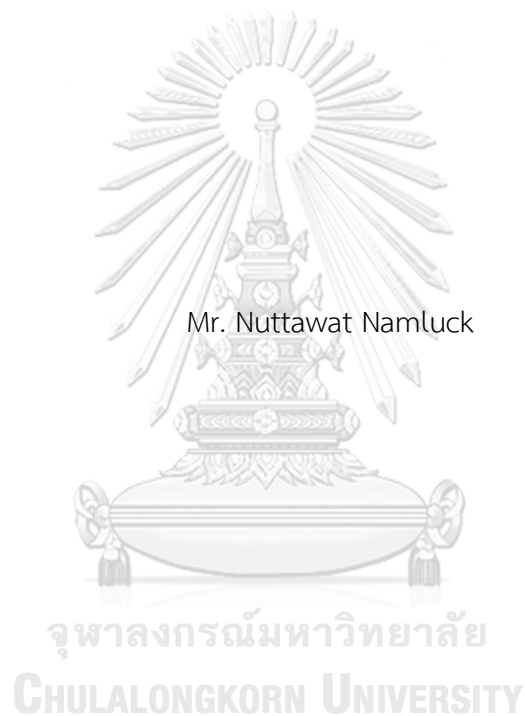


การวิเคราะห์แนวทางการลดการระเบิดของชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าระดับแรงดัน 22 กิโลโวลต์
ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS OF MITIGATION GUIDELINES FOR CAPACITOR BANK EXPLOSIONS AT 22 kV
SUBSTATION OF PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY



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

Department of Electrical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์แนวทางการลดการระเบิดของชุดตัวเก็บประจุ
ที่สถานีไฟฟ้าระดับแรงดัน 22 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้าส่วน
ภูมิภาค
โดย นายณัฐวัฒน์ นามลักษณ์
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชสุนันต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชสุนันต์)

..... กรรมการ
(ดร.พิสิษฐ์พล จิรพวงศานานุรักษ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.วิโรจน์ บัวคลี่)

ณัฐวัฒน์ นามลักษณะ : การวิเคราะห์แนวทางการลดการระเบิดของชุดตัวเก็บประจุที่
 สถานีไฟฟ้าระดับแรงดัน 22 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (ANALYSIS OF
 MITIGATION GUIDELINES FOR CAPACITOR BANK EXPLOSIONS AT 22 kV
 SUBSTATION OF PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY) อ.ที่ปรึกษาหลัก
 : รศ. ดร.ธวัชชัย เตชสุนันต์

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการวิเคราะห์แนวทางการลดการระเบิดของชุดตัวเก็บ
 ประจุที่สถานีไฟฟ้าระดับแรงดัน 22 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยนำโปรแกรมทาง
 คอมพิวเตอร์ ได้แก่ EMTP/ATP, PQView รวมทั้ง DigSILENT PowerFactory มาใช้วิเคราะห์
 สาเหตุที่มีผลต่อตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้า ข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลสถานีไฟฟ้าวิหารแดง จังหวัด
 สระบุรี ซึ่งนำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านคุณภาพไฟฟ้าในช่วงเวลาทรานเซียนต์ (Transient) และที่
 สภาวะปกติ (Steady state) รวมถึงมีการศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นเมื่อระบบที่
 นำมาวิเคราะห์มีการเชื่อมต่อกับโหลดประเภทต่างๆ ได้แก่ โรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ โรงหลอมเหล็ก
 รวมถึงการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์ โดยการจำลองแบบมีการเชื่อมต่อกับสาย
 ป้อน 1 บริเวณต้นสาย กลางสาย และปลายสาย ผลการศึกษาพบว่า ในสภาวะทรานเซียนต์
 ผลกระทบจากกระแสเกินและแรงดันเกินที่เกิดขึ้นกับตัวเก็บประจุมีผลน้อยมากเมื่อเชื่อมต่ออยู่ใน
 ระบบไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ แรงดันและกระแสขณะเกิดทรานเซียนต์ของชุดตัวเก็บประจุที่ได้มีค่า
 น้อยกว่าค่ามาตรฐาน IEEE ที่เกี่ยวข้อง และในสภาวะปกติ การระเบิดของชุดตัวเก็บประจุที่สถานี
 มีโอกาสเกิดขึ้นเนื่องจากค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบที่ไหลผ่านชุดตัวเก็บประจุที่สถานี และเมื่อ
 ระบบมีการเชื่อมต่อกับภาระโหลดที่กล่าวมาข้างต้น รูปแบบและคุณลักษณะของการเกิดฮาร์มอ
 นิกส์เรโซแนนซ์จะมีความแตกต่างกันตามแต่ละประเภทของภาระโหลด การวิเคราะห์ระบบ
 ดังกล่าวได้ทำการวิเคราะห์ที่ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ใช้งานจริงในช่วงเวลาหนึ่ง ทั้งนี้จึงได้มีแนว
 ททางการลดฮาร์มอนิกส์เพื่อลดการระเบิดของชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าระดับแรงดัน 22 กิโล
 โวลต์

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6070500621 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: capacitor bank, EXPLOSIONS, SUBSTATION

Nuttawat Namluck : ANALYSIS OF MITIGATION GUIDELINES FOR CAPACITOR BANK EXPLOSIONS AT 22 kV SUBSTATION OF PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY . Advisor: Assoc. Prof. THAVATCHAI TAYJASANANT, Ph.D.

The objective of this thesis is to analyze the guideline for reducing explosions of Capacitor Banks at 22 kV substation of the Provincial Electricity Authority by leading the program Computers including EMTP/ATP, PQView and DigSILENT PowerFactory are used to analyze. Various causes that occur and affect the Capacitor Banks at the substation. The data used was data from Wihan Dang substation in Saraburi which was used to analyze electrical quality data during the transient period and at a normal state (Steady state). There is also a study of the harmonic effects that occur when the systems analyzed are connected to various types of loads. The simulation is connected to the feeder line 1 at the beginning of the cable, midline and end of line feeder 1. The results showed that in transient state: the effects of overcurrent and overvoltage caused by the capacitor have very little effect when connected to 22 kV electrical system. In normal conditions, the explosion of the capacitor set at the substation have a chance to go up due to the harmonic current in the system that runs through the capacitor pack at the station. Therefore, the chance of an explosion will increase according to the increase current of harmonics. Also, there is a guideline to reduce harmonics in order to reduce the explosion of the capacitor bank at substation at 22 kV.

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชสุนันต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่อ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และให้การสนับสนุนการวิจัยอย่างดีตลอด ทำให้หนังสือเข้าใจทั้งในภาคทฤษฎี และ ภาคปฏิบัติอย่างยิ่ง ผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรชัย ชัยทัศนีย์ ประธานกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ ดร. พิสิษฐ์พล จีรพจนานุกรักษ์ กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร.วิโรจน์ บัวคลี กรรมการการ สอบวิทยานิพนธ์ภายนอกจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ได้สละเวลาตรวจสอบให้คำแนะนำเพื่อให้ผู้วิจัย เรียนรู้ และเข้าใจรายละเอียดของวิทยานิพนธ์อย่างชัดเจน ครบถ้วนทุกประเด็น และขอขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ จนผู้วิจัยมีความรู้ ความความสามารถในการนำความรู้ มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณทุนโครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่างการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กับ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการสนับสนุนด้านทุนวิจัยตลอดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับ ประสบการณ์ดีๆ ทั้งทางด้านวิชาการ ด้านสังคม และโอกาสในการเดินทางไปทำวิจัยต่างประเทศระยะ สั้น กับ Prof. Taisuke Masuta ณ Meijo University นาโกยา ประเทศญี่ปุ่น

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ร่วมอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า กองแผนที่และกองวิจัยของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสำนักงานใหญ่ สำหรับความ ช่วยเหลือ คำปรึกษา และความมีน้ำใจช่วยเหลือซึ่งกันและกัน จนทำให้ผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ได้ สำเร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดา ภรรยาและครอบครัวเป็นอย่างสูงที่คอยให้ความ ช่วยเหลือในทุกๆด้าน และคอยให้กำลังใจอย่างดีมาโดยตลอด และท่านที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จของ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทุกท่าน

ณัฐวัฒน์ นามลักษณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 แนวทางและเหตุผลในการทำวิทยานิพนธ์	1
1.2 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขอบเขตของโครงร่างวิทยานิพนธ์	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินการ.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
1.8 เนื้อหาของโครงร่างวิทยานิพนธ์.....	9
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง	10
2.1 ชุดตัวเก็บประจุ.....	10
2.1.1 ความหมายของชุดตัวเก็บประจุ (Capacitor Bank)	10
2.1.2 ชนิดของคาปาซิเตอร์.....	11
2.1.3 การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า.....	13
2.1.4 ส่วนประกอบชุดตัวเก็บประจุแบบ (switch capacitor) ในสถานีไฟฟ้า มีดังนี้.....	16

2.1.5 ระบบการทำงานของชุดตัวเก็บประจุ	17
2.1.6 การควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	17
2.2 สาเหตุการระเบิดของคาปาซิเตอร์	19
2.2.1 ทรานเซียนตทางไฟฟ้า	19
2.2.1.1 แรงดันเกินสวิตชิง	19
2.2.1.2 การสับสวิตชชุดตัวเก็บประจุ	20
2.2.1.2.1 การสับสวิตชชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว (Isolated bank)....	21
2.2.1.2.2 การสับสวิตชชุดตัวเก็บประจุแบบ Back-to-Back.....	23
2.2.1.2.3 การปลดสวิตชชุดตัวเก็บประจุ	25
2.2.2 ฮาร์โมนิกส์เรโซแนนซ์	27
2.2.2.1 ทฤษฎีการเกิดฮาร์โมนิกส์ (Harmonic).....	27
2.2.2.2 แรงดันและกระแสฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Voltage and Current).....	29
2.2.2.2.1 กระแสฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Current).....	29
2.2.2.2.2 แรงดันฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Voltage)	29
2.2.2.3 การผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ (Harmonics distortion).....	30
2.2.2.4 ขีดจำกัดของแรงดัน (Distortion limits)	31
2.2.2.5 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับชุดตัวเก็บประจุ	31
2.2.2.5.1 Transient overcurrent.....	33
2.2.2.5.2 Transient overvoltage	34
บทที่ 3 การดำเนินการจำลองแบบ	36
3.1 ข้อมูลพื้นฐานของสถานีไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลอง.....	36
3.1.1 ข้อมูลพื้นฐานการทำงานของชุดตัวเก็บประจุของสถานีไฟฟ้าวิหารแดง จังหวัดสระบุรี	38
3.1.2 การใช้ข้อมูลฮาร์โมนิกส์จากฐานข้อมูลทางคุณภาพไฟฟ้า.....	39

3.2 การจำลองชุดตัวเก็บประจุกรณีวิเคราะห์ทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้าที่สถานีบริหารแดงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ EMTP/ATP	41
3.2.1 กรณีการปลด/สับสวิตช์แบบแยกเดี่ยว (Isolate Bank) รวมถึงกรณีกระแสกระชาก (Inrush Current)	41
3.2.2 กรณีการปลด/สับสวิตช์แบบหลายตัว (Back to Back)	41
3.2.1 พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลอง.....	42
1. อิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Short circuit impedance)	42
2. หม้อแปลง (Transformer).....	43
3. ชุดตัวเก็บประจุ (Capacitors Bank).....	45
3.3 การจำลองชุดตัวเก็บประจุกรณีวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์	48
3.3.1 การวิเคราะห์สาเหตุปัญหาด้านฮาร์มอนิกส์จากข้อมูลคุณภาพไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PQView	48
3.3.2 การวิเคราะห์สาเหตุปัญหาด้านฮาร์มอนิกส์ด้วยการจำลองแบบด้วยโปรแกรม DigSILENT PowerFactory	55
บทที่ 4 การทดลองการวิเคราะห์สาเหตุปัญหาด้านทรานเซียนต์และฮาร์มอนิกส์ด้วยการจำลองแบบ.....	65
1. การศึกษาการจำลองแบบสถานีไฟฟ้าด้วยโปรแกรม EMTP/ATP จะจำลองแบบซึ่งประกอบไปด้วย	65
1.1 การสับ/ปลดชุดตัวเก็บประจุแบบเดี่ยว (Isolated Bank) สถานีบริหารแดง.....	65
1.2 การสับ/ปลดชุดตัวเก็บประจุแบบหลายตัว (Back to Back) สถานีบริหารแดง	65
2. การศึกษาการจำลองแบบสถานีไฟฟ้าด้วยโปรแกรม DigSILENT PowerFactory จะจำลองแบบซึ่งประกอบไปด้วย.....	65
2.1 Base Case สถานีบริหารแดง with PV ที่บริเวณการติดตั้งต่างๆ.....	65
2.2 Base Case สถานีบริหารแดง with Non-linear Load ที่บริเวณการติดตั้งต่างๆ.....	65
4.1 การจำลองแบบสถานีไฟฟ้าด้วยโปรแกรม EMTP/ATP เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ชุดตัวเก็บประจุ	65
1. การสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1	65

2. การปลดสวิตชชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1	67
3. การสับสวิตชชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3	68
4. การปลดสวิตชชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3	70
4.2 การจำลองแบบสถานีไฟฟ้าด้วยโปรแกรม DigSILENT PowerFactory เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ชุดตัวเก็บประจุ	70
4.2.1 การศึกษาผลกระทบเมื่อกำหนดให้มีโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ (PV) เชื่อมต่อในระบบ 22 กิโลโวลต์ (Base Case CP95 Percentile with PV)	71
4.2.2 การศึกษาผลกระทบเมื่อกำหนดให้มีโรงงานไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Load) ประเภทโรงเหล็กเชื่อมต่อในระบบ 22 กิโลโวลต์ (Base Case at CP95 Percentile with Non-linear Load)	101
4.2.3 ศึกษาผลกระทบเมื่อกำหนดให้มีอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูง (Fixed Capacitor) เชื่อมต่อในระบบ 22 กิโลโวลต์ ของสถานีไฟฟ้าบริหารแดง	131
4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	143
4.3.1 ศึกษาสาเหตุการเพิ่มขึ้นของฮาร์มอนิกส์เนื่องจากโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ที่มีการเชื่อมต่อในระบบ	144
4.3.2 ศึกษาสาเหตุการเพิ่มขึ้นของฮาร์มอนิกส์เนื่องจากโรงงานที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load)	150
4.3.3 ศึกษาสาเหตุเมื่อมีการเพิ่มของอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor)	156
บทที่ 5	163
5.1 สรุปแนวทางการวิเคราะห์จากงานวิจัย	163
5.2 แนวทางการแก้ไขปัญหา	167
5.3 ข้อเสนอแนะ	169
5.3.1 ประโยชน์ของงานวิจัย	170
5.3.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย	170
บรรณานุกรม	171

ประวัติผู้เขียน..... 174



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 พารามิเตอร์ของวงจร	18
ตารางที่ 2-2 ข้อกำหนดของแรงดันรวมที่ถูกบิดเบือน (THD) ตามมาตรฐาน IEEE ฉบับที่ 519 ปี 2014	31
ตารางที่ 3-1 ชุดตัวเก็บประจุที่ใช้ในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	37
ตารางที่ 3-2 ค่ากระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้าสถานีบริหารแดงของกองแผนงานระบบไฟฟ้า ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ปี 2562.....	42
ตารางที่ 3-3 ค่าพารามิเตอร์ของระบบหม้อแปลงที่ใช้ในการจำลองแบบในโปรแกรม EMTP/ATP 44	
ตารางที่ 3-4 ค่าพารามิเตอร์ของโหลด.....	47
ตารางที่ 3-5 แสดงค่าเปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากการวัดที่สถานีและค่าจากการจำลองโมเดลผ่าน DigSILENT PowerFactory ที่โหลดเต็มพิกัด (Base Case at full load).....	58
ตารางที่ 3 - 6 ค่าที่ได้จากการวัดที่สถานีเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลองโมเดลผ่าน Base Case CP95 Percentile	64
ตารางที่ 3 - 7 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับในสถานีไฟฟ้าบริหารแดงจากการจำลองผ่านโปรแกรม DigSILENT ของ Base Case CP 95 Percentile	64
ตารางที่ 4 -1 ตารางแสดงการจำลองระบบที่สถานีบริหารแดง	71
ตารางที่ 4 -2 ผลจากการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาดต่างๆบริเวณต้นสายสายป้อน 1 เข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory.....	75
ตารางที่ 4 -3 ผลของกระแสฮาร์มอนิกส์อันดับที่พิจารณาเกิดขึ้นเนื่องจากจากการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาดต่างๆบริเวณต้นสายสายป้อน 1 เข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory.....	76
ตารางที่ 4 -4 ผลจากการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาดต่างๆบริเวณกึ่งกลางสายป้อน 1 เข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory.....	77

ตารางที่ 4 -5 ผลของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่พิจารณาเกิดขึ้นเนื่องจากจากการจำลองโรงไฟฟ้าโซล่าเซลล์ขนาดต่างๆบริเวณบริเวณกลางสายสายป้อน 1 เข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory..... 78

ตารางที่ 4 -6 ผลจากการจำลองโรงไฟฟ้าโซล่าเซลล์ขนาดต่างๆบริเวณปลายสายสายป้อน 1 เข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory..... 79

ตารางที่ 4 -7 ผลของกระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับที่พิจารณาเกิดขึ้นเนื่องจากจากการจำลองโรงไฟฟ้าโซล่าเซลล์ขนาดต่างๆบริเวณบริเวณปลายสายสายป้อน 1 เข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory 80

ตารางที่ 4 -8 ผลของ Frequency Scan ที่เกิดขึ้น เมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซล่าเซลล์ที่บริเวณต้นสายสายป้อน 1 89

ตารางที่ 4 -9 ผลของ Frequency Scan ที่เกิดขึ้น เมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซล่าเซลล์ที่กลางสาย สายป้อน 1..... 90

ตารางที่ 4 -10 ผลของ Frequency Scan ที่เกิดขึ้น เมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซล่าเซลล์ที่ปลายสาย สายป้อน 1..... 91

ตารางที่ 4-11 ค่าคุณสมบัติเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกในระบบ (THD) ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า (Disturbance Meter) ในการกำหนดให้โรงงานหลอมเหล็กที่ใช้ในแบบจำลอง..... 103

