

การศึกษาการติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม  
ที่มีระดับกระแสฮาร์มอนิกน้อย

STUDY ON THE INSTALLATION OF HARMONIC FILTERS FOR  
INDUSTRIAL PLANTS WITH A LOW LEVEL OF HARMONIC CURRENTS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ (หลักสูตรสหวิทยาการ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2566

KMITL-2023-EN-M-027-027

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON THE INSTALLATION OF HARMONIC FILTERS FOR  
INDUSTRIAL PLANTS WITH A LOW LEVEL OF HARMONIC CURRENTS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING PROGRAM  
IN ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2023

KMITL-2023-EN-M-027-027

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2023**

**SCHOOL OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่มีระดับกระแสฮาร์มอนิกน้อย
นักศึกษา	นายภูมิภัทร กิจนำลาภเจริญ
รหัสนักศึกษา	63601087
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ (หลักสูตรสหวิทยาการ)
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.จรงค์ บัญเส็ง

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอและแนะนำให้ระงับและป้องกันผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีขนาดเล็กน้อยที่ถูกสร้างโดยภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้น เช่น ไดรฟ์ไฟฟ้ากระแสสลับขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้า ระบบพลังงานหมุนเวียน เป็นต้น อย่างไรก็ตามฮาร์มอนิกสามารถสร้างสภาวะเรโซแนนซ์และมีพลังทำลายล้างสูงได้ ฮาร์มอนิกที่วัดได้ในปัจจุบันไม่สามารถทำนายปรากฏการณ์หรือตีความสิ่งที่เกิดขึ้นในระบบได้ ส่งผลให้การออกแบบวงจรเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังและชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนไม่เป็นไปตามข้อกำหนด จากการออกแบบและที่ติดตั้งอยู่เดิมมีความไม่เหมาะสม ส่งผลให้เกิดการระเบิดของตัวเก็บประจุและความเสียหายของอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อระบบไฟฟ้า ได้ทำการศึกษาผลการออกแบบและติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิกที่ไม่เหมาะสมกับปัญหาที่เกิดขึ้นร่วมกับโรงงานอุตสาหกรรม โรงงานทุกแห่งมีฮาร์มอนิกเล็กน้อยที่เกิดจากภาระทางไฟฟ้าไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากนี้ยังมีรายงานการระเบิดของตัวเก็บประจุทำให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรง วิธีการตรวจสอบทั้งระบบและการออกแบบระบบแก้ไขตัวประกอบกำลังโดยใช้วงจรกรองฮาร์มอนิกและผลการออกแบบใหม่สาธิตวิธีการระงับปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ด้วยวิธีที่เรียบง่ายโดยการเลือกวงจรกรองแบบพาสซีฟประเภทจูน

<b>Thesis</b>	Study on the installation of harmonic filters for industrial plants with a low level of harmonic currents
<b>Student</b>	Mr. Poomipat Gitnumlapcharoen
<b>Student ID.</b>	63601087
<b>Degree</b>	MASTER OF ENGINEERING
<b>Program</b>	ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING
<b>Year</b>	2023
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Chongrag Boonseng

## ABSTRACT

This thesis presents and recommends suppressing and preventing the effects of low harmonics generated by non-linear electrical loads such as small AC drives relative to the size of power transformers, renewable energy systems, ETC. However, harmonics can create resonant and destructive conditions. Presently measured harmonics cannot predict phenomena or interpret what is happening in the system. As a result, the design of the circuit to improve the power factor and compensate for the virtual power does not meet the requirements. The design and the original installation are not suitable. This results in capacitor explosion and other electrical equipment damage, which directly affects the power system. Has studied the design and installation of harmonic filter circuits that are not suitable for problems that occur with industrial plants. All plants have few harmonics caused by non-linear electrical loads. There are also reports of capacitor explosions causing severe damage. The whole system verification method and design of the power factor correction system using a harmonic filter circuit and the new design results demonstrate how to suppress resonant harmonic problems simply by selecting a tuning-type passive filter.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จผลได้ต้องขอกราบขอบพระคุณคำปรึกษาจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์จรงค์ บัญเส็ง ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คอยให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ ให้ข้อคิดและความคิดเห็นทางวิชาการอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง และความร่วมมือจากบุคคลหลายฝ่าย

ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่สละเวลาอันมีค่าเป็นอย่างยิ่งที่รับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ กรุณาให้ความรู้และข้อชี้แนะเพิ่มเติมอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ผู้วิจัยขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและเพื่อนๆ ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่คอยช่วยเหลือให้คำปรึกษา ชี้แนะข้อบกพร่องต่าง ๆ รวมทั้งเป็นกำลังใจให้กับผู้ทำวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้า ผู้ที่ให้การสนับสนุนในทุกเรื่องและคอยเป็นกำลังใจให้เสมอมา ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ภูมิภัทร กิจนาลากเจริญ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ .....	I
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	XI
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XVI
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย .....	3
1.5 โครงสร้างวิทยานิพนธ์ .....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
1.7 บทสรุป.....	5
บทที่ 2 ฮาร์มอนิกและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง .....	6
2.1 คุณภาพไฟฟ้า.....	6
2.2 ฮาร์มอนิก.....	6
2.3 ประเภทของฮาร์มอนิก .....	8
2.3.1 แรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิก (Voltage harmonics) .....	8
2.3.2 กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิก (Current harmonics) .....	9
2.4 จุดเชื่อมต่อทั่วไป .....	10
2.4.1 ฮาร์มอนิกทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้า.....	12
2.4.2 ฮาร์มอนิกทางด้านภาระทางไฟฟ้า.....	12
2.5 การประเมินฮาร์มอนิกภายในระบบไฟฟ้า.....	13
2.5.1 ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกทั้งหมด (Total Harmonic Distortion, THD).....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
IV  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2 ค่าความผิดเพี้ยนรวม (Total demand Distortion, TDD).....	15
2.5.3 พิกัดความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกทั้งหมด (Total Rated Harmonic Distortion, TRD).....	16
2.6 เรโซแนนซ์ (Resonance).....	16
2.6.1 เรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series resonance).....	17
2.6.2 เรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel resonance).....	19
2.6.3 วิธีป้องกันการเกิดเรโซแนนซ์ภายในระบบ.....	21
2.7 มาตรฐาน IEEE 519-2014 [5].....	22
2.7.1 ขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้าฮาร์โมนิกที่แนะนำ.....	23
2.7.2 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบปกติในช่วง 120 V ถึง 69 kV.....	23
2.8 บทสรุป.....	25
บทที่ 3 วงจรกรองดีจูนและวงจรกรองจูน.....	26
3.1 วงจรกรองแบบพาสซีฟประเภทดีจูน (Detuned filter).....	27
3.1.1 องค์ประกอบพื้นฐาน.....	27
3.1.2 หลักการทำงาน.....	29
3.1.3 การออกแบบเบื้องต้น.....	29
3.2 วงจรกรองแบบพาสซีฟประเภทจูน (Tuned filter).....	31
3.2.1 หลักการทำงาน.....	32
3.2.2 การออกแบบเบื้องต้น.....	33
3.3 บทสรุป.....	38
บทที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินงานและการออกแบบ.....	39
4.1 ปัญหาที่พบ.....	39
4.1.1 ความเสียหายที่เกิดจากความผิดเพี้ยนสูง (High distortion).....	39
4.1.2 ความเสียหายที่เกิดจากความผิดเพี้ยนต่ำ (Low distortion).....	41
4.2 ตัวอย่างข้อมูลจากการสำรวจโรงงานอุตสาหกรรม.....	42
4.2.1 ตัวอย่างโรงงานที่ 1.....	43

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2 ตัวอย่างโรงงานที่ 2.....	47
4.2.3 ตัวอย่างโรงงานที่ 3.....	48
4.3 การออกแบบวงจรกรองที่ใช้ในการแก้ไขปัญหา .....	50
4.3.1 การวิเคราะห์สำหรับการแก้ปัญหาในโรงงานที่ 4.....	50
4.3.2 การวิเคราะห์สำหรับการแก้ปัญหาในโรงงานที่ 5.....	54
4.3.3 การวิเคราะห์สำหรับการแก้ปัญหาในโรงงานที่ 6.....	57
4.4 บทสรุป.....	63
บทที่ 5 ผลการทดลอง .....	64
5.1 ผลการสำรวจและการทดลองก่อนและหลังการติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟ ณ โรงงานที่ 4.....	64
5.1.1 บริเวณหม้อแปลงไฟฟ้าของศูนย์กลางการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าที่ 1 .....	64
5.1.2 บริเวณหม้อแปลงไฟฟ้าของศูนย์กลางการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าที่ 2 .....	76
5.2 ผลการสำรวจและการทดลองก่อนและหลังการติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟ ณ โรงงานที่ 5.....	89
5.2.1 บริเวณตู้ควบคุมไฟฟ้าหลักที่ 1.....	89
5.3 ผลการสำรวจและการทดลองก่อนและหลังการติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟ ณ โรงงานที่ 6.....	100
5.3.1 บริเวณตู้ควบคุมไฟฟ้าหลักที่ 1.....	100
5.3.2 บริเวณตู้ควบคุมไฟฟ้าหลักที่ 2.....	110
5.4 บทสรุป.....	120
บทที่ 6 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลอง .....	121
6.1 กรณีของตัวอย่างโรงงานที่ 1, 2 และ 3 .....	121
6.2 กรณีของศูนย์กลางการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าที่ 1 และ 2 ของโรงงานที่ 4.....	121
6.2.1 บริเวณศูนย์กลางการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าที่ 1 (MCC1).....	122
6.2.2 บริเวณศูนย์กลางการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าที่ 2 (MCC2).....	123

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
VI

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.3 กรณีของตู้ควบคุมไฟฟ้าหลักที่ 1 ของโรงงานที่ 5 .....	124
6.4 กรณีของตู้ควบคุมไฟฟ้าหลักที่ 1 และ 2 ของโรงงานที่ 6 .....	125
6.4.1 บริเวณตู้ควบคุมไฟฟ้าหลักที่ 1 (MDB1).....	125
6.4.2 บริเวณตู้ควบคุมไฟฟ้าหลักที่ 2 (MDB2).....	129
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	132
7.1 สรุปผลการทดลอง.....	132
7.1.1 ด้านวิศวกรรม .....	132
7.1.2 ด้านเศรษฐศาสตร์.....	133
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	135
เอกสารอ้างอิง .....	136
ภาคผนวก ก.....	138
ภาคผนวก ข.....	148
ประวัติผู้เขียน.....	157

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1	ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า ..... 23
ตารางที่ 2.2	ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบในช่วง 120 V ถึง 69 kV..... 24
ตารางที่ 4.1	ข้อมูลระบบไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 1 ภายในตัวอย่างโรงงานที่ 1 ..... 43
ตารางที่ 4.2	ข้อมูลระบบไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 2 ภายในตัวอย่างโรงงานที่ 1 ..... 44
ตารางที่ 4.3	ข้อมูลระบบไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 3 ภายในตัวอย่างโรงงานที่ 1 ..... 46
ตารางที่ 4.4	ข้อมูลค่าของตัวแปรทางไฟฟ้าภายในตัวอย่างโรงงานที่ 2..... 47
ตารางที่ 4.5	ข้อมูลค่าของตัวแปรทางไฟฟ้าภายในตัวอย่างโรงงานที่ 3..... 49
ตารางที่ 5.1	ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4 ..... 65
ตารางที่ 5.2	ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบก่อนติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4..... 66
ตารางที่ 5.3	ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบก่อนติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4..... 67
ตารางที่ 5.4	ผลการสำรวจขณะติดตั้งตัวเก็บประจุ..... 69
ตารางที่ 5.5	ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบขณะติดตั้งตัวเก็บประจุ..... 70
ตารางที่ 5.6	ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบขณะติดตั้งตัวเก็บประจุ..... 70
ตารางที่ 5.7	ผลการทดลองหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4..... 71
ตารางที่ 5.8	ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4..... 73
ตารางที่ 5.9	ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4..... 74
ตารางที่ 5.10	ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4..... 77
ตารางที่ 5.11	ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบก่อนติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟ ที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4 ..... 78
ตารางที่ 5.12	ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบก่อนติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟ ที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4 ..... 80
ตารางที่ 5.13	ผลการทดลองหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4 ..... 84

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 5.14 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟ ที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4 .....	85
ตารางที่ 5.15 ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟ ที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4 .....	87
ตารางที่ 5.16 ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5 .....	90
ตารางที่ 5.17 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบก่อนติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟ ที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5 .....	92
ตารางที่ 5.18 ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบก่อนติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟ ที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5 .....	93
ตารางที่ 5.19 ผลการทดลองหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5 .....	95
ตารางที่ 5.20 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟ ที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5 .....	96
ตารางที่ 5.21 ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟ ที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5 .....	98
ตารางที่ 5.22 ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6 .....	101
ตารางที่ 5.23 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบก่อนติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟ ที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6 .....	102
ตารางที่ 5.24 ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบก่อนติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟ ที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6 .....	104
ตารางที่ 5.25 ผลการสำรวจหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6 .....	106
ตารางที่ 5.26 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟ ที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6 .....	106
ตารางที่ 5.27 ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟ ที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6 .....	108
ตารางที่ 5.28 ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6 .....	111
ตารางที่ 5.29 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบก่อนติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟ ที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6 .....	112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
IX

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 5.30 ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบก่อนติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟ ที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6 .....	114
ตารางที่ 5.31 ผลการสำรวจหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6 .....	116
ตารางที่ 5.32 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟ ที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6 .....	116
ตารางที่ 5.33 ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟ ที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6 .....	118
ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (%THDv) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4 .....	122
ตารางที่ 6.2 เปรียบเทียบความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า (%THDi) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4 .....	122
ตารางที่ 6.3 เปรียบเทียบความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (%THDv) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4 .....	123
ตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า (%THDi) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4 .....	123
ตารางที่ 6.5 เปรียบเทียบความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (%THDv) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5 .....	124
ตารางที่ 6.6 เปรียบเทียบความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า (%THDi) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5 .....	125
ตารางที่ 6.7 เปรียบเทียบความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (%THDv) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6 .....	125
ตารางที่ 6.8 เปรียบเทียบความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า (%THDi) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6 .....	126
ตารางที่ 6.9 เปรียบเทียบความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (%THDv) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6 .....	129
ตารางที่ 6.10 เปรียบเทียบความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า (%THDi) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6 .....	129

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1.1 ตัวอย่างความเสียหายที่เกิดขึ้นจากปัญหาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า .....	2
รูปที่ 1.2 ขั้นตอนการศึกษาและวิจัย .....	4
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างสเปกตรัมฮาร์มอนิกของความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า.....	7
รูปที่ 2.2 แรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ (Instantaneous voltage) ระหว่างเฟสกับนิวทรัล .....	8
รูปที่ 2.3 กระแสไฟฟ้าเฟสชั่วขณะ (Instantaneous phase current) .....	10
รูปที่ 2.4 จุดเชื่อมต่อทั่วไป (PCC) สำหรับหนึ่งผู้ใช้ไฟฟ้า .....	11
รูปที่ 2.5 จุดเชื่อมต่อทั่วไป (PCC) สำหรับสองผู้ใช้ไฟฟ้า.....	11
รูปที่ 2.6 กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่ไหลจากผู้ใช้ไฟฟ้ารายที่ 1 ไปยังจุด PCC .....	13
รูปที่ 2.7 แรงดันไฟฟ้าที่ผิดเพี้ยนที่อุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟฟ้ารายที่ 2 .....	13
รูปที่ 2.8 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกในวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม .....	18
รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของเรโซแนนซ์แบบอนุกรม .....	19
รูปที่ 2.10 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกในวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน .....	21
รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของเรโซแนนซ์แบบขนาน .....	21
รูปที่ 3.1 องค์ประกอบพื้นฐานของวงจรกรองคลื่น .....	27
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างชุดตัวเก็บประจุ (Capacitor banks) ในอุตสาหกรรม .....	28
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างตัวเหนี่ยวนำ (Reactor) ในอุตสาหกรรม.....	28
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างแผงผังวงจรกรองคลื่นทั่วไปในโรงงานแห่งหนึ่ง.....	30
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างแผงผังวงจรอย่างง่ายของวงจรกรองแบบพาสซีฟ .....	32
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างแผงผังวงจรกรองคลื่นทั่วไปในโรงงานแห่งหนึ่ง .....	33
รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลของแผงผังวงจรกรองคลื่นในรูปที่ 3.6.....	34
รูปที่ 4.1 ความเสียหายของรีแอคเตอร์ของวงจรกรองฮาร์มอนิก.....	39
รูปที่ 4.2 ความเสียหายของฟิวส์ แมกเนติกคอนแทคเตอร์ และสายไฟฟ้า .....	40
รูปที่ 4.3 ความเสียหายของเบรกเกอร์ MCCB (Molded Case Circuit Breaker) .....	41
รูปที่ 4.4 ความเสียหายของตัวเก็บประจุ.....	42
รูปที่ 4.5 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 1 ภายในตัวอย่างโรงงานที่ 1 .....	44

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.6 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 1 ภายในตัวอย่างโรงงานที่ 1 .....	44
รูปที่ 4.7 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 2 ภายในตัวอย่างโรงงานที่ 1 .....	45
รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 2 ภายในตัวอย่างโรงงานที่ 1 .....	45
รูปที่ 4.9 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 3 ภายในตัวอย่างโรงงานที่ 1 .....	46
รูปที่ 4.10 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 3 ภายในตัวอย่างโรงงานที่ 1 .....	47
รูปที่ 4.11 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าภายในตัวอย่างโรงงานที่ 2.....	48
รูปที่ 4.12 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าภายในตัวอย่างโรงงานที่ 2.....	48
รูปที่ 4.13 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าภายในตัวอย่างโรงงานที่ 3.....	49
รูปที่ 4.14 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าภายในตัวอย่างโรงงานที่ 3.....	50
รูปที่ 4.15 ค่าของตัวแปรทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของวงจรกรองแบบพาสซีฟลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 ขนาด 250 kVAR ของโรงงานที่ 4.....	52
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความต้านทานของวงจรกรองแบบพาสซีฟ ลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 ขนาด 250 kVAR ของโรงงานที่ 4 .....	52
รูปที่ 4.17 ค่าของตัวแปรทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของวงจรกรองแบบพาสซีฟลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 ขนาด 145 kVAR ของโรงงานที่ 5.....	56
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความต้านทานของวงจรกรองแบบพาสซีฟ ลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 ขนาด 145 kVAR ของโรงงานที่ 5 .....	56
รูปที่ 4.19 ค่าของตัวแปรทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของวงจรกรองแบบพาสซีฟลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 ขนาด 100 kVAR ของโรงงานที่ 6.....	58
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความต้านทานของวงจรกรองแบบพาสซีฟ ลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 ขนาด 100 kVAR ของโรงงานที่ 6 .....	59

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.21 ค่าของตัวแปรทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของวงจรกรองแบบพาสซีฟลำดับฮาร์มอนิกที่ 3 ขนาด 35 kVAR ของโรงงานที่ 6.....	61
รูปที่ 4.22 ค่าของตัวแปรทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของวงจรกรองแบบพาสซีฟลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 ขนาด 145 kVAR ของโรงงานที่ 6.....	62
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความต้านทานของวงจรกรองแบบพาสซีฟ ลำดับฮาร์มอนิกที่ 3 ขนาด 35 kVAR ของโรงงานที่ 6 .....	62
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความต้านทานของวงจรกรองแบบพาสซีฟ ลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 ขนาด 145 kVAR ของโรงงานที่ 6 .....	63
รูปที่ 5.1 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4.....	65
รูปที่ 5.2 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4.....	66
รูปที่ 5.3 สเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4.....	67
รูปที่ 5.4 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4.....	68
รูปที่ 5.5 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4 .....	72
รูปที่ 5.6 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4 .....	72
รูปที่ 5.7 สเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4.....	74
รูปที่ 5.8 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4.....	75
รูปที่ 5.9 ตัวประกอบกำลังหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4.....	76
รูปที่ 5.10 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4 .....	78
รูปที่ 5.11 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4 .....	78
รูปที่ 5.12 สเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4 .....	79
รูปที่ 5.13 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4 .....	81

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5.14 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4.....	85
รูปที่ 5.15 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4.....	85
รูปที่ 5.16 สเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4 .....	86
รูปที่ 5.17 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4 .....	88
รูปที่ 5.18 ตัวประกอบกำลังหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4.....	89
รูปที่ 5.19 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5 .....	91
รูปที่ 5.20 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5 .....	91
รูปที่ 5.21 สเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5.....	93
รูปที่ 5.22 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5 .....	94
รูปที่ 5.23 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5.....	96
รูปที่ 5.24 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5.....	96
รูปที่ 5.25 สเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5 .....	97
รูปที่ 5.26 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5.....	99
รูปที่ 5.27 ตัวประกอบกำลังหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5.....	100
รูปที่ 5.28 สเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6 .....	103
รูปที่ 5.29 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6 .....	105
รูปที่ 5.30 สเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6 .....	107

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5.31 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6 .....	109
รูปที่ 5.32 ตัวประกอบกำลังหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6.....	110
รูปที่ 5.33 สเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสก่อนติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6 .....	113
รูปที่ 5.34 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสก่อนติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6 .....	115
รูปที่ 5.35 สเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6 .....	117
รูปที่ 5.36 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6.....	119
รูปที่ 5.37 ตัวประกอบกำลังหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6.....	120
รูปที่ 6.1 แนวโน้มของค่า %THD <sub>v</sub> หลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6.....	127
รูปที่ 6.2 แนวโน้มของค่า %THD <sub>i</sub> หลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6 .....	128
รูปที่ 6.3 แนวโน้มของค่า %THD <sub>v</sub> หลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6.....	130
รูปที่ 6.4 แนวโน้มของค่า %THD <sub>i</sub> หลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6 .....	131

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

%THD

Percentage of Total Harmonic Distortion คือ ร้อยละความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม

%THDi

Percentage of Total Harmonic Distortion Current คือ ร้อยละความผิดเพี้ยนกระแสไฟฟ้า

เชิงฮาร์โมนิกรวม

%THDv

Percentage of Total Harmonic Distortion Voltage คือ ร้อยละความผิดเพี้ยนแรงดันไฟฟ้า

เชิงฮาร์โมนิกรวม

C

Capacitor คือ ตัวเก็บประจุไฟฟ้า หน่วย ฟารัด (Farad ; F)

DER

Distributed Energy Resource คือ แหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์

f

Frequency คือ ความถี่ หน่วย เฮิรตซ์ (Hertz ; Hz)

HVDC

High Voltage Direct Current Transmission System คือ ระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

$I_L$

Load Current คือ ค่าความต้องการกระแสไฟฟ้าสูงสุดของภาระทางไฟฟ้า (องค์ประกอบความถี่

มูลฐาน) ภายใต้เงื่อนไขการทำงานของภาระทางไฟฟ้าปกติที่จุดเชื่อมต่อทั่วไป (จุด PCC)

$I_{rms}$

Root Mean Square Current คือ กระแสไฟฟารากที่สองของค่าเฉลี่ย

$I_{sc}$

Short Circuit Current คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่จุดเชื่อมต่อทั่วไป (จุด PCC)

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

$I_{THC}$

Total Harmonic Current คือ กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกรวม

$I_{THC\_peak}$

Total Harmonic Current peak คือ กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกรวมสูงสุด

L

Inductor คือ ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า หน่วย เฮนรี (Henry ; H)

MCC

Motor Control Center คือ ศูนย์กลางการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า

MCCB

Molded Case Circuit Breaker คือ เซอร์กิตเบรกเกอร์แรงดันไฟฟ้าต่ำประเภทหนึ่ง

MDB

Main Distribution Board คือ ตู้ควบคุมไฟฟ้าหลัก

P

Real Power คือ กำลังไฟฟ้าจริง หน่วย วัตต์ (Watt ; W)

P.F.

Power Factor คือ ตัวประกอบกำลัง

PCC

Point of Common Coupling คือ จุดเชื่อมต่อทั่วไป

Q

Reactive Power คือ กำลังไฟฟ้าเสมือน หน่วย วาร์ (VAR)

R

Resistor คือ ตัวต้านทาน หน่วย โอห์ม (Ohm ;  $\Omega$ )

RPA

Robotic Process Automation คือ จุดต่อที่มีการทำงานอัตโนมัติ

S

Apparent Power คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ หน่วย โวลต์-แอมป์ (Volt-Amp ; VA)

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

TDD

Total Demand Distortion คือ ความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์โมนิกมีค่าเป็นร้อยละของความ  
ต้องการ

กระแสไฟฟ้าของภาระทางไฟฟ้าสูงสุด

THD

Total Harmonic Distortion คือ ความผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกทั้งหมด

TRD

Total Rated Harmonic Distortion คือ พิกัดความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิก

V

Voltage คือ แรงดันไฟฟ้า หน่วย โวลต์ (Volt ; V)

$V_{rms}$

Root Mean Square Voltage คือ แรงดันไฟฟ้ารากที่สองของค่าเฉลี่ย

$V_{Line}$

Line Voltage คือ แรงดันไฟฟ้าระหว่างสายไฟฟ้าหรือระหว่างเฟสกับเฟส (Phase1-Phase2,  
Phase2-Phase3, Phase3-Phase1)

Z

Impedance คือ ความต้านทานเชิงซ้อน หน่วย โอห์ม (Ohm ;  $\Omega$ )

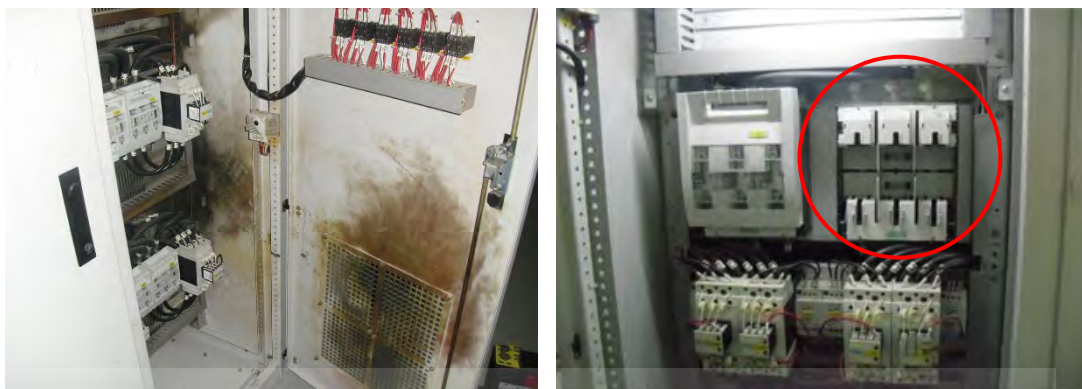
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันความกังวลหนึ่งที่เกิดขึ้นกับผู้ประกอบการในระบบอุตสาหกรรมเกี่ยวกับระบบไฟฟ้าคือ คุณภาพไฟฟ้า ซึ่งต้องยอมรับว่าภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นถูกนำมาใช้มากขึ้นเพื่ออำนวยความสะดวกและผลการดำเนินงานที่ดียิ่งขึ้นภายในกิจการต่าง ๆ เมื่อมีภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นจำนวนมากติดตั้งอยู่ในระบบหรือระบบพลังงานหมุนเวียนที่จะมาช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้า ก็ตาม อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้าทำให้เกิดปัญหาด้านฮาร์มอนิกขึ้นและอาจเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ตามมาในภายหลังได้ ปัญหาฮาร์มอนิกทำให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเกิดความผิดเพี้ยนส่งผลให้ระบบไฟฟ้าทำงานผิดปกติไม่ว่าจะเป็นการกำหนดเวลาที่ผิดเพี้ยนไป ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ลดลงจากแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมและกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมีค่าสูงเกินพิกัดของอุปกรณ์ เป็นต้น เหล่านี้เป็นปัญหาที่จะต้องได้รับการแก้ไขเพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อการทำงานหรือกระบวนการผลิตต่าง ๆ ภายในระบบอุตสาหกรรม ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นแล้วจะทำให้เสียเวลาและผลผลิตที่ควรจะได้รับนำไปสู่ต้นทุนที่เพิ่มขึ้นและผลประกอบการน้อยลง จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นภายในแต่ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นถ้าไม่ถูกควบคุมอาจจะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าข้างเคียงได้เช่นกัน เพราะฉะนั้นแล้วจึงมีมาตรฐานสากล IEEE 519-2014 มาควบคุมเกี่ยวกับขีดจำกัดความผิดเพี้ยนที่สามารถมีได้ ทำให้ปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นไม่แพร่ขยายเป็นวงกว้างออกไป

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นและการอ้างอิงข้อมูลจากการที่ได้ไปสำรวจการทำงานของโรงงานในภาคอุตสาหกรรมจริง พบว่ามีการติดตั้งชุดอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ในการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าภายในระบบ เช่น ชุดตัวเก็บประจุ และวงจรกรองฮาร์มอนิกเดิม เป็นต้น เพื่อรองรับการทำงานของภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้น เช่น โดรฟ์ไฟฟ้ากระแสสลับขนาดเล็ก (เทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้า) จำนวนมาก ระบบพลังงานหมุนเวียน อุปกรณ์อำนวยความสะดวกภายในอาคารที่มีจำนวนมาก เป็นต้น สามารถทำงานได้ดีในการควบคุมปัญหาฮาร์มอนิกหรือความผิดเพี้ยนทางไฟฟ้า แต่ยังคงเกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าภายในระบบ เช่น ชุดตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ ฟิวส์ สายไฟฟ้า แมกเนติกคอนแทคเตอร์ เป็นต้น แสดงตัวอย่างความเสียหายที่เกิดขึ้นในรูปที่ 1.1 จึงจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์และออกแบบเลือกใช้วงจรกรองฮาร์มอนิกที่เหมาะสมกับปัญหาที่เกิดขึ้นต่อไป



a) ความเสียหายที่เกิดในตัวควบคุม

b) ไฟส์เสียหายและเกิดการละลาย

รูปที่ 1.1 ตัวอย่างความเสียหายที่เกิดขึ้นจากปัญหาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของการเกิดฮาร์มอนิกน้อยถึงน้อยมากจากการใช้ภาระทางไฟฟ้าไม่เป็นเชิงเส้นขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้าด้วยข้อมูลพื้นฐานที่ได้สำรวจจากโรงงานอุตสาหกรรม
2. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการแก้ไขปัญหาของการเกิดฮาร์มอนิกน้อยถึงน้อยมากจากการใช้ภาระทางไฟฟ้าไม่เป็นเชิงเส้นขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับหม้อแปลงไฟฟ้า นำไปสู่การเลือกวิธีที่เหมาะสมและดีที่สุด
3. ออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่เกี่ยวข้อง จากข้อมูลสถานที่จริง ที่ได้ทำการสำรวจและตรวจวัดค่าของตัวแปรทางไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ในการแก้ปัญหา
4. สรุปผลการวัดจากข้อมูลของโรงงานและจัดทำวงจรกรองฮาร์มอนิกนำไปติดตั้งเพื่อแก้ปัญหาวัดค่าตัวแปรทางไฟฟ้าเปรียบเทียบก่อนและหลังติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิก นำข้อมูลที่ได้มาตรวจสอบคุณภาพทางไฟฟ้าของระบบ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีกระแสฮาร์มอนิกน้อยแต่เกิดการระเบิดของอุปกรณ์ไฟฟ้าอย่างรุนแรง โดยใช้วงจรกรองแบบพาสซีฟประเภทจูนซึ่งมีราคาถูก ในระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำที่ 400/230 V ชั้นพื้นฐานที่สามารถนำไปปรับใช้หรือประยุกต์ใช้ต่อไปได้ โดยมีโปรแกรมของ Nokian capacitor Co., Ltd สำหรับระบุค่าตัวเก็บประจุและค่าตัวเหนี่ยวนำ และโปรแกรมสำเร็จรูปของ KMITL สำหรับระบุค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน ภายใต้ข้อมูลจากสถานที่จริงที่ได้ทำการสำรวจ เพื่อทำหน้าที่ในการกรองและกำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น

ในระบบไฟฟ้าตามความเหมาะสมกับระบบนั้น ๆ และให้ฮาร์มอนิกมีขีดจำกัดเป็นไปตามมาตรฐานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
IEEE 519-2014

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ทำให้ได้ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับการเกิดปัญหาฮาร์มอนิกและผลกระทบ
2. สามารถวิเคราะห์และทำการออกแบบวงจรกรองแบบพาสซีฟประเภทจูนขึ้นพื้นฐานและสามารถนำไปประยุกต์กับการใช้งานจริงได้
3. ทำให้สามารถพิจารณาถึงความเหมาะสมของวิธีการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นบนพื้นฐานและข้อมูลเบื้องต้นทางวิศวกรรมที่มีได้
4. ทำให้มีความเข้าใจในมาตรฐานสากลที่มีความเกี่ยวข้องกับคุณภาพไฟฟ้าคือ IEEE 519-2014

## 1.5 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาภายในเล่ม มีทั้งหมด 6 บท ซึ่งในแต่ละบทมีเนื้อหาโดยสังเขปดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ โครงสร้างวิทยานิพนธ์โดยสังเขป และแผนผังขั้นตอนของการศึกษา

บทที่ 2 ฮาร์มอนิกและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึงเนื้อหาความรู้ ทฤษฎีต่าง ๆ และมาตรฐานที่เกี่ยวข้องเป็นความรู้เบื้องต้นในการทำความเข้าใจในส่วนต่อ ๆ ไป

บทที่ 3 วงจรกรองดีจูนและวงจรกรองจูน กล่าวถึงข้อมูลและทฤษฎีพื้นฐานของวงจรกรองฮาร์มอนิกที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับปัญหาและการแก้ปัญหาที่พบภายในงานวิจัยฉบับนี้

บทที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินงานและการออกแบบ กล่าวถึงปัญหาที่พบ ข้อมูลจริงจากตัวอย่างโรงงานอุตสาหกรรมที่ได้ไปสำรวจ และตัวแปรทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของวงจรกรองฮาร์มอนิก

บทที่ 5 ผลการทดลอง กล่าวถึงผลการสำรวจและผลการทดลองในช่วงเวลาต่าง ๆ ได้แก่ ก่อนการติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิก และหลังติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิก

บทที่ 6 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลอง กล่าวถึงการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากช่วงเวลาก่อนและหลังการติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิก รวมถึงการเปรียบเทียบค่าตัวแปรทางไฟฟ้า

บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ กล่าวถึงการสรุปผลการทดลองทั้งทางด้านวิศวกรรมและด้านเศรษฐศาสตร์ ข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุงต่อยอดให้ผู้ที่สนใจนำไปประยุกต์ใช้ในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่

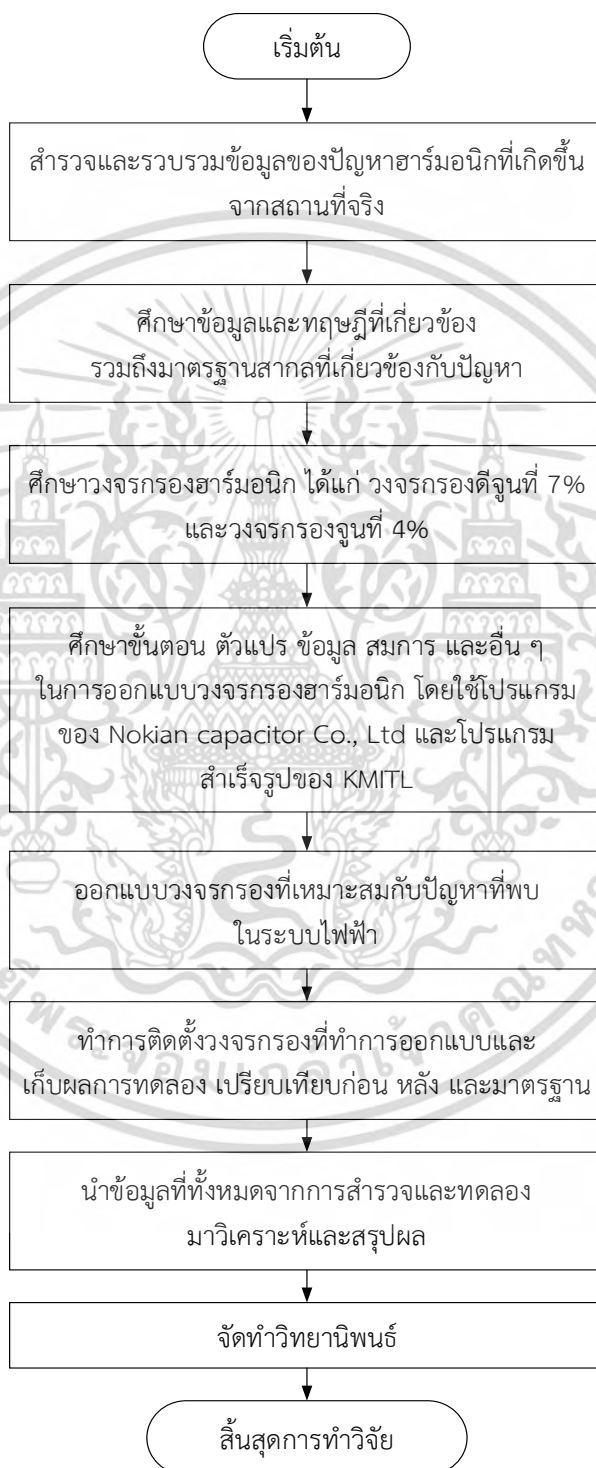
ภาคผนวก ข รูปภาพการติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟหรือวงจรกรองประเภทจูน

ประวัติผู้เขียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนในการทำงานวิจัยเรื่อง การศึกษาการติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิกสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่มีระดับกระแสฮาร์มอนิกน้อย แสดงรายละเอียดไว้ในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ขั้นตอนการทำการศึกษาและวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.7 บทสรุป

เมื่อเกิดปัญหาขึ้นต้องทำการสำรวจและเก็บข้อมูลของระบบไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสถานที่จริง ซึ่งส่วนนี้มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่จะเป็นจุดเริ่มต้นของการแก้ปัญหา จากนั้นตั้งสมมติฐานที่มีความเป็นไปได้ด้วยข้อมูลที่มีอยู่ นำไปสู่การศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องเพื่อที่จะเข้าใจถึงปัญหาได้มากขึ้น ทำการเลือกวิธีการแก้ปัญหาและออกแบบการแก้ปัญหาอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้ข้อมูลพื้นฐานที่มีอยู่และองค์ความรู้ทางวิศวกรรม สุดท้ายทำการติดตั้งอุปกรณ์หรือแนวทางการแก้ปัญหาที่ออกแบบไว้และติดตามดูผลลัพธ์ ทั้งหมดนี้จะถูกนำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ในส่วนต่อ ๆ ไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ฮาร์มอนิกและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 คุณภาพไฟฟ้า

คุณภาพไฟฟ้า (Power quality) เป็นคำที่มีความหมายต่างกันสำหรับแต่ละคน มาตรฐานสถาบันวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Institute of Electrical and Electronic Engineers, IEEE) มาตรฐาน IEEE1100 กำหนดคุณภาพไฟฟ้าว่าเป็น “แนวคิดในการจ่ายไฟฟ้าและต่อสายดินอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความละเอียดอ่อนในลักษณะที่เหมาะสมกับอุปกรณ์” ตามความเหมาะสมตามคำอธิบายนี้อาจเหมือนข้อจำกัดของคุณภาพกำลังไฟฟ้าสำหรับ “อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความละเอียดอ่อน” อาจมีข้อขัดแย้ง อุปกรณ์ไฟฟ้าที่อ่อนไหวต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าหรือเหมาะสมกว่าสำหรับการขาดคุณภาพกำลังไฟฟ้าจะอยู่ในขอบเขตที่ดูเหมือนไร้ขอบเขต อุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหมดมีแนวโน้มที่จะล้มเหลวหรือทำงานผิดพลาดเมื่อประสบปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้าอย่างน้อยหนึ่งปัญหา อุปกรณ์ไฟฟ้าอาจเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้า คอมพิวเตอร์ เครื่องพิมพ์ อุปกรณ์สื่อสาร หรือเครื่องใช้ในครัวเรือน อุปกรณ์เหล่านี้และอื่น ๆ ทั้งหมดตอบสนองต่อปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้า โดยขึ้นอยู่กับความรุนแรงของปัญหา

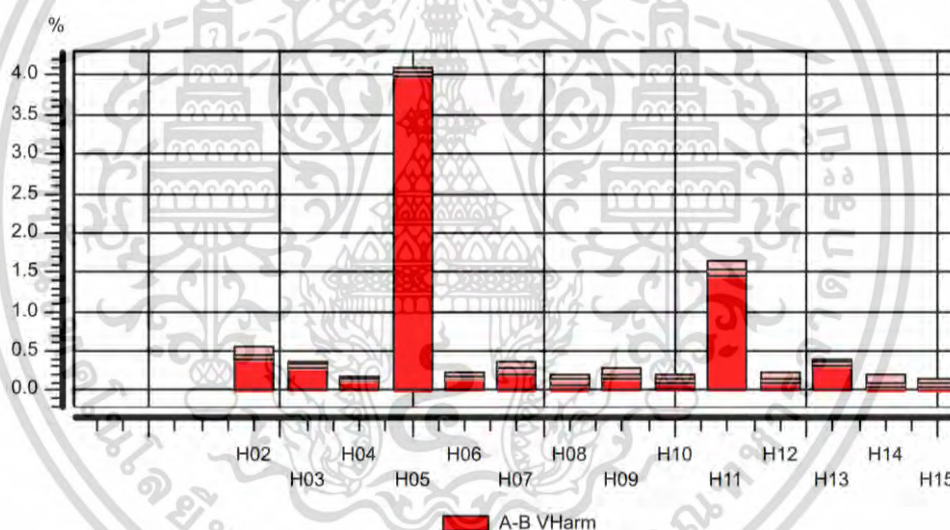
คำจำกัดความที่ง่ายกว่าและรัดกุมกว่าอาจระบุว่า “คุณภาพกำลังไฟฟ้าคือชุดของขอบเขตทางไฟฟ้าที่ช่วยให้ชิ้นส่วนของอุปกรณ์ทำงานในลักษณะที่ตั้งใจไว้โดยไม่สูญเสียประสิทธิภาพหรืออายุขัยอย่างมีนัยสำคัญ” คำจำกัดความนี้ครอบคลุมสองสิ่งที่ต้องการจากอุปกรณ์ไฟฟ้า ได้แก่ ประสิทธิภาพและอายุการใช้งาน ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับพลังงานที่กระทบต่อคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งคือข้อกังวลด้านคุณภาพไฟฟ้า [1]

### 2.2 ฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิก (Harmonics) คือ การมีอยู่ของความถี่หลายความถี่ในความถี่มูลฐานของแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าหรือทั้งสองอย่าง ด้วยเหตุนี้ความถี่มูลฐานที่ 50 Hz จึงถูกซ้อนทับด้วยความถี่หลายความถี่ เช่น 100 Hz, 150 Hz, 250 Hz เป็นต้น ส่งผลให้เกิดความผิดเพี้ยนจากลักษณะรูปคลื่นไซน์ในอุดมคติ ฮาร์มอนิกแบ่งออกเป็นสองประเภท ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกและกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิก การเกิดฮาร์มอนิกในแรงดันไฟฟ้าเรียกว่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้าและการเกิดฮาร์มอนิกในกระแสไฟฟ้าเรียกว่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกในกระแสไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกถูกสร้างขึ้นโดยภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear loads) เช่น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เตาอาร์ค เป็นต้น และกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกส่วนใหญ่สร้างขึ้นโดยตัวแปลงกำลังไฟฟ้า เมื่อเทียบกับความผิดเพี้ยนแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิก กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าเนื่องจากการใช้ตัวแปลงกำลังไฟฟ้าแบบคงที่ที่ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจำนวนมาก

ความถี่หลายช่วงเหล่านั้นเรียกอีกอย่างว่าความถี่ฮาร์มอนิกและเกี่ยวข้องกับลำดับฮาร์มอนิก ลำดับฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้นจากความถี่ต่ำเป็นความถี่สูง ความถี่มูลฐานที่ 50 Hz มีความถี่ฮาร์มอนิกที่ 100, 150, 200 และ 250 Hz ลำดับฮาร์มอนิกที่สอดคล้องกันคือลำดับที่สองสำหรับความถี่ 100 Hz ลำดับที่สามสำหรับความถี่ 150 Hz ลำดับที่สี่สำหรับความถี่ 200 Hz และลำดับที่ห้าสำหรับความถี่ 250 Hz โดยทั่วไปฮาร์มอนิกจะแสดงด้วยความถี่ในหน่วยเฮิร์ต (Hertz, Hz) หรือลำดับฮาร์มอนิก การระบุลำดับหรือความถี่ฮาร์มอนิกหลายรายการตามขนาดเรียกว่าสเปกตรัมฮาร์มอนิก สเปกตรัม-ฮาร์มอนิกทั่วไปที่มีลำดับฮาร์มอนิกจากลำดับที่ 2 ถึง 15 สำหรับตัวอย่างความผิดเพี้ยนแรงดันไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 2.1 [2]



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างสเปกตรัมฮาร์มอนิกของความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า

ในทางทฤษฎี ขนาดของลำดับฮาร์มอนิกแต่ละตัวสามารถหาได้จากสมการ (2.1)

$$I_h = \frac{I_f}{h} \quad (2.1)$$

โดยที่  $I_h$  คือ ขนาดของกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกลำดับที่  $h$  (Ampere, A)  
 $I_f$  คือ ขนาดของกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่ความถี่มูลฐาน (A)  
 $h$  คือ ลำดับฮาร์มอนิก

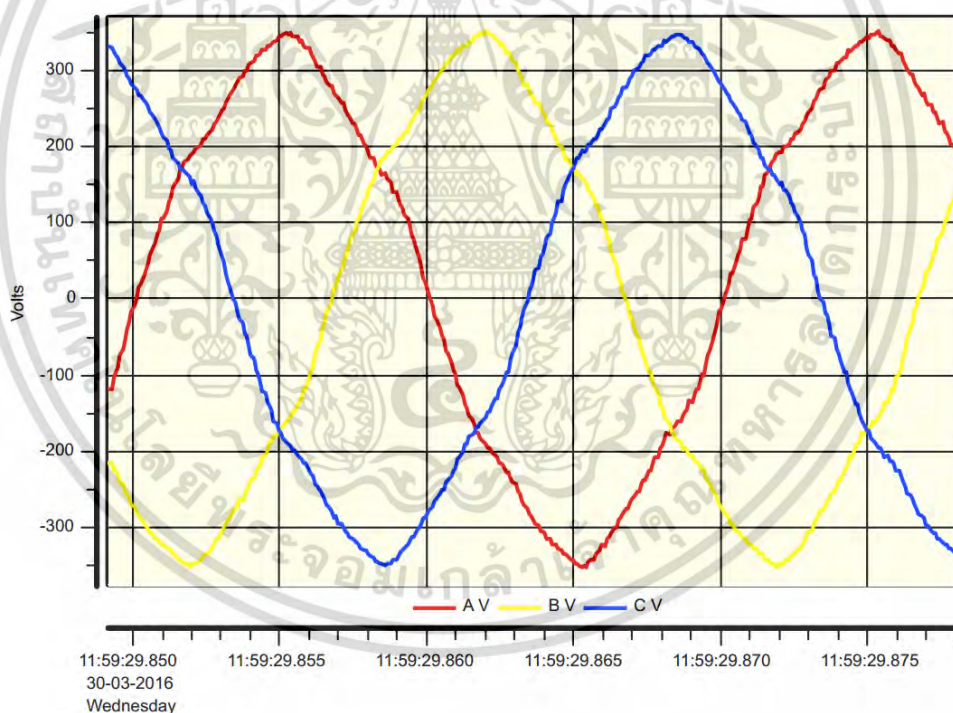
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ประเภทของฮาร์มอนิก

โดยจะแบ่งตามประเภทของการเกิดฮาร์มอนิก ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกแบ่งออกเป็นสองประเภท ดังนี้

### 2.3.1 แรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิก (Voltage harmonics)

คุณลักษณะของภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะทำการดึงแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าไปใช้เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าที่เป็นรูปคลื่นไซน์ตกคร่อมอยู่ที่ขั้วของภาระทางไฟฟ้า เนื่องจากคุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น แรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ในอุดมคติจะถูกเปลี่ยนแปลงไปและทำการสร้างแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกเข้าไปในแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ภาระทางไฟฟ้าเหล่านี้เรียกว่าแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้าหรือภาระทางไฟฟ้า ฮาร์มอนิกที่เข้าสู่ระบบโดยภาระทางไฟฟ้าเหล่านี้เรียกว่าแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิก ภาระทางไฟฟ้าที่สร้างฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้า เช่น เต้าอาร์ค เต้าหลอม ภาระทางไฟฟ้าที่มีการอาร์ค เป็นต้น



รูปที่ 2.2 แรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ (Instantaneous voltage) ระหว่างเฟสกับนิวทรัล

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ชัดเจนว่าเนื่องจากมีแรงดันไฟฟ้าหลายความถี่ ความถี่มูลฐานจึงถูกเบี่ยงเบนไปจากลักษณะรูปคลื่นไซน์ในอุดมคติ สิ่งนี้เรียกว่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้าหรือความผิดเพี้ยนแรงดันไฟฟ้า [2]

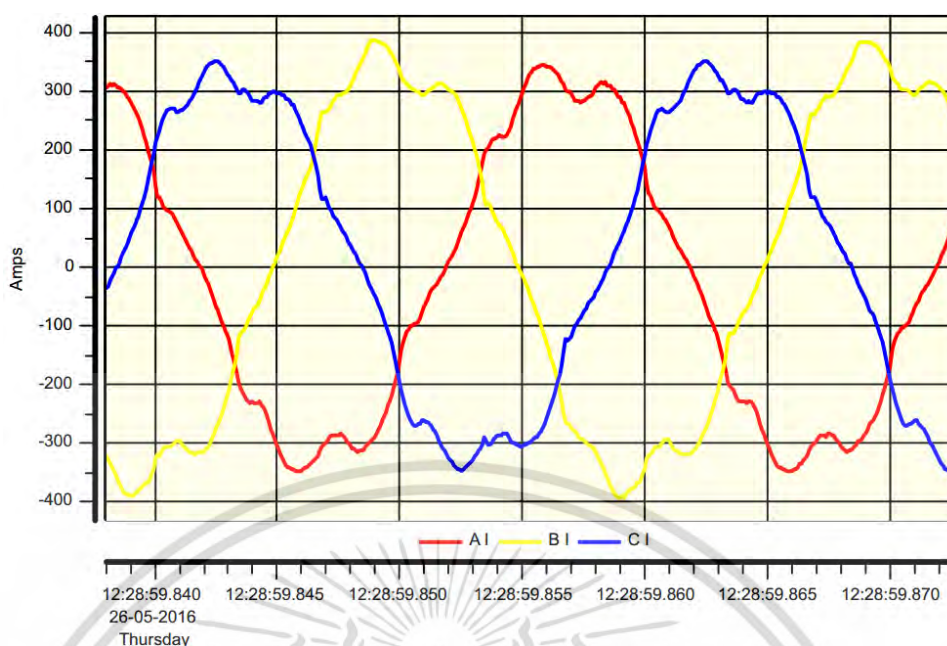
### 2.3.2 กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิก (Current harmonics)

คุณลักษณะของภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะทำการดึงแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าไปใช้เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าที่เป็นรูปคลื่นไซน์ตกคร่อมอยู่ที่ขั้วของภาระทางไฟฟ้า เนื่องจากคุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น กระแสไฟฟ้าที่ถูกนำมาใช้โดยภาระทางไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้าที่ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ ซึ่งส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายที่เป็นรูปคลื่นไซน์เปลี่ยนแปลงไปและทำการสร้างกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบ ภาระทางไฟฟ้าเหล่านี้เรียกว่าแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าหรือภาระทางไฟฟ้า ฮาร์มอนิกที่เข้าสู่ระบบโดยภาระทางไฟฟ้าเหล่านี้เรียกว่ากระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิก แหล่งที่มาหลักของการกำเนิดกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกเกิดจากการใช้ภาระทางไฟฟ้าที่ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ภาระทางไฟฟ้าที่สร้างกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกในการใช้งานระบบอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่น วงจรเรียงกระแสแบบโซลิดสเตต (Solid-state rectifiers), เครื่องชาร์จแบตเตอรี่, ไดรฟ์ปรับความเร็วได้ (Variable Frequency Drives, VFDs), ระบบเครื่องสำรองไฟฟ้า (Uninterruptible Power Supply systems, UPS), ตัวเปลี่ยนความเร็ว (Frequency changers หรือ Cycloconverters), ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC voltage regulators) เป็นต้น

ภาระทางไฟฟ้าที่สร้างกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกในรูปแบบของระบบเชิงพาณิชย์ ตัวอย่างเช่น แหล่งจ่ายไฟรูปแบบสวิตช์ (Switched Mode Power Supplies, SMPS), ไดโอดเปล่งแสงหรือหลอดไฟแอลอีดี (Light-Emitting Diodes, LED), หลอดไฟคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ (Compact Fluorescent Lamps), บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic ballasts), ระบบเครื่องสำรองไฟฟ้า, ไดรฟ์ความเร็วตัวแปร, ตัวปรับแรงดันไฟฟ้า, วงจรเรียงกระแสแบบโซลิดสเตต, เครื่องชาร์จแบตเตอรี่ เป็นต้น

ภาระทางไฟฟ้าที่สร้างกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกในระบบที่อยู่อาศัย ตัวอย่างเช่น เครื่องชาร์จคอมพิวเตอร์พกพาและโทรศัพท์มือถือ, ไดโอดเปล่งแสงหรือหลอดไฟแอลอีดี, หลอดไฟคอมแพคฟลูออเรสเซนต์, สวิตช์หรี่แสงไฟและพัดลม, อุปกรณ์รักษาเสถียรภาพแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic stabilizers) เป็นต้น

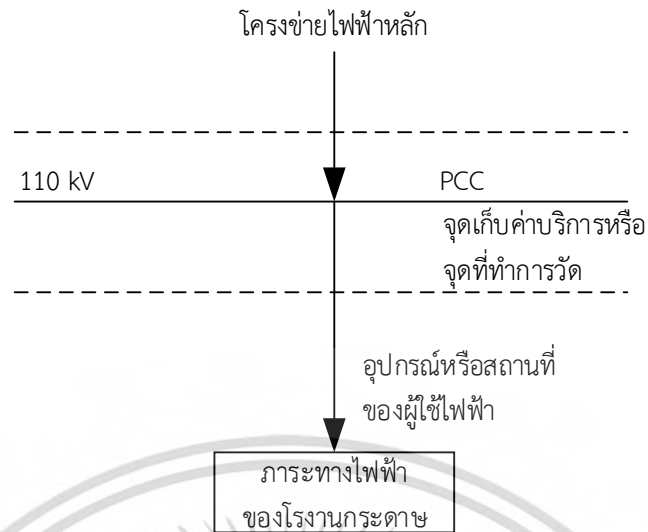


รูปที่ 2.3 กระแสไฟฟ้าเฟสชั่วขณะ (Instantaneous phase current)

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ชัดเจนว่าเนื่องจากการมีอยู่ของความถี่หลายความถี่ในกระแสไฟฟ้า ความถี่มูลฐานจึงถูกเบี่ยงเบนไปจากลักษณะรูปคลื่นไซน์ในอุดมคติ สิ่งนี้เรียกว่าความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าหรือความผิดเพี้ยนกระแสไฟฟ้า [2]

## 2.4 จุดเชื่อมต่อทั่วไป

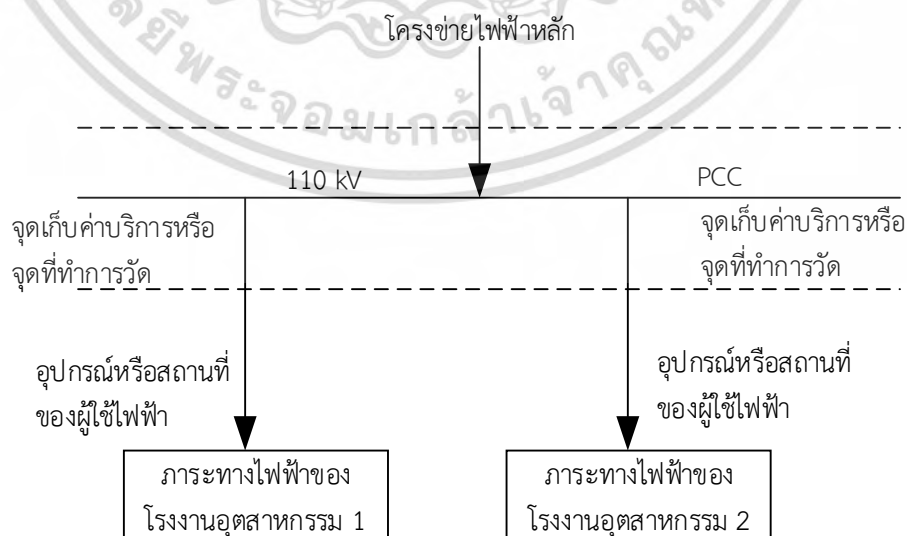
จุดเชื่อมต่อทั่วไป (Point of Common Coupling, PCC) เป็นจุดหรือตำแหน่งทั่วไปที่ผู้ใช้ไฟฟ้าหลายรายและอุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟฟ้าเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้าหลัก มาตรฐาน IEEE 519-2014 ให้คำจำกัดความของจุด PCC ว่าเป็นจุดบนระบบไฟฟ้าสาธารณะที่ใกล้กับภาระทางไฟฟ้าเฉพาะ ซึ่งสามารถเชื่อมต่อภาระทางไฟฟ้าอื่น ๆ ได้ จุด PCC เป็นจุดเริ่มต้นของการติดตั้งระบบไฟฟ้าในโรงงานที่ถูกพิจารณาแล้ว



รูปที่ 2.4 จุดเชื่อมต่อทั่วไป (PCC) สำหรับหนึ่งผู้ใช้ไฟฟ้า

ตัวอย่างที่หนึ่ง โรงงานกระดาษที่มีภาระทางไฟฟ้าเชื่อมต่อขนาด 10 MVA และรับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาด 110 kV การกระจายไฟฟ้าของระบบอุตสาหกรรมแสดงในรูปที่ 2.4 จุด PCC สำหรับโรงงานกระดาษนี้คือ 110 kV ในกรณีส่วนใหญ่ จุดที่ทำการวัดหรือจุดเก็บค่าบริการถือเป็นจุด PCC

ตัวอย่างที่สอง โรงงานอุตสาหกรรมสองแห่งเชื่อมต่อภาระทางไฟฟ้าขนาด 10 และ 15 MVA ตามลำดับ และรับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาด 110 kV การกระจายไฟฟ้าของระบบอุตสาหกรรมแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 จุดเชื่อมต่อทั่วไป (PCC) สำหรับสองผู้ใช้ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐาน IEEE 519-2014 ที่แนะนำให้จำกัดค่าฮาร์มอนิกทั้งความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่จุด PCC เท่านั้น ไม่ควรใช้ขีดจำกัดเหล่านี้ที่ใดก็ได้ภายในสถานที่ตั้งของผู้ใช้ไฟฟ้า เช่น เครื่องป้อนแต่ละเครื่อง หรืออุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นต้น [2]

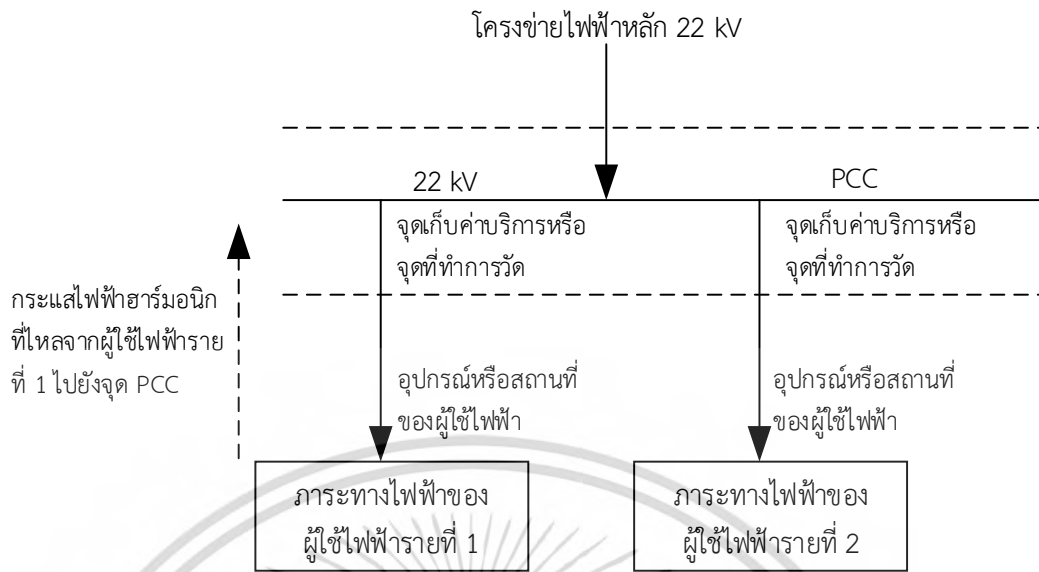
#### 2.4.1 ฮาร์มอนิกทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้า

ตามหลักการแล้วแหล่งจ่ายไฟฟ้าควรมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์และปราศจากฮาร์มอนิก อย่างไรก็ตามในระบบที่ใช้งานได้จริง แหล่งจ่ายไฟฟ้าไม่มีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์และปริมาณฮาร์มอนิกที่น้อยที่สุดก็คือการมีอยู่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ฮาร์มอนิกจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าอาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งหมายความว่าภาระทางไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าจะขับเคลื่อนด้วยแรงดันไฟฟ้าที่มีความผิดเพี้ยนซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแหล่งจ่ายไฟฟ้า [2]

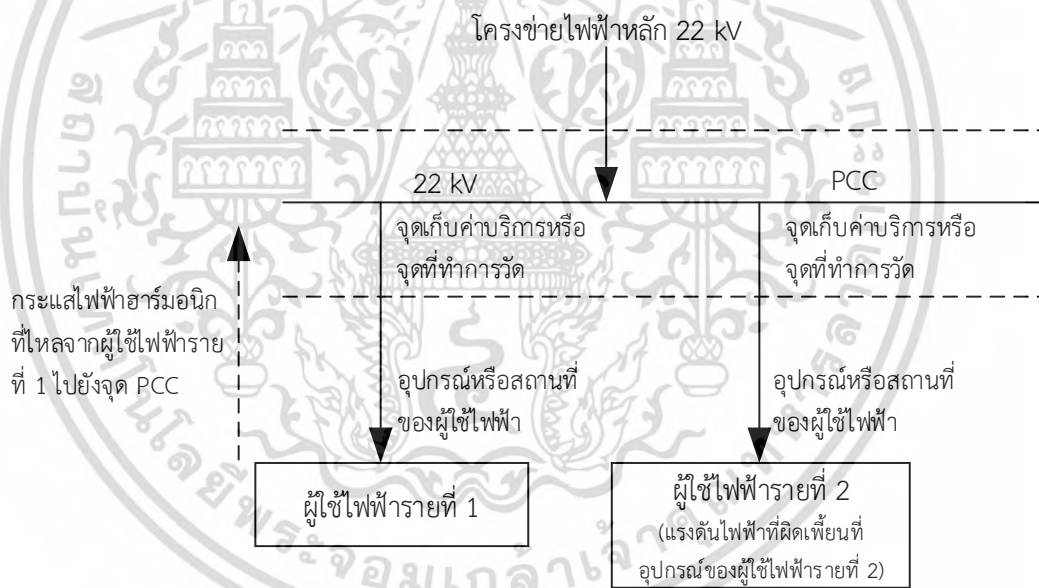
#### 2.4.2 ฮาร์มอนิกทางด้านภาระทางไฟฟ้า

จุด PCC เป็นจุดเชื่อมต่อทั่วไปสำหรับผู้ไฟฟ้าหลายรายที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้าหลักเดียวกัน หากกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบโดยภาระทางไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าไม่ถูกจำกัดคุณภาพไฟฟ้าที่จุด PCC จะได้รับผลกระทบ ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าที่จุด PCC ยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าหลายรายที่เชื่อมต่อกับจุด PCC เดียวกัน กล่าวคือกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่ผู้ใช้ไฟฟ้าย่อยหนึ่งนำเข้าสู่ระบบส่งผลกระทบต่อคุณภาพแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกถูกนำเข้าสู่ระบบจากผู้ไฟฟ้าหนึ่งไปยังจุด PCC ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และจะส่งผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC

แรงดันไฟฟ้าที่ผิดเพี้ยนที่จุด PCC ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าย่อยอื่นที่เชื่อมต่อกับจุด PCC เดียวกันโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ผิดเพี้ยน กล่าวคือ แรงดันไฟฟ้าที่ผิดเพี้ยนถูกส่งไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าย่อยที่สองที่เชื่อมต่อกับจุด PCC เดียวกัน แม้ว่าภาระทางไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าย่อยที่สองจะมีคุณลักษณะเป็นเชิงเส้น ผู้ใช้ไฟฟ้าย่อยที่สองจะนำเอากระแสไฟฟ้าที่ไม่ใช่รูปคลื่นไซน์จากแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากความผิดเพี้ยนของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า รูปที่ 2.7 แสดงแรงดันไฟฟ้าผิดเพี้ยนที่ภาระทางไฟฟ้าที่เชื่อมต่อของผู้ใช้ไฟฟ้าย่อยที่สอง [2]



รูปที่ 2.6 กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่ไหลจากผู้ใช้ไฟฟ้ายายที่ 1 ไปยังจุด PCC



รูปที่ 2.7 แรงดันไฟฟ้าที่ผิดเพี้ยนที่อุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟฟ้ายายที่ 2

## 2.5 การประเมินฮาร์มอนิกภายในระบบไฟฟ้า

โดยทั่วไปฮาร์มอนิกในระบบจะถูกการประเมินโดยใช้ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกทั้งหมด (Total Harmonic Distortion, THD) สำหรับทั้งความผิดเพี้ยนของฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้าและความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้า มาตรฐาน IEEE Std 519-2014 ใช้ค่าความผิดเพี้ยนรวม (Total demand Distortion, TDD) สำหรับการประเมินความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่จุด PCC และ มาตรฐาน IEEE Std 1547-2018 ได้แนะนำค่าศัพท์ใหม่สำหรับการประเมิน กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่เรียกว่า พิกัดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกทั้งหมด (Total Rated Harmonic Distortion, TRD) [2]

### 2.5.1 ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกทั้งหมด (Total Harmonic Distortion, THD)

ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกทั้งหมดหรือค่า THD คืออัตราส่วนของรากที่สองของผลรวมของ ส่วนประกอบฮาร์มอนิกทั้งหมดยกเว้นค่าพื้นฐานกับส่วนประกอบพื้นฐาน ในส่วนค่า THD นั้นใช้เพื่อ คำนวณร้อยละของความผิดเพี้ยนจากลักษณะรูปคลื่นพื้นฐาน มาตรฐาน IEEE 519-2014 กำหนดค่า THD เป็นอัตราส่วนของค่าเฉลี่ยรากที่สอง (Root Mean Square, RMS) ของฮาร์มอนิก โดยพิจารณา ส่วนประกอบฮาร์มอนิกมากถึงลำดับที่ 50 และไม่เฉพาะเจาะจงรวมกับอินเทอร์ฮาร์มอนิก โดยแสดง เป็นร้อยละของค่าพื้นฐาน ส่วนประกอบฮาร์มอนิกของลำดับที่มากกว่า 50 อาจรวมอยู่ด้วยเมื่อจำเป็น ค่า THD ใช้ในการประเมินฮาร์มอนิกทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

ค่า THD ของแรงดันไฟฟ้า คืออัตราส่วนของรากที่สองของผลรวมของส่วนประกอบ ฮาร์มอนิกแรงดันไฟฟ้าทั้งหมดยกเว้นแรงดันไฟฟ้าพื้นฐานกับแรงดันไฟฟ้าพื้นฐาน สำหรับ ความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้าจะแสดงในสมการ (2.2) และ (2.3)

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (2.2)$$

$$V_{THD}(\%) = V_{THD} \times 100\% \quad (2.3)$$

- โดยที่  $V_{THD}$  คือ ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกทั้งหมด (V)  
 $V_{THD}(\%)$  คือ ค่าร้อยละความผิดเพี้ยนแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกทั้งหมด (%)  
 $V_h$  คือ ส่วนประกอบแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกในค่า RMS (V)  
 $V_1$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าพื้นฐานในค่า RMS (V)

ค่า THD ของกระแสไฟฟ้า คืออัตราส่วนของรากที่สองของผลรวมของส่วนประกอบฮาร์มอนิก กระแสไฟฟ้าทั้งหมดยกเว้นกระแสไฟฟ้าพื้นฐานกับกระแสไฟฟ้าพื้นฐาน สำหรับความผิดเพี้ยน-ฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าจะแสดงในสมการ (2.4) และ (2.5) [2]

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (2.4)$$

$$I_{THD}(\%) = I_{THD} \times 100\% \quad (2.5)$$

- โดยที่  $I_{THD}$  คือ ค่าความผิดเพี้ยนกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกทั้งหมด (A)  
 $I_{THD}(\%)$  คือ ค่าร้อยละความผิดเพี้ยนกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกทั้งหมด (%)  
 $I_h$  คือ ส่วนประกอบกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกในค่า RMS (A)  
 $I_1$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าพื้นฐานในค่า RMS (A)

## 2.5.2 ค่าความผิดเพี้ยนรวม (Total demand Distortion, TDD)

ค่าความผิดเพี้ยนรวมหรือค่า TDD คืออัตราส่วนของรากที่สองของผลรวมของส่วนประกอบกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกทั้งหมดยกเว้นกระแสไฟฟ้าพื้นฐานกับความต้องการกระแสไฟฟ้าพื้นฐานสูงสุดมาตรฐาน IEEE 519-2014 กำหนดค่า TDD เป็นอัตราส่วนของค่าเฉลี่ยรากที่สองของฮาร์มอนิกโดยพิจารณาส่วนประกอบฮาร์มอนิกในลำดับที่ 50 และไม่รวมอินเทอร์ฮาร์มอนิกโดยเฉพาะ โดยแสดงเป็นร้อยละของความต้องการกระแสไฟฟ้าสูงสุด ส่วนประกอบฮาร์มอนิกของลำดับที่มากกว่า 50 อาจรวมอยู่ด้วยเมื่อจำเป็น [2]

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_L} \quad (2.6)$$

- โดยที่  $TDD$  คือ ค่าความผิดเพี้ยนรวม  
 $I_h$  คือ ส่วนประกอบกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกในค่า RMS (A)  
 $I_L$  คือ ค่าความต้องการกระแสไฟฟ้าสูงสุดของภาระทางไฟฟ้าในค่า RMS ที่จุด PCC  
 ค่าความต้องการกระแสไฟฟ้าสูงสุดของภาระทางไฟฟ้าคำนวณที่จุด PCC เป็นผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่สอดคล้องกับความต้องการสูงสุดสำหรับ 12 เดือนก่อนหน้าหารด้วย 12 สมการ (2.7)

$$I_L = \text{ผลรวมของกระแสไฟฟ้าสูงสุดสำหรับ 12 เดือน ก่อนหน้า} / 12 \quad (2.7)$$

### 2.5.3 พิกัดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกทั้งหมด (Total Rated Harmonic Distortion, TRD)

พิกัดความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกทั้งหมดหรือค่า TRD ได้รับการแนะนำโดยมาตรฐาน IEEE 1547-2018 การประเมินฮาร์มอนิกโดยค่า TRD นั้นแตกต่างจากค่า THD และค่า TDD ในมาตรฐาน IEEE 519

คำจำกัดความของค่า TRD ตามมาตรฐาน IEEE 1547-2018 คือผลรวมรากที่สองของส่วนประกอบความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า รวมทั้งฮาร์มอนิกและอินเทอร์ฮาร์มอนิกที่สร้างโดยแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายศูนย์ (Distributed Energy Resources, DER) หน่วยของ DER จะเป็นช่วงความจุของกระแสไฟฟ้าในรูปแบบของร้อยละ สำหรับการคำนวณค่า TRD แสดงในสมการ (2.8)

$$TRD(\%) = \sqrt{\frac{I_{RMS}^2 - I_1^2}{I_{RATED}}} \times 100\% \quad (2.8)$$

โดยที่  $I_{RMS}$  คือ ค่า RMS ของกระแสไฟฟ้าของ DER รวมถึงส่วนประกอบความถี่ทั้งหมดที่จุดอ้างอิงของการบังคับใช้ (Reference Point of Applicability, RPA)

$I_{RATED}$  คือ ความจุของกระแสไฟฟ้าที่อยู่ในช่วงของ DER (A)

$I_1$  คือ กระแสไฟฟ้าพื้นฐานที่ RPA (A)

จุด RPA เป็นจุดที่มีการประเมินข้อกำหนดด้านประสิทธิภาพของมาตรฐาน IEEE 1547 โดยทั่วไปแล้วจุด RPA จะเป็นจุดเดียวกันกับจุด PCC [2]

### 2.6 เรโซแนนซ์ (Resonance)

เรโซแนนซ์เป็นสถานะที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระบบไฟฟ้า ในสถานะนี้ระบบจะมีค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ (Inductive reactance) เท่ากับค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุ (Capacitive reactance) ที่ความถี่ฮาร์มอนิกบางความถี่ที่สร้างโดยภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในช่วงสถานะนี้พลังงานจะหมุนเวียนและถ่ายเทระหว่างองค์ประกอบของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุภายในระบบไฟฟ้า ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าเรโซแนนซ์ และความถี่ที่เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์เรียกว่าความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance frequency) แสดงในสมการ (2.9) เงื่อนไขสำหรับเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในระบบคือ  $X_L = X_C$  โดยที่  $X_L$  คือ ค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ และ  $X_C$  คือ ค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุ [2]

$$F_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.9)$$

โดยที่  $F_{res}$  คือ ความถี่เรโซแนนซ์ (Hertz, Hz)

$L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ (Henry, H)

$C$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ (Farad, F)

อุปกรณ์ไฟฟ้าที่สำคัญในระบบไฟฟ้ามีคุณลักษณะเป็นการเหนี่ยวนำ การใช้ตัวเก็บประจุแก้ไขตัวประกอบกำลังและวงจรกรองฮาร์มอนิกจะแนะนำคุณลักษณะของตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบสถานะเรโซแนนซ์เกิดขึ้นเพียงเพราะมีหลายความถี่ที่สร้างจากภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ความถี่ใดความถี่หนึ่ง ตามการกำหนดค่าระบบเงื่อนไขการเกิดเรโซแนนซ์แบ่งออกเป็นสองประเภทได้แก่ แบบอนุกรม (Series resonance) และแบบขนาน (Parallel resonance) [2]

### 2.6.1 เรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series resonance)

เรโซแนนซ์แบบอนุกรมเกิดขึ้นจากค่ารีแอกแตนซ์ทั้งของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกัน อิมพีแดนซ์สมมูลของระบบจะเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้าหลักในรูปแบบอนุกรม, หม้อแปลงไฟฟ้า, และตัวเก็บประจุหรือวงจรกรอง เรโซแนนซ์แบบอนุกรมทำให้อิมพีแดนซ์มีค่าต่ำนำไปสู่การเกิดกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกและส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่ไม่คาดคิดไหลผ่านอุปกรณ์ภายในระบบ เรียกว่าการขยายของกระแสไฟฟ้าในระบบ ค่าอิมพีแดนซ์ตามทฤษฎีสำหรับเรโซแนนซ์แบบอนุกรมแสดงในสมการ (2.10)

$$Z = j(X_L - X_C) = 0 \quad (2.10)$$

โดยที่  $Z$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) (Ohm,  $\Omega$ )

$X_L$  คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ (Inductive reactance) ( $\Omega$ )

$X_C$  คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ (Capacitive reactance) ( $\Omega$ )

ระหว่างสถานะเรโซแนนซ์แบบอนุกรม กระแสไฟฟ้าที่มากเกินไปอาจนำไปสู่การไหม้ของสายไฟฟ้า (wire) และฟิวส์ (fuse) การทำงานของรีเลย์ที่ไม่จำเป็น ฯลฯ [2]

จากรูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของตัวแปรภายในวงจรสมมูล แสดงในสมการต่อไปนี้ [3]

$$V_N = V_L + V_C \quad (2.11)$$

$$V_L = V_N \cdot \frac{jX_L}{jX_L - jX_C} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_L = V_N \cdot \frac{-jX_C}{jX_L - jX_C} \quad (2.13)$$

ที่ความถี่เรโซแนนซ์ความต้านทานรวมทั้งหมดของระบบ ( $Z$ ) เป็นไปตามสมการ (2.14)

$$Z = \frac{1 - \omega^2 LC}{j\omega C} \quad (2.14)$$

$$Z \rightarrow 0 \quad (2.15)$$

โดยที่  $V_N$  คือ แรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าหรือภายในโรงงานอุตสาหกรรม (V)

$V_L$  คือ แรงดันไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ (V)

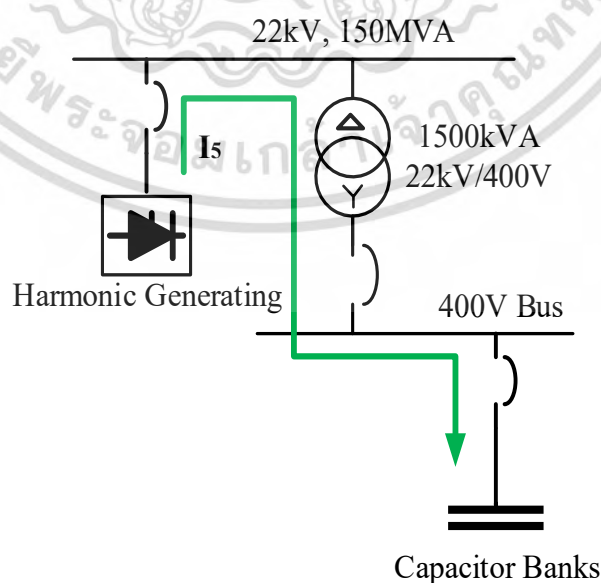
$V_C$  คือ แรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ (V)

$L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ (H)

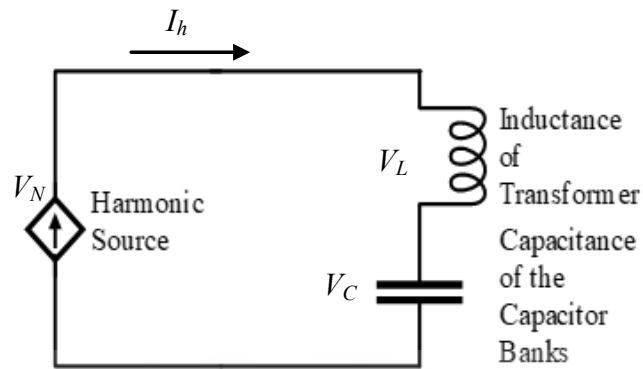
$C$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ (F)

$\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม (Radian, rad) ;  $\omega = 2\pi f$

ตัวอย่างเช่น แรงดันไฟฟ้าของโครงข่ายไฟฟ้าหลักมีความผิดเพี้ยน ในกรณีนี้วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม ซึ่งเกิดขึ้นจากความจุของชุดตัวเก็บประจุ (Capacitor bank) และการเหนี่ยวนำของไฟฟ้าลัดวงจรของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถดึงกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกสูงผ่านตัวเก็บประจุได้ เรโซแนนซ์แบบอนุกรมสามารถนำไปสู่ระดับความผิดเพี้ยนของไฟฟ้าแรงสูงที่ด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำของหม้อแปลงไฟฟ้าได้แสดงในรูปที่ 2.8 และวงจรสมมูลแสดงในรูปที่ 2.9 [4]



**รูปที่ 2.8** ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกในวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

### 2.6.2 เรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel resonance)

เรโซแนนซ์แบบขนานเกิดขึ้นจากค่ารีแอกแตนซ์ทั้งของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกัน อิมพีแดนซ์สมมูลของระบบจะเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้าหลักในรูปแบบขนาน, หม้อแปลงไฟฟ้า, และตัวเก็บประจุหรือวงจรถอง เรโซแนนซ์แบบขนานทำให้อิมพีแดนซ์สูงนำไปสู่แรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกและส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่มากเกินไปตกรวมอุปกรณ์ เรียกว่า การขยายแรงดันไฟฟ้าในระบบและส่งผลให้ตัวเก็บประจุและอุปกรณ์อื่น ๆ ทำงานล้มเหลว อิมพีแดนซ์ตามทฤษฎีสำหรับเรโซแนนซ์แบบขนานแสดงในสมการ (2.16) [2]

$$Z = \frac{(X_L \cdot X_C)}{j(X_L - X_C)} = \infty \quad (2.16)$$

โดยที่  $Z$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ ( $\Omega$ )

$X_L$  คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ ( $\Omega$ )

$X_C$  คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $\Omega$ )

จากรูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ของตัวแปรภายในวงจรสมมูล แสดงในสมการต่อไปนี้ [3]

$$I_h = I_{Ch} + I_{Sh} \quad (2.17)$$

$$I_{Ch} = \frac{R_S + jX_L}{R_S + (jX_L - jX_C)} \cdot I_h \quad (2.18)$$

$$I_{Sh} = \frac{-jX_C}{R_S + (jX_L - jX_C)} \cdot I_h \quad (2.19)$$

ที่ความถี่เรโซแนนซ์  $jX_L = jX_C$  จากสมการ (2.18) และ (2.19) จะได้

$$I_{Ch} = \frac{R_S + jX_L}{R_S} \cdot I_h \quad (2.20)$$

$$I_{Sh} = \frac{-jX_C}{R_S} \cdot I_h \quad (2.21)$$

จากสมการ (2.20) และ (2.21) ถ้า  $jX_L = jX_C > R_S$  มีค่าประมาณ 10-15 เท่า กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกอาจถูกขยายขนาดได้มากถึง 10-15 เท่า เช่นกัน และไหลผ่านกิ่งของวงจรสมมูล  $X_L$  และ  $X_C$  ที่ความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อ  $R_S \rightarrow 0$  จะได้

$$I_{Ch} = \frac{jX_L}{(jX_L - jX_C)} \cdot I_h \quad (2.22)$$

$$I_{Sh} = \frac{-jX_C}{(jX_L - jX_C)} \cdot I_h \quad (2.23)$$

ที่ความถี่เรโซแนนซ์ความต้านทานรวมทั้งหมดของระบบ ( $Z$ ) เป็นไปตามสมการ (2.24)

$$Z = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC} \quad (2.24)$$

$$Z \rightarrow \infty \quad (2.25)$$

โดยที่  $I_h$  คือ กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิก (A)

$I_{Ch}$  คือ กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านกิ่งของวงจรสมมูลตัวเก็บประจุ (A)

$I_{Sh}$  คือ กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านกิ่งของวงจรสมมูลตัวเหนี่ยวนำ (A)  
และความต้านทาน

$R_S$  คือ ความต้านทานรวมของระบบและหม้อแปลงไฟฟ้า ( $\Omega$ )

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

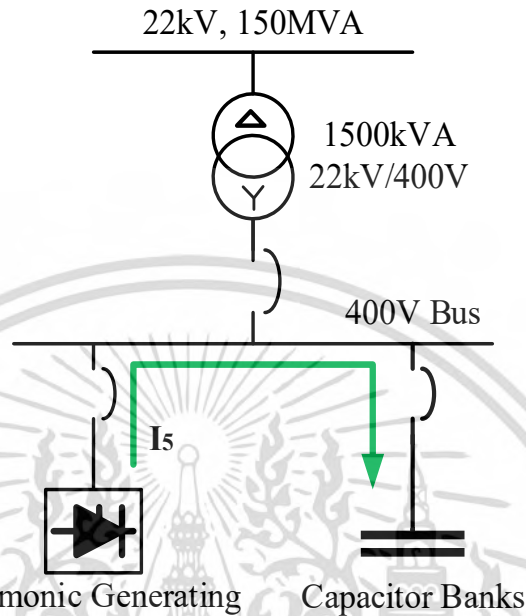
$X_L$  คือ รีแอกแตนซ์ของความเหนี่ยวนำของระบบและหม้อแปลงไฟฟ้า ( $\Omega$ )

$$; X_L = X_{NETWORK} + X_{TRANSFORMER}$$

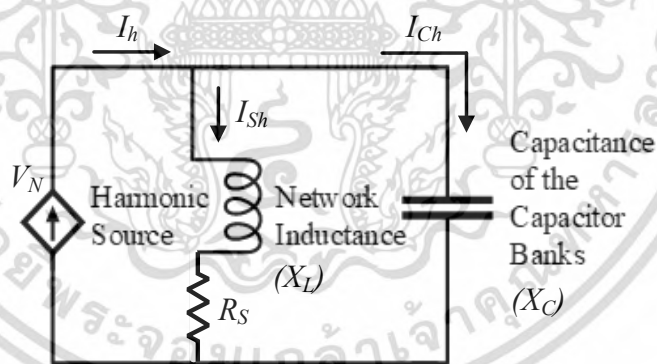
ตัวอย่างเช่น กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่ถูกสร้างขึ้นโดยไดรฟ์แบบปรับความเร็วได้ (Variable Speed Drives, VSD) สามารถถูกขยายขนาดได้ถึง 10-15 เท่า ในวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานที่เกิดขึ้นจากความจุของชุดตัวเก็บประจุและชุดตัวเหนี่ยวนำ กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่ขยายผ่านชุดตัวเก็บ-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุสามารถนำไปสู่ความร้อนที่สูงภายในหน่วยของตัวเก็บประจุที่แสดงในรูปที่ 2.10 และ วงจรสมมูลที่แสดงในรูปที่ 2.11 [4]



รูปที่ 2.10 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกในวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของเรโซแนนซ์แบบขนาน

### 2.6.3 วิธีป้องกันการเกิดเรโซแนนซ์ภายในระบบ

วิธีการป้องกันสภาวะเรโซแนนซ์ที่จะเกิดขึ้นภายในระบบมีหลากหลายวิธี ซึ่งวิธีที่ง่ายที่สุดวิธีหนึ่งคือการเพิ่มตัวเหนี่ยวนำ การเพิ่มตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับตัวเก็บประจุแต่ละตัวจะเปลี่ยนค่ารีแอกแตนซ์ของระบบเป็นแบบเหนี่ยวนำที่ความถี่เรโซแนนซ์และค่ารีแอกแตนซ์แบบตัวเก็บประจุที่ความถี่มูลฐาน เพื่อให้สามารถป้องกันการเกิดเรโซแนนซ์ ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำควรปรับให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้ากับควมถี่ที่ต่ำกว่าลำดับฮาร์โมนิกที่ต่ำที่สุดโดยขึ้นอยู่กับขนาดและลำดับของฮาร์โมนิกที่มีอยู่ในระบบ

เรโซแนนซ์สามารถเกิดขึ้นได้ที่ความถี่ใด ๆ ส่วนใหญ่เป็นฮาร์โมนิกลำดับที่ 5, 7, 11 และ 13 หรือใกล้เคียงกับความถี่เหล่านี้เนื่องจากภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะสร้างและนำกระแสไฟฟ้าฮาร์โมนิกเข้าสู่ระบบที่ฮาร์โมนิกลำดับที่ 5, 7, 11 และ 13 ความถี่เรโซแนนซ์ที่แนะนำโดยชุดตัวเก็บประจุสามารถระบุได้จากสมการ [2]

$$F_{res} = F_{fund} \times \sqrt{\frac{SC_{kVA}}{kVAR}} \quad (2.26)$$

โดยที่  $F_{res}$  คือ ความถี่เรโซแนนซ์ (Hz)

$F_{fund}$  คือ ความถี่มูลฐาน (50 Hz หรือ 60 Hz)

$SC_{kVA}$  คือ ขนาดความจุการลัดวงจร (short circuit capacity) ของระบบ  
ในหน่วย kVA (กิโลโวลต์-แอมป์)

$kVAR$  คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุในหน่วย kVAR (กิโลวาร์)

ลำดับฮาร์โมนิกที่แนะนำความถี่เรโซแนนซ์จากชุดตัวเก็บประจุสามารถระบุได้จากสมการ (2.27)

$$h = \sqrt{\frac{SC_{kVA}}{kVAR}} \quad (2.27)$$

โดยที่  $h$  คือ ลำดับฮาร์โมนิก

## 2.7 มาตรฐาน IEEE 519-2014 [5]

เนื่องจากการจัดการฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้าถือเป็นความรับผิดชอบร่วมกันที่เกี่ยวข้องกับผู้ใช้ปลายทางและเจ้าของระบบหรือผู้ปฏิบัติงาน ชีตจำกัดฮาร์โมนิกจึงเหมาะสมสำหรับทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ค่าที่แนะนำในข้อนี้อิงตามข้อเท็จจริงที่ว่าระดับความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าในระดับหนึ่งเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป และทั้งเจ้าของระบบหรือผู้ปฏิบัติงานและผู้ใช้ต้องทำงานร่วมกันเพื่อให้ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าจริงต่ำกว่าระดับที่ไม่เหมาะสม สมมติฐานพื้นฐานของชีตจำกัดที่แนะนำเหล่านี้คือการจำกัดการนำกระแสไฟฟ้าฮาร์โมนิกเข้าสู่ระบบโดยผู้ใช้ ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าสามารถอยู่ต่ำกว่าระดับที่ไม่เหมาะสม ในกรณีที่มีการจำกัดกระแสไฟฟ้าฮาร์โมนิก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพียงอย่างเดียวไม่ส่งผลให้เกิดความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าในระดับที่ยอมรับได้ เจ้าของระบบหรือผู้ปฏิบัติงานควรดำเนินการเพื่อปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของระบบเพื่อให้ระดับความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าเป็นที่ยอมรับได้ ระดับความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ยอมรับได้เป็นพื้นฐานของขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกในหัวข้อ 2.7.1

ขีดจำกัดที่แนะนำในข้อนี้ใช้เฉพาะที่จุด PCC และไม่ควรรีใช้กับอุปกรณ์แต่ละชิ้นหรือที่สถานที่ภายในสถานที่ของผู้ใช้ ในกรณีส่วนใหญ่แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่ตำแหน่งเหล่านี้ อาจพบว่ามีค่ามากกว่าขีดจำกัดที่แนะนำในจุด PCC อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากขาดความหลากหลายการยกเลิก และปรากฏการณ์อื่น ๆ ที่มีแนวโน้มลดผลกระทบรวมของแหล่งฮาร์มอนิกหลายแหล่งให้อยู่ในระดับได้ผลรวมเชิงพีชคณิต

### 2.7.1 ขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่แนะนำ

ที่จุด PCC เจ้าของระบบหรือผู้ปฏิบัติงานควรจำกัดฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้าแบบสายไลน์ถึงสายนิวทรัล ดังนี้

1. ค่าร้อยละ 99 ทุกวันเป็นเวลาสั้น ๆ (3 วินาที) ควรน้อยกว่า 1.5 เท่าของค่าที่ระบุในตารางที่ 2.1
2. ค่าเวลาสั้น ๆ ร้อยละ 95 รายสัปดาห์ (10 นาที) ควรน้อยกว่าค่าที่ระบุในตารางที่ 2.1 ค่าทั้งหมดควรเป็นร้อยละของช่วง กำลังไฟฟ้า, แรงดันไฟฟ้า, และความถี่ไฟฟ้าที่กำหนดที่จุด PCC ตารางที่ 2.1 ใช้กับแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่มีความถี่เป็นจำนวนเต็มทวีคูณของความถี่กำลัง

ตารางที่ 2.1 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า

แรงไฟฟ้าบัส $V$ ที่จุด PCC	ฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ (%)	%THD
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1.0 \text{ kV} \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5*

\* ระบบไฟฟ้าแรงดันสูงสามารถมีค่า THD สูงถึง 2.0% โดยที่สาเหตุคือขั้ว HVDC ซึ่งผลกระทบจะลดตอนที่จุดในเครือข่ายที่ผู้ใช้ในอนาคตอาจเชื่อมต่อ

### 2.7.2 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบปกติในช่วง 120 V ถึง 69 kV

ข้อจำกัดในข้อนี้ใช้กับผู้ที่ใช้ที่เชื่อมต่อกับระบบที่แรงดันไฟฟ้าที่กำหนดที่จุด PCC คือ 120 V

ถึง 69 kV ที่จุด PCC ผู้ใช้ควรจำกัดกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิก ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ร้อยละ 99 ของทุกวัน เวลาสั้นมาก (3 วินาที) กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกควรน้อยกว่า 2.0 เท่าของค่าที่ระบุในตารางที่ 2.2

2. กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกในระยะเวลายาวสั้น ๆ ร้อยละ 99 ต่อสัปดาห์ (10 นาที) ควรน้อยกว่า 1.5 เท่าของค่าที่ระบุในตารางที่ 2.2

3. กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกแบบสั้นร้อยละ 95 รายสัปดาห์ (10 นาที) ควรน้อยกว่าค่าที่ระบุในตารางที่ 2.2

ค่าทั้งหมดควรเป็นร้อยละของความต้องการสูงสุดในปัจจุบัน ( $I_L$ ) ค่าปัจจุบันนี้กำหนดขึ้นที่จุด PCC และควรใช้เป็นผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่สอดคล้องกับความต้องการสูงสุดในแต่ละเดือนก่อนหน้านั้นหารด้วย 12 ตารางที่ 2.2 ใช้กับกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่ความถี่เป็นจำนวนเต็มทวีคูณของความถี่กำลัง

ตารางที่ 2.2 ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบในวงจร 120 V ถึง 69 kV

ความผิดเพี้ยนกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกสูงสุดในหน่วย % สำหรับ $I_L$						
ลำดับฮาร์มอนิก (ฮาร์มอนิกเลขคี่)* **						
$I_{SC}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
<20***	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

\* ฮาร์มอนิกเลขคู่ถูกจำกัดไว้ที่ 25% ของขีดจำกัดฮาร์มอนิกแบบคี่ข้างต้น

\*\* ไม่อนุญาตให้มีความผิดเพี้ยนกระแสไฟฟ้าในดีซี-ออฟเซ็ท เช่น ตัวแปลงครึ่งคลื่น (Half-wave converters)

\*\*\* อุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าทั้งหมดจำกัดเฉพาะค่าความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้าเหล่านี้ โดยไม่คำนึงถึง  $I_{SC}/I_L$  จริง

โดยที่  $I_{SC}$  คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจรสูงสุดที่จุด PCC

$I_L$  คือ ค่าความต้องการกระแสไฟฟ้าสูงสุดของภาระทางไฟฟ้า (องค์ประกอบความถี่มูลฐาน) ภายใต้เงื่อนไขการทำงานของภาระทางไฟฟ้าปกติที่จุด PCC

## 2.8 บทสรุป

จากข้อมูลและทฤษฎีรวมถึงมาตรฐานที่มีความเกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่กล่าวมาข้างต้น เป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่ควรรู้สำหรับการเรียนรู้และทำความเข้าใจในเนื้อหาใจความในส่วนถัดไป ซึ่งจะกล่าวถึงปัญหาฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้น ขั้นตอนวิเคราะห์เพื่อทำการออกแบบวิธีการแก้ไขปัญหา เปรียบเทียบผลที่รับ และสรุปผลต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## วงจรกรองดีจูนและวงจรกรองจูน

ภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นสร้างกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่สามารถเดินทางไปยังตำแหน่งอื่นในระบบไฟฟ้าและกลับสู่แหล่งกำเนิดได้ กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกเป็นผลมาจากลักษณะของภาระทางไฟฟ้าเฉพาะ ทรานซิสเตอร์ที่เลือกใช้ภาระทางไฟฟ้าเหล่านั้นและสามารถสร้างผลกระทบต่าง ๆ ที่เป็นอันตรายต่อระบบไฟฟ้า ดังนั้นต้องจัดการกับความถี่จริงที่ว่ากระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกจะมีลำดับใดนั้นขึ้นอยู่กับภาระทางไฟฟ้า วิธีหนึ่งในการสร้างความมั่นใจว่ากระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่เกิดจากแหล่งกระแสไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะไม่รบกวนระบบพลังงานที่เหลืออย่างเหมาะสมคือ การกรองฮาร์มอนิกออก การใช้วงจรกรองฮาร์มอนิกช่วยให้บรรลุเป้าหมายนี้

วงจรกรองฮาร์มอนิกแบ่งออกเป็นวงจรกรองแบบพาสซีฟและแอกทีฟ วงจรกรองแบบพาสซีฟใช้ส่วนประกอบแบบพาสซีฟ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ เป็นต้น การผสมผสานของส่วนประกอบแบบพาสซีฟจะถูกปรับให้เข้ากับความถี่ฮาร์มอนิกที่จะทำการกรอง ค่าของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุจะถูกเลือกเพื่อแสดงความต้านทานต่ำต่อความถี่ฮาร์มอนิกที่จะกรองออก เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า ความถี่ฮาร์มอนิกจะหมุนเวียนระหว่างภาระทางไฟฟ้าและวงจรกรอง ซึ่งช่วยให้กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกของความถี่ที่ต้องการอยู่ห่างจากแหล่งจ่ายและภาระทางไฟฟ้าอื่น ๆ ในระบบไฟฟ้า ถ้าต้องการกรองความถี่ฮาร์มอนิกอื่น ๆ วงจรกรองจูนเพิ่มเติมจะถูกใช้ควบคู่กันไป การใช้งานเช่น เตาอาร์คต้องการวงจรกรองฮาร์มอนิกหลายวงจร เนื่องจากจะสร้างกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกปริมาณมากที่ความถี่ต่าง ๆ [1]

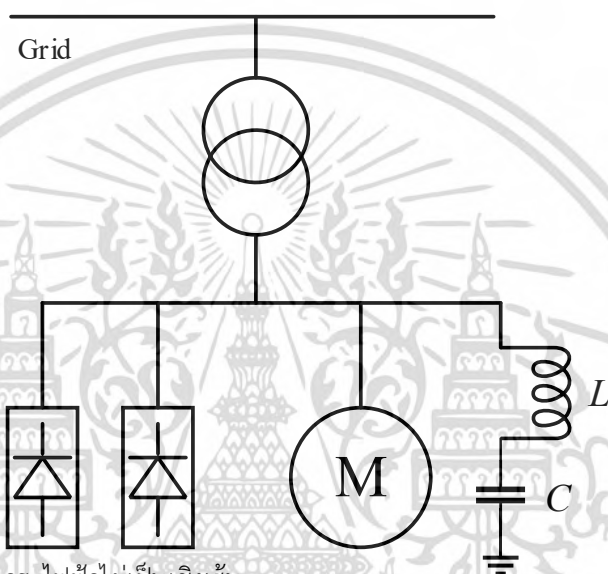
จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นวงจรกรองแบบพาสซีฟมีองค์ประกอบที่ค่อนข้างไม่ซับซ้อนโดยองค์ประกอบหลักจะใช้เป็นอุปกรณ์พาสซีฟเป็นส่วนใหญ่เช่น ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ เป็นต้น ประกอบกับข้อมูลในทางด้านวิศวกรรมและด้านเศรษฐศาสตร์ทำให้วงจรกรองแบบพาสซีฟจะเป็นตัวเลือกลำดับแรกที่ถูกนำมาแก้ปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบอุตสาหกรรมในประเทศไทย แต่ทั้งนี้ต้องพิจารณาความต้องการหรือข้อมูลปัญหาที่ได้จากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกประกอบด้วยเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เพราะฉะนั้นแล้ววิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงวงจรกรองแบบพาสซีฟเป็นหลัก

โดยวงจรกรองแบบพาสซีฟที่จะกล่าวถึงนั้นแบ่งเป็น 2 ประเภท จะใช้เกณฑ์ในการแบ่งประเภทวงจรกรองแบบพาสซีฟคือ ลักษณะการทำงานของวงจรกรอง มีดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 วงจรกรองแบบพาสซีฟประเภทดีจูน (Detuned filter)

วงจรกรองแบบพาสซีฟประเภทดีจูนหรือวงจรกรองดีจูน เป็นการร่วมกันทำงานของชุดตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อแบบอนุกรมกันซึ่งเชื่อมต่อแบบขนานกับระบบจำหน่ายภายในโรงงานหรืออุตสาหกรรมต่าง ๆ ในวงจรนี้ค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำมีค่าเป็นอัตราส่วนของค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุสำหรับการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง องค์ประกอบพื้นฐานของวงจรกรองดีจูนแสดงในรูปที่ 3.1 [6]



ภาระไฟฟ้าไม่เป็นเชิงเส้น

รูปที่ 3.1 องค์ประกอบพื้นฐานของวงจรกรองดีจูน

#### 3.1.1 องค์ประกอบพื้นฐาน

องค์ประกอบพื้นฐานของวงจรกรองดีจูนจะประกอบไปด้วยสองอุปกรณ์พาสซีฟที่เป็นพื้นฐานดังต่อไปนี้ [7], [8]

##### 1. ตัวเก็บประจุ (Capacitor)

ตัวเก็บประจุที่ใช้ภายในโรงงานอุตสาหกรรมจะมีความแตกต่างจากตัวเก็บประจุที่ใช้ในด้านอิเล็กทรอนิกส์หรือตัวเก็บประจุทั่วไป และมีความซับซ้อนกว่ามากเช่น โครงสร้าง วัสดุ เป็นต้น เนื่องจากต้องใช้งานกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงและมีความเครียดไฟฟ้าสะสมเป็นจำนวนมาก จึงต้องสามารถทนสภาพแวดล้อมดังกล่าวได้ ซึ่งเรียกตัวเก็บประจุที่ใช้ในอุตสาหกรรมว่า ตัวเก็บประจุแบงค์หรือชุดตัวเก็บประจุ (Capacitor banks) แต่โดยหลักการพื้นฐานแล้วชุดตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่ในการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน (หรือค่า VAR) ในแกระบบไฟฟ้าโดยส่วนใหญ่จะถูกนำไปใช้กับอุตสาหกรรมที่มีภาระทางไฟฟ้าประเภทมอเตอร์หรือประเภทมีการเหนี่ยวนำเป็นจำนวนมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนแล้ว การปรับปรุงตัวประกอบกำลังก็เป็นผลอันเนื่องมาจากการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนของชุดตัวเก็บประจุเช่นกัน



