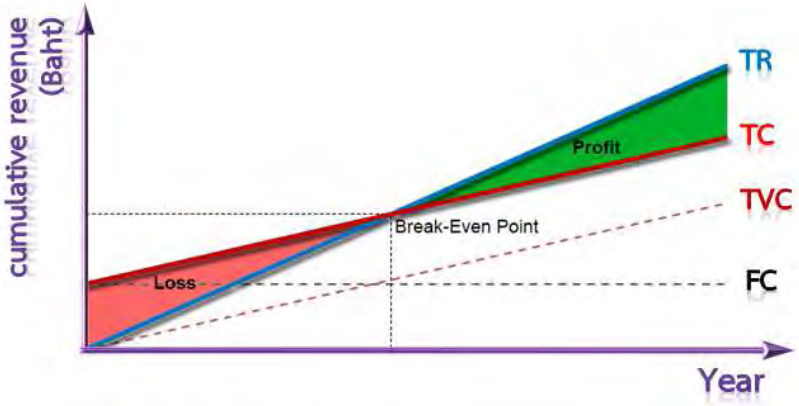
BEP = จุดคุ้มทุนสำหรับการลงทุน มีหน่วยเป็น ปี

F = งบประมาณที่ใช้สำหรับการลงทุนในการติดตั้งอุปกรณ์ มีหน่วยเป็น บาท

p = ค่าปรับจากการไฟฟ้าที่สามารถลดได้ รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม มีหน่วยเป็น บาท

v = ดอกเบี้ยสินเชื่อ รวมค่าเสื่อมสรูปที่ของอุปกรณ์ มีหน่วยเป็น บาท

นอกจากนี้การแสดงผลการวิเคราะห์จะแสดงออกมาให้อยู่ในรูปของกราฟเส้นตามที่แสดงในรูปที่ 3.7 เพื่อให้สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการนำเสนอเพื่อประกอบการตัดสินใจสำหรับการลงทุนได้



รูปที่ 3.7 กราฟผลการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของโครงการ

องค์ประกอบของกราฟในรูปที่ 3.7 สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. เส้นตรงสีน้ำเงิน (Total Revenue ; TR) คือ ข้อมูลสะสมของผลประโยชน์ในแต่ละปี ที่จะได้รับตลอด ทั้งโครงการตลอดช่วงระยะเวลาที่พิจารณา

2. เส้นตรงสีแดง (Total Cost ; TC) คือ ข้อมูลสะสมของค่าใช้จ่ายที่ใช้สำหรับการลงทุน ในแต่ละปี ประกอบด้วยต้นทุนคงที่ และต้นทุนผันแปร

3. เส้นประสีดำ (Fixed Cost ; FC) คือ ข้อมูลของค่าใช้จ่ายส่วนที่เป็นต้นทุนคงที่

4. เส้นประสีเลือดหมู (Total Variable Cost ; TVC) คือ ข้อมูลของค่าใช้จ่ายสะสมส่วนที่เป็นต้นทุนคงผันแปร

5. จุดที่เส้นตรงสีน้ำเงิน (TR) และสีแดง (TC) ตัดกัน คือจุดคุ้มทุนของโครงการ

6. บริเวณที่แรงเงาสีแดง คือ ระยะเวลาที่โครงการยังคงขาดทุนอยู่

7. บริเวณที่แรงเงาสีเขียว คือ ระยะเวลาหลังจากจุดคุ้มทุนเป็นช่วงที่สามารถทำกำไรได้

โดยรูปแบบการแสดงผลของข้อมูลดังกล่าวนี้จะถูกแสดงในบทที่ 4 กรณีศึกษา และการวิเคราะห์ ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงข้อมูลที่ได้จากการประเมินผลการทดสอบ หรือการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของกรณีศึกษาในแต่ละกรณี

บทที่ 4
กรณีศึกษาและการวิเคราะห์

4.1 บทนำ

บทที่ 4 กรณีศึกษาและการวิเคราะห์ได้นำเสนอข้อมูลของอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งประกอบด้วย อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิก กรณีศึกษาที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรม และด้านเศรษฐศาสตร์ สำหรับอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังไว้ 10 กรณีด้วยกัน ซึ่งกรณีศึกษาทั้ง 10 นี้สามารถจำแนกรูปแบบของการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกเป็น 3 รูปแบบตามจำนวนอุปกรณ์ที่ติดตั้งเข้าสู่ระบบ โดยมีรูปแบบดังนี้

รูปแบบที่หนึ่ง ติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า หรืออุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบเพียงหนึ่งอุปกรณ์ต่อหนึ่งกรณีศึกษา

รูปแบบที่สอง ติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบจำนวนสองอุปกรณ์ต่อหนึ่งกรณีศึกษา

รูปแบบที่สาม ติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบจำนวนสามอุปกรณ์ต่อหนึ่งกรณีศึกษา

สำหรับการวิเคราะห์จะพิจารณาผลของการติดตั้งอุปกรณ์เข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิกทั้งทางด้านวิศวกรรม และด้านเศรษฐศาสตร์ ทางด้านวิศวกรรมจะพิจารณากระแสฮาร์มอนิกที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกในระบบกระแสฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลัง กระแสฮาร์มอนิกที่อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และกระแสฮาร์มอนิกที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิก รวมไปถึงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบ ทางด้านเศรษฐศาสตร์จะวิเคราะห์จุดคุ้มทุนสำหรับการลงทุนในการติดตั้งอุปกรณ์แต่ละชนิดเข้าสู่ระบบซึ่งจะแสดงระยะเวลาที่ใช้ในการคืนทุนของแต่ละกรณี โดยปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณาประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์ ค่าเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ ดอกเบี้ยสินเชื่อ ทั้งหมดนี้เป็นส่วนของต้นทุนในการลงทุน และการลดค่าปรับจากการไฟฟ้าเนื่องจากระบบมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าเกณฑ์ และภาษี ณ ที่จ่าย ซึ่งเป็นส่วนของผลประโยชน์ที่ได้รับจากการลงทุน

4.2 คุณสมบัติของอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้า

4.2.1 อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

1. ชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitor Bank) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ชดเชยกำลัง ไฟฟ้าต้านกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบให้มีค่าสูงขึ้น โดยระดับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมในระบบไฟฟ้ากำลังทั่วไปคือ 0.95 ล้าหลัง

4.2.2 อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิก

1. ชุดตัวกรองแบบดีจูน (Detuned Filter Bank) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบให้มีค่าสูงขึ้น แต่จะมีความแตกต่างกับชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าตรงที่สามารถใช้งานกับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิกได้ และสามารถกรองกระแสฮาร์มอนิกออกจากระบบได้ในระดับหนึ่ง

2. ชุดตัวกรองแบบจูน (Tuned Filter Bank) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กรองกระแสฮาร์มอนิกออกจากระบบ โดยการกรองกระแสฮาร์มอนิกนั้นจะขึ้นอยู่กับการออกแบบค่าความต้านทานของตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับที่ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งโดยปกติแล้วชุดตัวกรองแบบจูน 1 ชุด จะสามารถกรองกระแสฮาร์มอนิกได้เพียงลำดับเดียวเท่านั้น หากมีกระแส ฮาร์มอนิกหลายลำดับที่ต้องการกรองจะต้องติดตั้งชุดตัวกรองแบบจูนเพิ่ม นอกจากนี้ตัวกรอง แบบจูนยังสามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ แต่อย่างไรก็ดีการออกแบบจะต้องคำนึงถึงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบด้วย เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับเกินความต้องการของระบบจากการต่อชุดตัวกรองแบบจูนเข้าสู่ระบบ

3. ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ (Active Harmonic Filter) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ชดเชยกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบเพื่อลดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในระบบให้มีค่าลดลง โดยกระแสฮาร์มอนิกที่จ่ายเข้าสู่ระบบจะมีมุมเฟสตรงกันข้ามกับกระแสฮาร์มอนิกในระบบ นอกจากนี้ตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีพยังสามารถควบคุมให้ชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับในระบบ และปรับปรุงเรื่องความสมุดลของแรงดันไฟฟ้าในระบบได้ แต่จะสามารถชดเชย และปรับปรุงได้ได้ต่อเมื่ออุปกรณ์สามารถชดเชยกระแสฮาร์มอนิกได้ตามความต้องการของระบบแล้ว

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำงานของอุปกรณ์แต่ละชนิด

ประสิทธิภาพในการทำงาน	C-Bank	Detuned	Tuned	Active
การชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับ	สูง	สูง	สูง	ต่ำ
ความสามารถในทำงานภายใต้ระบบที่มีการรบกวนฮาร์มอนิก	ต่ำมาก	ปานกลาง	สูง	สูง
การกรองกระแสฮาร์มอนิก (ปริมาณ)	-	ต่ำ	ค่อนข้างสูง	สูง
การกรองกระแสฮาร์มอนิก (ครอบคลุม)	-	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
การทำงานร่วมกัน	ไม่ได้	ได้	ได้	ได้

4.3 กรณีศึกษาสำหรับการวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรม และด้านเศรษฐศาสตร์

เพื่อให้สามารถศึกษา และวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการทำงานของอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าแต่ละชนิด การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ รวมทั้งการประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์จึงได้กำหนดกรณีศึกษาสำหรับการทดสอบระบบไฟฟ้าในแบบจำลองไว้ดังนี้

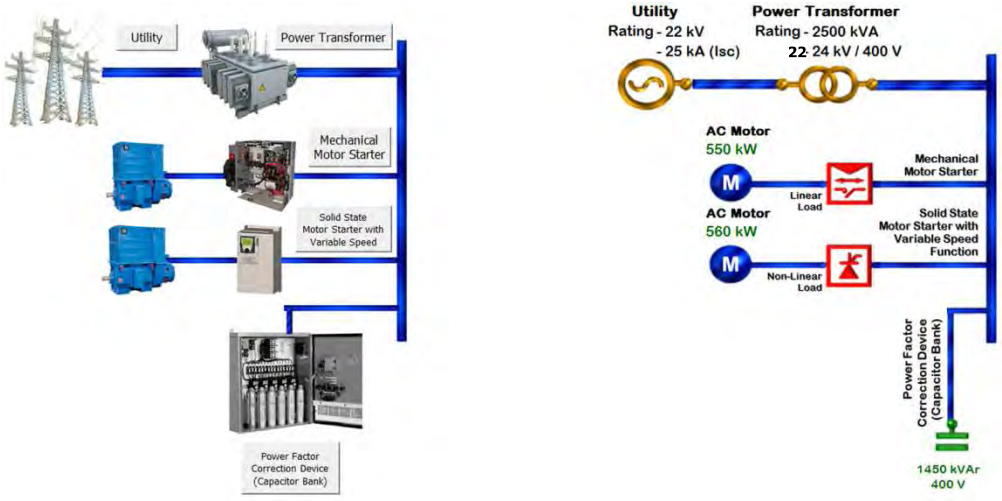
ตารางที่ 4.2 กรณีศึกษาสำหรับการวิเคราะห์การแก้ไขปัญหาการรบกวนฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง

รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์			เงื่อนไขในการปรับปรุง	
จำนวนอุปกรณ์	กรณีศึกษา	ชนิดของอุปกรณ์	การรบกวนฮาร์มอนิก IEEE519 - 2014	ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า การไฟฟ้าในประเทศไทย
1	1	C[1]	≤ 8 % TDD[5]	≥ 0.85 ล้าหลัง
1	2	DF[2]	≤ 8 % TDD[5]	≥ 0.85 ล้าหลัง
1	3	TF[3]	≤ 8 % TDD[5]	≥ 0.85 ล้าหลัง
1	4	AHF[4]	≤ 8 % TDD[5]	≥ 0.85 ล้าหลัง
2	5	C+DF	≤ 8 % TDD[5]	≥ 0.85 ล้าหลัง
2	6	C+TF	≤ 8 % TDD[5]	≥ 0.85 ล้าหลัง
2	7	C+AHF	≤ 8 % TDD[5]	≥ 0.85 ล้าหลัง
2	8	DF+AHF	≤ 8 % TDD[5]	≥ 0.85 ล้าหลัง
3	9	C+DF+TF	≤ 8 % TDD[5]	≥ 0.85 ล้าหลัง
3	10	C+DF+AHF	≤ 8 % TDD[5]	≥ 0.85 ล้าหลัง

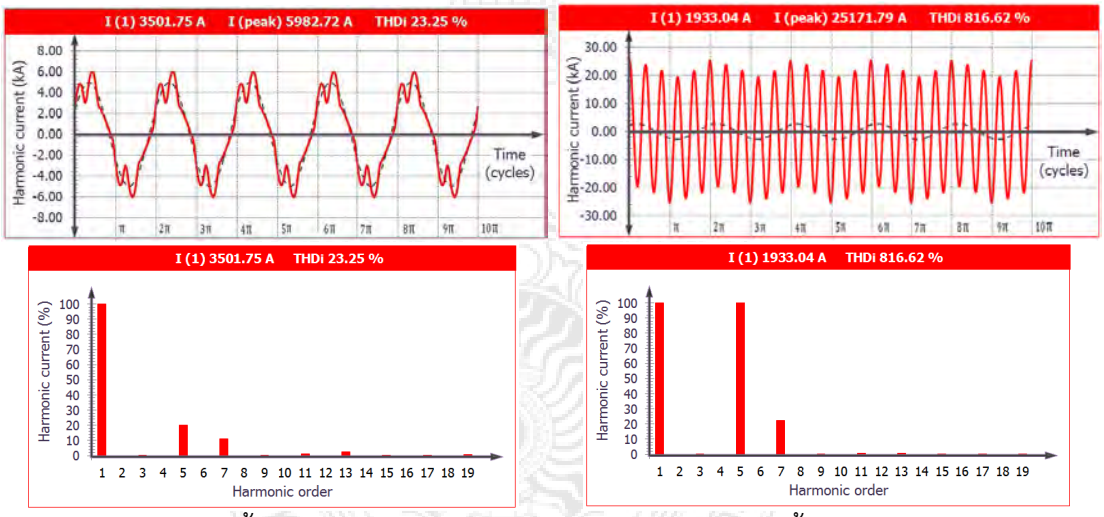
[1]C = Capacitor Bank [2]DF = Detuned Filter Bank TF[3] = Tuned Filter Bank
[4]AHF = Active Harmonic Filter [5]TDD = Total Demand Distortion (THD_i on CCP)

4.3.1 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิก

ภาระทางไฟฟ้าที่ทำการวิเคราะห์ประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ และอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ตามที่แสดงในรูปที่ 4.1

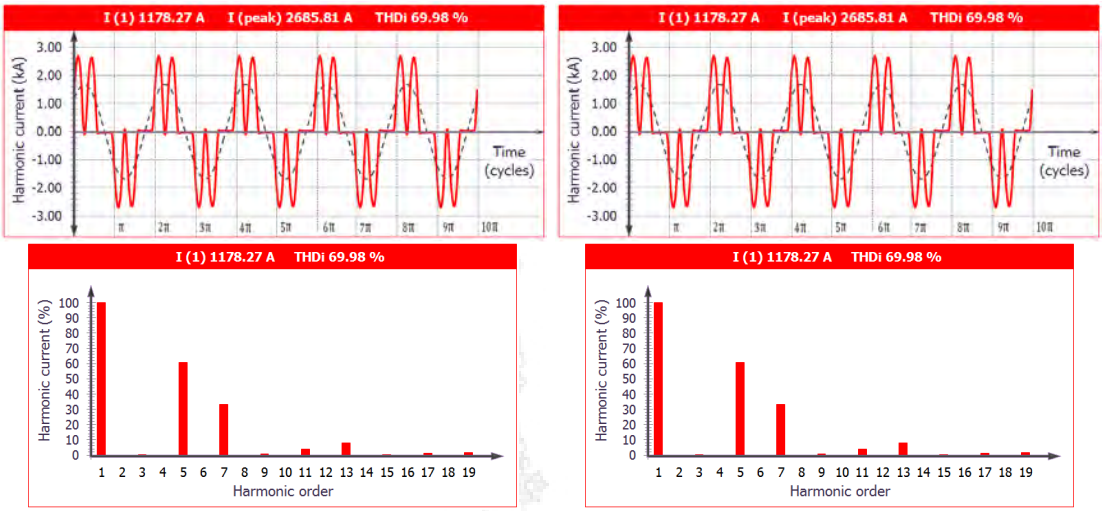


ภาพที่ 4.1 ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 1



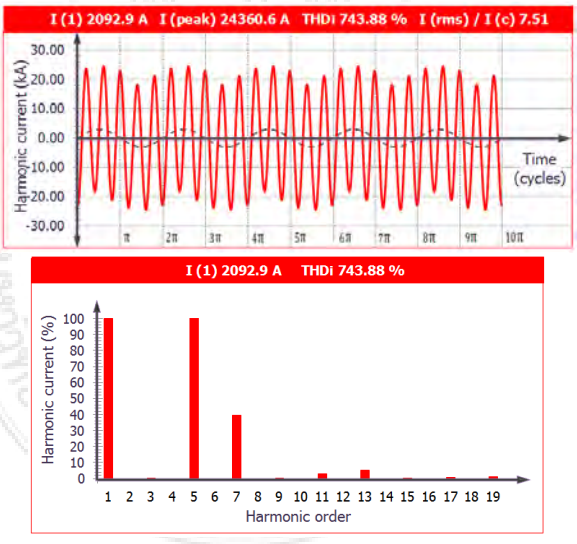
ก่อนติดตั้งอุปกรณ์ หลังติดตั้งอุปกรณ์

รูปที่ 4.2 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่จุดต่อร่วม
ในระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 1



ก่อนติดตั้งอุปกรณ์ หลังติดตั้งอุปกรณ์

รูปที่ 4.3 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์
ปรับความเร็วรอบมอเตอร์สำหรับกรณีศึกษาที่ 1



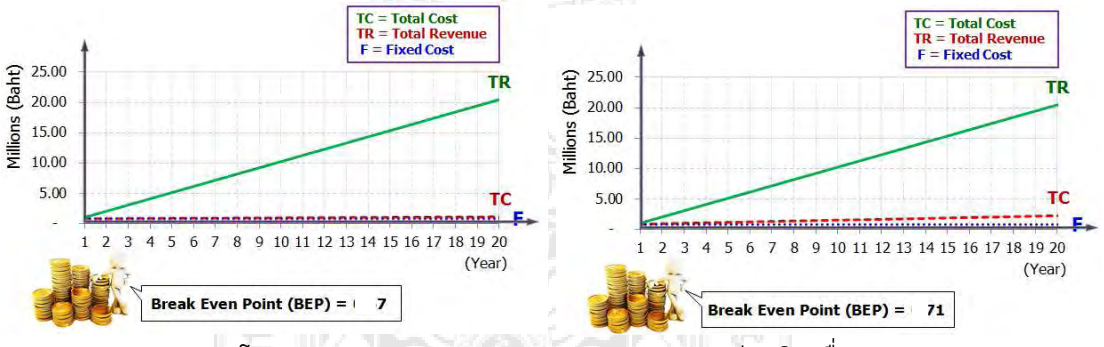
รูปที่ 4.4 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุง
ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสำหรับกรณีศึกษาที่ 1

ผลที่ได้จากการทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีที่ 1 หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุง ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าพบว่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบจะมีผลตอบสนองต่อความเพี้ยนฮาร์มอนิก แตกต่างกัน โดยสามารถวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมได้ดังนี้

1. กระแสไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลังมีความเพี้ยนของกระแสเพิ่มสูงถึงร้อยละ 816.62 ของค่ากระแสความต้องการรวมในระบบที่ความถี่มูลฐาน ซึ่งมีค่าสูงกว่าระดับที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน ซึ่งใน IEEE519 - 2014 กำหนดค่าความเพี้ยนความต้องการรวมที่ร้อยละ 8

2. กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับมีความเพี้ยนของกระแสคงเดิมทั้งก่อน และหลังการติดตั้งอุปกรณ์

3. กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีความเพี้ยนของกระแสอยู่ที่ร้อยละ 743.88 ของค่ากระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐาน และมีอัตราส่วน I_{rms}/I_c เท่ากับ 7.51 ซึ่งมีค่าสูงกว่ามาตรฐานมาก ซึ่งใน IEC Standard 60831-1 - 2014 กำหนดให้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ประกอบสร้างขึ้นตามมาตรฐานนี้ต้องมีอัตราส่วน I_{rms}/I_c ไม่น้อยกว่า 1.3



ลงทุนโดยตรง ลงทุนผ่านสินเชื่อธนาคาร

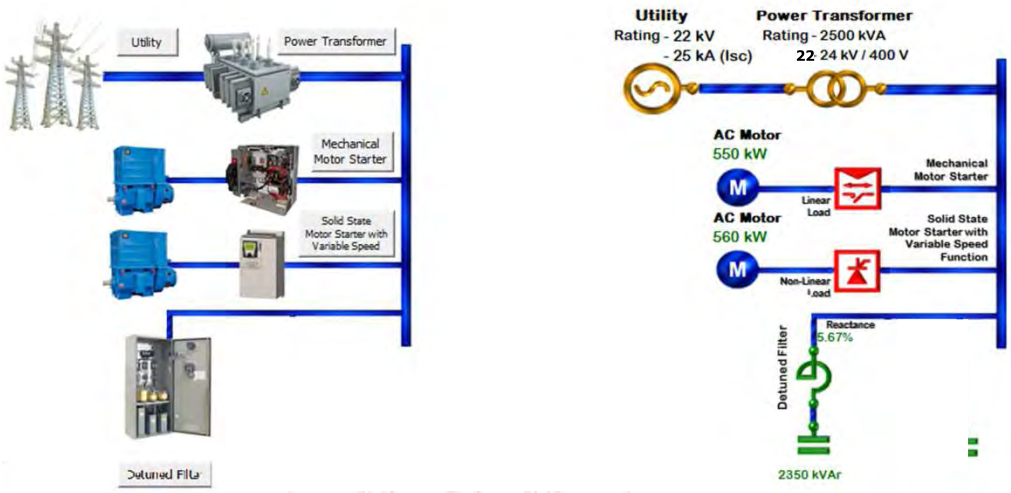
รูปที่ 4.5 จุดคุ้มทุนสำหรับการลงทุนในกรณีศึกษาที่ 1

สำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วยการหาจุดคุ้มทุนของโครงการ (Break Even Point) พบว่าจุดคุ้มทุนของการลงทุนในกรณีนี้มีระยะเวลาอยู่ที่ 0.6 ปี สำหรับกรณีที่ลงทุนโดยตรงแต่หากลงทุนโดยผ่านสินเชื่อธนาคารจะยืดเวลาออกไปเป็น 1.7 ปี

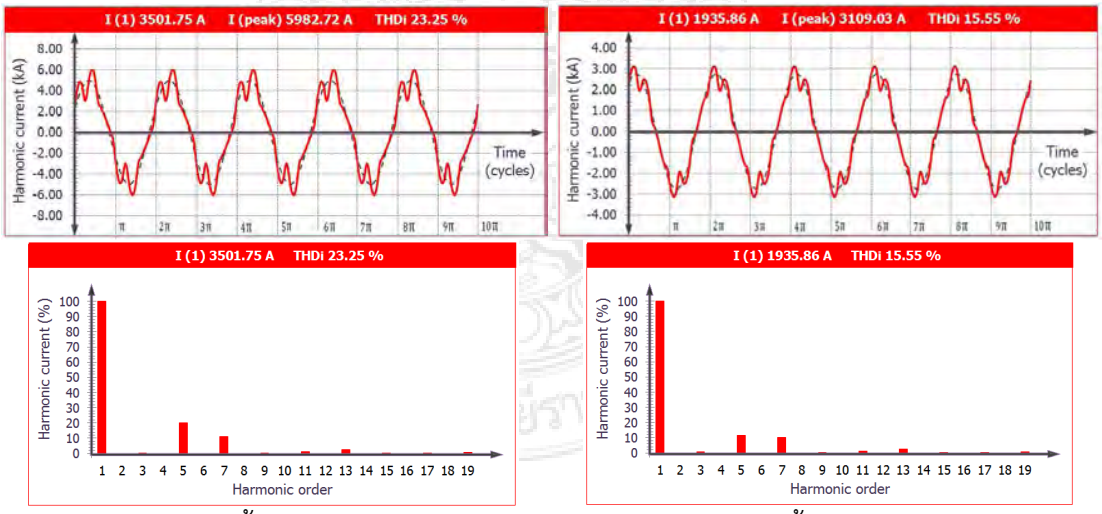
จากกรณีดังกล่าวสรุปได้ว่าการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ซึ่งใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์หลัก เข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิก จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์แบบขนานขึ้นในช่วงฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ทำให้เกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิก สูงขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะลำดับที่ 5 รวมไปถึงลำดับใกล้เคียงซึ่งสร้างความเสียหายให้กับระบบ และอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหมด โดยเฉพาะชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า และหม้อแปลงไฟฟ้าเนื่องจากมีปริมาณความเพี้ยนของฮาร์มอนิกที่สูงมาก

4.3.2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูนในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิก

ภาระทางไฟฟ้าที่ทำการวิเคราะห์ประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน ตามที่แสดงในรูปที่ 4.6