ตารางที่ 4-12 ผลจากการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาดต่างๆบริเวณต้นทางติดกับสถานีเข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory..... 105

ตารางที่ 4-13 ผลของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่พิจารณาเกิดขึ้นเนื่องจากจากการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาดต่างๆบริเวณต้นทางติดกับสถานีเข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory 106

ตารางที่ 4-14 ผลจากการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาดต่างๆบริเวณกลางสายสายป้อน 1 เข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory..... 107

ตารางที่ 4-15 ผลของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่พิจารณาเกิดขึ้นเนื่องจากจากการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาดต่างๆบริเวณบริเวณกลางสายสายป้อน 1 เข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory..... 108

ตารางที่ 4-16 ผลจากการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาดต่างๆบริเวณปลายทางสายป้อน 1 เข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory..... 109

ตารางที่ 4-17 ผลของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่พิจารณาเกิดขึ้นเนื่องจากจากการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาดต่างๆบริเวณบริเวณปลายสายสายป้อน 1 เข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory..... 110

ตารางที่ 4-18 ผลของ Frequency Scan ที่เกิดขึ้น เมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กที่ต้นทาง สายป้อน 1 119

ตารางที่ 4-19 ผลของ Frequency Scan ที่เกิดขึ้น เมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กที่กลางสาย สายป้อน 1 120

ตารางที่ 4-20 ผลของ Frequency Scan ที่เกิดขึ้น เมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กที่ปลายสาย สายป้อน 1 121

ตารางที่ 4-21 ผลจากการจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ขนาดต่างๆบริเวณต้นสายสายป้อน 1 ติดกับสถานีเข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory..... 133

ตารางที่ 4-22 ผลจากการจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fix Capacitor) ขนาดต่างๆบริเวณกลางสายสายป้อน 1 ในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory..... 133

ตารางที่ 4-23 ผลจากการจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fix Capacitor) ขนาดต่างๆบริเวณปลายสายสายป้อน 1 ในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory..... 134

ตารางที่ 4-24 ผลของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่พิจารณาเกิดขึ้นเนื่องจากจากการจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ขนาดต่างๆ ณ บริเวณจุดติดตั้งที่กำหนดเข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory..... 134

ตารางที่ 4-25 ผลของ Frequency Scan ที่เกิดขึ้น เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ที่ต้นทาง สายป้อน 1 138

ตารางที่ 4-26 ผลของ Frequency Scan ที่เกิดขึ้น เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ที่กลางสาย สายป้อน 1 138

ตารางที่ 4-27 ผลของ Frequency Scan ที่เกิดขึ้น เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์
แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ที่ปลายสาย สายป้อน 1..... 138



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2-1 โครงสร้างพื้นฐานของชุดตัวเก็บประจุ.....	10
รูปที่ 2-2 วงจรสมมูลก่อนติดตั้งคาปาซิเตอร์.....	10
รูปที่ 2-3 วงจรสมมูลหลังติดตั้งคาปาซิเตอร์.....	11
รูปที่ 2-4 คาปาซิเตอร์แบบคงที่.....	12
รูปที่ 2-5 Switched Capacitor คาปาซิเตอร์.....	12
รูปที่ 2-6 วัฏจักรกำลังไฟฟ้า.....	13
รูปที่ 2-7 สมการคำนวณกำลังไฟฟ้าและสามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้า.....	14
รูปที่ 2-8 ส่วนประกอบชุดตัวเก็บประจุแบบ (switch capacitor) ในสถานีไฟฟ้า.....	16
รูปที่ 2-9 แผนภาพแสดงชุดตัวเก็บประจุที่ติดตั้งในสถานีไฟฟ้า.....	20
รูปที่ 2-10 วงจรสมมูลชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว.....	21
รูปที่ 2-11 วงจรสมมูลชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว (ไม่พิจารณาค่าความต้านทาน).....	21
รูปที่ 2-12 วงจรสมมูลชุดตัวเก็บประจุแบบ Back to Back.....	23
รูปที่ 2-13 วงจรสมมูลการปลดสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุ.....	25
รูปที่ 2-14 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อเกิดอาร์กที่แรงดันคายอด.....	26
รูปที่ 2-15 แสดงรูปคลื่นแรงดันเนื่องจากการอาร์กซ้ำหลายครั้ง.....	27
รูปที่ 2-16 กระแสไหลผ่านโหลดไม่เชิงเส้น.....	28
รูปที่ 2-17 การผิดเพี้ยนของกระแสที่เกิดจากอุปกรณ์ไม่เชิงเส้น.....	30
รูปที่ 2-18 การใช้ทฤษฎีอนุกรมฟูเรียร์วิเคราะห์รูปคลื่น.....	31
รูปที่ 2-19 ค่าความสามารถของชุดตัวเก็บประจุที่ทนแรงดันเกิน (Overvoltage) ภายใต้การทำงาน.....	32
รูปที่ 2-20 ค่าความสามารถการทนได้ของกระแสขณะเกิดทรานเซียนต์.....	33

รูปที่ 2-21 ค่าความสามารถการทนได้ของแรงดันเกินขณะเกิดทรานเซียนต์ฮาร์มอนิกส์ที่มีผลต่อชุดตัวเก็บประจุ	34
รูปที่ 3-1 ตัวอย่างแผนที่สถานีไฟฟ้าบริหารแดง จังหวัดสระบุรี	36
รูปที่ 3-2 แผนผังสถานีไฟฟ้าบริหารแดง จังหวัดสระบุรี	36
รูปที่ 3-3 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จาก PQ Meter ที่ติดตั้งที่สถานีไฟฟ้าบริหารแดง จังหวัดสระบุรี	37
รูปที่ 3-4 ข้อมูลชุดตัวเก็บประจุ (Name Plate) ที่ใช้ในสถานีไฟฟ้า ระบบ 22 kV	37
รูปที่ 3-5 Single line diagram ชุดตัวเก็บประจุที่ใช้ในสถานีไฟฟ้า ระบบ 22 kV	38
รูปที่ 3-6 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัด	40
รูปที่ 3-7 ค่าเฉลี่ยของTHDvและแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่ต่างๆของทุกตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัด	40
รูปที่ 3-8 ค่าเฉลี่ยของTDD และกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่ต่างๆของทุกตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัด	40
รูปที่ 3-9 แบบจำลองสถานีไฟฟ้าจากโปรแกรม EMTP/ ATP	41
รูปที่ 3-10 วงจรสมมูลของหม้อแปลง	43
รูปที่ 3-11 ค่าพารามิเตอร์หม้อแปลงในโปรแกรม EMTP/ATP	45
รูปที่ 3-12 การต่อชุดตัวเก็บประจุแบบดับเบิ้ลสายไม่ต่อลงดิน	46
รูปที่ 3-13 แผนผังการจ่ายไฟฟ้าสถานีบริหารแดง	48
รูปที่ 3-14 ตัวอย่างแผนผังภูมิสารสนเทศที่นำมาใช้วิเคราะห์	48
รูปที่ 3-15 ข้อมูลที่ได้จากมิเตอร์คุณภาพไฟฟ้าที่ติดตั้งที่สถานีบริหารแดง	49
รูปที่ 3-16 กำลังไฟฟ้าจริงที่นำมาวิเคราะห์จากโปรแกรม PQview	49
รูปที่ 3-17 กระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่สามจากโปรแกรม PQview	49
รูปที่ 3-18 กระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่ห้าจากโปรแกรม PQview	50
รูปที่ 3-19 กระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่เจ็ดจากโปรแกรม PQview	50
รูปที่ 3-20 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยหลังจากทำ CP95 Percentile	51
รูปที่ 3-21 กระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่สามหลังจากทำ CP95 Percentile	51

รูปที่ 3-22	กระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่ห้าหลังจากทำ CP95 Percentile.....	51
รูปที่ 3-23	กระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่เจ็ดหลังจากทำ CP95 Percentile	52
รูปที่ 3-24	กระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่เก้าหลังจากทำ CP95 Percentile.....	52
รูปที่ 3-25	กระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่สิบเอ็ดหลังจากทำ CP95 Percentile.....	52
รูปที่ 3-26	กระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่สิบสามหลังจากทำ CP95 Percentile.....	53
รูปที่ 3-27	ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับผู้ใช้ไฟของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	53
รูปที่ 3-28	โมเดลจากการจำลองระบบที่สถานีบริหารแดงในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory 55	
รูปที่ 3-29	การวิเคราะห์โมเดลจากการจำลองระบบที่สถานีบริหารแดงในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory.....	56
รูปที่ 3-30	ผลการวิเคราะห์ค่ากระแสฮาร์มอนิกของระบบ 22 kV สำหรับเฟส A, B และ C.....	56
รูปที่ 3-31	ผลการวิเคราะห์ค่ากระแสฮาร์มอนิกของระบบ 115 kV สำหรับเฟส A, B และ C.....	57
รูปที่ 3-32	การวิเคราะห์จากกราฟ frequency scan ของระบบ (Base Case at full load) ที่ ...	57
รูปที่ 3-33	การต่อของบัสที่ 22 กิโลโวลต์ ของสถานีไฟฟ้าบริหารแดง.....	58
รูปที่ 3-34	โหลดโปรไฟล์ของสถานีบริหารแดงจากระบบ SCADA.....	59
รูปที่ 3-35	การทำ Scaling Load ในการตั้ง Base Case ที่อิงตามโหลดโปรไฟล์.....	60
รูปที่ 3-36	การทำ Flexible Data เพื่อนำมาตั้งค่า Load Flow สำหรับ Base Case.....	60
รูปที่ 3-37	การตั้งค่า Load Flow สำหรับ Base Case	61
รูปที่ 3-38	การวิเคราะห์โมเดลจากการจำลอง Base Case (CP 95 Percentile) ระบบที่สถานีบริหารแดงในโปรแกรม DigSILENT.....	61
รูปที่ 3-39	ค่ากำลังรวมที่หม้อแปลงไฟฟ้าของBase Case (CP95 Percentile)เมื่อจำลองโมเดลผ่านโปรแกรม DigSILENT.....	62
รูปที่ 3-40	ค่ากระแสที่ไหลผ่านชุดตัวเก็บประจุที่สถานีของBase Case (CP95 Percentile)เมื่อจำลองโมเดลผ่านโปรแกรม DigSILENT	62
รูปที่ 3-41	ผลการวิเคราะห์ค่ากระแสฮาร์มอนิกของระบบ 22 kV สำหรับเฟส A, B และ C.....	63
รูปที่ 3-42	ผลการวิเคราะห์ค่ากระแสฮาร์มอนิกของระบบ 115 kV สำหรับเฟส A, B และ C.....	63

รูปที่ 3-43 การวิเคราะห์จากกราฟ frequency scan ของระบบ (CP 95 Percentile) ที่สถานีบริหาร แดง	64
รูปที่ 4-1 รูปคลื่นแรงดันที่จุด V1 (สับสวิตชชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1)	65
รูปที่ 4-2 รูปคลื่นแรงดันที่จุด V2 (สับสวิตชชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1)	66
รูปที่ 4-3 รูปคลื่นแรงดันที่จุด V3 (สับสวิตชชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1)	66
รูปที่ 4-4 รูปคลื่นกระแสที่จุด C3 (สับสวิตชชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1)	67
รูปที่ 4-5 รูปคลื่นแรงดันที่จุด V3 (ปลดสวิตชชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1)	67
รูปที่ 4-6 รูปคลื่นแรงดันที่จุด V1 (สับสวิตชชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3)	68
รูปที่ 4-7 รูปคลื่นแรงดันที่จุด V2 (สับสวิตชชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3)	68
รูปที่ 4-8 รูปคลื่นแรงดันที่จุด V3 (สับสวิตชชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3)	69
รูปที่ 4-9 รูปคลื่นกระแส C3 (สับสวิตชชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3)	69
รูปที่ 4-10 รูปคลื่นแรงดันที่จุด V3 (ปลดสวิตชชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3)	70
รูปที่ 4-11 การวิเคราะห์โมเดลจากการจำลองระบบสถานีบริหารแดงในโปรแกรม DigSILENT ที่	71
รูปที่ 4-12 ค่าคุณสมบัติเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกสรีในระบบ (Total Harmonic Distortion) ของอินเวอร์เตอร์สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการจำลองกับระบบโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์	72
รูปที่ 4-13 ค่ากระแสเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกสรีในระบบ (Total Harmonic Distortion)ที่ใช้ ในการจำลองกับระบบโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์	72
รูปที่ 4-14 การตั้งค่าระบบ Harmonics/Power Quality ของโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในการจำลอง โมเดล	73
รูปที่ 4-15 การตั้งค่าขนาดโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในการจำลองโมเดลในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory	73
รูปที่ 4-16 การจำลองระบบโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์เข้ามาบริเวณกลางสายสายป้อน 1	74
รูปที่ 4-17 การจำลองระบบโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์เข้ามาที่ปลายสายสายป้อน 1	74
รูปที่ 4-18 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ ขนาด 0.5 MW	81
รูปที่ 4-19 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ ขนาด 1 MW	81

รูปที่ 4 -20 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 1.5 MW	82
รูปที่ 4 -21 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 2 MW	82
รูปที่ 4 -22 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 2.5 MW	83
รูปที่ 4 -23 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 3 MW	83
รูปที่ 4 -24 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 3.5 MW	84
รูปที่ 4- 25 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 4 MW	84
รูปที่ 4 -26 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 4.5 MW	85
รูปที่ 4 -27 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 5 MW	85
รูปที่ 4 -28 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 5.5 MW	86
รูปที่ 4 -29 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 6 MW	86
รูปที่ 4 -30 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 6.5 MW	87
รูปที่ 4 -31 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 7 MW	87
รูปที่ 4 -32 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 7.5 MW	88
รูปที่ 4 -33 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 8 MW	88
รูปที่ 4-34 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 0.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด	92
รูปที่ 4-35 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 1 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด	92
รูปที่ 4-36 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 1.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด	93
รูปที่ 4-37 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 2 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด	93
รูปที่ 4-38 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 2.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด	94

รูปที่ 4-39 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 3 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด	94
รูปที่ 4-40 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 3.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด	95
รูปที่ 4-41 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 4 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด	95
รูปที่ 4-42 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 4.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด	96
รูปที่ 4-43 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด	96
รูปที่ 4-44 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 5.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด	97
รูปที่ 4-45 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 6 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด	97
รูปที่ 4-46 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 6.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด	98
รูปที่ 4-47 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 7 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด	98
รูปที่ 4-48 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 7.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด	99
รูปที่ 4-49 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 8 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด	99
รูปที่ 4-50 การจำลองโรงหลอมเหล็กเข้ามาบริเวณต้นทางสายป้อน 1 ติดกับสถานี	101
รูปที่ 4-51 การจำลองโรงหลอมเหล็กเข้ามาบริเวณกลางสายสายป้อน 1 ที่ห่างจากสถานี	102
รูปที่ 4-52 การจำลองโรงหลอมเหล็กเข้ามาบริเวณปลายสายสายป้อน 1 ที่ห่างจากสถานี	102
รูปที่ 4-53 การจำลองการเชื่อมต่อโรงงานหลอมเหล็กเข้ากับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผ่านทางโปรแกรม DigSILENT PowerFactory	104

รูปที่ 4-54 การวิเคราะห์โหมดลจากการจำลองระบบของสถานีบริหารแรงในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory ผ่าน Base Case เข้ากับระบบโรงงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ประเภท โรงงานหลอมเหล็ก	104
รูปที่ 4-55 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 0.5 MW.....	111
รูปที่ 4-56 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 1 MW.....	111
รูปที่ 4-57 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 1.5 MW.....	112
รูปที่ 4-58 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 2 MW.....	112
รูปที่ 4-59 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 2.5 MW.....	113
รูปที่ 4-60 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 3 MW.....	113
รูปที่ 4-61 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 3.5 MW.....	114
รูปที่ 4-62 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 4 MW.....	114
รูปที่ 4-63 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 4.5 MW.....	115
รูปที่ 4-64 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 5 MW.....	115
รูปที่ 4-65 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 5.5 MW.....	116
รูปที่ 4-66 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 6 MW.....	116
รูปที่ 4-67 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 6.5 MW.....	117
รูปที่ 4-68 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 7 MW.....	117
รูปที่ 4-69 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 7.5 MW	118
รูปที่ 4-70 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 8 MW.....	118
รูปที่ 4-71 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 0.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด.....	122
รูปที่ 4-72 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 1 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด.....	122
รูปที่ 4-73 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 1.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด.....	123

รูปที่ 4-87 การวิเคราะห์โมเดลจากการจำลองระบบสถานีบริหารแรงดันในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory ผ่าน Base Case เมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) เชื่อมต่อในระบบ 22 กิโลโวลต์ ของสถานีไฟฟ้าบริหารแรง	131
รูปที่ 4-88 การจำลองอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) เข้ามา บริเวณกึ่งกลางสายป้อน 1	132
รูปที่ 4-89 การจำลองอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) เข้ามา บริเวณปลายสายสายป้อน 1	132
รูปที่ 4-90 (a,b,c) ติดตั้ง Fixed Capacitor ขนาด 300 kVar	135
รูปที่ 4-91 (a,b,c) ติดตั้ง Fixed Capacitor ขนาด 600 kVar	135
รูปที่ 4-92 (a,b,c) ติดตั้ง Fixed Capacitor ขนาด 900 kVar	136
รูปที่ 4-93 (a,b,c) ติดตั้ง Fixed Capacitor ขนาด 1,200 kVar	136
รูปที่ 4-94 (a,b,c) ติดตั้ง Fixed Capacitor ขนาด 1,500 kVar	137
รูปที่ 4-95 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ขนาด 300 kVA ขนาดต่างๆ ณ บริเวณจุดติดตั้งที่กำหนด	139
รูปที่ 4-96 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ขนาด 600 kVA ขนาดต่างๆ ณ บริเวณจุดติดตั้งที่กำหนด	139
รูปที่ 4-97 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ขนาด 900 kVA ขนาดต่างๆ ณ บริเวณจุดติดตั้งที่กำหนด	140
รูปที่ 4-98 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ขนาด 1,200 kVA ขนาดต่างๆ ณ บริเวณจุดติดตั้งที่กำหนด	140
รูปที่ 4-99 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ขนาด 1,500 kVA ขนาดต่างๆ ณ บริเวณจุดติดตั้งที่กำหนด	141