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างชุดตัวเก็บประจุ (Capacitor banks) ในอุตสาหกรรม

## 2. ตัวเหนี่ยวนำ (Reactor)

ตัวเหนี่ยวนำหรือรีแอคเตอร์ มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนมากโดยจะประกอบไปด้วยสองส่วนคือ แกนเป็นแกนเหล็กหรือแกนอากาศ และขดลวดตัวนำนิยมใช้วัสดุเป็นทองแดง ทำให้ตัวเหนี่ยวนำสามารถรับกำลังไฟฟ้าเสมือนส่วนเกินของระบบได้และสามารถลดกระแสไฟฟ้ากระชาก (Inrush current) ที่เกิดจากการเปิด-ปิดสวิตช์หรืออุปกรณ์ตัดต่อวงจรภายในวงจรไฟฟ้า เพราะฉะนั้นอาจกล่าวได้ว่าตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์ที่มีหน้าที่หรือสามารถจำกัดกระแสไฟฟ้าเกินของระบบได้เช่นกัน



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างตัวเหนี่ยวนำ (Reactor) ในอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 หลักการทำงาน

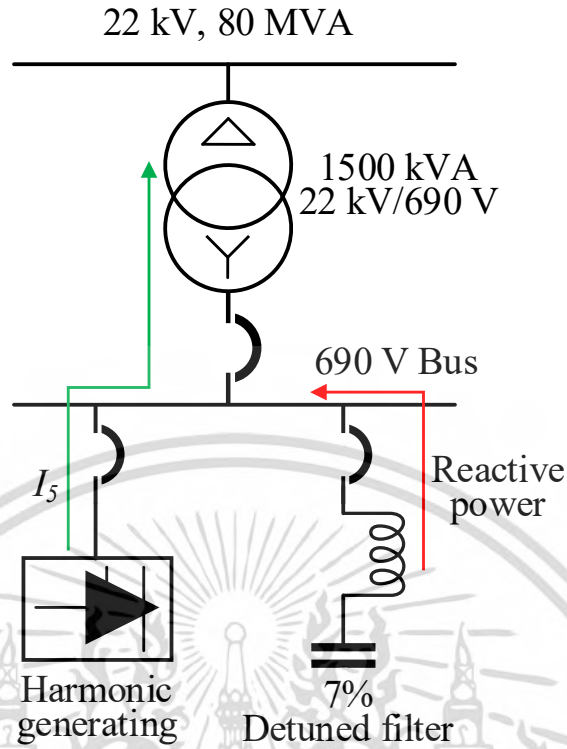
เมื่อระบบไฟฟ้ามีปัญหาฮาร์มอนิกเกิดขึ้นในระบบอันเนื่องมาจากภาระทางไฟฟ้าประเภทเหนี่ยวนำมีการใช้ปริมาณของกำลังไฟฟ้าเสมือนจากระบบเป็นจำนวนมาก ชุดตัวเก็บประจุจะถูกนำมาใช้ในการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนคืนแก่ระบบ แต่ในการเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าจากชุดตัวเก็บประจุโดยตรงหรือทันทีทันใดให้แก่ระบบที่มีฮาร์มอนิกจะทำให้มีโอกาสเกิดสภาวะเรโซแนนซ์แบบขนานได้ ส่งผลที่เป็นอันตรายต่อระบบและชุดตัวเก็บประจุ เพราะฉะนั้นแล้วเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์จึงนำรีแอกเตอร์มาต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุโดยขนาดของรีแอกเตอร์จะเป็นร้อยละอัตราส่วนระหว่างค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ ( $X_L$ ) กับค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $X_C$ ) รีแอกเตอร์จะทำหน้าที่ในการจำกัดกระแสไฟฟ้าที่เข้าไปสู่ชุดตัวเก็บประจุ แต่แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมชุดตัวเก็บประจุจะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยสามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มพิกัดการทนแรงดันไฟฟ้าของชุดตัวเก็บประจุ

ในการทำงานร่วมกันของชุดตัวเก็บประจุกับตัวเหนี่ยวนำดังที่กล่าวมาข้างต้นจะเรียกว่า วงจรกรองดีจูน จากที่กล่าวมาข้างต้นวงจรกรองดีจูนจะทำการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนให้แก่ระบบ และส่งผลให้เป็นการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไปพร้อม ๆ กัน

### 3.1.3 การออกแบบเบื้องต้น

การออกแบบวงจรกรองดีจูนมีองค์ประกอบที่ต้องคำนึงถึงดังต่อไปนี้ [4]

ทำการสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูลปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากสถานที่จริงเช่น %THDi, %THDv, ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน, แรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า เป็นต้น เพื่อนำข้อมูลจริงเบื้องต้นไปออกแบบวงจรกรองสำหรับแก้ไขปัญหานั้น ๆ โดยเครื่องมือวัดต้องมีความแม่นยำอยู่ในระดับ A (Class A) เนื่องจากจะทำให้ข้อมูลที่ได้รับความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ตัวอย่างแผงผังวงจรกรองแบบดีจูนทั่วไปที่ติดตั้งในโรงงานแห่งหนึ่งแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างแผงผังวงจรกรองคลื่นทุกในโรงงานแห่งหนึ่ง

ความถี่ในการใช้งานเป็นไปตามสมการ (3.1)

$$f_D = f_0 \times \sqrt{\frac{\%X_C}{\%X_L}} \tag{3.1}$$

- โดยที่  $f_D$  คือ ความถี่ดีจูน (Detuning frequency) (Hz)
- $f_0$  คือ ความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency, 50 หรือ 60 Hz)
- $\%X_L$  คือ ค่าร้อยละของรีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ
- $\%X_C$  คือ ค่าร้อยละของรีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ

จากสมการ (3.1) ถ้าความถี่ดีจูนเท่ากับ 189 Hz จะมีความสอดคล้องกับการเลือกใช้รีแอกเตอร์ที่มีขนาดเป็น 7% แต่ถ้าความถี่ดีจูนเท่ากับ 204 Hz จะมีความสอดคล้องกับการเลือกใช้รีแอกเตอร์ที่มีขนาดเป็น 6%

กำลังไฟฟ้าเสมือน พิจารณาดังต่อไปนี้

$$V_N = V_C + V_{X_L} = I \cdot (X_C - X_L) = I \cdot X_C (1 - (X_L/X_C)) \tag{3.2}$$

$$p = (Q_L/Q_C) \times 100\% \tag{3.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_L = V^2/X_L \text{ and } Q_C = V^2/X_C \quad (3.4)$$

$$V_C = V_N \cdot \frac{1}{(1 - 0.01p)} \quad (3.5)$$

$$Q_{C1} = V_{N1}^2/X_C, X_L = 0 \text{ and } Q_{C2} = V_{N2}^2/(X_C - X_L) \quad (3.6)$$

$$\frac{Q_{C2}}{Q_{C1}} = \left(\frac{V_{N2}}{V_{N1}}\right)^2 \cdot \frac{1}{(1 - 0.01p)} \quad (3.7)$$

โดยที่  $V_N$  คือ แรงดันไฟฟ้าของระบบภายในโรงงาน (V)

$V_C$  คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V)

$V_{X_L}$  คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ (V)

$X_L$  คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ ( $\Omega$ )

$X_C$  คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $\Omega$ )

$p$  คือ ร้อยละของค่า  $Q_L$  กับ  $Q_C$  (%)

$Q_L$  คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเหนี่ยวนำ (kVAR)

$Q_C$  คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุ (kVAR)

1, 2 เลขห้อยเป็นค่าของระบบก่อนและหลังตามลำดับ

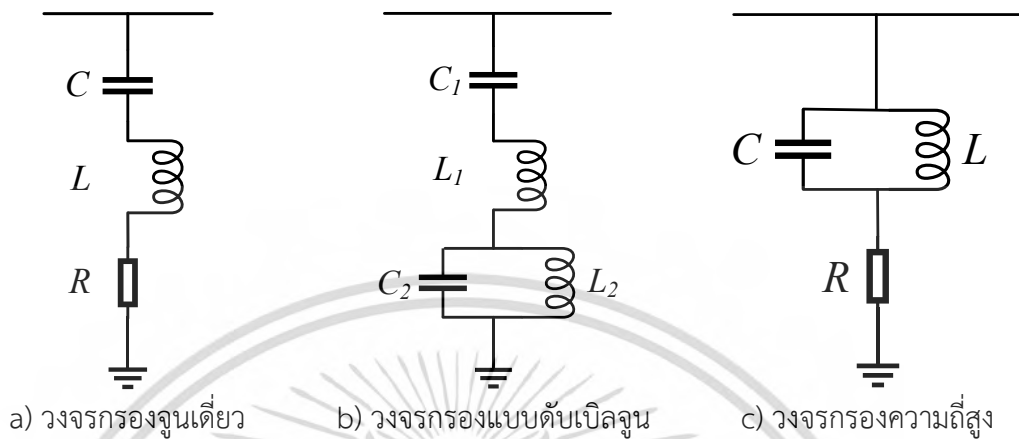
ตัวเก็บประจุที่ใช้ทั่วไปในประเทศไทยสำหรับการแก้ปัญหาฮาร์มอนิก นิยมใช้ที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า 525 V ดังนั้นในวงจรกรองดีจูนที่ 7% ถ้าใช้ตัวเก็บประจุขนาด 200 kVAR ที่พิกัดแรงดันไฟฟ้า 525 V และ 400 V จะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนได้แตกต่างกัน เมื่อคำนวณจากสมการ (3.7) สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของวงจรกรองดีจูนที่ 7% เท่ากับ 124.84 kVAR

วงจรกรองดีจูนจะถูกออกแบบให้มีการทำงานที่ความถี่ดีจูนที่มีค่าต่ำกว่าความถี่ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบหรือโรงงานอุตสาหกรรม และทำการเลือกขนาดรีแอกเตอร์ (%) ที่สอดคล้องกับชุดตัวเก็บประจุเพื่อทำงานร่วมกัน จะสามารถช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดสภาวะเรโซแนนซ์แบบขนานขึ้นกับชุดตัวเก็บประจุที่ติดตั้งอยู่ภายในระบบ เพราะถ้าชุดตัวเก็บประจุเกิดความเสียหายจะส่งผลกระทบต่อไปยังส่วนอื่น ๆ ภายในโรงงานอุตสาหกรรม

### 3.2 วงจรกรองแบบพาสซีฟประเภทจูน (Tuned filter)

วงจรกรองแบบพาสซีฟประเภทจูนหรือวงจรกรองจูน คือการผสมผสานที่เหมาะสมของตัวเก็บประจุ ตัวเหนี่ยวนำ (รีแอกเตอร์) และตัวต้านทาน (หรือใช้ความต้านทานที่ได้รับจากตัวเหนี่ยวนำ) เมื่อเชื่อมต่อกันกับแหล่งฮาร์มอนิก จะสามารถกรองฮาร์มอนิกและชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนไปพร้อมกัน สามารถแบ่งออกได้อีกเป็นวงจรกรองจูนเดี่ยว (Single-tuned filter) วงจรกรองแบบ-

ดับเบิลจูน (Double-tuned filter) และวงจรรองความถี่สูง (High-pass filter) โดยประเภทแรก และประเภทที่สามมักเป็นที่นิยมในการใช้งาน แสดงแผนผังวงจรอย่างง่ายในรูปที่ 3.5 [9]



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างแผนผังวงจรอย่างง่ายของวงจรรองแบบพาสซีฟ

### 3.2.1 หลักการทำงาน

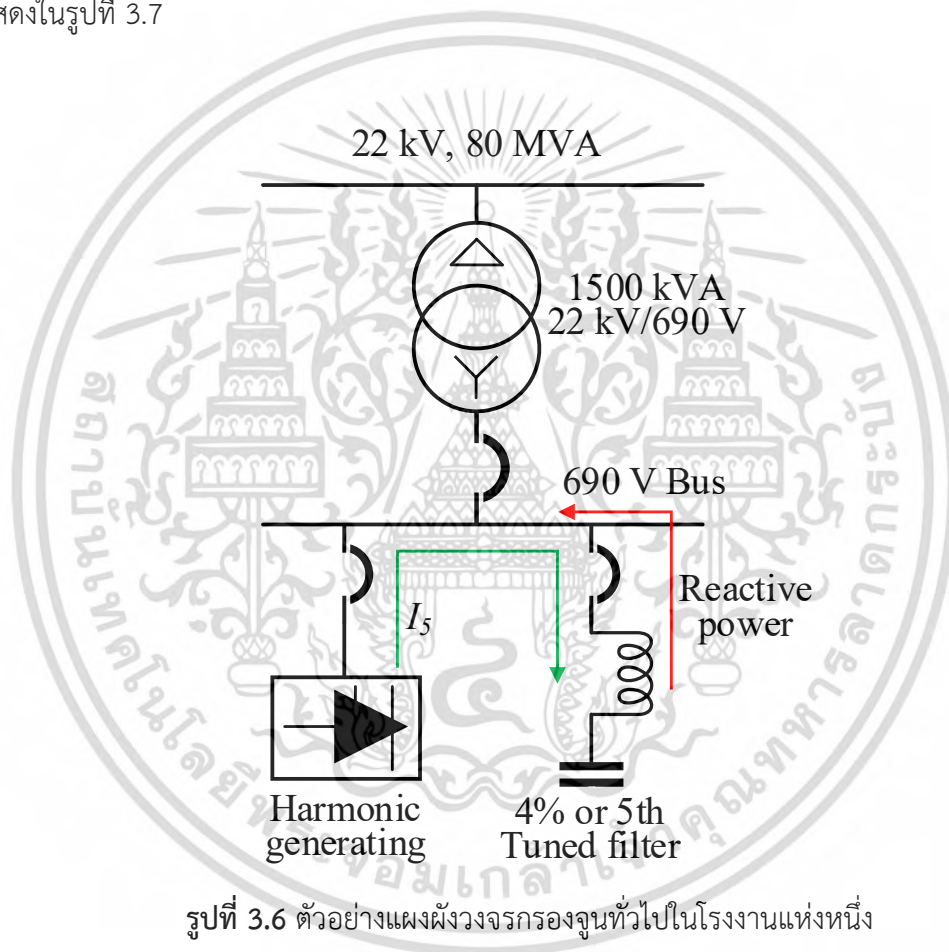
วงจรรองแบบพาสซีฟจะสร้างกำลังไฟฟ้าเสมือนแบบเหนี่ยวนำ (Capacitive reactive power) ที่ความถี่มูลฐาน วงจรรองจะแสดงพฤติกรรมของมันเป็นในลักษณะที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำระหว่างเฟสและจุดสตาร์ (Star point) หรือระหว่างเฟสเพียงอย่างเดียวโดยการปรับความถี่เพื่อให้ฮาร์มอนิกที่ความถี่สูงไหลเข้าสู่จูนและเครือข่ายการป้อน (Feeding network) ตามข้อกำหนดวงจรเชื่อมต่อในระดับแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมในแต่ละเครือข่าย วงจรรองจะมีมากกว่าหนึ่งสาขาของวงจรขึ้นไป แต่ละสาขานั้นได้รับการจูนให้เป็นความถี่ฮาร์มอนิกที่ปรากฏในเครือข่ายที่เป็นปัญหา วงจรรองสามารถลดฮาร์มอนิกได้ 60-90% ผลลัพธ์ของการกำจัดฮาร์มอนิกจะมีประสิทธิภาพมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของเครือข่ายแหล่งจ่ายไฟฟ้าและศักยภาพของวงจรรอง ส่วนประกอบวงจรรองอาจได้รับการจูนเพื่อให้มีการแบ่งเส้นทางที่อิมพีแดนซ์ต่ำไปยังความถี่ที่เฉพาะเจาะจง วงจรรองแบบจูนเดี่ยวเป็นวงจรรองที่มีความนิยมสามารถช่วยลดกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกและจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ความถี่มูลฐานบางส่วนหรือทั้งหมดที่จำเป็นสำหรับการปรับปรุงตัวประกอบกำลัง ความชัดเจนในการจูนจะถูกกำหนดด้วยปัจจัยด้านคุณภาพของตัวเหนี่ยวนำ สำหรับข้อเสียที่สำคัญของการใช้วงจรรองจูนเดี่ยวแบบขั้นหรือแบบแบ่ง (Single tuned shunt filter) คือปัญหาสถานะเรโซแนนซ์ที่มักเกิดขึ้นเมื่อติดตั้งวงจรรองไว้ในระบบแต่ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้และสามารถแก้ไขแนวทางตัวประกอบกำลังให้เป็นเอกภาพ (Unity power factor) ได้ [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

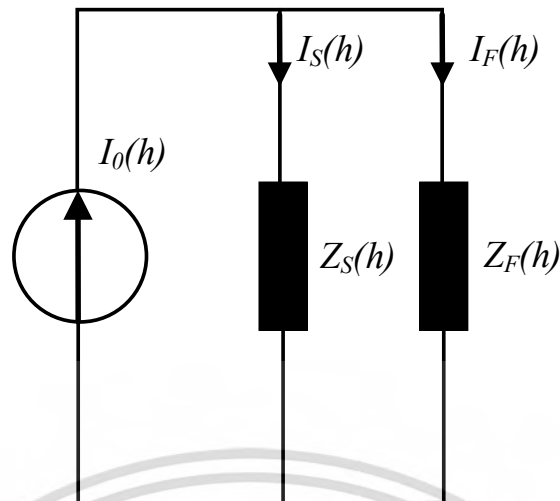
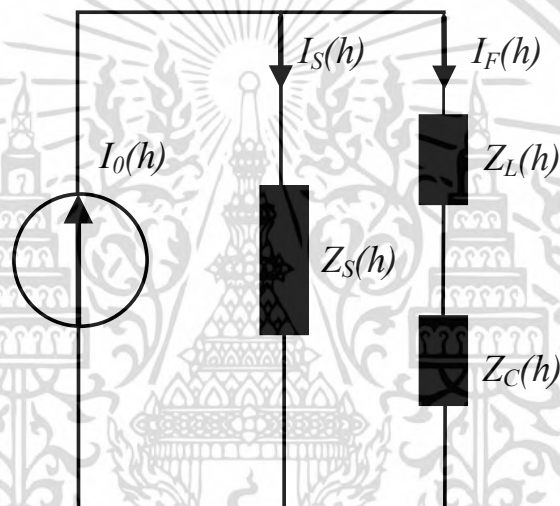
### 3.2.2 การออกแบบเบื้องต้น

การออกแบบวงจรกรองดีจูนมีองค์ประกอบที่ต้องคำนึงถึงดังต่อไปนี้ [11]

ทำการสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูลปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากสถานที่จริงเช่น %THDi, %THDv, ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน, แรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้า เป็นต้น เพื่อนำข้อมูลจริงเบื้องต้นไปออกแบบวงจรกรองสำหรับแก้ไขปัญหานั้น ๆ โดยเครื่องมือวัดต้องมีความแม่นยำอยู่ในระดับ A (Class A) เนื่องจากจะทำให้ข้อมูลที่ได้รับมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ตัวอย่างแผงผังวงจรกรองแบบจูนทั่วไปที่ติดตั้งในโรงงานแห่งหนึ่งแสดงในรูปที่ 3.6 และวงจรสมมูลแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างแผงผังวงจรกรองจูนทั่วไปในโรงงานแห่งหนึ่ง

a) วงจรสมมูลสำหรับตัวแปร  $Z_F(h)$ b) วงจรสมมูลสำหรับตัวแปร  $Z_L(h)$  และ  $Z_C(h)$ 

รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลของแผงผังวงจรรองจูนในรูปที่ 3.6

แหล่งจ่ายและวงจรรองฮาร์โมนิกแบบจูนจะถูกจำลองเป็นองค์ประกอบอิมพีแดนซ์ เพราะฉะนั้นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $I_0(h)$ ,  $I_S(h)$ ,  $I_F(h)$ ,  $V_S(h)$ ,  $Z_S(h)$  และ  $Z_F(h)$  จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3.7a) รวมถึงกระแสไฟฟ้าฮาร์โมนิกที่ส่งไปยังแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับวงจรรองและแรงดันไฟฟ้าฮาร์โมนิกที่บัส (Bus) เป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$I_S(h) = \frac{Z_F(h)}{Z_F(h) + Z_S(h)} \cdot I_0(h) \quad (3.8)$$

$$I_F(h) = \frac{Z_S(h)}{Z_F(h) + Z_S(h)} \cdot I_0(h) \quad (3.9)$$

$$V_S(h) = \frac{Z_F(h) \cdot Z_S(h)}{Z_F(h) + Z_S(h)} \cdot I_0(h) \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_L(h) = Z_L(h) \cdot I_F(h) = Z_L(h) \cdot \frac{Z_S(h)}{Z_F(h)+Z_S(h)} \cdot I_0(h) \quad (3.11)$$

$$V_C(h) = Z_C(h) \cdot I_F(h) = Z_C(h) \cdot \frac{Z_S(h)}{Z_F(h)+Z_S(h)} \cdot I_0(h) \quad (3.12)$$

โดยที่  $I_0(h)$  คือ กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก (A)

$I_S(h)$  คือ กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่ระบบ (A)

$I_F(h)$  คือ กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกไหลเข้าสู่วงจรกรอง (A)

$V_S(h)$  คือ แรงดันไฟฟ้าของระบบ (V)

$Z_S(h)$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบ ( $\Omega$ )

$Z_F(h)$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรกรอง ( $\Omega$ )

$Z_L(h)$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำในวงจรกรอง ( $\Omega$ )

$Z_C(h)$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุในวงจรกรอง ( $\Omega$ )

ตัวอย่างที่นำเสนอเป็นวิธีแก้ปัญหาฮาร์มอนิกที่มี %THDv เกินค่ามาตรฐาน สามารถวัดกระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกและสเปกตรัมได้

$$Z = R + \left( j\omega_n L - \frac{1}{j\omega_n C} \right) = R \quad (3.13)$$

โดยที่  $Z$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ ( $\Omega$ )

$R$  คือ ค่าความต้านทาน ( $\Omega$ )

$L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ (H)

$C$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ (F)

$\omega_n$  คือ ความถี่จูนในหน่วยเรเดียน (rad)

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.14)$$

ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรกรองฮาร์มอนิกจะสามารถทราบได้จากแหล่งผลิตที่มีการใช้งานอยู่แล้วทั่ว ๆ ไปมีหน่วยเป็นไมโครฟารัด ( $\mu\text{F}$ ) เพราะจะเป็นค่าจริงของอุปกรณ์ ส่วนค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำ สามารถพิจารณาได้จากสมการ (3.15)

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C} \quad (3.15)$$

โดยที่  $f$  คือ ความถี่ (Hz)

ค่ารีแอคแตนซ์และค่ากระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำในวงจรกรองที่ความถี่ฮาร์มอนิกเป็นไปตามสมการ (3.16) และ (3.17) ตามลำดับ

$$Z_L(h) = j\omega_h L \quad (3.16)$$

$$I_F(h) = \frac{V_S(h)}{\left(j\omega_h L - \frac{1}{j\omega_h C}\right)} \quad (3.17)$$

โดยที่  $\omega_h$  คือ ความถี่ฮาร์มอนิกในหน่วยเรเดียน (rad)

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ ( $V_L(h)$ ) ในรูปที่ 3.7b) ที่ความถี่ฮาร์มอนิกสามารถพิจารณาได้จากสมการ (3.11) และ (3.16) จะได้ว่า

$$V_L(h) = Z_L(h) \cdot I_F(h) = j\omega_h L \cdot \left( \frac{V_S(h)}{\left(j\omega_h L - \frac{1}{j\omega_h C}\right)} \right) \quad (3.18)$$

$$V_L(h) = \frac{V_S(h)}{\left(1 + \frac{1}{\omega_h^2 LC}\right)} \quad (3.19)$$

ค่ารีแอคแตนซ์และค่ากระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุในวงจรกรองที่ความถี่ฮาร์มอนิกเป็นไปตามสมการ (3.20) และ (3.21) ตามลำดับ

$$Z_C(h) = \frac{1}{j\omega_h C} \quad (3.20)$$

$$I_F(h) = \frac{V_S(h)}{\left(j\omega_h L - \frac{1}{j\omega_h C}\right)} \quad (3.21)$$

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ ( $V_C(h)$ ) ในรูปที่ 3.7b) ที่ความถี่ฮาร์มอนิกสามารถพิจารณาได้จากสมการ (3.12) และ (3.20) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_C(h) = Z_C(h) \cdot I_F(h) = \frac{1}{j\omega_h C} \cdot \left( \frac{V_S(h)}{j\omega_h L - \frac{1}{j\omega_h C}} \right) \quad (3.22)$$

$$V_C(h) = -\frac{V_S(h)}{(\omega_h^2 LC + 1)} \quad (3.23)$$

จากสมการ (3.19) และ (3.23) ทำให้สามารถคาดการณ์ค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ ( $V_C(h)$ ) และตัวเหนี่ยวนำ ( $V_L(h)$ ) ได้เป็นข้อมูลเบื้องต้น ในการใช้งานในสถานการณ์จริง เป็นสภาวะปกติที่จะเกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมบนอุปกรณ์ แต่อาจจะมีการแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่สูงไหลเข้ามาทำให้มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมากถึง 120 V ถึงแม้ว่าจะมีโอกาสเกิดขึ้นน้อยก็ตามแต่ต้องทำการป้องกันไว้เป็นอันดับแรก ๆ เพื่อให้ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำสามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวได้

จากขั้นตอนการหาค่าต่าง ๆ เพื่อทำการออกแบบวงจรกรองจูนเดี่ยวที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ จะมีอีกหนึ่งค่าสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเช่นกัน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นขั้นตอนหรือเทคนิคอย่างง่ายในการที่จะเลือกใช้วงจรกรองจูนเดี่ยวมากำจัดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ คือ ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนรวมของระบบจะมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าเสมือนรวมของวงจรกรองฮาร์มอนิก

$$Q_{System} = Q_{Filter} \quad (3.24)$$

โดยที่  $Q_{System}$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนรวมของระบบที่ได้จากการวัด (kVAR)

$Q_{Filter}$  คือ ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนรวมของวงจรกรองฮาร์มอนิก (kVAR)

$$Q_{System} = Q_{F1} + Q_{F2} + Q_{F3} + \dots + Q_{Fn} \quad (3.25)$$

โดยที่  $n$  คือ จำนวนกิ่งหรือสาขาของวงจรกรองฮาร์มอนิก

$$Q_{F1} = Q_{F2} = Q_{F3} = Q_{Fn} \quad (3.26)$$

ตัวเก็บประจุโดยทั่วไปที่ใช้กับวงจรกรองฮาร์มอนิกจะมีพิกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ 40, 50, 60, 75, 80, 90, 100 และ 120 kVAR ที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าที่ 400, 525, 600, 690, 800, 870 และ 1,000 V จากค่าพิกัดดังกล่าวทำให้ตัวเก็บประจุเหล่านี้จะครอบคลุมการออกแบบวงจรกรองที่ระดับแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 1,000 V ขั้นตอนข้างต้นเป็นวิธีที่เรียบง่ายแต่อย่างไรก็ตามการวัดและเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบยังคงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างมากในการเริ่มต้นการออกแบบวงจรกรองซึ่งอาจใช้สมการ (3.17) ประกอบกัน ดังนั้นจึงมีข้อควรปฏิบัติในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบดังต่อไปนี้

- ในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนควรใช้เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (Power meter) ในระดับ A (Class A) สามารถทำการวัดซ้ำจนกว่าจะมั่นใจว่าสามารถนำข้อมูลไปใช้ได้

- ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่วัดในแรงดันไฟฟ้าปกติอาจจะมีการเพิ่มขึ้นตามพิกัดแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ

- การเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าระบบไฟฟ้าเป็นแนวทางการปฏิบัติทางวิศวกรรมที่ควรทำถึงแม้ว่าจะมีการลงทุนที่สูงขึ้นแต่มีความคุ้มค่าการลงทุน เนื่องจากตัวเก็บประจุจะสามารถทนต่อแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นและฮาร์มอนิกที่สูงขึ้นได้เช่นกัน

วงจรกรองฮาร์มอนิกทั้งสองประเภทได้แก่ วงจรกรองดีจูนและวงจรกรองจูนหรือวงจรกรองแบบพาสซีฟที่กล่าวมานั้นมีลักษณะการทำงานที่คล้ายคลึงกันในส่วนกล่าวคือวงจรกรองดีจูนจะมีการทำงานที่ไม่สอดคล้องกับความถี่ฮาร์มอนิกแต่วงจรกรองแบบพาสซีฟจะถูกคำนวณและปรับแก้ให้สอดคล้องกับความถี่ฮาร์มอนิกที่มีค่าสูงจนเกินไป ทำให้เกิดเป็นปัญหาในการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในระบบอุตสาหกรรม สำหรับวงจรกรองดีจูนจะได้รับความนิยมมากกว่าในประเทศไทยด้วยเหตุผลทางด้านวิศวกรรมและด้านเศรษฐศาสตร์ประกอบกันไป แต่จากการสำรวจตัวอย่างโรงงานอุตสาหกรรมพบปัญหาจากการใช้วงจรกรองดีจูนที่ 7% เป็นส่วนใหญ่ จะแสดงในส่วนถัดไปถึงปัญหาที่พบและการแก้ไขปัญหาดังกล่าว

### 3.3 บทสรุป

จากองค์ความรู้ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นความรู้ขั้นพื้นฐานในเรื่องของส่วนประกอบ หลักการทำงาน และการออกแบบของวงจรกรองฮาร์มอนิกที่จะถูกกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อทำให้เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับวงจรกรองฮาร์มอนิกเพิ่มขึ้นซึ่งจะเป็นส่วนหนึ่งหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าหนึ่งประเภทที่สามารถเข้ามาแก้ปัญหาทางด้านคุณภาพไฟฟ้าได้ โดยเฉพาะปัญหาฮาร์มอนิก จะแสดงในส่วนถัดไป

## บทที่ 4

# ขั้นตอนการดำเนินงานและการออกแบบ

### 4.1 ปัญหาที่พบ

จากการสำรวจภายในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ พบว่าความเสียหายของอุปกรณ์ไฟฟ้าในส่วนของวงจรรองฮาร์มอนิกและตัวเก็บประจุโดยที่วงจรรองฮาร์มอนิกส่วนใหญ่ที่โรงงานเลือกใช้ในการแก้ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าจะเป็นวงจรรองดีจูนที่ 7% เป็นความเสียหายอันเนื่องมาจากมีฮาร์มอนิกอยู่ในระบบไฟฟ้ามีขนาดที่ไม่สูงมากนักทั้งในส่วนของความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าและความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้าแต่ยังคงเกิดความเสียหายขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าตัวอย่างเช่น รีแอกเตอร์ใหม่ ฟิวส์ขาด แมกเนติกคอนแทคเตอร์ (Magnetic Contactor) เสียหายบริเวณหน้าสัมผัสละลายติดกัน สายไฟฟ้าขาดและขึ้นสนิมทองแดงหรือออกซิเจนของทองแดง อุณหภูมิสูงมีความร้อนมาก เป็นต้น สันนิษฐานว่าอาจจะเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ขึ้นในระบบ ตัวอย่างความเสียหายดังกล่าวแสดงในรูปที่ 4.1-4.4

#### 4.1.1 ความเสียหายที่เกิดจากความผิดเพี้ยนสูง (High distortion)

ตัวอย่างของความเสียหายอย่างรุนแรงต่อวงจรรองดีจูนที่ 7% ซึ่งติดตั้งภายในโรงงานที่สำรวจเกิดจากสภาวะเรโซแนนซ์ภายในระบบที่อาจจะมีอยู่ ประกอบกับการขยายขนาดโดยการติดตั้งวงจรรองดีจูนทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรรองทั่วทั้งระบบ เกิดความร้อนสะสมส่งผลให้อุปกรณ์ไฟฟ้าภายในวงจรเสียหาย

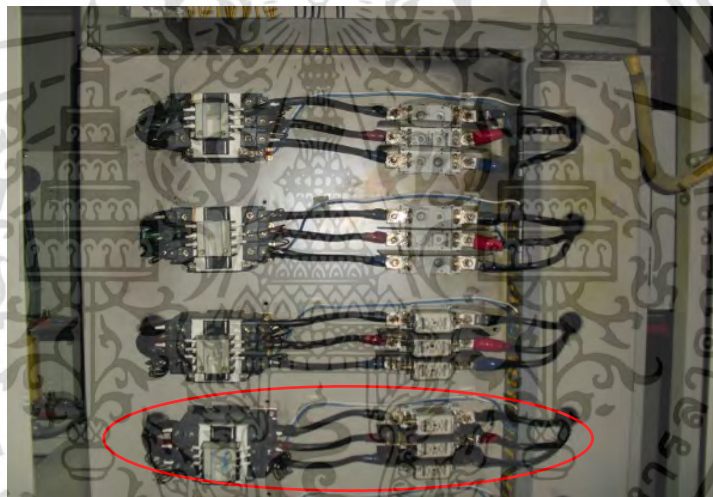


รูปที่ 4.1 ความเสียหายของรีแอกเตอร์ของวงจรรองฮาร์มอนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ความเสียหายของรีแอคเตอร์ของวงจรกรองฮาร์มอนิก (ต่อ)



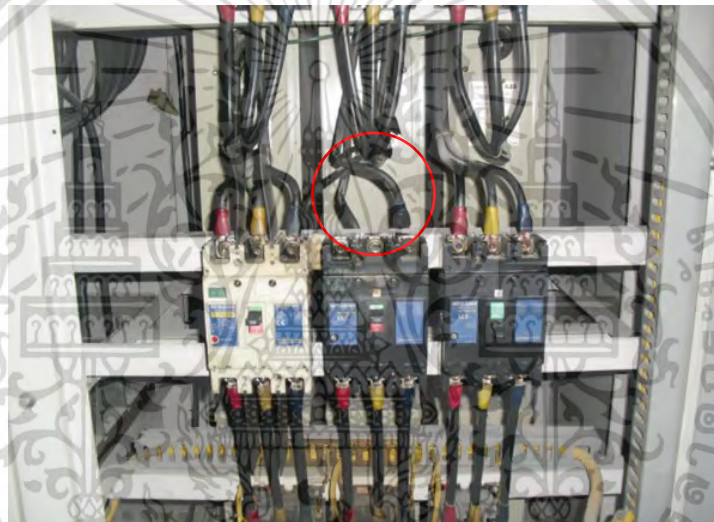
a) ฟิวส์และแมกเนติกคอนแทคเตอร์



b) สายไฟฟ้า

รูปที่ 4.2 ความเสียหายของฟิวส์ แมกเนติกคอนแทคเตอร์ และสายไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



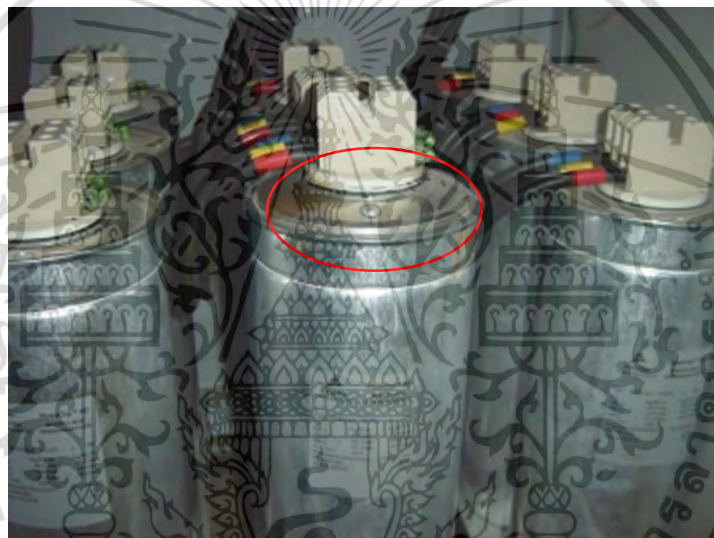
รูปที่ 4.3 ความเสียหายของเบรกเกอร์ MCCB (Molded Case Circuit Breaker)

#### 4.1.2 ความเสียหายที่เกิดจากความผิดเพี้ยนต่ำ (Low distortion)

ตัวอย่างความเสียหายในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่าความรุนแรงของเหตุการณ์นั้นเล็กน้อยแต่สามารถส่งผลกระทบต่อส่วนอื่น ๆ ของระบบ สาเหตุของความเสียหายที่เกิดขึ้นคล้ายคลึงกับความเสียหายรุนแรงที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ ความเสียหายที่เกิดขึ้นเป็นรอยไหม้ของตัวเก็บประจุ มีลักษณะบวมและการจุดเชื่อมต่อขาดหายไป



a) ที่จุดเชื่อมต่อ



b) บริเวณที่บวม

รูปที่ 4.4 ความเสียหายของตัวเก็บประจุ

## 4.2 ตัวอย่างข้อมูลจากการสำรวจโรงงานอุตสาหกรรม

โรงงานอุตสาหกรรมที่ได้ไปทำการสำรวจทางด้านคุณภาพไฟฟ้าส่วนใหญ่แล้วจะเลือกใช้วิธีการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกโดยการใช้วงจรกรองดีจันที่ 7% ซึ่งพบปัญหาดังที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ ตัวอย่างข้อมูลของค่าต่าง ๆ ทางด้านไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรมจะแสดงให้เห็นปัญหาที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น แสดงในตารางที่ 4.1-4.5

โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะติดตั้งวงจรกรองในลักษณะการเพิ่มตัวเก็บประจุอย่างเป็นลำดับขั้นเช่น วงจรกรองดีจันที่ 7% แบบ 4 ชั้น เป็นต้น กล่าวคือหลักการอย่างง่ายระบบของการกรองฮาร์มอนิกจะทำงานเป็นลำดับขั้นโดยจะมีการเพิ่มขนาดรีแอคเตอร์และตัวเก็บประจุทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4 ชั้น (ตามตัวอย่างดังกล่าว) เพิ่มเข้าไปในระบบเป็นลำดับ ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับความต้องการใช้กำลังไฟฟ้าเสมือนและปริมาณฮาร์มอนิกของระบบ ณ ช่วงเวลานั้น ปริมาณการใช้ไฟฟ้าของภาระทางไฟฟ้าจะส่งผลต่อปริมาณความต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนและปริมาณฮาร์มอนิกของระบบสืบเนื่องกันไปเป็นช่วง ๆ

#### 4.2.1 ตัวอย่างโรงงานที่ 1

ระบบไฟฟ้าของโรงงานแห่งนี้ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 1 ขนาด 2,500 kVA หม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 2 ขนาด 2,500 kVA และหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 3 ขนาด 1,600 kVA ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 220 V

หม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 1 มีการติดตั้งวงจรรองฮาร์มอนิกเดิมที่เป็นวงจรรองดีจูนที่ 7% แบบ 4 ชั้น ประกอบด้วย รีแอกเตอร์ 4 หน่วย และตัวเก็บประจุขนาด 40 kVAR ทั้งหมด 12 หน่วย ปัญหาที่พบเมื่อใช้งานวงจรรองนี้ไประยะหนึ่งตัวเก็บประจุเสียหาย 4 หน่วย และได้ทำการเปลี่ยนแทนที่ในส่วนที่เสียหาย ในเวลาถัดมาตัวเก็บประจุเสียหายอีกครั้งหนึ่งโดยเสียหายไป 2 ชิ้น ทั้งหมด 6 หน่วย ภายในเวลาไม่กี่เดือน ข้อมูลของค่าทางไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 4.1

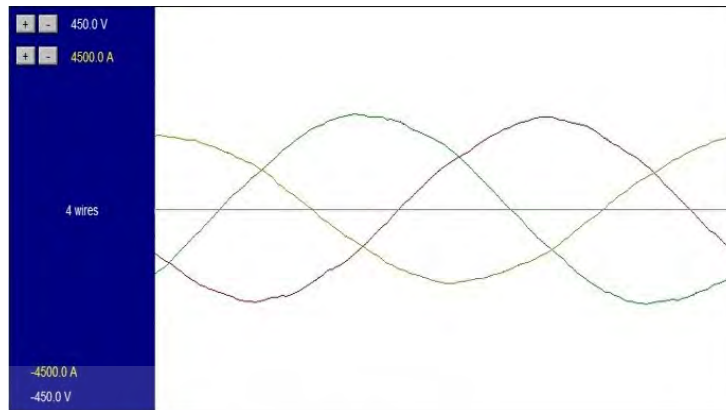
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลระบบไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 1 ภายในตัวอย่างโรงงานที่ 1

Phase	$V_{rms}$ (V)	$I_{rms}$ (A)	%THDv	%THDi	$V_{Line}$
1	223.66	1482.465	1.19	2.20	387.80
2	229.38	1418.657	1.23	2.19	388.36
3	219.30	1136.492	1.37	2.17	388.15
Total	$I_{null}$	386.174			

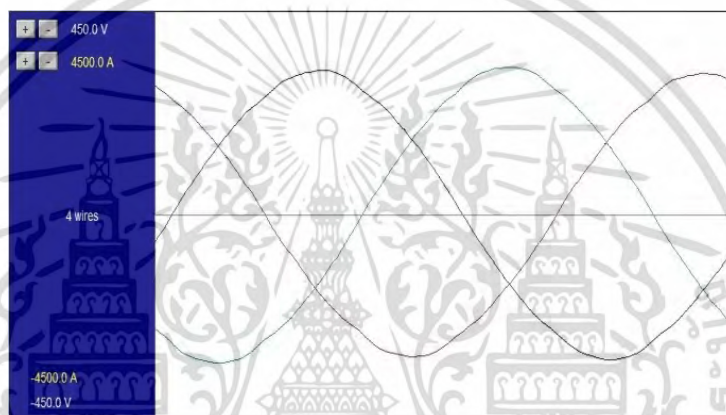
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลระบบไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 1 ภายในตัวอย่างโรงงานที่ 1 (ต่อ)

Phase	S (kVA)	P (kW)	Q (kVAR)	pf.	Freq (Hz)
1	331.568	286.808	166.369	0.865	
2	325.410	298.202	130.258	0.916	
3	249.238	217.240	122.174	0.872	
Total	904.986	802.250	418.801	0.89	49.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 1 ภายในตัวอย่างโรงงานที่ 1



รูปที่ 4.6 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 1 ภายในตัวอย่างโรงงานที่ 1

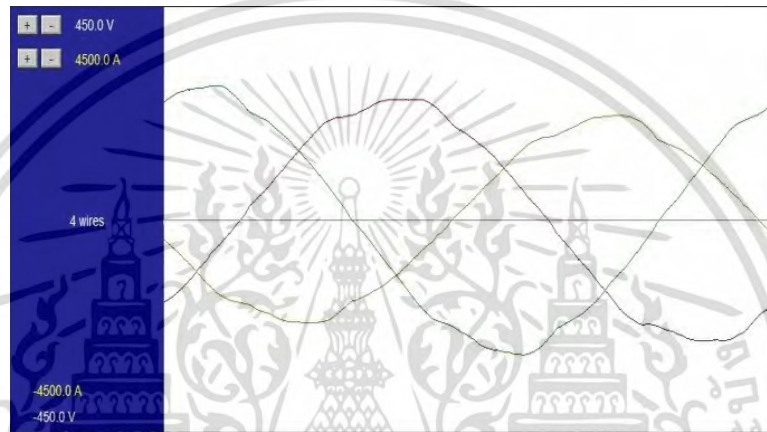
หม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 2 มีการติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิกเดิมที่เป็นวงจรกรองดีจูนที่ 7% แบบ 4 ชั้น ประกอบด้วย รีแอกเตอร์ 4 หน่วย และตัวเก็บประจุขนาด 40 kVAR ทั้งหมด 12 หน่วย ปัญหาที่พบเมื่อใช้งานวงจรกรองนี้ไประยะหนึ่งตัวเก็บประจุเสียหาย 3 หน่วย และได้ทำการเปลี่ยนแทนที่ในส่วนที่เสียหาย ในเวลาถัดมาตัวเก็บประจุเสียหายอีกครั้งหนึ่งโดยเสียหายไป 3 ชิ้น ทั้งหมด 9 หน่วย ภายในเวลาไม่กี่เดือน ข้อมูลของค่าทางไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลระบบไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 2 ภายในตัวอย่างโรงงานที่ 1

Phase	$V_{rms}$ (V)	$I_{rms}$ (A)	%THDv	%THDi	$V_{Line}$
1	221.16	1947.580	1.41	2.93	384.01
2	227.63	1801.077	1.44	3.16	384.95
3	216.81	1509.311	1.67	3.38	383.68
Total	$I_{null}$	440.760			

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลระบบไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 2 ภายในตัวอย่างโรงงานที่ 1 (ต่อ)

Phase	S (kVA)	P (kW)	Q (kVAR)	pf.	Freq (Hz)
1	430.717	361.142	234.721	0.838	
2	409.988	359.893	196.384	0.878	
3	327.239	274.353	178.371	0.838	
Total	1167.158	995.388	609.476	0.85	49.77



รูปที่ 4.7 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 2 ภายในตัวอย่างโรงงานที่ 1



รูปที่ 4.8 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 2 ภายในตัวอย่างโรงงานที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

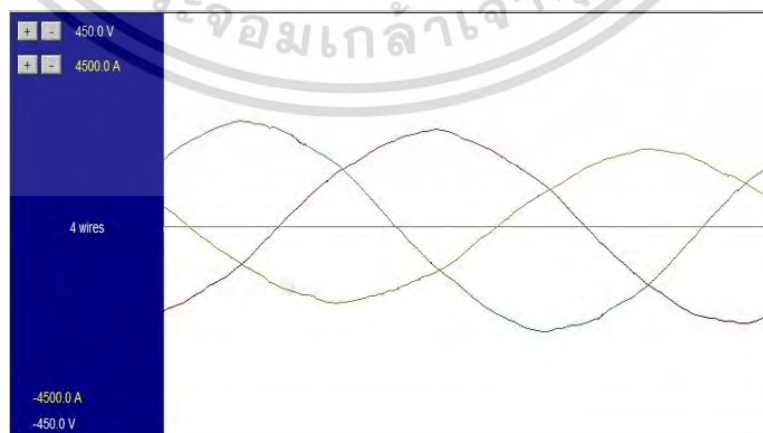
หม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 3 มีการติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิกเดิมที่เป็นวงจรกรองดีจูนที่ 7% แบบ 4 ชั้น ประกอบด้วย รีแอกเตอร์ 4 หน่วย และตัวเก็บประจุขนาด 40 kVAR ทั้งหมด 12 หน่วย ปัญหาที่พบเมื่อใช้งานวงจรกรองนี้ไประยะหนึ่งตัวเก็บประจุเสียหาย 3 หน่วย และได้ทำการเปลี่ยนแทนที่ในส่วนที่เสียหาย ในเวลาถัดมาตัวเก็บประจุเสียหายอีกครั้งหนึ่งโดยเสียหายไป 1 ชั้น ทั้งหมด 3 หน่วย ภายในเวลาไม่กี่เดือน ข้อมูลของค่าทางไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลระบบไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 3 ภายในตัวอย่างโรงงานที่ 1

Phase	$V_{rms}$ (V)	$I_{rms}$ (A)	%THDv	%THDi	$V_{Line}$
1	223.28	1531.557	1.10	2.15	387.45
2	229.46	1406.433	1.18	2.54	388.11
3	218.99	1114.359	1.37	2.61	387.68
Total	$I_{null}$	437.111			

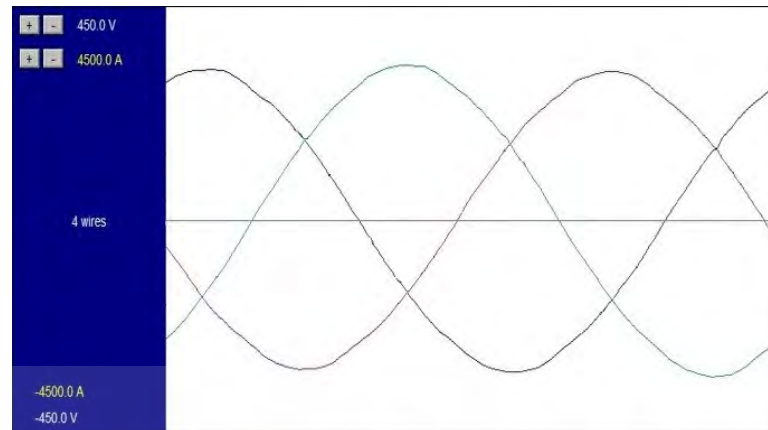
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลระบบไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 3 ภายในตัวอย่างโรงงานที่ 1 (ต่อ)

Phase	S (kVA)	P (kW)	Q (kVAR)	pf.	Freq (Hz)
1	341.965	311.702	140.648	0.912	
2	322.719	309.058	92.902	0.958	
3	244.033	220.978	103.541	0.906	
Total	906.727	841.739	337.090	0.93	49.77



รูปที่ 4.9 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 3 ภายในตัวอย่างโรงงานที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้าเครื่องที่ 3 ภายในตัวอย่างโรงงานที่ 1

#### 4.2.2 ตัวอย่างโรงงานที่ 2

ระบบไฟฟ้าของโรงงานแห่งนี้มีระดับแรงดันไฟฟ้า 220 V ใช้วงจรกรองคลื่นที่ 7% เป็นวงจรกรองฮาร์มอนิก แต่เกิดความเสียหายขึ้นที่อุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นรีแอกเตอร์ใหม่ ฟิวส์ขาด หน้าสัมผัสแมกเนติกคอนแทคเตอร์เสียหายละลายติดกัน อุณหภูมิสูงและมีความร้อนสูง ข้อมูลของค่าทางไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 4.4

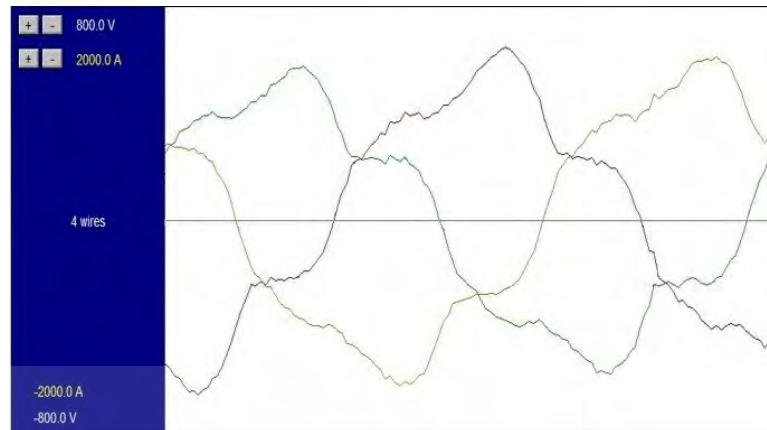
ตารางที่ 4.4 ข้อมูลค่าของตัวแปรทางไฟฟ้าภายในตัวอย่างโรงงานที่ 2