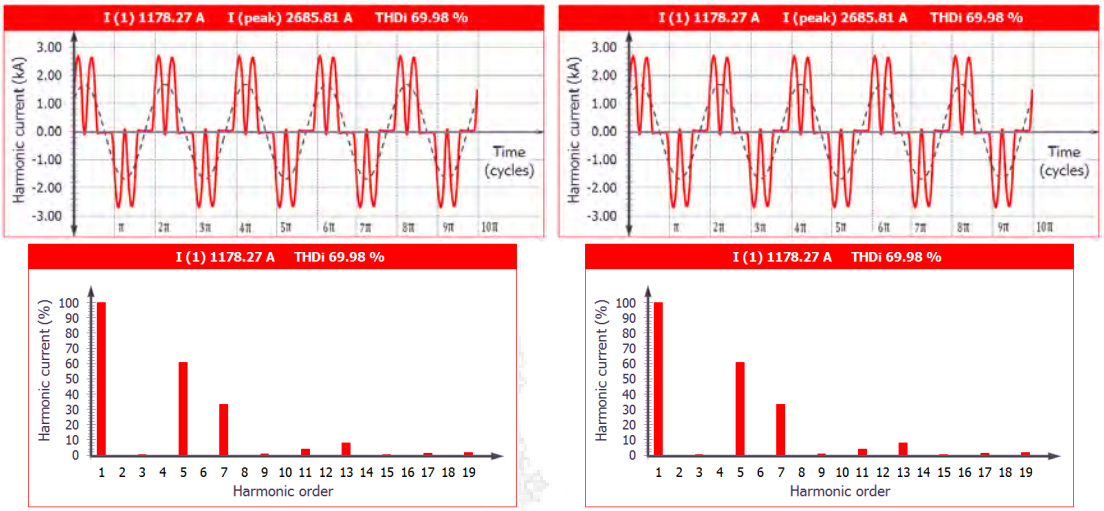


รูปที่ 4.6 ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 2



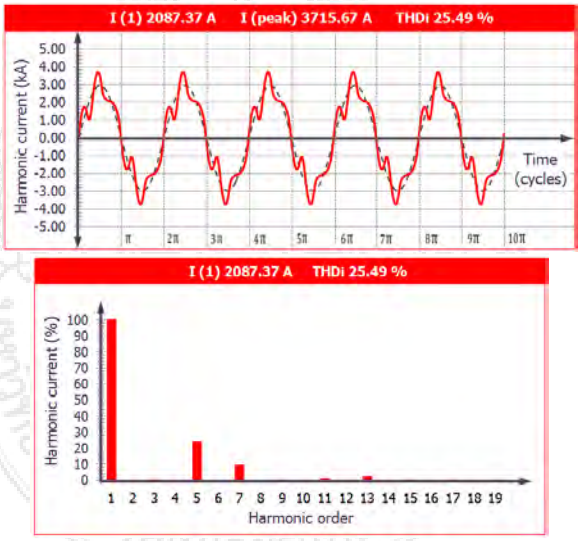
ก่อนติดตั้งอุปกรณ์ หลังติดตั้งอุปกรณ์

รูปที่ 4.7 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 2



ก่อนติดตั้งอุปกรณ์ หลังติดตั้งอุปกรณ์

รูปที่ 4.8 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์สำหรับกรณีศึกษาที่ 2



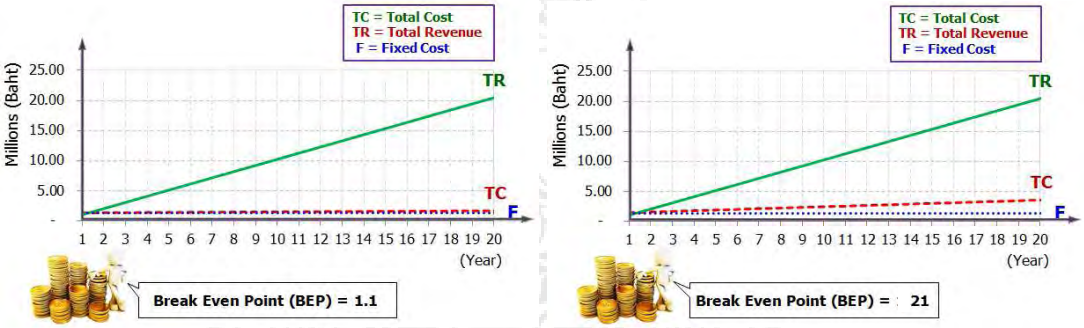
รูปที่ 4.9 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน สำหรับกรณีศึกษาที่ 2

ผลที่ได้จากการทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีที่ 2 หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูนพบว่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบจะมีผลตอบสนองต่อความเพี้ยนฮาร์มอนิก แตกต่างกัน โดยสามารถวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมได้ดังนี้

1. กระแสไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลังมีความเพี้ยนของกระแสลดลงอยู่ที่ร้อยละ 15.55 ของค่ากระแสความต้องการรวมในระบบที่ความถี่มูลฐาน แต่ยังคงมีค่าสูงกว่าระดับที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน ซึ่งใน IEEE519 - 2014 กำหนดค่าความเพี้ยนความต้องการรวมที่ร้อยละ 8

2. กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับมีความเพี้ยนของกระแสคงเดิมทั้งก่อน และหลังการติดตั้งอุปกรณ์

3. กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูนมีความเพี้ยนของกระแสอยู่ที่ร้อยละ 25.49 ของค่ากระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐาน จากข้อมูลของผู้ผลิตโดยทั่วไปแล้วตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับจะสามารถรับกระแสฮาร์มอนิกที่มีความเพี้ยนอยู่ในระดับร้อยละ 40 ของค่ากระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐานได้



ลงทุนโดยตรง ลงทุนผ่านสินเชื่อธนาคาร

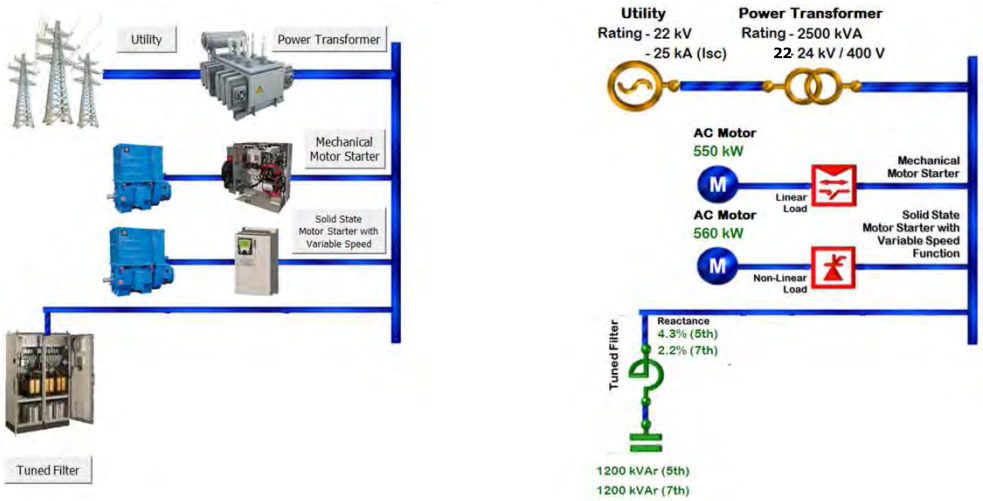
รูปที่ 4.10 จุดคุ้มทุนสำหรับการลงทุนในกรณีศึกษาที่ 2

สำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วยการหาจุดคุ้มทุนของโครงการ (Break Even Point) พบว่าจุดคุ้มทุนของการลงทุนในกรณีนี้มีระยะเวลาอยู่ที่ 1.1 ปี สำหรับกรณีที่ลงทุนโดยตรงแต่หากลงทุนโดยผ่านสินเชื่อธนาคารจะยืดเวลาออกไปเป็น 1.2 ปี

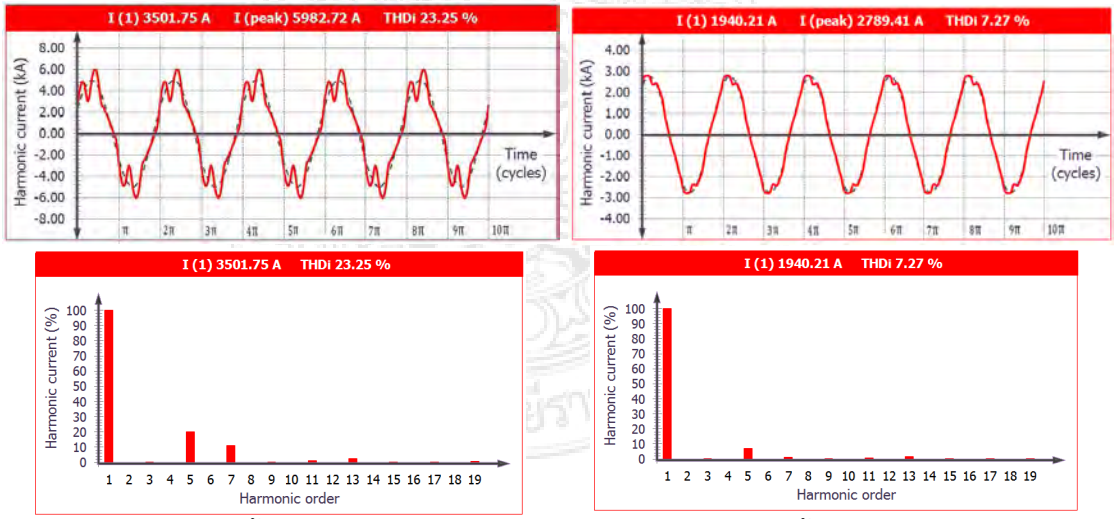
จากกรณีดังกล่าวสรุปได้ว่าอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูนเป็นการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ซึ่งใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์หลัก โดยมีการติดตั้งตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับเพิ่มเติม เพื่อให้อุปกรณ์สามารถติดตั้งเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิกได้ และยังสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ตามปกติ อีกทั้งอุปกรณ์ยังสามารถลดระดับความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมของระบบได้ในระดับหนึ่ง แต่ระยะเวลาของจุดคุ้มทุนจะยาวนานขึ้นกว่าในกรณีแรก ข้อจำกัดของอุปกรณ์ชนิดนี้คือ ไม่สามารถที่จะลดความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกที่บริเวณจุดต่อร่วมในระบบตามที่ต้องการได้

4.3.3 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูนเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิก

ภาระทางไฟฟ้าที่ทำการวิเคราะห์ประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูน ตามที่แสดงในรูปที่ 4.11

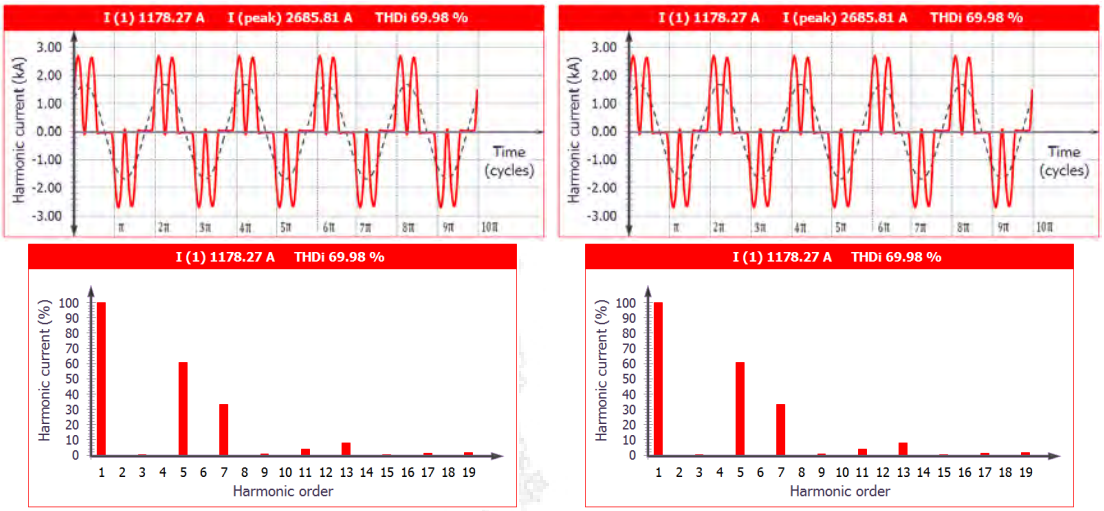


รูปที่ 4.11 ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 3



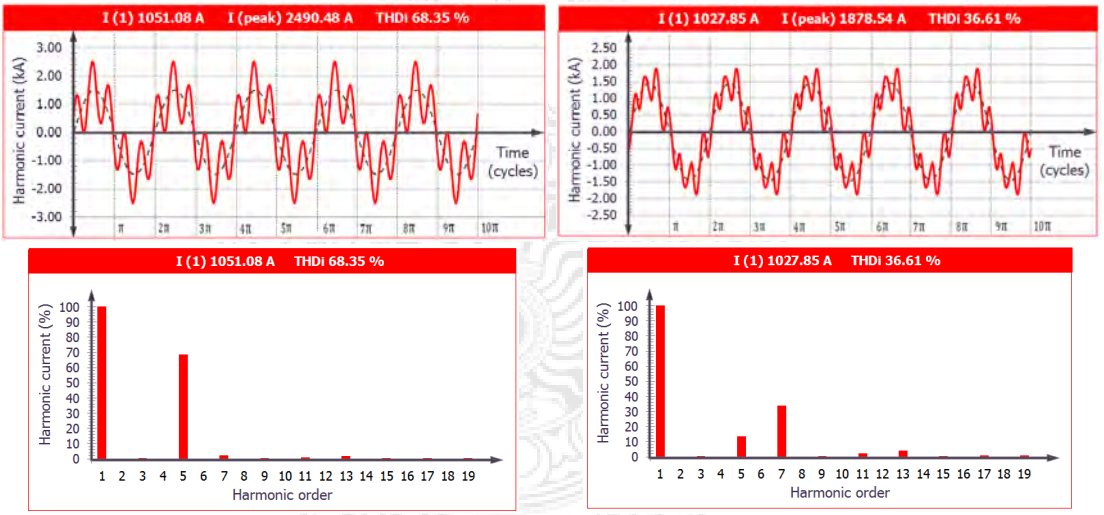
ก่อนติดตั้งอุปกรณ์ หลังติดตั้งอุปกรณ์

รูปที่ 4.12 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 3



ก่อนติดตั้งอุปกรณ์ หลังติดตั้งอุปกรณ์

รูปที่ 4.13 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์
ปรับความเร็วรอบมอเตอร์สำหรับกรณีศึกษาที่ 3



ตัวกรองจูนลำดับที่ 5 ตัวกรองจูนลำดับที่ 7

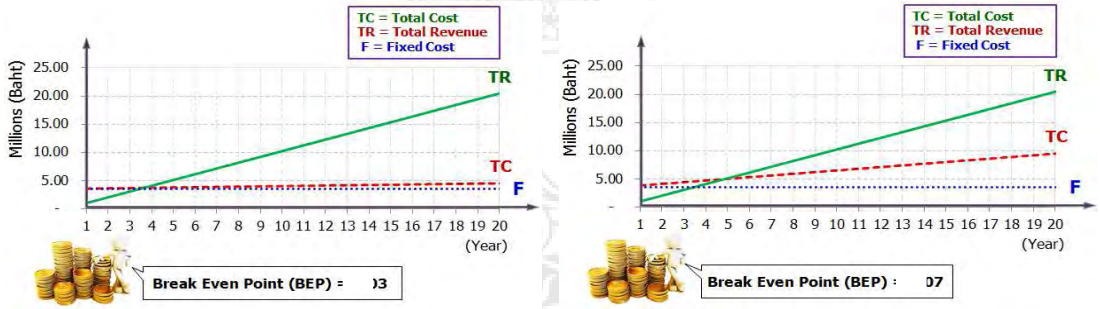
รูปที่ 4.14 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุง
สัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูน สำหรับกรณีศึกษาที่ 3

ผลที่ได้จากการทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีที่ 3 หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุง สัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูนพบว่าอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบจะมีผลตอบสนองต่อความเพี้ยนฮาร์มอนิก แตกต่างกัน โดยสามารถวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมได้ดังนี้

1. กระแสไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลังมีความเพี้ยนของกระแสลดลงอยู่ที่ร้อยละ 7.27 ของค่ากระแสความต้องการรวมในระบบที่ความถี่มูลฐาน และมีค่าต่ำกว่าระดับที่กำหนดไว้ตาม มาตรฐาน ซึ่งใน IEEE519 - 2014 กำหนดค่าความเพี้ยนความต้องการรวมที่ร้อยละ 8

2. กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับมีความเพี้ยนของกระแสคงเดิมทั้งก่อน และหลังการติดตั้งอุปกรณ์

3. กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูนเบอร์ 5 และเบอร์ 7 มีค่าความเพี้ยนของกระแสอยู่ที่ร้อยละ 68.35 และ 36.61 ของค่ากระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐานตาม ลำดับ โดยจะมีค่ามากกว่าอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูนเนื่องจากอุปกรณ์ถูกออกแบบมาให้กรองกระแสฮาร์มอนิกออกจากระบบ



ลงทุนโดยตรง ลงทุนผ่านสินเชื่อธนาคาร

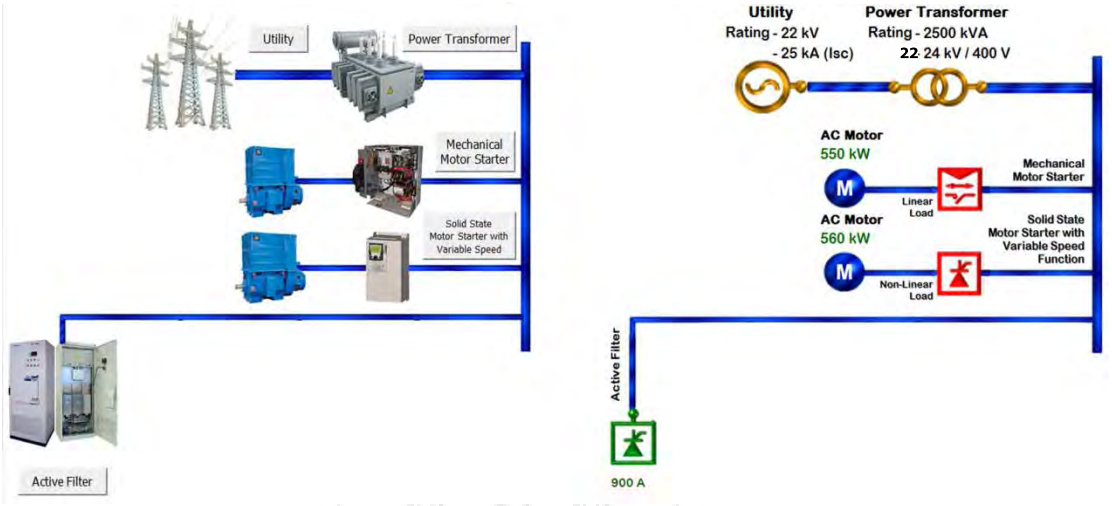
รูปที่ 4.15 จุดคุ้มทุนสำหรับการลงทุนในกรณีศึกษาที่ 3

สำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วยการหาจุดคุ้มทุนของโครงการ (Break Even Point) พบว่าจุดคุ้มทุนของการลงทุนในกรณีนี้มีระยะเวลาอยู่ที่ 3 ปี สำหรับกรณีที่ลงทุนโดยตรงแต่หากลงทุนโดยผ่านสินเชื่อธนาคารจะยืดเวลาออกไปเป็น 4 ปี

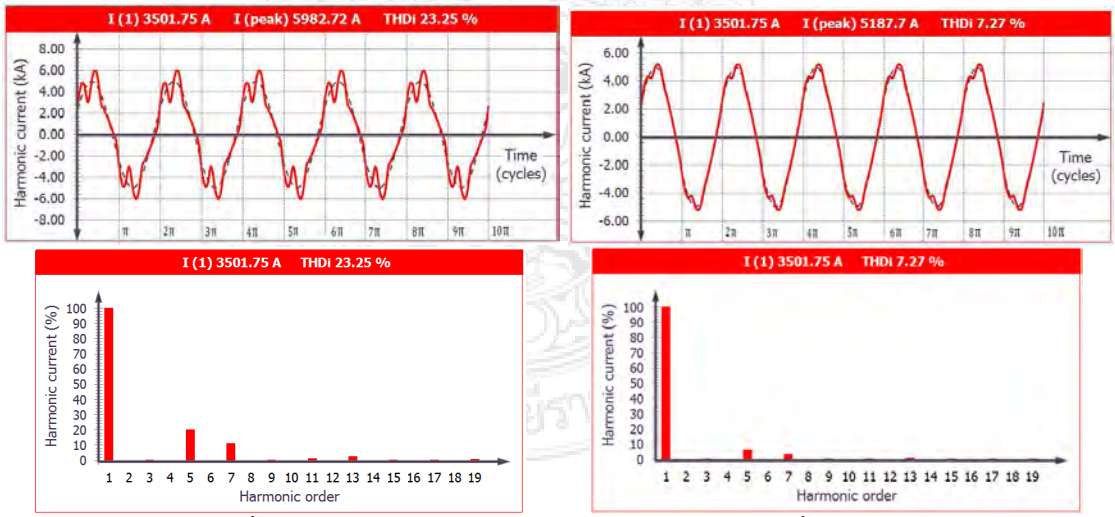
จากกรณีดังกล่าวสรุปได้ว่าอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูนสามารถกรองกระแสฮาร์มอนิกออกจากระบบให้ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน และสามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ตามความต้องการของระบบ แต่ระยะเวลาของจุดคุ้มทุนจะยาวนานขึ้นกว่าในกรณีที่หนึ่ง และสอง เพราะอุปกรณ์ที่ใช้จะต้องมีประสิทธิภาพในการกรอง และรับกระแสฮาร์มอนิกได้มากกว่าในสองกรณีที่ผ่านมา ข้อจำกัดของอุปกรณ์ชนิดนี้ คือ อุปกรณ์หนึ่งชุดสามารถกรองกระแสฮาร์มอนิกได้เพียงลำดับเดียวเท่านั้น อีกทั้งยังมีความซับซ้อนในการควบคุมอุปกรณ์ นอกจากนี้หากมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางไฟฟ้าในระบบ อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบตัวกรองจูนจะต้องทำการออกแบบประกอบสร้าง และติดตั้งใหม่

4.3.4 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิก

ภาระทางไฟฟ้าที่ทำการวิเคราะห์ประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ ตามที่แสดงในรูปที่ 4.16

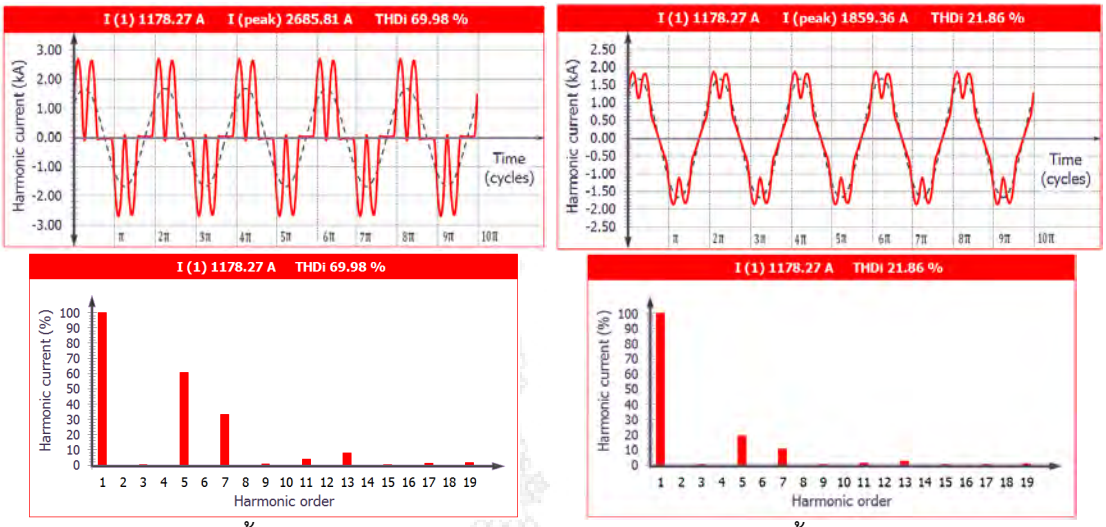


รูปที่ 4.16 ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 4



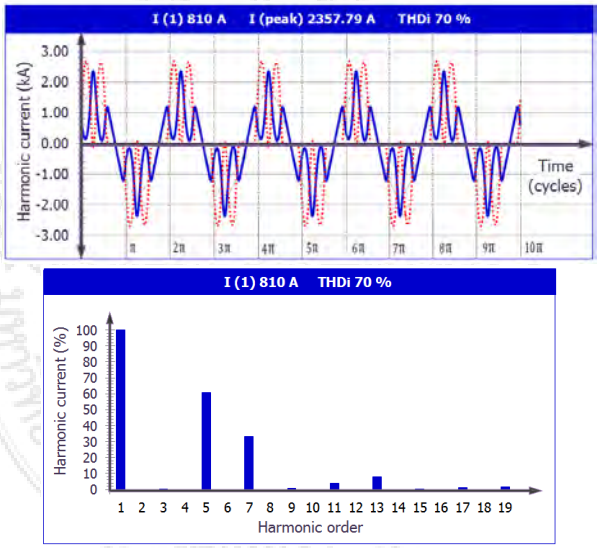
ก่อนติดตั้งอุปกรณ์ หลังติดตั้งอุปกรณ์

รูปที่ 4.17 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่จุดต่อร่วม ในระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 4