รูปที่ 4-100 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์แบบขนานของระบบเมื่อเพิ่มขนาด โรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ	145
รูปที่ 4-101 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอันดับแบบขนาน (Parallel Harmonic Resonance Order) ของระบบเมื่อเพิ่มขนาดโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ	145
รูปที่ 4-102 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์แบบอนุกรมของระบบเมื่อเพิ่มขนาด โรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ	146
รูปที่ 4-103 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอันดับแบบอนุกรม (Series Harmonic Resonance Order) ของระบบเมื่อเพิ่มขนาดโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ	146
รูปที่ 4-104 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์แบบขนานของระบบเมื่อเพิ่มขนาดโรง หลอมเหล็กที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ	151
รูปที่ 4-105 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอันดับแบบขนาน (Parallel Harmonic Resonance Order) ของระบบเมื่อเพิ่มขนาดโรงหลอมเหล็กที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ	151
รูปที่ 4-106 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์แบบอนุกรมของระบบเมื่อเพิ่มขนาด โรงหลอมเหล็กที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ	152
รูปที่ 4-107 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอันดับแบบอนุกรม (Series Harmonic Resonance Order) ของระบบเมื่อเพิ่มขนาดโรงหลอมเหล็กที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ	152
รูปที่ 4-108 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์แบบขนานของระบบเมื่อเพิ่มขนาด อุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ	157
รูปที่ 4-109 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอันดับแบบขนาน (Parallel Harmonic Resonance Order) ของระบบเมื่อเพิ่มขนาดอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ	158
รูปที่ 4-110 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์แบบอนุกรมของระบบเมื่อเพิ่มขนาด อุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ	158
รูปที่ 4-111 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอันดับแบบอนุกรม (Series Harmonic Resonance Order) ของระบบเมื่อเพิ่มขนาดอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor)ที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ	159

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวทางและเหตุผลในการทำวิทยานิพนธ์

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) เป็นรัฐวิสาหกิจดูแลด้านระบบจำหน่ายไฟฟ้า มีหน้าที่บริการจำหน่ายไฟฟ้าแก่ประชาชนในส่วนภูมิภาคทุกจังหวัดทั่วประเทศไทย ยกเว้นกรุงเทพมหานคร จังหวัดนนทบุรี และจังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งเป็นเขตรับผิดชอบของการไฟฟ้านครหลวง ทั้งนี้ กฟภ. ได้พัฒนาและขยายระบบจำหน่ายไฟฟ้าให้มีความเพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้า สร้างความมั่นคงและเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า เพื่อให้ผู้ใช้ไฟฟ้าได้ใช้ไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการใช้งานในทุกกรณี ทั้งอาคารบ้านเรือน โรงงานอุตสาหกรรม และหน่วยงานราชการ เนื่องจากปริมาณความต้องการการใช้ไฟฟ้าจำนวนมาก มีการเพิ่มขึ้นของบ้านเรือนที่อยู่อาศัยต่างๆตามเพิ่มของประชากร ซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้าที่ตามมา ทั้งผลกระทบทางตรงและทางอ้อม ถ้าบริเวณที่เกิดปัญหานั้นอยู่ในย่านอุตสาหกรรมโรงงานต่างๆ ย่านชุมชน หรือสถานที่ราชการที่สำคัญของรัฐ รวมไปถึงระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มีอุปกรณ์ที่สำคัญต่างๆที่อยู่ในสถานี่ไฟฟ้าซึ่งมีมูลค่าสูงจำนวนมาก เกิดการทำงานผิดพลาดหรือได้รับความเสียหายจากปัญหาดังกล่าวจึงเป็นที่มาในการศึกษาวิเคราะห์ถึงสาเหตุที่ทำให้ชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าระเบิด เนื่องจากปัญหาของทรานเซียนต์และฮาร์มอนิกส์ ดังกล่าว

1.2 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพบว่าการใช้พลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และผู้ใช้ไฟฟ้าให้ความสนใจเกี่ยวกับคุณภาพไฟฟ้ามากยิ่งขึ้นโดยคำว่า “ คุณภาพไฟฟ้า (Power Quality) ” เป็นคำหนึ่งที่ถูกกล่าวถึงในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับระบบไฟฟ้า โดยมุ่งเน้นเกี่ยวกับสิ่งรบกวนในระบบไฟฟ้า ซึ่งมีหลายชนิดส่วนใหญ่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าเป็นประจำ แต่การแก้ไขปัญหานั้นจะทำแยกกันในแต่ละชนิดของสิ่งรบกวนในแต่ละแห่งที่เกิดปัญหา โดยพยายามแก้ไขปัญหานั้นภาพรวมของระบบไฟฟ้ากำลัง ให้มีคุณภาพไฟฟ้าที่ดีขึ้น ซึ่งคำนึงถึงปัจจัยดังนี้ คือ อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน อาจมีความไวในการตอบสนองต่อคุณภาพไฟฟ้ามากกว่าอุปกรณ์ที่เคยใช้ในอดีต อีกทั้งยังมีการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าผ่านไมโครโพรเซสเซอร์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งจะส่งผลตามการเปลี่ยนแปลงตามสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าได้ง่าย ทำให้มีความพยายามที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้ามากขึ้น มีการนำอุปกรณ์ที่จะทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น เช่น มอเตอร์แบบปรับความเร็วได้ และตัวเก็บประจุ

แบบขนานที่ใช้ในการแก้ตัวประกอบกำลัง (Power factor) เพื่อลดการสูญเสียพลังงาน แต่ผลลัพธ์ที่ตามมาคือ เป็นการเพิ่มระดับของฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้า ก่อให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะผลกระทบของฮาร์มอนิกส์ ซึ่งจะเข้าไปในระบบไฟฟ้าบริเวณใกล้เคียง ทำให้อุปกรณ์เกิดการดำเนินงานที่ผิดพลาด หรือเกิดความเสียหายได้

โครงร่างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอการวิเคราะห์และศึกษาแนวทางแก้ไขการระเบิดของชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 22 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ในอนาคตประเทศไทยมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นจำนวนมาก เช่น การเพิ่มขึ้นของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ รวมถึงนิคมอุตสาหกรรมต่างๆ การเพิ่มขึ้นของบ้านเรือนที่อยู่อาศัย การที่มีประชากรเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่าง ๆ มากขึ้นตามรวมถึงพลังงานทางเลือกและพลังงานหมุนเวียน ซึ่งจะเข้ามากระทบอย่างมากในอนาคต ซึ่งที่กล่าวมาเหล่านี้ล้วนก่อให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้าที่ตามมา ส่งผลให้ระบบไฟฟ้าได้รับผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อม อาจมีความเสียหายทางเศรษฐกิจจำนวนมากเกิดขึ้น ถ้าบริเวณที่เกิดปัญหานั้นอยู่ในย่านอุตสาหกรรมโรงงานต่างๆหรือย่านชุมชน หรือสถานที่ราชการที่สำคัญของรัฐ และรวมไปถึงระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค อุปกรณ์ที่สำคัญต่างๆที่อยู่ในสถานีไฟฟ้าซึ่งมีมูลค่าจำนวนมากเกิดการดำเนินงานผิดพลาดหรือได้รับความเสียหายได้ รวมถึงผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าต่อสถานีที่อยู่ใกล้เคียง อาจกระทบเป็นวงกว้างสร้างความเสียหายได้มากหากยังไม่ได้มีการศึกษาผลกระทบและแนวทางป้องกันที่จะเกิดขึ้นอย่างจริงจัง

ในที่นี้จะทำการศึกษาผลกระทบการระเบิดของชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงโดยจะวิเคราะห์ปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ผลกระทบจากทรานเซียนต์และฮาร์มอนิกส์ อันเป็นสาเหตุที่อาจส่งผลกระทบต่อดังกล่าว โดยทำการจำลองจากระบบไฟฟ้าที่เคยเกิดเหตุการณ์ขึ้นจริงผ่านการวิเคราะห์ทางโปรแกรม EMTP/ATP, PQView และ DigSILENT PowerFactory เพื่อศึกษาผลกระทบกับชุดเก็บประจุที่สถานีและความสามารถในการรองรับปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้า รวมถึงปัจจัยที่ทำให้ชุดเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าระเบิดได้ เพื่อเป็นการรองรับเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต และจะมีการประยุกต์แนวทางการใช้งานข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดมิเตอร์คุณภาพไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าวิเคราะห์ร่วมกัน เป็นแนวทางในการป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้นและผลกระทบต่อสถานีใกล้เคียง เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาแนวทางการแจ้งเตือนระบบคุณภาพไฟฟ้าในอนาคต ให้สามารถรองรับและเพิ่มความเชื่อมั่นด้านระบบคุณภาพไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคให้แก่ลูกค้าปัจจุบันและในอนาคต

1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

- 1) เพื่อนำโปรแกรมทางด้านคอมพิวเตอร์มาช่วยเพื่อวิเคราะห์สาเหตุทรานเซียนต์และฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นและมีผลต่อตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้า
- 2) เพื่อหาแนวทางในการแก้ไขปัญหาการระเบิดของชุดตัวเก็บประจุที่สถานีของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในอนาคต

1.4 ขอบเขตของโครงร่างวิทยานิพนธ์

- 1) ศึกษาการระเบิดของชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าที่แรงดัน 22 กิโลโวลต์เท่านั้น
- 2) จำลองข้อมูลผ่านโปรแกรม EMTP/ATP, PQView และ DiGSILENT PowerFactory เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การระเบิดของชุดตัวเก็บประจุ
- 3) นำข้อมูลทางคุณภาพไฟฟ้าจากมิเตอร์ตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้า (PQ Meter) ที่สถานีไฟฟ้าจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมาทำการวิเคราะห์ร่วมด้วย

1.5 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินการ

- 1) ศึกษาบทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อต่างๆ ดังนี้
 - 1.1) ผลกระทบกระแสพุ่งเข้าจากการสวิตช์ซึ่งต่อคาปาซิเตอร์แบงก์แรงดันปานกลาง
 - 1.2) การศึกษาผลของการสับและปลดสวิตช์ชนิดสูญญากาศต่อชุดเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อยระดับแรงดันปานกลาง
 - 1.3) การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบสายส่งและระบบจำหน่ายผ่านทางชิงโครนัส สวิตช์ซึ่ง
 - 1.4) ผลกระทบต่อชุดตัวเก็บประจุในสถานีไฟฟ้าเมื่อมีแรงดันเกินทางธรรมชาติและการใช้งานกับดักแรงกันเกิน
 - 1.5) ศึกษาการติดตั้งและทดสอบอุปกรณ์อัตโนมัติสวิตช์ซึ่งคาปาซิเตอร์แบงก์ ในสถานีไฟฟ้าย่อยระบบ 115/22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
 - 1.6) ชุดตัวเก็บประจุที่มีผลต่อระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีโหลดฮาร์มอนิกส์ขนาดใหญ่
 - 1.7) การศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกในสถานีไฟฟ้าย่อย
 - 1.8) การวิเคราะห์ทางเลือกในการกรองกระแสฮาร์มอนิกส์

- 1.9) การใช้งานฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเคลือบอยู่ในชุดตัวเก็บประจุและสาเหตุการพังทลายของชุดตัวเก็บประจุ
- 2) นำเอาข้อมูลภูมิศาสตร์สารสนเทศของสถานีไฟฟ้าวิหารแดง จังหวัดสระบุรี ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมาใช้เป็นแบบในการจำลองและศึกษา
- 3) จำลองสาเหตุและปัจจัยต่างๆที่ทำให้เกิดการระเบิดชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าวิหารแดงที่สภาวะทรานเซียนต์และฮาร์มอนิกส์ตามสาเหตุที่ได้ศึกษา
- 4) ประยุกต์ใช้ข้อมูลวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าที่สถานีวิหารแดง
- 5) วิเคราะห์ผลถึงสาเหตุและปัจจัยต่างๆที่ทำให้เกิดการระเบิดชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้ารวมถึงข้อมูลเมื่อมีการเชื่อมต่อของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเข้ามาในระบบ
- 6) สรุปกำหนดแนวทางในการแก้ไขและป้องกันปัญหาชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าระเบิดในอนาคต

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) พัฒนาแนวทางในการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้า โดยใช้ฐานข้อมูลมิเตอร์คุณภาพไฟฟ้าที่สถานีร่วมด้วย
- 2) แนวโน้มความน่าเชื่อถือคุณภาพระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคดีขึ้น เนื่องจากทราบถึงปัญหาคุณภาพไฟฟ้า
- 3) ลดความสูญเสียอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า (ชุดตัวเก็บประจุ) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเนื่องจากปัญหาคุณภาพไฟฟ้าภายในระบบไฟฟ้า
- 4) แนวทางในการแก้ไขปัญหาเหตุการณ์ชุดตัวเก็บประจุระเบิดที่สถานีในอนาคต

1.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. งานวิจัยคุณภาพไฟฟ้าด้านทรานเซียนต์

1.1 ผลกระทบกระแสพุ่งเข้าจากการสวิตช์ชิ่งต่อคาปาซิเตอร์แบงก์แรงดันปานกลาง กรณีศึกษาของ กฟน. โดยภาณุวัฒน์ สิริวิหะธนกุล และคณะ ปี 2561[1] กล่าวถึงการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power) ด้วยการใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์เชื่อมต่อคาปาซิเตอร์แบงก์จะทำให้เกิดกระแสพุ่ง

เข้า (inrush current) เกิดกระแสพุ่งเข้าสูงอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อคาปาซิเตอร์แบงก์ได้ งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบกระแสพุ่ง คือ ค่ากระแสสูงสุดที่คาปาซิเตอร์ใช้ในการชาร์จประจุเมื่อเริ่มต่อ วงจรคาปาซิเตอร์เข้ากับระบบไฟฟ้า กรณีใช้เซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อเชื่อมต่อคาปาซิเตอร์แบงก์ด้วยการ สร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทรานเซียนต์ ATP-EMTP ส่วนพารามิเตอร์อุปกรณ์ ไฟฟ้าตามระบบไฟฟ้า แหล่งจ่ายแรงดันและอิมพีแดนซ์ลัดวงจรได้จากการจำลองระบบไฟฟ้านคร หลวงผ่าน PSS/E โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กรณี

กรณีที่ 1 สวิตช์ซึ่งจ่ายคาปาซิเตอร์แบงก์เพียง 1 ชุด

กรณีที่ 2 สวิตช์ซึ่งจ่ายคาปาซิเตอร์แบงก์เพียง 1 ชุด ขณะที่คาปาซิเตอร์แบงก์อีกชุดทำงาน อยู่ (back to back)

ซึ่งกรณีที่ 1 มีค่ากระแสมากกว่ากรณีที่ 2 จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่ทำให้คาปาซิเตอร์เสื่อมสภาพ ขึ้นอยู่กับปริมาณแรงดันที่ตกคร่อมและกระแสไหลเข้าตัวเก็บประจุ แม้ว่าผลที่ได้จะไม่ทำให้เกิดการ เสื่อมสภาพหรือชำรุดฉับพลัน แต่จะส่งผลให้เกิดความร้อนสูงขณะสวิตช์ ซึ่งนำไปสู่การเสื่อมสภาพ สะสมและทำให้อายุการทำงานลดลง

1.2 การศึกษาผลของการสับและปลดสวิตช์ชนิดสูญญากาศต่อชุดเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อยระดับ แรงดันปานกลาง (A study on capacitor bank switching by vacuum switch in medium voltage sub station) โดยอรรถพันธ์ จันทสมิต ปี 2543 [2] การสับและปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ ในสถานีไฟฟ้าย่อยส่งผลกระทบต่อระบบสถานีอย่างมากเนื่องจากทรานเซียนต์ (Transient) ในกรณีสับ สวิตช์เข้าจะเกิดแรงดันเกิน (over voltage) หรือกระแสเกิน (Inrush current) เป็นสาเหตุให้ฟิวส์ หรือตัวของชุดเก็บประจุเสียหาย กรณีปลดสวิตช์จะเกิดเหตุการณ์แรงดันเกินเนื่องจากการอาร์คหลาย รอบ (restrike) ที่ชุดเก็บประจุทำให้อุปกรณ์เสียหายได้ ซึ่งจะจำลองโดยใช้โปรแกรม EMTP เพื่อ วิเคราะห์สาเหตุทรานเซียนต์

1.3 การปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบสายส่งและระบบจำหน่ายผ่านทางซิงโครนัสสวิตช์ซิง (Power quality Improvement in transmission and distribution networks via symchronous withching) โดย Delfinoและคณะ ปี 2544 [3] ได้นำเสนอวิธีการลดแรงดันเกิน (Overvoltage)

และกระแสพุ่งเข้า (Inrush Current) โดยใช้หลักการควบคุมการปลดสับสวิตช์ให้สอดคล้องกับแรงดันของระบบไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์มาช่วยวิเคราะห์ คือ โปรแกรม EMTP/ATP ซึ่งจะเปรียบเทียบผลการสับชุดตัวเก็บประจุในกรณีที่ไม่มีสวิตช์แบบซิงโครนัสและกรณีที่มีการใช้การสับชุดตัวเก็บประจุในกรณีที่มีสวิตช์แบบซิงโครนัส ซึ่งผลจากงานวิจัยพบว่า การสับชุดตัวเก็บประจุในกรณีที่มีสวิตช์แบบซิงโครนัสจะช่วยลดผลของแรงดันเกิน (Overvoltage) และกระแสพุ่งเข้า (Inrush Current) ได้

1.4 ผลกระทบต่อชุดตัวเก็บประจุในสถานีไฟฟ้าเมื่อมีแรงดันเกินทางธรรมชาติและการใช้งานกับดักแรงเกินเกิน (Impact of shunt Capacitor Bank on Substation Surge Environmental and Surge Arrester Applications) โดย Working Group 3.4.17 of the IEEE Surge Protective Devices Committee และคณะ ปี 2539 [4] ได้นำเสนอปัญหาของการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลังไม่ว่าจะเป็นปัญหาจากแรงดันเกิน (Overvoltage) เมื่อมีการปลด/สับชุดตัวเก็บประจุ ปรากฏการณ์การเกิดการอาร์คซ้ำ (Restrike) โดยบทความได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาโดยการติดตั้งกับดัก (Surge Arrester) มาใช้ในการป้องกัน