Phase	$V_{rms}$ (V)	$I_{rms}$ (A)	%THDv	%THDi	$V_{Line}$
1	222.08	902.440	3.28	18.24	385.54
2	223.30	973.246	3.24	17.89	387.59
3	222.14	972.471	3.02	15.70	383.01
Total	$I_{hull}$	41.741			

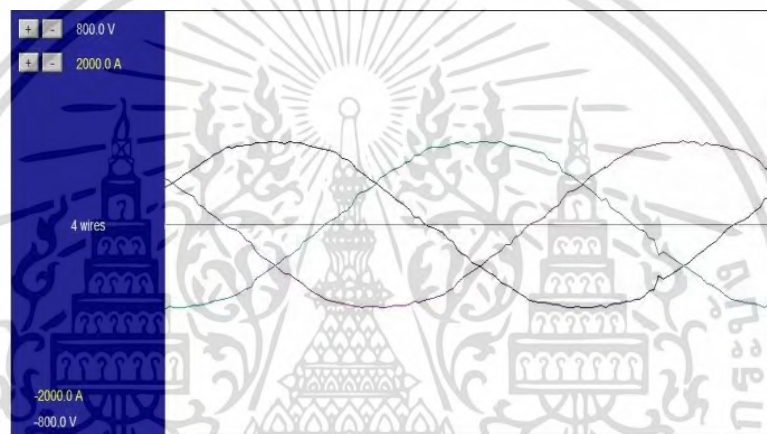
ตารางที่ 4.4 ข้อมูลค่าของตัวแปรทางไฟฟ้าภายในตัวอย่างโรงงานที่ 2 (ต่อ)

Phase	S (kVA)	P (kW)	Q (kVAR)	pf.	Freq (Hz)
1	200.417	196.701	38.417	0.981	
2	217.323	213.577	40.175	0.983	
3	216.026	212.333	39.769	0.983	
Total	633.762	622.611	118.361	0.98	50.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าภายในตัวอย่างโรงงานที่ 2



รูปที่ 4.12 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าภายในตัวอย่างโรงงานที่ 2

#### 4.2.3 ตัวอย่างโรงงานที่ 3

ระบบไฟฟ้าของโรงงานแห่งนี้มีระดับแรงดันไฟฟ้า 220 V ใช้วงจรรองดีจูนที่ 7% เป็นวงจรกรองฮาร์มอนิก แต่เกิดความเสียหายขึ้นที่อุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นสายไฟฟ้าขาดและมีสนิมของทองแดงหรือออกไซด์ของทองแดงเกิดขึ้น MCCB เปิดวงจรหรือทริป (Trip) หน้าสัมผัสแมกเนติกคอนแทคเตอร์เสียหายละลายติดกัน อุณหภูมิสูงและมีความร้อนสูง ข้อมูลของค่าทางไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลค่าของตัวแปรทางไฟฟ้าภายในตัวอย่างโรงงานที่ 3

Phase	$V_{rms}$ (V)	$I_{rms}$ (A)	%THDv	%THDi	$V_{Line}$
1	221.39	1179.620	2.31	6.49	385.69
2	223.14	1189.176	2.51	7.89	386.19
3	223.16	1226.498	2.56	7.03	384.59
Total	$I_{null}$	0.000			

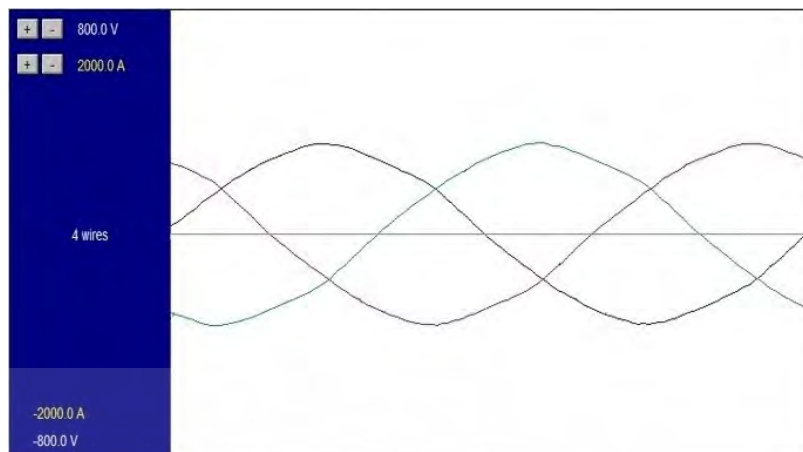
ตารางที่ 4.5 ข้อมูลค่าของตัวแปรทางไฟฟ้าภายในตัวอย่างโรงงานที่ 3 (ต่อ)

Phase	S (kVA)	P (kW)	Q (kVAR)	pf.	Freq (Hz)
1	261.153	227.303	128.585	0.870	
2	265.355	236.069	121.818	0.890	
3	273.706	236.728	137.386	0.865	
Total	800.016	700.100	387.152	0.88	50.00



รูปที่ 4.13 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าภายในตัวอย่างโรงงานที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าภายในตัวอย่างโรงงานที่ 3

จากข้อมูลจริงของตัวอย่างโรงงานต่าง ๆ ที่แสดงในตารางที่ 4.1-4.5 เมื่อทำการวิเคราะห์แล้วพบว่าปริมาณของฮาร์มอนิกทั้งแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าภายในระบบของโรงงานมีขนาดที่ไม่สูงมากนัก บางตัวอย่างข้อมูลมีค่าที่เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 519-2014

### 4.3 การออกแบบวงจรกรองที่ใช้ในการแก้ไขปัญหา

จากการออกแบบวงจรกรองจูนหรือวงจรกรองแบบพาสซีฟในเบื้องต้นที่แสดงในหัวข้อที่ 3.2.2 แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนเบื้องต้นและสมการที่สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่จำเป็นต่อการเลือกขนาดของวงจรกรองแบบพาสซีฟ ซึ่งจะเริ่มต้นวิเคราะห์จากค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่ระบบต้องการทั้งหมดและพิจารณากำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบที่ถูกภาระทางไฟฟ้านำไปใช้ทำให้ระบบขาดแคลนกำลังไฟฟ้าเสมือน (สมการ 3.24 และ 3.25) จากสมการ 3.14 และ 3.15 จะได้ค่าของตัวเก็บประจุและค่าของตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าของวงจรกรอง ซึ่งจะพิจารณาในสภาวะที่เกิดเรโซแนนซ์โดยใช้ความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์เป็นความถี่จูนสำหรับออกแบบวงจรกรอง มีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

#### 4.3.1 การวิเคราะห์สำหรับการแก้ปัญหาในโรงงานที่ 4

การวิเคราะห์ในส่วนของคุณ์กลางการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าที่ 1 มีดังต่อไปนี้

1. หลังจากการสำรวจและเก็บข้อมูลพื้นฐานที่ได้จากระบบไฟฟ้าในสถานที่จริง สมการ (3.24) กำลังไฟฟ้าเสมือนของวงจรกรองที่ใช้จะเท่ากับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ระบบไฟฟ้าต้องการหรือที่เก็บข้อมูลมาได้ มีค่าประมาณ 843 kVAR และลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 (250 Hz) มีขนาดมากกว่าลำดับอื่น ๆ (แสดงในบทที่ 5 ผลการทดลอง)

2. การเลือกใช้วงจรกรองแบบพาสซีฟ จะใช้เป็นวงจรกรองจูนที่ 4% จากสมการ (3.1) วงจรกรองจูนที่ 4% (4% รีแอกเตอร์)  $\%X_L = 4\%X_C$  หรือ  $X_L = 0.04X_C$  จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_D = 50 \times \sqrt{\frac{X_C}{0.04X_C}} = 250 \text{ Hz}$$

เพราะฉะนั้นวงจรกรองจูนที่ 4% มีความถี่ที่สอดคล้องกับความถี่ของลำดับฮาร์โมนิกที่ต้องการกรองหรือกำจัดออกไปจากระบบไฟฟ้าจากหัวข้อย่อยที่ 1.

3. เลือกขนาดของวงจรกรองแบบพาสซีฟ ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของวงจรกรองที่มากที่สุดที่สามารถหาได้ทั่วไปมีค่าเท่ากับ 250 kVAR เพราะฉะนั้นจากหัวข้อย่อยที่ 1. ต้องแบ่งวงจรกรองเป็น 3 ชุด ( $843/250 = 3.372$  หรือ  $\approx 3$ )

4. การเลือกขนาดของตัวเก็บประจุ ตัวเก็บประจุที่สามารถหาได้ทั่วไปมีหลากหลายขนาดสำหรับขนาดของวงจรกรอง 250 kVAR จะเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด 80 kVAR ที่ 525 V แต่เนื่องจากระบบไฟฟ้าของโรงงานมีระดับแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 400 V ต้องพิจารณากำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุที่แรงดันไฟฟ้า 400 V จากหัวข้อย่อยที่ 2.  $p = 4$  แทนในสมการ (3.7) จะได้

$$\frac{Q_{C2}}{80} = \left(\frac{400}{525}\right)^2 \times \frac{1}{(1 - (0.01 \times 4))}$$

$$Q_{C2} = 48.375 \text{ kVAR}$$

เพราะฉะนั้นจะต้องใช้ตัวเก็บประจุ 5 หน่วย ต่อวงจรกรองแบบพาสซีฟ 1 ชุด (จากหัวข้อย่อยที่ 3.  $250/48.375 = 5.168$  หรือ  $\approx 5$ ) และค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเป็นไปตามข้อมูลจากผู้ผลิตเท่ากับ 4973.59  $\mu\text{F}$

5. การเลือกขนาดของตัวเหนี่ยวนำ จากค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแทนค่าในสมการ (3.15) จะได้

$$L = \frac{1}{4\pi^2 \times 250^2 \times 0.00497359}$$

$$L = 0.081 \text{ mH}$$

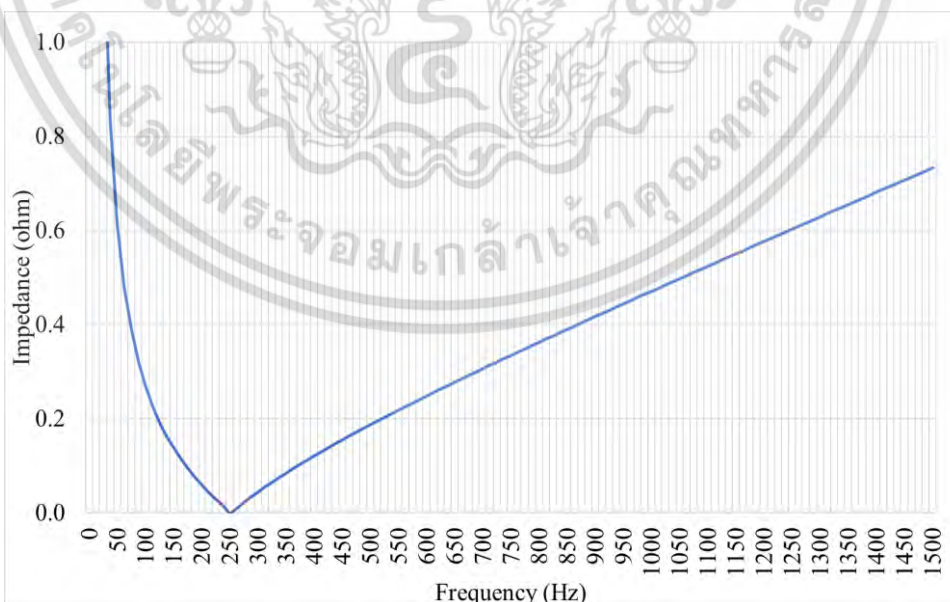
นำขนาดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่คำนวณได้ให้กับผู้ผลิตรีแอกเตอร์

เพราะฉะนั้นจากการวิเคราะห์และทำการออกแบบวงจรกรองที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ได้ค่าตัวแปรทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ใช้เพื่อแก้ไขปัญหาฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นโดยมีลำดับฮาร์โมนิกที่ 5 เป็นส่วนใหญ่ แสดงในรูปที่ 4.15 และความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของ

วงจรกรองกับความถี่แสดงในรูปที่ 4.16 จะแสดงถึงค่าความต้านทานของวงจรกรองที่ได้รับ การออกแบบให้กรองฮาร์มอนิกในลำดับที่เกิดปัญหาขึ้นจริง

Passive Power Filter Calculation Sheet by Dept. of Electrical Engineering Faculty of Engineering, KMITL								
Filter Performance								
Filter	Designs	kVAR	kV	%				
Filter	Banks	250	0.4	4.0%				
f/Hz	250							
n	5.00							
k	1.04							
Cp/uF	4,973.59							
Lreactor/mH	0.08							
Reactor and System								
f/Hz	Ith/A	Xc	Xl	Xtot	Uth	Ireactor/A	Umit/V	Ubank/V
50	397	0.64	0.03	0.61	254	397	254	440
150	0	0.22	0.08	0.14	0	0	0	0
250	200	0.13	0.13	0.00	27	200	27	46
350	0	0.10	0.19	0.09	0	0	0	0
550	0	0.06	0.29	0.23	0	0	0	0
						445	291	506
Capacitor Banks								
Qc 1ph KVAR	Qc 3ph KVAR	Selected Uc V						
144	431	525						

รูปที่ 4.15 ค่าของตัวแปรทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของวงจรกรองแบบพาสซีฟลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 ขนาด 250 kVAR ของโรงงานที่ 4



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความต้านทานของวงจรกรองแบบพาสซีฟ ลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 ขนาด 250 kVAR ของโรงงานที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ในส่วนของคุณยกลางการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าที่ 2 มีดังต่อไปนี้

1. หลังจากการสำรวจและเก็บข้อมูลพื้นฐานที่ได้จากระบบไฟฟ้าในสถานที่จริง สมการ (3.24) กำลังไฟฟ้าเสมือนของวงจรถองที่ใช้จะเท่ากับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ระบบไฟฟ้าต้องการ หรือที่เก็บข้อมูลมาได้ มีค่าประมาณ 675 kVAR และลำดับฮาร์โมนิกที่ 5 (250 Hz) มีขนาดมากกว่า ลำดับอื่น ๆ (แสดงในบทที่ 5 ผลการทดลอง)
2. การเลือกใช้วงจรถองแบบพาสซีฟ จะใช้เป็นวงจรถองจุนที่ 4% จากสมการ (3.1) วงจรถองจุนที่ 4% (4% รีแอกเตอร์)  $\%X_L = 4\%X_C$  หรือ  $X_L = 0.04X_C$  จะได้

$$f_D = 50 \times \sqrt{\frac{X_C}{0.04X_C}} = 250 \text{ Hz}$$

เพราะฉะนั้นวงจรถองจุนที่ 4% มีความถี่ที่สอดคล้องกับความถี่ของลำดับฮาร์โมนิกที่ ต้องการกรองหรือกำจัดออกไปจากระบบไฟฟ้าจากหัวข้อย่อยที่ 1.

3. เลือกขนาดของวงจรถองแบบพาสซีฟ ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของวงจรถองที่มากที่สุด ที่สามารถหาได้ทั่วไปมีค่าเท่ากับ 250 kVAR เพราะฉะนั้นจากหัวข้อย่อยที่ 1. ต้องแบ่งวงจรถองเป็น 2 ชุด ( $675/250 = 2.7$  หรือ  $\approx 2$ )

4. การเลือกขนาดของตัวเก็บประจุ ตัวเก็บประจุที่สามารถหาได้ทั่วไปมีหลากหลายขนาด สำหรับขนาดของวงจรถอง 250 kVAR จะเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด 80 kVAR ที่ 525 V แต่เนื่องจากระบบไฟฟ้าของโรงงานมีระดับแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 400 V ต้องพิจารณากำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุที่แรงดันไฟฟ้า 400 V จากหัวข้อย่อยที่ 2.  $p = 4$  แทนในสมการ (3.7) จะได้

$$\frac{Q_{C2}}{80} = \left(\frac{400}{525}\right)^2 \times \frac{1}{(1 - (0.01 \times 4))}$$

$$Q_{C2} = 48.375 \text{ kVAR}$$

เพราะฉะนั้นจะต้องใช้ตัวเก็บประจุ 5 หน่วย ต่อวงจรถองแบบพาสซีฟ 1 ชุด (จากหัวข้อย่อยที่ 3.  $250/48.375 = 5.168$  หรือ  $\approx 5$ ) และค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเป็นไปตามข้อมูลจากผู้ผลิตเท่ากับ 4973.59  $\mu\text{F}$

5. การเลือกขนาดของตัวเหนี่ยวนำ จากค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแทนค่าในสมการ (3.15) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L = \frac{1}{4\pi^2 \times 250^2 \times 0.00497359}$$

$$L = 0.081 \text{ mH}$$

นำขนาดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่คำนวณได้ให้กับผู้ผลิตรีแอกเตอร์

เพราะฉะนั้นจากการวิเคราะห์และทำการออกแบบวงจรกรองที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ได้ค่าตัวแปรทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ใช้เพื่อแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นโดยมีลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 เป็นส่วนใหญ่ แสดงในรูปที่ 4.15 และความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของวงจรกรองกับความถี่แสดงในรูปที่ 4.16 จะแสดงถึงค่าความต้านทานของวงจรกรองที่ได้รับ การออกแบบให้กรองฮาร์มอนิกในลำดับที่เกิดปัญหาขึ้นจริง

#### 4.3.2 การวิเคราะห์สำหรับการแก้ปัญหาในโรงงานที่ 5

การวิเคราะห์ในส่วนของผู้ควบคุมไฟฟ้าหลักที่ 1 มีดังต่อไปนี้

1. หลังจากการสำรวจและเก็บข้อมูลพื้นฐานที่ได้จากระบบไฟฟ้าในสถานที่จริง สมการ (3.24) กำลังไฟฟ้าเสมือนของวงจรกรองที่ใช้จะเท่ากับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ระบบไฟฟ้าต้องการ หรือที่เก็บข้อมูลมาได้ มีค่าประมาณ 355 kVAR และลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 (250 Hz) มีขนาดมากกว่า ลำดับอื่น ๆ (แสดงในบทที่ 5 ผลการทดลอง)
2. การเลือกใช้งานวงจรกรองแบบพาสซีฟ จะใช้เป็นวงจรกรองจูนที่ 4% จากสมการ (3.1) วงจรกรองจูนที่ 4% (4% รีแอกเตอร์)  $\%X_L = 4\%X_C$  หรือ  $X_L = 0.04X_C$  จะได้

$$f_D = 50 \times \sqrt{\frac{X_C}{0.04X_C}} = 250 \text{ Hz}$$

เพราะฉะนั้นวงจรกรองจูนที่ 4% มีความถี่ที่สอดคล้องกับความถี่ของลำดับฮาร์มอนิกที่ ต้องการกรองหรือกำจัดออกไปจากระบบไฟฟ้าจากหัวข้อย่อยที่ 1.

3. เลือกขนาดของวงจรกรองแบบพาสซีฟ ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของวงจรกรองที่สามารถหาได้ทั่วไปมีค่าเท่ากับ 145 kVAR เพราะฉะนั้นจากหัวข้อย่อยที่ 1. ต้องแบ่งวงจรกรองเป็น 2 ชุด ( $355/145 = 2.448$  หรือ  $\approx 2$ )

4. การเลือกขนาดของตัวเก็บประจุ ตัวเก็บประจุที่สามารถหาได้ทั่วไปมีหลากหลายขนาด สำหรับขนาดของวงจรกรอง 145 kVAR จะเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด 120 kVAR ที่ 525 V แต่เนื่องจากระบบไฟฟ้าของโรงงานมีระดับแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 400 V ต้องพิจารณากำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุที่แรงดันไฟฟ้า 400 V จากหัวข้อย่อยที่ 2.  $p = 4$  แทนในสมการ (3.7) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{Q_{C2}}{120} = \left(\frac{400}{525}\right)^2 \times \frac{1}{(1 - (0.01 \times 4))}$$

$$Q_{C2} = 72.562 \text{ kVAR}$$

เพราะฉะนั้นจะต้องใช้ตัวเก็บประจุ 2 หน่วย ต่อวงจรกรองแบบพาสซีฟ 1 ชุด (จากหัวข้อย่อยที่ 3.  $145/72.562 = 1.998$  หรือ  $\approx 2$ ) และค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเป็นไปตามข้อมูลจากผู้ผลิตเท่ากับ 2884.68  $\mu\text{F}$

5. การเลือกขนาดของตัวเหนี่ยวนำ จากค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแทนค่าในสมการ (3.15) จะได้

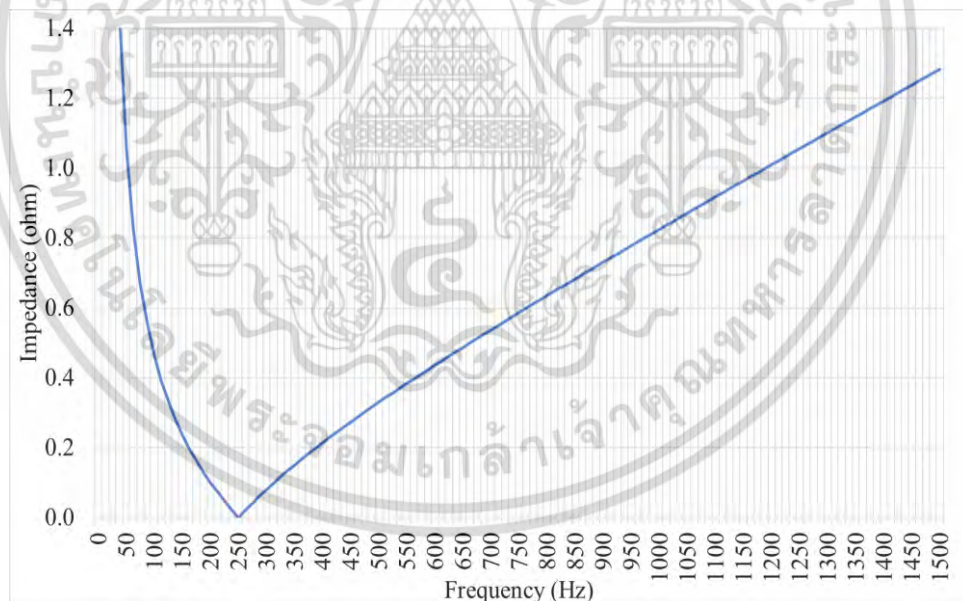
$$L = \frac{1}{4\pi^2 \times 250^2 \times 0.00288468}$$

$$L = 0.140 \text{ mH}$$

นำขนาดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่คำนวณได้ให้กับผู้ผลิตรีแอคเตอร์ เพราะฉะนั้นจากการวิเคราะห์และทำการออกแบบวงจรกรองที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ได้ค่าตัวแปรทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ใช้เพื่อแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นโดยมีลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 เป็นส่วนใหญ่สำหรับโรงงานที่ 5 แสดงในรูปที่ 4.17 และความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของวงจรกรองกับความถี่แสดงในรูปที่ 4.18 จะแสดงถึงค่าความต้านทานของวงจรกรองที่ได้รับการออกแบบให้กรองฮาร์มอนิกในลำดับที่เกิดปัญหาขึ้นจริง

Passive Power Filter Calculation Sheet by Dept. of Electrical Engineering Faculty of Engineering, KMITL								
<b>Filter Performance</b>								
Filter	Designs	kVAR	kV	%				
Filter	Banks	145	0.4	4.0%				
f/Hz	250							
n	5.00							
k	1.04							
Cp/uF	2884.68							
Lreactor/mH	0.14							
<b>Reactor and System</b>								
f/Hz	Ith/A	Xc	XL	Xtot	Uth	Ireactor/A	Uunit/V	Ubank/V
50	217	1.11	0.04	1.07	241	217	241	417
150	0	0.37	0.13	0.24	0	0	0	0
250	150	0.22	0.22	0.00	33	150	44	58
350	0	0.16	0.31	0.15	0	0	0	0
550	0	0.10	0.49	0.39	0	0	0	0
						263	274	475
<b>Capacitor Banks</b>								
Qc 1ph	Qc 3ph	Selected Uc						
kVAR	kVAR	V						
120	240	525						

รูปที่ 4.17 ค่าของตัวแปรทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของวงจรกรองแบบพาสซีฟลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 ขนาด 145 kVAR ของโรงงานที่ 5



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความต้านทานของวงจรกรองแบบพาสซีฟลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 ขนาด 145 kVAR ของโรงงานที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 การวิเคราะห์สำหรับการแก้ปัญหาในโรงงานที่ 6

การวิเคราะห์ในส่วนของผู้ควบคุมไฟฟ้าหลักที่ 1 มีดังต่อไปนี้

1. หลังจากการสำรวจและเก็บข้อมูลพื้นฐานที่ได้จากระบบไฟฟ้าในสถานที่จริง สมการ (3.24) กำลังไฟฟ้าเสมือนของวงจรกรองที่ใช้จะเท่ากับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ระบบไฟฟ้าต้องการ หรือที่เก็บข้อมูลมาได้ มีค่าประมาณ 50 kVAR และลำดับฮาร์โมนิกที่ 5 (250 Hz) มีขนาดมากกว่า ลำดับอื่น ๆ (แสดงในบทที่ 5 ผลการทดลอง)

2. การเลือกใช้งานวงจรกรองแบบพาสซีฟ จะใช้เป็นวงจรกรองจูนที่ 4% จากสมการ (3.1) วงจรกรองจูนที่ 4% (4% รีแอกเตอร์)  $\%X_L = 4\%X_C$  หรือ  $X_L = 0.04X_C$  จะได้

$$f_D = 50 \times \sqrt{\frac{X_C}{0.04X_C}} = 250 \text{ Hz}$$

เพราะฉะนั้นวงจรกรองจูนที่ 4% มีความถี่ที่สอดคล้องกับความถี่ของลำดับฮาร์โมนิกที่ ต้องการกรองหรือกำจัดออกไปจากระบบไฟฟ้าจากหัวข้อย่อยที่ 1.

3. เลือกขนาดของวงจรกรองแบบพาสซีฟ ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของวงจรกรองที่สามารถ หาได้ทั่วไปมีค่าเท่ากับ 100 kVAR เพราะฉะนั้นจากหัวข้อย่อยที่ 1. ต้องแบ่งวงจรกรองเป็น 3 ชุด (เป็นการออกแบบสำหรับการเพิ่มภาระทางไฟฟ้าในอนาคต)

4. การเลือกขนาดของตัวเก็บประจุ ตัวเก็บประจุที่สามารถหาได้ทั่วไปมีหลากหลายขนาด สำหรับขนาดของวงจรกรอง 100 kVAR จะเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด 80 kVAR ที่ 525 V แต่เนื่องจากระบบไฟฟ้าของโรงงานมีระดับแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 400 V ต้องพิจารณากำลังไฟฟ้าเสมือน ของตัวเก็บประจุที่แรงดันไฟฟ้า 400 V จากหัวข้อย่อยที่ 2.  $p = 4$  แทนในสมการ (3.7) จะได้

$$\frac{Q_{C2}}{80} = \left(\frac{400}{525}\right)^2 \times \frac{1}{(1 - (0.01 \times 4))}$$

$$Q_{C2} = 48.375 \text{ kVAR}$$

เพราะฉะนั้นจะต้องใช้ตัวเก็บประจุ 2 หน่วย ต่อวงจรกรองแบบพาสซีฟ 1 ชุด (จากหัวข้อย่อยที่ 3.  $100/48.375 = 2.067$  หรือ  $\approx 2$ ) และค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเป็นไปตามข้อมูลจากผู้ผลิตเท่ากับ 1909.86  $\mu\text{F}$

5. การเลือกขนาดของตัวเหนี่ยวนำ จากค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแทนค่าในสมการ (3.15) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

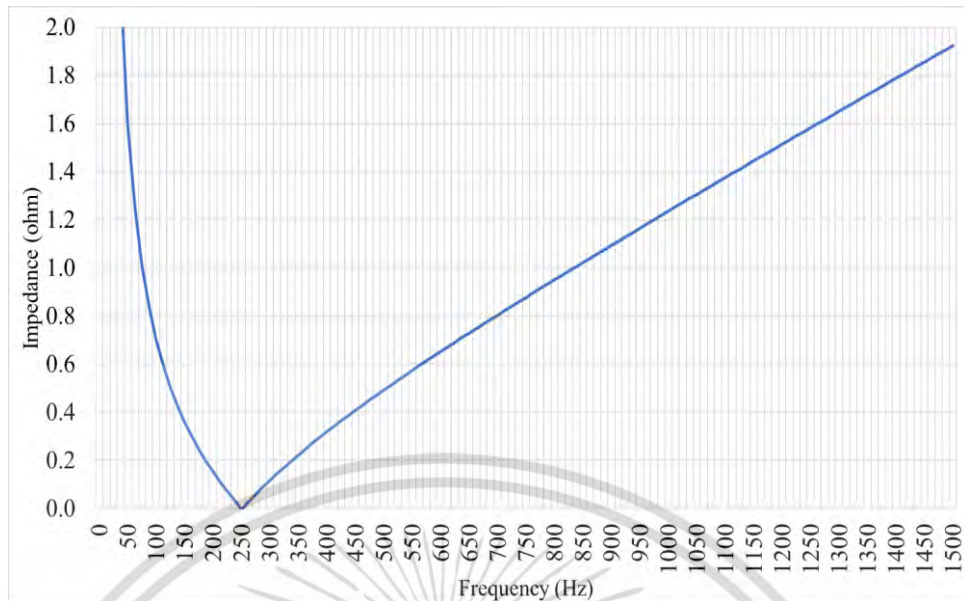
$$L = \frac{1}{4\pi^2 \times 250^2 \times 0.00190986}$$

$$L = 0.212 \text{ mH}$$

นำขนาดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่คำนวณได้ให้กับผู้ผลิตรีแอกเตอร์ เพราะฉะนั้นจากการวิเคราะห์และทำการออกแบบวงจรกรองที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ได้ค่าตัวแปรทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ใช้เพื่อแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นโดยมีลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นการออกแบบสำหรับรองรับภาระทางไฟฟ้าที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคต แสดงในรูปที่ 4.19 และความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของวงจรกรองกับความถี่แสดงในรูปที่ 4.20 จะแสดงถึงค่าความต้านทานของวงจรกรองที่ได้รับการออกแบบให้กรองฮาร์มอนิกในลำดับที่เกิดปัญหาขึ้นจริง

Passive Power Filter Calculation Sheet by Dept. of Electrical Engineering Faculty of Engineering, KMITL								
Filter Performance								
Filter Designs	kVAR	kV	%					
Filter Banks	100	0.4	4.0%					
f <sub>r</sub> /Hz	250							
n	5.00							
k	1.04							
C <sub>p</sub> /uF	1,909.86							
L <sub>reactor</sub> /mH	0.21							
Reactor and System								
f/Hz	I <sub>th</sub> /A	X <sub>c</sub>	X <sub>L</sub>	X <sub>tot</sub>	U <sub>th</sub>	I <sub>reactor</sub> /A	U <sub>unit</sub> /V	U <sub>bank</sub> /V
50	144	1.67	0.07	1.60	241	144	241	417
150	0	0.56	0.20	0.36	0	0	0	0
250	150	0.33	0.33	0.00	50	150	50	87
350	0	0.24	0.47	0.23	0	0	0	0
550	0	0.15	0.73	0.58	0	0	0	0
						208	291	504
Capacitor Banks								
Q <sub>c</sub> 1ph kVAR	Q <sub>c</sub> 3ph kVAR	Selected U <sub>c</sub> V						
80	160	525						

รูปที่ 4.19 ค่าของตัวแปรทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของวงจรกรองแบบพาสซีฟลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 ขนาด 100 kVAR ของโรงงานที่ 6



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความต้านทานของวงจรแบบพาสซีฟ ลำดับฮาร์โมนิกที่ 5 ขนาด 100 kVAR ของโรงงานที่ 6

การวิเคราะห์ในส่วนของผู้ควบคุมไฟฟ้าหลักที่ 2 มีดังต่อไปนี้

1. หลังจากการสำรวจและเก็บข้อมูลพื้นฐานที่ได้จากระบบไฟฟ้าในสถานที่จริง สมการ (3.24) กำลังไฟฟ้าเสมือนของวงจรกรองที่ใช้จะเท่ากับกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ระบบไฟฟ้าต้องการ หรือที่เก็บข้อมูลมาได้ มีค่าประมาณ 158 kVAR และลำดับฮาร์โมนิกที่ 3 (150 Hz) และลำดับฮาร์โมนิกที่ 5 (250 Hz) มีขนาดมากกว่าลำดับอื่น ๆ (แสดงในบทที่ 5 ผลการทดลอง)

2. การเลือกใช้วงจรกรองแบบพาสซีฟ จะใช้เป็นวงจรกรองจูนที่ 11% สำหรับลำดับฮาร์โมนิกที่ 3 และวงจรกรองจูนที่ 4% สำหรับลำดับฮาร์โมนิกที่ 5 จากสมการ (3.1) วงจรกรองจูนที่ 11% (11% รีแอกเตอร์)  $\%X_L = 11\%X_C$  หรือ  $X_L = 0.11X_C$  และวงจรกรองจูนที่ 4% (4% รีแอกเตอร์)  $\%X_L = 4\%X_C$  หรือ  $X_L = 0.04X_C$  จะได้

$$f_{D(3^{rd})} = 50 \times \sqrt{\frac{X_C}{0.11X_C}} = 150.76 \text{ Hz}$$

$$f_{D(5^{th})} = 50 \times \sqrt{\frac{X_C}{0.04X_C}} = 250 \text{ Hz}$$

เพราะฉะนั้นวงจรกรองจูนที่ 11% และวงจรกรองจูนที่ 4% มีความถี่ที่สอดคล้องกับความถี่ของลำดับฮาร์โมนิกที่ต้องการกรองหรือกำจัดออกไปจากระบบไฟฟ้าจากหัวข้อย่อยที่ 1.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เลือกขนาดของวงจรกรองแบบพาสซีฟ ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของวงจรกรองที่สามารถหาได้ทั่วไปสำหรับลำดับฮาร์โมนิกที่ 3 มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 35 kVAR และสำหรับลำดับฮาร์โมนิกที่ 5 มีค่าเท่ากับ 145 kVAR เพราะฉะนั้นจากหัวข้อย่อยที่ 1. ต้องแบ่งวงจรกรองเป็น 1 ชุด พิจารณาจากขนาดกระแสไฟฟ้าฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้น และ 1 ชุด  $((158 - 35)/145 = 0.848$  หรือ  $\approx 1$ ) ตามลำดับ

4. การเลือกขนาดของตัวเก็บประจุ ตัวเก็บประจุที่สามารถหาได้ทั่วไปมีหลากหลายขนาด สำหรับขนาดของวงจรกรอง 35 kVAR และ 145 kVAR จะเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด 60 kVAR ที่ 525 V และขนาด 120 kVAR ที่ 525 V ตามลำดับ แต่เนื่องจากระบบไฟฟ้าของโรงงานมีระดับแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 400 V ต้องพิจารณากำลังไฟฟ้าเสมือนของตัวเก็บประจุที่แรงดันไฟฟ้า 400 V จากหัวข้อย่อยที่ 2.  $p_{(3rd)} = 11$  และ  $p_{(5th)} = 4$  แทนในสมการ (3.7) จะได้

$$\frac{Q_{C2(3rd)}}{60} = \left(\frac{400}{525}\right)^2 \times \frac{1}{(1 - (0.01 \times 11))}$$

$$Q_{C2(3rd)} = 39.135 \text{ kVAR}$$

$$\frac{Q_{C2(5th)}}{120} = \left(\frac{400}{525}\right)^2 \times \frac{1}{(1 - (0.01 \times 4))}$$

$$Q_{C2(5th)} = 72.562 \text{ kVAR}$$

เพราะฉะนั้นจะต้องใช้ตัวเก็บประจุ 1 หน่วย และ 2 หน่วย ต่อวงจรกรองแบบพาสซีฟ 1 ชุด (จากหัวข้อย่อยที่ 3.  $35/39.135 = 0.894$  หรือ  $\approx 1$  และ  $145/72.562 = 1.998$  หรือ  $\approx 2$ ) และค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเป็นไปตามข้อมูลจากผู้ผลิตเท่ากับ 696.30  $\mu\text{F}$  และ 2884.68  $\mu\text{F}$  ตามลำดับ

5. การเลือกขนาดของตัวเหนี่ยวนำ จากค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแทนค่าในสมการ (3.15) จะได้

$$L_{(3rd)} = \frac{1}{4\pi^2 \times 150^2 \times 0.0006963}$$

$$L_{(3rd)} = 1.617 \text{ mH}$$

$$L_{(5th)} = \frac{1}{4\pi^2 \times 250^2 \times 0.00288468}$$

$$L_{(5th)} = 0.140 \text{ mH}$$

นำขนาดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของตัวเหนี่ยวนำที่คำนวณได้ให้กับผู้ผลิตรีแอคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

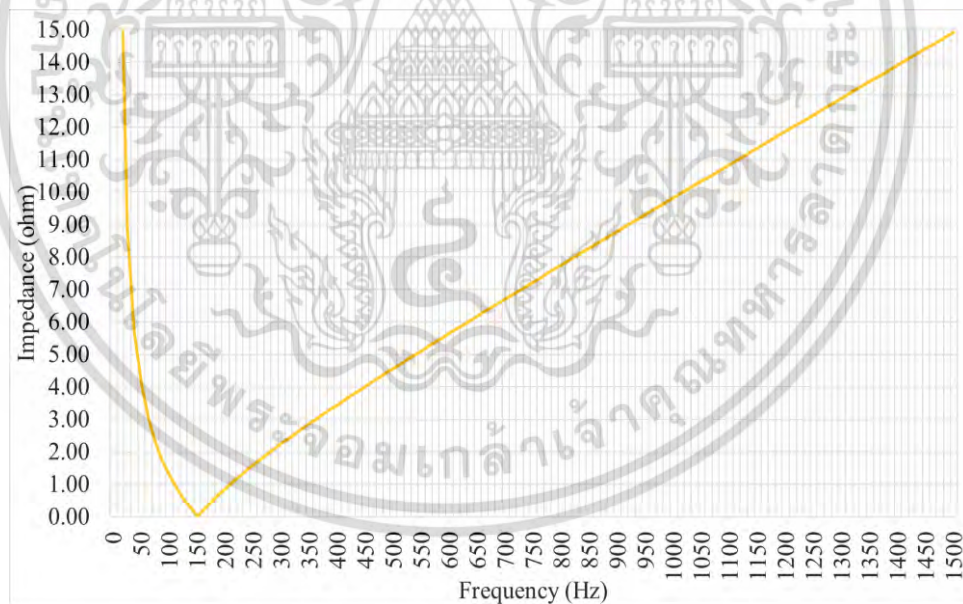
เพราะฉะนั้นจากการวิเคราะห์และทำการออกแบบวงจรกรองที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ได้ค่าตัวแปรทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ใช้เพื่อแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นโดยมีลำดับฮาร์มอนิกที่ 3 และ 5 เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นการออกแบบสำหรับรองรับภาระทางไฟฟ้าที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคต แสดงในรูปที่ 4.21 และ 4.22 ตามลำดับ และความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของวงจรกรองกับความถี่แสดงในรูปที่ 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ จะแสดงถึงค่าความต้านทานของวงจรกรองที่ได้รับการออกแบบให้กรองฮาร์มอนิกในลำดับที่เกิดปัญหาขึ้นจริง

Passive Power Filter Calculation Sheet by Dept. of Electrical Engineering Faculty of Engineering, KMITL								
Filter Performance								
Filter	Designs	kVAR	kV	%				
Filter	Banks	35	0.4	11.0%				
f/Hz	151							
n	3.02							
k	1.11							
Cp/uF	696.30							
Lreactor/mH	1.60							
Reactor and System								
f/Hz	Ith/A	Xc	XL	Xtot	Uth	Ireactor/A	Uunit/V	Ubank/V
50	56	4.57	0.50	4.07	254	56	254	440
150	100	1.52	1.51	0.01	29	100	29	54
250	0	0.91	2.51	1.60	0	0	0	0
350	0	0.65	3.52	2.87	0	0	0	0
550	0	0.42	5.53	5.11	0	0	0	0
						114	291	494
Capacitor Banks								
Qc 1ph kVAR	Qc 3ph kVAR	Selected Uc V						
20	60	525						

รูปที่ 4.21 ค่าของตัวแปรทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของวงจรกรองแบบพาสซีฟลำดับฮาร์มอนิกที่ 3 ขนาด 35 kVAR ของโรงงานที่ 6

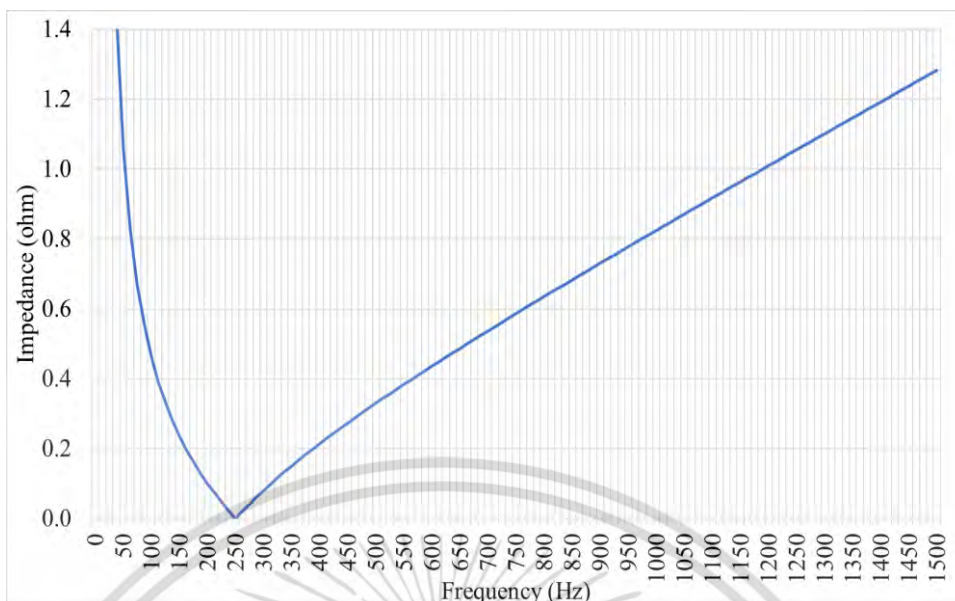
Passive Power Filter Calculation Sheet by Dept. of Electrical Engineering Faculty of Engineering, KMITL								
Filter Performance								
Filter	Designs	kVAR	kV	%				
Filter	Banks	145	0.4	4.0%				
f/Hz	250							
n	5.00							
k	1.04							
Cp/uF	2884.68							
Lreactor/mH	0.14							
Reactor and System								
f/Hz	Ith/A	Xc	XL	Xtot	Uth	Ireactor/A	Uunit/V	Ubank/V
50	217	1.11	0.04	1.07	241	217	241	417
150	0	0.37	0.13	0.24	0	0	0	0
250	150	0.22	0.22	0.00	33	150	44	58
350	0	0.16	0.31	0.15	0	0	0	0
550	0	0.10	0.49	0.39	0	0	0	0
						263	274	475
Capacitor Banks								
Qc 1ph	Qc 3ph	Selected Uc						
kVAR	kVAR	V						
120	240	525						

รูปที่ 4.22 ค่าของตัวแปรทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของวงจรกรองแบบพาสซีฟลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 ขนาด 145 kVAR ของโรงงานที่ 6



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความต้านทานของวงจรกรองแบบพาสซีฟลำดับฮาร์มอนิกที่ 3 ขนาด 35 kVAR ของโรงงานที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความต้านทานของวงจรกรองแบบพาสซีฟ ลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 ขนาด 145 kVAR ของโรงงานที่ 6

#### 4.4 บทสรุป

จากขั้นตอนการดำเนินงานและการออกแบบที่กล่าวมาข้างต้น จะเป็นการแสดงให้เห็นว่าเมื่อเกิดปัญหาขึ้นแล้วนั้นจะต้องมีขั้นตอนอย่างไรในการนำไปสู่การออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกที่มีประสิทธิภาพและสามารถนำไปต่อยอดหรือประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมได้จริง ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องเรียนรู้ขั้นตอนปฏิบัติเพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานที่มีคุณภาพสามารถนำไปใช้ในการออกแบบดังกล่าวได้ ผลก่อนและหลังการติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิกจะแสดงในส่วนถัดไป

หมายเหตุ : เพื่อความเข้าใจแก่ผู้ที่สนใจ วงจรกรองดีจูนที่ 7% ยังคงเรียกแบบนี้เช่นเดิม แต่วงจรกรองจูนที่ 11% และวงจรกรองจูนที่ 4% ซึ่งเป็นวงจรกรองที่ได้ออกแบบให้แก้ปัญหาลำดับฮาร์มอนิกที่ 3 และ 5 ตามลำดับ จะขอเรียกว่า วงจรกรองแบบพาสซีฟ ตั้งแต่นี้เป็นต้นไป

## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

#### 5.1 ผลการสำรวจและการทดลองก่อนและหลังการติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟ ณ โรงงานที่ 4

##### 5.1.1 บริเวณหม้อแปลงไฟฟ้าของศูนย์กลางการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าที่ 1

ระบบไฟฟ้าภายในโรงงานจริงที่ทำการสำรวจและการทดลองมีแหล่งจำหน่ายพลังงานภายในโรงงานเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 3,000 kVA มีค่าร้อยละแรงดันไฟฟ้าอิมพีแดนซ์ (%Voltage impedance, %Z) เท่ากับ 6% ประเภทเดลต้า-สตาร์หรือเดลต้า-วาย (Delta-Star, D-Y) ระดับแรงดันไฟฟ้า 22 kV/400 V, 3 เฟส โดยส่วนของศูนย์กลางการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าที่ 1 (Motor Control Center 1, MCC1) ภาระทางไฟฟ้าเป็นประเภทมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นส่วนใหญ่ซึ่งจะมีไดรฟ์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าจึงทำให้เกิดปัญหาอาร์มอิกขึ้น

จากข้อมูลของระบบไฟฟ้าภายในโรงงานที่กล่าวมาข้างต้นและขนาดกระแสไฟฟ้าของภาระทางไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด ( $I_L$ ) เท่ากับ 2,240 A สามารถหาค่ากระแสไฟฟ้ลัดวงจรได้จากสมการต่อไปนี้

$$I_{sc} = S/\%Z \quad (5.1)$$

โดยที่  $I_{sc}$  คือ ขนาดกระแสไฟฟ้ลัดวงจร (A)

$S$  คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power) (kVA)

$\%Z$  คือ ร้อยละแรงดันไฟฟ้าอิมพีแดนซ์

จากสมการ (5.1) แทนค่าในสมการจะได้  $I_{sc} = 3000 \text{ kVA}/0.06 = 50000 \text{ A}$

อัตราส่วนระหว่างขนาดกระแสไฟฟ้ลัดวงจรกับขนาดกระแสไฟฟ้าของภาระทางไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดจะได้  $I_{sc}/I_L = 50000/2240 = 22.321$  เพราะฉะนั้นเลือกใช้ชนิดจำกัดความผิดพลาด กระแสไฟฟ้าสำหรับระบบในช่วง 120 V ถึง 69 kV ในตารางที่ 2.2 ในช่วง  $20 < 50$  และเลือกใช้ชนิดจำกัดความผิดพลาดแรงดันไฟฟ้าในตารางที่ 2.1 ในช่วง  $V \leq 1.0 \text{ kV}$  ตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน IEEE 519-2014

##### 5.1.1.1 ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟ

ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟหรือในสภาวะการทำงานปกติของโรงงาน

ที่มีภาระทางไฟฟ้าเป็นไดรฟ์ไฟฟ้ากระแสสลับควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก แสดงในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

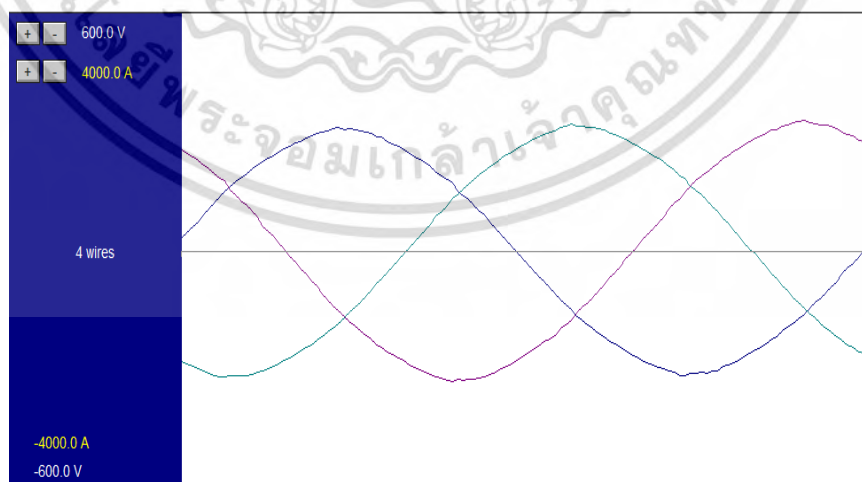
ตารางที่ 5.1 พบว่าค่า %THDv และ %THDi ในแต่ละเฟสมีค่าที่เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 519-2014 แต่ก็ยังคงเกิดความเสียหายขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในระบบมีลักษณะคล้ายคลึงกับรูปที่ 4.1-4.4 จึงจำเป็นต้องได้รับการแก้ไข

ตารางที่ 5.1 ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4

Phase	$V_{rms}$ (V)	$I_{rms}$ (A)	%THDv	%THDi	$V_{Line}$
1	215.12	2236.20	1.38	3.00	381.63
2	219.95	2232.82	1.30	3.22	382.12
3	226.35	2193.42	1.38	3.54	381.63
Total	$I_{null}$	287.67			

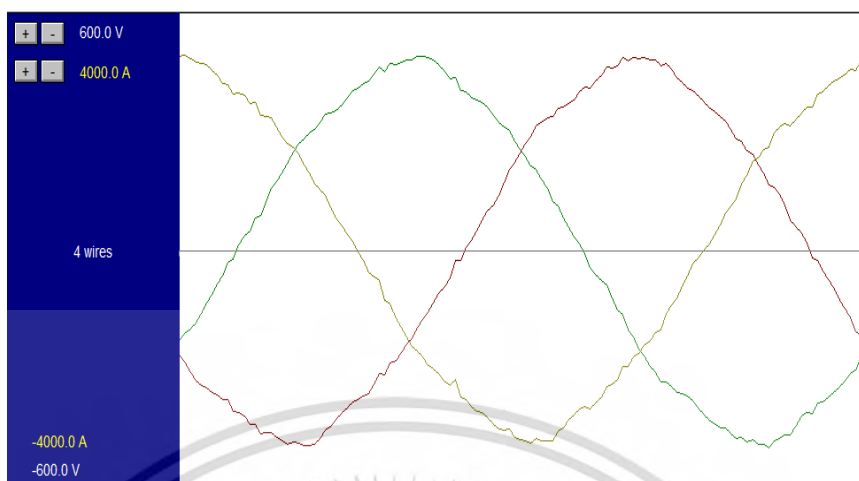
ตารางที่ 5.1 ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4 (ต่อ)