ก่อนติดตั้งอุปกรณ์ หลังติดตั้งอุปกรณ์

รูปที่ 4.18 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์สำหรับกรณีศึกษาที่ 4



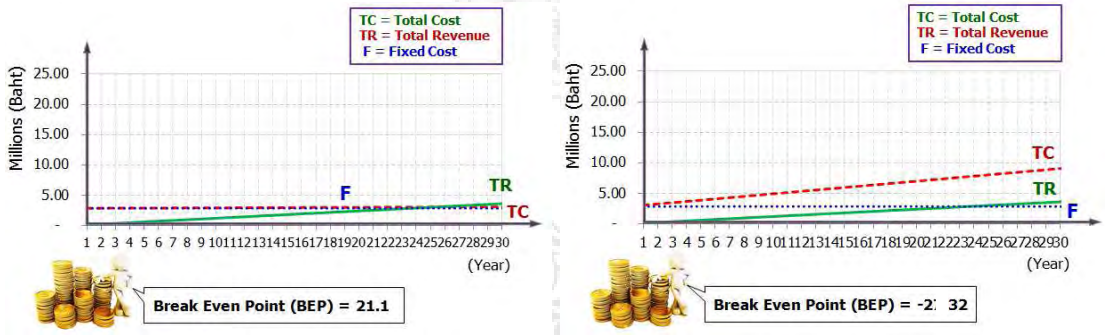
รูปที่ 4.19 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพสำหรับกรณีศึกษาที่ 4

ผลที่ได้จากการทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีที่ 4 หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพแล้ว พบว่าอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบจะมีผลตอบสนองต่อความเพี้ยนฮาร์มอนิกแตกต่างกัน โดยสามารถวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมได้ดังนี้

1. กระแสไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลังมีความเพี้ยนของกระแสลดลงอยู่ที่ร้อยละ 7.27 ของค่ากระแสความต้องการรวมในระบบที่ความถี่มูลฐาน และมีค่าต่ำกว่าระดับที่กำหนดไว้ตาม มาตรฐาน ซึ่งใน IEEE519 - 2014 กำหนดค่าความเพี้ยนความต้องการรวมที่ร้อยละ 8

2. กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับมีความเพี้ยนของกระแสคงลดลงอยู่ที่ร้อยละ 21.86 ของค่ากระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐาน

3. กระแสฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพที่ใช้งานมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 70 ของกระแสเต็มพิกัด และมีมุมเฟสในทิศทางตรงกันข้ามกับอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ



ลงทุนโดยตรง ลงทุนผ่านสินเชื่อธนาคาร

รูปที่ 4.20 จุดคุ้มทุนสำหรับการลงทุนในกรณีศึกษาที่ 4

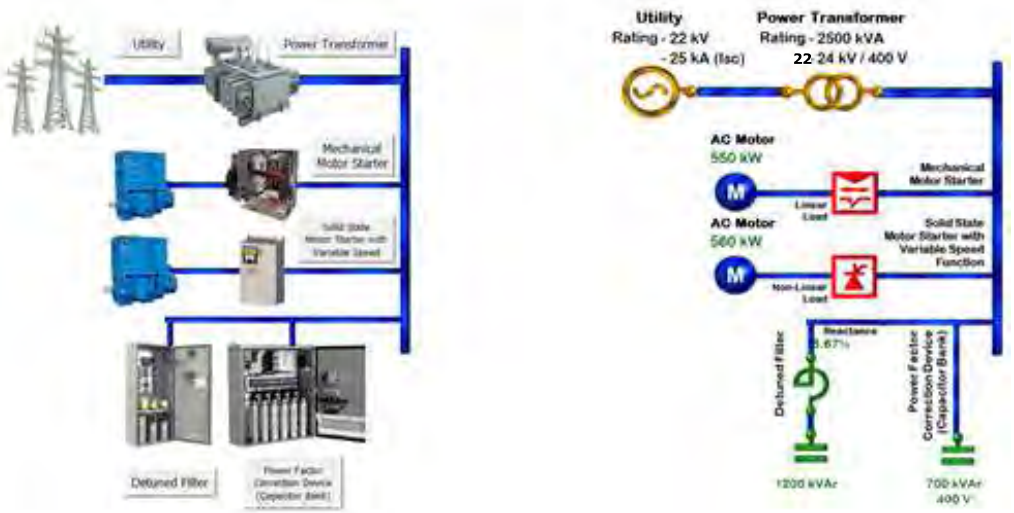
สำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วยการหาจุดคุ้มทุนของโครงการ (Break Even Point) พบว่าจุดคุ้มทุนของการลงทุนในกรณีนี้มีระยะเวลาอยู่ที่ 21.1 ปี สำหรับกรณีที่ลงทุนโดยตรงแต่หากลงทุนโดยผ่านสินเชื่อธนาคารจะยืดเวลาออกไปเป็น -27.3 ปี จากตัวเลขที่ติดลบแสดงว่าหากลงทุนในโครงการผ่านสินเชื่อธนาคารจะขาดทุน

จากกรณีดังกล่าวสรุปได้ว่าอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพจะชดเชยกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบเพื่อลดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบให้อยู่ในระดับที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานได้ แต่สำหรับการชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้านั้นจะไม่สามารถทำได้ตามความต้องการของระบบ โดยจะชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับได้เพียงร้อยละ 30 ของพิกัดอุปกรณ์ ซึ่งในขณะเดียวกับปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่ชดเชยให้กับระบบจะมีปริมาณลดลงเป็นสัดส่วนกัน นอกจากนี้อุปกรณ์ที่ใช้จะต้องเป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูง และมีขนาดใหญ่เกินกว่าปกติ ข้อดีของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพคือ สามารถที่จะปรับเปลี่ยนตามภาระทางไฟฟ้าในระบบได้อย่าง

อิสระ กรองกระแสฮาร์มอนิก ได้อย่างครอบคลุมทุกลำดับที่มีอยู่ในระบบ และมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิก อยู่ในระดับสูง ยิ่งไปกว่านั้นวิธีการลดปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกด้วยการชดเชยกระแสฮาร์มอนิก เข้าสู่ระบบของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพยังสามารถลดค่าความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกได้

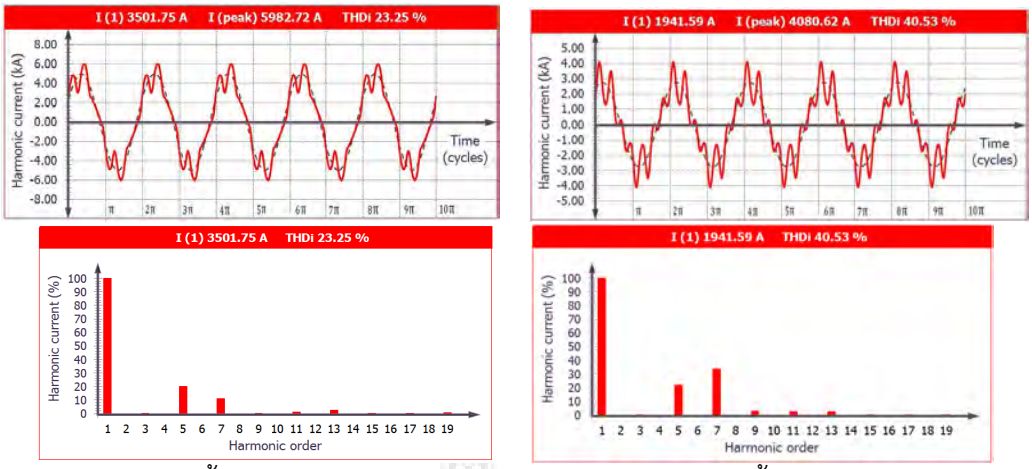
4.3.5 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูนเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิก

ภาระทางไฟฟ้าที่ทำการวิเคราะห์ประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน ตามที่แสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 5

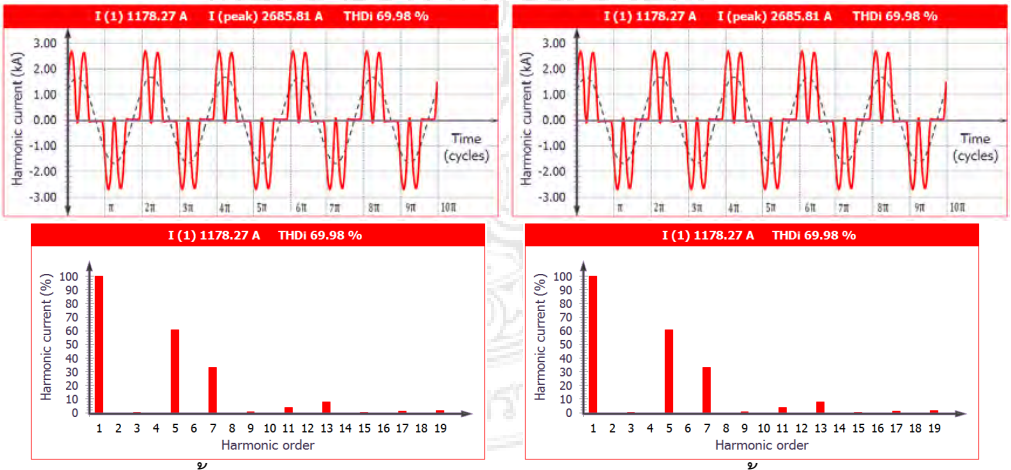
ผลที่ได้จากการทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีที่ 5 หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุง ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน พบว่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบจะมีผลตอบสนองต่อความเพี้ยนฮาร์มอนิกแตกต่างกัน โดยสามารถวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมได้ดังนี้



ก่อนติดตั้งอุปกรณ์ หลังติดตั้งอุปกรณ์

รูปที่ 4.22 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่จุดต่อร่วม ในระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 5

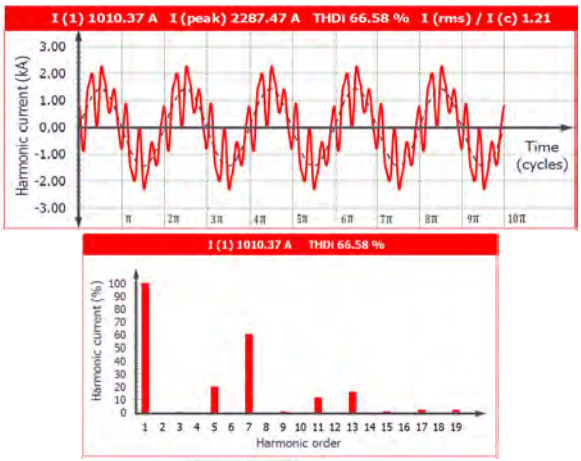
1. กระแสไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลังมีความเพี้ยนของกระแสเพิ่มขึ้นอยู่ที่ร้อยละ 40.53 ของค่ากระแสความต้องการรวมในระบบที่ความถี่มูลฐาน ซึ่งมีค่าสูงกว่าระดับที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน ซึ่งใน IEEE519 - 2014 กำหนดค่าความเพี้ยนความต้องการรวมที่ร้อยละ 8



ก่อนติดตั้งอุปกรณ์ หลังติดตั้งอุปกรณ์

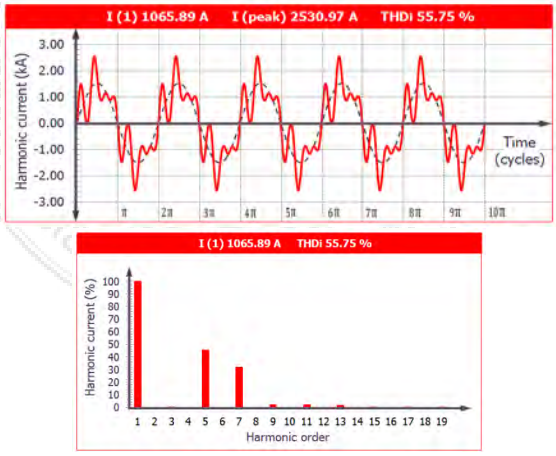
รูปที่ 4.23 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ ปรับความเร็วรอบมอเตอร์สำหรับกรณีศึกษาที่ 5

2. กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับมีความเพี้ยนของกระแสคงเดิมทั้งก่อน และหลังการติดตั้งอุปกรณ์



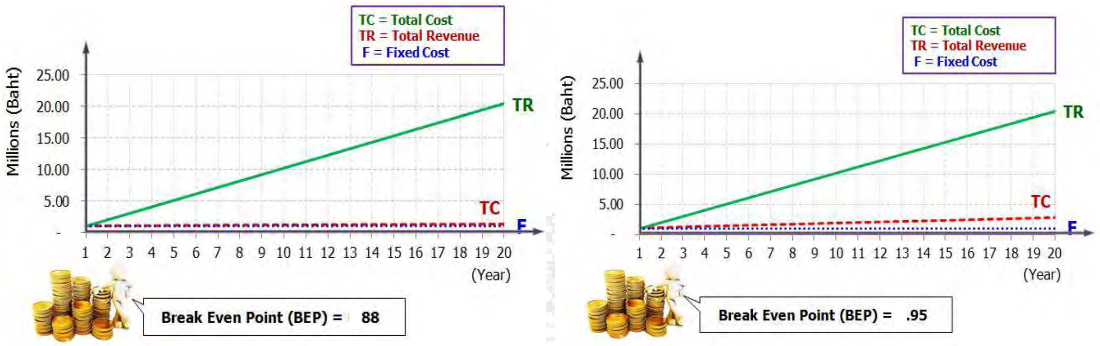
รูปที่ 4.24 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสำหรับกรณีศึกษาที่ 5

3. กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีความเพี้ยนของกระแสอยู่ที่ร้อยละ 66.58 ของค่ากระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐาน และมีอัตราส่วน I_{rms}/I_c เท่ากับ 1.21 ซึ่งในIEC Standard 60831-1 - 2014 กำหนดให้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ประกอบสร้างขึ้นตามมาตรฐานนี้ต้องมีอัตราส่วน I_{rms}/I_c ไม่น้อยกว่า 1.3



รูปที่ 4.25 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน สำหรับกรณีศึกษาที่ 5

4. กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูนมีความเพี้ยนของกระแสอยู่ที่ร้อยละ 55.75 ของค่ากระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐาน จากข้อมูลของผู้ผลิตโดยทั่วไปแล้ว ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับจะสามารถรับกระแสฮาร์มอนิกที่มีความเพี้ยนอยู่ในระดับร้อยละ 40 ของค่ากระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐานได้ กรณีนี้ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับจะมีความร้อนสูงขึ้นเนื่องจากได้รับกระแสเกินพิกัดของอุปกรณ์ พิจารณาได้จากค่าความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกในผลการทดสอบ ซึ่งอาจนำไปสู่การเกิดความเสียหายขึ้นกับตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับที่ติดตั้งอยู่ภายในอุปกรณ์ได้



ลงทุนโดยตรง ลงทุนผ่านสินเชื่อธนาคาร

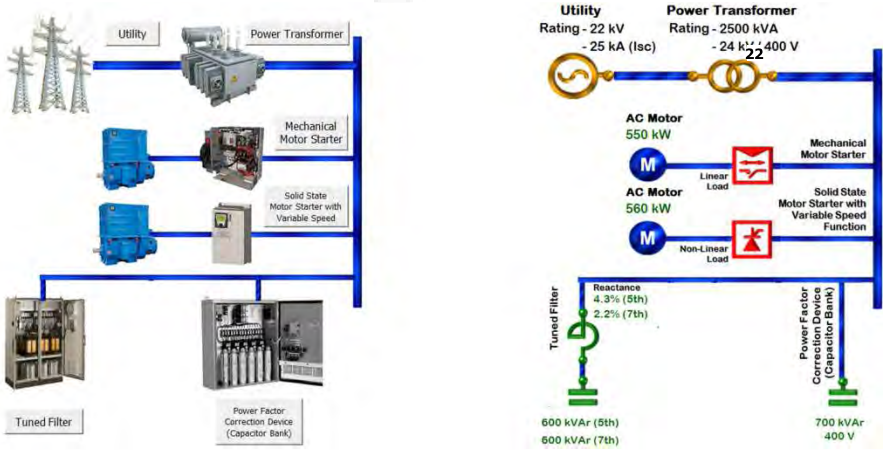
รูปที่ 4.26 จุดคุ้มทุนสำหรับการลงทุนในกรณีศึกษาที่ 5

สำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วยการหาจุดคุ้มทุนของโครงการ (Break Even Point) พบว่าจุดคุ้มทุนของการลงทุนในกรณีนี้มีระยะเวลาอยู่ที่ 0.8 ปี สำหรับกรณีที่ลงทุนโดยตรงแต่หากลงทุนโดยผ่านสินเชื่อธนาคารจะยืดเวลาออกไปเป็น 0.9 ปี

จากกรณีดังกล่าวสรุปได้ว่าการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ซึ่งใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์หลัก และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูนเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความเพี้ยนฮาร์มอนิก จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์แบบขนานขึ้นสองตำแหน่ง ตำแหน่งแรกอยู่ในช่วงฮาร์มอนิกลำดับที่ 4 เป็นตำแหน่งที่เกิดจากอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน และตำแหน่งที่สองเกิดซึ่งจากอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจะถูกเลื่อนออกไปอยู่ในฮาร์มอนิกลำดับที่สูงขึ้นจากเดิม สำหรับกรณีนี้อยู่ในลำดับที่ 7 จากเดิมอยู่ในลำดับที่ 5 ตามผลการทดสอบในกรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งถือว่ายังอยู่ในฮาร์มอนิกลำดับที่มีนัยยะสำคัญ ส่งผลให้เกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่ 7 และลำดับใกล้เคียงขึ้นในระบบทั้งบริเวณจุดต่อร่วมในระบบ อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน ที่ต่อร่วมอยู่ในระบบ โดยเฉพาะอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูนจะพบว่ามีค่าความเพี้ยนของกระแสสูงเกินกว่าระดับที่ยอมรับได้ซึ่งอาจทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นที่ตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับ อันเนื่องมาจากกระแสฮาร์มอนิกที่ขยายจากการเรโซแนนซ์ของชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าและทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายได้

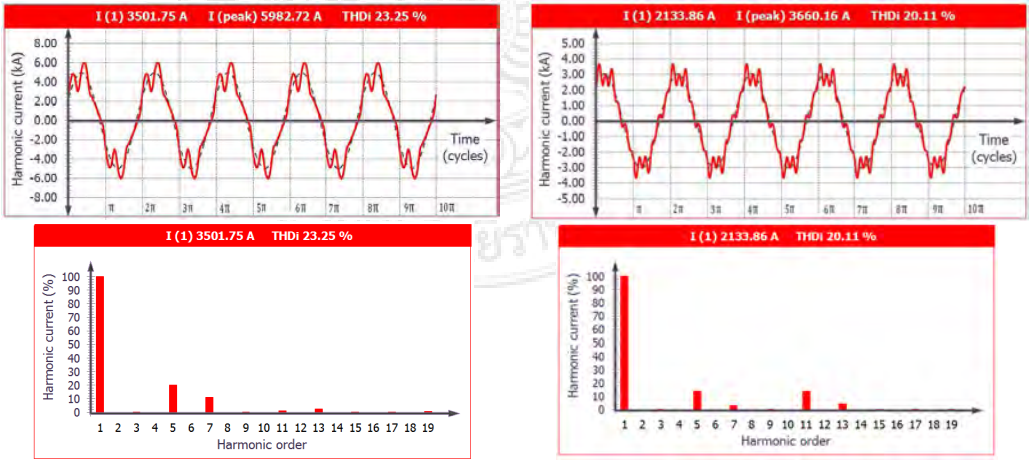
4.3.6 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูนเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิก

ภาระทางไฟฟ้าที่ทำการวิเคราะห์ประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูน ตามที่แสดงในรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 6

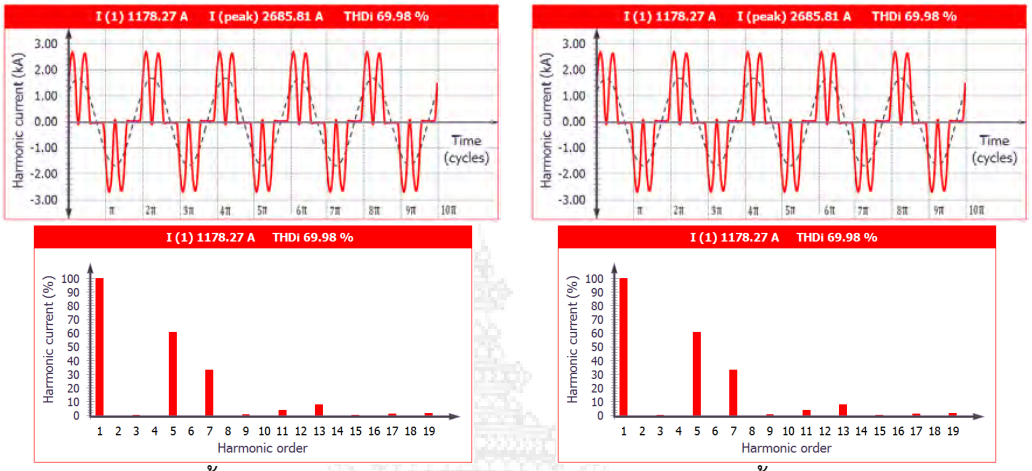
ผลที่ได้จากการทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีที่ 6 หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุง ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูน พบว่าอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบจะมีผลตอบสนองต่อความเพี้ยนฮาร์มอนิกแตกต่างกัน โดยสามารถวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมได้ดังนี้



ก่อนติดตั้งอุปกรณ์ หลังติดตั้งอุปกรณ์

รูปที่ 4.28 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่จุดต่อร่วม ในระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 6

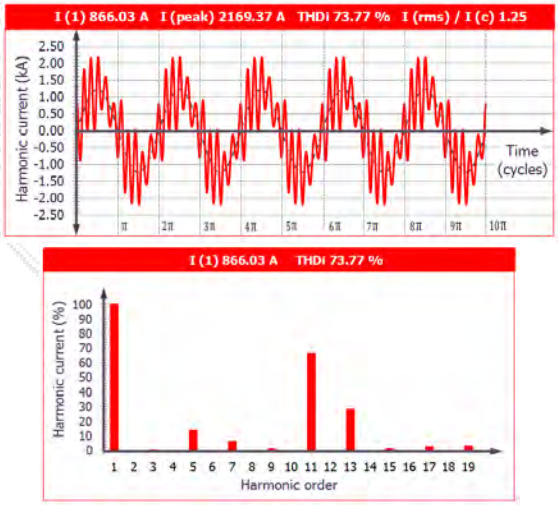
1. กระแสไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลังมีความเพี้ยนของกระแสลดลงเล็กน้อยอยู่ในระดับร้อยละ 20.11 ของค่ากระแสความต้องการรวมในระบบที่ความถี่มูลฐาน ซึ่งมีค่าสูงกว่าระดับที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน ซึ่งใน IEEE519 - 2014 กำหนดค่าความเพี้ยนความต้องการรวมที่ร้อยละ 8



ก่อนติดตั้งอุปกรณ์ หลังติดตั้งอุปกรณ์

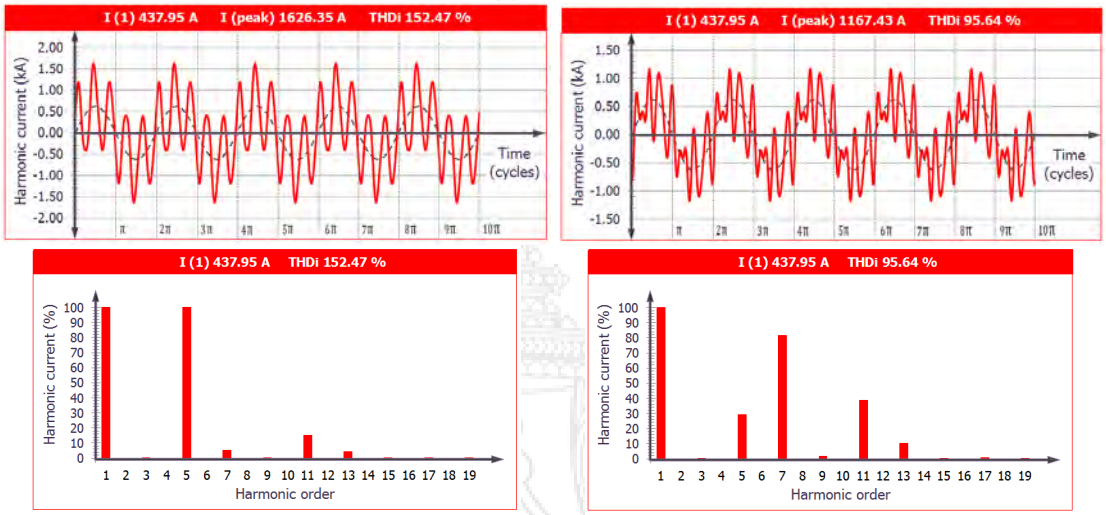
รูปที่ 4.29 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์สำหรับกรณีศึกษาที่ 6

2. กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับมีความเพี้ยนของกระแสคงเดิมทั้งก่อน และหลังการติดตั้งอุปกรณ์



รูปที่ 4.30 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสำหรับกรณีศึกษาที่ 6

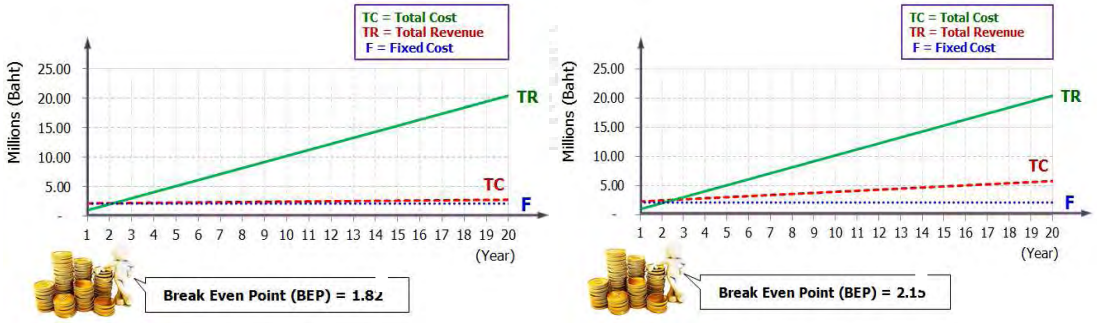
3. กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีความเพี้ยนของกระแสอยู่ที่ร้อยละ 73.77 ของค่ากระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐาน และมีอัตราส่วน I_{rms}/I_c เท่ากับ 1.25 ซึ่งในIEC Standard 60831-1 - 2014 กำหนดให้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ประกอบสร้างขึ้นตามมาตรฐานนี้ต้องมีอัตราส่วน I_{rms}/I_c ไม่น้อยกว่า 1.3



ตัวกรองจูนลำดับที่ 5 ตัวกรองจูนลำดับที่ 7

รูปที่ 4.31 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูนสำหรับกรณีศึกษาที่ 6

4. กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูนเบอร์ 5 และเบอร์ 7 มีค่าความเพี้ยนของกระแสอยู่ที่ร้อยละ 152.47 และ 95.64 ของค่ากระแสไฟฟ้าใช้งานที่ความถี่มูลฐานตามลำดับ



ลงทุนโดยตรง ลงทุนผ่านสินเชื่อธนาคาร

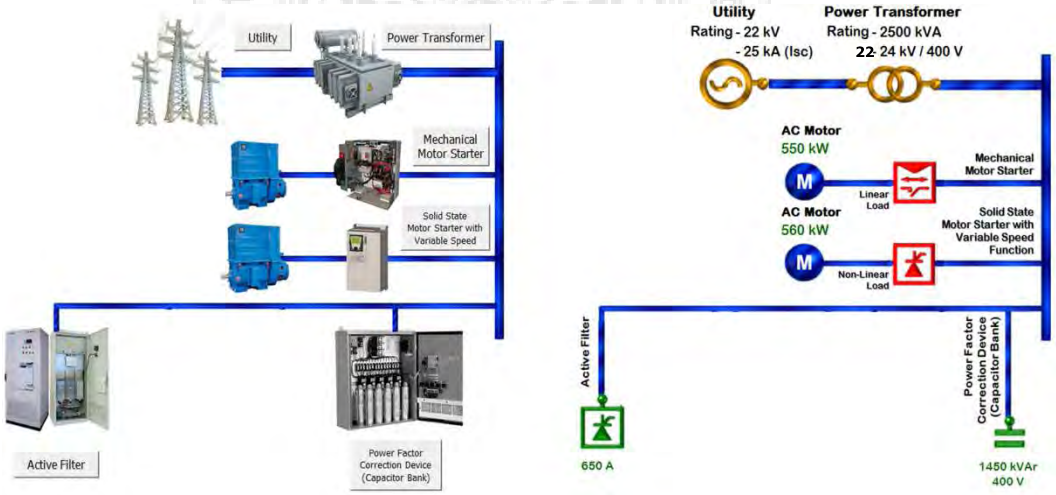
รูปที่ 4.32 จุดคุ้มทุนสำหรับการลงทุนในกรณีศึกษาที่ 6

สำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วยการหาจุดคุ้มทุนของโครงการ (Break Even Point) พบว่าจุดคุ้มทุนของการลงทุนในกรณีนี้มีระยะเวลาอยู่ที่ 1.8 ปี สำหรับกรณีที่ลงทุนโดยตรงแต่หากลงทุนโดยผ่านสินเชื่อธนาคารจะยืดเวลาออกไปเป็น 2.1 ปี

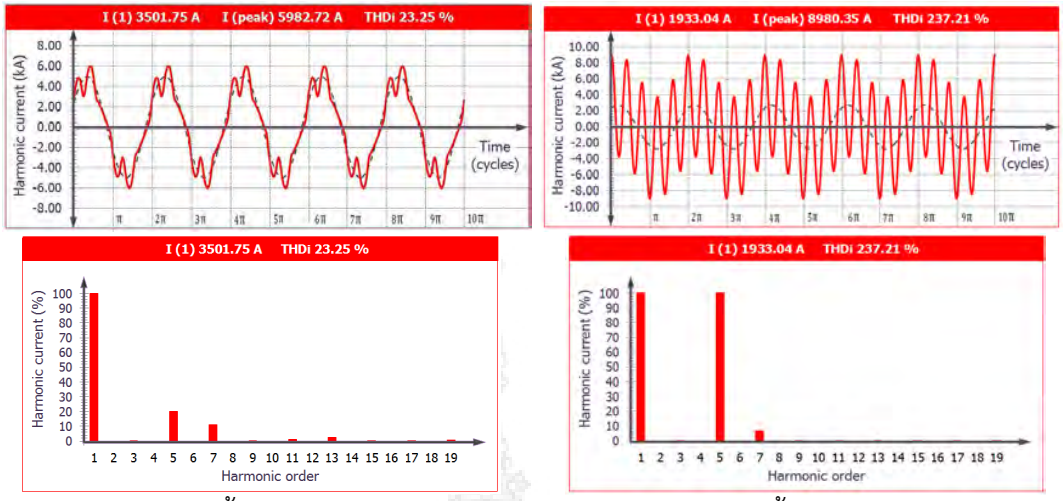
จากกรณีดังกล่าวสรุปได้ว่าการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ซึ่งใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์หลัก และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูนเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความเพี้ยนฮาร์มอนิก จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์แบบขนานขึ้นสามตำแหน่ง ตำแหน่งแรกอยู่ในช่วงฮาร์มอนิกลำดับที่ 4 และ 5 เป็นตำแหน่งที่เกิดจากอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณ ฮาร์มอนิกแบบจูนลำดับที่ 5 ตำแหน่งที่สองอยู่ในช่วงฮาร์มอนิกลำดับที่ 6 และ 7 เป็นตำแหน่งที่เกิด จากอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูนลำดับที่ 7 และสุดท้ายคือตำแหน่งที่สามเกิดจากอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ซึ่งจะถูกเลื่อนออกไปอยู่ในฮาร์มอนิกลำดับที่สูงขึ้นจากเดิมสำหรับกรณีนี้อยู่ในช่วงฮาร์มอนิกลำดับที่ 11 จากเดิมอยู่ในลำดับที่ 5 ตามผลการทดสอบในกรณีศึกษาที่ 1 ซึ่งถือว่ายังอยู่ในฮาร์มอนิกลำดับที่มีนัยยะสำคัญส่งผลให้เกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่ 11 และลำดับใกล้เคียงขึ้นในระบบ แต่สำหรับกรณีนี้กระแสฮาร์มอนิกที่ขยายจากเรโซแนนซ์ของชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิก โดยเฉพาะจูนลำดับที่ 7 มีกระแสฮาร์มอนิกลำดับอื่นปะปนมาด้วยซึ่งอาจทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายได้ เนื่องจากกระแสเกินพิกัดของอุปกรณ์ได้

4.3.7 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิก

ภาระทางไฟฟ้าที่ทำการวิเคราะห์ประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ ตามที่แสดงในรูปที่ 4.33

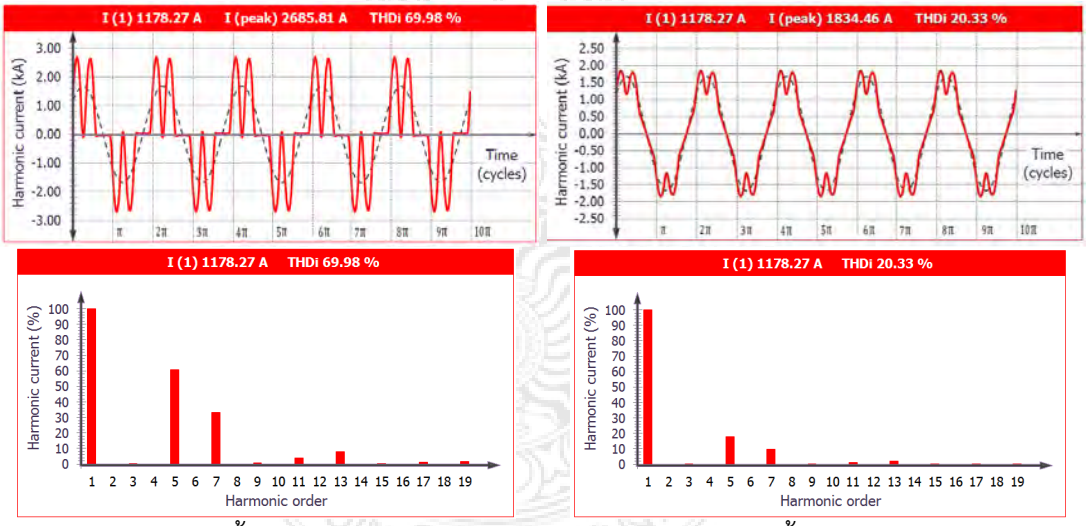


รูปที่ 4.33 ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 7



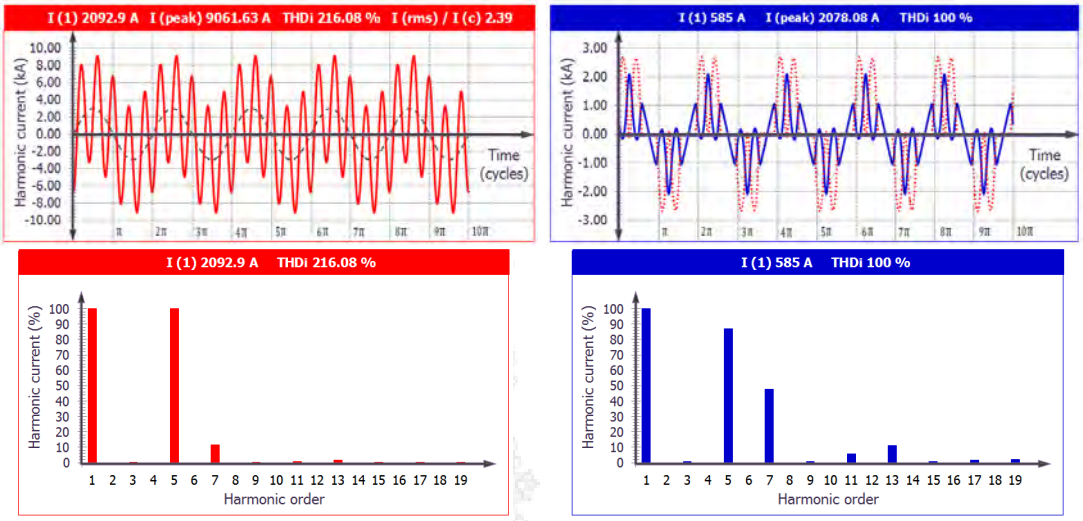
ก่อนติดตั้งอุปกรณ์ หลังติดตั้งอุปกรณ์

รูปที่ 4.34 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่จุดต่อร่วม ในระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 7



ก่อนติดตั้งอุปกรณ์ หลังติดตั้งอุปกรณ์

รูปที่ 4.35 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์สำหรับกรณีศึกษาที่ 7



อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิก

รูปที่ 4.36 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าสำหรับกรณีศึกษาที่ 7

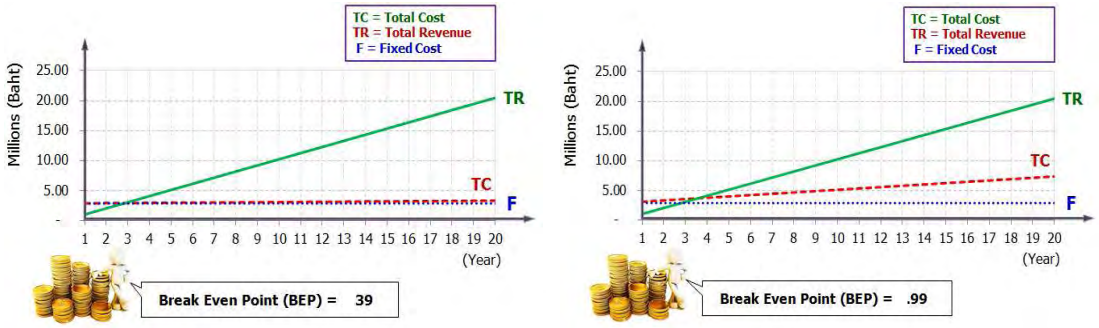
ผลที่ได้จากการทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีที่ 7 หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ พบว่าอุปกรณ์จะมีผลตอบสนองต่อความเพี้ยนฮาร์มอนิกต่างกัน ซึ่งสามารถวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมได้ดังนี้

1. กระแสไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลังมีความเพี้ยนของกระแสเพิ่มขึ้นอยู่ที่ร้อยละ 237.21 ของค่ากระแสความต้องการรวมในระบบที่ความถี่มูลฐาน ซึ่งมีค่าสูงกว่าระดับที่กำหนดไว้ตาม มาตรฐาน ซึ่งใน IEEE519 - 2014 กำหนดค่าความเพี้ยนความต้องการรวมที่ร้อยละ 8

2. กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับมีความเพี้ยนของกระแสคงลดลงอยู่ที่ร้อยละ 20.33 ของค่ากระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐาน

3. กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีความเพี้ยนของกระแสอยู่ที่ร้อยละ 216.08 ของค่ากระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐาน และมีอัตราส่วน I_{rms}/I_c เท่ากับ 2.39 ซึ่งมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน ซึ่งใน IEC Standard 60831-1 - 2014 กำหนดให้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ประกอบสร้างขึ้นตามมาตรฐานนี้ต้องมีอัตราส่วน I_{rms}/I_c ไม่น้อยกว่า 1.3

4. กระแสฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพที่ใช้งานมีค่าเต็มพิกัด และมีมุมเฟสในทิศทางตรงกันข้ามกับอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ



ลงทุนโดยตรง ลงทุนผ่านสินเชื่อธนาคาร

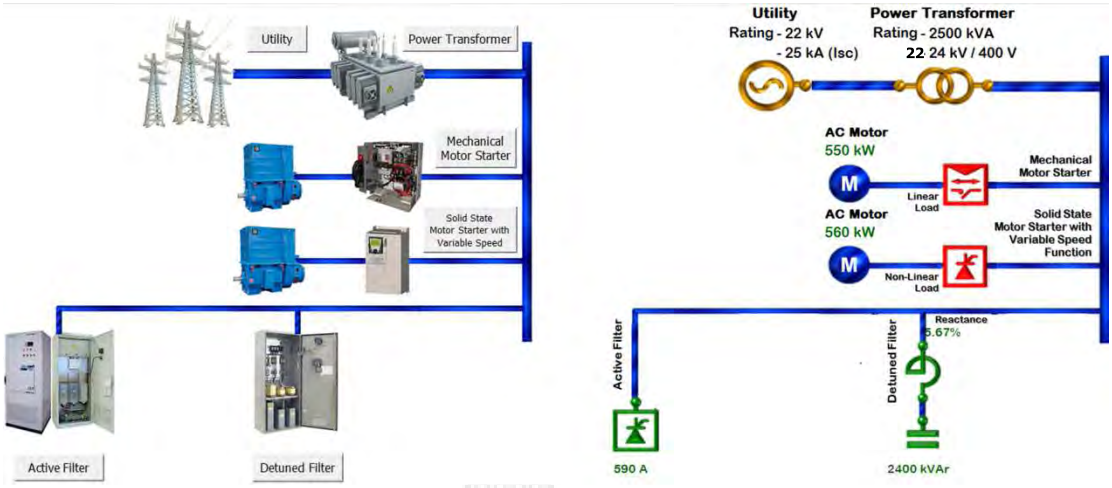
รูปที่ 4.37 จุดคุ้มทุนสำหรับการลงทุนในกรณีศึกษาที่ 7

สำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วยการหาจุดคุ้มทุนของโครงการ (Break Even Point) พบว่าจุดคุ้มทุนของการลงทุนในกรณีนี้มีระยะเวลาอยู่ที่ 2.3 ปี สำหรับกรณีที่ลงทุนโดยตรงแต่หากลงทุนโดยผ่านสินเชื่อธนาคารจะยืดเวลาออกไปเป็น 2.9 ปี

จากกรณีดังกล่าวสรุปได้ว่าการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ซึ่งใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์หลัก และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความเพี้ยนฮาร์มอนิก ถึงแม้ว่ากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากจะอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก จะถูกชดเชยจากอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพจนลดลงอยู่ในระดับร้อยละ 20.33 ของกระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐาน แต่กระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่ 5 ยังคงถูกขยายเข้าสู่ระบบอยู่ เนื่องจากตำแหน่ง เรโซแนนซ์แบบขนานยังคงอยู่ในช่วงอาร์มอนิกลำดับที่ 5 เช่นเดียวกับกรณีที่ 1 ทำให้ความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมในระบบยังมีความเพี้ยนเกินกว่าระดับที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน และชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าในอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจะได้รับความเสียหายเนื่องจากมีการขยายกระแสฮาร์มอนิกจนเกินพิกัดของตัวเก็บประจุไฟฟ้า

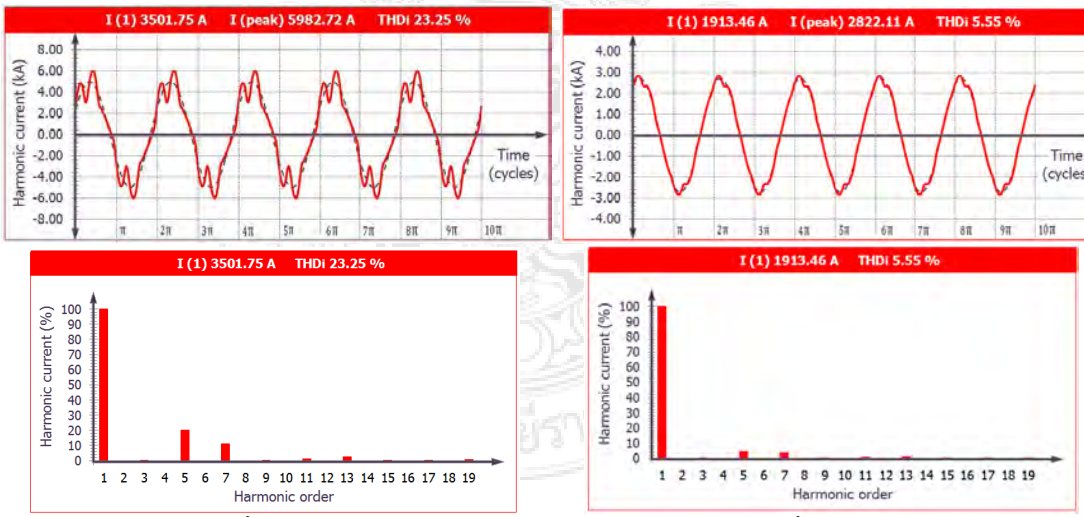
4.3.8 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิก

ภาระทางไฟฟ้าที่ทำการวิเคราะห์ประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ ตามที่แสดงในรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.38 ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 8

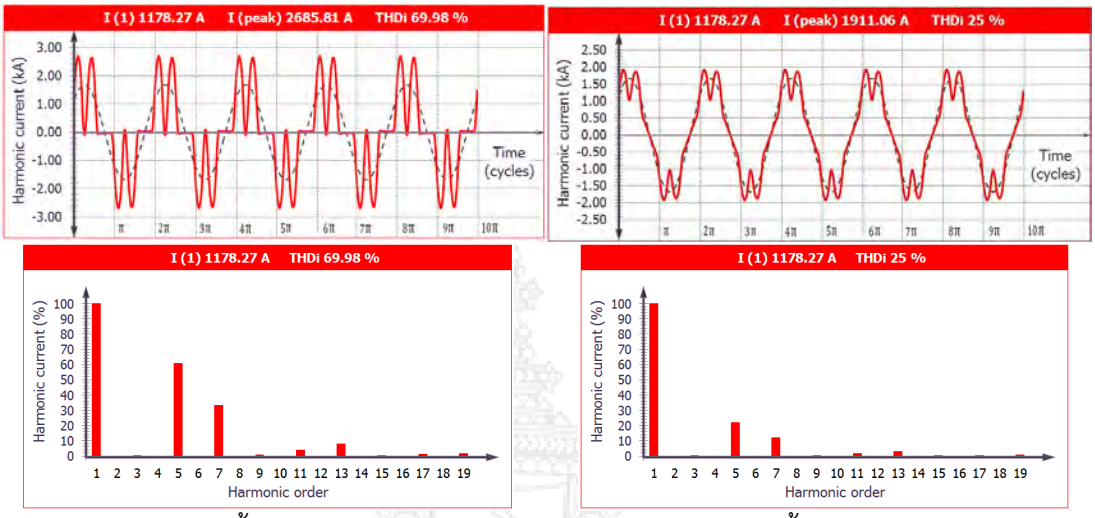
ผลที่ได้จากการทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีที่ 8 หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุง สัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ พบว่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบจะมีผลตอบสนองต่อความเพี้ยนฮาร์มอนิกแตกต่างกัน โดยสามารถวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมได้ดังนี้



ก่อนติดตั้งอุปกรณ์ หลังติดตั้งอุปกรณ์

รูปที่ 4.39 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่จุดต่อร่วม ในระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 8

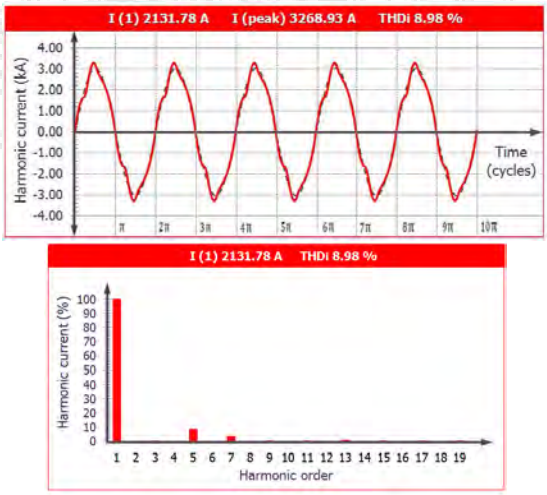
1. กระแสไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลังมีความเพี้ยนของกระแสลดลงอยู่ที่ร้อยละ 5.55 ของค่ากระแสความต้องการรวมในระบบที่ความถี่มูลฐาน ซึ่งมีค่าไม่เกินระดับที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน ซึ่งใน IEEE519 - 2014 กำหนดค่าความเพี้ยนความต้องการรวมที่ร้อยละ 8



ก่อนติดตั้งอุปกรณ์ หลังติดตั้งอุปกรณ์

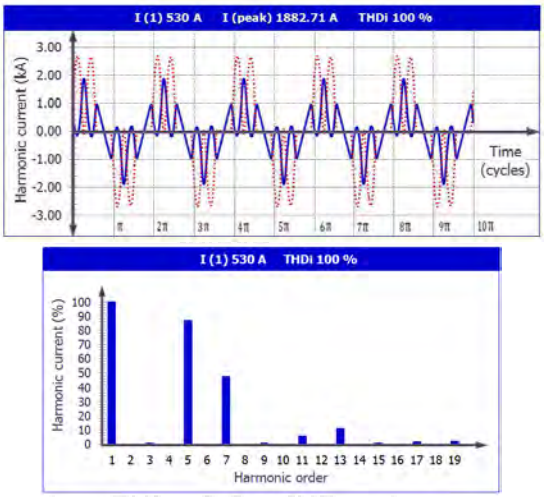
รูปที่ 4.40 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์สำหรับกรณีศึกษาที่ 8

2. กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับมีความเพี้ยนของกระแสคงลดลงอยู่ที่ร้อยละ 25 ของค่ากระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐาน



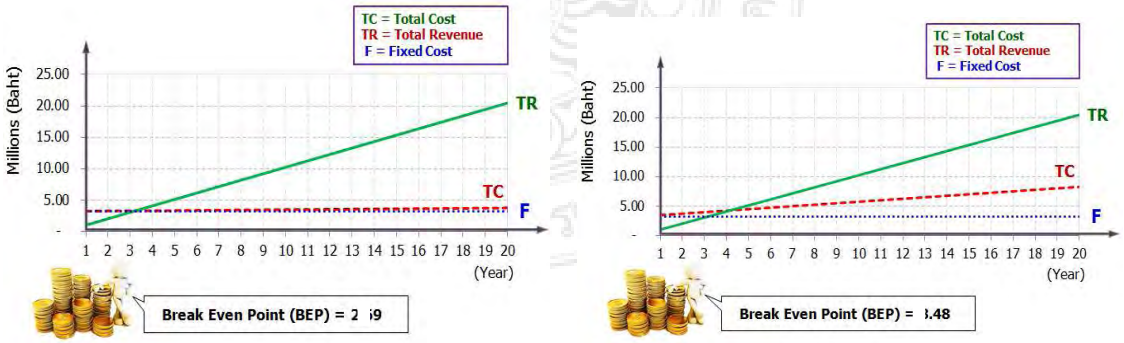
รูปที่ 4.41 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูนสำหรับกรณีศึกษาที่ 8

3. กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูนมีความเพี้ยนของกระแสอยู่ที่ร้อยละ 8.98 ของค่ากระแสไฟฟ้าใช้งานที่ความถี่มูลฐาน ซึ่งจากข้อมูลของผู้ผลิตโดยทั่วไปแล้วตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับจะสามารถรับกระแสฮาร์มอนิกที่มีความเพี้ยนอยู่ในระดับร้อยละ 40 ของค่ากระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐานได้



รูปที่ 4.42 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพสำหรับกรณีศึกษาที่ 8

4. กระแสฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพที่ใช้งานมีค่าเต็มพิกัด และมีมุมเฟสในทิศทางตรงกันข้ามกับอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ



ลงทุนโดยตรง ลงทุนผ่านสินเชื่อธนาคาร

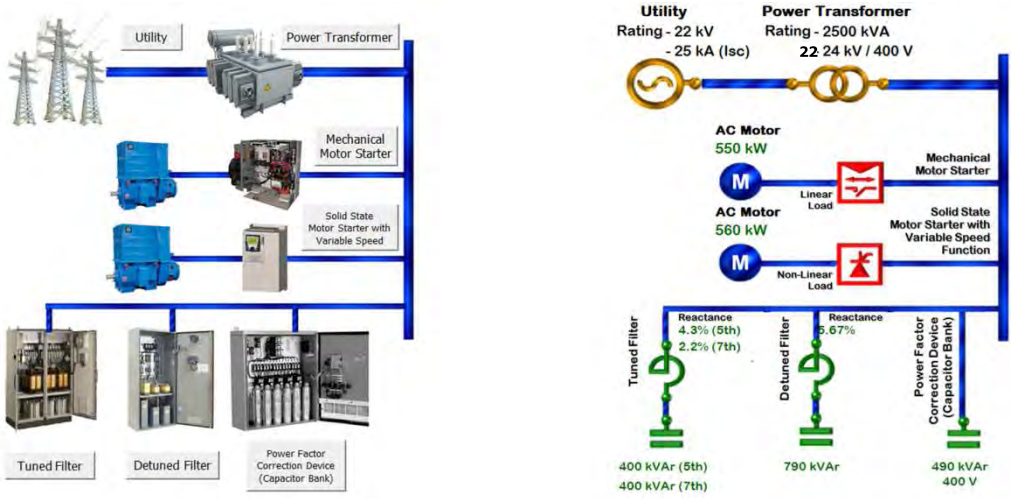
รูปที่ 4.43 จุดคุ้มทุนสำหรับการลงทุนในกรณีศึกษาที่ 8

สำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วยการหาจุดคุ้มทุนของโครงการ (Break Even Point) พบว่าจุดคุ้มทุนของการลงทุนในกรณีนี้มีระยะเวลาอยู่ที่ 2.6 ปี สำหรับกรณีที่ลงทุนโดยตรงแต่หากลงทุนโดยผ่านสินเชื่อธนาคารจะยืดเวลาออกไปเป็น 3.4 ปี

จากกรณีดังกล่าวสรุปได้ว่าการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ เข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความเพี้ยนฮาร์มอนิกจะสามารถลดความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกที่บริเวณจุดต่อร่วมในระบบให้ในอยู่ระดับที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานได้ หากวิเคราะห์คุณสมบัติของอุปกรณ์แต่ละชนิดที่ต่อเข้าระบบสามารถสรุปผลวิเคราะห์ผลได้เป็นลำดับขั้นดังนี้ อันดับแรกเริ่มจากคุณสมบัติของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิก แบบดีจูนซึ่งจะทำการย้ายตำแหน่งของเรโซแนนซ์แบบขนานไปอยู่ในฮาร์มอนิกลำดับที่ไม่มีนัยยะสำคัญ ในกรณีนี้คือฮาร์มอนิกลำดับที่น้อยกว่า 5 เนื่องจากระบบที่พิจารณาเป็นระบบสามเฟสสมดุล จากนั้นอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพจะทำการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบทำให้กระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดลดลงและสามารถจำกัดปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกให้อยู่ในระดับที่มาตรฐานกำหนดไว้ได้ ข้อดีของการติดตั้งอุปกรณ์ในรูปแบบนี้คือสามารถที่จะลดขนาดของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพลงได้ โดยที่ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกยังอยู่ในระดับที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ 3 การติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบ จูนลำดับที่ 5 และจูนลำดับที่ 7 เข้าสู่ระบบที่มีการรบกวนฮาร์มอนิก ซึ่งเป็นกรณีที่ผ่านเงื่อนไขทั้งค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและการรบกวนฮาร์มอนิกเช่นกัน พบว่ากรณีนี้มีระยะจุดคุ้มทุนที่สั้นกว่าเล็กน้อย แต่หากมองในมุมของการควบคุม และการใช้งานจะพบว่ารูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับกรณีที่ 8 จะมีความยืดหยุ่นมากกว่าเนื่องจากอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ไฟฟ้า และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกนั้นมีรูปแบบการทำงานแยกออกจากกันเป็นอิสระ

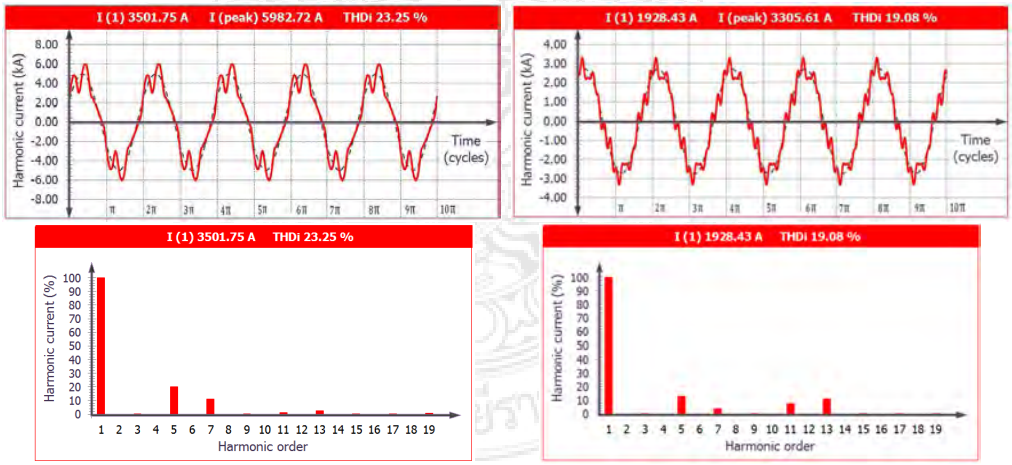
4.3.9 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณ ฮาร์มอนิกแบบจูนเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิก

ภาระทางไฟฟ้าที่ทำการวิเคราะห์ประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูน ตามที่แสดงในรูปที่ 4.44



รูปที่ 4.44 ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 9

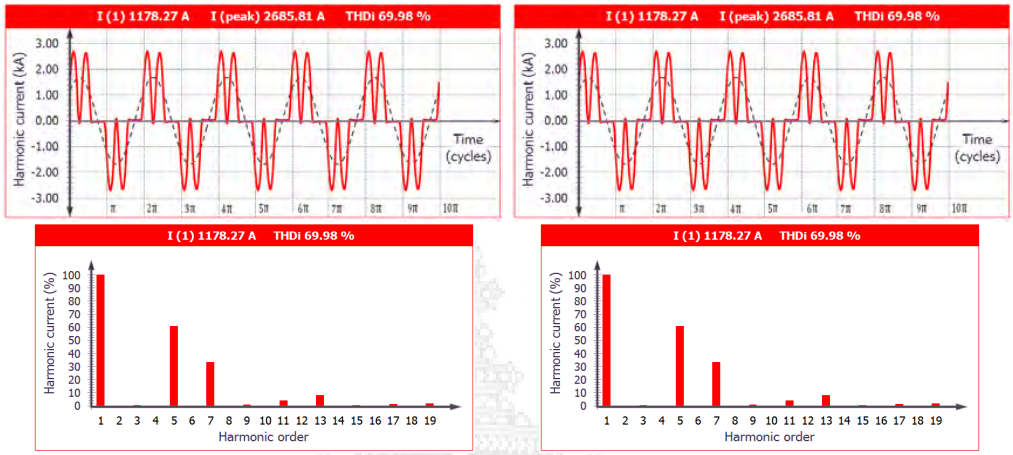
ผลที่ได้จากการทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีที่ 9 หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุง ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูน พบว่าอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบจะมีผลตอบสนองต่อความเพี้ยนฮาร์มอนิกแตกต่างกัน โดยสามารถวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมได้ดังนี้



ก่อนติดตั้งอุปกรณ์ หลังติดตั้งอุปกรณ์

รูปที่ 4.45 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่จุดต่อร่วม ในระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 9

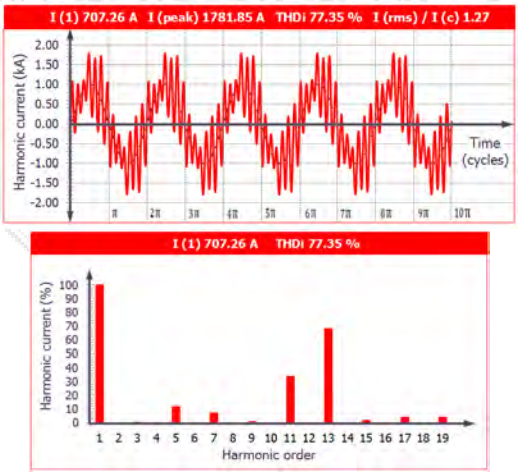
1. กระแสไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลังมีความเพี้ยนของกระแสลดลงอยู่ในระดับร้อยละ 19.08 ของค่ากระแสความต้องการรวมในระบบที่ความถี่มูลฐาน แต่ยังมีค่าสูงกว่าระดับที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน ซึ่งใน IEEE519 - 2014 กำหนดค่าความเพี้ยนความต้องการรวมที่ร้อยละ 8



ก่อนติดตั้งอุปกรณ์ หลังติดตั้งอุปกรณ์

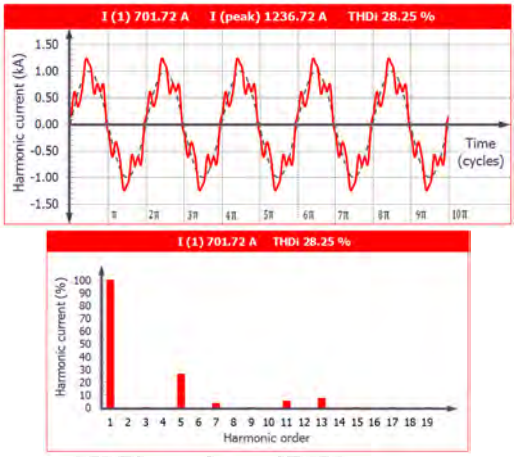
รูปที่ 4.46 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์สำหรับกรณีศึกษาที่ 9

2. กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับมีความเพี้ยนของกระแสคงเดิมทั้งก่อน และหลังการติดตั้งอุปกรณ์



รูปที่ 4.47 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสำหรับกรณีศึกษาที่ 9

3. กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีความเพี้ยนของกระแสอยู่ที่ร้อยละ 77.35 ของค่ากระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐาน และมีอัตราส่วน I_{rms}/I_c เท่ากับ 1.27 ซึ่งใน IEC Standard 60831-1 - 2014 กำหนดอัตราส่วน I_{rms}/I_c ต่ำสุดที่ 1.3



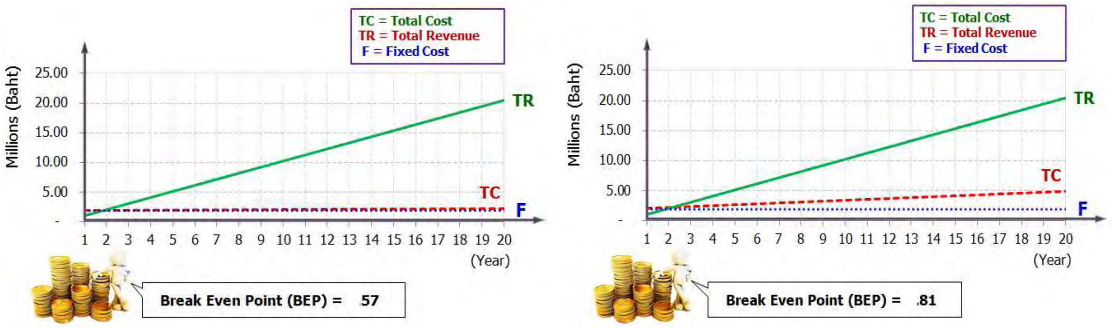
รูปที่ 4.48 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน สำหรับกรณีศึกษาที่ 9

4. กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูนมีความเพี้ยนของกระแสอยู่ที่ร้อยละ 28.25 ของค่ากระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐาน โดยทั่วไปตัวต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับสามารถรับกระแสฮาร์มอนิกที่มีความเพี้ยนอยู่ในระดับร้อยละ 40 ของค่ากระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐาน

ตัวกรองจูนลำดับที่ 5 ตัวกรองจูนลำดับที่ 7

รูปที่ 4.49 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูน สำหรับกรณีศึกษาที่ 9

5. กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูนเบอร์ 5 และเบอร์ 7 มีความเพี้ยนของกระแสอยู่ที่ร้อยละ 128.95 และ 102.8 ของค่ากระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐานตามลำดับ



ลงทุนโดยตรง ลงทุนผ่านสินเชื่อธนาคาร

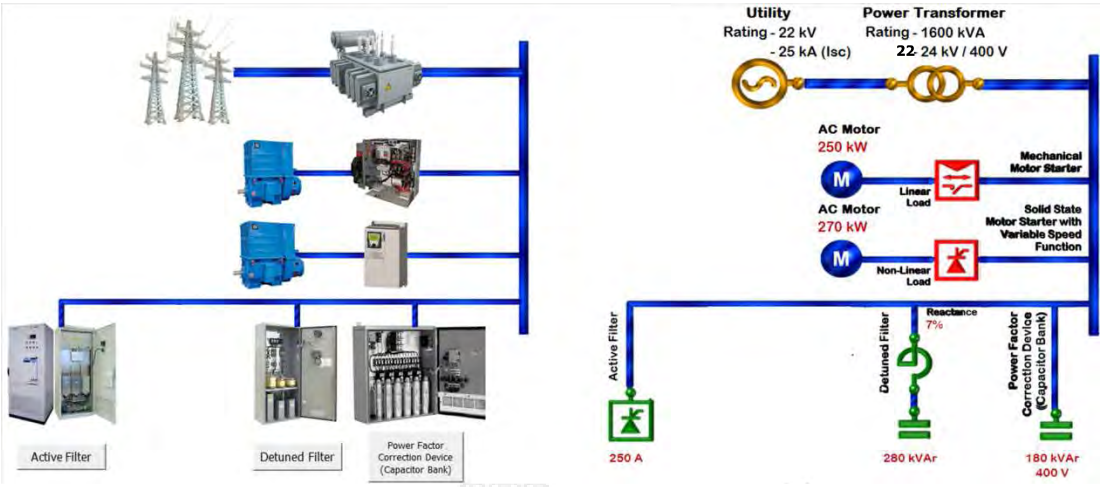
รูปที่ 4.50 จุดคุ้มทุนสำหรับการลงทุนในกรณีศึกษาที่ 9

สำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วยการหาจุดคุ้มทุนของโครงการ (Break Even Point) พบว่าจุดคุ้มทุนของการลงทุนในกรณีนี้มีระยะเวลาอยู่ที่ 1.5 ปี สำหรับกรณีที่ลงทุนโดยตรงแต่หากลงทุนโดยผ่านสินเชื่อธนาคารจะยืดเวลาออกไปเป็น 1.8 ปี

จากกรณีดังกล่าวสรุปได้ว่าการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูน เข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความเพี้ยนฮาร์มอนิก จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์แบบขนานขึ้นสี่ตำแหน่ง โดยตำแหน่งที่มีนัยยะสำคัญคือตำแหน่งเรโซแนนซ์แบบขนานที่เกิดจากอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าซึ่งอยู่ในช่วงฮาร์มอนิกลำดับที่ 11 และ 13 ทำให้เกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 11 และ 13 เข้าสู่ระบบ หากพิจารณาผลการทดสอบจะพบว่ากระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่ 11 และ 13 จะขยาย และไหลเข้าสู่อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ถึงแม้ว่ากระแสจะไม่เกินพิกัดแต่อาจทำให้อายุการใช้งานของตัวเก็บประจุไฟฟ้าสั้นลง นอกจากนี้กระแสฮาร์มอนิก ที่ไหลจูนลำดับที่ 7 ทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายได้

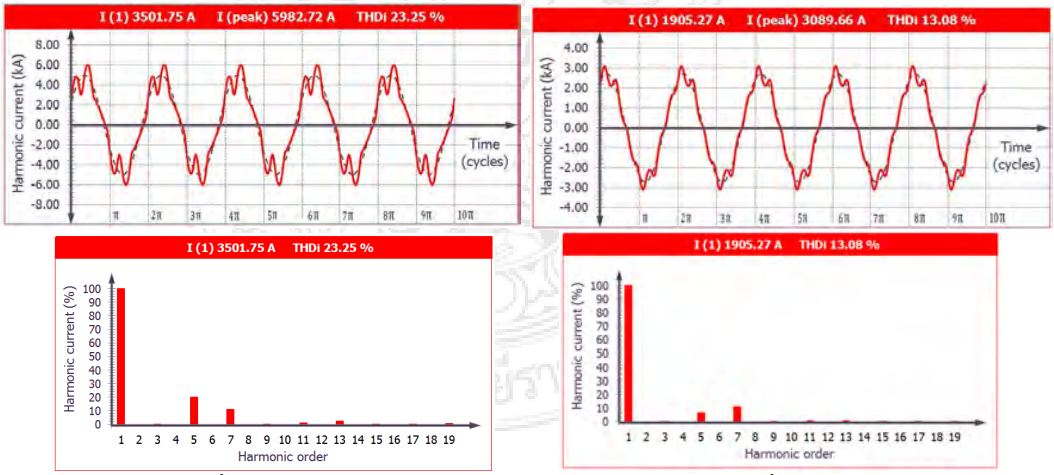
4.3.10 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาฮาร์มอนิกแบบ แอคทีฟในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิก

ภาระทางไฟฟ้าที่ทำการวิเคราะห์ประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ ตามที่แสดงในรูปที่ 4.51



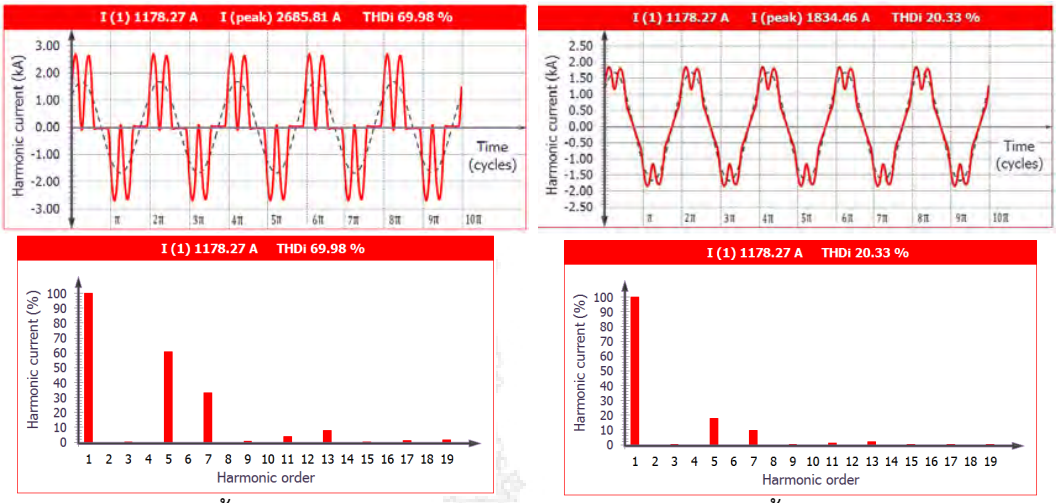
รูปที่ 4.51 ระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 10

ผลที่ได้จากการทดสอบระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีที่ 10 หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุง ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ พบว่าอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบจะมีผลตอบสนองต่อความเพี้ยน ฮาร์มอนิกแตกต่างกัน โดยสามารถวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมได้ดังนี้



ก่อนติดตั้งอุปกรณ์ หลังติดตั้งอุปกรณ์

รูปที่ 4.52 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่จุดต่อร่วม ในระบบไฟฟ้ากำลังสำหรับกรณีศึกษาที่ 10

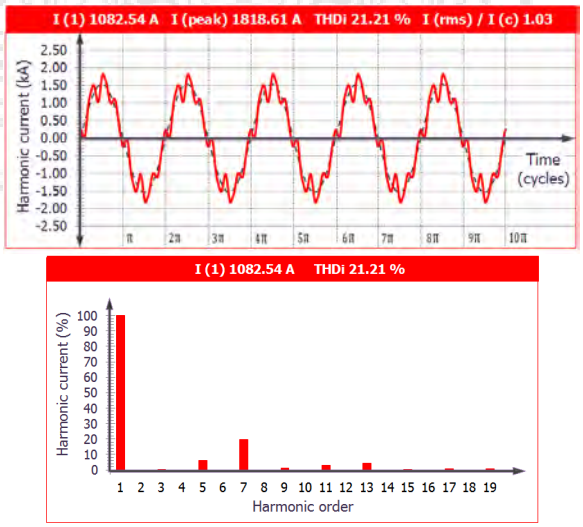


ก่อนติดตั้งอุปกรณ์ หลังติดตั้งอุปกรณ์

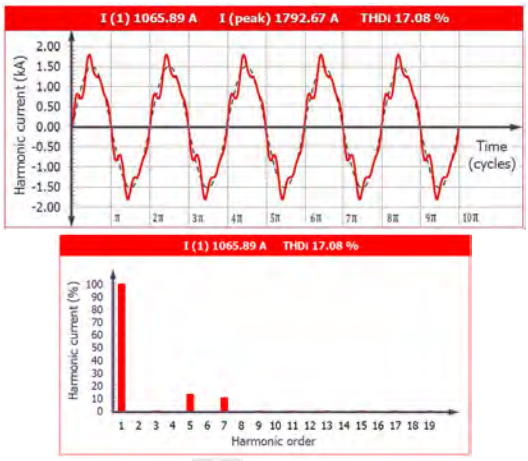
รูปที่ 4.53 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์สำหรับกรณีศึกษาที่ 10

1. กระแสไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลังมีความเพี้ยนของกระแสลดลงอยู่ที่ร้อยละ 13.08 ของค่ากระแสความต้องการรวมในระบบที่ความถี่มูลฐาน แต่ยังมีค่าเกินระดับที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน ซึ่งใน IEEE519 - 2014 กำหนดค่าความเพี้ยนความต้องการรวมที่ร้อยละ 8

2. กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับมีความเพี้ยนของกระแสคงลดลงอยู่ที่ร้อยละ 20.33 ของค่ากระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐาน



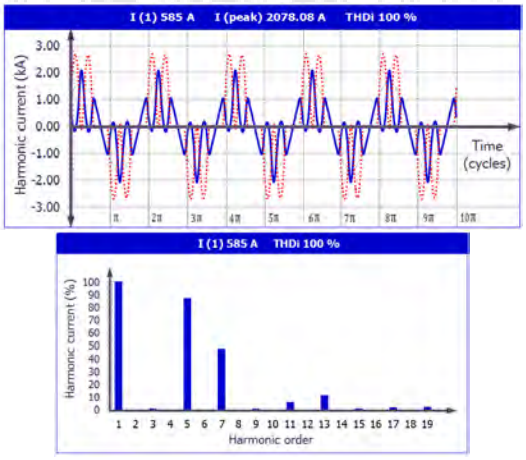
รูปที่ 4.54 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสำหรับกรณีศึกษาที่ 10



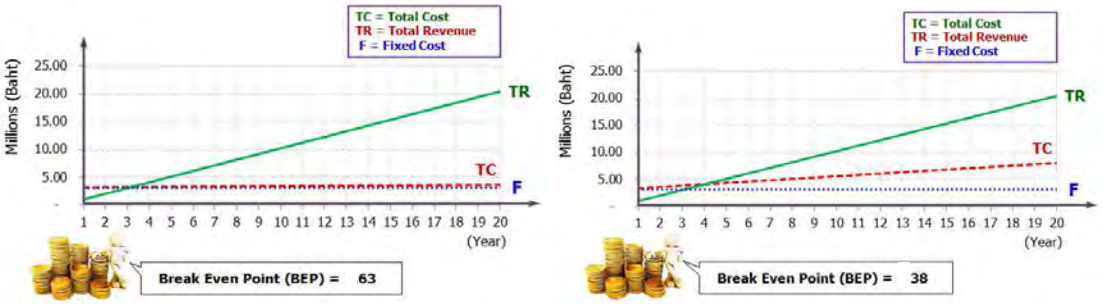
รูปที่ 4.55 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูนสำหรับกรณีศึกษาที่ 10

3. กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีความเพี้ยนของกระแสอยู่ที่ร้อยละ 21.21 ของค่ากระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐาน และมีอัตราส่วน I_{rms}/I_c เท่ากับ 1.03 ซึ่งในIEC Standard 60831-1 - 2014 กำหนดให้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ประกอบสร้างขึ้นตามมาตรฐานนี้ต้องมีอัตราส่วน I_{rms}/I_c ไม่น้อยกว่า 1.3)

4. กระแสไฟฟ้าที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูนมีความเพี้ยนของกระแสอยู่ที่ร้อยละ 17.08 ของค่ากระแสใช้งานที่ความถี่มูลฐาน จากข้อมูลของผู้ผลิตโดยทั่วไปแล้วตัวต้านทาน ไฟฟ้ากระแสสลับจะสามารถรับกระแสฮาร์มอนิกที่มีความเพี้ยนอยู่ในระดับร้อยละ 40 ของค่ากระแส ใช้งานที่ความถี่มูลฐานได้



รูปที่ 4.56 รูปคลื่นสัญญาณ และสเปกตรัมของกระแสที่อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพสำหรับกรณีศึกษาที่ 10



ลงทุนโดยตรง ลงทุนผ่านสินเชื่อธนาคาร

รูปที่ 4.57 จุดคุ้มทุนสำหรับการลงทุนในกรณีศึกษาที่ 10

5. กระแสฮาร์มอนิกของอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพที่ใช้งานมีค่าเต็มพิกัด และมีมุมเฟสในทิศทางตรงกันข้ามกับอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

สำหรับการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วยการหาจุดคุ้มทุนของโครงการ (Break Even Point) พบว่าจุดคุ้มทุนของการลงทุนในกรณีนี้มีระยะเวลาอยู่ที่ 2.6 ปี สำหรับกรณีที่ลงทุนโดยตรงแต่หากลงทุนโดยผ่านสินเชื่อธนาคารจะยืดเวลาออกไปเป็น 3.3 ปี

จากกรณีดังกล่าวสรุปได้ว่าการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความเพี้ยนฮาร์มอนิก จะมีการขยายกระแสฮาร์มอนิกในระบบเพียงเล็กน้อยเนื่องจากอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพได้ชดเชยกระแสฮาร์มอนิกในทุก ๆ ลำดับที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิด ถึงแม้ว่าตำแหน่งของเรโซแนนซ์แบบขนานจะยังคงอยู่ในฮาร์มอนิกลำดับที่มีนัยยะสำคัญซึ่งในกรณีจะอยู่ในช่วงฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 เช่นเดียวกันกับกรณีที่ 5 แต่กระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่ตรงกับตำแหน่งของเรโซแนนซ์แบบขนานมีปริมาณน้อยจึงขยายตัวได้ไม่สูงมาก แต่อย่างไรก็ดีความเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมในระบบยังคงมีค่าสูงเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้

บทที่ 5
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

เนื้อหาสำหรับบทนี้จะเป็นการสรุปผลพร้อมทั้งนำเสนอข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบ และการวิเคราะห์กรณีศึกษาทั้งหมด 10 กรณี จากบทที่ 4 โดยหัวข้อที่นำเสนอประกอบด้วย ผลการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งเป็นการนำผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดในบทที่ 4 มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแก้ไขปัญหาการรบกวนฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังตามรูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิก โดยเปรียบเทียบทางด้านวิศวกรรม จากการประเมินจากระดับความเพี้ยนความต้องการรวม หรือค่าความเพี้ยนรวมของกระแสฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลัง และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบ สำหรับทางด้านเศรษฐศาสตร์ จะประเมินจากงบประมาณที่ใช้ในการลงทุน และระยะเวลาของจุดคุ้มทุนในการลงทุน แบ่งเป็นสองกรณีคือ ลงทุนโดยตรง และลงทุนผ่านสินเชื่อจากสถาบันการเงิน การอภิปรายผลจะนำข้อมูลที่ได้จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลมาสรุปโดยจำแนกตามอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้า ประกอบด้วย อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูน และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ การพิจารณาข้อมูลทางด้านเศรษฐศาสตร์สำหรับการลงทุน รวมไปถึงแนวทางสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ที่ถูกต้องตามหลักวิศวกรรม และมีความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อพิจารณาแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิก ซึ่งจะนำไปสู่การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบพร้อมทั้งแก้ไขปัญหาการรบกวนฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ สุดท้ายคือข้อเสนอแนะจะกล่าวถึงข้อเสนอแนะเพิ่มเติมสำหรับการนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในเพื่อเป็นข้อมูลในการอ้างอิง ศึกษาเพิ่มเติม หรือนำไปพัฒนาต่อไป

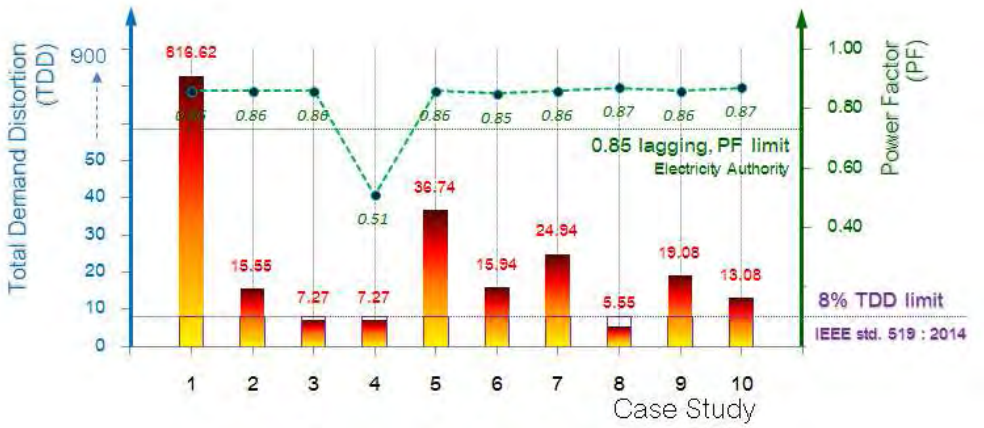
5.2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การประเมินผลการทดสอบเพื่อพิจารณาประสิทธิภาพการแก้ไขปัญหาการรบกวนฮาร์มอนิกในระบบด้วยอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกมีเครื่องมือที่ใช้ประกอบการชี้วัดอยู่สองส่วนดังนี้

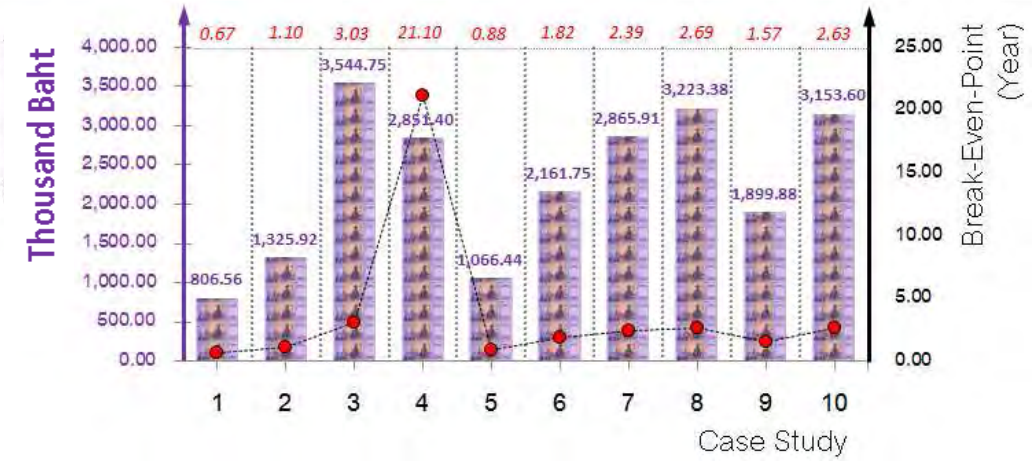
1. การประเมินทางด้านวิศวกรรมโดยใช้มาตรฐานสากลที่เกี่ยวข้องกับการประเมินระดับการรบกวนฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังคือมาตรฐาน IEEE519 - 2014 ฉบับปรับปรุงล่าสุดที่มีใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากข้อกำหนดที่ระบุไว้ในมาตรฐานฉบับนี้สอดคล้องกับการประยุกต์ใช้งานซึ่งระดับของค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกที่ยอมรับได้นั้นจะแปรผันไปตามขนาด หรือพิกัดระบบไฟฟ้ากำลังของผู้ใช้ และสำหรับปริมาณทางไฟฟ้าที่ประเมินจะใช้เป็นปริมาณของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาการควบคุม หรือแก้ไขปัญหาในมุมของผู้ใช้ไฟ โดยผู้ใช้ไฟมีหน้าควบคุม

ปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกในระบบของผู้ใช้ไฟเอง ส่วนการไฟฟ้า หรือผู้ให้บริการด้านการใช้ไฟฟ้าจะมีหน้าที่ในการควบคุมปริมาณของแรงดันฮาร์มอนิกที่ในระบบที่จ่ายไฟให้กับผู้ใช้ พร้อมทั้งประเมินค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบ ซึ่งในข้อกำหนดกฎเกณฑ์ของการไฟฟ้าภายในประเทศไทยได้มีการบังคับให้ผู้ใช้ไฟ รวมทั้งผู้ผลิตไฟฟ้าที่ขายไฟให้กับการไฟฟ้าจะต้องมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าไม่ต่ำกว่า 0.85 ล้าหลัง โดยตรวจวัด ณ จุดเครื่องมือวัดที่ใช้สำหรับซื้อขายไฟของการไฟฟ้าเนื่องจากขอบเขตของวิทยานิพนธ์นี้วิเคราะห์ หรือพิจารณาค่าปรับจากการไฟฟ้าที่เกิดจากค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าเกณฑ์เป็นองค์ประกอบในการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ เพราะฉะนั้นในการประเมินจึงใช้เกณฑ์ 0.85 ล้าหลัง นี้เป็นหลักเกณฑ์ หรือเงื่อนไขในการประเมินทางด้านวิศวกรรมในส่วนของการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบ สำหรับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ที่ 0.95 ล้าหลัง

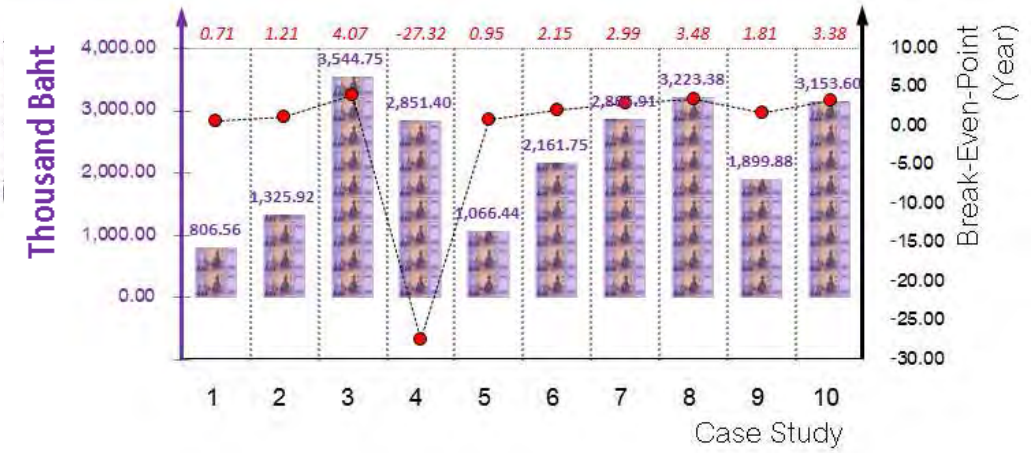
2. การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์จะใช้การประเมินผลด้วยวิธีการวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนของโครงการเนื่องจากวิธีการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วยวิธีการนี้มีความเหมาะสม และสอดคล้องกับฐานข้อมูลที่มีอยู่ อีกทั้งยังสามารถแสดงผลออกมาให้อยู่ในรูปของกราฟเส้นซึ่งสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย และทำให้เห็นภาพรวมเบื้องต้นของการลงทุนในโครงการ ทั้งจุดคืนทุน ระยะเวลาที่ขาดทุน รวมไปถึงช่วงเวลาที่สามารถทำกำไรได้จากการลงทุน สำหรับองค์ประกอบที่ใช้ในการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ประกอบด้วยข้อมูลที่ใช้ในการประเมินสองส่วน ส่วนแรกคืองบประมาณที่ใช้ในการลงทุนประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายสำหรับการติดตั้ง ทดสอบอุปกรณ์ และจ่ายไฟเข้าสู่อุปกรณ์ ส่วนที่สองคือรายรับที่ได้จากการลงทุนประกอบด้วย ค่าปรับของการไฟฟ้าที่สามารถลดได้ และค่าภาษี ณ ที่จ่าย แต่จะมีส่วนที่หักลบกับรายได้สองส่วนคือ ค่าเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ในแต่ละปี และดอกเบี้ยสินเชื่อจากสถาบันการเงินในแต่ละปีกรณีที่ลงทุนผ่านสินเชื่อของสถาบันการเงิน



รูปที่ 5.1 การประเมินผลทางด้านวิศวกรรม



รูปที่ 5.2 การประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ สำหรับการลงทุนโดยตรง



รูปที่ 5.3 การประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ สำหรับการลงทุนผ่านสินเชื่อ

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านวิศวกรรม และด้านเศรษฐศาสตร์สำหรับอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแต่ละชนิด

รูปแบบการติดตั้ง		การประเมินผลทางด้านวิศวกรรม					การประเมินผลทางด้านเศรษฐศาสตร์			
จำนวนอุปกรณ์	กรณีศึกษา	การรบกวนฮาร์มอนิก[1]		ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า			เงินลงทุน (TC)[2] บาท	รายรับ (TR)[3] บาท / ปี	จุดคุ้มทุน[4] ปี	จุดคุ้มทุน[5] ปี
		เงื่อนไข	หลังติดตั้ง	เงื่อนไข	ก่อนติดตั้ง	หลังติดตั้ง				
1	1 (C[8])	8% (TDD)	816.67 (N/P)[6]	0.85	0.48 (N/P)[6]	0.86 (P)[7]	806,564.80	1,007,808.68	0.6	0.7
	2 (DF[9])	8% (TDD)	15.55 (N/P)[6]	0.85	0.48 (N/P)[6]	0.86 (P)[7]	1,325,919.48	1,005,023.45	1.1	1.2
	3 (TF[10])	8% (TDD)	7.27 (P)[7]	0.85	0.48 (N/P)[6]	0.86 (P)[7]	3,544,746.52	973,793.90	3.0	4.0
	4 (AHF[11])	8% (TDD)	7.27 (P)[7]	0.85	0.48 (N/P)[6]	0.51 (N/P)[6]	2,851,401.41	112,631.39	21.1	-27.3
2	5 (C+DF)	8% (TDD)	36.74 (N/P)[6]	0.85	0.48 (N/P)[6]	0.86 (P)[7]	1,066,441.38	1,007,343.35	0.8	0.9
	6 (C+TF)	8% (TDD)	15.94 (N/P)[6]	0.85	0.48 (N/P)[6]	0.85 (P)[7]	2,161,749.37	991,068.24	1.8	2.1
	7 (C+AHF)	8% (TDD)	24.91 (N/P)[6]	0.85	0.48 (N/P)[6]	0.86 (P)[7]	2,865,910.27	999,951.49	2.3	2.9
	8 (DF+AHF)	8% (TDD)	5.55 (P)[7]	0.85	0.48 (N/P)[6]	0.87 (P)[7]	3,223,382.57	996,777.57	2.6	3.4
3	9 (C+DF+TF)	8% (TDD)	19.08 (N/P)[6]	0.85	0.48 (N/P)[6]	0.86 (P)[7]	1,899,880.09	1,006,792.52	1.5	1.8
	10 (C+DF+AHF)	8% (TDD)	13.08 (N/P)[6]	0.85	0.48 (N/P)[6]	0.87 (P)[7]	3,153,599.42	998,346.98	2.6	3.3

[1] ใช้ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแส (THD_i) ที่จุดต่อร่วมในระบบ ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าความเพี้ยนความต้องการรวม (TDD) ในการประเมิน

[2] ปัจจัยที่นำมาประเมินประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายสำหรับการจัดซื้ออุปกรณ์ ค่าใช้จ่ายสำหรับการติดตั้ง และทดสอบ

[3] ปัจจัยที่นำมาประเมินประกอบด้วย ค่าปรับจากการไฟฟ้า (ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าเกณฑ์) ที่สามารถลดได้ ภาษีมูลค่าเพิ่ม อัตราดอกเบี้ยสินเชื่อ และค่าเสื่อมสภาพของอุปกรณ์

[4] จุดคุ้มทุน (ลงทุนโดยไม่ใช้สินเชื่อจากสถาบันการเงิน)

[5] จุดคุ้มทุน (ลงทุนโดยผ่านสินเชื่อจากสถาบันการเงิน)

[6] (N/P) Not pass = ไม่ผ่านเกณฑ์ [7](P) Pass = ผ่านเกณฑ์ [8]C = Capacitor Bank

[9]DF = Detuned Filter Bank [10]TF = Tuned Filter Bank [11]AHF = Active Harmonic Filter Bank

5.3 การอภิปายผล

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลในตารางที่ 5.1 ทำให้สามารถอภิปรายผลการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิก โดยจำแนกตามอุปกรณ์แต่ละชนิด รวมไปถึงการพิจาณาข้อมูลทางด้านเศรษฐศาสตร์สำหรับการลงทุนได้ดังนี้

5.3.1 อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

1. ในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิก อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง ไฟฟ้าไม่สามารถติดตั้งในระบบดังกล่าวได้ไม่ว่ากรณีใด ๆ เนื่องจากปรากฏการณ์เรโซแนนซ์แบบขนานจะทำให้เกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกในระบบทำให้ระดับความเพี้ยนฮาร์มอนิกในระบบมีค่าสูงขึ้น หากพิจารณากรณีศึกษาที่ 1 จะพบว่ามีค่าสูงเกินร้อยละ 816.62 เนื่องจากตำแหน่ง เรโซแนนซ์แบบขนานในระบบตรงกับฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ซึ่งเป็นฮาร์มอนิกลำดับมีนัยยะสำคัญมาก ที่สุดพอดี

2. อุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าไม่สามารถติดตั้งร่วมกันกับอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกในระบบที่มีการรบกวนฮาร์มอนิกได้ไม่ว่ากรณีใดๆ เนื่องจากตำแหน่งเรโซแนนซ์แบบขนานของชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าในอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ายังคงอยู่ในฮาร์มอนิกลำดับที่มีนัยยะสำคัญคือฮาร์มอนิกตั้งแต่ลำดับที่ 5 ขึ้นไปเนื่องจาก พิจารณาระบบสามเฟสสมดุล ถึงแม้ว่าจะมีการปรับปรุงสัญาณฮาร์มอนิกในระบบแล้วก็ตามแต่ตำแหน่งเรโซแนนซ์แบบขนานของชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้ายังคงทำให้เกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิก ส่วนที่เหลือเข้าสู่ระบบ

5.3.2 อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน

1. อุปกรณ์สามารถปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบได้เช่นเดียวกับอุปกรณ์ ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า แต่จะมีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถใช้งานกับระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิกได้โดยที่ตัวอุปกรณ์ไม่ได้รับความเสียหาย

2. เปลี่ยนตำแหน่งของเรโซแนนซ์แบบขนานจากฮาร์มอนิกลำดับที่มีนัยยะสำคัญให้อยู่ในฮาร์มอนิกลำดับที่ไม่มีนัยยะสำคัญคือฮาร์มอนิกลำดับที่ต่ำกว่าฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ทำให้สามารถ หลีกเลี่ยงการขยายกระแสฮาร์มอนิกในระบบจากปรากฏการณ์เรโซแนนซ์แบบขนานได้ ซึ่งหากใช้อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูนแทนอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์หลัก จะสามารถติดตั้งอุปกรณ์ร่วมกับอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกชนิดอื่นๆ ได้ทำให้ประสิทธิภาพในการแก้ไขปัญหาดียิ่งขึ้น

3. ความสามารถในการกรอง หรือลดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในระบบค่อนข้างต่ำไม่สามารถกรองหรือลดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้ กรณีที่ระบบมีความเพี้ยนฮาร์มอนิกอยู่ในระดับสูงต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกชนิดอื่นๆ ร่วมด้วยมิฉะนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าอาจได้รับความเสียหายได้ พิจารณาได้จากความเพี้ยนของกระแส ฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลังได้จากกรณีศึกษาในบทที่ 4

5.3.3 อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูน

1. อุปกรณ์สามารถกรอง หรือลดปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกในระบบพร้อมทั้งสามารถ ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบได้ เนื่องจากภายในของอุปกรณ์จะประกอบด้วยตัวเก็บประจุไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์หลัก

2. อุปกรณ์ทำหน้าหลักที่คือการกรองกระแสฮาร์มอนิก การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์เป็นเพียงผลพลอยได้ไม่ควรนำมาใช้ทำหน้าที่เช่นเดียวกับอุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

3. อุปกรณ์ 1 ชุดจะสามารถออกแบบให้กรองกระแสฮาร์มอนิกได้เพียงลำดับเดียวเท่านั้น เพราะฉะนั้นหากในระบบมีฮาร์มอนิกลำดับที่มีนัยยะสำคัญมากกว่า 1 ลำดับ จะต้องมีการออกแบบ และติดตั้งอุปกรณ์เพิ่ม ซึ่งมีข้อจำกัดคือไม่สามารถที่จะติดตั้งข้ามลำดับได้กล่าวคือ จะต้องทำการติดตั้งฮาร์มอนิกลำดับที่มีนัยยะสำคัญที่อยู่ต่ำสุดก่อน กรณีที่พิจารณาระบบสามเฟสสมดุลคือฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 แล้วค่อยเพิ่มลำดับขึ้นไป หากมีการติดตั้งข้ามลำดับจะเกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่ถูกข้ามไปเข้าสู่ระบบ

4. หากต้องการปรับเปลี่ยนภาระทางไฟฟ้าในระบบจะต้องทำการออกแบบ และติดตั้งอุปกรณ์ใหม่

5.3.4 อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ

1. อุปกรณ์สามารถกรอง หรือลดปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกได้ตามต้องการขึ้นอยู่ กับขนาดที่เลือกใช้ว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ และมีความยืดหยุ่นในการใช้งาน

2. สามารถปรับเปลี่ยนการชดเชยกระแสฮาร์มอนิกตามกระแสฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบ ได้ โดยย่านของลำดับฮาร์มอนิกที่ทำการชดเชยจะค่อนข้างกว้างสามารถชดเชยกระแสฮาร์มอนิก ได้อย่างครอบคลุม

3. สามารถปรับเปลี่ยนภาระทางไฟฟ้าหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์และระบบ

4. สามารถในการชดเชยกระแสไฟฟ้าต้านกลับ (Reactive Current) ได้อย่างต่อเนื่อง จากอุปกรณ์ถูกออกแบบมาเพื่อแก้ไข หรือปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกในระบบเท่านั้น

5. ในกรณีที่มีพื้นที่ในการติดตั้งอุปกรณ์จำกัด อุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบ แอคทีพจะเหมาะสมกับกรณีนี้มากกว่าอุปกรณ์อื่น ๆ เนื่องจากอุปกรณ์มีขนาดที่ไม่ใหญ่มากเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ชนิดอื่น ๆ

5.3.5 การพิจาณาข้อมูลทางด้านเศรษฐศาสตร์สำหรับการลงทุน

จากกรณีตัวอย่างที่ผ่านมาจะพบว่า หากเลือกแนวทางในการแก้ไขปัญหาโดยเน้นที่จุดคุ้มทุนเพียงอย่างเดียว ระบบรวมไปถึงอุปกรณ์ที่ติดตั้งในระบบจะมีความเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายได้ เนื่องจากวิธีการแก้ไขปัญหาที่มีจุดคุ้มทุนโดยใช้ระยะเวลาน้อยจะเน้นไปที่การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเป็นหลัก เพราะฉะนั้นในการพิจารณาเลือกวิธีในการแก้ไขปัญหาควรคำนึงถึงการแก้ไขปัญหาการรบกวนฮาร์มอนิกในระบบประกอบด้วย ซึ่งแนวทางที่สามารถแก้ไขปัญหาทั้งสองอย่างร่วมกันได้อย่างประสบผลสำเร็จอาจจะต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการแก้ไขปัญหามากกว่าหนึ่งอุปกรณ์ แต่ต้องพิจารณา