1.5 ศึกษาการติดตั้งและทดสอบอุปกรณ์อัตโนมัติสวิตช์ซึ่งคาปาซิเตอร์แบงก์ ในสถานีไฟฟ้าย่อยระบบ 115/22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดย นิรินธ์ เตชาติศัย และคณะ ปี 2555 [5] เป็นการศึกษา วิเคราะห์ การติดตั้งและทดสอบอุปกรณ์อัตโนมัติสวิตช์ซึ่ง คาปาซิเตอร์แบงก์ในสถานีไฟฟ้าย่อยระบบ 115/22 กิโลโวลต์ โดยใช้สถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประกอบไปด้วย การติดตั้ง การใช้งานอุปกรณ์ที่ใช้กับชุดควบคุมและ ข้อเสนอแนะต่างๆ และมีการจำลองเหตุการณ์โดยใช้โปรแกรม EMTP/ATP วิเคราะห์และจำลองระบบไฟฟ้า ได้นำ ค่าพารามิเตอร์จากสถานีไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมาทำการจำลองเหตุการณ์ พิจารณาในสภาวะการปลด/สับชุดคาปาซิเตอร์ การลดแรงดันเกิน โดยควบคุมการสับและปลดสวิตช์ให้สอดคล้องกับรูปคลื่นแรงดันของระบบ

2. งานวิจัยคุณภาพไฟฟ้าด้านฮาร์มอนิกส์

2.1 ชุดตัวเก็บประจุที่มีผลต่อระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อมีโหลดฮาร์มอนิกส์ขนาดใหญ่ (Capacitor Bank and its effect on power systems with high harmonic loads) โดย Sharma Y. และคณะ ปี 2560 [6] กระแสฮาร์มอนิกส์ระหว่างที่ไหลอยู่ในระบบกระแสไฟฟ้า เป็นสาเหตุให้แรงดันไฟฟ้าตก

เกิดความเครียดในระบบจำหน่าย และทำให้เกิดการทำงานผิดพลาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางชนิดที่มีความไวต่อกระแสฮาร์โมนิกส์ แรงดันที่ผิดเพี้ยนจะเป็นผลของแรงดันไฟฟ้าตก ที่ตกคร่อมระบบและขนาดจะขึ้นอยู่กับขนาดกระแสฮาร์โมนิกส์ ผลเสียที่ตามมาของการเกิดกระแสฮาร์โมนิกส์ต่อชุดตัวเก็บประจุ ทำให้เกิด premature damage และ resonance effect ได้

2.2 การศึกษาผลกระทบของฮาร์โมนิกในสถานีไฟฟ้าย่อยโดย ศรชัย บัวแก้วปี 2541 [7] กล่าวถึงการพัฒนาของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear load) เพิ่มมากขึ้นซึ่งโหลดเหล่านี้จะเป็นแหล่งกำเนิดของกระแสฮาร์โมนิกส์ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้า ถ้าปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์มีค่ามากพออาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าย่อยได้ เช่น อาจเกิดความสูญเสียขณะจ่ายโหลดเพิ่มขึ้นภายในตัวหม้อแปลงกำลัง ซึ่งมีผลทำให้หม้อแปลงกำลังมีอุณหภูมิสูงขึ้น และจะเป็นผลให้หม้อแปลงกำลังจ่ายโหลดได้ลดลง นอกจากนี้ผลที่ตามมาอีกอย่างหนึ่งก็คือการเกิดเรโซแนนซ์ภายในสถานีไฟฟ้าย่อยบางแห่งที่มีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุ ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายต่อชุดตัวเก็บประจุได้ แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์ส่วนใหญ่จะเกิดจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น เช่น อุปกรณ์ประเภทเรียงกระแส (rectifier) เครื่องแปลงผันแบบสถิต (static converter) เต้าหลอมแบบอาร์ก เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะทำให้เกิดกระแสฮาร์โมนิกส์ไหลเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้า โดยหลักๆแยกพิจารณาได้ ดังนี้ คือ

1. การวิเคราะห์ปริมาณกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกส์ในสายป้อนและที่บัสภายในสถานีไฟฟ้าย่อยโดยพิจารณาเทียบกับมาตรฐานต่างๆ และข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์โมนิกส์เกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม ในการพิจารณาปริมาณกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกส์จะพิจารณาปริมาณกระแสและแรงดันฮาร์โมนิกส์แต่ละลำดับและค่ากระแสและแรงดันฮาร์โมนิกส์รวม
2. พิจารณาการเกิดเรโซแนนซ์ในสถานีไฟฟ้า เนื่องจากมีการใช้ชุดตัวเก็บประจุ โดยพิจารณาถึงอันดับของฮาร์โมนิกส์ที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์และพิจารณาถึงผลกระทบต่อชุดตัวเก็บประจุ

2.3 การวิเคราะห์ทางเลือกในการกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ โดย นิติ วันทอง และคณะในปี2551[8] กล่าวถึงการใช้งานชุดตัวเก็บประจุเพื่อกำจัดผลกระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบ ถึงจะมีการใช้งานร่วมกับตัวกรองชนิดดีจูนก็ตาม ชุดตัวเก็บประจุไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากเกิดการขยายของกระแสฮาร์มอนิกส์ในย่านความถี่ฮาร์มอนิกส์ที่มีกระแสฮาร์มอนิกส์อยู่ทำให้กระแส rms มีค่าสูงกว่า 130% ของค่ากระแสพิกัดของตัวเก็บประจุ สำหรับตัวกรองชนิดดีจูนสามารถที่จะใช้งานได้แต่ช่วยแก้ปัญหาทางด้านแรงดัน THD ที่بسแรงต่ำ 400 V ได้น้อย เนื่องจากตัวกรองชนิดดีจูนช่วยแก้ปัญหาฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 5 เท่านั้น ตัวกรองที่ดีสำหรับงานวิจัย คือตัวกรองชนิดแพสซีฟแบบเดี่ยวช่วยแก้ปัญหาได้ดีที่สุดเมื่อมีกระแสฮาร์มอนิกส์ปริมาณมากๆ คือการใช้ตัวกรองแบบนี้หลายอัน ทั้งนี้ต้องพิจารณาถึงอันดับฮาร์มอนิกส์ที่จะทำการกรองและขนาดพิกัดของชุดตัวเก็บประจุชนิดนั้นด้วย งานวิจัยนี้พบว่าระบบที่มีโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (Non Linear Load) อย่างเดียวเมื่อใช้วงจรกรองจะทำให้เกิดความเสียหายมากกว่าระบบที่มีโหลดเป็นเชิงเส้น (Linear Load) ต่ออยู่ด้วย

2.4 การใช้งานฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเคลือบอยู่ในชุดตัวเก็บประจุและสาเหตุการพังทลายของชุดตัวเก็บประจุ โดย R. Gallay และคณะ. Metallized Film Capacitor Lifetime Evaluation and Failure Mode Analysis, 2558 [9] จากบทความด้านเทคโนโลยีเกี่ยวกับชุดตัวเก็บประจุ ระบุว่าความร้อนเป็นสาเหตุของการทำลายฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเคลือบอยู่ในชุดตัวเก็บประจุ เมื่อความเป็นฉนวนของฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์เสื่อมสภาพหรือถูกทำลายจากความร้อน จะเกิดการหลอมละลายของสาร polypropylene ซึ่งจะเห็นผ่านทางขดลวด ซึ่งความร้อนจะเหนี่ยวนำให้ค่าความเป็นฉนวนและค่ากระแสรั่วไหลลดลงและเกิดความดันสูงขึ้นภายในชุดตัวเก็บประจุผลที่ตามมาคือจะเกิดการไหม้หรือการระเบิดเกิดขึ้นได้ดังนั้นความร้อนจากกระแสฮาร์มอนิกส์ที่เพิ่มขึ้นจึงเป็นสาเหตุให้เกิดการสะสมความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดการระเบิดของชุดตัวเก็บประจุที่สถานีได้

จากผลการค้นคว้าบทความปริทัศน์ (literature Review) พบว่าผลกระทบต่อชุดตัวเก็บประจุ (Capacitor Bank) ที่สถานีไฟฟ้าระบบ 22 กิโลโวลต์ ที่ทำให้ชุดของตัวเก็บประจุระเบิดจะมีเรื่อง การปลด/สับสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าเนื่องจากทรานเซียนต์ การเกิดฮาร์มอนิกส์ขึ้นในระบบไฟฟ้า การเพิ่มขึ้นของโหลดฮาร์มอนิกส์ขนาดใหญ่ในระบบไฟฟ้า ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ผลการปลด/สับสวิตซ์ในช่วงเวลาทรานเซียนต์ โดยใช้โปรแกรม EMTP/ATP การระเบิด

เนื่องจากผลของฮาร์มอนิกส์โดยใช้โปรแกรม PQView และ DigSILENT PowerFactory และหาแนวทางในการป้องกันการระเบิดของชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าต่อไป

1.8 เนื้อหาของโครงร่างวิทยานิพนธ์

โครงร่างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเป็น 5 บท โดยมีเนื้อหา ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึง ที่มาและความสำคัญของปัญหาวัตถุประสงค์ขอบเขตวิทยานิพนธ์ขั้นตอนการศึกษา และวิธีดำเนินการ ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและเนื้อหาของโครงร่างวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึง ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง ความหมายและแหล่งกำเนิดของฮาร์มอนิกส์ การใช้งานชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้า

บทที่ 3 กล่าวถึง วิธีการดำเนินการการประยุกต์จำลองแบบวงจรสถานีไฟฟ้าในสถานะทรานเซียนต์ และฮาร์มอนิกส์รวมถึงการประยุกต์การใช้งานข้อมูลคุณภาพไฟฟ้าและการวิเคราะห์ข้อมูลคุณภาพไฟฟ้า

บทที่ 4 กล่าวถึง การวิเคราะห์สาเหตุปัญหาด้านทรายเซียนต์และด้านฮาร์มอนิกส์ ในระบบ 22 กิโลโวลต์ ในการจำลองแบบจากโปรแกรม EMT/ATP ,PQView และ DigSILENT PowerFactory รวมถึงการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์ในการจำลองแบบเมื่อมีโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเข้ามาในระบบไฟฟ้า

บทที่ 5 กล่าวถึง สรุปผลการศึกษา ข้อเสนอแนะ ข้อจำกัด

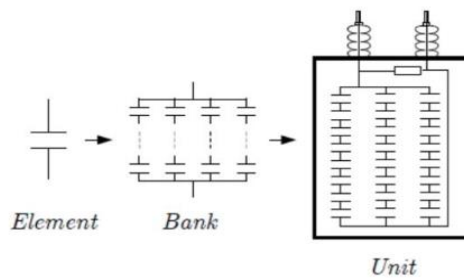
บทที่ 2

ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชุดตัวเก็บประจุ

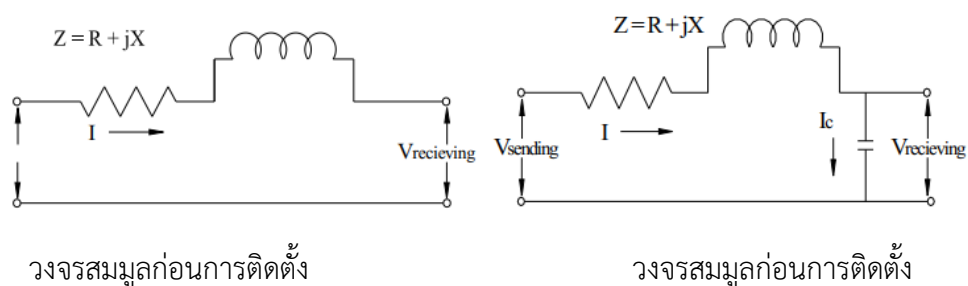
2.1.1 ความหมายของชุดตัวเก็บประจุ (Capacitor Bank)

ชุดตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์คาปาซิเตอร์ชนิดหนึ่งที่นำมาใช้งานทางไฟฟ้าโครงสร้าง โดยทั่วไปประกอบไปด้วยแผ่นโลหะบางๆสองแผ่นวางซ้อนทับกับฉนวนไดอิเล็กตริก ซึ่งในคาปาซิเตอร์หนึ่งตัวจะประกอบไปด้วยส่วนย่อยหลายๆส่วนมาต่อเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้ขนาดที่ต้องการโดยเทคโนโลยีในการผลิตคาปาซิเตอร์ที่นำมาใช้ในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นต้องทำให้คาปาซิเตอร์สามารถทนอยู่ในสภาวะที่มีความเครียดทางไฟฟ้าสูงได้ มีโครงสร้างดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 โครงสร้างพื้นฐานของชุดตัวเก็บประจุ

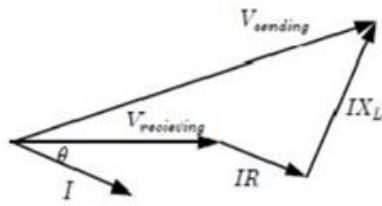
ซึ่งคาปาซิเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถช่วยชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในระบบไฟฟ้าในการติดตั้งคาปาซิเตอร์ นั้นต้องต่อขนานเข้าไปในระบบคาปาซิเตอร์ ที่ต่อขนานเข้าไปในระบบจะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของอินดักทีฟโหลดโดยทำให้กระแสมีเฟสหน้าหักล้างองค์ประกอบที่เฟสล่าช้าของกระแสอินดักทีฟโหลดในจุดที่มีการติดตั้งคาปาซิเตอร์จากหลักการข้างต้นสามารถแสดงภาพวงจรสมมูลก่อนและหลังติดตั้งคาปาซิเตอร์ในการสร้างแบบจำลอง Simulation จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองชุดตัวเก็บประจุ ซึ่งแบบจำลองหรือชุดตัวเก็บประจุเป็นดังรูปที่ 2-2



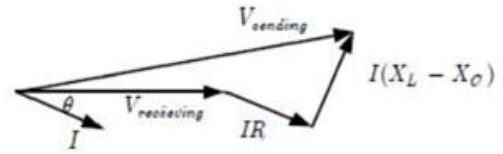
วงจรสมมูลก่อนการติดตั้ง

วงจรสมมูลก่อนการติดตั้ง

รูปที่ 2-2 วงจรสมมูลก่อนติดตั้งคาปาซิเตอร์



ก.เวกเตอร์หลังการติดตั้ง



ข.เวกเตอร์หลังการติดตั้ง

รูปที่ 2-3 วงจรสมมูลหลังติดตั้งคาปาซิเตอร์

แรงดันตกที่เกิดขึ้นในสายป้อนในสภาวะก่อนและหลังติดตั้งคาปาซิเตอร์ แสดงได้ ตามสมการ

$$VD = I_R R + I_X X_L \quad (2.1)$$

$$VD = I_R R + I_X X_L - I_C X_C \quad (2.2)$$

เมื่อ

R	คือ	ความต้านทานของสายป้อน
X_L	คือ	ความต้านทานขดลวดของสายป้อน
X_C	คือ	ความต้านทานตัวเก็บประจุของสายป้อน
I_R	คือ	กระแสไหลผ่านส่วนที่เป็นความต้านทาน
I_L	คือ	กระแสไหลผ่านส่วนที่เป็นความต้านทานขดลวด
I_C	คือ	กระแสไหลผ่านส่วนที่เป็นความต้านทานตัวเก็บประจุ

2.1.2 ชนิดของคาปาซิเตอร์

คาปาซิเตอร์ที่นำไปติดตั้งเพื่อลดกำลังสูญเสียในระบบไฟฟ้ากำลังนั้นมี 2 ชนิดให้เลือกใช้งานตามความเหมาะสม คือคาปาซิเตอร์แบบคงที่และคาปาซิเตอร์แบบปรับค่าสามารถอธิบายลักษณะของคาปาซิเตอร์ทั้ง 2 ชนิดได้ ดังนี้

1.คาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) เป็นคาปาซิเตอร์ที่เมื่อติดตั้งเข้าไปในระบบแล้วจะจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเข้าสู่ระบบตลอดเวลาโดยไม่สามารถทำการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟได้ ไม่สามารถปรับตั้งค่าของคาปาซิเตอร์ได้เนื่องจากเป็นค่าที่ได้จากการผลิตที่โรงงานตั้งแต่แรก



รูปที่ 2-4 คาปาซิเตอร์แบบคงที่

2. คาปาซิเตอร์แบบปรับค่า (Switched Capacitor) เป็นคาปาซิเตอร์ที่เมื่อติดตั้งเข้าไปในระบบแล้วสามารถปรับค่าการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้โดยการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟนั้นมีหลายวิธีให้เลือก เช่น การควบคุมด้วยกระแสหรือแรงดันที่จุดติดตั้ง การควบคุมแรงดัน เป็นต้น เนื่องจากคาปาซิเตอร์แบบคงที่ที่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบตลอดเวลา นั้น เวลาพิจารณาเลือกคาปาซิเตอร์ชนิดนี้ไปใช้งานต้องคำนึงถึงช่วงเวลาที่มีการใช้โหลดน้อยอาจทำให้เกิดแรงดันเกินที่จุดติดตั้งได้



รูปที่ 2-5 Switched Capacitor คาปาซิเตอร์

จากปัญหาของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ผ่านมาพบว่าการระเบิดของชุดตัวเก็บประจุ (Capacitor Bank) แบบ Switched Capacitor ซึ่งรายละเอียดจะได้ทำการศึกษาอย่างบทถัดไป

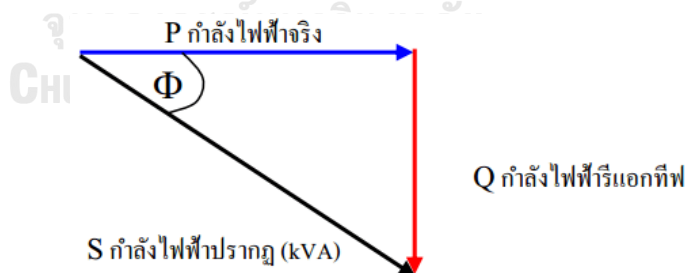
2.1.3 การปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

สำหรับชุดตัวเก็บประจุ (Capacitor Bank) ที่สถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเป็นแบบ Switched Capacitor มีหน้าที่ในการปรับปรุงตัวประกอบไฟฟ้ากำลัง (Power Factor) ซึ่งหลักการปรับปรุงตัวประกอบไฟฟ้ากำลัง มีดังนี้