Phase	S (kVA)	P (kW)	Q (kVAR)	pf.	Freq (Hz)
1	481.06	390.06	281.56	0.81	
2	491.11	419.58	255.22	0.85	
3	496.48	390.80	306.22	0.79	
Total	1466.86	1200.44	843.00	0.82	50.00



รูปที่ 5.1 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



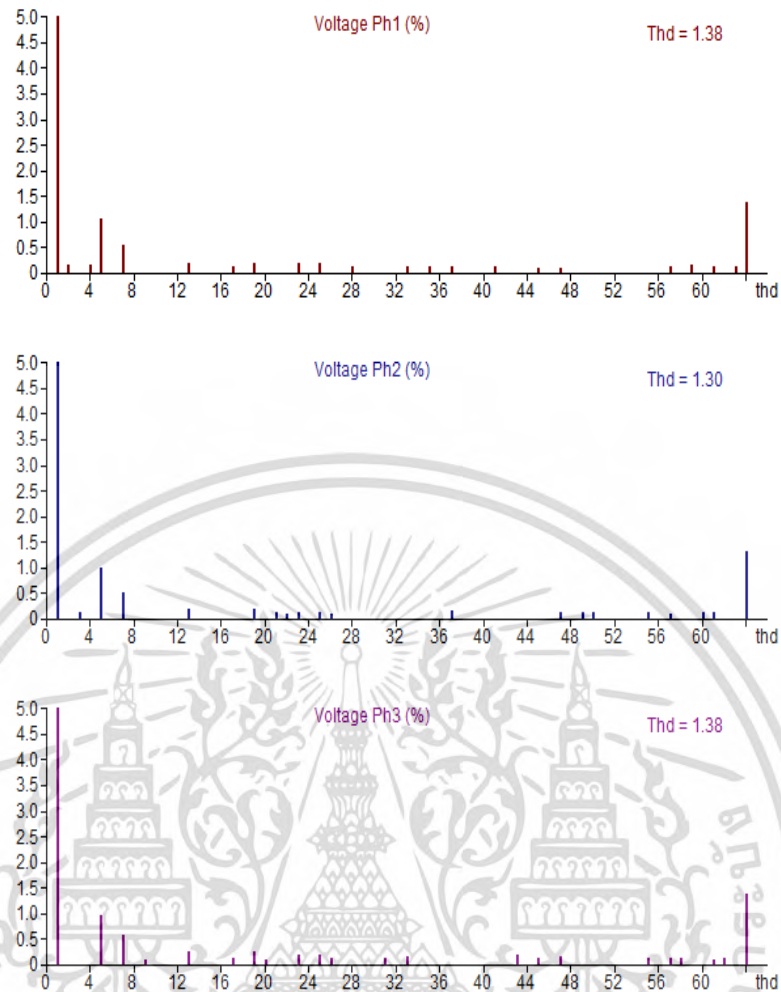
รูปที่ 5.2 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4

ตารางที่ 5.2 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4

ลำดับฮาร์มอนิก	แรงดันไฟฟ้า (V)			%THDv		
	1	2	3	1	2	3
0	0.08	0.21	0.03	0.04	0.10	0.02
1	215.10	219.93	226.33	100.00	100.00	100.00
2	0.33	0.02	0.22	0.15	0.01	0.10
3	0.03	0.27	0.14	0.01	0.12	0.06
4	0.33	0.17	0.17	0.15	0.08	0.08
5	2.24	2.16	2.20	1.04	0.98	0.97
6	0.13	0.17	0.14	0.06	0.08	0.06
7	1.17	1.14	1.34	0.55	0.52	0.59
8	0.15	0.05	0.06	0.07	0.02	0.03
9	0.18	0.08	0.24	0.08	0.03	0.11
10	0.14	0.19	0.13	0.06	0.09	0.06
11	0.14	0.10	0.22	0.07	0.05	0.10
12	0.09	0.18	0.15	0.04	0.08	0.07
13	0.38	0.44	0.59	0.18	0.20	0.26

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 สเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4

ตารางที่ 5.3 ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4

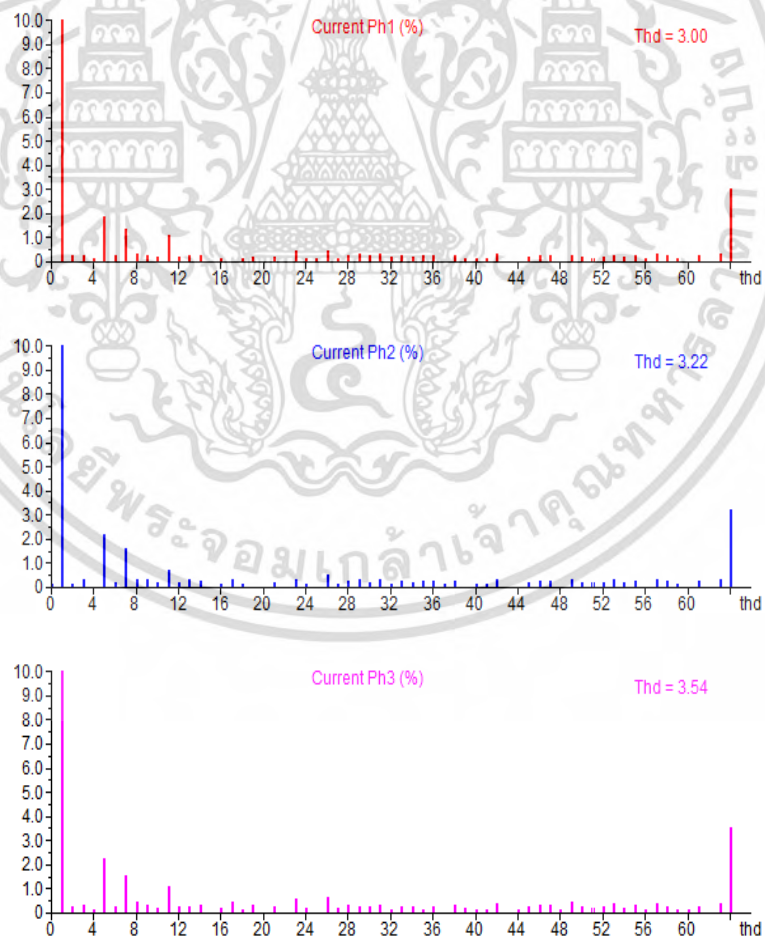
ลำดับฮาร์มอนิก	กระแสไฟฟ้า (A)			%THDi		
	1	2	3	1	2	3
0	1.33	2.34	0.96	0.06	0.10	0.04
1	2235.19	2231.66	2192.05	100.00	100.00	100.00
2	4.79	3.11	5.81	0.21	0.14	0.26
3	5.79	6.71	6.54	0.26	0.30	0.30
4	2.83	0.45	2.59	0.13	0.02	0.12
5	40.92	48.50	48.36	1.83	2.17	2.21
6	5.18	4.65	6.00	0.23	0.21	0.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4 (ต่อ)

ลำดับฮาร์มอนิก	กระแสไฟฟ้า (A)			%THDi		
	1	2	3	1	2	3
7	29.57	35.43	34.04	1.32	1.59	1.55
8	7.65	6.55	9.30	0.34	0.29	0.42
9	6.00	7.11	6.65	0.27	0.32	0.30
10	3.92	3.60	4.44	0.18	0.16	0.20
11	24.74	14.98	23.48	1.11	0.67	1.07
12	4.32	4.24	5.07	0.19	0.19	0.23
13	5.30	6.51	4.82	0.24	0.29	0.22

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)



รูปที่ 5.4 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลสเปกตรัมความถี่ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แสดงในตารางที่ 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ พบว่าค่า %THDv และ %THDi ในลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 มีค่าสูงกว่าลำดับอื่น ๆ แต่ไม่เกินมาตรฐาน IEEE 519-2014 จึงสันนิษฐานว่าจะมีแนวโน้มการเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ที่ลำดับฮาร์มอนิกดังกล่าว ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่สูงนำไปสู่การเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในระบบ เพราะฉะนั้นจะมุ่งเน้นในการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เป็นหลักเท่านั้น

#### 5.1.1.2 ผลการสำรวจขณะติดตั้งตัวเก็บประจุ

การสำรวจขณะที่โรงงานได้มีการติดตั้งตัวเก็บประจุอย่างเดียวก่อนเพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าและชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนคืนแก่ระบบจากการที่ถูกระบบทางไฟฟ้านำไปใช้ระหว่างการทำงาน ซึ่งเป็นข้อกำหนดหนึ่งที่โรงงานทั่วไปจะต้องปฏิบัติตามไม่สามารถทำการตรวจวัดได้ เนื่องจากชุดตัวเก็บประจุเกิดความเสียหายขึ้นเป็นที่เรียบร้อยแล้วจากปัญหาฮาร์มอนิก จึงทำให้ผลการสำรวจที่แสดงในตารางที่ 5.4-5.6 เป็นข้อมูลที่ได้มาจากโรงงานที่มีระบบไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกับโรงงานที่ได้ทำการสำรวจและการทดลองเพื่อจะสามารถประมาณการและเปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ที่มีความจำเป็นได้

ตารางที่ 5.4 ผลการสำรวจขณะติดตั้งตัวเก็บประจุ

Phase	V <sub>rms</sub> (V)	I <sub>rms</sub> (A)	%THDv	%THDi	V <sub>Line</sub>
1	214.44	1185.95	6.28	13.23	371.42
2	218.26	1229.44	5.91	13.06	378.04
3	227.59	1208.39	6.25	13.29	394.20
Total	I <sub>null</sub>	143.836			

ตารางที่ 5.4 ผลการสำรวจขณะติดตั้งตัวเก็บประจุ (ต่อ)

Phase	S (kVA)	P (kW)	Q (kVAR)	pf.	Freq (Hz)
1	240.531	195.028	140.780	0.821	
2	245.554	209.792	127.608	0.843	
3	248.241	195.398	153.112	0.778	
Total	734.299	600.218	421.500	0.81	50.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบขณะติดตั้งตัวเก็บประจุ

ลำดับฮาร์มอนิก	แรงดันไฟฟ้า (V)			%THDv		
	1	2	3	1	2	3
0	0.14	0.48	0.007	0.07	0.22	0.03
1	214.44	218.26	227.59	100.00	100.00	100.00
2	4.48	3.13	2.21	2.09	1.43	0.97
3	2.54	0.87	2.25	1.19	0.40	0.99
4	2.91	0.15	2.43	1.36	0.07	1.07
5	8.53	8.29	8.66	3.98	3.80	3.80
6	3.03	2.97	4.14	1.41	1.36	1.82
7	1.62	3.31	1.83	0.76	1.52	0.80
8	4.26	2.49	1.84	1.99	1.14	0.81
9	1.86	1.07	1.40	0.87	0.49	0.62
10	3.34	1.00	2.23	1.56	0.46	0.98
11	4.40	5.27	7.70	2.05	2.41	3.38
12	1.21	4.79	3.35	0.57	2.20	1.47
13	2.83	2.90	3.16	1.32	1.33	1.39

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

ตารางที่ 5.6 ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบขณะติดตั้งตัวเก็บประจุ

ลำดับฮาร์มอนิก	กระแสไฟฟ้า (A)			%THDi		
	1	2	3	1	2	3
0	9.11	3.15	6.49	0.77	0.26	0.54
1	1185.95	1229.44	1208.39	100.00	100.00	100.00
2	48.47	36.67	22.21	4.09	2.98	1.84
3	8.17	6.98	14.56	0.69	0.57	1.20
4	9.16	6.35	12.40	0.77	0.52	1.03
5	113.49	119.35	124.79	9.57	9.71	10.33
6	4.84	7.86	9.86	0.41	0.64	0.82
7	54.95	55.34	55.81	4.63	4.50	4.62
8	11.34	6.87	3.75	0.96	0.56	0.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบขณะติดตั้งตัวเก็บประจุ (ต่อ)

ลำดับฮาร์มอนิก	กระแสไฟฟ้า (A)			%THDi		
	1	2	1	2	1	2
9	3.03	1.60	3.78	0.26	0.13	0.31
10	3.18	2.05	5.07	0.27	0.17	0.42
11	70.79	71.45	70.95	5.97	5.81	5.87
12	10.71	11.98	11.84	0.90	0.97	0.98
13	30.05	41.17	30.16	2.53	3.35	2.50

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

จากข้อมูลสเปกตรัมของระบบในตารางที่ 5.5-5.6 พบว่าค่า %THDv และ %THDi ในลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 จะมีค่าสูงกว่าลำดับอื่น ๆ และสูงกว่าสภาวะการทำงานปกติอย่างเห็นได้ชัดเจน อาจจะไปสู่การยืนยันข้อสันนิษฐานก่อนหน้าที่ได้คาดการณ์ไว้

#### 5.1.1.3 ผลการทดลองหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟ

หลังจากการติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟตามรูปที่ 4.15 ในระบบไฟฟ้าภายในโรงงานจริง มุ่งเน้นการแก้ปัญหาลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 ที่มีในระบบ แสดงข้อมูลหลังติดตั้งวงจรรองในตารางที่ 5.7 พบว่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและกระแสไฟฟ้าลดลงเปรียบเทียบกับตารางที่ 5.1 เป็นผลดีที่ระบบมีคุณภาพไฟฟ้าดีขึ้น

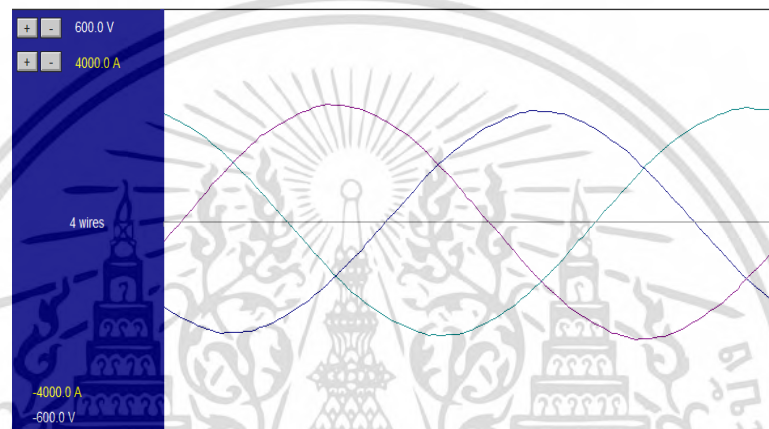
ตารางที่ 5.7 ผลการทดลองหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4

Phase	$V_{rms}$ (V)	$I_{rms}$ (A)	%THDv	%THDi	$V_{Line}$
1	221.25	2234.56	0.49	2.26	385.22
2	226.87	2236.52	0.55	2.62	398.95
3	231.68	2198.13	0.66	2.65	400.28
Total	$I_{null}$	290.24			

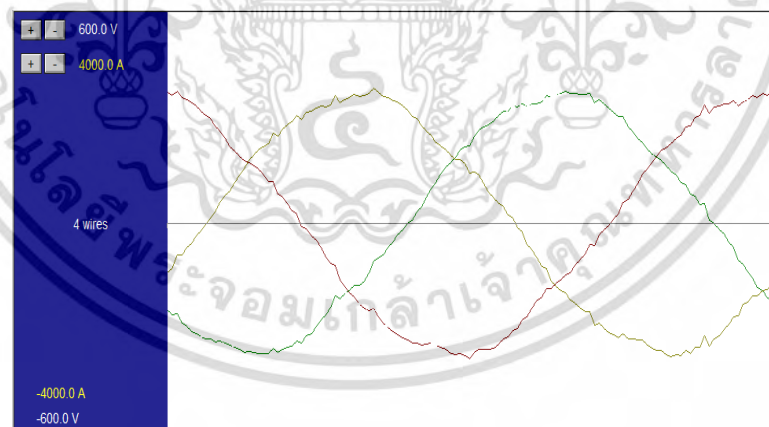
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 ผลการทดลองหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4 (ต่อ)

Phase	S (kVA)	P (kW)	Q (kVAR)	pf.	Freq (Hz)
1	494.40	489.45	69.74	0.99	
2	507.40	492.18	123.35	0.97	
3	509.26	499.08	101.34	0.98	
Total	1511.06	1480.71	294.44	0.99	50.16



รูปที่ 5.5 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4



รูปที่ 5.6 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4

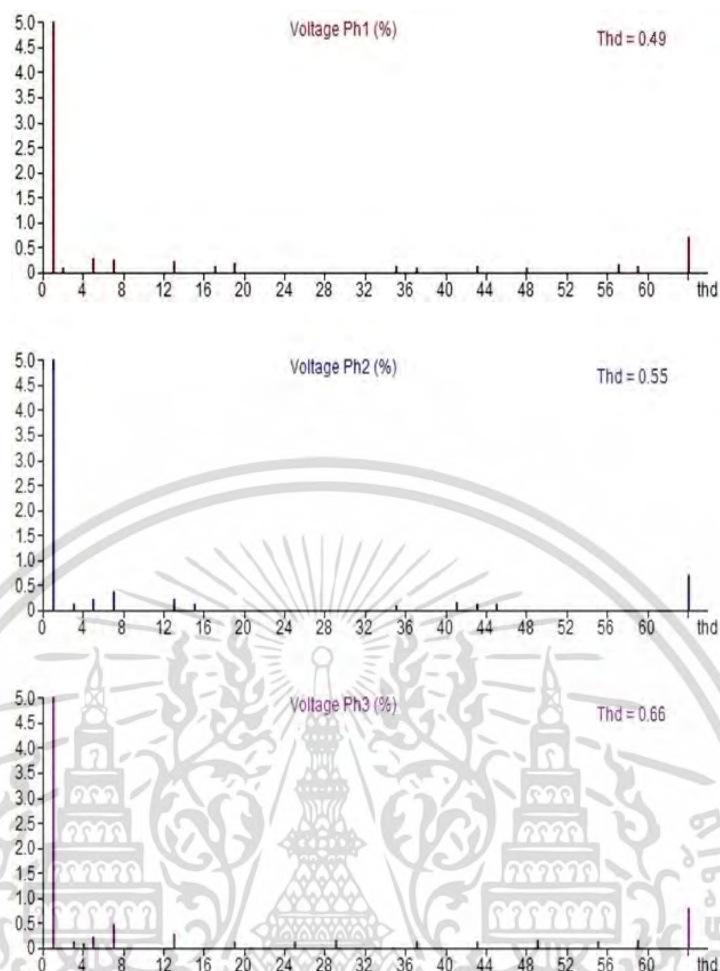
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4

ลำดับฮาร์มอนิก	แรงดันไฟฟ้า (V)			%THDv		
	1	2	3	1	2	3
0	0.04	0.01	0.12	0.01	0.00	0.05
1	221.23	226.85	231.66	100.00	100.00	100.00
2	0.25	0.11	0.08	0.11	0.05	0.03
3	0.02	0.25	0.30	0.01	0.11	0.13
4	0.09	0.08	0.27	0.04	0.04	0.12
5	0.68	0.59	0.57	0.31	0.26	0.25
6	0.15	0.09	0.23	0.07	0.04	0.10
7	0.57	0.91	1.12	0.26	0.40	0.48
8	0.08	0.01	0.02	0.04	0.01	0.01
9	0.13	0.17	0.08	0.06	0.07	0.03
10	0.03	0.15	0.11	0.01	0.07	0.05
11	0.15	0.22	0.19	0.07	0.10	0.08
12	0.02	0.09	0.17	0.01	0.04	0.07
13	0.50	0.45	0.66	0.23	0.20	0.28

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 สเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4

ตารางที่ 5.9 ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4

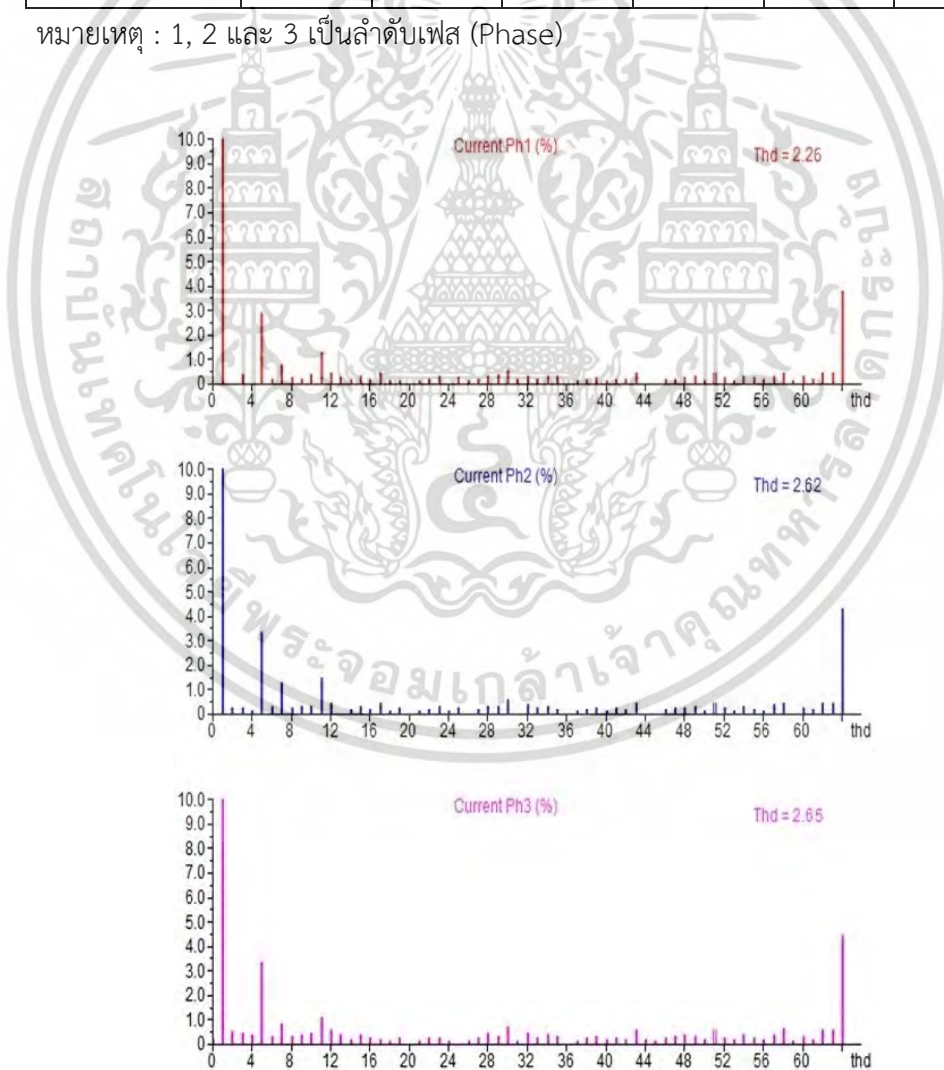
ลำดับฮาร์มอนิก	กระแสไฟฟ้า (A)			%THDi		
	1	2	3	1	2	3
0	0.98	0.29	3.01	0.04	0.03	0.13
1	2236.27	2239.36	2199.82	100.00	100.00	100.00
2	2.21	3.54	10.46	0.10	0.16	0.48
3	6.69	3.13	6.98	0.30	0.14	0.32
4	1.47	1.99	6.71	0.07	0.09	0.31
5	40.19	46.69	47.60	1.80	2.08	2.16
6	3.59	4.94	5.21	0.16	0.22	0.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.9 ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4

ลำดับฮาร์มอนิก	กระแสไฟฟ้า (A)			%THDi		
	1	2	1	2	1	2
7	13.48	18.69	14.15	0.60	0.83	0.64
8	4.24	4.55	5.57	0.19	0.20	0.25
9	5.28	7.47	8.41	0.24	0.33	0.38
10	6.72	5.45	7.88	0.30	0.24	0.36
11	23.23	26.63	20.19	1.04	1.19	0.92
12	6.23	6.48	9.90	0.28	0.29	0.45
13	3.96	0.90	5.97	0.18	0.04	0.27

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)



รูปที่ 5.8 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลสเปกตรัมของระบบในตารางที่ 5.8-5.9 พบว่าค่า %THDv และ %THDi ในลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 มีค่าที่ลดน้อยลงอย่างเห็นได้ชัดเจนเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุ (ตารางที่ 5.5-5.6) เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 519-2014

ทำการติดตามผลหลังจากติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟไประยะเวลาหนึ่งภายในระบบไฟฟ้าของโรงงาน ไม่พบปัญหาฮาร์มอนิกและการเกิดสถานะเรโซแนนซ์ในระบบอีก และไม่เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าภายในระบบ นำไปสู่คุณภาพไฟฟ้าที่ดีขึ้นภายในโรงงาน แสดงค่าตัวประกอบกำลังในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ตัวประกอบกำลังหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4

### 5.1.2 บริเวณหม้อแปลงไฟฟ้าของศูนย์กลางการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าที่ 2

ระบบไฟฟ้าภายในโรงงานจริงที่ทำการสำรวจและการทดลองมีแหล่งจำหน่ายพลังงานภายในโรงงานและภาระทางไฟฟ้าที่ศูนย์กลางการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าที่ 2 (MCC2) นี้มีความคล้ายคลึงกับ MCC1 โดยที่แหล่งจำหน่ายพลังงานเหมือนกัน ภาระทางไฟฟ้าเป็นประเภทเดียวกันแต่มีขนาดการใช้งานไม่เท่ากับโดยที่จะมีขนาดกระแสไฟฟ้าของภาระทางไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 2,470 A เพราะฉะนั้นแล้วอัตราส่วนระหว่างขนาดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับขนาดกระแสไฟฟ้าของภาระทางไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดจะได้  $I_{sc}/I_L = 50000/2470 = 20.243$  จะเลือกใช้ขีดจำกัดความผิดพลาดกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบในช่วง 120 V ถึง 69 kV ในตารางที่ 2.2 ในช่วง  $20 < 50$  และเลือกใช้ขีดจำกัดความผิดพลาดแรงดันไฟฟ้าในตารางที่ 2.1 ในช่วง  $V \leq 1.0 \text{ kV}$  เช่นเดียวกันกับที่ MCC1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.2.1 ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟ

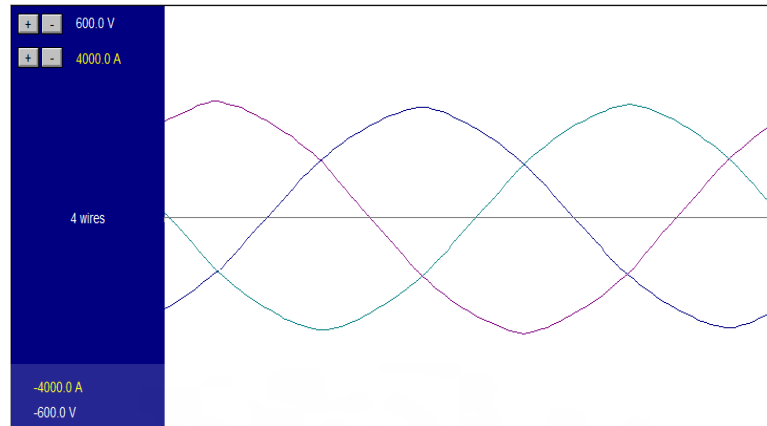
ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟหรือในสภาวะการทำงานปกติของโรงงานที่มีภาระทางไฟฟ้าเป็นโวลต์ไฟฟ้ากระแสสลับควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก แสดงในตารางที่ 5.10 พบว่าค่า %THDv และ %THDi ในแต่ละเฟสมีค่าที่เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 519-2014 แต่ก็ยังคงเกิดความเสียหายขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในระบบมีลักษณะคล้ายคลึงกับรูปที่ 4.1-4.4 จึงจำเป็นต้องได้รับการแก้ไข

ตารางที่ 5.10 ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4

Phase	V <sub>rms</sub> (V)	I <sub>rms</sub> (A)	%THDv	%THDi	V <sub>Line</sub>
1	214.92	2470.142	1.59	2.95	381.69
2	220.26	2459.833	1.43	3.32	382.12
3	225.86	2416.853	1.64	3.14	380.90
Total	I <sub>null</sub>	235.815			

ตารางที่ 5.10 ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4 (ต่อ)

Phase	S (kVA)	P (kW)	Q (kVAR)	pf.	Freq (Hz)
1	530.871	480.745	225.186	0.906	
2	541.792	503.528	199.995	0.929	
3	545.876	486.333	247.911	0.891	
Total	1617.323	1470.606	673.092	0.91	49.82



รูปที่ 5.10 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4



รูปที่ 5.11 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4

ตารางที่ 5.11 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4

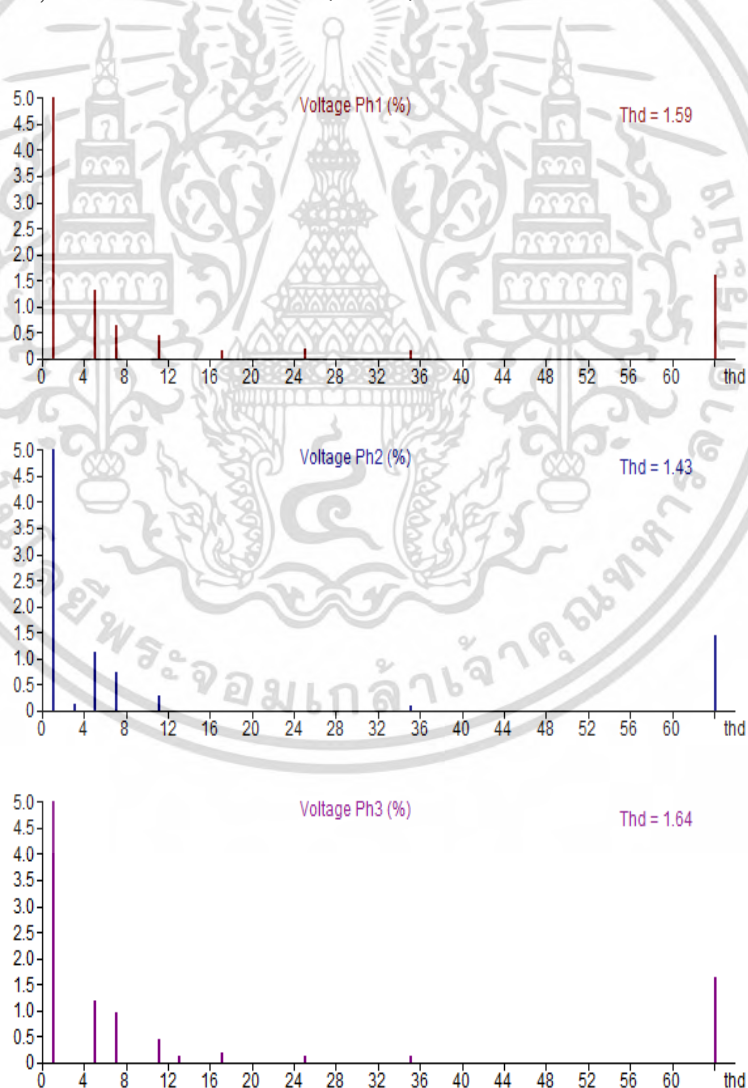
ลำดับฮาร์มอนิก	แรงดันไฟฟ้า (V)			%THDv		
	1	2	3	1	2	3
0	0.02	0.04	0.06	0.01	0.02	0.03
1	214.89	220.23	225.83	100.00	100.00	100.00
2	0.04	0.20	0.16	0.02	0.09	0.07
3	0.21	0.25	0.15	0.10	0.11	0.07
4	0.03	0.09	0.10	0.01	0.04	0.04
5	2.83	2.48	2.69	1.32	1.13	1.19
6	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02
7	1.39	1.64	2.19	0.65	0.74	0.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.11 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4 (ต่อ)

ลำดับฮาร์โมนิก	แรงดันไฟฟ้า (V)		%THDv			
	1	2	1	2	1	2
8	0.11	0.03	0.04	0.05	0.01	0.02
9	0.12	0.18	0.04	0.05	0.08	0.02
10	0.06	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02
11	0.92	0.64	0.97	0.43	0.29	0.43
12	0.00	0.07	0.08	0.00	0.03	0.04
13	0.09	0.21	0.26	0.04	0.10	0.12

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)



รูปที่ 5.12 สเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ

โรงงานที่ 4

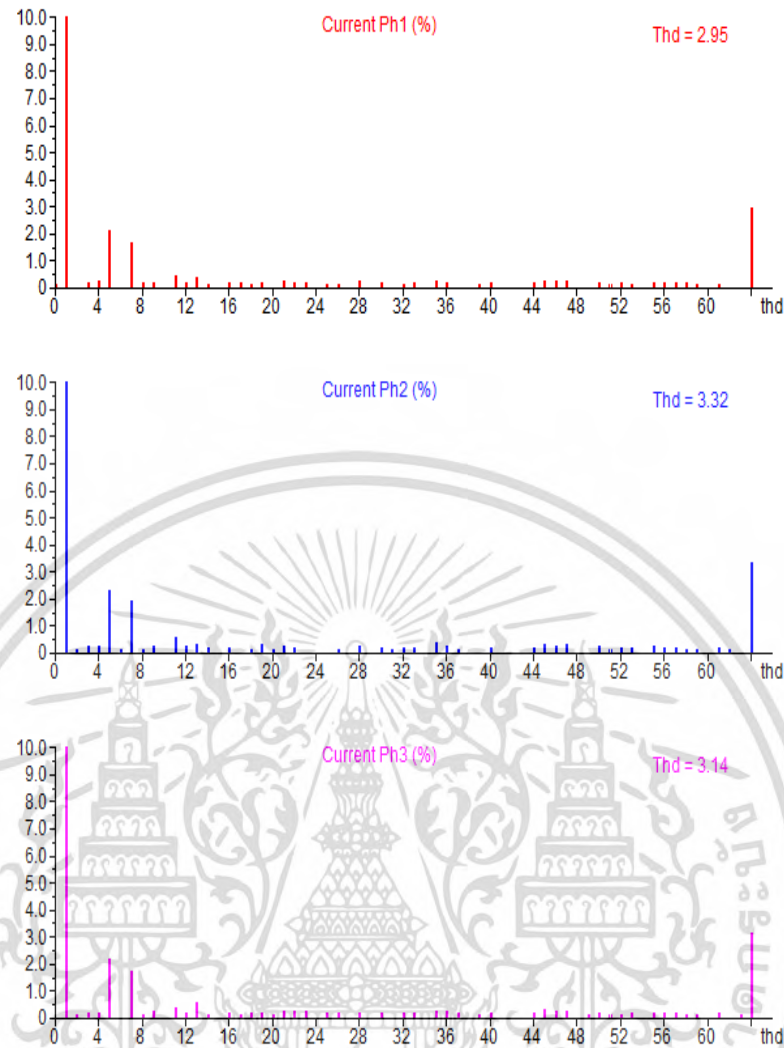
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.12 ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบก่อนติดตั้งวงจกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4

ลำดับฮาร์มอนิก	กระแสไฟฟ้า (A)			%THDi		
	1	2	3	1	2	3
0	2.91	1.24	0.97	0.12	0.05	0.04
1	2469.06	2458.48	2415.66	100.00	100.00	100.00
2	1.89	3.43	2.44	0.08	0.14	0.10
3	5.11	5.71	4.73	0.21	0.23	0.20
4	6.81	6.60	4.78	0.28	0.27	0.20
5	51.49	55.96	52.87	2.09	2.28	2.19
6	1.72	3.26	0.48	0.07	0.13	0.02
7	40.44	47.81	42.29	1.64	1.94	1.75
8	3.96	3.64	3.30	0.16	0.15	0.14
9	4.83	6.69	6.49	0.20	0.27	0.27
10	1.40	0.43	0.95	0.06	0.02	0.04
11	11.72	14.38	8.77	0.47	0.59	0.36
12	4.21	5.31	5.02	0.17	0.22	0.21
13	8.86	7.74	14.37	0.36	0.31	0.60

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4

จากข้อมูลสเปกตรัมความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แสดงในตารางที่ 5.11 และ 5.12 ตามลำดับ พบว่าค่า %THD<sub>v</sub> และ %THD<sub>i</sub> ในลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 มีค่าสูงกว่าลำดับอื่น ๆ แต่ไม่เกินมาตรฐาน IEEE 519-2014 จึงสันนิษฐานว่าจะมีแนวโน้มการเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ที่ลำดับฮาร์มอนิกดังกล่าว ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่สูงนำไปสู่การเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในระบบ เพราะฉะนั้นจะมุ่งเน้นในการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เป็นหลักเท่านั้น เช่นเดียวกับที่ MCC1

#### 5.1.2.2 ผลการสำรวจขณะติดตั้งตัวเก็บประจุ

การสำรวจขณะที่โรงงานได้มีการติดตั้งตัวเก็บประจุอย่างเดียวเพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า และชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนคืนแก่ระบบจากการที่ถูกภาระทางไฟฟ้านำไปใช้ระหว่างการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นข้อกำหนดหนึ่งที่โรงงานทั่วไปจะต้องปฏิบัติตามไม่สามารถทำการตรวจวัดได้ มีสาเหตุเดียวกับหัวข้อที่ 5.1.1.2 จึงขอนำข้อมูลต่าง ๆ มาใช้เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 5.4 ผลการสำรวจขณะติดตั้งตัวเก็บประจุ

Phase	$V_{rms}$ (V)	$I_{rms}$ (A)	%THDv	%THDi	$V_{Line}$
1	214.44	1185.95	6.28	13.23	371.42
2	218.26	1229.44	5.91	13.06	378.04
3	227.59	1208.39	6.25	13.29	394.20
Total	$I_{null}$	143.836			

ตารางที่ 5.4 ผลการสำรวจขณะติดตั้งตัวเก็บประจุ (ต่อ)

Phase	S (kVA)	P (kW)	Q (kVAR)	pf.	Freq (Hz)
1	240.531	195.028	140.780	0.821	
2	245.554	209.792	127.608	0.843	
3	248.241	195.398	153.112	0.778	
Total	734.299	600.218	421.500	0.81	50.01

ตารางที่ 5.5 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบขณะติดตั้งตัวเก็บประจุ

ลำดับฮาร์มอนิก	แรงดันไฟฟ้า (V)			%THDv		
	1	2	3	1	2	3
0	0.14	0.48	0.007	0.07	0.22	0.03
1	214.44	218.26	227.59	100.00	100.00	100.00
2	4.48	3.13	2.21	2.09	1.43	0.97
3	2.54	0.87	2.25	1.19	0.40	0.99
4	2.91	0.15	2.43	1.36	0.07	1.07
5	8.53	8.29	8.66	3.98	3.80	3.80
6	3.03	2.97	4.14	1.41	1.36	1.82
7	1.62	3.31	1.83	0.76	1.52	0.80
8	4.26	2.49	1.84	1.99	1.14	0.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบขณะติดตั้งตัวเก็บประจุ (ต่อ)

ลำดับฮาร์มอนิก	แรงดันไฟฟ้า (V)			%THDv		
	1	2	1	2	1	2
9	1.86	1.07	1.40	0.87	0.49	0.62
10	3.34	1.00	2.23	1.56	0.46	0.98
11	4.40	5.27	7.70	2.05	2.41	3.38
12	1.21	4.79	3.35	0.57	2.20	1.47
13	2.83	2.90	3.16	1.32	1.33	1.39

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

ตารางที่ 5.6 ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบขณะติดตั้งตัวเก็บประจุ

ลำดับฮาร์มอนิก	กระแสไฟฟ้า (A)			%THDi		
	1	2	3	1	2	3
0	9.11	3.15	6.49	0.77	0.26	0.54
1	1185.95	1229.44	1208.39	100.00	100.00	100.00
2	48.47	36.67	22.21	4.09	2.98	1.84
3	8.17	6.98	14.56	0.69	0.57	1.20
4	9.16	6.35	12.40	0.77	0.52	1.03
5	113.49	119.35	124.79	9.57	9.71	10.33
6	4.84	7.86	9.86	0.41	0.64	0.82
7	54.95	55.34	55.81	4.63	4.50	4.62
8	11.34	6.87	3.75	0.96	0.56	0.31
9	3.03	1.60	3.78	0.26	0.13	0.31
10	3.18	2.05	5.07	0.27	0.17	0.42
11	70.79	71.45	70.95	5.97	5.81	5.87
12	10.71	11.98	11.84	0.90	0.97	0.98
13	30.05	41.17	30.16	2.53	3.35	2.50

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลสเปกตรัมของระบบในตารางที่ 5.5-5.6 พบว่าค่า %THDv และ %THDi ในลำดับฮาร์โมนิกที่ 5 จะมีค่าสูงกว่าลำดับอื่น ๆ และสูงกว่าสภาวะการทำงานปกติอย่างชัดเจน อาจจะไปสู่การยืนยันข้อสันนิษฐานก่อนหน้าที่ได้คาดการณ์ไว้

### 5.1.2.3 ผลการทดลองหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟ

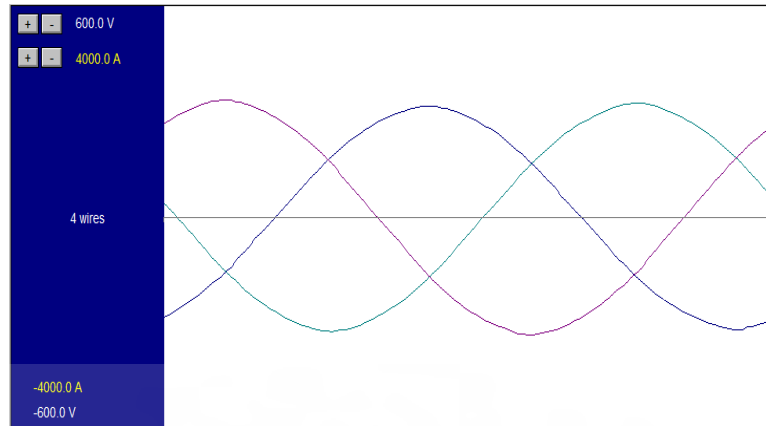
หลังจากการติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟตามรูปที่ 4.15 ในระบบไฟฟ้าภายในโรงงานจริง มุ่งเน้นการแก้ปัญหาลำดับฮาร์โมนิกที่ 5 ที่มีในระบบ แสดงข้อมูลหลังติดตั้งวงจรกรองในตารางที่ 5.13 พบว่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและกระแสไฟฟ้าลดลงเปรียบเทียบกับตารางที่ 5.1 เป็นผลดีที่ระบบมีคุณภาพไฟฟ้าดีขึ้น

ตารางที่ 5.13 ผลการทดลองหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4

Phase	$V_{rms}$ (V)	$I_{rms}$ (A)	%THDv	%THDi	$V_{Line}$
1	221.64	2468.73	0.82	2.49	392.12
2	229.42	2460.16	0.80	2.65	399.37
3	232.14	2414.98	0.86	2.59	403.08
Total	$I_{null}$	239.78			

ตารางที่ 5.13 ผลการทดลองหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4 (ต่อ)

Phase	S (kVA)	P (kW)	Q (kVAR)	pf.	Freq (Hz)
1	547.17	541.70	77.19	0.99	
2	564.41	558.77	79.62	0.99	
3	560.61	555.01	79.08	0.99	
Total	1672.19	1655.47	235.89	0.99	49.98



รูปที่ 5.14 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4



รูปที่ 5.15 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4

ตารางที่ 5.14 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4

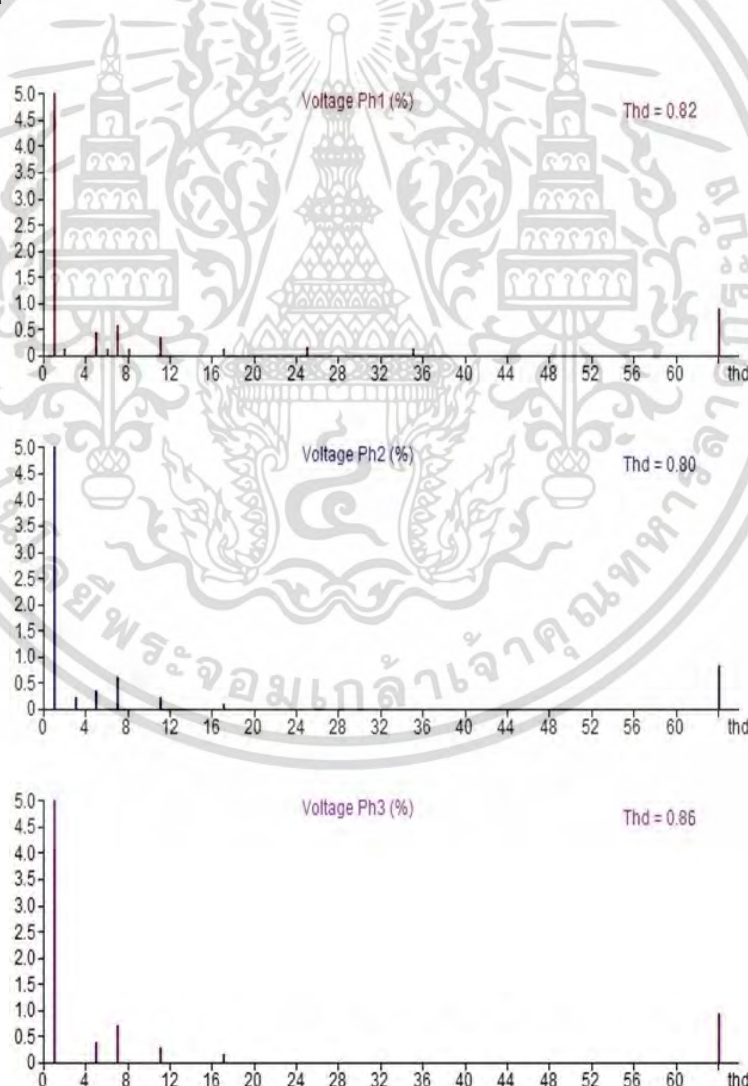
ลำดับฮาร์มอนิก	แรงดันไฟฟ้า (V)			%THDv		
	1	2	3	1	2	3
0	0.03	0.13	0.08	0.01	0.03	0.05
1	221.62	229.40	232.12	100.00	100.00	100.00
2	0.27	0.03	0.19	0.12	0.01	0.08
3	0.15	0.49	0.17	0.07	0.21	0.07
4	0.17	0.16	0.15	0.08	0.07	0.06
5	0.95	0.83	0.90	0.43	0.36	0.39
6	0.28	0.08	0.17	0.13	0.03	0.07
7	1.23	1.34	1.61	0.56	0.58	0.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.14 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4 (ต่อ)

ลำดับฮาร์โมนิก	แรงดันไฟฟ้า (V)			%THDv		
	1	2	1	2	1	2
8	0.22	0.09	0.11	0.10	0.04	0.05
9	0.10	0.05	0.06	0.05	0.02	0.03
10	0.02	0.08	0.02	0.01	0.03	0.01
11	0.76	0.57	0.63	0.34	0.25	0.27
12	0.09	0.05	0.06	0.04	0.02	0.03
13	0.03	0.14	0.16	0.01	0.06	0.07

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)



รูปที่ 5.16 สเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ

โรงงานที่ 4

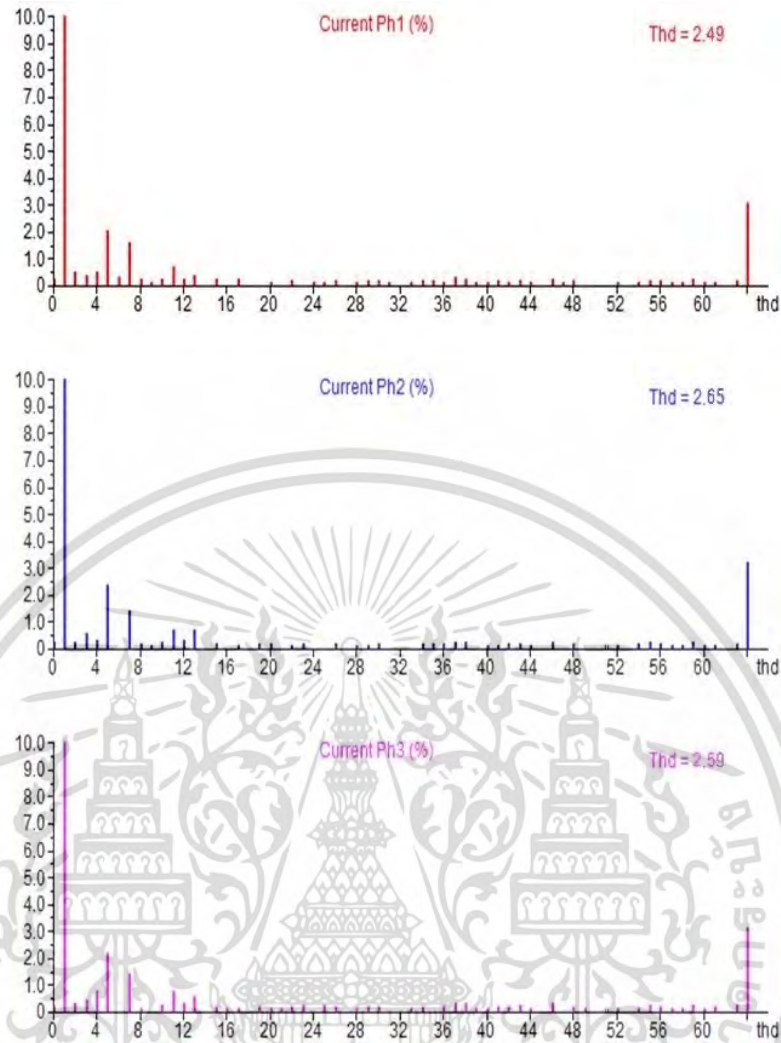
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.15 ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ  
โรงงานที่ 4

ลำดับฮาร์มอนิก	กระแสไฟฟ้า (A)			%THDi		
	1	2	3	1	2	3
0	4.90	5.10	4.46	0.23	0.23	0.32
1	2467.67	2459.58	2413.24	100.00	100.00	100.00
2	11.23	5.52	7.56	0.46	0.22	0.31
3	8.72	11.95	10.11	0.35	0.49	0.42
4	10.96	5.51	15.78	0.44	0.22	0.65
5	43.98	51.34	44.78	1.78	2.09	1.86
6	5.18	1.98	1.86	0.21	0.08	0.08
7	33.49	29.82	32.17	1.36	1.21	1.33
8	5.27	4.05	2.49	0.21	0.16	0.10
9	2.79	2.68	1.42	0.11	0.11	0.06
10	5.89	5.13	4.41	0.24	0.21	0.18
11	14.79	15.76	15.89	0.60	0.64	0.66
12	5.20	5.94	6.89	0.21	0.24	0.29
13	7.61	13.36	11.05	0.31	0.54	0.46

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4

จากข้อมูลสเปกตรัมของระบบในตารางที่ 5.14-5.15 พบว่าค่า %THDv และ %THDi ในลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 มีค่าที่ลดน้อยลงอย่างชัดเจนเปรียบเทียบกับระบบที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุ (ตารางที่ 5.5-5.6) เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 519-2014

ทำการติดตามผลหลังจากติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟไประยะเวลาหนึ่งภายในระบบไฟฟ้าของโรงงาน ไม่พบปัญหาฮาร์มอนิกและการเกิดสถานะเรโซแนนซ์ในระบบอีกและไม่เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าภายในระบบ นำไปสู่คุณภาพไฟฟ้าที่ดีขึ้นภายในโรงงาน แสดงค่าตัวประกอบกำลังในรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 ตัวประกอบกำลังหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4

## 5.2 ผลการสำรวจและการทดลองก่อนและหลังการติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟ ณ โรงงานที่ 5

### 5.2.1 บริเวณตู้ควบคุมไฟฟ้าหลักที่ 1

ระบบไฟฟ้าภายในโรงงานจริงที่ทำการสำรวจและการทดลองมีแหล่งจ่ายพลังงานภายในโรงงานเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 1,500 kVA มีค่าร้อยละแรงดันไฟฟ้าอิมพีแดนซ์ (%Voltage impedance, %Z) เท่ากับ 6% ประเภทเดลต้า-สตาร์หรือเดลต้า-วาย (Delta-Star, D-Y) ระดับแรงดันไฟฟ้า 22 kV/400 V, 3 เฟส โดยส่วนของตู้ควบคุมไฟฟ้าหลักที่ 1 (Main Distribution Board 1, MDB1) มีการเชื่อมต่อกับระบบแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าหรือระบบโซลาร์เซลล์ (Solar cells system) ขนาด 1 MW ทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกขึ้น

จากข้อมูลของระบบไฟฟ้าภายในโรงงานที่กล่าวมาข้างต้นและขนาดกระแสไฟฟ้าของภาระทางไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด ( $I_L$ ) เท่ากับ 1,135 A สามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรได้จากสมการต่อไปนี้

$$I_{SC} = S/\%Z \quad (5.1)$$

โดยที่  $I_{SC}$  คือ ขนาดกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (A)

$S$  คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power) (kVA)

$\%Z$  คือ ร้อยละแรงดันไฟฟ้าอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (5.1) แทนค่าในสมการจะได้  $I_{SC} = 1500 \text{ kVA}/0.06 = 25000 \text{ A}$

อัตราส่วนระหว่างขนาดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับขนาดกระแสไฟฟ้าของภาระทางไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดจะได้  $I_{SC}/I_L = 25000/1135 = 22.026$  เพราะฉะนั้นเลือกใช้ซีดีจำกัดความผิดพลาดกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบในช่วง 120 V ถึง 69 kV ในตารางที่ 2.2 ในช่วง  $20 < 50$  และเลือกใช้ซีดีจำกัดความผิดพลาดแรงดันไฟฟ้าในตารางที่ 2.1 ในช่วง  $V \leq 1.0 \text{ kV}$  ตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน IEEE 519-2014

### 5.2.1.1 ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟ

ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟหรือในสภาวะการทำงานปกติของโรงงานที่มีการเชื่อมต่อกับระบบโซล่าเซลล์ ซึ่งการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในขั้นต้นแผงพลังงานแสงอาทิตย์ (แผงโซล่าเซลล์) จะผลิตกระแสไฟฟ้าในรูปแบบของไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current, DC) และทำการแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อนำไปใช้ในระบบไฟฟ้าหลักของโรงงานโดยอินเวอร์เตอร์พลังงานแสงอาทิตย์หรือโซล่าอินเวอร์เตอร์ (Solar inverter) โซล่าอินเวอร์เตอร์เป็นภาระทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นจึงทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกในสภาวะเรโซแนนซ์ขึ้นในระบบ

ถึงแม้ว่าค่า %THDv และ %THDi จะมีค่าน้อยและไม่เกินมาตรฐาน IEEE 519-2014 ที่กำหนดไว้ แต่เกิดความเสียหายขึ้นกับตัวเก็บประจุที่ติดตั้งก่อนหน้านี้จากสภาวะเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้น แสดงข้อมูลทางไฟฟ้าต่าง ๆ ในตารางที่ 5.16 ทำให้จำเป็นต้องได้รับการแก้ไข

ตารางที่ 5.16 ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5

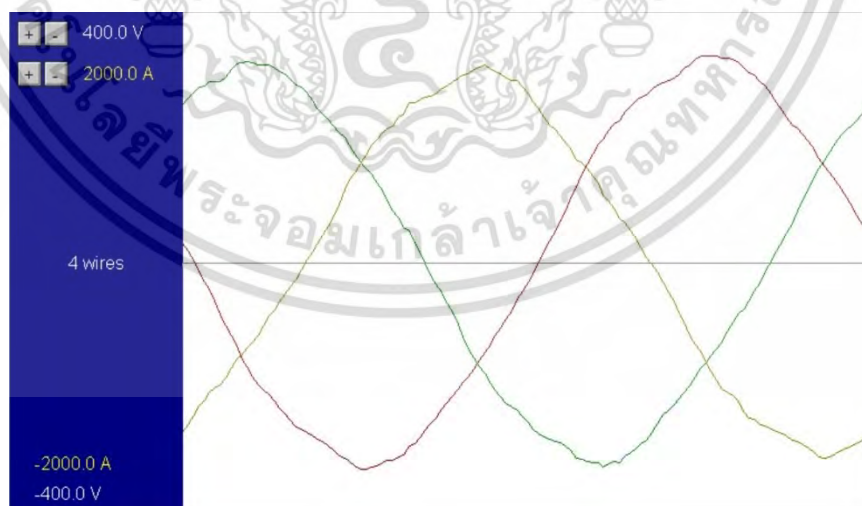
Phase	$V_{rms}$ (V)	$I_{rms}$ (A)	%THDv	%THDi	$V_{Line}$
1	227.06	1106.438	0.71	3.05	396.60
2	230.32	1134.831	0.71	3.15	396.34
3	227.48	1057.039	1.00	3.83	393.28
Total	$I_{null}$	77.969			

ตารางที่ 5.16 ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5 (ต่อ)

Phase	S (kVA)	P (kW)	Q (kVAR)	pf.	Freq (Hz)
1	251.228	219.728	121.798	0.875	
2	261.374	229.370	125.321	0.878	
3	240.459	215.165	107.352	0.895	
Total	752.925	664.264	354.471	0.88	50.03



รูปที่ 5.19 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5



รูปที่ 5.20 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5

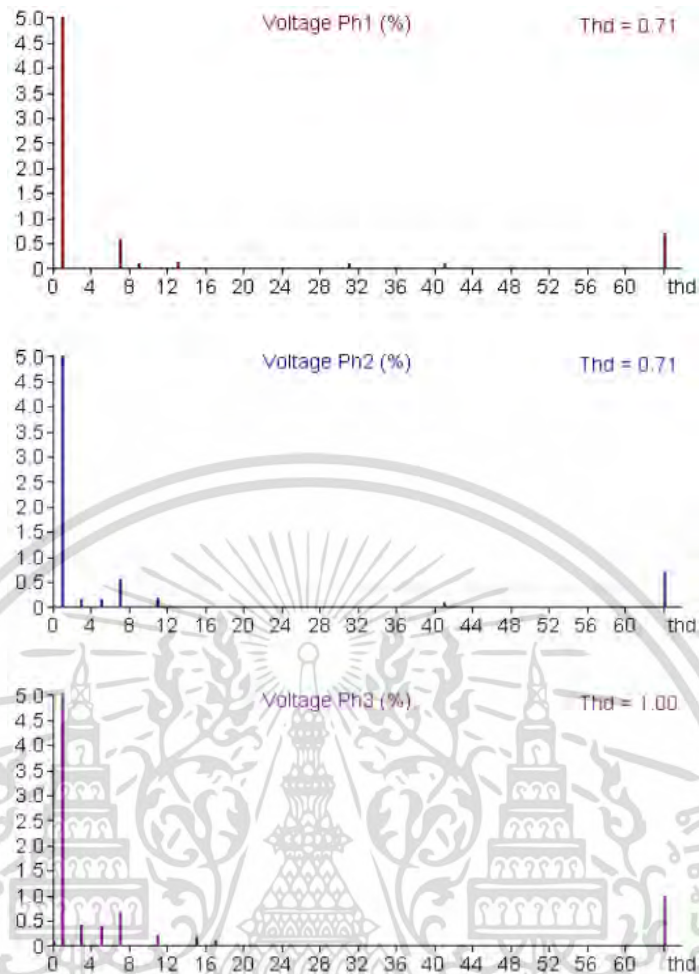
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.17 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5

ลำดับฮาร์มอนิก	แรงดันไฟฟ้า (V)			%THDv		
	1	2	3	1	2	3
0	0.02	0.09	0.25	0.01	0.04	0.11
1	227.05	230.31	227.47	100.00	100.00	100.00
2	0.09	0.12	0.07	0.04	0.05	0.03
3	0.19	0.38	0.96	0.08	0.17	0.42
4	0.08	0.03	0.14	0.03	0.01	0.06
5	0.21	0.35	0.90	0.09	0.15	0.39
6	0.10	0.10	0.11	0.05	0.04	0.05
7	1.33	1.31	1.53	0.58	0.57	0.67
8	0.08	0.09	0.09	0.04	0.04	0.04
9	0.17	0.01	0.01	0.08	0.00	0.00
10	0.08	0.01	0.10	0.04	0.00	0.01
11	0.19	0.45	0.49	0.09	0.20	0.21
12	0.02	0.01	0.14	0.01	0.00	0.06
13	0.30	0.05	0.13	0.13	0.02	0.06

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.21 สเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5

ตารางที่ 5.18 ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5

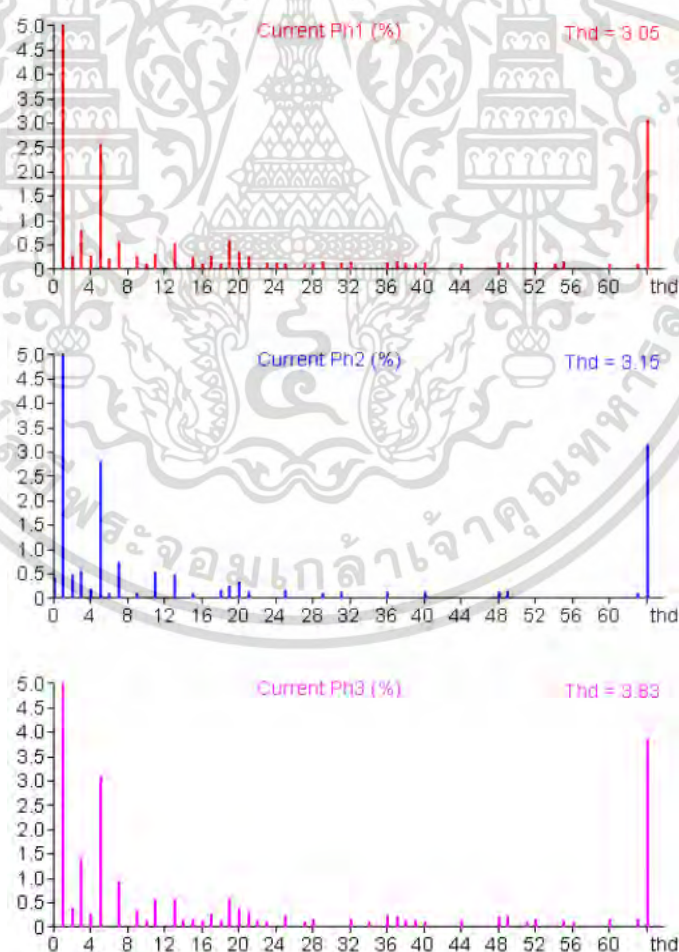
ลำดับฮาร์มอนิก	กระแสไฟฟ้า (A)			%THDi		
	1	2	3	1	2	3
0	0.95	4.85	0.90	0.09	0.43	0.09
1	1105.92	1134.25	1056.26	100.00	100.00	100.00
2	2.97	5.47	3.93	0.27	0.48	0.37
3	8.61	6.21	14.79	0.78	0.55	1.40
4	2.98	2.00	2.79	0.27	0.18	0.26
5	28.48	31.68	32.57	2.57	2.79	3.08
6	2.31	1.18	0.70	0.21	0.10	0.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.18 ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ  
โรงงานที่ 5 (ต่อ)

ลำดับฮาร์มอนิก	กระแสไฟฟ้า (A)			%THDi		
	1	2	1	2	1	2
7	6.23	8.27	9.88	0.56	0.73	0.94
8	0.77	1.07	0.75	0.07	0.09	0.07
9	3.07	1.18	3.68	0.28	0.10	0.35
10	1.10	0.71	1.05	0.10	0.06	0.10
11	3.29	5.91	5.78	0.30	0.52	0.55
12	0.78	0.83	0.21	0.07	0.07	0.02
13	5.84	5.43	5.92	0.53	0.48	0.56

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)



รูปที่ 5.22 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ  
โรงงานที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลสเปกตรัมของระบบในตารางที่ 5.17-5.18 พบว่าค่า %THDv มีค่ามากที่สุดประมาณ 1% และ %THDi มีค่ามากที่สุดประมาณ 3.08% และในแต่ละลำดับฮาร์โมนิกมีค่าไม่เกินมาตรฐาน ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่ามีสภาวะเรโซแนนซ์เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าจากการที่มีความผิดเพี้ยนทางไฟฟ้าน้อยแต่ทำให้ตัวเก็บประจุเกิดความเสียหายได้

### 5.2.1.2 ผลการทดลองหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟ

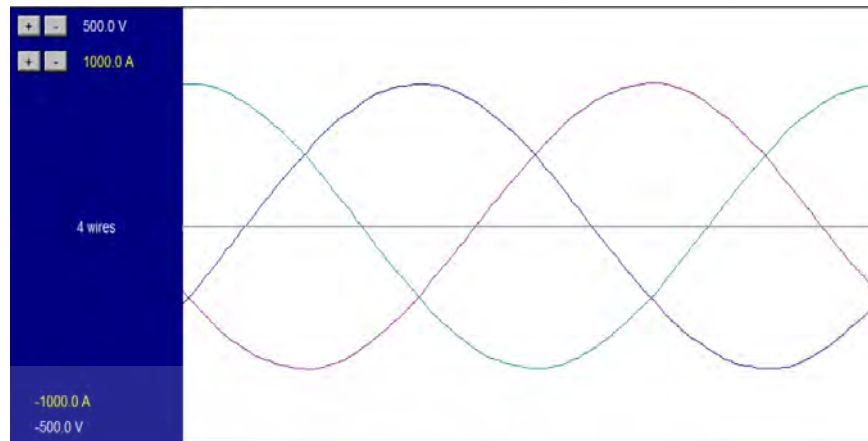
หลังจากการติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟตามรูปที่ 4.17 ในระบบไฟฟ้าภายในโรงงานจริง มุ่งเน้นการแก้ปัญหาลำดับฮาร์โมนิกที่ 5 ที่มีในระบบ แสดงข้อมูลหลังติดตั้งวงจรกรองในตารางที่ 5.19 เป็นผลดีที่ระบบมีคุณภาพไฟฟ้าดีขึ้น

ตารางที่ 5.19 ผลการทดลองหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5

Phase	$V_{rms}$ (V)	$I_{rms}$ (A)	%THDv	%THDi	$V_{Line}$
1	229.78	1102.67	0.44	2.59	398.99
2	230.56	1138.32	0.54	2.88	400.34
3	228.98	1053.09	0.66	3.41	397.61
Total	$I_{null}$	84.27			

ตารางที่ 5.19 ผลการทดลองหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5 (ต่อ)

Phase	S (kVA)	P (kW)	Q (kVAR)	pf.	Freq (Hz)
1	253.37	250.84	35.74	0.99	
2	262.45	259.83	37.02	0.99	
3	241.14	236.31	47.99	0.98	
Total	756.96	746.98	120.75	0.99	50.00



รูปที่ 5.23 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5



รูปที่ 5.24 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5

ตารางที่ 5.20 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5

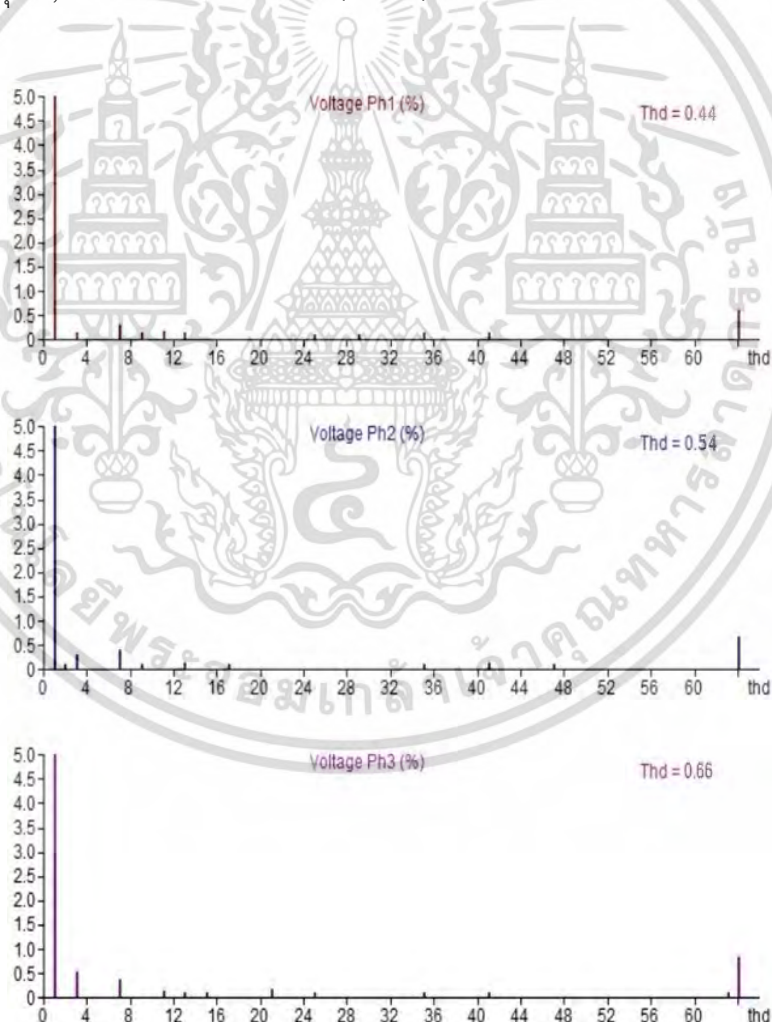
ลำดับฮาร์มอนิก	แรงดันไฟฟ้า (V)			%THDv		
	1	2	3	1	2	3
0	0.19	0.11	0.16	0.06	0.05	0.07
1	229.79	230.55	228.96	100.00	100.00	100.00
2	0.21	0.32	0.23	0.09	0.14	0.10
3	0.36	0.75	1.17	0.16	0.33	0.51
4	0.13	0.11	0.16	0.06	0.05	0.07
5	0.13	0.06	0.21	0.06	0.03	0.09
6	0.02	0.11	0.07	0.01	0.05	0.03
7	0.62	0.81	0.76	0.27	0.35	0.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.20 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ  
โรงงานที่ 5 (ต่อ)

ลำดับฮาร์โมนิก	แรงดันไฟฟ้า (V)			%THDv		
	1	2	1	2	1	2
8	0.04	0.02	0.07	0.02	0.01	0.03
9	0.31	0.25	0.13	0.13	0.11	0.06
10	0.08	0.07	0.11	0.03	0.03	0.05
11	0.43	0.20	0.37	0.19	0.09	0.16
12	0.07	0.05	0.08	0.03	0.02	0.03
13	0.35	0.30	0.24	0.15	0.13	0.10

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)



รูปที่ 5.25 สเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ  
โรงงานที่ 5

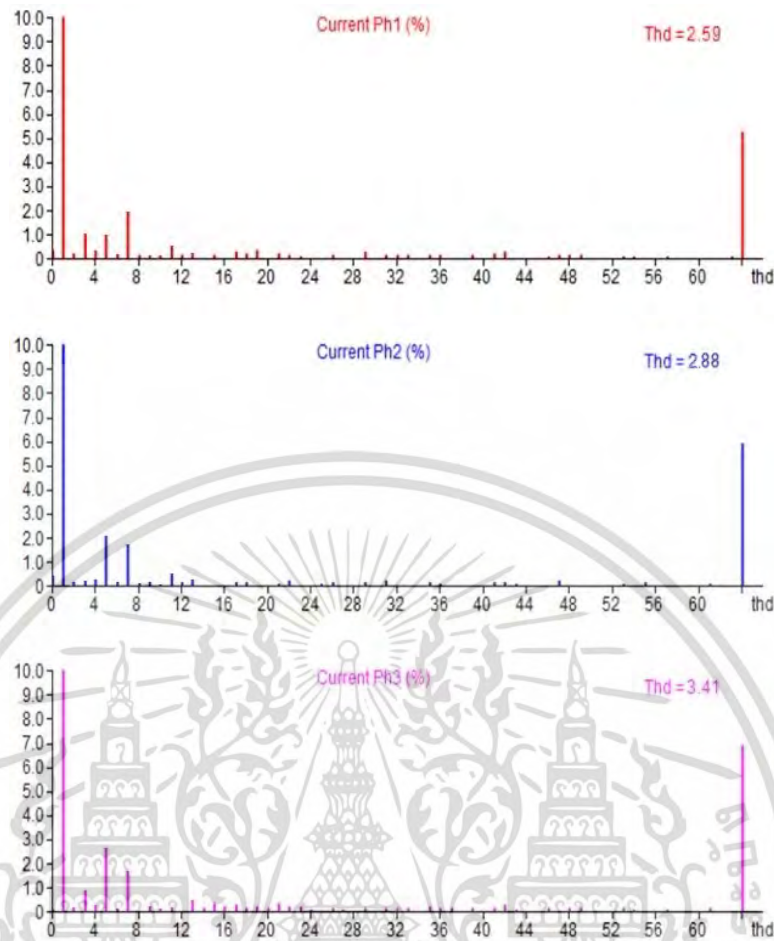
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.21 ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ  
โรงงานที่ 5

ลำดับฮาร์มอนิก	กระแสไฟฟ้า (A)			%THDi		
	1	2	3	1	2	3
0	1.81	2.87	0.76	0.45	0.68	0.39
1	1101.65	1137.13	1053.01	100.00	100.00	100.00
2	1.11	1.45	2.01	0.10	0.13	0.19
3	12.14	2.14	9.47	1.10	0.19	0.90
4	3.15	4.03	2.59	0.29	0.35	0.25
5	11.87	23.89	28.13	1.08	2.10	2.67
6	3.73	2.11	1.23	0.34	0.19	0.12
7	20.91	20.27	18.62	1.90	1.78	1.77
8	1.02	0.79	0.37	0.09	0.07	0.04
9	1.87	2.12	3.81	0.17	0.19	0.36
10	1.50	0.90	1.53	0.14	0.08	0.15
11	6.16	6.65	3.49	0.56	0.58	0.33
12	1.68	0.81	0.47	0.15	0.07	0.04
13	4.25	4.03	4.64	0.39	0.35	0.44

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.26 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5

จากข้อมูลสเปกตรัมของระบบในตารางที่ 5.20-5.21 พบว่าค่า %THD<sub>v</sub> มีค่าระหว่าง 0.01-0.51% และ %THD<sub>i</sub> มีค่ามากที่สุดประมาณ 2.67% และในแต่ละลำดับฮาร์โมนิกมีค่าไม่เกินมาตรฐานที่กำหนดไว้

ทำการติดตามผลหลังจากติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟไประยะเวลาหนึ่งภายในระบบไฟฟ้าของโรงงาน ไม่พบปัญหาฮาร์โมนิกและการเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ในระบบอีกและไม่เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าภายในระบบ นำไปสู่คุณภาพไฟฟ้าที่ดีขึ้นภายในโรงงานแสดงค่าตัวประกอบกำลังในรูปที่ 5.27



รูปที่ 5.27 ตัวประกอบกำลังหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5

### 5.3 ผลการสำรวจและการทดลองก่อนและหลังการติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟ ณ โรงงานที่ 6

#### 5.3.1 บริเวณตู้ควบคุมไฟฟ้าหลักที่ 1

ระบบไฟฟ้าภายในโรงงานจริงที่ทำการสำรวจและการทดลองมีแหล่งจ่ายพลังงานภายในโรงงานเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 1,500 kVA มีค่าร้อยละแรงดันไฟฟ้าอิมพีแดนซ์ (%Voltage impedance, %Z) เท่ากับ 5.87% ประเภทเดลต้า-สตาร์หรือเดลต้า-วาย (Delta-Star, D-Y) ระดับแรงดันไฟฟ้า 22 kV/400 V, 3 เฟส โดยส่วนของตู้ควบคุมไฟฟ้าหลักที่ 1 (Main Distribution Board 1, MDB1) ภาระทางไฟฟ้าเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็ก (Power supply) และประเภทคอมพิวเตอร์จำนวนมาก ทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกขึ้น

จากข้อมูลของระบบไฟฟ้าภายในโรงงานที่กล่าวมาข้างต้นและขนาดกระแสไฟฟ้าของภาระทางไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด ( $I_L$ ) ประมาณ 300 A สามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรได้จากสมการต่อไปนี้

$$I_{SC} = S/\%Z \quad (5.1)$$

โดยที่  $I_{SC}$  คือ ขนาดกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (A)

$S$  คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power) (kVA)

$\%Z$  คือ ร้อยละแรงดันไฟฟ้าอิมพีแดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (5.1) แทนค่าในสมการจะได้  $I_{SC} = 1500 \text{ kVA}/0.0587 = 25553.66 \text{ A}$

อัตราส่วนระหว่างขนาดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับขนาดกระแสไฟฟ้าของภาระทางไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดจะได้  $I_{SC}/I_L = 25553.66/300 = 85.179$  เพราะฉะนั้นเลือกใช้ซีดจำกัดความผิดปกติบนกระแสไฟฟ้าสำหรับระบบในช่วง 120 V ถึง 69 kV ในตารางที่ 2.2 ในช่วง  $50 < 100$  และเลือกใช้ซีดจำกัดความผิดปกติแรงดันไฟฟ้าในตารางที่ 2.1 ในช่วง  $V \leq 1.0 \text{ kV}$  ตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน IEEE 519-2014

### 5.3.1.1 ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟ

ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟหรือในสภาวะการทำงานปกติของโรงงาน แสดงในตารางที่ 5.22 พบว่าค่า %THDv และ %THDi แต่ละเฟสมีค่าที่เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 519-2014 แต่ยังคงเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในระบบ

ตารางที่ 5.22 ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6

Phase	$V_{rms}$ (V)	$I_{rms}$ (A)	%THDv	%THDi	$V_{Line}$
1	229.38	229.82	1.01	7.28	397.84
2	230.65	276.95	0.99	8.66	400.02
3	231.04	225.24	1.15	6.87	398.05

ตารางที่ 5.22 ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6 (ต่อ)

Phase	S (kVA)	P (kW)	Q (kVAR)	pf.	Freq (Hz)
1	49.69	47.81	-13.07	0.94	
2	61.21	59.97	-9.72	0.96	
3	49.87	48.40	-11.24	0.95	
Total	160.77	156.19	-34.03	0.95	49.96

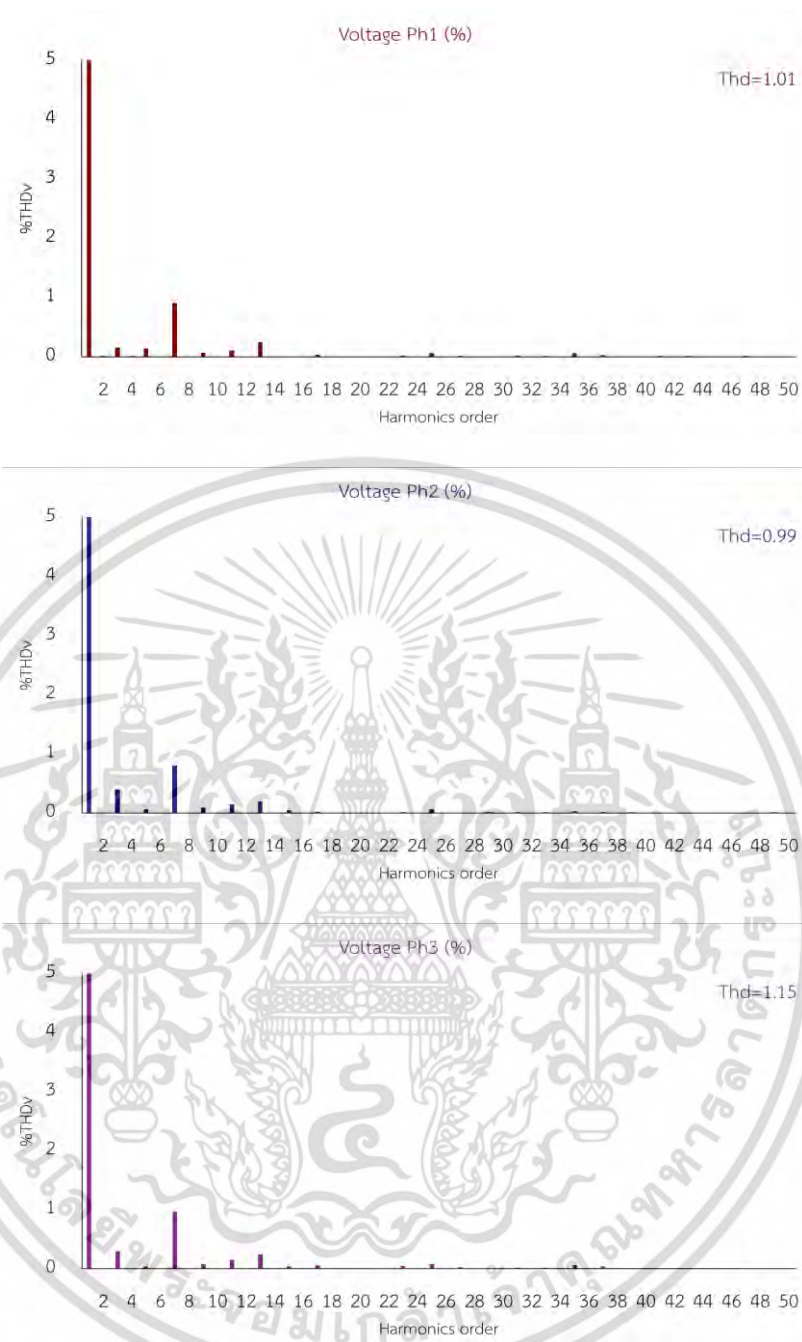
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.23 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ  
โรงงานที่ 6

ลำดับฮาร์มอนิก	แรงดันไฟฟ้า (V)			%THDv		
	1	2	3	1	2	3
1	229.37	230.64	231.03	100.00	100.00	100.00
2	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01
3	0.35	0.91	0.70	0.15	0.40	0.30
4	0.03	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01
5	0.32	0.15	0.09	0.14	0.06	0.04
6	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
7	2.08	1.85	2.25	0.91	0.80	0.97
8	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
9	0.16	0.22	0.19	0.07	0.10	0.08
10	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
11	0.24	0.34	0.35	0.11	0.15	0.15
12	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
13	0.58	0.46	0.57	0.25	0.20	0.25
14	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01
15	0.02	0.12	0.10	0.01	0.05	0.04

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.28 สเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6

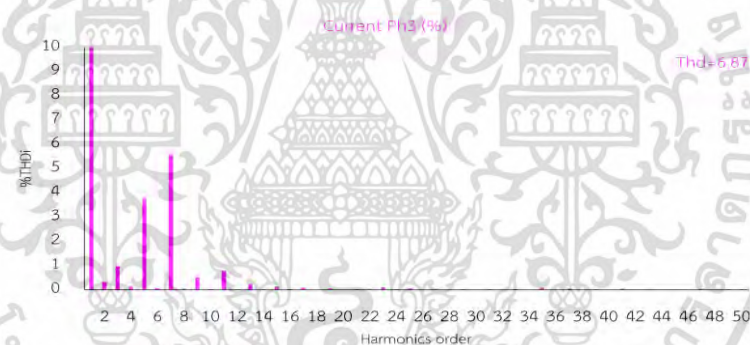
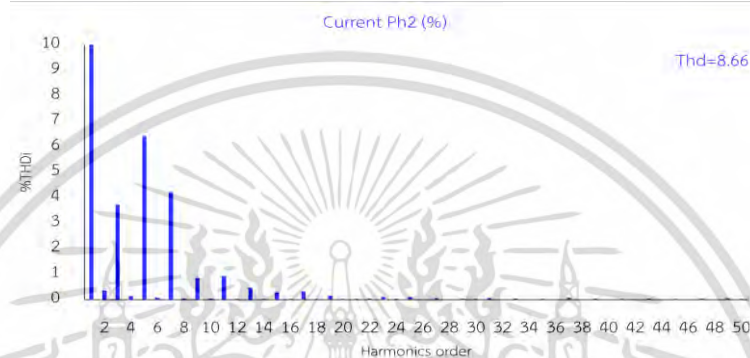
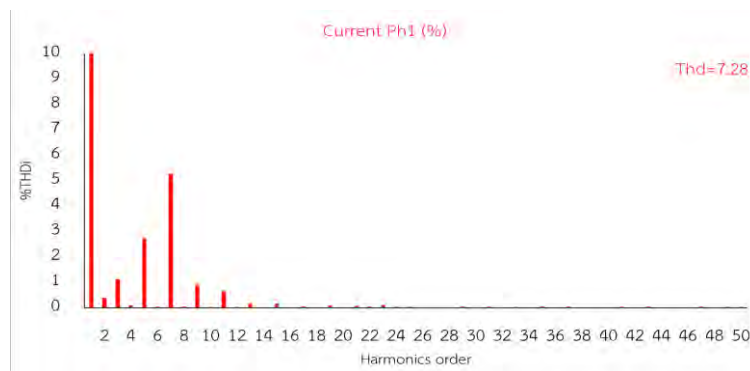
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.24 ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ  
โรงงานที่ 6

ลำดับฮาร์มอนิก	กระแสไฟฟ้า (A)			%THDi		
	1	2	3	1	2	3
1	229.16	274.94	224.39	100.00	100.00	100.00
2	0.90	0.98	0.75	0.39	0.36	0.33
3	2.58	10.25	2.19	1.13	3.72	0.97
4	0.20	0.36	0.32	0.09	0.13	0.14
5	6.24	17.66	8.43	2.72	6.42	3.76
6	0.11	0.19	0.15	0.05	0.07	0.06
7	12.07	11.58	12.54	5.27	4.21	5.59
8	0.09	0.11	0.12	0.04	0.04	0.05
9	2.06	2.30	1.14	0.90	0.83	0.51
10	0.06	0.09	0.09	0.03	0.03	0.04
11	1.47	2.54	1.78	0.64	0.92	0.79
12	0.06	0.08	0.08	0.02	0.03	0.04
13	0.36	1.29	0.50	0.16	0.47	0.22
14	0.03	0.06	0.06	0.01	0.02	0.03
15	0.39	0.75	0.32	0.17	0.27	0.14

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.29 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสก่อนติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6

จากข้อมูลสเปกตรัมของระบบในตารางที่ 5.23-5.24 พบว่าค่า %THDv และ %THDi ในแต่ละลำดับฮาร์โมนิกมีค่าไม่เกินมาตรฐาน ทำการทดสอบติดตั้งตัวเก็บประจุที่สภาพดีเข้าไปในระบบพบว่าลำดับฮาร์โมนิกที่ 5 มีขนาดเพิ่มขึ้น จึงสันนิษฐานว่ามีการเกิดสถานะเรโซแนนซ์ขึ้นในระบบมีความเสี่ยงทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเกิดความเสียหาย

### 5.3.1.2 ผลการทดลองหลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟ

หลังจากการติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟตามรูปที่ 4.19 ในระบบไฟฟ้าภายในโรงงานจริง มุ่งเน้นการแก้ปัญหาลำดับฮาร์โมนิกที่ 5 แสดงข้อมูลหลังติดตั้งวงจรรองในตารางที่ 5.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.25 ผลการสำรวจหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6

Phase	V <sub>rms</sub> (V)	I <sub>rms</sub> (A)	%THDv	%THDi	V <sub>Line</sub>
1	229.82	227.77	0.99	6.18	398.54
2	231.05	279.89	0.95	8.30	400.89
3	231.46	228.38	1.09	6.85	398.96

ตารางที่ 5.25 ผลการสำรวจหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6 (ต่อ)

Phase	S (kVA)	P (kW)	Q (kVAR)	pf.	Freq (Hz)
1	54.84	52.82	-14.38	0.97	
2	66.67	65.60	-9.49	0.98	
3	54.44	53.08	-11.47	0.97	
Total	175.95	171.49	-35.34	0.98	49.97

ตารางที่ 5.26 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6

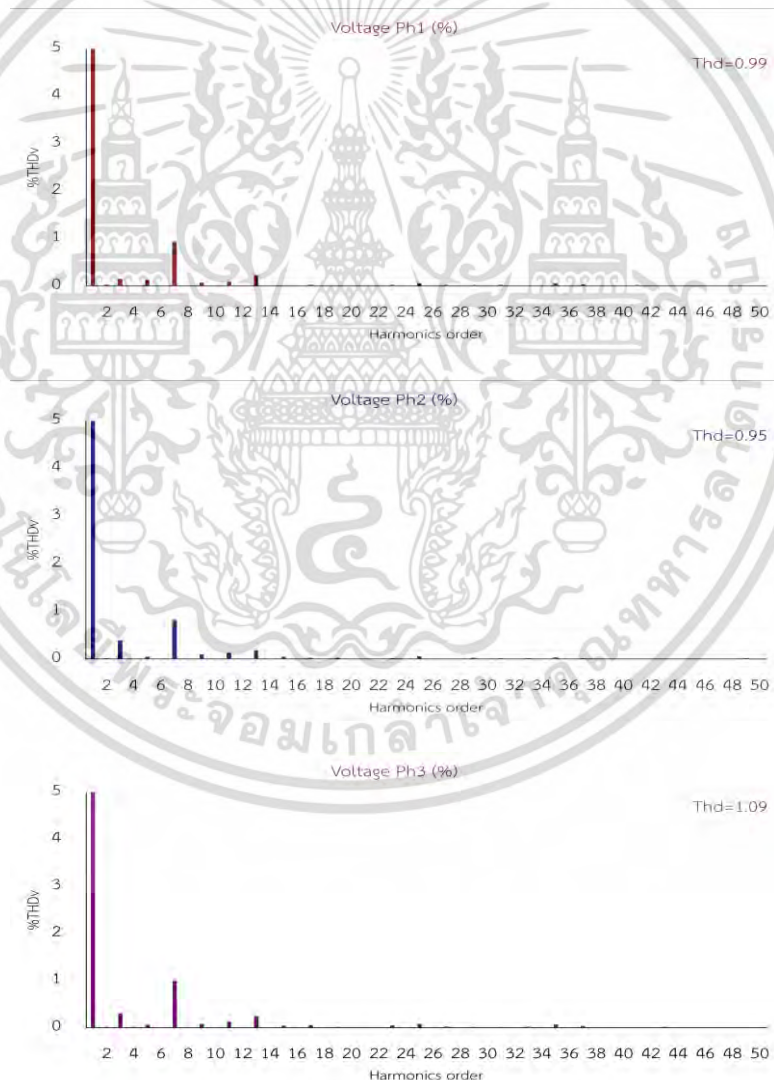
ลำดับฮาร์มอนิก	แรงดันไฟฟ้า (V)			%THDv		
	1	2	3	1	2	3
1	229.81	231.04	231.45	100.00	100.00	100.00
2	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01
3	0.34	0.92	0.71	0.15	0.40	0.30
4	0.03	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01
5	0.30	0.11	0.14	0.13	0.05	0.06
6	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00
7	2.13	1.89	2.31	0.93	0.82	1.00
8	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
9	0.17	0.23	0.18	0.07	0.10	0.08
10	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01
11	0.20	0.30	0.29	0.09	0.13	0.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.26 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6 (ต่อ)

ลำดับฮาร์มอนิก	แรงดันไฟฟ้า (V)			%THDv		
	1	2	3	1	2	3
12	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
13	0.52	0.43	0.56	0.22	0.18	0.24
14	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
15	0.01	0.12	0.09	0.01	0.05	0.04

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)



รูปที่ 5.30 สเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6

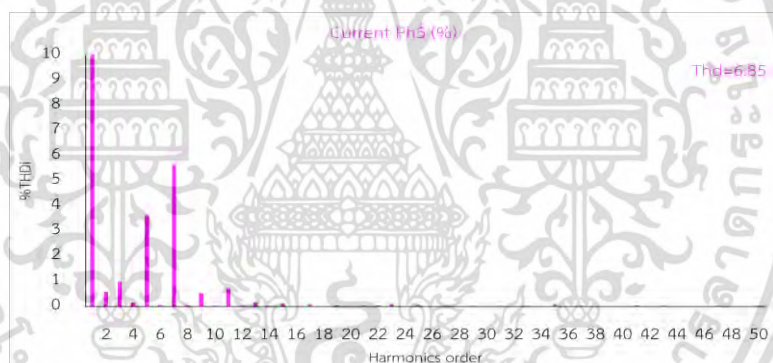
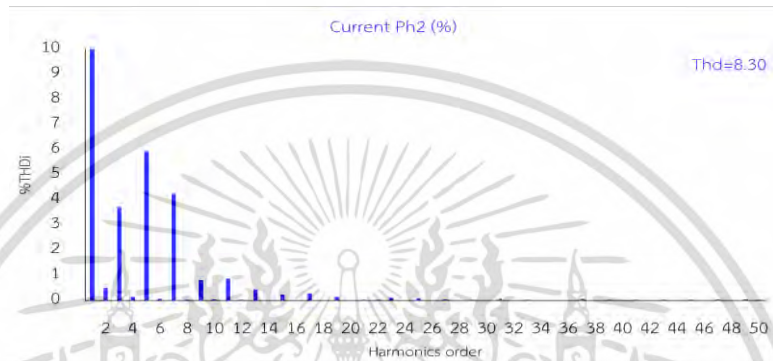
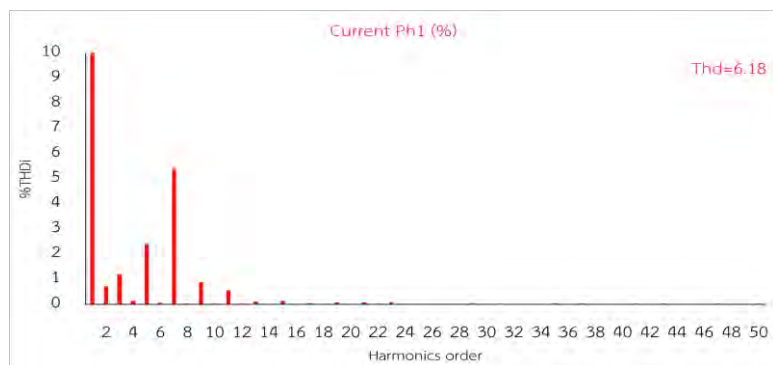
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.27 ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ  
โรงงานที่ 6

ลำดับฮาร์มอนิก	กระแสไฟฟ้า (A)			%THDi		
	1	2	3	1	2	3
1	227.05	277.94	227.50	100.00	100.00	100.00
2	1.65	1.40	1.33	0.73	0.50	0.58
3	2.75	10.31	2.24	1.21	3.71	0.99
4	0.35	0.39	0.36	0.15	0.14	0.16
5	5.47	16.48	8.25	2.41	5.93	3.63
6	0.14	0.19	0.15	0.06	0.07	0.07
7	12.26	11.79	12.78	5.40	4.24	5.62
8	0.09	0.11	0.10	0.04	0.04	0.04
9	2.02	2.27	1.22	0.89	0.82	0.54
10	0.08	0.13	0.09	0.03	0.04	0.04
11	1.31	2.44	1.64	0.58	0.88	0.72
12	0.07	0.08	0.07	0.03	0.03	0.03
13	0.27	1.24	0.40	0.12	0.45	0.18
14	0.04	0.08	0.06	0.02	0.03	0.03
15	0.35	0.67	0.30	0.15	0.24	0.13

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.31 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6

จากข้อมูลสเปกตรัมของระบบในตารางที่ 5.26-5.27 พบว่าในลำดับฮาร์โมนิกที่ 5 มีค่า %THD<sub>v</sub> ที่ลดน้อยลง แต่ค่า %THD<sub>i</sub> ยังคงมีค่าใกล้เคียงกับช่วงก่อนการติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟ ส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังมีค่าไม่ดีเท่าที่ควร แสดงในรูปที่ 5.32 แต่ไม่ได้ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเกิดความเสียหาย



รูปที่ 5.32 ตัวประกอบกำลังหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6

### 5.3.2 บริเวณตู้ควบคุมไฟฟ้าหลักที่ 2

ระบบไฟฟ้าภายในโรงงานจริงที่ทำการสำรวจและการทดลองมีแหล่งจำหน่ายพลังงานภายในโรงงานเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 1,500 kVA มีค่าร้อยละแรงดันไฟฟ้าอิมพีแดนซ์ (%Voltage impedance, %Z) เท่ากับ 5.84% ประเภทเดลต้า-สตาร์หรือเดลต้า-วาย (Delta-Star, D-Y) ระดับแรงดันไฟฟ้า 22 kV/400 V, 3 เฟส โดยส่วนของตู้ควบคุมไฟฟ้าหลักที่ 2 (Main Distribution Board 2, MDB2) ภาระทางไฟฟ้าเป็นสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ เช่น อุปกรณ์ทำความเย็นขนาดใหญ่ใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุม ลิฟท์ และปั้มน้ำที่ใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมเช่นกัน เป็นต้น ทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกขึ้น

จากข้อมูลของระบบไฟฟ้าภายในโรงงานที่กล่าวมาข้างต้นและขนาดกระแสไฟฟ้าของภาระทางไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด ( $I_L$ ) ประมาณ 600 A สามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรได้จากสมการต่อไปนี้

$$I_{SC} = S/\%Z \quad (5.1)$$

โดยที่  $I_{SC}$  คือ ขนาดกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (A)

$S$  คือ กำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power) (kVA)

$\%Z$  คือ ร้อยละแรงดันไฟฟ้าอิมพีแดนซ์

จากสมการ (5.1) แทนค่าในสมการจะได้  $I_{SC} = 1500 \text{ kVA}/0.0584 = 25684.93 \text{ A}$

อัตราส่วนระหว่างขนาดกระแสไฟฟ้าลัดวงจรกับขนาดกระแสไฟฟ้าของภาระทางไฟฟ้าเฉลี่ย

สูงสุดจะได้  $I_{SC}/I_L = 25684.93/600 = 42.808$  เพราะฉะนั้นเลือกใช้ชนิดจำกัดความผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าสำหรับระบบในช่วง 120 V ถึง 69 kV ในตารางที่ 2.2 ในช่วง  $20 < 50$  และเลือกใช้ขีดจำกัดความผิดเพี้ยนแรงดันไฟฟ้าในตารางที่ 2.1 ในช่วง  $V \leq 1.0 \text{ kV}$  ตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน IEEE 519-2014

### 5.3.2.1 ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟ

ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟหรือในสภาวะการทำงานปกติของโรงงาน แสดงในตารางที่ 5.28 พบว่าค่า %THDv และ %THDi ในแต่ละเฟสมีค่าที่เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 519-2014 แต่ก็ยังคงมีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในระบบ

ตารางที่ 5.28 ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6

Phase	$V_{rms}$ (V)	$I_{rms}$ (A)	%THDv	%THDi	$V_{Line}$
1	230.84	535.75	0.96	4.34	399.70
2	232.22	446.85	0.96	5.24	401.40
3	232.12	526.22	1.01	4.88	403.20

ตารางที่ 5.28 ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6 (ต่อ)

Phase	S (kVA)	P (kW)	Q (kVAR)	pf.	Freq (Hz)
1	123.67	116.25	42.19	0.94	
2	103.77	95.47	40.67	0.92	
3	122.15	113.60	44.90	0.93	
Total	349.59	325.32	127.76	0.93	49.99

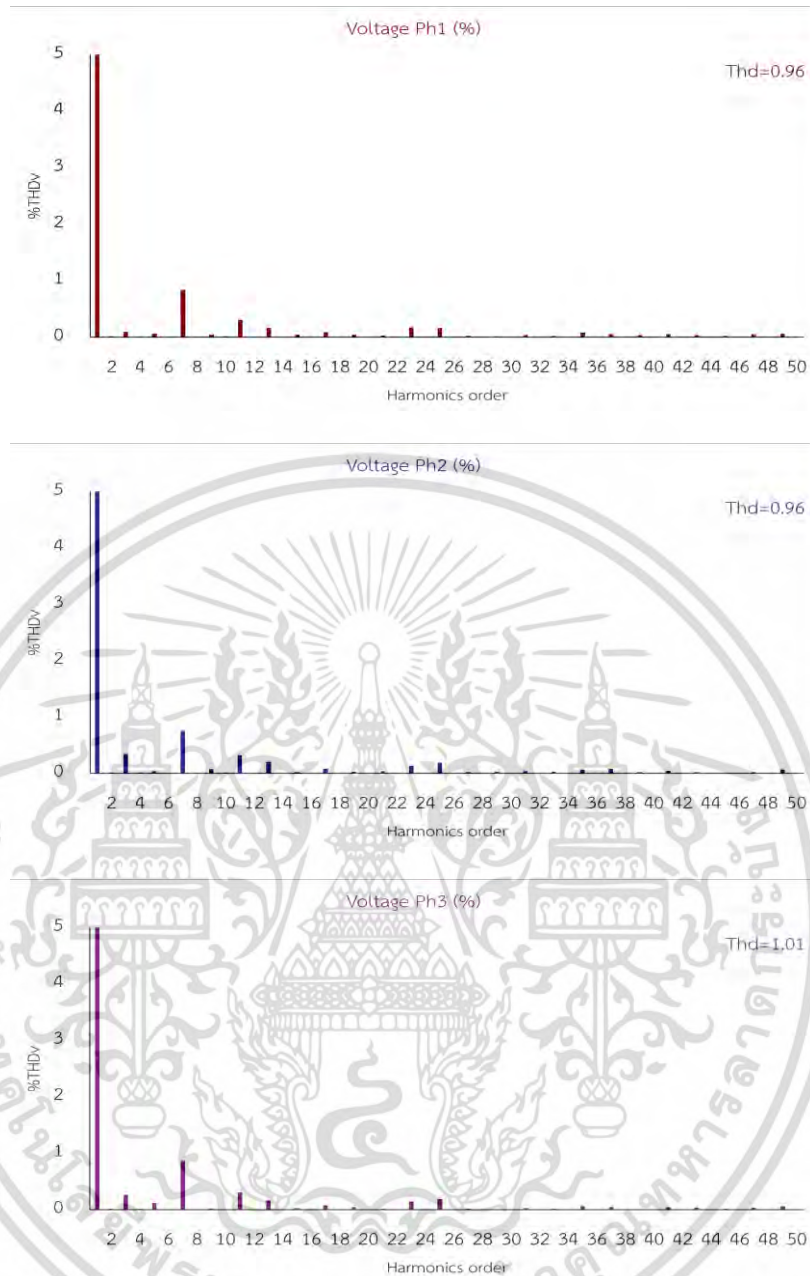
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.29 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ  
โรงงานที่ 6