เลือกอุปกรณ์ที่สามารถทำงานร่วมกันได้โดยไม่เกิดปัญหา เมื่อพิจารณาจากกรณีศึกษาทั้งหมด พบว่าการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิก แบบดีจูน กับอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบแอคทีพ สามารถที่จะตอบโจทย์การแก้ไขปัญหาในระบบได้อย่างสมบูรณ์ทั้งค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และการแก้ไขปัญหาการรบกวนฮาร์มอนิกในระบบ อีกทั้งจุดคุ้มทุนยังมีระยะเวลาที่สามารถยอมรับได้ สำหรับแนวทางในการลงทุนหากลงทุนโดยตรงไม่ผ่านสินเชื่อจากสถาบันการเงินระยะเวลาในการคืนทุนจะสั้นกว่าการลงทุนโดยผ่านสินเชื่อจากสถาบันการเงิน แต่อย่างไรก็ดีปัจจัยสำหรับการตัดสินใจในประเด็นนี้ก็คือสภาพคล่องของผู้ตัดสินลงทุน หากผู้ลงทุนมีปัญหาเกี่ยวกับสภาพคล่องทางด้านการเงินการลงทุนโดยผ่านสินเชื่อจากสถาบันการเงินก็อาจเป็นคำตอบสำหรับผู้ลงทุนได้ซึ่งต้องแลกกับระยะเวลาในการคืนทุนที่นานขึ้น

5.3.6 แนวทางสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ที่ถูกต้องตามหลักวิศวกรรม และมีความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์

จากการสรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลในหัวข้อ 5.1 ตารางที่ 5.1 รูปที่ 5.1 รูปที่ 5.2 และรูปที่ 5.3 จะพบว่ารูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ หรือกรณีศึกษาที่ผ่านเงื่อนไขทางด้านวิศวกรรมทั้งสอง ข้อ โดยมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และระดับการรบกวนฮาร์มอนิกในระบบอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือกรณีที่ 3 การติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบจูนเข้าสู่ระบบ และกรณีที่ 8 การ ติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน และแอคทีพเข้าสู่ระบบ เมื่อพิจารณาการควบคุม และการใช้งานของอุปกรณ์ที่ติดตั้งทั้งสองกรณีแล้วพบว่ารูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ในกรณีที่ 8 จะมีความยืดหยุ่นต่อการใช้งานมากกว่า เนื่องจากอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าจะทำหน้าที่แยกออกจากกัน โดยตัวกรองแบบดีจูนทำหน้าปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบ โดยไม่ให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่ลำดับฮาร์มอนิกที่มีนัยยะสำคัญ และตัวกรองฮาร์มอนิกแบบแอคทีพทำหน้าที่ลดกระแสฮาร์มอนิกในระบบ ซึ่งจากการสำรวจข้อมูลสำหรับรูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ที่นิยมโดยทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม รวมไปถึงระบบไฟฟ้ากำลังที่มีปัญหาทางด้านการรบกวนฮาร์มอนิกในระบบพบว่ารูปแบบการติดตั้งจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับกรณีที่ 8 คือการติดตั้งอุปกรณ์ปรับปรุงสัญญาณฮาร์มอนิกแบบดีจูน และแอคทีพร่วมกัน

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์อาจเพิ่มปัจจัยอื่น ๆ ยกตัวอย่างเช่น กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบที่สามารถลดได้จากการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบ เข้ามาพิจารณาเพิ่มเติมเพื่อให้จุดคุ้มทุนมีระยะเวลาที่น่าดึงดูด และมีความน่าสนใจสำหรับการลงทุนมากขึ้น

2. เมื่อเพิ่มปัจจัยทางด้านเศรษฐศาสตร์อื่นๆ เข้ามาพิจารณาแล้ว การประเมินทางด้านวิศวกรรมในส่วนของค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบอาจเพิ่มค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมคือระดับที่ 0.95 ล้าหลัง เพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองการรบกวนฮาร์มอนิกของระบบ ในกรณีที่ระบบมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น

3. การประเมินผลกระทบของการรบกวนฮาร์มอนิก อาจมีการเพิ่มแหล่งจ่ายของกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบต่าง ๆ หรือเพิ่มปริมาณของภาระทางไฟฟ้าที่มีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองในระบบกรณีที่ในระบบมีแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกมากกว่าหนึ่งแหล่ง

บรรณานุกรม

คมสันต์ ดาโรจน์. 2541. ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่ออายุการใช้งานของหม้อแปลงกำลัง. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท. (ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า). คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ไชยยะ แช่มช้อย. 2554. คู่มือคุณภาพไฟฟ้า. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพ ฯ.

ไชยยะ แช่มช้อย. ม.ป.ป. “ฮาร์มอนิก การประยุกต์ใช้ตัวกรองดีจูนเพื่อป้องกันสภาวะเรโซแนนซ์สำหรับระบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้น.” วารสาร M & E.

ไชยยะ แช่มช้อย. ม.ป.ป. “ฮาร์มอนิก ตัวกรองฮาร์มอนิก วิธีจำกัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้นด้วยตัวกรองฮาร์มอนิกประเภทพาสซีฟต่อขนาน.” วารสาร M & E.

ตฤน แสงสุวรรณ. 2556. คุณภาพไฟฟ้า. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพ ฯ.

ธีระ ธนานุสนธิ์. 2538. การศึกษาแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในระบบจำหน่ายของ กฟภ. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท. (ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า). คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิติ วันทอง. 2551. การวิเคราะห์ทางเลือกในการกรองกระแสฮาร์มอนิก. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท. (ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า). คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปัทมา ไวทยวงศ์สกุล. 2556. กลยุทธ์การวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุนกับการวางแผนกำไรในการลงทุนซื้ออุปกรณ์ประหยัดพลังงาน. การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. ภูเก็ต.

ปรีชา เกรียงกรกฎ. 2555. การเลือกเครื่องจักรโดยวิธีจุดคุ้มทุนของมูลค่าเงินเทียบเท่ารายปีสำหรับกรณีอัตราผลตอบแทนไม่คงที่. การประชุมวิชาการข่ายวิศวกรรมอุตสาหการ. เพชรบุรี.

วิทยา ธีระสาสน์. 2553. การกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้ากำลังสามเฟสสำหรับอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วยฟิลเตอร์แบบพาสซีฟ. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท. (ครุศาสตร์ไฟฟ้า). ครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

วิบูลย์ ชื่นแขก. 2539. “กระแสฮาร์มอนิก ปัญหาที่ต้องป้องกัน.” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 6, 6 (ธันวาคม) : 36-43.

วิบูลย์ ชื่นแขก. 2549. ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพ ฯ.

ABB Co., Ltd. n.d. Active Filter Parallel with Detuned Filter for Paper Plant. ABB Company Limited.

Boonseng C., Inwai C., Kinnares V., Nakawiwat K. and Apiratikul P. 2001. “Failure Analysis of Dielectric of Low Voltage Power Capacitors Due to Related Harmonic

Resonance Effects," IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. vol.3. pp. 1003-1008.

Chaladying S. and Rugthaichareoncheep N. 2016. "Implement of Harmonic Current Impact on Power Factor Correction Device," The Journal of Industrial Technology (JIT), vol.12. no.1.

Chaladying S., Charlangsut A., Rugthaichareoncheep N. 2015. "Parallel Resonance Impact on Power Factor Improvement in Power System with Harmonic Distortion," IEEE Region 10 Annual Conference (TENCON' 2015).

Copper Development Association. 2002. Power Quality Application Guide. European Copper Institute, Hemel Hempstead.

Collombet C., Lupin J.M.and Schonek J. 2000. Harmonic Disturbances in Network and Their Theatment. Imprimerie du Pont de Claix, Claix. (Schneider Electric Cahier Technique No. 152).

Dugan R.C., McGranghan M.F., Santoso S., Beaty H.W. 2012. Electrical Power System Quality. 3th ed. n.p., n.p.

Danfoss Co., Ltd. 2009. VLT® Active Filter AFF 005 Operating Instruction. Danfoss Co., Ltd.

Engineering Recommendation (ER). 2001. "Planning Levels for Harmonic Voltage Distortion and The Connection of Non-Linear Equipment to Transmission Systems and Distribution Networks in The United Kingdom," ER G5/4.

Ferracci P. 2001. Power Quality. Imprimerie du Pont de Claix, Claix. (Schneider Electric Cahier Technique No. 199).

Hong S., Zheng C., Lei F. and Xing X. 2012. "Research on the Parallel Capacitor Series Reactance Rate Parameter Design," IEEE Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). pp. 1-4.

J.C. Das. 2015. Power System Harmonics and Passive Filter Designs. A John Wiley & Sons, Inc., Publication.

J. Verboomen, D. Van Hertem ; P. H. Schavemaker ; W. L. Kling and R. Belmans. 2005. "Phase shifting transformers: principles and applications," 2005 International Conference on Future Power Systems. pp. 1-6.

Math H.J. Bollen, Irene Yu-Hua Gu. 2006. Signal Processing of Power Quality Disturbances. A John Wiley $ Sons, Inc., Publication.

Pasist Suwanapingkarl. 2012. Power Quality Analysis of Future Power Network. The Doctor of Philosophy Thesis. (Electrical Power Engineering). Faculty of Engineering and Environment. University of Northumbia.

R. S. Vedam and M. S. Sarma. 2009. Power Quality VAr Compensation in Power System. Taylor & Francis Group, LLC.

Sakanran C. 2002. Power Quality. np., United State of America.

Schneider Electric Industries SAS. 2015. Guide for Design and Production of LV Power Factor Correction Cubicles. Schneider Electric Industries SAS, Rueil Malmaison.

Stefan Svensson. 1999. Power Measurement Techniques for Non-Sinusoidal Conditions. The Doctor of Philosophy Thesis. (Electrical Power Engineering). Faculty of Engineering. Chalmers University of Technology.

The International Electrotechnical Commission (IEC). 2002. "Compatibility Levels for Low Frequency Conducted Disturbances and Signaling in Public Low-voltage Power Supply Systems," IEC Std. 61000-2-2.

The International Electrotechnical Commission (IEC). 2002. "Compatibility Levels in Industrial Plant for Low-Frequency Conducted Disturbances," IEC Std. 61000-2-4.

The International Electrotechnical Commission (IEC). 1997. "Industrial A.C. Networks Affected by Harmonic Application of Filters and Shunt Capacitors," IEC Std. 61642.

The International Electrotechnical Commission (IEC). 1996. "Shunt Capacitors of The Self- Healing Type for A.C. Systems Having a Rated Voltage up to and Including1,000 V, Guide for Installation and Operation," IEC Std. 60831-1.

The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). 2014. "IEEE Recommended Practice and Requirement for Harmonic Control in Electrical Power Systems," IEEE Std. 519-2014 (Revision of IEEE Std. 519-1992).

The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). 2010. "IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions," IEEE Std. 1459-2010 (Revision of IEEE Std. 1459-2000).

The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). 2000. "IEEE Recommended Practice Monitoring Electric Power Quality," IEEE Std. 1159-2000 (Revision of IEEE Std. 1159-2009).

The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). 1992. "IEEE Recommended Practice and Requirement for Harmonic Control in Electrical Power Systems," IEEE Std. 519-1992 (Revision of IEEE Std. 519-1981).

Transnational College of LEX. 2012. Who is Fourier? A Mathematic Adventure. 2nd ed. np., United Kingdom.

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์
บทความวิชาการที่ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ

1. S. Chaladying, A. Charlangsut and N. Rugthaicharoencheep, "Harmonic Impact on Reactive Power Compensated Equipment in Power System," The 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET2015), Chonburi, Thailand, 27 – 29 March 2015

2. S. Chaladying, A. Charlangsut and N. Rugthaicharoencheep, " Parallel Resonance Impact on Power Factor Improvement in Power System with Harmonic Distortion," IEEE Region 10 Annual Conference (TENCON' 2015), Macau, China, 1 – 4 November 2015

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7
Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่ออุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าด้านกลับในระบบไฟฟ้ากำลัง

Harmonic Impact on Reactive Power Compensated Equipment in Power System

ศรัณฐ์ ฉลาดยิ่ง อรุณ ชลังสุทธิ์ และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร โทรศัพท์ 02-8363000 ต่อ 4150 E-mail: nattachotc.r@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่ออุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าด้านกลับในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยนำเสนอนิยามและที่มาของฮาร์มอนิกรวมไปถึงผลของการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าด้านกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้าที่มีความเพี้ยนฮาร์มอนิก ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์อันเนื่องมาจากการที่ค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุในอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าด้านกลับและค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำในหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าเท่ากันที่ความถี่ฮาร์มอนิก ทำให้เกิดการขยายตัวของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกส่งผลให้เกิดความเสียหายกับตัวเก็บประจุในอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าด้านกลับ โดยการหลีกเลี่ยงความเสียหายที่เกิดขึ้นสามารถทำได้โดยการติดตั้งรีแอกเตอร์อนุกรมเข้ากับตัวเก็บประจุเพื่อหลีกเลี่ยงปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่สร้างความเสียหายให้กับตัวเก็บประจุในอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าด้านกลับ และยังอาจส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าโดยรวมได้

คำสำคัญ : ความเพี้ยนฮาร์มอนิก, ปรากฏการณ์เรโซแนนซ์

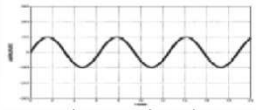
Abstract

This paper present harmonic impact on the reactive power compensated equipment in power system. The content consist of harmonic definition, origin of harmonic and effect of on the reactive power compensated equipment installation in power system with harmonic distortion that generated the resonance phenomenon. The resonance phenomenon is generated by matching impedance between capacitive reactance of capacitor and inductive reactance of inductor at harmonic frequency. It linked to amplify harmonic voltage and current and made damage on capacitors in the reactive power compensated equipment. The installed reactor on capacitor can be avoid the resonance phenomenon in power system with harmonic distortion.

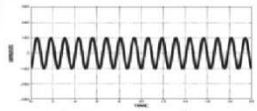
Keywords: Harmonic Distortion, Resonance in Power System

1. บทนำ

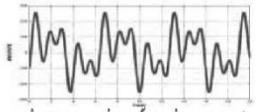
ฮาร์มอนิก เป็นปรากฏการณ์ทางด้านคุณภาพไฟฟ้ารูปแบบหนึ่งที่ถูกจัดอยู่ในปรากฏการณ์ทางด้านความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณ นิยามของฮาร์มอนิกส์ คือ สัญญาณของแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าที่มีค่าความถี่มากกว่าความถี่มูลฐานในระบบไฟฟ้าเป็นจำนวนทวีคูณ ซึ่งเมื่อรวมเข้ากับสัญญาณที่ความถี่มูลฐานจะทำให้รูปคลื่นสัญญาณที่ความถี่มูลฐานเกิดการผิดเพี้ยนไปจากเดิม โดยที่ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณจะขึ้นอยู่กับปริมาณของฮาร์มอนิกที่มีในระบบไฟฟ้ากำลัง รูปคลื่นสัญญาณที่ความถี่มูลฐาน ความถี่ฮาร์มอนิก และรูปคลื่นสัญญาณที่เกิดความผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากฮาร์มอนิก แสดงในรูปที่ 1



(ก) รูปคลื่นสัญญาณที่ความถี่มูลฐาน



(ข) รูปคลื่นสัญญาณที่ความถี่ฮาร์มอนิก



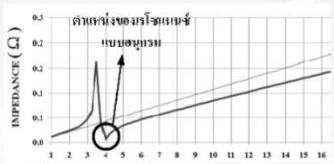
(ค) รูปคลื่นสัญญาณที่ผิดเพี้ยนเนื่องจากฮาร์มอนิก

รูปที่ 1 รูปคลื่นสัญญาณทางไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง คือ อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำงานในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นกล่าวคือ มีลักษณะระหว่างรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ไม่เป็นสัดส่วนซึ่งกันและกันยกตัวอย่างเช่น บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ สวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ เตาหลอมเหล็ก หรือ เครื่องเชื่อมไฟฟ้า เป็นต้น รูปคลื่นสัญญาณของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2

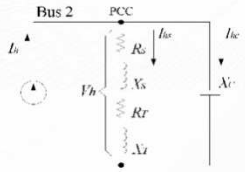
บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7
Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

3.1 เรโซแนนซ์แบบอนุกรม เมื่อเกิดปรากฏการณ์นี้อิมพีแดนซ์ในระบบขณะนั้นจะมีค่าต่ำสุด หากจุดที่เกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมตรงกันกับลำดับของฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบ กระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดจะถูกดึงเข้าสู่อุปกรณ์จนเกินพิกัดและเสียหายไปในที่สุด ลักษณะของอิมพีแดนซ์ในระบบขณะที่เกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม แสดงในรูปที่ 4



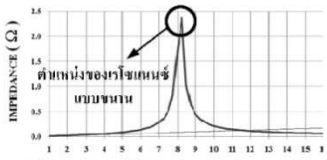
รูปที่ 4 อิมพีแดนซ์ที่เกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

3.2 เรโซแนนซ์แบบขนาน เมื่อเกิดปรากฏการณ์นี้อิมพีแดนซ์ในระบบขณะนั้นจะมีค่าสูงสุด เมื่อพิจารณากระแสฮาร์มอนิกที่ไหลออกจากอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นตามที่แสดงในรูปที่ 5 จะพบว่าเมื่อกระแสฮาร์มอนิกไหลมาเจอกับอิมพีแดนซ์ที่จุดเรโซแนนซ์ ก็จะทำให้เกิดการขยายตัวของแรงดันฮาร์มอนิกสูงมากที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้า



รูปที่ 5 วงจรสมมูลย์ของระบบที่เกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน

ซึ่งส่งผลให้เกิดการขยายตัวของกระแสฮาร์มอนิกในปริมาณที่สูงมาก จนทำให้อุปกรณ์ตัดตอนสั่งปลดอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าด้านกลับออก หรือในกรณีที่รุนแรงมากอาจจะทำให้ตัวเก็บประจุในอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าด้านกลับเกิดความเสียหายขึ้นในทันที ลักษณะของอิมพีแดนซ์ในระบบขณะที่เกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน แสดงในรูปที่ 6

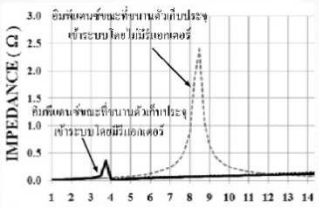


รูปที่ 6 อิมพีแดนซ์ที่เกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน

โดยทั่วไปแล้วปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง คือ ปรากฏการณ์เรโซแนนซ์แบบขนาน ซึ่งเกิดจากการขนานอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าด้านกลับเข้าสู่ระบบเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าด้านกลับหรือปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า หากไม่มีการป้องกันหรือหลีกเลี่ยงอาจส่งผลให้เกิดเหตุการณ์ร้ายแรงขึ้นต่อเสถียรภาพของระบบและ อุปกรณ์ที่ต่อร่วมอยู่ในระบบได้

4. การหลีกเลี่ยงการเกิดเรโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

การหลีกเลี่ยงการเกิดเรโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถทำได้โดยการต่อรีแอกเตอร์อนุกรมกับตัวเก็บประจุในอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าด้านกลับ ซึ่งจะทำให้ตำแหน่งของเรโซแนนซ์ถูกเลื่อนไปอยู่ในลำดับของฮาร์มอนิกที่ไม่มีนัยยะสำคัญ ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อตัวเก็บประจุในอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าด้านกลับ



รูปที่ 7 อิมพีแดนซ์เมื่อต่อรีแอกเตอร์อนุกรมกับตัวเก็บประจุ

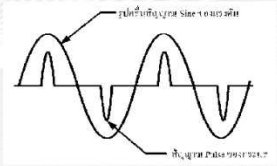
เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 7 ตำแหน่งของเรโซแนนซ์จะถูกเลื่อนไปอยู่ในฮาร์มอนิกลำดับที่ต่ำกว่าลำดับที่ 5 ที่มีนัยยะสำคัญ เนื่องจากตัวเก็บประจุในอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าด้านกลับมีการต่อวงจรภายในเป็นแบบสตาร์ ฮาร์มอนิกลำดับที่สามจึงไม่สามารถส่งผลกระทบต่อเก็บประจุได้ และระบบที่มีความสมดุลของรูปคลื่นระหว่างซีกบวกและลบจะไม่เกิดฮาร์มอนิกลำดับที่เป็นเลขคู่ขึ้น จึงไม่มีโอกาสที่จะเกิดการขยายแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดเรโซแนนซ์

ในขณะเดียวกันรีแอกเตอร์ก็จะสร้างจุดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมขึ้นมา ซึ่งจะช่วยกรองกระแสฮาร์มอนิกได้บางส่วนหากออกแบบได้เหมาะสมก็จะช่วยลดแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมของระบบได้

รูปที่ 8 ลักษณะของรีแอกเตอร์ที่ใช้ต่อร่วมกับตัวเก็บประจุ

รูปที่ 8 แสดงโครงสร้างของรีแอกเตอร์ชนิดดีจูนฟิลเตอร์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการหลีกเลี่ยงปรากฏการณ์โซแนนซ์แบบขนานที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่ตัวเก็บประจุในอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าด้านกลับสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 5-6

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7
Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)



รูปที่ 2 รูปคลื่นสัญญาณของอุปกรณ์ที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น

ลักษณะรูปคลื่นสัญญาณของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ไม่เป็นสัดส่วนกันนี้จะทำให้เกิดฮาร์มอนิกขึ้น ซึ่งอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการทำงานในลักษณะนี้จะเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง และกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนี้จะไหลย้อนกลับไปยังส่วนต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้า เช่น หม้อแปลง หรือ ตัวเก็บประจุ ทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ ทำให้อุปกรณ์ทำงานผิดพลาด เสื่อมสภาพก่อนเวลาอันควร และยังอาจส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบได้

2. ดัชนีชี้วัดฮาร์มอนิก

ดัชนีชี้วัดระดับความรุนแรงของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังประกอบด้วย ค่าที่แสดงระดับฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับ ค่าความเพี้ยนรวมของฮาร์มอนิกในทุกลำดับที่พิจารณาซึ่งประกอบด้วยกระแสและแรงดัน และค่าความเพี้ยนความต้องการรวม พิจารณาได้ตามสมการที่ 1-4

$$I_h(\%) = \frac{I_h}{I_1} x100 \quad (1)$$

$$THD_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} I_h^2}}{I_1} x100 \quad (2)$$

$$THD_v(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} x100 \quad (3)$$

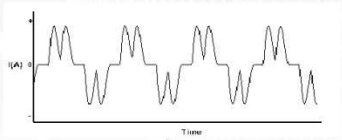
$$TDD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} I_h^2}}{I_L} x100 \quad (4)$$

สมการที่ 1 เป็นสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณของฮาร์มอนิกในลำดับที่กำลังพิจารณา ซึ่งลำดับของฮาร์มอนิก คือ จำนวนเท่าของความถี่ที่เป็นทวีคูณของความถี่มูลฐาน

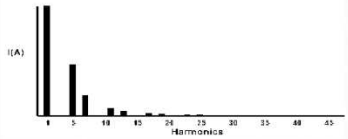
สมการที่ 2-3 เป็นสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ระดับความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสและแรงดันตามลำดับ โดยเป็นการรวมกันระว่างกระแสหรือแรงดันตั้งแต่ลำดับสองขึ้นไปที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้าที่ทำการพิจารณาตามกฎ Root-Sum-Square แล้วเทียบกับความถี่มูลฐาน

สมการที่ 4 เป็นสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์หาระดับความเพี้ยนความต้องการรวมของระบบ โดยพิจารณาจากกระแสฮาร์มอนิกตั้งแต่ลำดับสองขึ้นไป เทียบกระแสใช้งานทั้งหมดของระบบเพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ระดับความรุนแรงของฮาร์มอนิก ในกรณีที่อุปกรณ์มีความเพี้ยนของฮาร์มอนิกมากแต่กระแสใช้งานต่ำ

ระดับความรุนแรงของฮาร์มอนิกในระบบ สามารถแสดงให้อยู่ในรูปของ รูปคลื่นสัญญาณ และ สเปกตรัมของฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับตามที่แสดงในรูปที่ 3



(ก) รูปคลื่นสัญญาณ



(ข) สเปกตรัมของฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ

รูปที่ 3 รูปแบบในการแสดงระดับความรุนแรงของฮาร์มอนิก

จากรูปที่ 3 (ก) เป็นการแสดงระดับความรุนแรงของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยรูปคลื่นสัญญาณ ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของรูปคลื่นสัญญาณเทียบกับเวลา ความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณจะแปรผันตรงกับระดับความรุนแรงของฮาร์มอนิก ถ้าระดับความรุนแรงของฮาร์มอนิกในระบบมากรูปคลื่นก็จะมีความผิดเพี้ยนมาก รูปที่ 3 (ข) เป็นการแสดงระดับความรุนแรงของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังด้วยสเปกตรัมของฮาร์มอนิก ซึ่งจะแสดงปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับที่ทำการพิจารณา

โดยทั่วไปแล้วลำดับของฮาร์มอนิกที่ส่งผลกระทบต่อระบบมากที่สุดคือลำดับที่อยู่ใกล้กับความถี่มูลฐานเนื่องจากฮาร์มอนิกลำดับที่อยู่ใกล้ความถี่มูลฐานจะมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับฮาร์มอนิกในลำดับสูง แต่อย่างไรก็ดีฮาร์มอนิกในลำดับสูงก็อาจส่งผลกระทบในรูปของการรบกวนการทำงานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้

3. ปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

เรโซแนนซ์เป็นปรากฏการณ์ที่ค่ารีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์เหนี่ยวนำและอุปกรณ์เก็บประจุในระบบไฟฟ้ามีค่าเท่ากัน ทำให้เกิดการหักล้างกันของค่ารีแอกแตนซ์เหลือเพียงค่าความต้านทาน ซึ่งปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้ามีอยู่ 2 รูปแบบด้วยกันคือ

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7
Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

$$I_{ch} = I_h\left[\frac{R_{ST}+jhX_{ST}}{R_{ST}+jhX_{ST}-j\frac{X_C}{h})}\right] \quad (5)$$

$$I_{ch} = I_h\left[\frac{R_{ST}+jhX_{ST}}{R_{ST}+R_L+jh(X_{ST}+X_L)-j\frac{X_C}{h})}\right] \quad (6)$$

จากสมการที่ 5-6 กำหนดให้

I_{ch} = กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ
I_h = กระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก
R_{ST} = ค่าความต้านทานของระบบและหม้อแปลง
R_L = ค่าความต้านทานของรีแอกเตอร์
jX_{ST} = ค่ารีแอกแตนซ์ของระบบและหม้อแปลง
jX_L = ค่ารีแอกแตนซ์ของรีแอกเตอร์
jX_C = ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ

สมการที่ 5 ใช้ในการพิจารณากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในขณะที่ยังไม่มีการติดตั้งรีแอกเตอร์อนุกรมกับตัวเก็บประจุ และสมการที่ 6 ใช้ในการพิจารณากระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุที่ติดตั้งรีแอกเตอร์ ซึ่งจากสมการที่ 6 จะพบว่าเมื่อพิจารณาค่าความต้านทานของรีแอกตอร์ที่ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ จะทำให้อิมพีแดนซ์รวมมีค่าลดลงส่งผลให้อัตราการขยายกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่ตัวเก็บประจุมีค่าลดลงเช่นกัน

5. สรุป

การขนานตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังจะช่วยชดเชยกำลังไฟฟ้าด้านกลับให้กับระบบ ซึ่งส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้ากำลังดีขึ้น และยังช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียทำให้ระบบรองรับโหลดได้เพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันหากในระบบไฟฟ้ากำลังมีความเพี้ยนฮาร์มอนิกอยู่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์แบบขนานขึ้น ผลที่ตามคือการขยายตัวของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิก ทำให้อุปกรณ์ในระบบเกิดความเสียหายและยังอาจส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าโดยรวม แนวทางในการหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวคือการติดตั้งรีแอกเตอร์อนุกรมกับตัวเก็บประจุในอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าด้านกลับ แต่อย่างไรก็ดีรีแอกเตอร์ที่ใช้กับตัวเก็บประจุจะถูกออกแบบให้กรองกระแสฮาร์มอนิกได้เพียงบางส่วนเท่านั้น กระแสฮาร์มอนิกในส่วนที่เหลือจะยังคงมีอยู่ในระบบ ในกรณีที่กระแสฮาร์มอนิกในระบบมีปริมาณมากกระแสฮาร์มอนิกเหล่านี้จะถูกผลักไปยังหม้อแปลงไฟฟ้า เพราะฉะนั้นถ้าฮาร์มอนิกในระบบมีปริมาณมากควรมีการติดตั้งอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่หลักในการกรองกระแสฮาร์มอนิกให้กับระบบไฟฟ้า เช่น พาสซีฟฟิลเตอร์ หรือ แอคทีฟฟิลเตอร์ เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนและความช่วยเหลือในการจัดทำบทความนี้ซึ่งได้ช่วยให้บทความนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

7. เอกสารอ้างอิง

[1] S. Hong, C. Zheng, F. Lei and X. Xing, "Research on the Parallel Capacitor Series Reactance Rate Parameter Design," IEEE Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), March 2012.