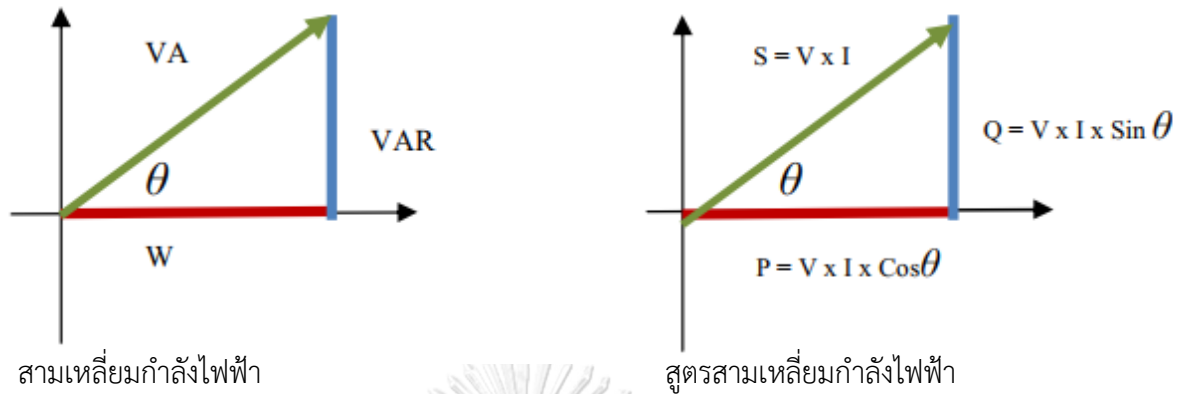
กำลังไฟฟ้าจริงหรือกำลังไฟฟ้าแอกทีฟ (Real Power,P) คือ กำลังไฟฟ้าที่ถูกเปลี่ยนให้ เป็นกำลังงานในรูปแบบต่างๆ เช่น เตาหลอมโลหะ เป็นการเปลี่ยนกำลังงานไฟฟ้าเป็นกำลังงานความร้อน หรือ มอเตอร์ เป็นการเปลี่ยนกำลังงานไฟฟ้าเป็นกำลังงานกล เป็นต้นนี้คือกำลังงานเฉลี่ยมีกำลังชนิดหน่วยเป็นวัตต์ (W)

กำลังไฟฟ้าเสมือนหรือกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (ReactivePower,Q) คือ กำลังงานไฟฟ้าที่ถูกเปลี่ยนให้ เป็น พลังงานรูปอื่นชั่วคราวโดยจะถูกเก็บรักษาไว้ ภายในตัวเก็บพลังงานไฟฟ้าเพียงครึ่งวัฏจักร (half cycle) และจะส่งพลังงานกลับไปยังแหล่งจ่ายเปลี่ยนไปเป็นพลังงานอีกครั้งในครึ่งวัฏจักร กำลังชนิดนี้วัดได้ จากวาร์ มิเตอร์ (Var)มีหน่วยเป็นหน่วยใหญ่จะเป็นkVarและ MVar

กำลังปรากฏ (Apparent power,S) คือ กำลังไฟฟ้ารวมตามปกติใช้เป็นค่าบอกความสามารถในการรับกำลังงานของโหลดหรือการจ่ายกำลังงานของแหล่งจ่ายกำลังชนิดนี้หาได้ จากผลคูณของแรงดัน(V)ที่ ตกคร่อมอุปกรณ์ และกระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์ นั้นๆ จึงมีหน่วยเป็นโวลต์แอมแปร์ (VA)ถ้าหน่วย ใหญ่ ๆจะเป็นkVA และ MVA



รูปที่ 2-6 วัฏจักรกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 2-7 สมการคำนวณกำลังไฟฟ้าและสามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้า

จากสามเหลี่ยมกำลังไฟฟ้าในรูปที่ จะได้ ความสัมพันธ์ ทางตรีโกณมิติต่าง ๆ ดังนี้

$$\text{ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor, P.F.)} \quad \cos \theta = \frac{P}{S} \quad (2.3)$$

$$\sin \theta = \frac{Q}{S} \quad (2.4)$$

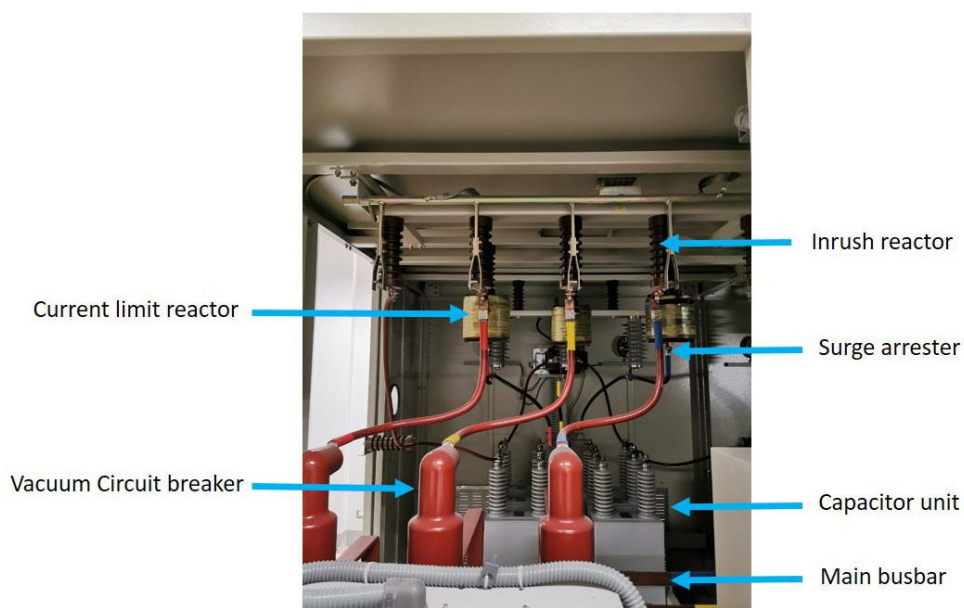
$$\tan \theta = \frac{Q}{P} \quad (2.5)$$

ค่านี้จะเป็นตัวบอกถึงประสิทธิภาพการใช้งานของระบบไฟฟ้าตัวหนึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 หรืออาจจะบอกอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ เพาเวอร์แฟคเตอร์ก็ได้ ถ้าค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ มีค่าใกล้ 1 หรือ 100%) จะหมายถึงระบบไฟฟ้ามีประสิทธิภาพดี แต่ถ้าค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ มีค่าใกล้ 0 หรือ 100%) จะหมายถึงระบบไฟฟ้ามีประสิทธิภาพต่ำ เมื่อพิจารณาจะพบว่าผู้ใช้จะได้ประโยชน์จากโหลด ในรูปของกำลังไฟฟ้าจริง (P) และจะต้องสำรองระบบไฟฟ้าในรูปของกำลังไฟฟ้าปรากฏ (S) รวมทั้ง จะต้องสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเสมือน (Q) ไปอีกส่วนหนึ่งเพื่อให้โหลดทำงานได้ ในกรณีที่โหลดต้องการ พลังงานไฟฟ้าเสมือน (Q) ในปริมาณมาก จะทำให้ผู้ใช้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการสำรองระบบไฟฟ้า (S) ในปริมาณมากขึ้น ขณะที่ได้ประโยชน์จากกำลังไฟฟ้าจริง (P) คงที่ นั่นคือ ระบบไฟฟ้านั้นจะมี ประสิทธิภาพต่ำนั่นเอง (ค่า P.F. มีค่าต่ำด้วย)

โดยปกติค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจะเป็นลักษณะล่าหลัง (Lagging power factor) เนื่องจากโหลดส่วนใหญ่ เป็นโหลดชนิดอินดักทีฟ การปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้นสามารถทำได้โดยการต่อโหลดชนิดคาปาซิทีฟ (Capacitive Load) เพิ่มเข้าไปในระบบเพื่อให้โหลดชนิดคาปาซิทีฟ (Capacitive Load) ช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนแทนแหล่งจ่าย เนื่องจากโหลดประเภทนี้มีคุณสมบัติในโหลดคาปาซิทีฟ (Capacitive Load) ที่สามารถใช้ในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ ก็คือ คาปาซิเตอร์กำลัง (Power Capacitor) และมอเตอร์ชนิดซิงโครนัส (Synchronous Motor) แต่เนื่องจากมอเตอร์ชนิดซิงโครนัสจะมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง จึงไม่เป็นที่นิยม ดังนั้นจะขอกล่าวถึงเฉพาะการนำคาปาซิเตอร์กำลังมาใช้ในการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่านั้น



2.1.4 ส่วนประกอบชุดตัวเก็บประจุแบบ (switch capacitor) ในสถานีไฟฟ้า มีดังนี้



รูปที่ 2-8 ส่วนประกอบชุดตัวเก็บประจุแบบ (switch capacitor) ในสถานีไฟฟ้า

- 1.Current limit Reactor เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ลดกระแสเมื่อเวลาสวิตซ์ซึ่ง
- 2.Vacum Circuit Breaker เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปิด/ปิดของวงจรไฟฟ้าชนิดสูญญากาศ โดยป้องกันไม่ให้อุปกรณ์ที่ต่อกับเซอร์กิตเบรกเกอร์นั้นเกิดความเสียหายจากกระแสเกินได้
- 3.Inrush Reactor ทำหน้าที่เป็นขดลวดช่วยลดกระแสกระชากขณะปลด/สับสวิตซ์ โดยจะจำกัดปริมาณกระแสที่ไหลผ่านก่อนเข้าสู่ชุดตัวเก็บประจุ
4. Surge Arestor เป็นอุปกรณ์ป้องกันที่สภาวะแรงดันเกินและกระแสเกิน โดยจะออกแบบให้เหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นในช่วงเวลาอันสั้นออกจากอุปกรณ์ โดยให้แรงดันไหลผ่านความต้านทานต่ำไปยังสายดิน
- 5.ชุดตัวเก็บประจุ (Capacitor Bank) ทำหน้าที่ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในสถานีไฟฟ้า
- 6.Main Busbar เป็นแท่งโลหะตัวนำไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่างสายประธานกับสายป้อนบัสบาร์

2.1.5 ระบบการทำงานของชุดตัวเก็บประจุ (Capacitor Bank) ที่สถานีไฟฟ้าส่วนภูมิภาค มีดังนี้

1. ระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automatic Control Mode) ควบคุมการทำงานโดยการเปรียบเทียบค่า Power Factor ของ Main Bus ที่ชุดตัวเก็บประจุนั้นต่ออยู่ในขณะนั้นว่ามีค่าใกล้เคียงกับที่กำหนดหรือไม่ ถ้าไม่ก็จะมีการสั่ง ON/OFF ในแต่ละสเต็ป (Step) โดยที่แต่ละสเต็ปมีค่า 2.4 MVar เพื่อให้มีค่าตามที่ต้องการ

2. ระบบควบคุมแบบ Manual (Remote Manual Mode) ควบคุมการทำงานค่า Power Factor ตามความต้องการ โดยสั่งการ ON/OFF ในแต่ละสเต็ป (Step) ผ่านระบบ

3. ระบบควบคุมแบบ Manual ที่ Local (Local Manual Mode) สามารถสั่งการควบคุมแบบ Manual ผ่านตัว PFR ที่อยู่ในตู้ Central Control โดยตั้งโหมดการควบคุมอยู่ใน Auto Mode โดยสั่งการ ON/OFF ในแต่ละสเต็ป (Step) ผ่านตัว PFR ได้ตามต้องการ

หมายเหตุ : การควบคุมแบบ Manual ที่ Local ยังสามารถทำงานผ่าน Mechanic ON/OFF push button

ด้านหน้า Vacuum Circuit Breaker ซึ่งโดยปกติแนะนำให้ใช้เฉพาะสั่ง OFF (ในกรณี Emergency Trip) เท่านั้น ไม่ควรกดสั่ง ON ที่นี้ เนื่องจากไม่มีระบบ Interlock ห้ามการสั่ง On อีกครั้งถ้ายังไม่ถึง 10 นาที (10 minutes time delay interlocking) เพื่อให้ Capacitor Bank มีการ discharge ประจุไฟฟ้าออกไปจนกว่าแรงดันไฟฟ้าตกค้างมีค่าตกลง จนไม่ก่อให้เกิดอันตรายเนื่องจาก Double charge เมื่อมีการสับเข้าระบบไฟฟ้าอีกครั้ง

มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

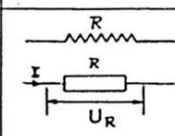
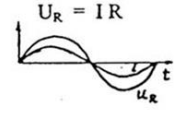
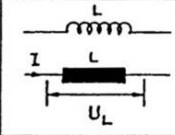
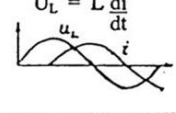

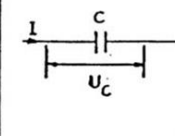
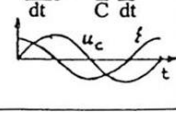

2.1.6 การควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

การควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแบบอัตโนมัติสามารถทำได้ โดยใช้เครื่องควบคุมเพาเวอร์แฟคเตอร์อัตโนมัติ (Automatic Power Factor Controller ; APFC) ติดตั้งที่ศูนย์กลางของโหลด หรือตู้คอนโทรลของคาปาซิเตอร์แบงก์ การควบคุมแบบนี้เหมาะสำหรับโหลดที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนไม่คงที่ ทำให้ต้องมีการสับ-ปลดคาปาซิเตอร์ตามความต้องการของโหลดอยู่ตลอดเวลา นิยมใช้กันมากเนื่องจากมีความสะดวกในการใช้งานควบคุมค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้อย่างแน่นอน โดยตัว APFC จะทำการตรวจสอบค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบไฟฟ้าผ่านทางหม้อ

แปลงกระแส และแรงดันไฟฟ้าของระบบ แล้วจึงส่งสัญญาณไปยังแมคเนติกคอนแทกเตอร์ที่ควบคุม คาปาซิเตอร์แต่ละชุดให้ทำงานตามที่ตั้งค่าไว้

การใช้ APFC ในการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้านั้น มีค่าที่ต้องปรับตั้งที่สำคัญ 2 ค่า คือ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ และค่าความไวในการทำงาน ค่าตัวประกอบกำลังที่เหมาะสม จะอยู่ระหว่าง 0.875 ถึง 1.0 ถ้าหลัง แต่เพื่อให้ใช้งานชุดควบคุมคาปาซิเตอร์ ให้ได้ประโยชน์สูงสุด ควรตั้งค่าใกล้ 1.0 มากที่สุด โดยทั่วไปจะปรับตั้งอยู่ที่ค่า 0.95 ถ้าหลัง ส่วนการปรับค่าความไวในการทำงานจะเป็นการปรับตั้งค่าความไวในการสั่งปลด-สับคาปาซิเตอร์เข้ากับระบบ ซึ่งเกิดจากการปรับตั้ง ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ต้องการแล้ว APFC จะส่งสัญญาณให้แมคเนติกคอนแทกเตอร์ สับหรือ ปลดคาปาซิเตอร์ เพื่อให้ได้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ตามที่ต้องการ เนื่องจากคาปาซิเตอร์ที่ติดตั้งในแต่ละ ขั้น (Step) จะให้กำลังไฟฟ้าเสมือนที่แน่นอนค่าหนึ่ง ดังนั้นเพาเวอร์แฟคเตอร์ที่ได้จริงจึงต้องมีความ คลาดเคลื่อนจากค่าที่ตั้งไว้ ถ้าช่วงความคลาดเคลื่อน APFC ก็จะมีส่งให้แมคเนติกคอนแทกเตอร์สับ หรือปลดคาปาซิเตอร์ เข้าออกอย่างต่อเนื่องเพื่อพยายามให้ได้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ตามที่ต้องการ

ตารางที่ 2-1 พารามิเตอร์ของวงจร

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	แรงดันตกคร่อม	พลังงานในพารามิเตอร์
ความต้านทาน R (Ω)		$U_R = I R$ 	$W_R = I^2 R$ สูญเสียกระจายไป
ความเหนี่ยวนำ L (H, mH, μ H)		$U_L = L \frac{di}{dt}$ 	$W_L = 1/2 L I^2$ เก็บในรูปแบบแม่เหล็ก 
ความจุไฟฟ้า C (ค่าเก็บประจุ) (F, μ F, pF)		$U_C = Q/C$ $= I / j\omega C$ $\frac{dU_C}{dt} = \frac{1}{C} \frac{Q}{dt}$ 	$W_C = 1/2 C U^2$ เก็บอยู่ในรูปสนามไฟฟ้า 

2.2 สาเหตุการระเบิดของคาปาซิเตอร์

2.2.1 ทรานเซียนตทางไฟฟ้า

ทรานเซียนตทางไฟฟ้า [10] คือ การเปลี่ยนแปลงคาทางแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะอย่างทันทีทันใดในวงจร เช่น การปิด/เปิดสวิตซ์ หรือการเกิดฟอลต์ (fault) ขึ้นในระบบช่วงเวลาการเกิดทรานเซียนตจะมีช่วงที่สั้นมากๆ และระยะเวลาสั้น ๆ ในช่วงเวลาของการเกิดทรานเซียนตจะมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะในช่วงเวลาสั้นๆ ดังนั้ องค์ประกอบต่างๆ ของวงจรจะได้รับความเครียด (stress) ทั้งทางไฟฟ้าและทางกลสูงมาก อันเป็นผลจากแรงดันหรือกระแสที่มีค่าสูงกว่าคาแรงดันระบบที่ใช้งาน

การเปลี่ยนแปลงจากสภาพปกติไปสู่ทรานเซียนตทางไฟฟ้าจะทำให้วงจรต้องมีการกระจายพลังงานปรับไปอยู่ในสภาวะใหม่ แต่การกระจายพลังงานใหม่นี้จะเกิดขึ้นทันทีทันใดไม่ได้ เนื่องจาก