ลำดับฮาร์มอนิก	แรงดันไฟฟ้า (V)			%THDv		
	1	2	3	1	2	3
1	230.83	232.20	232.11	100.00	100.00	100.00
2	0.03	0.04	0.03	0.01	0.02	0.01
3	0.23	0.80	0.60	0.10	0.35	0.26
4	0.02	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01
5	0.15	0.09	0.27	0.06	0.04	0.12
6	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
7	1.93	1.75	2.01	0.83	0.75	0.87
8	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
9	0.11	0.17	0.06	0.05	0.07	0.02
10	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01
11	0.71	0.74	0.70	0.31	0.32	0.30
12	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00
13	0.37	0.47	0.38	0.16	0.20	0.17
14	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
15	0.10	0.04	0.06	0.04	0.02	0.03

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.33 สเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6

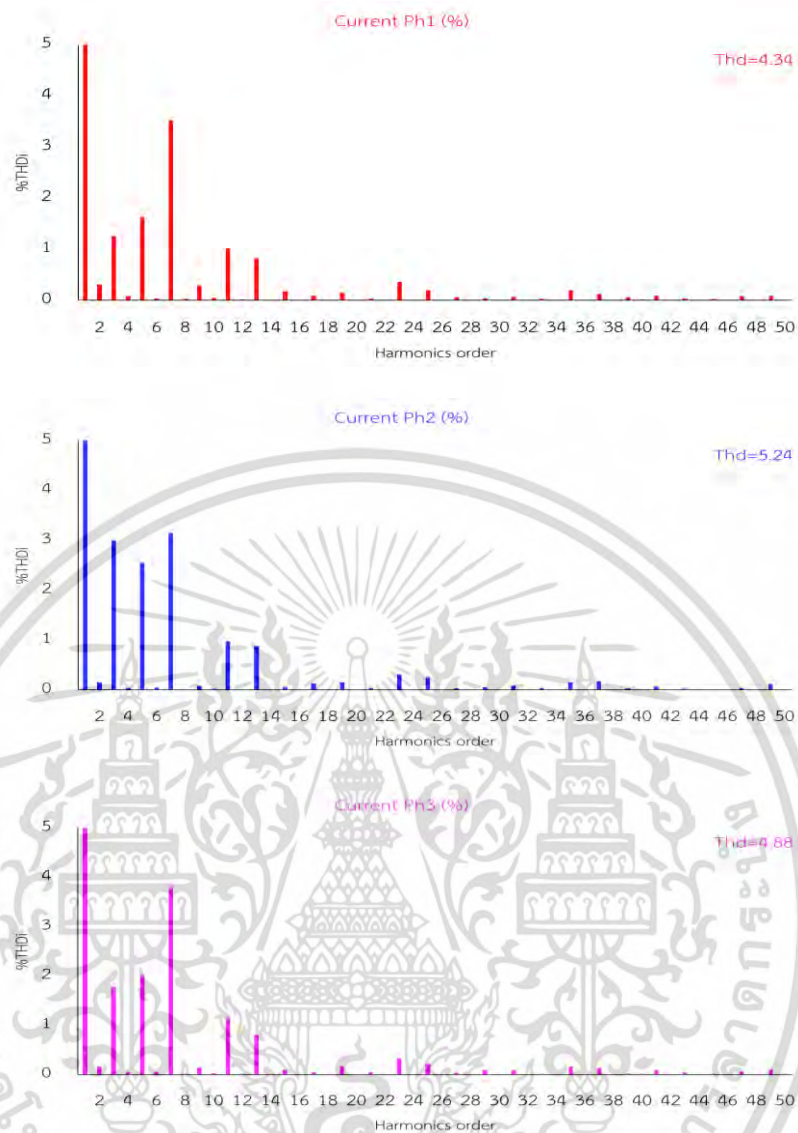
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.30 ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ  
โรงงานที่ 6

ลำดับฮาร์มอนิก	กระแสไฟฟ้า (A)			%THDi		
	1	2	3	1	2	3
1	535.15	446.15	525.47	100.00	100.00	100.00
2	1.66	0.68	0.87	0.31	0.15	0.17
3	6.74	13.38	9.32	1.26	3.00	1.77
4	0.46	0.18	0.25	0.09	0.04	0.05
5	8.71	11.37	10.55	1.63	2.55	2.01
6	0.20	0.23	0.28	0.04	0.05	0.05
7	18.84	14.03	19.94	3.52	3.14	3.79
8	0.17	0.08	0.10	0.03	0.02	0.02
9	1.55	0.33	0.77	0.29	0.07	0.15
10	0.26	0.13	0.15	0.05	0.03	0.03
11	5.40	4.38	5.97	1.01	0.98	1.14
12	0.08	0.08	0.09	0.02	0.02	0.02
13	4.42	3.91	4.19	0.83	0.88	0.80
14	0.06	0.07	0.09	0.01	0.02	0.02
15	0.95	0.29	0.49	0.18	0.06	0.09

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.34 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6

จากข้อมูลสเปกตรัมของระบบในตารางที่ 5.29-5.30 พบว่าค่า %THDv และ %THDi ในแต่ละลำดับฮาร์มอนิกมีค่าไม่เกินมาตรฐาน แต่ได้ทำการทดสอบติดตั้งตัวเก็บประจุที่สภาพดีเข้าไปในระบบพบว่าลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 มีขนาดเพิ่มขึ้น จึงสันนิษฐานว่ามีการเกิดสถานะเรโซแนนซ์ขึ้นในระบบมีความเสี่ยงทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเกิดความเสียหาย

### 5.3.2.2 ผลการทดลองหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟ

หลังจากการติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟตามรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 ในระบบไฟฟ้าภายในโรงงานจริง มุ่งเน้นการแก้ปัญหาลำดับฮาร์มอนิกที่ 3 และ 5 ตามลำดับ แสดงข้อมูลหลังติดตั้งวงจรกรองในตารางที่ 5.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.31 ผลการสำรวจหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6

Phase	V <sub>rms</sub> (V)	I <sub>rms</sub> (A)	%THDv	%THDi	V <sub>Line</sub>
1	230.78	535.98	0.93	4.19	400.10
2	232.20	447.25	0.94	5.15	401.00
3	232.10	524.25	0.99	4.63	402.60

ตารางที่ 5.31 ผลการสำรวจก่อนติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6 (ต่อ)

Phase	S (kVA)	P (kW)	Q (kVAR)	pf.	Freq (Hz)
1	123.69	122.45	17.45	0.99	
2	103.85	101.77	20.67	0.98	
3	121.68	120.46	17.17	0.99	
Total	349.22	344.68	55.29	1.00	49.96

ตารางที่ 5.32 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6

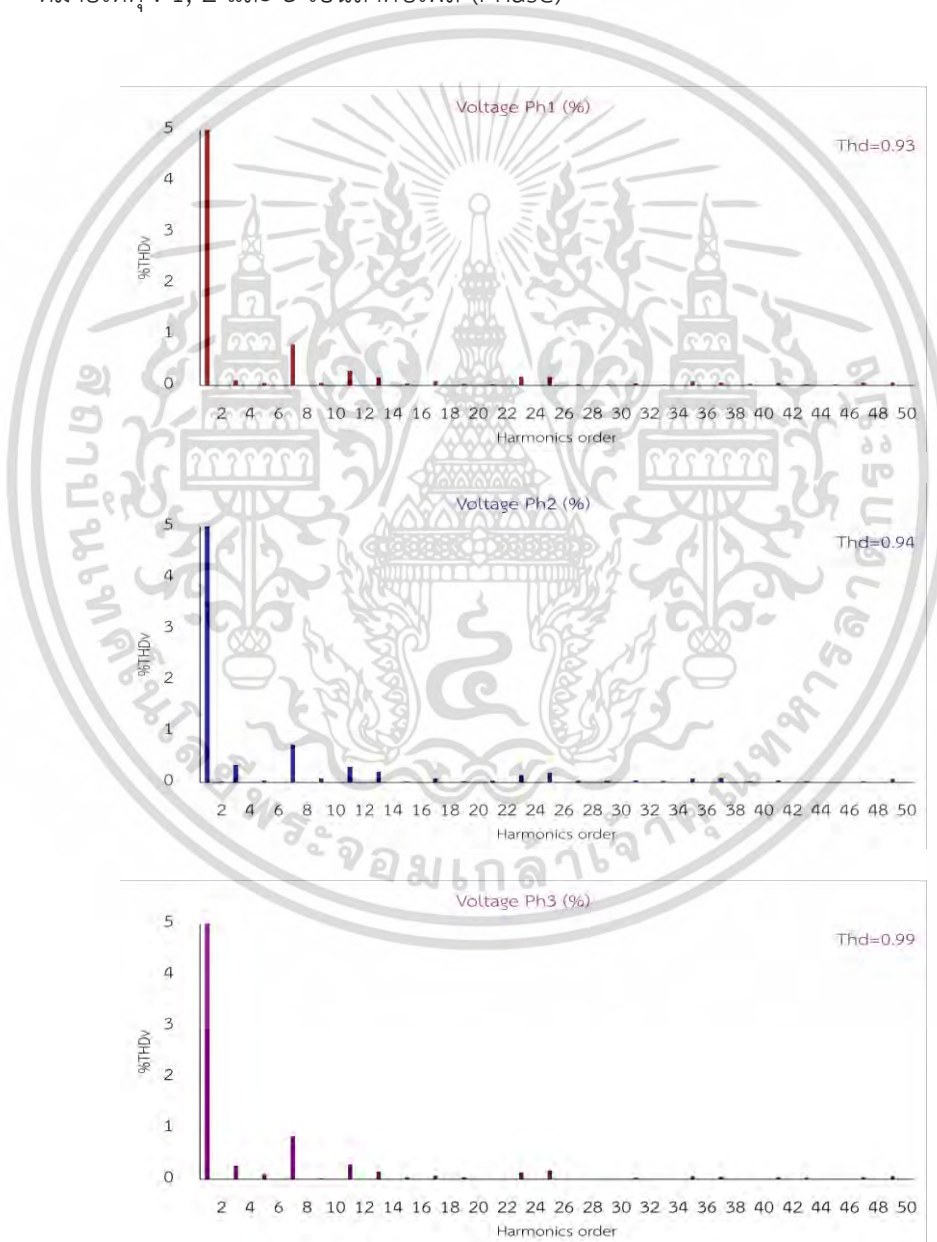
ลำดับฮาร์มอนิก	แรงดันไฟฟ้า (V)			%THDv		
	1	2	3	1	2	3
1	230.77	232.19	232.09	100.00	100.00	100.00
2	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01
3	0.25	0.80	0.63	0.11	0.34	0.27
4	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01
5	0.12	0.08	0.25	0.05	0.04	0.11
6	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01
7	1.87	1.70	1.96	0.81	0.73	0.84
8	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
9	0.10	0.17	0.04	0.04	0.07	0.02
10	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
11	0.67	0.70	0.67	0.29	0.30	0.29
12	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.32 ค่าแรงดันไฟฟ้าและ %THDv ของระบบหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6 (ต่อ)

ลำดับฮาร์มอนิก	แรงดันไฟฟ้า (V)			%THDv		
	1	2	3	1	2	3
13	0.37	0.48	0.36	0.16	0.20	0.15
14	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
15	0.09	0.04	0.09	0.04	0.02	0.04

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)



รูปที่ 5.35 สเปกตรัมของแรงดันไฟฟ้าทั้งสามเฟสหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6

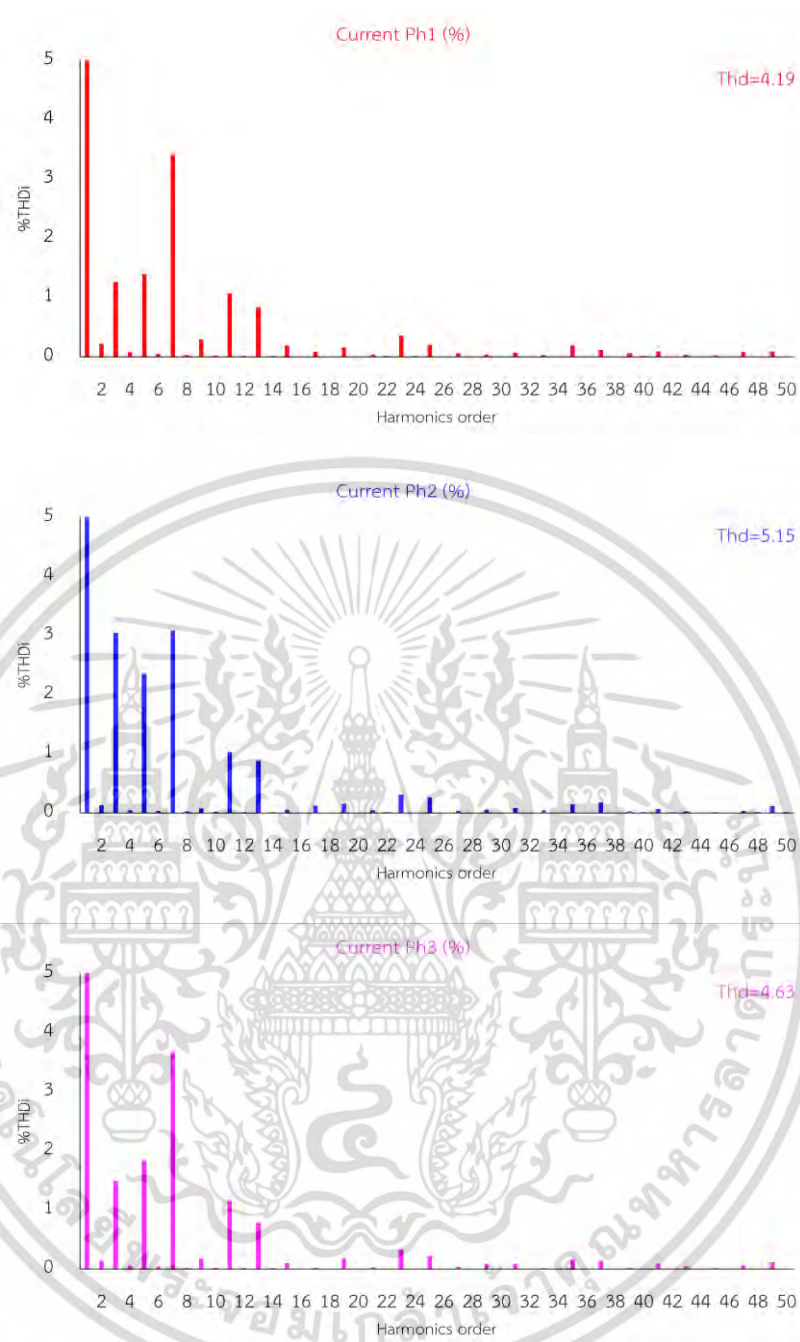
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.33 ค่ากระแสไฟฟ้าและ %THDi ของระบบหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ  
โรงงานที่ 6

ลำดับฮาร์มอนิก	กระแสไฟฟ้า (A)			%THDi		
	1	2	3	1	2	3
1	535.43	446.59	523.61	100.00	100.00	100.00
2	1.20	0.58	0.72	0.22	0.13	0.14
3	6.78	13.60	7.82	1.27	3.04	1.49
4	0.41	0.20	0.30	0.08	0.04	0.06
5	7.50	10.54	9.64	1.40	2.36	1.84
6	0.24	0.15	0.24	0.04	0.03	0.05
7	18.29	13.78	19.23	3.42	3.08	3.67
8	0.15	0.11	0.12	0.03	0.03	0.02
9	1.58	0.32	0.93	0.30	0.07	0.18
10	0.13	0.09	0.13	0.02	0.02	0.02
11	5.74	4.57	6.04	1.07	1.02	1.15
12	0.08	0.07	0.10	0.01	0.01	0.02
13	4.45	3.95	4.14	0.83	0.88	0.79
14	0.07	0.06	0.08	0.01	0.01	0.01
15	1.02	0.24	0.54	0.19	0.05	0.10

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.36 สเปกตรัมของกระแสไฟฟ้าทั้งสามเฟสหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6

จากข้อมูลสเปกตรัมของระบบในตารางที่ 5.32-5.33 พบว่ามีค่า %THDv และ %THDi ในแต่ละลำดับฮาร์มอนิกไม่เกินที่มาตรฐานกำหนด และมีแนวโน้มที่ลดลง ทำให้ค่าตัวประกอบของระบบดีขึ้น แสดงในรูปที่ 5.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.37 ตัวประกอบกำลังหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6

#### 5.4 บทสรุป

ผลการทดลองข้างต้นจะแสดงให้เห็นถึงข้อมูลพื้นฐานที่สามารถเก็บรวบรวมมาได้ทั้งก่อนและหลังการติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟ โดยที่ข้อมูลก่อนการติดตั้งวงจรกรองจะเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญในการใช้ออกแบบวิธีการแก้ไขในบทที่ 4 จะทำให้เห็นถึงปัญหาที่เกิดขึ้นได้ชัดเจนยิ่งขึ้น และแนวโน้มที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างสองช่วงที่แสดงไว้ การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มาและการเปรียบเทียบจะแสดงในส่วนถัดไป

## บทที่ 6

### วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลอง

จากผลการสำรวจและผลการทดลองโรงงานที่เกิดปัญหาฮาร์มอนิกคือ ตัวอย่างโรงงานที่ 1, 2, 3 บริเวณ MCC1 และ MCC2 ของโรงงานที่ 4, บริเวณ MDB1 ของโรงงานที่ 5 และบริเวณ MDB1 และ MDB2 ของโรงงานที่ 6 ซึ่งเป็นโรงงานที่มีภาระทางไฟฟ้าไม่เป็นเชิงเส้นเช่น ไดโพลไฟฟ้ากระแสสลับระบบโซล่าเซลล์ ติดตั้งอยู่ เป็นต้น และเกิดความเสียหายไม่มากนักน้อยขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ทั้งภายในระบบไฟฟ้าและภายในวงจรกรองเองเช่นกัน เช่น เซอร์คิตเบรกเกอร์ ฟิวส์ แมกเนติกคอนแทคเตอร์ สายไฟฟ้า ตัวเก็บประจุ เป็นต้น

#### 6.1 กรณีของตัวอย่างโรงงานที่ 1, 2 และ 3

ตัวอย่างโรงงานที่ 1, 2 และ 3 มีการติดตั้งวงจรกรองฮาร์มอนิกแบบดีจูนที่ 7% จากผลสำรวจข้อมูลจริงในตารางที่ 4.1-4.5 ค่าความผิดเพี้ยนแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 519-2014 แต่ยังคงเกิดความเสียหายขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้า เนื่องจากเกิดสถานะเรโซแนนซ์ในระบบและไม่สามารถกำจัดได้ จากหัวข้อที่ 3.1 และสมการ (3.1) จะแสดงให้เห็นทราบว่า ดีจูนที่ 7% จะมีความสอดคล้องกับความถี่ 189 Hz ซึ่งไม่สอดคล้องกับความถี่ในลำดับฮาร์มอนิกใด ๆ

#### 6.2 กรณีของศูนย์กลางการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าที่ 1 และ 2 ของโรงงานที่ 4

บริเวณ MCC1 และ MCC2 ของโรงงานที่ 4 ช่วงแรกมีการติดตั้งตัวเก็บประจุเพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าภายในโรงงานเพียงอย่างเดียว แต่ตัวเก็บประจุเสียหายจากปัญหาฮาร์มอนิก ทำให้ได้เข้าไปสำรวจและเก็บข้อมูลต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 5.1 และ 5.10 ตามลำดับ ในเมื่อตัวเก็บประจุได้เกิดความเสียหายขึ้นแล้วทำให้ไม่สามารถเก็บข้อมูลของระบบจากช่วงดังกล่าวได้จึงนำข้อมูลจากโรงงานจริงที่มีลักษณะของระบบไฟฟ้าที่คล้ายคลึงมาเปรียบเทียบแทน เพื่อยืนยันสมมติฐานที่ว่า อาจจะมีสถานะเรโซแนนซ์เกิดขึ้นในระบบและเป็นสาเหตุให้ตัวเก็บประจุในช่วงแรกเสียหาย และวิเคราะห์หาวิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสมต่อไป ตารางที่ 6.1-6.2 และตารางที่ 6.3-6.4 แสดงการเปรียบเทียบของข้อมูลในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่บริเวณ MCC1 และ MCC2 ตามลำดับ

### 6.2.1 บริเวณศูนย์กลางการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าที่ 1 (MCC1)

ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (%THDv) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4

ลำดับ ฮาร์มอนิก	%THDv									IEEE 519- 2014
	ก่อนติดตั้ง			ติดตั้งตัวเก็บประจุ (อย่างเดียว)			หลังติดตั้ง			
	วงจรกรองแบบพาสซีฟ			วงจรกรองแบบพาสซีฟ			วงจรกรองแบบพาสซีฟ			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
3	0.01	0.12	0.06	1.19	0.40	0.99	0.05	0.11	0.13	5
5	1.04	0.98	0.97	3.98	3.80	3.80	0.30	0.24	0.21	5
7	0.55	0.52	0.59	0.76	1.52	0.80	0.26	0.39	0.47	5
9	0.08	0.03	0.11	0.87	0.49	0.62	0.04	0.08	0.03	5
11	0.07	0.05	0.10	2.05	2.41	3.38	0.07	0.10	0.08	5
13	0.18	0.20	0.26	1.32	1.33	1.39	0.23	0.21	0.28	5

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

ตารางที่ 6.2 เปรียบเทียบความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า (%THDi) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ MCC1 ณ โรงงานที่ 4

ลำดับ ฮาร์มอนิก	%THDi									IEEE 519- 2014
	ก่อนติดตั้ง			ติดตั้งตัวเก็บประจุ (อย่างเดียว)			หลังติดตั้ง			
	วงจรกรองแบบพาสซีฟ			วงจรกรองแบบพาสซีฟ			วงจรกรองแบบพาสซีฟ			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
3	0.26	0.30	0.30	0.69	0.57	1.20	0.30	0.14	0.32	7
5	1.83	2.17	2.21	9.57	9.71	10.33	1.80	2.08	2.16	7
7	1.32	1.59	1.55	4.63	4.50	4.62	0.60	0.83	0.64	7
9	0.27	0.32	0.30	0.26	0.13	0.31	0.24	0.33	0.38	7
11	1.11	0.67	1.07	5.97	5.81	5.87	1.04	1.19	0.92	3.5
13	0.24	0.29	0.22	2.53	3.35	2.50	0.18	0.04	0.27	3.5

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

## 6.2.2 บริเวณศูนย์กลางการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าที่ 2 (MCC2)

ตารางที่ 6.3 เปรียบเทียบความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (%THDv) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4

ลำดับ ฮาร์มอนิก	%THDv									IEEE 519- 2014
	ก่อนติดตั้ง			ติดตั้งตัวเก็บประจุ (อย่างเดียว)			หลังติดตั้ง			
	วงจรกรองแบบพาสซีฟ			วงจรกรองแบบพาสซีฟ			วงจรกรองแบบพาสซีฟ			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
3	0.10	0.11	0.07	1.19	0.40	0.99	0.07	0.21	0.07	5
5	1.32	1.13	1.19	3.98	3.80	3.80	0.43	0.36	0.39	5
7	0.65	0.74	0.97	0.76	1.52	0.80	0.56	0.58	0.69	5
9	0.05	0.08	0.02	0.87	0.49	0.62	0.05	0.02	0.03	5
11	0.43	0.29	0.43	2.05	2.41	3.38	0.34	0.25	0.27	5
13	0.04	0.10	0.12	1.32	1.33	1.39	0.01	0.06	0.07	5

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

ตารางที่ 6.4 เปรียบเทียบความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า (%THDi) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ MCC2 ณ โรงงานที่ 4

ลำดับ ฮาร์มอนิก	%THDi									IEEE 519- 2014
	ก่อนติดตั้ง			ติดตั้งตัวเก็บประจุ (อย่างเดียว)			หลังติดตั้ง			
	วงจรกรองแบบพาสซีฟ			วงจรกรองแบบพาสซีฟ			วงจรกรองแบบพาสซีฟ			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
3	0.21	0.23	0.20	0.69	0.57	1.20	0.35	0.49	0.42	7
5	2.09	2.28	2.19	9.57	9.71	10.33	1.78	2.09	1.86	7
7	1.64	1.94	1.75	4.63	4.50	4.62	1.36	1.21	1.33	7
9	0.20	0.27	0.27	0.26	0.13	0.31	0.11	0.11	0.06	7
11	0.47	0.59	0.36	5.97	5.81	5.87	0.60	0.64	0.66	3.5
13	0.36	0.31	0.60	2.53	3.35	2.50	0.31	0.54	0.46	3.5

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

### 6.3 กรณีของตู้ควบคุมไฟฟ้าหลักที่ 1 ของโรงงานที่ 5

บริเวณ MDB1 ของโรงงานที่ 5 เกิดปัญหาฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้าของโรงงานจึงทำให้ตัวเก็บประจุที่ติดตั้งไว้เพื่อปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าเกิดความเสียหาย จากการที่ได้เข้าไปทำการสำรวจได้ข้อมูลเบื้องต้นในตารางที่ 5.16 พบว่าโรงงานได้มีการใช้งานระบบโซล่าเซลล์และทำการวัดค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามีค่าน้อยและไม่เกินที่มาตรฐานกำหนดแต่ยังคงเกิดความเสียหายที่ตัวเก็บประจุ ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่ามีสภาวะเรโซแนนซ์เกิดขึ้นในระบบเป็นเหตุให้มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุมากกว่าปกติที่ตัวเก็บประจุจะทนได้ทำให้ตัวเก็บประจุเสียหายนำไปสู่การติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าว ตารางที่ 6.5-6.6 แสดงการเปรียบเทียบของข้อมูลในช่วงเวลาต่าง ๆ

ตารางที่ 6.5 เปรียบเทียบความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (%THDv) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5

ลำดับฮาร์มอนิก	%THDv						IEEE 519-2014
	ก่อนติดตั้ง			หลังติดตั้ง			
	วงจรกรองแบบพาสซีฟ			วงจรกรองแบบพาสซีฟ			
	1	2	3	1	2	3	
3	0.08	0.17	0.42	0.16	0.33	0.51	5
5	0.09	0.15	0.39	0.06	0.03	0.09	5
7	0.58	0.57	0.67	0.27	0.35	0.33	5
9	0.08	0.00	0.00	0.13	0.11	0.06	5
11	0.09	0.20	0.21	0.19	0.09	0.16	5
13	0.13	0.02	0.06	0.15	0.13	0.10	5

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

ตารางที่ 6.6 เปรียบเทียบความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า (%THDi) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 5

ลำดับ ฮาร์มอนิก	%THDi						IEEE 519-2014
	ก่อนติดตั้ง			หลังติดตั้ง			
	วงจรกรองแบบพาสซีฟ			วงจรกรองแบบพาสซีฟ			
	1	2	3	1	2	3	
3	0.78	0.55	1.40	1.10	0.19	0.90	7
5	2.57	2.79	3.08	1.08	2.10	2.67	7
7	0.56	0.73	0.94	1.90	1.78	1.77	7
9	0.28	0.10	0.35	0.17	0.19	0.36	7
11	0.30	0.52	0.55	0.56	0.58	0.33	3.5
13	0.53	0.48	0.56	0.39	0.35	0.44	3.5

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

#### 6.4 กรณีของตู้ควบคุมไฟฟ้าหลักที่ 1 และ 2 ของโรงงานที่ 6

บริเวณ MDB1 และ MDB2 ของโรงงานที่ 6 เกิดปัญหาฮาร์มอนิกขึ้นในระบบ ทำการสำรวจและเก็บข้อมูลต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 5.22 และ 5.28 ตามลำดับ มีความเสี่ยงในการเกิดสภาวะเรโซแนนซ์ในระบบจากการที่ได้ทำการทดสอบติดตั้งตัวเก็บประจุสภาพดีแล้วฮาร์มอนิกมีขนาดเพิ่มขึ้น ทำการวิเคราะห์หาวิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสมต่อไป ตารางที่ 6.7-6.8 และตารางที่ 6.9-6.10 แสดงการเปรียบเทียบของข้อมูลในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่บริเวณ MDB1 และ MDB2 ตามลำดับ

##### 6.4.1 บริเวณตู้ควบคุมไฟฟ้าหลักที่ 1 (MDB1)

ตารางที่ 6.7 เปรียบเทียบความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (%THDv) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6

ลำดับ ฮาร์มอนิก	%THDv						IEEE 519-2014
	ก่อนติดตั้ง			หลังติดตั้ง			
	วงจรกรองแบบพาสซีฟ			วงจรกรองแบบพาสซีฟ			
	1	2	3	1	2	3	
3	0.15	0.40	0.30	0.15	0.40	0.30	5
5	0.14	0.06	0.04	0.13	0.05	0.06	5
7	0.91	0.80	0.97	0.93	0.82	1.00	5

ตารางที่ 6.7 เปรียบเทียบความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (%THDv) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6 (ต่อ)

ลำดับ ฮาร์มอนิก	%THDv						IEEE 519-2014
	ก่อนติดตั้ง			หลังติดตั้ง			
	วงจรกรองแบบพาสซีฟ			วงจรกรองแบบพาสซีฟ			
	1	2	3	1	2	3	
9	0.07	0.10	0.08	0.07	0.10	0.08	5
11	0.11	0.15	0.15	0.09	0.13	0.13	5
13	0.25	0.20	0.25	0.22	0.18	0.24	5

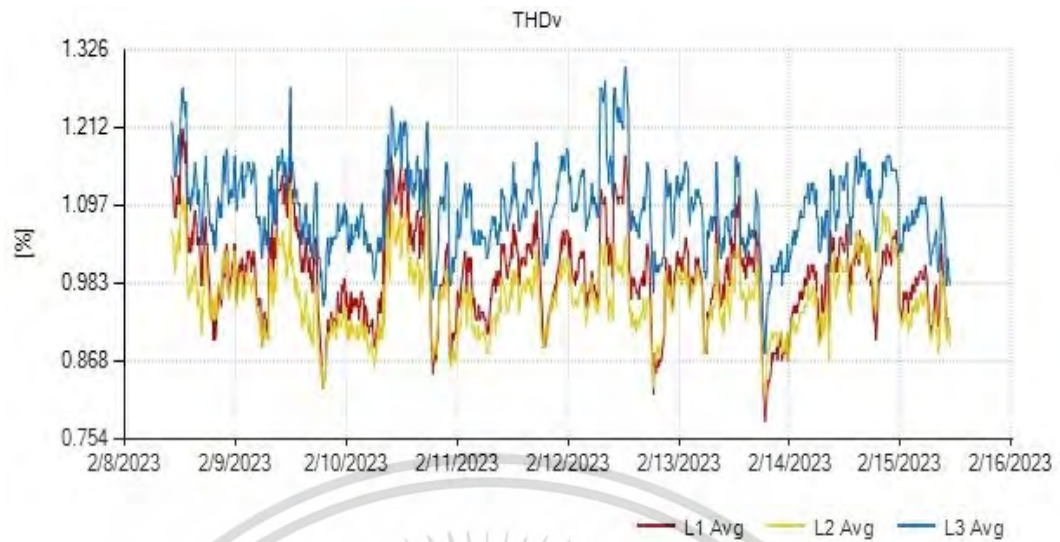
หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

ตารางที่ 6.8 เปรียบเทียบความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า (%THDi) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6

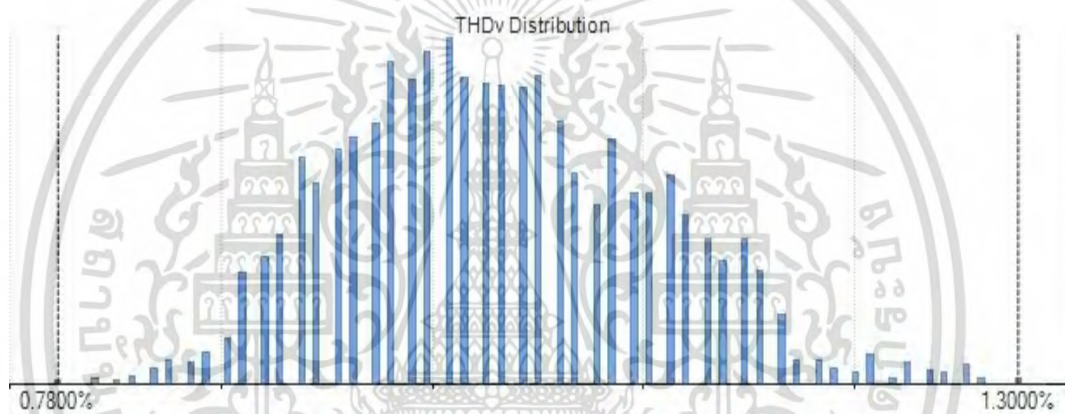
ลำดับ ฮาร์มอนิก	%THDi						IEEE 519-2014
	ก่อนติดตั้ง			หลังติดตั้ง			
	วงจรกรองแบบพาสซีฟ			วงจรกรองแบบพาสซีฟ			
	1	2	3	1	2	3	
3	1.13	3.72	0.97	1.21	3.71	0.99	10
5	2.72	6.42	3.76	2.41	5.93	3.63	10
7	5.27	4.21	5.59	5.40	4.24	5.62	10
9	0.90	0.83	0.51	0.89	0.82	0.54	10
11	0.64	0.92	0.79	0.58	0.88	0.72	4.5
13	0.16	0.47	0.22	0.12	0.45	0.18	4.5

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



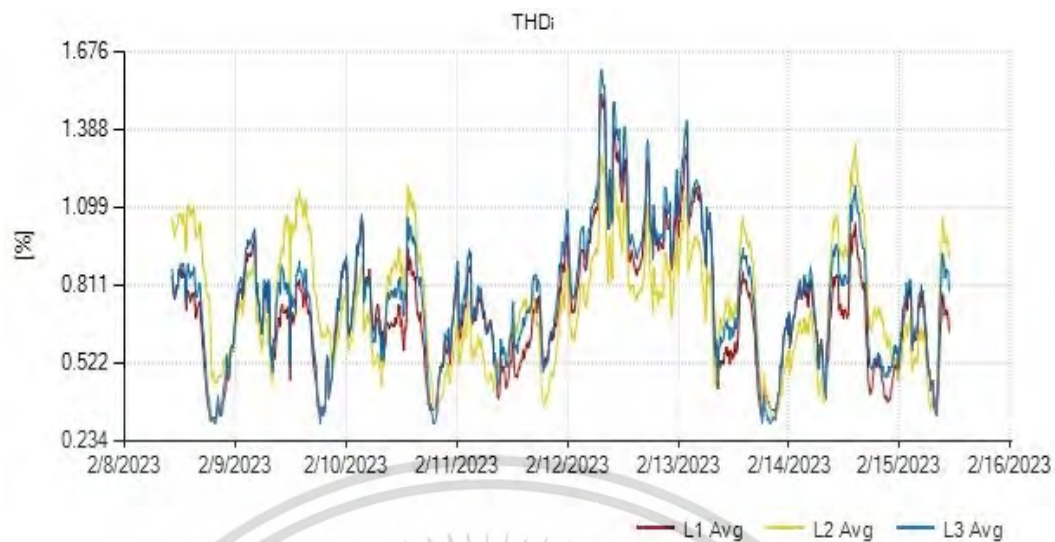
a) แนวโน้มค่า %THDv



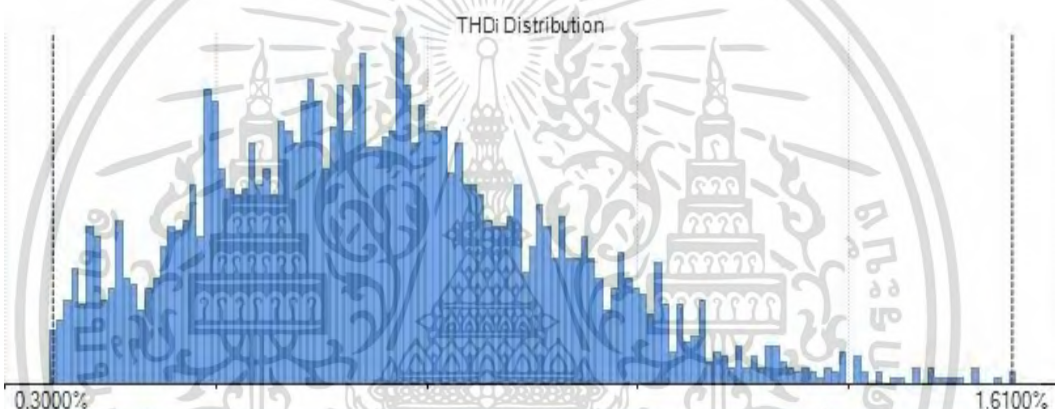
b) การกระจายของค่า %THDv

รูปที่ 6.1 แนวโน้มของค่า %THDv หลังติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6

หลังจากการติดตั้งวงจรรองแบบพาสซีฟบริเวณ MDB1 ที่โรงงานที่ 6 และได้ทำการตรวจวัดติดตามประสิทธิภาพการทำงานของวงจรรองที่ได้ติดตั้งไว้ในระบบ แสดงแนวโน้มของค่า %THDv ในรูปที่ 6.1 ปรากฏว่าในช่วงเวลาในรูปวงจรรองสามารถจำกัดค่า %THDv ให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE519-2014 ได้



a) แนวโน้มค่า %THDi



b) การกระจายของค่า %THDi

รูปที่ 6.2 แนวโน้มของค่า %THDi หลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ณ โรงงานที่ 6

หลังจากการติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟบริเวณ MDB1 ที่โรงงานที่ 6 และได้ทำการตรวจวัดติดตามประสิทธิภาพการทำงานของวงจรกรองที่ได้ติดตั้งไว้ในระบบ แสดงแนวโน้มของค่า %THDi ในรูปที่ 6.2 ปรากฏว่าในช่วงเวลาในรูปวงจรกรองสามารถจำกัดค่า %THDi ให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE519-2014 ได้

จากรูปที่ 6.1-6.2 แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มของค่า %THDv และ %THDi มีแนวโน้มที่ดีอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐาน IEEE519-2014 กำหนด ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ได้ทำการติดตั้งไปนั้นทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ระบบมีคุณภาพไฟฟ้าที่ดีขึ้น

### 6.4.2 บริเวณตู้ควบคุมไฟฟ้าหลักที่ 2 (MDB2)

ตารางที่ 6.9 เปรียบเทียบความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า (%THDv) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6

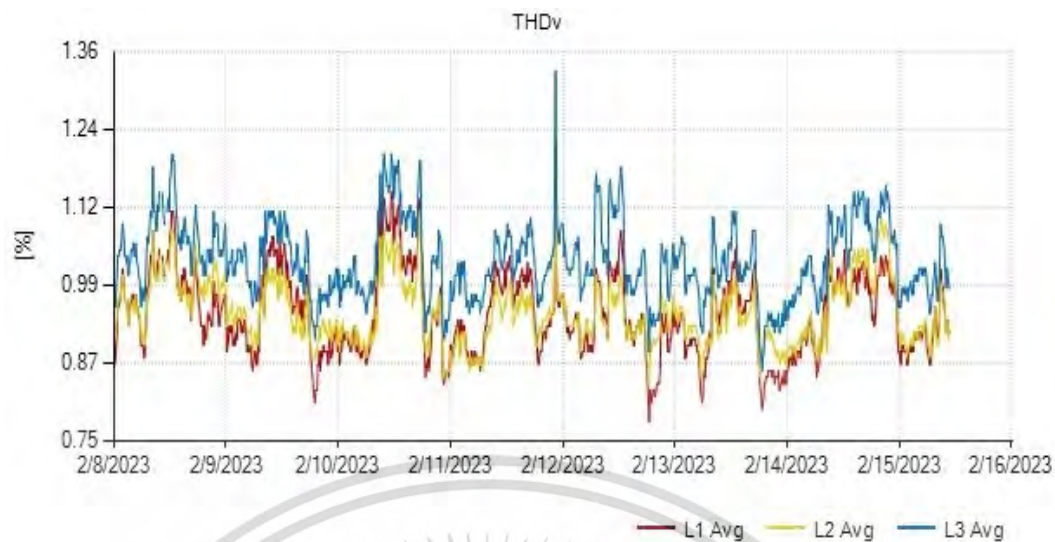
ลำดับ ฮาร์มอนิก	%THDv						IEEE 519-2014
	ก่อนติดตั้ง			หลังติดตั้ง			
	วงจรกรองแบบพาสซีฟ			วงจรกรองแบบพาสซีฟ			
	1	2	3	1	2	3	
3	0.10	0.35	0.26	0.11	0.34	0.27	5
5	0.06	0.04	0.12	0.05	0.04	0.11	5
7	0.83	0.75	0.87	0.81	0.73	0.84	5
9	0.05	0.07	0.02	0.04	0.07	0.02	5
11	0.31	0.32	0.30	0.29	0.30	0.29	5
13	0.16	0.20	0.17	0.16	0.20	0.15	5

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)

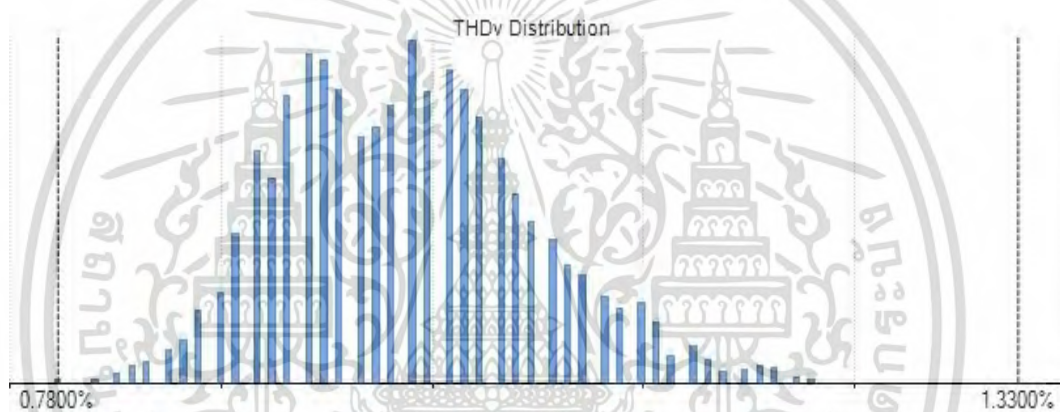
ตารางที่ 6.10 เปรียบเทียบความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้า (%THDi) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6

ลำดับ ฮาร์มอนิก	%THDi						IEEE 519-2014
	ก่อนติดตั้ง			หลังติดตั้ง			
	วงจรกรองแบบพาสซีฟ			วงจรกรองแบบพาสซีฟ			
	1	2	3	1	2	3	
3	1.26	3.00	1.77	1.27	3.04	1.49	7
5	1.63	2.55	2.01	1.40	2.36	1.84	7
7	3.52	3.14	3.79	3.42	3.08	3.67	7
9	0.29	0.07	0.15	0.30	0.07	0.18	7
11	1.01	0.98	1.14	1.07	1.02	1.15	3.5
13	0.83	0.88	0.80	0.83	0.88	0.79	3.5

หมายเหตุ : 1, 2 และ 3 เป็นลำดับเฟส (Phase)



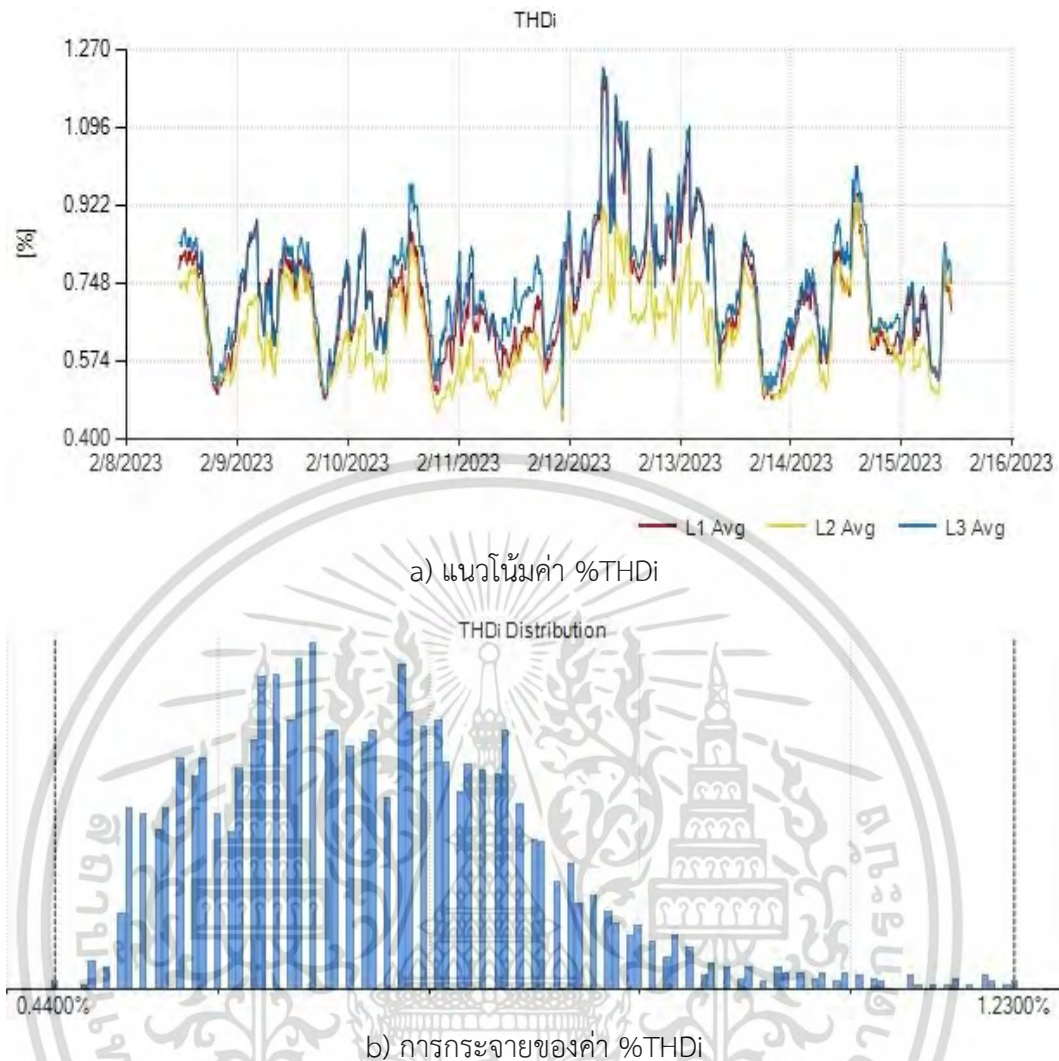
a) แนวโน้มค่า %THDv



b) การกระจายของค่า %THDv

รูปที่ 6.3 แนวโน้มของค่า %THDv หลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6

หลังจากการติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟบริเวณ MDB2 ที่โรงงานที่ 6 และได้ทำการตรวจวัดติดตามประสิทธิภาพการทำงานของวงจรกรองที่ได้ติดตั้งไว้ในระบบ แสดงแนวโน้มของค่า %THDv ในรูปที่ 6.3 ปรากฏว่าในช่วงเวลาในรูปวงจรกรองสามารถจำกัดค่า %THDv ให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE519-2014 ได้



รูปที่ 6.4 แนวโน้มของค่า %THDi หลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ MDB2 ณ โรงงานที่ 6

หลังจากการติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟบริเวณ MDB2 ที่โรงงานที่ 6 และได้ทำการตรวจวัดติดตามประสิทธิภาพการทำงานของวงจรกรองที่ได้ติดตั้งไว้ในระบบ แสดงแนวโน้มของค่า %THDi ในรูปที่ 6.4 ปรากฏว่าในช่วงเวลาในรูปวงจรกรองสามารถจำกัดค่า %THDi ให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE519-2014 ได้

จากรูปที่ 6.3-6.4 แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มของค่า %THDv และ %THDi มีแนวโน้มที่ดีอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐาน IEEE519-2014 กำหนด ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ได้ทำการติดตั้งไปนั้นทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ระบบมีคุณภาพไฟฟ้าที่ดีขึ้น

## บทที่ 7

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอปัญหาที่พบ วิธีการวิเคราะห์ และวิธีการแก้ปัญหาที่เกิดจากการมีฮาร์มอนิกเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรมจากโรงงานจริงที่ได้ทำการสำรวจ โดยที่มุ่งเน้นในการหาวิธีการแก้ปัญหาที่ดีที่สุดทั้งทางด้านวิศวกรรมและด้านเศรษฐศาสตร์ควบคู่กันไปอย่างเหมาะสม นำไปสู่การออกแบบวงจรกรองฮาร์มอนิกที่เฉพาะเจาะจงสำหรับการแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น สามารถควบคุมให้ฮาร์มอนิกเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 519-2014 และไม่เกิดสถานะเรโซแนนซ์ขึ้นอีก ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ในระบบไม่เกิดความเสียหาย ไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตหรือกระบวนการดำเนินการต่าง ๆ ของโรงงานอุตสาหกรรม

#### 7.1 สรุปผลการทดลอง

##### 7.1.1 ด้านวิศวกรรม

ตัวอย่างโรงงานที่ 1, 2 และ 3 มีการติดตั้งวงจรกรองดีจันที่ 7% จากการวิเคราะห์ทำให้สรุปได้ว่าการเลือกใช้วงจรกรองดีจันที่ 7% ไม่เหมาะสมกับการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับโรงงานตัวอย่างดังกล่าว ควรใช้วงจรกรองฮาร์มอนิกประเภทอื่นในการแก้ปัญหา

บริเวณ MCC1 และ MCC2 ของโรงงานที่ 4 จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบความผิดปกติแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาและสถานการณ์ต่าง ๆ ได้แก่ ช่วงที่ 1 ระบบในช่วงที่ไม่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุและวงจรกรองแบบพาสซีฟ ช่วงที่ 2 ระบบขณะติดตั้งตัวเก็บประจุเพียงอย่างเดียว และช่วงที่ 3 ระบบในช่วงที่ติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟ ที่ MCC1 และ MCC2 แสดงในตารางที่ 6.1-6.4 พบว่าวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ได้รับการออกแบบให้กำจัดลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 ที่เป็นลำดับที่มีค่าสูงกว่าลำดับอื่น ๆ ในช่วงที่ 1 ถึงแม้ว่าค่าจะไม่เกินมาตรฐานที่กำหนดแต่อุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหาย จึงตรวจสอบสถานะเรโซแนนซ์ในลำดับฮาร์มอนิกดังกล่าว ในช่วงที่ 2 เกิดเรโซแนนซ์ขึ้นที่ลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 จริง ทำการติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟในช่วงที่ 3 และติดตามผลพบว่าระบบทำงานได้ปกติไม่มีสถานะเรโซแนนซ์ ไม่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหาย ได้คุณภาพไฟฟ้าที่ดีขึ้น