[2] C. Boonseng, C. Chompoo-inwai, V. Kinnares, K. Nakawiwat and P. Apiratikul, "Failure Analysis of Dielectric of Low Voltage Power Capacitors Due to Related Harmonic Resonance Effects," IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 3, February 2012.

[3] Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, Electrical Power System Quality, Third Edition, January 2012.

[4] Ph. Ferracci, "Power Quality," Schneider Electric Cahier Technique, no.199, October 2001.

[5] C. Collombet, J. M. Lupin. J. Schonek, "Harmonic Disturbances in Network, and Their Treatment," Schneider Electric Collection Technique, no.152, January 2000.

ศรัณฐ์ ฉลาดยิ่ง สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครปัจจุบันกำลังศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร งานวิจัยที่สนใจ การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง คุณภาพกำลังไฟฟ้า

อรุณ ชลังสุทธิ์ ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครงานวิจัยที่สนใจ การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง คุณภาพกำลังไฟฟ้า

นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร งานวิจัยที่สนใจการวิเคราะห์และวางแผนระบบไฟฟ้ากำลัง ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลัง

Parallel Resonance Impact on Power Factor Improvement in Power System with Harmonic Distortion

Saran Chaladying
Department of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering
Rajamangala University of Technology
Phra Nakhon
Bangkok, Thailand
chaladying.s@gmail.com

Aroon Charlangsut
Department of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering
Rajamangala University of Technology
Phra Nakhon
Bangkok, Thailand
aroon.c@rmutp.ac.th

Nattachote Rugthaichareoncheep
Department of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering
Rajamangala University of Technology
Phra Nakhon
Bangkok, Thailand
nattachote.r@rmutp.ac.th

***Abstract*—This paper mentions parallel resonance impact on power factor improvement in power system with harmonic distortion and correction. This paper illustrates effect of parallel resonance phenomenon to harmonic voltage and harmonic current amplification in power system by illustrated a case study for power factor improvement in power system with harmonic distortion and a case study for correction of harmonic voltage and harmonic current amplification when corrected power factor of power system with harmonic distortion. A power system model is established with MATLAB/Simulink. A non-liner load, which is a harmonic current source, is a direct current variable speed drive (DC drive). This paper mentions a direct current variable speed drive (DC drive) because it is the most type of motor speed control and it has a low power factor, resulting in a need for power factor correction. The mitigation of harmonic voltage and harmonic current amplification on capacitors when parallel resonance generated in power system is connection of series reactors (the detuned filter) to capacitors in a power factor correction device because this solution is cheaper and easier than other solutions.**

Keywords— Parallel Resonance, Harmonic Distortion

I. INTRODUCTION

In the currently, The variable speed drive (VSD), the variable frequency drive (VFD) or the variable voltage and variable frequency drive (VVFD) can be a significant percentage of plant in many industrial facilities. They commonly used in the rubber, paper, plastic, oil, chemical and metal industries, etc. There are many industrial facilities used the variable speed drive (VSD) for decreased their power energy using. The variable speed drive can be classified as per type of the electricity such as alternating current and direct current. This paper will be mentioned to the direct current variable speed drive (DC drive) because these drives are still the most type of motor speed control for applications requiring very fine control over wide ranges with high torque and the important reason, DC drive is required power factor correction because phasing back of SCRs result in relatively poor power factor, especially when the motor is at reduced speeds [1]. As the above reason, consideration for the harmonic effect form DC drive operation and power factor correction of DC drive can be illustrated parallel resonance phenomenon impact on power factor improvement in power system with harmonic distortion. An example voltage and current waveform of a DC drive load as shown in Fig.1.

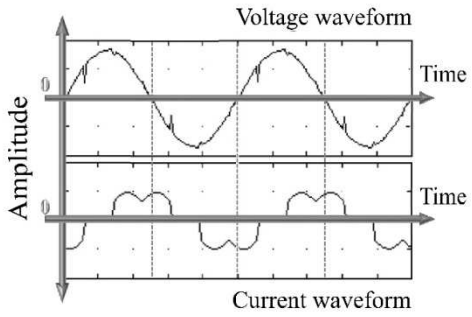


Fig. 1. An example voltage and current waveform of a DC drive

As shown in Fig.1, a current waveform is lagging from a voltage waveform, therefore power factor correction is important requirement of a DC drive but a current waveform in Fig.1 is distorted from the sinusoidal power factor correction by used capacitors may be linked to generate parallel resonance phenomenon in power system. Parallel resonance is a phenomenon of matching impedance between capacitive reactance of capacitors and inductive reactance of a transformer at harmonic frequency. While parallel resonance is generated in power system, there is high harmonic voltage amplification on a point of common coupling (PCC) and high harmonic current amplification on capacitors. High harmonic voltage amplification in a point of common coupling (PCC) is linked to harmonic current amplification on other loads in power system and affect to reliability of power system. High harmonic current on capacitor can be reduced the life time of

978-1-4799-8641-5/15/$31.00 ©2015 IEEE

capacitors and linked to partial discharge and flash over on capacitors [3]. Parallel resonance phenomenon in power system with harmonic distortion can be considered in a diagram as shown in Fig.2.

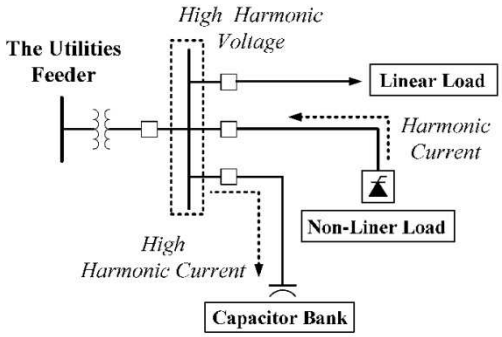


Fig. 2. Parallel resonance phenomenon in power system

II. PARALLEL RESONANCE CORRECTION

Parallel resonance phenomenon in power system as shown in Fig.2 can be corrected by connection of series reactors with capacitors that used to improved power factor in power system and series reactors can be partially filtered harmonic current from a harmonic current source in power system, if series reactors are correctly designed [2]. Solution of parallel resonance phenomenon in power system correction can be considered in a diagram as shown in Fig.3.

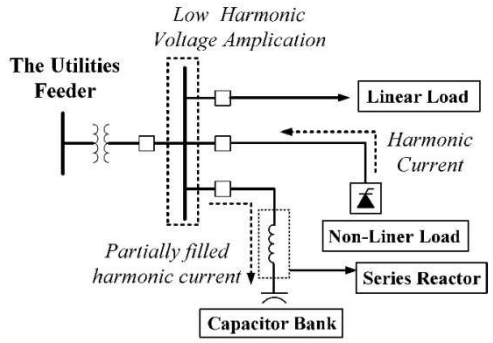


Fig. 3. Solution of Parallel resonance phenomenon in power system

Series reactors will be moved a point of maximum impedance amplification of power system from the significant harmonic order to the non-significant harmonic order. This phenomenon is decreased the risk of Harmonic voltage amplification on point of common coupling (PCC) and decreased harmonic current amplification on capacitors. The characteristic of impedance in power system can be considered as shown in Fig.4.

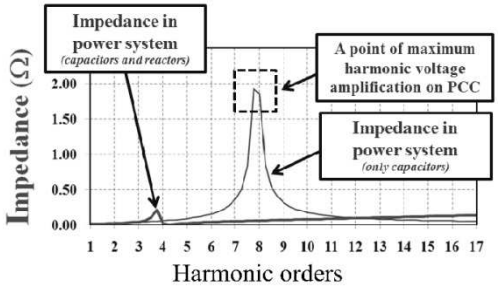


Fig. 4. Impedance of power system

The various harmonic voltage and harmonic current parameters can be calculated by the equations as follow

An equation for calculation of harmonic current in each order.

$$I_h(\%) = \frac{I_h}{I_1} x100 \quad (1)$$

An equation for calculation of total harmonic current distortion (THDi).

$$THD_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_1} x100 \quad (2)$$

An equation for calculation of total harmonic voltage distortion (THDv).

$$THD_v(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} x100 \quad (3)$$

An equation for calculation of harmonic current amplification on a capacitor (without a series reactor).

$$I_{ch} = I_h \left[\frac{R_{ST} + jhX_{ST}}{R_{ST} + jhX_{ST} - j\left(\frac{X_C}{h}\right)} \right] \quad (4)$$

An equation for calculation of harmonic current amplification on a capacitor (with a series reactor).

$$I_{ch} = I_h \left[\frac{R_{ST} + jhX_{ST}}{R_{ST} + R_L + jh(X_{ST} + X_L) - j\frac{X_C}{h}} \right] \quad (5)$$

III. CASE STUDY

A power system model for analysis of parallel resonance phenomenon impact on power system with harmonic distortion can be considered in a figure and a diagram as shown in Fig.5 and Fig.6.

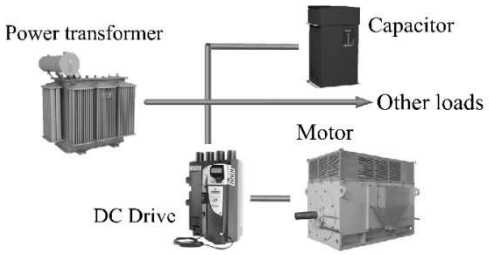


Fig. 5. A power system model for a case study

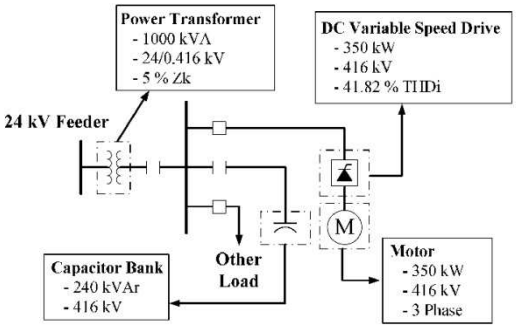


Fig. 6. A diagram of the power system for a case study

A power system model consist of A power transformer of 1000 kVA, 24 kV primary voltage, 416 V secondary voltage, 5% impedance short circuit, frequency of 50 Hz, A direct current variable speed drive (DC drive) of 350 kW (470 HP), 416 voltage, frequency of 50 Hz and A power factor correction device (capacitor bank) of 240 kVAr, 416 V.

From a power system model in Fig5 and Fig. 6, parallel resonance impact on power system with harmonic distortion for this power system model can be calculated and analyzed with eq.1, eq.2, eq.3 and eq.4. The results of calculation and analysis for this power system model can be considered in table 1, Fig.7 and Fig.8.

TABLE I. THE RESULT OF POWER SYSTEM MODEL (WITHOUT SERIES REACTORS)

Order	Harmonic current of DC drive	Harmonic current amplification on capacitors (%)
3	0.00	0.00
5	32.86	13.64
7	20.37	47.63
9	0.00	0.00
11	13.35	16.52
13	12.17	11.64
15	0.00	0.00

This table illustrates harmonic current of each order for a direct current variable speed drive (DC drive) in the second column of the table and harmonic current amplification of each order on capacitors in the third column of the table.

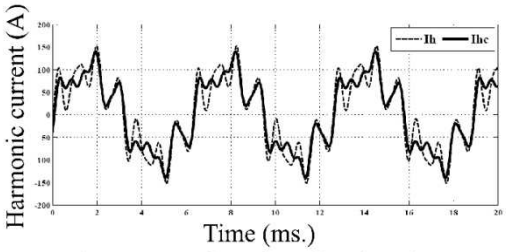


Fig. 7. Current waveforms of a DC drive and capacitors

This a figure illustrates current waveforms of a direct current variable speed drive (DC drive) and capacitors. Both of current waveforms distort from sinusoidal because of harmonic voltage and current amplification with parallel resonance phenomenon in power system.

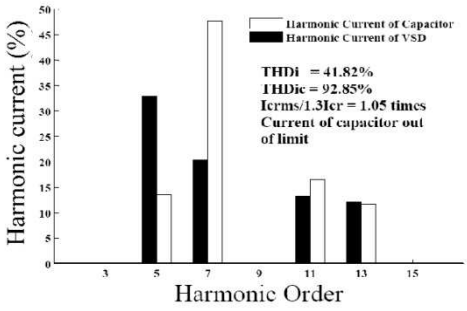


Fig. 8. Spectrums of harmonic current for a DC drive and capacitors

This figure illustrates spectrums of harmonic current of each order for a direct current variable speed drive in black bar graphs and harmonic current amplification of each order on capacitors in white bar graphs. In a white bar graph of the seventh harmonic order, there is maximum amplification of harmonic current on capacitors because a point of maximum

impedance amplification in power system is on the seventh harmonic order. As the results of calculation and analysis, power factor improvement in power system with harmonic distortion is linked to generate parallel resonance phenomenon in power system. This phenomenon linked to amplify harmonic current on capacitors that can be reduced life time of capacitors and linked to partial discharge and flash over on capacitors.

Parallel resonance phenomenon in the power system model can be eliminated by connected series reactors to capacitors. Series reactors can be designed conforming to IEC 61642 the standard of Industrial a.c. networks affected by harmonics - Application of filters and shunt capacitors. This standard classifies two types of the harmonic filter. The detuned filter is a filter with a tuning frequency more than 10% below the lowest harmonic frequency with considerable current/voltage amplitude [5]. The tuned filter is a filter with a tuning with differs by no more than 10% from the frequency with is to be filtered [5]. Series reactors in this case study used the detuned filters with reactance of 7%. A power system model for solution of parallel resonance phenomenon in power system can be considered in a figure and a diagram as shown in Fig.7 and Fig.8.

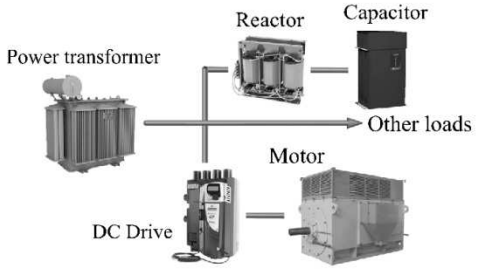


Fig. 9. The power system for solution of a case study

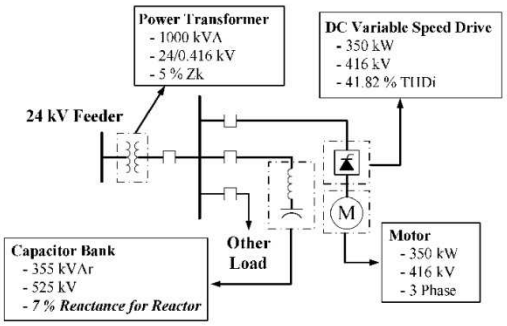


Fig. 10. A diagram of the power system for solution of a case study

From a power system model in Fig.10, the solution of parallel resonance impact on power system with harmonic distortion for this power system model can be calculated and analyzed with eq.1, eq.2, eq.3 and eq.5. The results of calculation and analysis for this power system model can be considered in table 2, Fig.11 and Fig.12.

TABLE II. THE RESULT OF POWER SYSTEM MODEL (WITH SERIES REACTORS)

Order	Harmonic current of DC drive	Harmonic current amplification on capacitors (%)
3	0.00	0.00
5	32.86	7.36
7	20.37	2.71
9	0.00	0.00
11	13.35	1.75
13	12.17	1.55
15	0.00	0.00

This table illustrates harmonic current of each order for a direct current variable speed drive (DC drive) in the second column of the table and harmonic current amplification of each order on capacitors with series reactors in the third column of the table

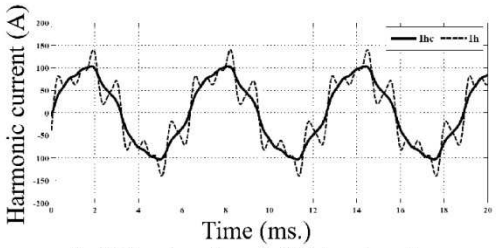


Fig. 11. Current waveforms of a DC drive and capacitors

This a figure illustrates current waveforms of a direct current variable speed drive (DC drive) and capacitors. The current waveform of a DC drive distorts from sinusoidal as same as the former result as shown in Fig.7 because a DC drive in the power system is a non-linear loads but a current waveform of capacitors are the same as sinusoidal.

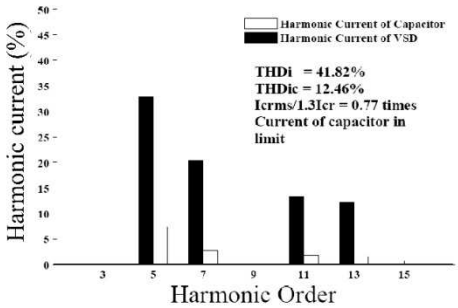


Fig. 12. Level of harmonic current that flow to the capacitors

This figure illustrates spectrums of harmonic current of each order for a direct current variable speed drive in black bar graphs and harmonic current amplification of each order on capacitors in white bar graphs. Harmonic current amplification on capacitors is decreasing more than the former result.

IV. Conclusion

A direct current variable speed drive (DC drive) are the most type of motor speed control for applications requiring very fine control over wide ranges with high torque but phasing back of SCRs in a direct current variable speed drive (DC drive) result in relatively poor power factor, resulting in a need for power factor correction.

However, power factor improvement in power system that contains a direct current variable speed drive (DC drive) may has a problem about power quality in power system because of parallel resonance phenomenon. Parallel resonance phenomenon can be influenced harmonic voltage amplification on a point of common coupling (PCC) and harmonic current amplification on capacitors. Harmonic voltage and harmonic current amplification can be affected to power system reliability and linked to amplify harmonic current on loads in power system, especially capacitors in power factor correction device. High harmonic current can be reduced the life time of capacitors and linked to partial discharge and flash over on capacitors.

Harmonic voltage and harmonic current amplification on capacitors can be eliminated by connected series reactors to capacitors. This paper presents series reactors that are designed to the detuned filter for mitigation of harmonic current amplification on capacitors because this solution is cheaper and easier than other solutions. As the result in case study, series reactors (the detuned filter) can be decreased harmonic current amplification on capacitors and a current waveform of capacitors are the same as sinusoidal, especially the operated current of capacitor (Irms), it has value not exceed 1.3 times of the maximum rated current of capacitor (Icr). However, Series reactors (the detuned filter) are only partially filtered harmonic current in power system, if there are high harmonic current of non-linear loads in power system. The other harmonic filter such as the tuned filter or the active filter must be installed in power system to filter harmonic current in power system.

Acknowlwdgment

The authors would like to express his gratitude to Rajamangala University of Technology Phra Nakhon for the support.

References

[1] Electrotek Concepts, Inc, "Power Factor Correction and Harmonic Control for DC drive loads," PQ Soft Case Study, PQS0410, December 2004.

[2] S. Hong, C. Zheng, F. Lei and X. Xing, "Research on the Parallel Capacitor Series Reactance Rate Parameter Design," IEEE Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), March 2012.

[3] C. Boonseng, C. Chompoo-inwai, V. Kinnares, K. Nakawiwat and P. Apiratikul, "Failure Analysis of Dielectric of Low Voltage Power Capacitors Due to Related Harmonic Resonance Effects," IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 3, February 2012.

[4] IEC 60831-1, "Shunt power capacitors of the self-healing type for a.c. systems having a rated voltage up to and including 1000 V," International Standard, International Electrotechnical Commission, Second Edition, November 1996.

[5] IEC 61642, "Industrial A.C. Networks Affected by Harmonic Application of Filters and Shunt Capacitors," International Standard, International Electrotechnical Commission, October 1997.

[6] Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, "Electrical Power System Quality," Second Edition, January 2012.

[7] Ph. Ferracci, "Power Quality," Schneider Electric Cahier Technique, no.199, October 2001.

Biographies

Saran Chaladying received B. Eng. Degree in Electrical Engineering from Rajamangala University of Technology Phra Nakhon (RMUTP), Bangkok, Thailand. He is currently studying the M.Eng. Degree in Electrical Engineering at Rajamangala University of Technology Phra Nakhon (RMUTP), Bangkok, Thailand. His researches interested in Renewable Energy, Power Quality (PQ) and Smart Grid System.

Aroon Charlangsut received B.ind.Tech Degree in Electrical Industrial Technology from King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Bangkok, Thailand, where he succeeded in getting the M.S.Ind.Ed. in Vocational and Technical Education Management at King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Bangkok, Thailand, His researches interested in Power System Analysis and Power Quality (PQ).

Nattachote Rugthaichareoncheep received B. Eng. Degree in Electrical Engineering from Rajamangala University of Technology Phra Nakhon (RMUTP), Bangkok, Thailand, where he succeeded in getting the M.Eng. Degree in Electrical Engineering at Thammasart University, Bangkok, Thailand, and Ph.D Degree in Electrical Engineering at King Mongkut's University of Technology North Bangkok (KMUTNB), Bangkok, Thailand. His researches interested in Power System Analysis, Power System Reliability and Power Quality (PQ).

คณะผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

การศึกษา

ปร.ด. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
วศ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
คอ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์

งานวิจัยที่สนใจ

การวางแผนและปฏิบัติการในระบบไฟฟ้ากำลัง ผลกระทบของการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายในระบบจำหน่ายไฟฟ้า และเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุด

ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพ

ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับสามัญวิศวกร สาขาไฟฟ้า งานไฟฟ้ากำลัง
ใบอนุญาตผู้ตรวจสอบอาคาร

สมาชิกสมาคมวิชาชีพ

- สมาคมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า (แห่งประเทศไทย)
- สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) สามัญสมาชิก ตลอดชีพ
- Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology Association of Thailand (ECTI Thailand)
- Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)
- The Institution of Engineering and Technology (IET)
- International Association of Computer Science and Information Technology (IACSIT)

คณะผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรุณ ชลังสุทธิ์
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
E-mail: aroon.c@rmutp.ac.th

การศึกษา

ค.อ.ม.(บริหารอาชีวะและเทคนิคศึกษา) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อส.บ.(เทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

งานวิจัยที่สนใจ

ระบบไฟฟ้ากำลัง และการต่อลงดินของระบบไฟฟ้า

ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพ

ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับภาคีวิศวกร สาขาไฟฟ้า งานไฟฟ้ากำลัง

สมาชิกสมาคมวิชาชีพ

- สมาคมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า (แห่งประเทศไทย)