1. ความเหนี่ยวนำ (L) สามารถเก็บพลังงานไว้ได้ในรูปแบบสนามแม่เหล็กคือ $\frac{1}{2}LI^2$ การเปลี่ยนแปลงใดๆ ในกระแสผ่านตัวเหนี่ยวนำจะสร้างการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ เป็นการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันคร่อมตัวเหนี่ยวนำนั้ กระแสจะเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดนั้นไม่ได้
2. ความจุไฟฟ้า (C) สามารถเก็บพลังงานได้ในรูปแบบสนามไฟฟ้าคือ $\frac{1}{2}CU^2$ จากความสัมพันธ์ $U = QC$ จะเห็นได้ว่าจะมีแรงดันคร่อม C ก็ต่อเมื่อมีประจุไฟฟ้าก่อน นั้นคือ แรงดันคร่อมความจุไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงโดยทันทีทันใดไม่ได้
3. ความต้านทาน (R) เป็นพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดพลังงานสูญเสียคือ IR^2 เป็นตัวชี้วัดของความยากลำบากในการที่จะผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในตัวนั้

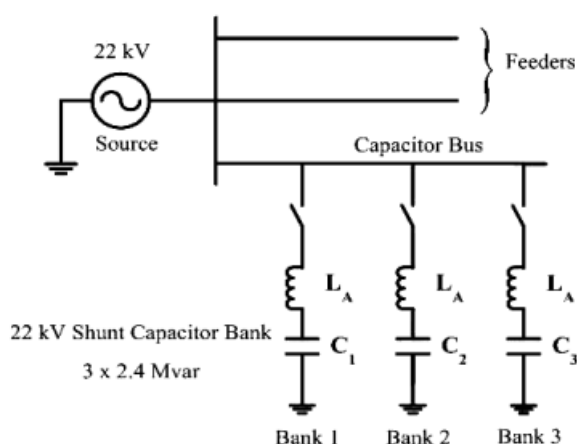
2.2.1.1 แรงดันเกินสวิตซ์

แรงดันเกินสวิตซ์ [10] จัดเป็นแรงดันเสิร์จหรือทรานเซียนต ที่เกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ตัดต่อวงจรตามทีผู้ปฏิบัติงานเป็นผู้กระทำ หรือเกิดจากการทำงานของสวิตซ์ตัดตอนโดยอัตโนมัติ เช่น เซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อขจัดการผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบ เป็นต้น แรงดันเกินสวิตซ์มีขนาดต่ำกว่าแรงดันเกินฟาส คือ มีโอกาสเกิดสูงประมาณ 4 เทา ของคายอดแรงดันเฟสของระบบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของระบบกำลังไฟฟ้าลัดวงจร ลักษณะสมบัติของอุปกรณ์และโหลด

ของวงจรที่สวิตชหรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ต้องตัดต่อแรงดันเสิร์จหรือทรานเซียนตเกิดจากการเปลี่ยนแปลงคาทางไฟฟ้าอย่างกะทันหันรวดเร็วและมีช่วงระยะเวลาการเกิดอยู่สั้นมากเมื่อเทียบกับสภาพเวลาทำงานปกติ ค่าไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวที่สำคัญก็คือ แรงดันและกระแส ซึ่งคาทรานเซียนตที่เกิดขึ้นทั้งสองจะมีค่าสูงเกินกว่าค่าปกติหลายเท่าตัว เปนแรงดันเกิน Δu หรือกระแสเกิน Δi เมื่อเกิดอย่างหนึ่ง(Δu , Δi) จะทำให้อีกอย่างหนึ่งเกิดตามมา (Δu , Δi) แมวาชวงงการเกิดจะสั้นมาก แต่ก็มีคววมหมยและสำคัญมาก เพราะการฉนวนและองคประกอบในระบบจะได้รับความเครียดสนามไฟฟ้า (E) และกระแสสูงมาก ซึ่งจะยังผลให้เกิดคววมเสียหายได้แรงดันเกินสวิตซึ่งมีหลกหลายรูปแบบ เช่น แรงดันเกินจากการสับสวิตชบนสายส่ง แรงดันเกินจากสวิตชตัดวงจรถึงเกิดการผิตพรองแรงดันเกินจากสวิตชตัดวงจรถึงกระแส (Current chopping) แรงดันเกินเนื่องจากการสับและปลดชุดตัวเก็บประจุ เปนต้น ในการวิเคราะห์ผลจากแรงดันเกินสวิตซึ่ง ที่มีผลกระทบตอชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อยนี้ จะ กลวถึงแรงดันเกินเนื่องจากการสับและปลดชุดตัวเก็บประจุ ซึ่งสามารถเปนนอกเปน 2 กรณี คือ

2.2.1.2 การสับสวิตชชุดตัวเก็บประจุ

การสับสวิตชชุดตัวเก็บประจุจะพิจารณาตามจำนวนชุดตัวเก็บประจุที่จะทำการสับสวิตชพิจารณารูปที่ 2-9 เปนแผนภาพเสนเดียว (Single Line Diagram) ของชุดตัวเก็บประจุ ขนาด 2.4 Mvar จำนวน 3 ชุดเมื่อมีการติดตั้งอยู่ในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟาสวนภูมิภาคเพื่อใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังในระบบ 22 กิโลโวลต์

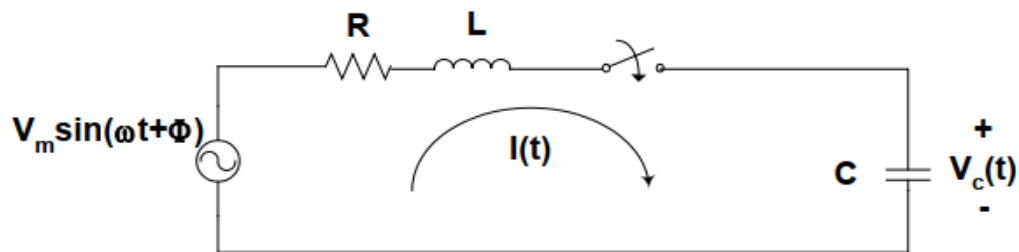


รูปที่ 2-9 แผนภาพแสดงชุดตัวเก็บประจุที่ติดตั้งในสถานีไฟฟ้า

โดยแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

2.2.1.2.1 การสับสวิตชชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว (Isolated bank)

เป็นการสับสวิตชชุดตัวเก็บประจุเพียงชุดเดียวหรือสับสวิตชชุดตัวเก็บประจุชุดแรก เมื่อทำการสับสวิตชจะทำให้แรงดันที่ตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเพื่อให้เท่ากับแรงดันของแหล่งจ่าย การทำเช่นนี้ทำให้เกิดการพุ่งเกิน (overshoot) เทียบเท่ากับขนาดของแรงดันที่เปลี่ยนแปลงโดยแรงดันและกระแสเกินสวิตชิ่งที่เกิดขึ้นจะมีขนาดและความถี่สูง [11],[12] ซึ่งสามารถคำนวณหาสมการแรงดันและกระแสเกินสวิตชิ่งได้ดังนี้

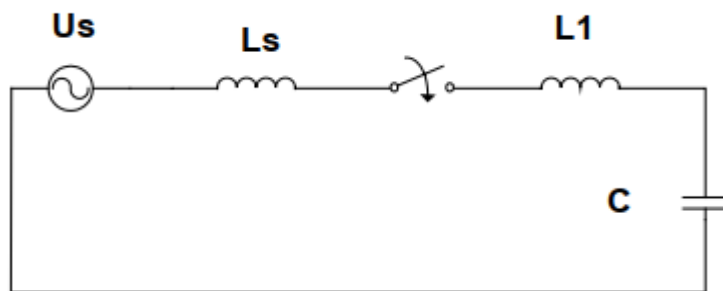


รูปที่ 2-10 วงจรสมมูลชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว

จากรูปที่ 2.10 สามารถหาสมการของวงจรสมมูลชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยวได้ ดังนี้

$$iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt + V_c(0) = V_m \sin(\omega t + \phi) \quad (2.6)$$

กำหนดให้สวิตชิ่งวงจรที่เวลา $t=0$ สามารถหาค่ากระแสพุ่งเขาและความถี่โดยไม่พิจารณา ค่าความต้านทานในระบบได้จากมาตรฐาน ANSI/IEEE C37.012-1979 [13] และ IEC 60871-1 [14]



รูปที่ 2-11 วงจรสมมูลชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว (ไม่พิจารณาค่าความต้านทาน)

จากรูปที่ 2-11 สามารถหากระแสพุ่งเขาและความถี่ได้ดังนี้

จากมาตรฐาน ANSI/IEEE C37.012-1979

$$I_{max} = 1.41\sqrt{I_{sc} \times I_1} \quad \text{หรือ} \quad \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \text{ kV}_{LL} \times 10^3 \frac{\sqrt{C}}{\sqrt{L_T}} \quad (2.7)$$

$$f = f_s \sqrt{\frac{I_{sc}}{I_1}} \quad \text{หรือ} \quad \frac{10^6}{2\pi\sqrt{L_T \times C}} \quad (2.8)$$

เมื่อ

I_{max}	คือ	คายอดของกระแสพุ่งเขา (A)
f	คือ	ความถี่ของกระแสพุ่งเขา (Hz)
f_s	คือ	ความถี่ของระบบ (Hz)
I_1	คือ	กระแสของชุดตัวเก็บประจุที่จะสับสวิตช์ (A, rms)
I_{sc}	คือ	กระแสลัดวงจร (A)
kV_{LL}	คือ	แรงดันระหว่างสาย (kV)
C	คือ	ความจุไฟฟ้าของชุดตัวเก็บประจุ (μF)
L_s	คือ	ความเหนี่ยวนำของแหล่งกำเนิด (μH)
L_1	คือ	ความเหนี่ยวนำจากบัสถึงชุดตัวเก็บประจุ (μH)
L_T	คือ	$L_s + L_1$ (μH)

จากมาตรฐาน IEC 60871-1

$$I_s \approx I_N \sqrt{2S/Q} \quad (2.9)$$

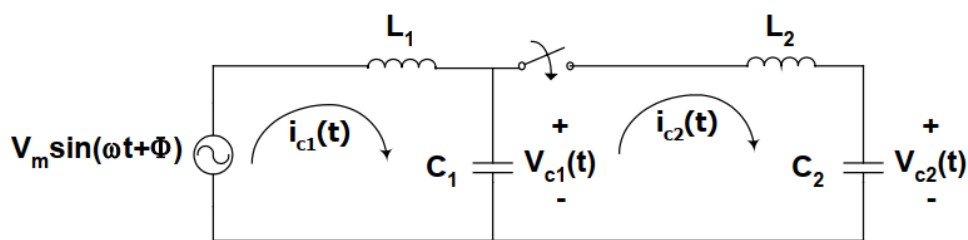
เมื่อ

I_s	คือ	คายอดของกระแสพุ่งเขา (A)
I_N	คือ	กระแสของชุดตัวเก็บประจุที่จะสับสวิตช์ (A, rms)

S	คือ	กำลังลัดวงจร (MVA)
Q	คือ	กำลังรีแอกทีฟของชุดตัวเก็บประจุ (Mvar)

2.2.1.2.2 การสับสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุแบบ Back-to-Back

การสับสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุแบบนี้เกิดเนื่องจากการสับสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุในขณะที่มีชุดตัวเก็บประจุอื่นต่ออยู่ ซึ่งโดยปกติสถานะไฟฟ้ามักจะมีการแบ่งชุดตัวเก็บประจุออกเป็นหลาย ๆ ชุด เพื่อความสะดวกในการควบคุมแรงดันหรือแก้ไขตัวประกอบกำลัง (power factor) โดยการสับชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 2 หรือ 3 อาจทำให้เกิดแรงดันและกระแสเกินสวิตซ์ซึ่งมากกว่าในกรณีสับชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว [11, 12] โดยสามารถคำนวณหาค่าแรงดันที่ตัวเก็บประจุ C1 และ C2 โดยไม่พิจารณาค่าความต้านทานได้ดังนี้



รูปที่ 2-12 วงจรสมมูลชุดตัวเก็บประจุแบบ Back to Back

หรือสามารถหาค่ากระแสพุ่งเขาและความถี่โดยไม่พิจารณาค่าความต้านทานในระบบได้จากมาตรฐาน ANSI/IEEE C37.012-1979 และ IEC 60871-1 ดังสมการ (2.14) ถึง (2.16) จากมาตรฐาน ANSI/IEEE C37.012-1979

$$I_{max} = 1.917 \sqrt{\frac{kV_{LL}(I_1)(I_2)}{L_{eq}(I_1+I_2)}} \quad (2.10)$$

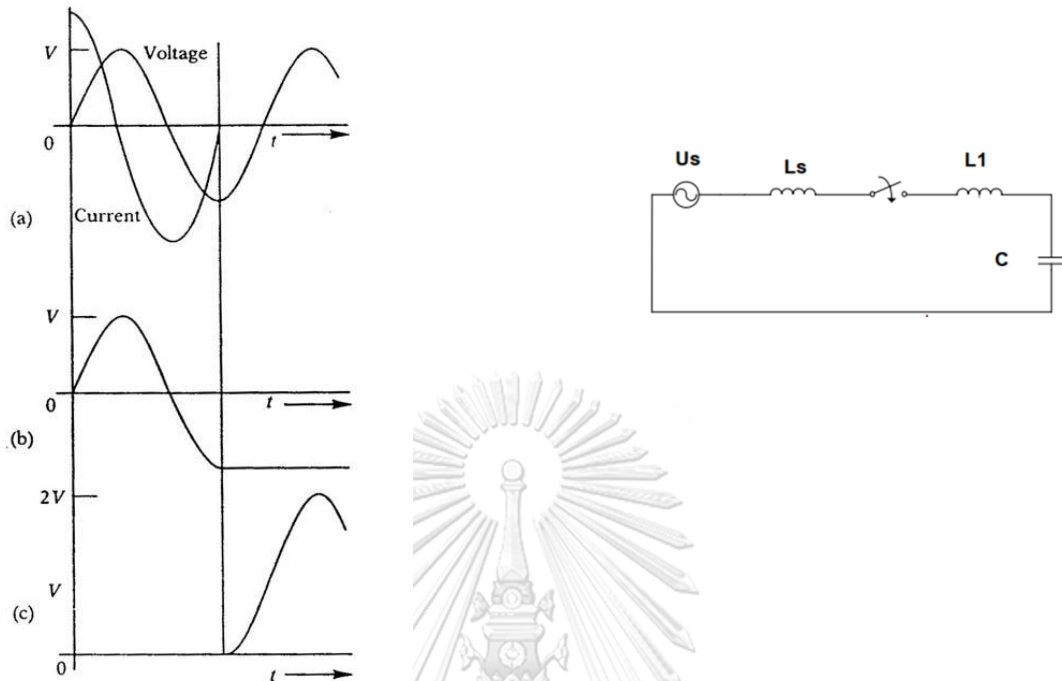
$$f = 9.5 \sqrt{\frac{f_s x kV_{LL}(I_1+I_2)}{L_{eq} x (I_1)(I_2)}} \quad (2.11)$$

เมื่อ		
I_{max}	คือ	คายอดของกระแสฟองเขา (A)
f	คือ	ความถี่ของกระแสฟองเขา (kHz)
f_s	คือ	ความถี่ของระบบ (Hz)
kV_{LL}	คือ	แรงดันระหว่างสาย (kV)
I_1	คือ	กระแสของชุดตัวเก็บประจุที่จะสับสวิตช (A, rms)
I_2	คือ	กระแสของชุดตัวเก็บประจุที่สับสวิตชแล้ว (A, rms)
L_{eq}	คือ	ความเหนี่ยวนำรวมระหว่างชุดตัวเก็บประจุ (μH)

$$I_s = \frac{U\sqrt{2}}{X_C X_L} \quad \text{โดย } X_C = 3U^2 \left(\frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2} \right) \times 10^{-6} \quad (2.12)$$

เมื่อ		
I_s	คือ	คายอดของกระแสฟองเขา (A)
U	คือ	แรงดันเฟส (V)
X_C	คือ	อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุต่อเฟส (Ω)
X_L	คือ	อิมพีแดนซ์ของความเหนี่ยวนำต่อเฟส (Ω)
Q_1	คือ	กำลังรีแอกทีฟของชุดตัวเก็บประจุที่จะสับสวิตช (Mvar)
Q_2	คือ	ผลรวมของกำลังรีแอกทีฟชุดตัวเก็บประจุที่สับสวิตชแล้ว (Mvar)

2.2.1.2.3 การปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ



- (a) แรงดันและกระแสของระบบ
 (b) แรงดันตกคร่อมชุดตัวเก็บประจุ
 (c) แรงดันตกคร่อมสวิตช์

รูปที่ 2-13 วงจรสมมูลการปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ

โดยปกติแล้วการปลดสวิตช์ของชุดตัวเก็บประจุจะทำในขณะที่กระแสเป็นศูนย์ ซึ่งในขณะนั้นแรงดันที่ชุดตัวเก็บประจุมีค่าเท่าแรงดันคายอด (V_p) และเมื่อเวลาผ่านไปครึ่งรอบหลังการปลดสวิตช์ แรงดันของระบบจะเป็นคายอดแรงดันอีกครั้งแต่จะกลับขั้วกับแรงดันที่ชุดตัวเก็บประจุทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่หน้าสัมผัสของสวิตช์มีความตาศักย์ถึง $2 V_p$ หากค่าแรงดันตกคร่อมหน้าสัมผัสที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมีค่ามากกว่าค่าความคงทนไดของไดอิเล็กตริก (dielectric strength) จะทำให้เกิดการเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซที่อยู่ระหว่างหน้าสัมผัสและนำไปสู่การเกิดการอาร์กเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าอาร์กซ้ำ เมื่อเกิดการอาร์กซ้ำจะเกิดการออสซิลเลชันระหว่างตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุ โดยมีสมการที่อธิบายปรากฏการณ์นี้ได้ดังนี้ [15],[16]

$$V_p \sin(\omega t) = L \frac{di}{dt} + V_c \quad (2.13)$$

การออสซิลเลชันของวงจร LC ที่เกิดขึ้นจะเป็นความถี่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับความถี่ของระบบ ดังนั้น

$$V_c(t) = V_p - [V_p - V_c(0)] \cos(\omega_0 t) \quad (2.14)$$

เมื่อ

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.15)$$

จากนั้นสามารถหากระแสเกินสวิตช์ซึ่งได้จากสมการ

$$I_c = C \frac{dv}{dt} \quad (2.16)$$

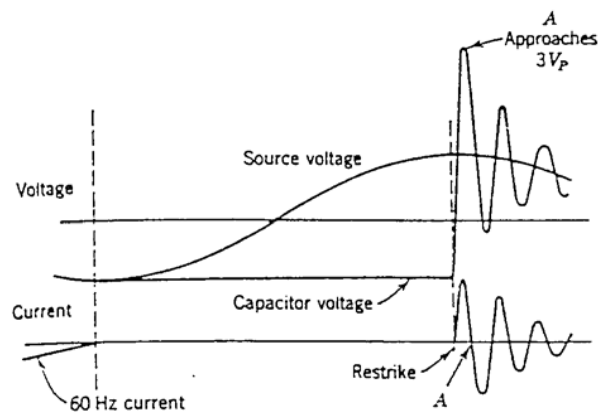
ได้กระแสเกินสวิตช์ซึ่งเนื่องจากเกิดการอาร์กซ้ำดังนี้

$$I_c(t) = [V_p - V_c(0)] \sqrt{\frac{C}{L}} \sin(\omega_0 t) \quad (2.17)$$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (2.18)$$