บริเวณ MDB1 ของโรงงานที่ 5 จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบความผิดปกติแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาและสถานการณ์ต่าง ๆ ได้แก่ ช่วงที่ 1 ระบบในช่วงก่อนการติดตั้งตัวเก็บประจุและวงจรกรองแบบพาสซีฟ และช่วงที่ 2 ระบบในช่วงหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟ พบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงที่ 2 ค่า %THDv ในตารางที่ 6.5 และค่า %THDi ในตารางที่ 6.6 มีค่าไม่เกินมาตรฐาน เนื่องจากการมีระบบโซล่าเซลล์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าหลักของโรงงานเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้มีลำดับฮาร์มอนิกอื่น ๆ เพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามหลังจากการติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟแล้วนั้น ทำให้ระบบไฟฟ้าของโรงงานมีคุณภาพที่ดีขึ้นไม่เกิดสภาวะเรโซแนนซ์ขึ้นและอุปกรณ์ไฟฟ้าไม่เสียหาย วงจรกรองแบบพาสซีฟจึงมีความเหมาะสมสำหรับการแก้ปัญหาดังกล่าว

บริเวณ MDB1 และ MDB2 ของโรงงานที่ 6 จากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบความผิดเพี้ยนแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาและสถานการณ์ต่าง ๆ ได้แก่ ช่วงที่ 1 ระบบในช่วงก่อนการติดตั้งตัวเก็บประจุและวงจรกรองแบบพาสซีฟ และช่วงที่ 2 ระบบในช่วงหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟ ในช่วงที่ 2 ในส่วนของ MDB1 แสดงในตารางที่ 6.7-6.8 พบว่าค่า %THDv และ %THDi มีค่าเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด และในส่วนของ MDB2 แสดงในตารางที่ 6.9-6.10 พบว่าค่า %THDv และ %THDi เป็นไปตามมาตรฐานกำหนด แต่เนื่องจากภาระทางไฟฟ้าของโรงงานที่ 6 ที่ทำการสำรวจมานั้นเป็นในลักษณะของสิ่งอำนวยความสะดวกภายในอาคาร ซึ่งมีความไม่แน่นอนในการใช้งานและมีความยากต่อการคาดการณ์บนพื้นฐานทางวิศวกรรมต่อปัญหาที่เกิดขึ้นต่อไป จึงทำให้ต้องออกแบบวงจรกรองแบบพาสซีฟให้ครอบคลุมปัญหาที่เกิดขึ้นอาจจะส่งผลให้คุณภาพไฟฟ้าในบางส่วนไม่ดีเท่าที่ควร และจำเป็นต้องออกแบบให้สามารถรองรับภาระทางไฟฟ้าที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคต แต่อย่างไรก็ตามวงจรกรองแบบพาสซีฟที่ติดตั้งให้แก่ระบบยังคงทำให้ความเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายของอุปกรณ์ไฟฟ้าลดลงและมีคุณภาพไฟฟ้าที่ดีมากขึ้น

จากข้อมูลดังกล่าวมาทั้งหมดในข้างต้นสำหรับปัญหาฮาร์มอนิกที่พบในตัวอย่างโรงงานทั้ง 6 แห่ง โรงงานที่ 1-3 การติดตั้งวงจรกรองดีจันที่ 7% และตัวเก็บประจุ เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกและปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าไม่ใช่วิธีการที่เหมาะสมกับปัญหาที่เกิดขึ้นในโรงงานดังกล่าว จึงทำให้เลือกใช้วงจรกรองแบบพาสซีฟหรือวงจรกรองจันที่ 4% และ 11% มาใช้แทน ซึ่งจากผลการทดลองทั้งหมดพบว่าเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับแก้ไขปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้นได้

### 7.1.2 ด้านเศรษฐศาสตร์

นอกจากการพิจารณาเหตุผลในด้านวิศวกรรมแล้ว ด้านเศรษฐศาสตร์หรือราคาของวัสดุและอุปกรณ์ต่าง ๆ ก็มีส่วนสำคัญในการพิจารณาประกอบกันไป กำลังการจัดซื้อหรือกำลังการหาอุปกรณ์ที่จะมาแก้ปัญหาก็แตกต่างกันออกไปในแต่ละโรงงาน จึงจะขอยกตัวอย่างในการพิจารณาด้านราคาของอุปกรณ์ในโรงงานที่มีปัญหาที่ MCC1 และ MCC2 ของโรงงานที่ 4 ดังต่อไปนี้ (ค่าไฟฟ้าต่อหน่วยเฉลี่ย 3.2 บาท)

### 1. ความสูญเสียและการประเมินราคาที่ MCC1

ความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 3000 kVA, 22 kV/400 V, %Z = 6% ที่ประสิทธิภาพ 95% ทำงานตลอดทั้งวันเป็นเวลา 1 ปี จะมีความสูญเสียเท่ากับ 83,425 หน่วยต่อปี เป็นเงิน 266,960 บาทต่อปี

ความสูญเสียจากการเกิดฮาร์มอนิกในระบบ เท่ากับ 165,518 หน่วยต่อปี เป็นเงิน 529,657 บาทต่อปี

ความเสียหายของตัวเก็บประจุและอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ เป็นเงิน 200,000 บาท และ 150,000 บาท ตามลำดับ

ค่าเสียเวลาเนื่องจากการเกิดความเสียหายของอุปกรณ์ไฟฟ้าทำให้ไม่สามารถดำเนินการกระบวนการผลิตได้ เป็นเงิน 144,000 บาทต่อชั่วโมง เฉลี่ย 1 ครั้ง ใช้เวลานาน 4 ชั่วโมง เป็นเงิน 576,000 บาท

เพราะฉะนั้นรวมค่าความสูญเสียทั้งหมดเท่ากับ 1,522,617 บาทต่อปี ในการลงทุนติดตั้ง วงจรกรองแบบพาสซีฟคิดเป็นเงิน 2,093,260 บาท อายุการใช้งานของวงจรกรองแบบพาสซีฟมากกว่า 10 ปี เมื่อติดตั้งวงจรกรองแล้วจะไม่จำเป็นต้องเสียเม็ดเงินที่เกิดจากความสูญเสียที่มีผลมาจากฮาร์มอนิกในระบบอีกตลอดอายุการใช้งานวงจรกรอง จะทำให้โรงงานคืนทุนในระยะเวลา 1.45 ปี

### 2. ความสูญเสียและการประเมินราคาที่ MCC2

ความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 3000 kVA, 22 kV/400 V, %Z = 6% ที่ประสิทธิภาพ 95% ทำงานตลอดทั้งวันเป็นเวลา 1 ปี จะมีความสูญเสียเท่ากับ 53,425 หน่วยต่อปี เป็นเงิน 170,960 บาทต่อปี

ความสูญเสียจากการเกิดฮาร์มอนิกในระบบ เท่ากับ 229,046 หน่วยต่อปี เป็นเงิน 732,947 บาทต่อปี

ความเสียหายของตัวเก็บประจุและอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ เป็นเงิน 200,000 บาท และ 150,000 บาท ตามลำดับ

ค่าเสียเวลาเนื่องจากการเกิดความเสียหายของอุปกรณ์ไฟฟ้าทำให้ไม่สามารถดำเนินการกระบวนการผลิตได้ เป็นเงิน 144,000 บาทต่อชั่วโมง เฉลี่ย 1 ครั้ง ใช้เวลานาน 4 ชั่วโมง เป็นเงิน 576,000 บาท

เพราะฉะนั้นรวมค่าความสูญเสียทั้งหมดเท่ากับ 1,629,907 บาทต่อปี ในการลงทุนติดตั้ง วงจรกรองแบบพาสซีฟคิดเป็นเงิน 2,093,260 บาท อายุการใช้งานของวงจรกรองแบบพาสซีฟมากกว่า 10 ปี เมื่อติดตั้งวงจรกรองแล้วจะไม่จำเป็นต้องเสียเม็ดเงินที่เกิดจากความสูญเสียที่มีผลมาจากฮาร์มอนิกในระบบอีกตลอดอายุการใช้งานวงจรกรอง จะทำให้โรงงานคืนทุนในระยะเวลา 1.39 ปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณราคาต่าง ๆ ที่กล่าวมาจึงสรุปได้ว่าการลงทุนติดตั้งวงจรระบบพาสซีฟหรือวงจรกรองที่ 4% และ 11% นอกจากจะเหมาะสมในด้านวิศวกรรมแล้วยังมีความเหมาะสมที่จะลงทุนติดตั้งภายในโรงงานที่ให้ผลตอบแทนที่น่าพึงพอใจ

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อมูลที่ได้มาจากการสำรวจโรงงานต่าง ๆ เป็นข้อมูลจริงจากอุปกรณ์จริงที่ติดตั้งอยู่ภายในระบบไฟฟ้าของโรงงาน ซึ่งการเข้าไปสำรวจนั้นจะเป็นช่วงที่ระบบเกิดปัญหาแล้วทำให้ข้อมูลในบางส่วนอยู่นอกเหนือการควบคุม อาจส่งผลกระทบต่อข้อมูลอื่น ๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องเล็กน้อย แต่สามารถนำอุปกรณ์ที่วัดและเก็บข้อมูลต่าง ๆ แบบตลอดเวลามาติดตั้งเพิ่มเติมได้ จะทำให้มีข้อมูลที่แม่นยำไปใช้ในการวิเคราะห์ห่ออกแบบวิธีการแก้ไขปัญหาที่ดีมากขึ้น

วิธีการและขั้นตอนการแก้ปัญหาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกออกแบบให้เหมาะสมกับปัญหาที่ได้พบมาจากการสำรวจของผู้วิจัยเท่านั้น แต่สามารถพิจารณาเป็นแนวทางและนำไปประยุกต์ในการแก้ไขปัญหาค่าอื่น ๆ ได้ ที่สำคัญต้องคำนึงถึงข้อมูลและความรู้ด้านวิศวกรรมให้ถูกต้องเพื่อนำไปสู่ความปลอดภัยของผู้ใช้งาน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Sankaran, **POWER QUALITY**, Florida: CRC Press, 2002.
- [2] P. Sanjeevikumar, C. Sharmeela, J. B. Holm-Nielsen and P. Sivaraman, **Power Quality in Modern Power Systems**, Massachusetts: Academic press, 2021.
- [3] C. Boonseng , R. Boonseng and K. Kularbphettong, "Failure Investigation in Molded Case Circuit Breaker (MCCB) and Data Mining Support for Condition-Based Maintenance," in **The 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD 2020)**, Phuket, Thailand, October 25-28, 2020.
- [4] C. Boonseng and P. Gitnumlapcharoen, "Effect of Low Harmonic Current Under Large Transformers on Harmonic Resonance Assessment in Industrial Systems," in **2022 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)**, Langkawi, Malaysia, 2022.
- [5] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., "**IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**," 11 June 2014. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6826459>. [Accessed 20 May 2022].
- [6] S. Suresh, R. Gnanadass and N. Subramaniam, "Design and analysis of a cost effective power quality improvement method using De-tuned filter," in **2017 International Conference on Electrical, Instrumentation and Communication Engineering (ICEICE2017)**, Tamilnadu, India, 2017.
- [7] สมชาย ภิญโญ, ธัชพล จันทธำรงวัฒน์, วีระเทพ พงษ์ศรีเพียร, วรวิทย์ แสงเพชร และ จงรักษ์ บุญเส็ง, “การติดตั้งวงจรบล็อกกิ้งรีแอกเตอร์เพื่อประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม,” ใน **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 39**, กรุงเทพมหานคร, ไทย, 2544.
- [8] ธวัตรชัย มาคง, ชีรพล ณรงค์เปลี่ยน และ อติชาติ ยืนยงจงเจริญ, “การวิเคราะห์การสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระบบการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบที่มีความเพี้ยนสูงด้วยวงจรดีจูน 7%,” ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, ไทย, 2549.

- [9] L. Fusheng, L. Ruisheng and Z. Fengquan, **Microgrid Technology and Engineering Application**, Harbin, China: China Electric Power Press, 2016.
- [10] C. Boonseng, B. Rapeepornpat, D. Suksawat, N. Nilnimitr, W. Inwanna, A. Manee, T. Juntasorn, V. Kinnares, C. Chompo-Inwai and C. Chompo-Inwai, "Design and Installation of Passive Power Filter for Grid-connected Solar Rooftop Applications at Industrial Plants," in **The 2019 IEEE PES GTD Asia**, Bangkok, Thailand, 2019.
- [11] C. Boonseng, R. Boonseng and K. Kularbphettong, "Simple Techniques for Designing Passive Power Filter System to Reduced Harmonic Resonance and Improve Power Quality of Electrical Systems with Servo Drive," in **The 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)**, Hamamatsu, Japan, 2020.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

---

Board of Engineers Malaysia (BEM)  
Approved CPD/PDP Hours: 14 Hours  
Ref. No.: BEM/REG/12 Jld. 9 (604)

---

Organized by:



Supported by:

Malaysia  
Convention  
& Exhibition  
Bureau

Meet in   
Malaysia  
BE Greater, Together.

Sponsored by:

**WRTDS**  
Technologies

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 2022 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 2022)

Langkawi, Kedah, Malaysia  
5 – 6 December 2022



IEEE Catalog Number: CFP22820-POD  
ISBN: 978-1-6654-0991-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Copyright © 2022 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.  
All Rights Reserved**

*Copyright and Reprint Permissions:* Abstracting is permitted with credit to the source. Libraries are permitted to photocopy beyond the limit of U.S. copyright law for private use of patrons those articles in this volume that carry a code at the bottom of the first page, provided the per-copy fee indicated in the code is paid through Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923.

For other copying, reprint or republication permission, write to IEEE Copyrights Manager, IEEE Service Center, 445 Hoes Lane, Piscataway, NJ 08854. All rights reserved.

***\*\*\* This is a print representation of what appears in the IEEE Digital Library. Some format issues inherent in the e-media version may also appear in this print version.***

IEEE Catalog Number:	CFP22820-POD
ISBN (Print-On-Demand):	978-1-6654-0991-9
ISBN (Online):	978-1-6654-0990-2

**Additional Copies of This Publication Are Available From:**

Curran Associates, Inc  
57 Morehouse Lane  
Red Hook, NY 12571 USA  
Phone: (845) 758-0400  
Fax: (845) 758-2633  
E-mail: [curran@proceedings.com](mailto:curran@proceedings.com)  
Web: [www.proceedings.com](http://www.proceedings.com)

CURRAN ASSOCIATES, INC.  
**proceedings**  
.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Effect of Low Harmonic Current Under Large Transformers on Harmonic Resonance Assessment in Industrial Systems

C. BOONSENG  
School of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Bangkok, Thailand  
chongrag.bo@kmitl.ac.th

P. GITNUMLAPCHAROEN  
School of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Bangkok, Thailand  
63601087@kmitl.ac.th

**Abstract** - This research suggests suppressing and preventing the effects of small harmonic currents generated by ac drives compared to the size of the transformer. However, it can produce resonance and high destructive power. The harmonics being measured today cannot predict phenomena or interpret what is happening in the system. As a result, the design of the circuit to improve the power factor and compensate for reactive power does not meet the requirements. The incorrectly designed output is installed on an existing system. This results in a capacitor explosion that directly affects the electrical system. The study of the incorrect design results was carried out in collaboration with ten industrial factories. Every plant had a small harmonic current generated by the ac drive compared to a transformer. Moreover, there were reports of capacitor explosions causing severe damage. Methods of system-wide verification and design of power factor correction systems using harmonic filter circuits and the new design results have been reported. Finally, this paper demonstrates how to suppress the resonance harmonics problem in a simplified way by choosing a tuned filter.

**Keywords** - harmonic filter, harmonic resonance, low harmonic current, tuned filter

## I. INTRODUCTION

In 1981, the IEEE introduced the IEEE guide for Harmonic Control and Reactive Compensation for Static Power Converter or IEEE standard-519-1981 [1]. In 1988, in an update of standard harmonic IEEE-519, the IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems that described how the ability of the power system to absorb harmonics should split amongst individual users was introduced [2]. In 1992, A revised version of the IEEE standard, Recommended Practice for Harmonic Control in Electric Power Systems, provided recommended limits for both current and voltage harmonics [3]. In 2014, in an update of standard harmonic IEEE-519, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, the limit voltage increased the harmonic voltage from 5-8% [4]. The increasing application of power electronic equipment in the industrial environment has led to a growing concern for harmonic distortion and the resulting impacts on system equipment and operations. Possible problems include tripping of air circuit breaker (ACB), capacitor failures, fuse blowing, malfunction, and misoperation of controls [5-8]. Ten sample factories reported damage to capacitors and other equipment due to harmonics, five of which were paper mills using ac drives for paper machines and five being plastic mills using ac drives for injection molding machines. The factory has an electrical load in all small AC drives, and the

power consumption (kVA) ratio does not reach 10-30% of power transformers. This paper considers harmonic source based on AC drive compared to large power transformers as the entire power distribution system is many installed. Harmonic currents are generated by operating nonlinear loads such as small AC drives. The engineers who design and maintain the plant have designed with the requirements of the IEEE-519 standard in mind, depending on the approach to solving inaccuracies and imperfections, choosing the least costly method, for example, the use of capacitors alone. A significant increase in harmonic currents resulting in a resonance phenomenon in the power system is shown in the second section. This causes damage to capacitors and other devices such as contactors burnt and fuses blown, etc. as shown in Fig. 1.

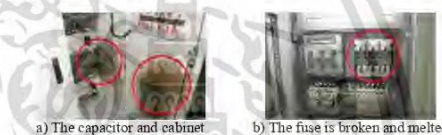


Fig. 1. The explosion of electrical equipment in the cabinet

This paper introduces considerations and decisions for solving harmonic problems in that resonance conditions occur and cause capacitors to explode based on basic data obtained from approximately ten real factories. The decision to solve harmonics is not correct by using a 7% detuning filter and capacitor alone, causing damage. The author was contacted to solve the problem. Therefore, examining and analyzing results from relevant data, we proposed using a passive power filter system (PPFs) or single tuned filter instead of the 7% detuned filter installed already having problems in all ten factories. Specifically, damage caused in the production process and errors in solving harmonic problems can be summarized as follows—the explosion of electrical equipment in the cabinet.

- The measured data were misinterpreted and the system resonance search lacked that critical component. Even though %THDi, %THDv, harmonic sequence, and amplitude values are checked. Those designing harmonic solutions will need to know the resonance conditions and find protective measures, hoping that the %THDv value should be less than 2% based on previous experience [9-12].
- The resonance condition can be calculated from the relationship between the harmonic, the capacitance of the capacitor and the reactance of the system, and the

transformer that occurs in the system. There is no calculation of resonance conditions in all ten factories.

- The filter design criteria must be respected by the reactive power demand of the system. The total reactive power from a measurement must be equal to the total reactive power supplied by the filter to compensate for the reactive power of the entire factory in the example.
- The reactive power configuration is essential in passive filter circuits. Improper reactive power design by using non-harmonic elimination circuits leads to overvoltage and overcurrent. This results in the excessive cutting of the switch or the magnetic contactor, and when the switch is operated too many times, it can cause damage.
- Harmonic attenuation and elimination in Thailand is predominantly a 7% detuning filter, and the high cost of irreversible increases the problem. For this reason, harmonic solutions have no direction and appropriateness, causing damage such as blown capacitors, fuses, connectors, Etc.

II. HARMONIC RESONANCE

Harmonic currents produced, for example, by variable speed drives can be amplified up to 10-15 times in a parallel resonance circuit formed by the capacitance of the capacitor bank and the network inductance. Amplified harmonic currents through the capacitors can lead to internal overheating of the capacitor unit shown in Fig. 2a) and its equivalent circuit shown in Fig. 3a).

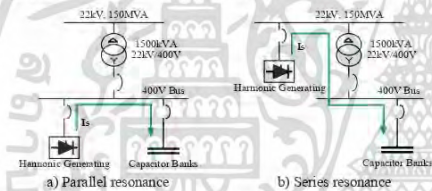


Fig. 2. Parallel and series resonance circuit

Suppose the voltage of the upstream network is distorted. In that case, the series resonance circuit, formed by the capacitance of the capacitor bank and the short circuit inductance of the supplying transformer, can draw a high harmonic current through the capacitors. Series resonance can lead to a high voltage distortion level at the low voltage side of the transformer shown in Fig. 2b) and its equivalent circuit shown in Fig. 3b).



Fig. 3. Parallel and series resonance equivalent circuit

III. ANALYSIS OF REACTIVE POWER COMPENSATION

Reactive power compensation is necessary when it detects that reactive power within the system has been lost to the load. This can be verified by measuring the reactive power, which will affect the loss of the system leading to harmonic problems. Methods for reactive power compensation include

- A capacitor bank only. It is the only reactive power compensation.
- Capacitor bank with a reactor. It compensates for the reactive power and limits the current to the capacitor bank.
- A detuning filter. The behavior is similar to how capacitor banks with reactors.
- A single-tuning filter. This is a virtual power compensation by compensation through a filter circuit, as shown in Fig. 4.

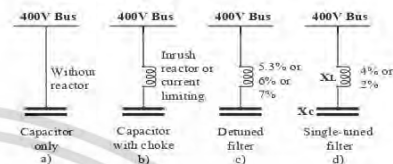


Fig. 4. Typical reactive power compensation at 400V bus

IV. DIFFERENCE BETWEEN DETUNED AND TUNED

Suppose a harmonic problem occurs within the system of the inspected plant. In that case, a detuning filter is preferred to solve the harmonic problem as it is relatively simple and inexpensive, which is a plus. one of the detuning filters A detuning filter consists of a capacitor bank and a reactor connected in series, both of which must be of relative magnitude. It compensates for the reactive power and solves the harmonic resonance problem, thereby reducing the resonance frequency below the harmonic frequencies. In order to reduce the violence that will occur within the system, when applied to a variable load, for example, an AC drive, the detuning filter creates more problems. On the other hand, tuning filters are designed so that the reactance of the capacitor and reactor in series is minimal to allow the harmonics to flow into the filter circuit. At the same time, it can compensate for the reactive power. However, the tuning filter can be designed to solve for only one harmonic frequency, which is one of its drawbacks. The differences and effectiveness of the two filters will be further highlighted in the next section.

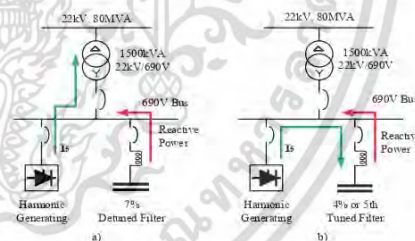


Fig. 5. Typical detuned and tuned filter

A. Frequency Response

For the design of the detuned filter Fig. 5a), detuning frequencies ( $f_D$ ) are 189 Hz, corresponding to 7% reactor, and 204 Hz to 6% reactor, respectively [13]. The  $f_0$  is a fundamental frequency.  $X_C$  and  $X_L$  are % Reactance of C and L. The relation between  $f_D$  and  $f_0$  is shown in (1).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_D = f_0 \sqrt{\frac{\%X_C}{\%X_L}} \tag{1}$$

Several filter topologies are available to a filter designer. The topologies are shown in Fig. 5b). The single-tuned filter contains a capacitor in series with an inductor identical to the detuning filter. The  $f_D$  is equal to 250 Hz corresponding to 4% reactor, and 350 Hz corresponding to 2% reactor. This resonant frequency will be detuned filter into a tuned filter corresponding 5<sup>th</sup> and 7<sup>th</sup> filter, respectively. As a result, the frequency response of the detuned and tuned filter is shown in Fig. 6.

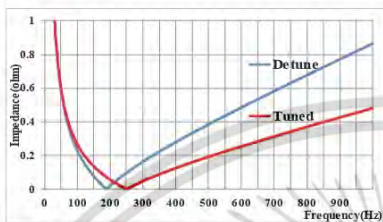


Fig. 6. The 250kVAR detune (7%) filter and tuned (4%) filter corresponding to 7% and 4% reactor filter

**B. Reactive Power**

$$V_N = V_C + V_{X_L} = I \cdot (X_C - X_L) = I \cdot X_C (1 - (X_L/X_C)) \tag{2}$$

$$p = (Q_L/Q_C) \times 100\% \tag{3}$$

$$Q_L = V^2/X_L \text{ and } Q_C = V^2/X_C \tag{4}$$

$$V_C = V_N \cdot (1/(1 - 0.01p)) \tag{5}$$

$$Q_{C1} = V_{N1}^2/X_C, X_L = 0 \text{ and } Q_{C2} = V_{N2}^2/(X_C - X_L) \tag{6}$$

$$Q_{C2}/Q_{C1} = (V_{N2}/V_{N1})^2 \cdot (1/(1 - 0.01p)) \tag{7}$$

where  $V_N$  is System voltage (V),  $V_C$  is capacitor voltage (V),  $V_{X_L}$  is inductor voltage (V),  $p$  is the percentage of the ratio between the reactive power of the inductor ( $Q_L$ ) and the capacitor ( $Q_C$ ) and the subscripts 1, 2 are the system values before and after respectively.

The capacitors are commonly used in Thailand to solve harmonic problems, most of them at a voltage of 525V. Therefore, in the circuit 7% Detune and 4% Tuned filter, if using capacitors of 200kVAR, 525V can supply reactive power at 400V differently. Calculated from (7), it can find values in the circuit 7% Detune and 4% Tuned filter 124.84 and 120.94kVAR, respectively.

**C. Harmonic Voltage and Current**

The difference in the reactive power distribution between the two circuits depends on the p-value. The difference in reactive power distribution between the two circuits depends on the p-value. If more p can also pay more reactive power value, both circuits can supply reactive power close together. The harmonic consideration of the detune filter circuit and waveform is shown in Fig. 7. It can be seen that when the circuit is installed into the system, the values of %THDv and %THDi are reduced to a minimum and do not meet the standards. As shown in Fig. 8, the values of %THDv and %THDi decreased from 15.05 and 31.36 to 12.90 and 29.17,

respectively, which is considered very small. Therefore, it is impossible to use a detune filter circuit to solve harmonic problems.

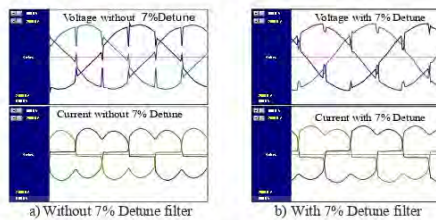


Fig. 7. The voltage and current waveform without and with 7% detune filter

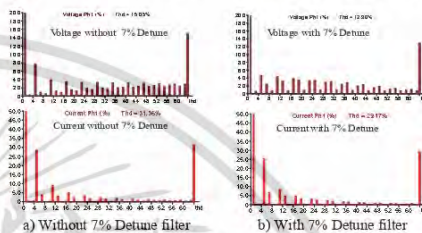


Fig. 8. The harmonic spectrum of voltage and current without and with 7% detune filter

The harmonic consideration of the tuned filter circuit and waveform is shown in Fig. 9. As shown in Fig. 10, the values of %THDv and %THDi decreased from 17.06 and 36.74 to 5.06 and 18.63, respectively, which considered distortion for %THDv reduced by about three times and doubled for %THDi, which is considered to reduce much distortion and can control the removal of harmonics from the system well. Therefore, it is possible to use a tuned filter circuit to solve harmonic problems.

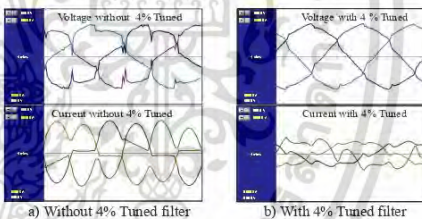


Fig. 9. The voltage and current waveform without and with 4% tuned filter

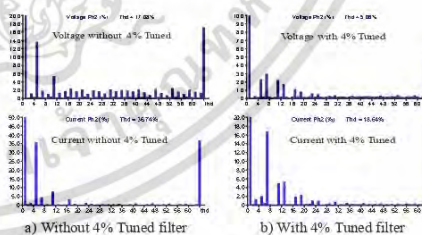


Fig. 10. The harmonic spectrum of voltage and current without and with 4% tuned filter

For many decades, for example, in harmonic attenuation and elimination in Thailand, well-known European companies recommend using 7% detune filters. The selling price to the customer is also meager. It cannot be eliminated, creating more problems, resulting in the harmonic solution to no direction and suitability leading to damage such as capacitor explosion, fuse, connector, Etc. In addition, in some cases, even if the ACB of the system has tripped, the transformer cannot transmit energy through ACB, and it affects the production process to stop. Damage caused by machinery stopped, unable to produce products.

V. VIEW FOR EXAMPLE

A. High Distortion

An example of severe damage to a detuned filter installed within the inspected plant was caused by harmonic resonance within the existing system. Combined with being enlarged by installing a detuning filter, the current flows through the filter circuit throughout the system, causing heat to accumulate, resulting in damage to the electrical components inside the circuit, whether it is a fire, explosion, or broken electrical wires as shown in Fig. 11-13.

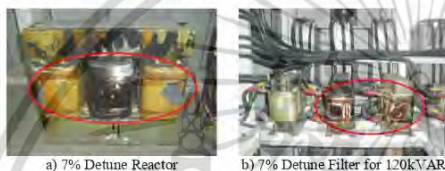


Fig. 11. Damage of the 7% Detune filter (12 x 120kVAR, 400V)

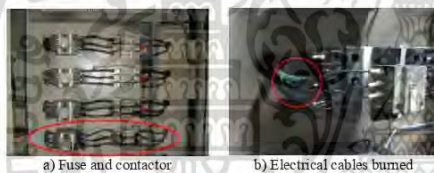


Fig. 12. Damage of the 7% Detune filter (12 x 50kVAR, 400V)

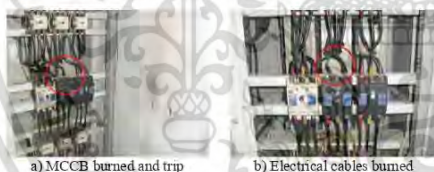


Fig. 13. Damage of the 7% Detune filter (6 x 50kVAR, 400V)

B. Low Distortion

The damage example in this section shows that the severity of the incident is minor but can significantly impact other parts of the system. The cause of the damage is similar to the severe damage mentioned earlier. The damage dealt is in the form of a burned trace. The capacitor bank looks swollen, and the connection blows out, as shown in Fig. 14-15.

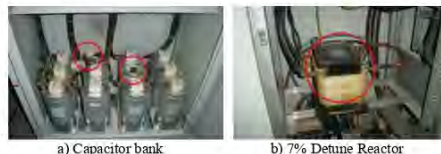


Fig. 14. Damage of the 7% Detune filter (12 x 50kVAR, 400V)



Fig. 15. Damage of the 7% Detune filter (12 x 50kVAR, 400V)

VI. NEW DESIGN

A. Transformer: 3000kVA

In the paper mill of the kraft paper factory, a small ac drive was used, approximately 300kVA from a 3000kVA transformer. The first design uses only capacitors shown in Fig. 4a) to improve power factors. When the initial use of the capacitor for power factor improvements and resulting in the bursting of the capacitors and fuses immediately broke. The initial investigation found that resonance occurred. The 5th harmonic current was 1.88% to 13.86% higher than before without compensation, increasing %THDi and %THDv from 1.32 and 3.34 to 5.52 and 16.43, respectively. The measurement results confirmed that the resonance occurred in the current and voltage waveform and spectrum display system in Fig. 16 and 17, respectively. Resulting in the 5th harmonic current flowing in the electrical system at approximately 279.6 A. Almost all capacitors are damaged. This system cannot be used. Redesigned and changed to use a 7% detune filter, which has to change the voltage rating of the capacitor to a higher and add a 7% reactor to the series. After making changes to the 7% detune filter and operating, it was found that it worked pretty well initially, but the reactor's heat was very high. Not long after that, the reactor had the same condition as in Fig. 11. An intense explosion caused the transformer to disconnect from the system and the ACB to trip. After that, the event would be repeated. Together, it affects the paper production process, wasting time and production loss. The electricity system has stopped, the production has stopped, damages 4,365 USD/hr., the intermediate stop is around four hr., the total cost is 17,460 USD/event.

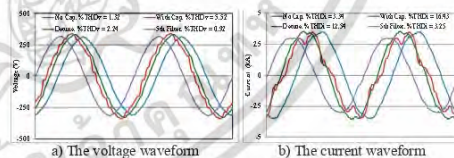


Fig. 16. The voltage and current waveform of phase A

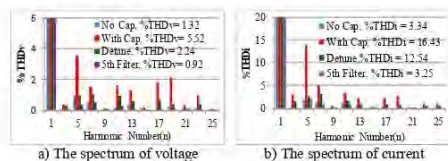


Fig. 17. The voltage and current spectrum of phase A

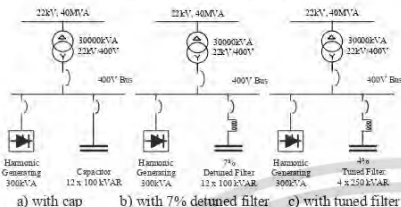


Fig. 18. Improving power quality by various methods at Transformer 1 of 3,000kVA

TABLE I  
ELECTRICAL PARAMETER FOR REACTIVE POWER COMPENSATION

Methods	%THDv	%THDi	PF	I5	I7	I11	I13
without Capacitor	1.33	3.09	0.82	41.95	28.42	27.29	9.80
with Capacitor	5.53	16.07	0.95	309.06	110.09	74.48	50.07
with 7% Detuned	2.15	5.25	0.96	67.77	80.91	43.56	28.85
with 5th Filter	0.78	3.01	1.00	40.67	25.50	17.81	6.13

In section IV, explaining the difference between 7% detuned and the 5<sup>th</sup> filter, in this example, it can be confirmed that 7% detuned cannot handle harmonic problems, but it will create more problems, as shown in Table I. The solution to harmonic problems that must be remembered and a simple model for solving this problem is to observe or check that the ac drive is installed in the system. If it is found that it is advisable to use the 5<sup>th</sup> filter, it will be able to solve the problem better and will not cause damage in the future.

TABLE II  
COST FOR REACTIVE POWER COMPENSATION

Methods	kVAR	Investment	Damage Cost	Target PF	Real PF	REMARK
without Capacitor						
with Capacitor	1,200	37,500 USD	17,460 USD	1.00	0.96	Capacitor Exploded
with 7% Detuned	1,200	48,484 USD	17,460 USD	1.00	0.97	Capacitor Exploded
with 5th Filter	1,000	72,728 USD		1.00	1.00	Good Performance

From Table II, the total cost of the design and the wrong method that the capacitor is installed in and the 7% detuned filter is 37,500 USD + 48,484 USD, and the cost of damage caused by the double capacitor explosion was 17,460 USD +17,460 USD, a total of 120,904 USD. Compared to installing a 5<sup>th</sup> filter, the cost was 72,728 USD. It would be much cheaper. Therefore, installing a 5<sup>th</sup> filter from the beginning will save money and get high-quality electricity, as shown in Fig. 19.



Fig. 19. Shows the results of the installation of the 5<sup>th</sup> filter at transformer 1

VII. CONCLUSION

Inspections and diagnostics are performed based on the actual data available. The sample plant surveyed had AC drives small compared to the size of a power transformer. AC drives were installed and used in large numbers. When measuring, the harmonics present in the system are small, resulting in being ignored. This causes harmonic resonance in the system coupled with the selection of improper harmonic resonance elimination methods. The last is damage to electrical equipment in the sample factory. Therefore, when comparing methods or systems for eliminating harmonic resonance, it can be seen that passive power filters offer more satisfactory harmonic filtering performance than other methods, including Detuning Filter 7% and Tuning Filter 4%.

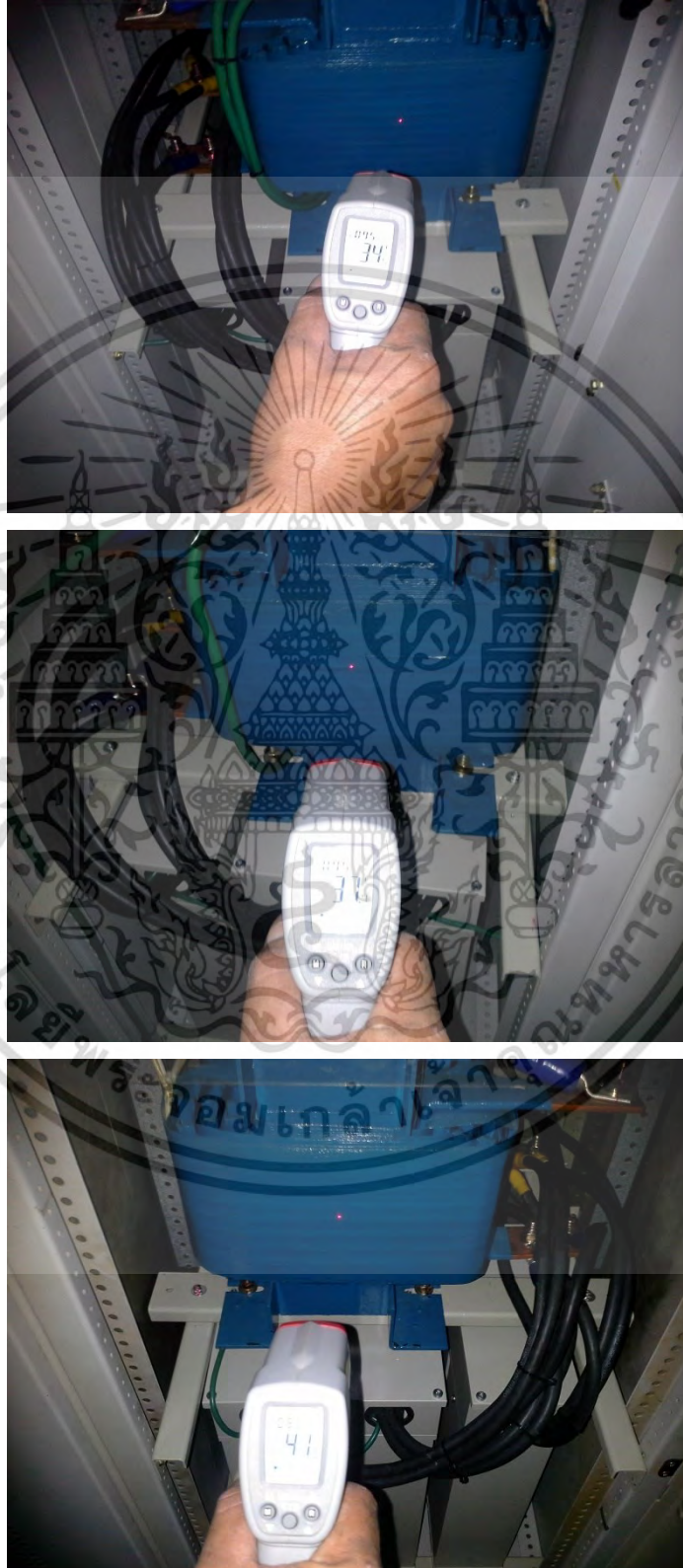
REFERENCES

- [1] IEEE guide for Harmonic Control and Reactive Compensation for Static Power Converter, *IEEE stand.ard-519-1981*.
- [2] C. K. Duffey and R.P. Stratford, "Update of harmonic standard IEEE-519, IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems," in *Conf. Rec. IAS/IEEE PCIC, 1988*, pp. 249-256.
- [3] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, *IEEE standard 519-1992*.
- [4] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, *IEEE standard 519-2014*.
- [5] M.M. Cameron, "Trends in Power Factor Correction with Harmonic Filtering" *IEEE Trans. Ind. Appl.* vol.29, No. 1, Jan/Feb, 1993.
- [6] E. B. Makram, E.V. Subramaniam, A.A. Girgis and R. C. Catoo, "Harmonic Filter Design Using Actual Record Data," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.29, No 6., Nov/Dec, 1993.
- [7] M.F. McGranaghan and D.R. Mueller, "Designing Harmonic Filters for Adjustable-Speed Drive to Comply with IEEE-519 Harmonic Limits", *IEEE Trans. Ind. Appl.* vol.35, No. 2, Mar/Apr, 1999.
- [8] C. Boonseng, V. Kinnaree, W. Khan-ngan, "an implementation of harmonic filter installations for improved quality and reduced voltage and current distortion in UPS system. In: *IPEC 99 International Power Engineering Conference, Vol II*, May 1999: 24-26.
- [9] C. Boonseng, "Harmonic Filter Designs for AC and DC Drive and Applications" *SCG for Paper Report 2015*.
- [10] C. Boonseng, B. Rapeepornpat, D. Suksawat, N. Nilnimit, W. Inwama, A. Manee, T. Juntasorn, V. Kinnaree, Chai Chompo-Inwai Chow Chompo-Inwai, Design and installation of passive power filter for grid-connected solar rooftop applications at industrial plants. *IEEE PES GTD 2019 Bangkok Thailand*.
- [11] C. Boonseng, B. Rapeepornpat, K. Kularbphetong, "Passive power filter for grid-connected solar rooftop applications for power quality improvement in industrial plants" *IEEE PEDS, Toulouse, France 9 – 12 July 2019*.
- [12] C. Boonseng, B. Rapeepornpat, K. Kularbphetong, "Design and installation of hybrid power filter for power factor and quality improvement in industrial plants" *IEEE PEDS, Toulouse, France 9 – 12 July 2019*.
- [13] Umimi Imarah, Marizan Sulaiman, Azhar Ahmad, Rosli Omar, "Experimental of the 7% detuned le passive filter for harmonic mitigation for industrial application" *International Journal of Energy and Power Engineering Research 2*, 2014, pp. 45-50.
- [14] J. C. Das, "Passive Filters-Potentialities and Limitations", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.40, no. 1, Jan/Feb, 2004.
- [15] A. B. Nassif, W. Xu and W. Freitas, "An Investigation on the section of Filter Topologies for Passive Filter Applications.", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, No 3, pp. 1710—1718, Jul, 2009.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โรงงานที่ 4 วงจรกรองแบบพาสซีฟขนาด 250 kVAR (4% รีแอกเตอร์)  
ศูนย์กลางการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าที่ 1 (MCC1)



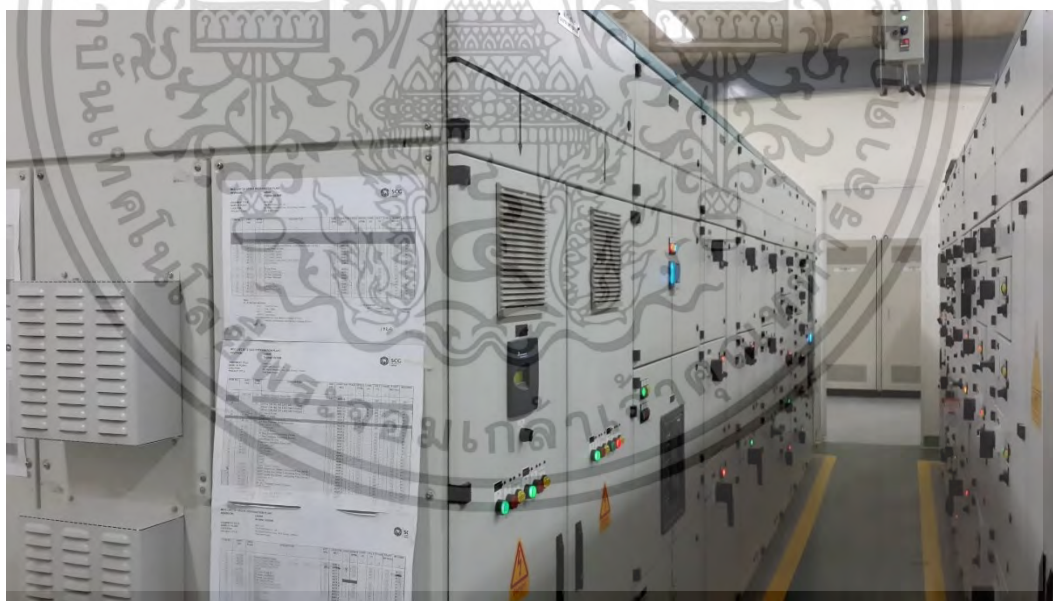
รูปที่ ข.1 การวัดอุณหภูมิของตัวเหนี่ยวนำหรือรีแอกเตอร์ขณะทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.2 ศูนย์กลางการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าที่ 1 ของโรงงานที่ 4

ศูนย์กลางการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าที่ 2 (MCC2)



รูปที่ ข.3 ศูนย์กลางการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าที่ 2 ของโรงงานที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โรงงานที่ 5 วงจรกรองแบบพาสซีฟขนาด 145 kVAR (4% รีแอกเตอร์)



รูปที่ ข.4 การสำรวจและเก็บข้อมูลด้วยเครื่องมือวัด Class A ที่ MDB1 ของโรงงานที่ 5



รูปที่ ข.5 วงจรกรองแบบพาสซีฟที่ติดตั้งที่ MDB1 ของโรงงานที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.6 ภายในของวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ของโรงงานที่ 5

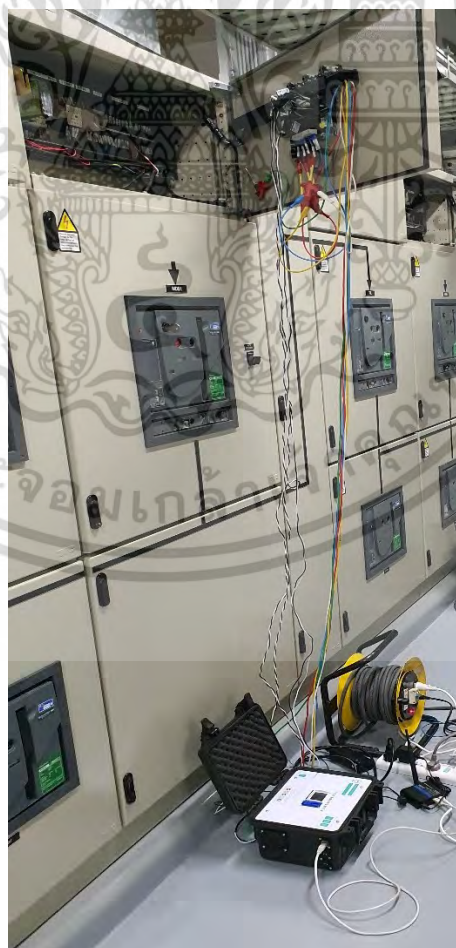


รูปที่ ข.7 ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำของวงจรรองแบบพาสซีฟที่ MDB1 ของโรงงานที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โรงงานที่ 6 วงจรกรองแบบพาสซีฟ

MDB1 ขนาด 100 kVAR (4% รีแอกเตอร์)



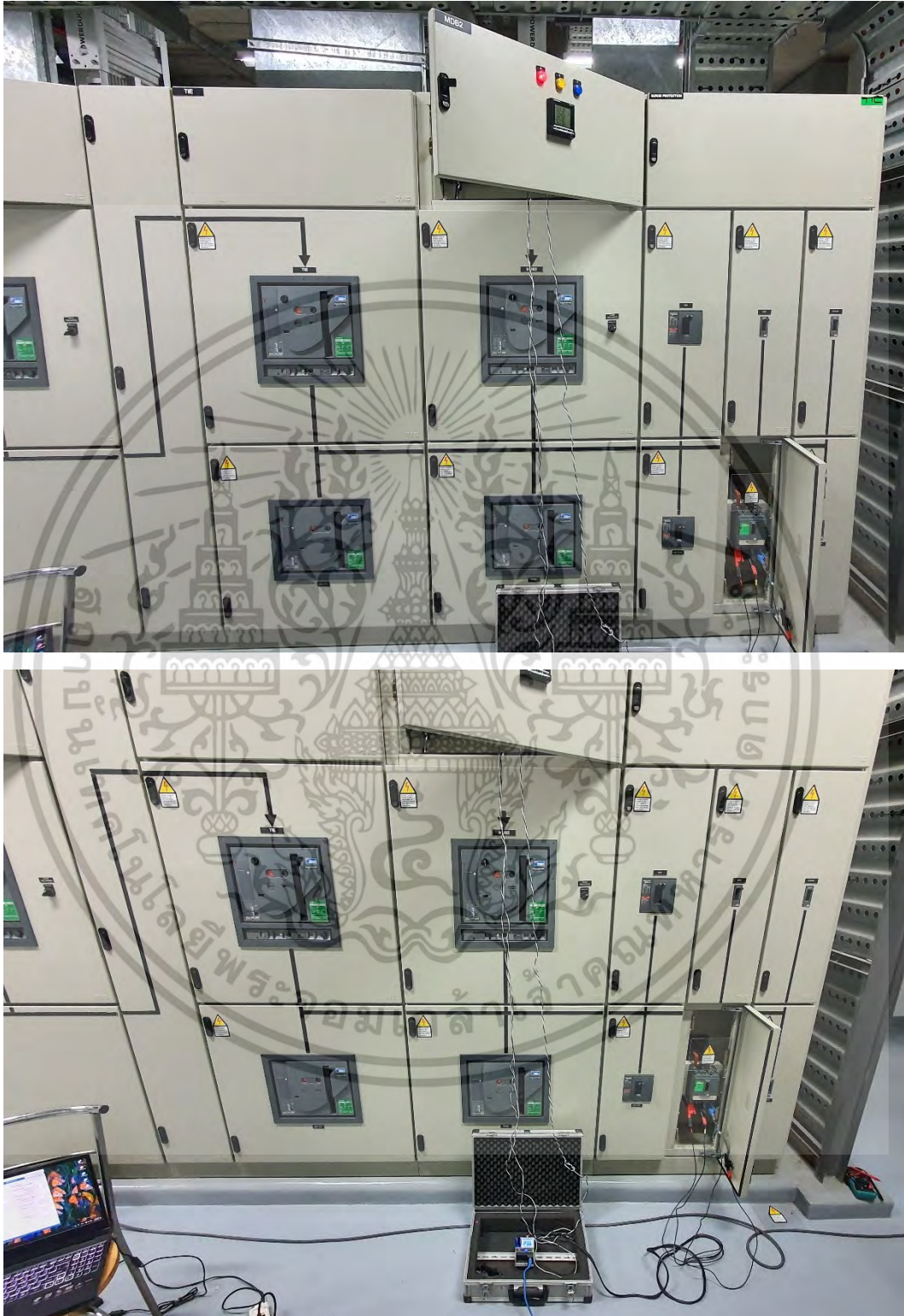
รูปที่ ข.8 การสำรวจและเก็บข้อมูลด้วยเครื่องมือวัด Class A ที่ MDB1 ของโรงงานที่ 6 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.9 วงจรกรองแบบฟาสซีฟที่ติดตั้งที่ MDB1 ของโรงงานที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MDB2 ขนาด 35 kVAR (11% รีแอกเตอร์) และ 145 kVAR (4% รีแอกเตอร์)



รูปที่ ข.10 การสำรวจและเก็บข้อมูลด้วยเครื่องมือวัด Class A ที่ MDB2 ของโรงงานที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.11 วงจรกรองแบบพาสซีฟที่ติดตั้งที่ MDB2 ของโรงงานที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายภูมิภัทร กิจนำลาภเจริญ  
 วัน เดือน ปีเกิด 30 กรกฎาคม 2540 ที่กรุงเทพมหานคร  
 ที่อยู่ 135 ซ.อินทรีพิทักษ์ 3 ถ.อินทรีพิทักษ์ แขวงบางยี่เรือ เขตธนบุรี  
 กรุงเทพมหานคร 10600  
 ประวัติการศึกษา 2558 โรงเรียนเทพศิรินทร์  
 2562 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ผลงานทางวิชาการ

1. C. Boonseng and P. Gitnumlapcharoen “Effect of Low Harmonic Current Under Large Transformers on Harmonic Resonance Assessment in Industrial Systems”, in 2022 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon2022), Langkawi, Malaysia, December 5-6, 2022.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้