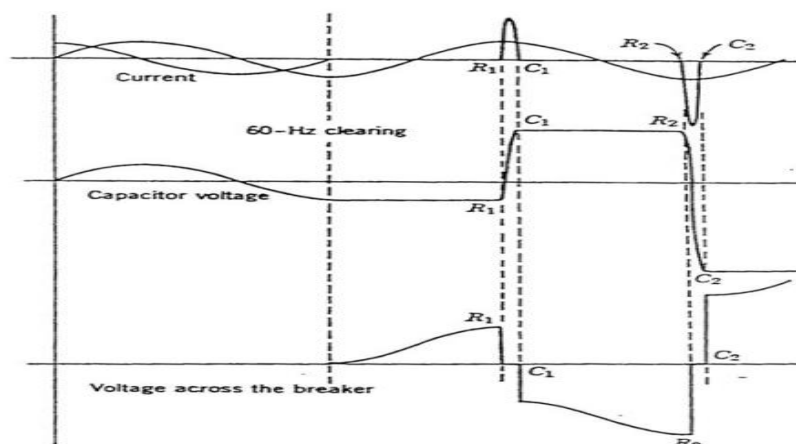
จากสมการ (2.18) พบว่าเมื่อเกิดการอาร์กซ้ำจะทำให้เกิดแรงดันเกินชั่วขณะมีค่าประมาณ $3V_p$ (ที่จุด A ในรูปที่ 2.14)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2-14 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเมื่อเกิดอาร์กที่แรงดันคายอด

ถ้าสวิตช์สามารถตัดการอาร์กเนื่องจากการเกิดอาร์กซ้ำเมื่อกระแสความถี่สูงผ่านศูนย์ได้ จะเกิดแรงดันคางที่ตัวเก็บประจุมีขนาดประมาณ 3 Vp และเมื่อแรงดันของแหล่งจ่ายเพิ่มจนมีแรงดันขนาดประมาณ 4 Vp ตกรวมสวิตช์ ซึ่งมีโอกาสเกิดอาร์กซ้ำได้สูงมาก หากมีการเกิดอาร์กซ้ำอีกครั้ง คากระแสเกินสวิตช์ซึ่งที่เกิดจะมีคาบสองเท่าของการเกิดอาร์กซ้ำครั้งแรก เพราะแรงดันตกรวมสวิตช์มีค่า $2 \times 2V_p = 4V_p$ และแรงดันที่ตัวเก็บประจุจะเปลี่ยนจาก +3 Vp เป็น -5 Vp และหากเหตุการณ์เช่นนี้เกิดซ้ำอีกก็จะทำให้แรงดันที่ตัวเก็บประจุเพิ่มขึ้นเป็น +7 Vp, -9 Vp จนกระทั่งเกิดการวูบไฟตามผิวของตัวเก็บประจุหรือ ตัวเก็บประจุเสียหายเนื่องจากแรงดันหรือกระแสเกิน ซึ่งจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า อาร์กซ้ำหลายครั้ง (multiple restrike) สำหรับการเกิดการอาร์กซ้ำจะสามารถนำไปใช้วิเคราะห์การระเบิดของชุดตัวเก็บประจุที่อยู่ในสถานีได้ตามมาตรฐาน IEEE ที่กล่าวในลำดับถัดไป



รูปที่ 2-15 แสดงรูปคลื่นแรงดันเนื่องจากการอาร์กซ้ำหลายครั้ง

2.2.2 ฮาร์โมนิกส์เรโซแนนซ์

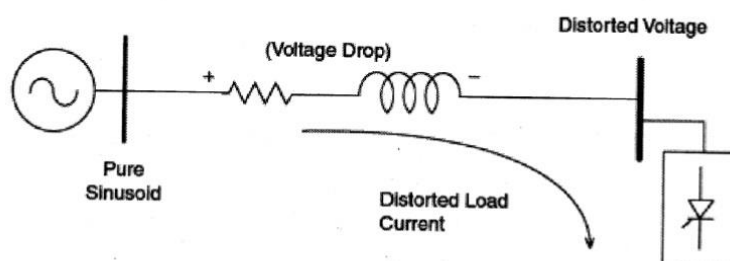
2.2.2.1 ทฤษฎีการเกิดฮาร์โมนิกส์ (Harmonic)

ฮาร์โมนิกส์ คือ รูปคลื่นไซน์แรงดันหรือกระแสที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่า และเป็นเลขจำนวนเต็มของความถี่มูลฐาน เช่น ความถี่มูลฐานทั่วไปคือ 50 หรือ 60 เฮิร์ตซ์ รูปคลื่นที่ผิดเพี้ยนนี้สามารถแยกออกเป็นผลรวมของความถี่มูลฐาน และความถี่ฮาร์โมนิกส์ได้ ทั้งนี้ ฮาร์โมนิกส์เกิดจากอุปกรณ์หรือโหลดแบบไม่เชิงเส้นในระบบไฟฟ้า ซึ่งความรุนแรงของฮาร์โมนิกส์ อธิบายได้โดยใช้สเปกตรัมฮาร์โมนิกส์ ซึ่งประกอบด้วยขนาด และมุมของฮาร์โมนิกส์แต่ละค่า โดยค่าที่นิยมใช้บอก

ระดับความรุนแรงของฮาร์มอนิกส์ คือ ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม (Total harmonic distortion; THD) ในบางกรณีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวม อาจทำให้เข้าใจสับสนได้ เช่น มอเตอร์ที่ปรับความเร็วรอบได้ อาจมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมสูงมาก ในขณะที่โหลดต่ำซึ่งไม่ได้สร้างความเสียหายให้กับระบบ เพราะกระแสโหลดมีค่าน้อยมาก ถึงแม้ว่าความผิดเพี้ยนจะมีค่าสูงก็ตาม ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดค่าที่ใช้อธิบายการผิดเพี้ยนรวมของฮาร์มอนิกส์เพิ่มขึ้นมาโดยมาตรฐาน IEEE Std. 519 ปี 2014 [17] ได้กำหนดค่าความผิดเพี้ยนรวม (Total demand distortion; TDD) ค่านี้คล้ายกับค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมแตกต่างกันที่การหาค่าเป็นเปอร์เซ็นต์จะใช้เทียบกับค่ากระแสพิคก์ของโหลด

ความผิดเพี้ยนของแรงดัน และกระแส จากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นเป็นแหล่งกำเนิดนั้นค่าของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่เข้าสู่ระบบไฟฟ้าจะทำให้การผิดเพี้ยนของแรงดันที่เกิดจากกระแสไหลผ่านโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้ความผิดเพี้ยนของแรงดันจะมีค่าขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ และกระแสที่ไหลผ่านการควบคุมฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นตามมาตรฐาน IEEE Std. 519 ปี 2014 สามารถทำได้ดังนี้

- 1) การควบคุมปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์ที่เข้าสู่ระบบไฟฟ้าที่เกิดจากโหลดของผู้ใช้ไฟ
- 2) กรณีฮาร์มอนิกส์อยู่ในข้อจำกัด การควบคุมจะกระทำโดยการไฟฟ้า



รูปที่ 2-16 กระแสไหลผ่านโหลดไม่เชิงเส้น

ฮาร์มอนิกส์กับสภาวะชั่วคราว เกิดจากการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าโดยการบันทึกเหตุการณ์ที่มีความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น และมีองค์ประกอบความถี่สูง ในบางครั้งเกิดความเข้าใจผิด และพิจารณาเป็นการเกิดฮาร์มอนิกส์ ซึ่งในความเป็นจริงเหตุการณ์นี้เป็นการเกิดสภาวะชั่วคราวของฮาร์มอนิกส์ และสภาวะชั่วคราวมีความแตกต่างกัน คือ สภาวะชั่วคราว มีรูปคลื่นที่มีความถี่สูงในช่วงเวลาสั้นและหลังจากที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใดในระบบไฟฟ้า โดยความถี่นี้ไม่จำเป็นต้องเป็นความถี่ฮาร์มอนิกส์ ทำ

ให้ไม่มีความสัมพันธ์กับความถี่มูลฐานของระบบ สภาวะชั่วคราวอาจเกิดจากการสวิตช์ของตัวเก็บประจุ ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงเวลา 2-3 รูปคลื่น

ผลของกระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดความร้อนและความเครียดไดอิเล็กตริก (Dielectric Stress) กับตัวคาปาซิเตอร์และอาจทำให้พิวส์ของตัวคาปาซิเตอร์ขาดง่ายกว่าการใช้งานปกติ ผลของแรงดันฮาร์มอนิกทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียใน คาปาซิเตอร์ และผลจากภาวะเรโซแนนซ์ที่ตัวคาปาซิเตอร์ทำให้เกิดขยายกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกขนาดใหญ่ตั้งนั้นเพื่อความปลอดภัยในการใช้งานของชุดตัวเก็บประจุสามารถทนต่อค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิกที่ชุดตัวเก็บประจุที่ออกแบบสร้างจากผู้ผลิตได้กำหนดตามมาตรฐาน IEEE Std. 18 ปี 2012 [18]

2.2.2.2 แรงดันและกระแสฮาร์มอนิก (Harmonic Voltage and Current)

2.2.2.2.1 กระแสฮาร์มอนิก (Harmonic Current)

กระแสฮาร์มอนิก เกิดจากฮาร์มอนิกที่อยู่ในรูปของกระแสในสายในระบบไฟฟ้าเกิดขึ้นจากอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งอาจเป็นโหลดหรือแหล่งกำเนิดก็ได้ ในอดีตที่ไม่มีการศึกษาฮาร์มอนิกอย่างจริงจัง เนื่องจากอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นมีจำนวนน้อยทำให้เกิดผลของฮาร์มอนิกต่อระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อย แต่ในปัจจุบันมีอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับเครื่องแปลงผัน (Converter) ได้ขยายตัวอย่างมากซึ่งก็เป็นผลให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกอย่างมากมายตามมาด้วยเช่นกัน

2.2.2.2.2 แรงดันฮาร์มอนิก (Harmonic Voltage)

แรงดันฮาร์มอนิก เกิดจากกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านค่ารีแอคแตนซ์ของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบ เช่น รีแอคแตนซ์ของแหล่งจ่ายสายส่งหรือรีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่ต่อเข้าไปในระบบ เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังและแรงดันไฟฟ้า ให้ดีขึ้นทำให้เกิดความเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันอันต่อเนื่องมาจากค่ารีแอคแตนซ์เปลี่ยนแปลงตามความถี่ส่วนค่าความต้านทานจะไม่เปลี่ยนแปลงกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบนั้นจะทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของแรงดันฮาร์มอนิก (Harmonic Voltage Distortion) ซึ่งเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$V_n = Z_n I_n \quad (2.19)$$

เมื่อ

V_n คือ แรงดันฮาร์มอนิกที่ลำดับ n

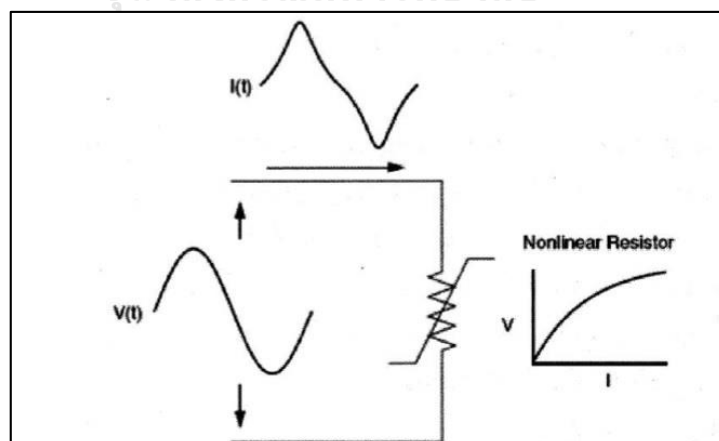
Z_n คือ ค่าอิมพีแดนซ์เนื่องจากกระแสอันดับที่ n

I_n คือ กระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ n

ถ้าในระบบไฟฟ้าใช้ตัวเก็บประจุต่อขนานเข้าไปในระบบเพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังจะทำให้มีอิทธิพลต่อระดับฮาร์โมนิกในระบบจำหน่ายตัวเก็บประจุ อาจเป็นตัวกำเนิดฮาร์โมนิกส์จากการต่อวงจรเข้าในระบบมีความจำเป็นที่จะทำให้เกิดเงื่อนไขความถี่รีโซแนนซ์แบบขนานระหว่างตัวเก็บประจุและรีแอคแตนซ์ของระบบ เมื่อพิจารณาเมื่อโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเป็นแหล่งจ่ายฮาร์โมนิกส์ ถ้ารีโซแนนซ์แบบขนานเกิดที่ความถี่เดียวกันหรือใกล้เคียงกับความถี่ฮาร์โมนิกส์ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นจะทำให้เกิดกระแสจำนวนมากไหลผ่านระหว่างรีแอคแตนซ์ของระบบและรีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุกระแสนี้กับกระแสฮาร์โมนิกส์ของโหลดไม่เป็นเชิงเส้นทำให้เกิดความเพี้ยนของแรงดันและกระแสมีค่ามากขึ้น

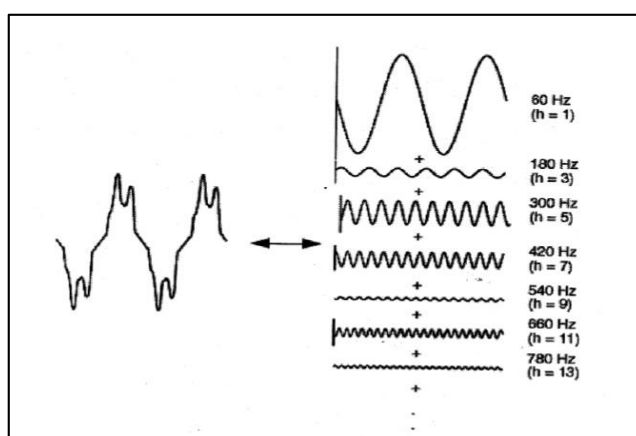
2.2.2.3 การผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ (Harmonics distortion)

การผิดเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ เกิดจากสาเหตุจากอุปกรณ์ที่ไม่เชิงเส้นในระบบ โดยอุปกรณ์ที่ไม่เชิงเส้นมีค่ากระแสไม่เป็นสัดส่วนกับแรงดัน เมื่อภายในระบบมีค่าเพิ่มเพียงเล็กน้อยกระแสจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากและมีรูปร่างที่ผิดเพี้ยนตามลักษณะของตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้เมื่อความถี่หลักมุลมีแรงดันฮาร์โมนิกส์ผสมเข้าไปจะมีผลทำให้แรงดันที่ความถี่หลักมุลเกิดความเพี้ยนขึ้น



รูปที่ 2-17 การผิดเพี้ยนของกระแสที่เกิดจากอุปกรณ์ไม่เชิงเส้น

รูปคลื่นที่มีการบิดเบี้ยวในลักษณะเป็นรายคาบ (Periodic) เกิดจากการรวมของรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ต่างๆ ในแต่ละความถี่มีค่าเป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่มูลฐาน โดยองค์ประกอบความถี่ที่เกิดขึ้นสามารถหาได้โดยการใช้ทฤษฎีอนุกรมฟูเรียร์ โดยปกติแล้วฮาร์มอนิกอันดับสูงที่มากกว่าอันดับที่ 25 ขึ้นไปจะไม่นำมาวิเคราะห์ แต่ฮาร์มอนิกอันดับสูงนั้นอาจจะรบกวนการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงต่ำได้



รูปที่ 2-18 การใช้ทฤษฎีอนุกรมฟูเรียร์วิเคราะห์รูปคลื่น

2.2.2.4 ขีดจำกัดของแรงดัน (Distortion limits)

ข้อจำกัดของแรงดันที่ถูกบิดเบือน (voltage distortion limit) ตามมาตรฐาน IEEE ฉบับที่ 519 ปี 2004 กล่าวถึงค่าของแรงดันที่ถูกบิดเบือนไว้ในตารางที่ 2.2 รูปคลื่นที่ถูกบิดเบือนจะถูกนิยามในรูปของ Total Harmonic distortion (THD)

ตารางที่ 2-2 ข้อจำกัดของแรงดันรวมที่ถูกบิดเบือน (THD) ตามมาตรฐาน IEEE ฉบับที่ 519 ปี 2014

Power system voltage level (kV)	Total voltage THD (%)
69 and below	5.0
Greater than 69 through 161	2.5
Greater than 161	1.5

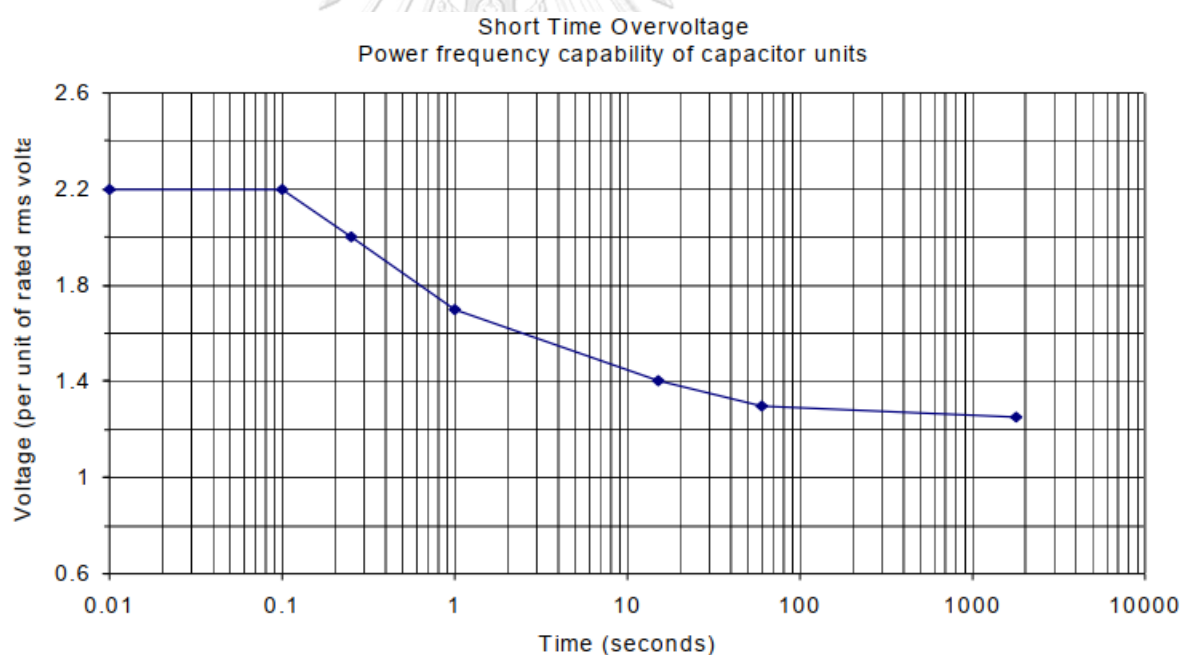
2.2.2.5 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับชุดตัวเก็บประจุ

IEEE เล่มที่ 18 ปี 2012 [18] กล่าวถึงขีดจำกัดของกระแส แรงดันและกำลังไฟฟ้าเสมือน ภายใต้สภาวะการทำงานเสถียร (Steady State) ชุดตัวเก็บประจุจะมีความสามารถการทำงานภายใต้

สภาวะฉุกเฉินของระบบ (Continuous Operation) ห้ามเกินข้อจำกัดของระบบ เพราะจะส่งผลกระทบให้ชุดเก็บประจุได้รับความเสียหายรุนแรงหรือเกิดระเบิดได้ มีดังนี้

1. แรงดันพิกัดค่าเฉลี่ยกำลังสอง (rated rms voltage) ห้ามเกิน 110%
2. แรงดันพิกัดสูงสุด (rated peak voltage) ห้ามเกิน 120%
3. กระแสน้อยสุดค่าเฉลี่ยกำลังสอง (nominal rms current) รวมถึงกระแสมูลฐานและกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละลำดับ (fundamental and harmonic currents) ห้ามเกิน 135%
4. พิกัดของกำลังไฟฟ้าเสมือน (rated kvar) ห้ามเกิน135%

ค่ากระแสเกินและแรงดันเกิน (Overcurrent and OverVoltage) ที่ชุดตัวเก็บประจุสามารถทนได้ตามมาตรฐาน IEEE Std. 1036 ปี 2012 [11] ค่าความสามารถทนได้ชุดตัวเก็บประจุกรณีที่เกิดค่ากระแสเกินและแรงดันเกินแบบชั่วขณะ (Momentary power frequency overcurrent and overvoltage)



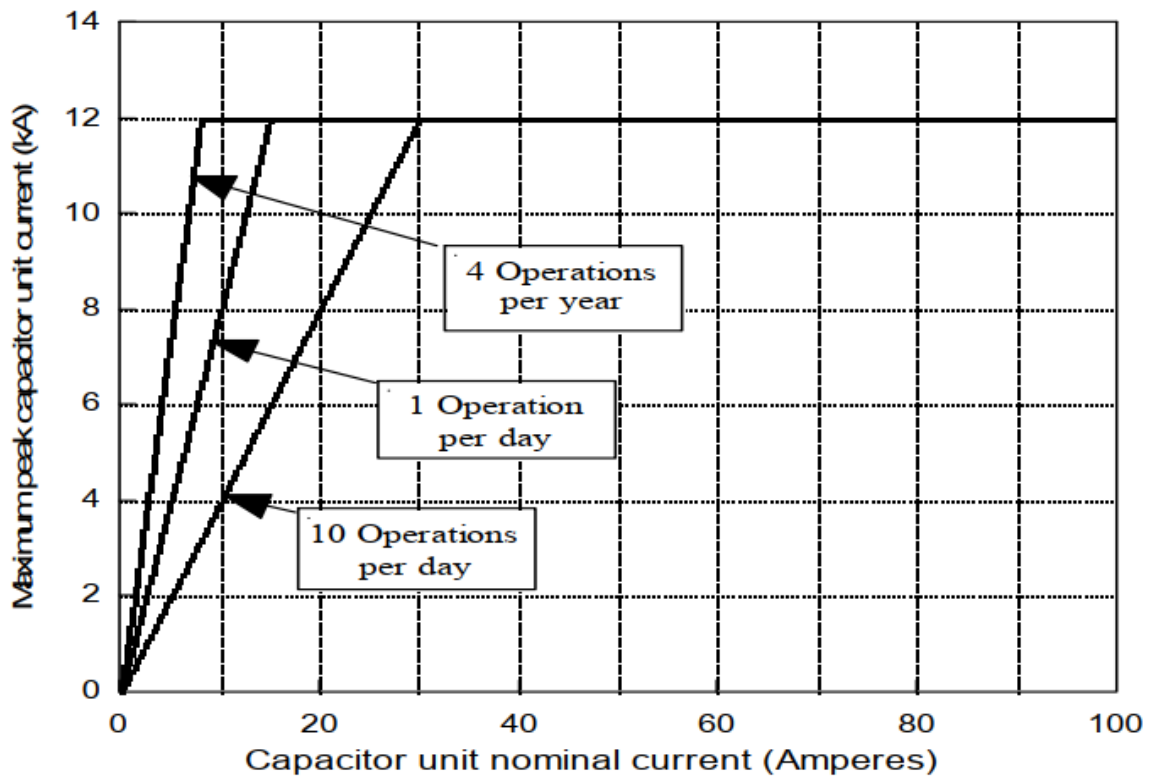
รูปที่ 2-19 ค่าความสามารถของชุดตัวเก็บประจุที่ทนแรงดันเกิน (Overvoltage) ภายใต้การทำงาน

แรงดันเกินเป็นสาเหตุให้เกิดการระเบิดของชุดตัวเก็บประจุหรือความสามารถในการเก็บประจุลดลงการสะสมของการเกิดแรงดันเกินแต่ละเหตุการณ์จะทำให้เกิดความรุนแรงขึ้นตามระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์แต่ละครั้ง เมื่อเกิดแรงดันเกินในแต่ละครั้งในชุดตัวเก็บประจุ จะมีการจำกัด

แก๊สที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ซึ่งจะถูกดูดซับโดยชุดกับดักแก๊ส ซึ่งเป็นการปรับปรุงค่าของสารไดอิเล็กตริกในตัวชุดเก็บประจุเมื่อเกิดเหตุการณ์แรงดันเกินแต่ละครั้ง

เวลาการเกิดที่อยู่ในรูปที่ 2-19 จะเป็นตัวกำหนดความเสียหายของชุดตัวเก็บประจุ เช่น การเกิดแรงดันเกินแบบต่อเนื่อง 2 ครั้งของเวลาที่ 1.73 เพอร์ยูนิตจะมีความรุนแรงกว่าการเกิดแบบแยกแต่ละเหตุการณ์ที่เวลา 1 วินาที เนื่องจากจะมีเวลาลดการระบายความร้อนและการดูดซับของแก๊สที่เกิดขึ้นในชุดตัวเก็บประจุ นอกจากนี้ระยะเวลาในการเกิดแรงดันเกินยังมีผลต่อความรุนแรง เช่นเมื่อเกิดแรงดันเกินที่ 1.73 เพอร์ยูนิตที่เวลา 0.1 วินาทีจะมีความรุนแรงน้อยกว่าเกิดแรงดันเกินที่ 1.73 เพอร์ยูนิตที่เวลา 1 วินาที (ไม่เกินเส้นกราฟ)

2.2.2.5.1 Transient overcurrent



รูปที่ 2-20 ค่าความสามารถการทนได้ของกระแสขณะเกิดทรานเซียนต์

ชุดตัวเก็บประจุจะสามารถทนต่อกระแสชั่วขณะ (transient current) โดยธรรมชาติ ภายใต้ระบบอยู่แล้ว รวมถึงการเกิดขึ้นที่ไม่บ่อยของกระแสเกิดฟอล์ตจากฟ้าผ่า (lighting current) และการคายกระแสของฟอล์ตใกล้เคียง เช่น การการเกิด back to back สวิตซ์ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดัน

เกินและกระแสกระชาก ซึ่งจะส่งผลต่ออายุของชุดตัวเก็บประจุ ค่ากระแสสูงสุดที่ชุดตัวเก็บประจุสามารถทนได้ควรจะต่ำกว่ากราฟในรูปที่ 2-20

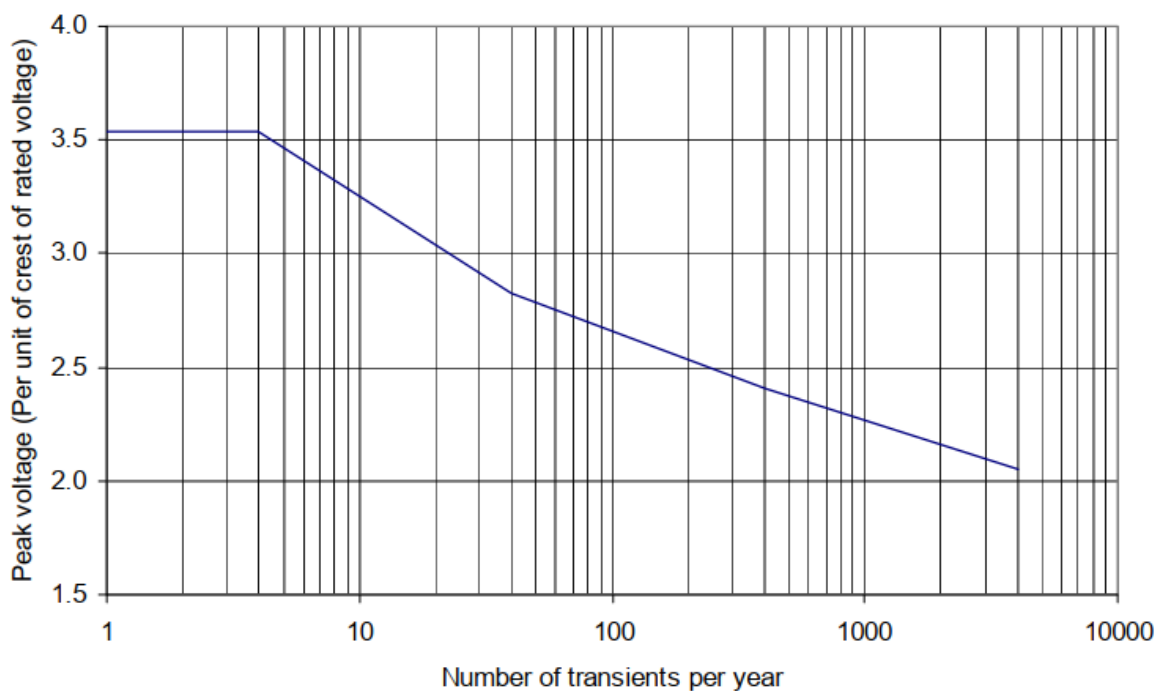
จากกราฟดังกล่าวค่ากระแสสูงสุดที่สามารถทนได้ คือ 12 kA โดยที่ความชันของกราฟแต่ละเส้น ได้แก่

- สามารถทนได้ 1,500 ครั้ง สำหรับการเกิดกระแสเกิน 4 ครั้งต่อปี
- สามารถทนได้ 800 ครั้ง สำหรับการเกิดกระแสเกิน 1 ครั้งต่อวัน
- สามารถทนได้ 400 ครั้ง สำหรับการเกิดกระแสเกิน 10 ครั้งต่อวัน

จะได้อยู่ยิ่งเกิดเกิดกระแสเกินมากขึ้นเท่าไร ความสามารถในการทนได้ของชุดตัวเก็บประจุยิ่งลดลงเท่านั้น

2.2.2.5.2 Transient overvoltage

ชุดตัวเก็บประจุจะสามารถทนต่อแรงดันเกินชั่วขณะ (transient overvoltage) ดังกราฟในรูปที่ 2-21



รูปที่ 2-21 ค่าความสามารถการทนได้ของแรงดันเกินขณะเกิดทรานเซียนต์ฮาร์โมนิกส์ที่มีผลต่อชุดตัวเก็บประจุ

ความรุนแรงของฮาร์โมนิกส์แรงดันและกระแสในระบบจะเพิ่มขึ้น เหตุผลหลักเนื่องจากการแพร่กระจายของอุปกรณ์ที่ผลิตฮาร์โมนิกส์ เช่น อุปกรณ์กำลัง solid-state เป็นต้น อุปกรณ์เหล่านี้มี

การใช้อย่างแพร่หลายจำพวกโรงงานอุตสาหกรรม,ธุรกิจการค้ารวมถึงบ้านเรือนที่อยู่อาศัยเพื่อใช้ในการควบคุมแรงดัน ควบคุมความเร็ว ความถี่และการเปลี่ยนถ่ายส่งผ่านพลังงาน ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะมีราคาถูก มีประสิทธิภาพสูงลดการซ่อมบำรุงได้ โดยชุดตัวเก็บประจุจะมีอิทธิพลต่อระดับฮาร์มอนิกส์ในการถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงระบบให้มีประสิทธิภาพ แม้ว่าชุดตัวเก็บประจุจะไม่ได้มีผลโดยตรงกับการสร้างฮาร์มอนิกส์ในระบบ แต่ก็มอิทธิพลกับขนาดของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งค่าที่เหมาะสมของฮาร์มอนิกส์ถูกระบุไว้ในมาตรฐาน IEEE ฉบับ 18 ปี 2012 [18] ดังหัวข้อที่ 2.2.2.4

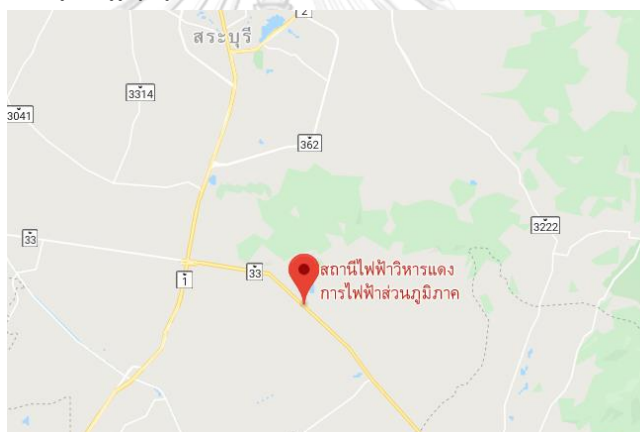


บทที่ 3

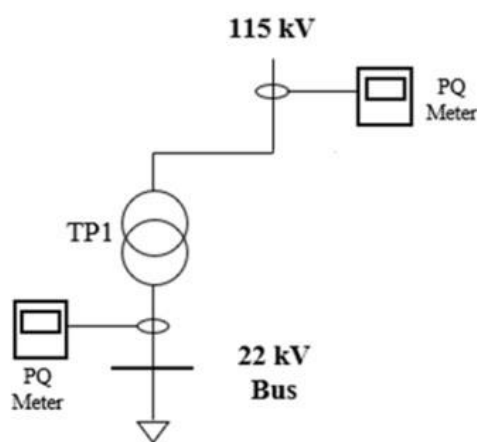
การดำเนินการจำลองแบบ

3.1 ข้อมูลพื้นฐานของสถานีไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลอง

การวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านคุณภาพไฟฟ้ายกตัวอย่างจากสถานีไฟฟ้าวิหารแดง จังหวัดสระบุรี ดังตัวอย่างด้านล่าง โดยมีเครื่องตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้าติดตั้งไว้ทั้งฝั่งแรงดันทางด้าน 115 กิโลโวลต์ และ 22 กิโลโวลต์ เพื่อตรวจวัดและเก็บข้อมูล การตรวจวัดทางด้าน TP1 จะถูกนำมาพิจารณาเพื่อใช้ในการศึกษาในบทนี้ โดยข้อมูลการตรวจวัดที่จะนำมาใช้ศึกษาคือ ข้อมูลในด้านแรงดัน 22 KV ซึ่งข้อมูลจากการตรวจวัดที่นำมาใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วงวันที่ 18 มกราคม 2562 เวลา 00.00 น. จนถึงวันที่ 18 กุมภาพันธ์ 2562 เวลา 00.00 น. ซึ่งเป็นการเก็บข้อมูลการตรวจวัดในทุกๆ 10 นาทีเป็นเวลาทั้งหมดจำนวน 30 วัน ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ ข้อมูลแรงดัน, กระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 1-19 , กิโลวัตต์ และกิโลวาร์



รูปที่ 3-22 ตัวอย่างแผนที่สถานีไฟฟ้าวิหารแดง จังหวัดสระบุรี



รูปที่ 3-23 แผนผังสถานีไฟฟ้าวิหารแดง จังหวัดสระบุรี

No.	Date/Time Event	V1 THD	V2 THD	V3 THD	V UNB%	FREQ	V1 Pst	V2 Pst	V3 Pst	V1 Pk	V2 Pk	V3 Pk	kW IMP SD	kvar IMP SD	kW EXP SD	kvar EXP SD	kVA SD
1	00:00.1 SP1	0.5	0.6	0.6	0.1	50.01	0.36	0.34	0.33	0.87	0.87	0.87	0	575	10703	68	10764
2	10:00.1 SP1	0.6	0.6	0.6	0.1	49.98	1.03	1.01	1.13	0.87	0.87	0.87	0	371	11690	317	11750
3	20:00.1 SP1	0.6	0.6	0.6	0.1	50.01	1.11	1.07	1.2	0.87	0.87	0.87	0	538	11898	240	11973
4	30:00.1 SP1	0.6	0.6	0.6	0.1	50.01	1.08	0.99	1.02	0.87	0.87	0.87	0	564	11924	241	11996
5	40:00.1 SP1	0.6	0.6	0.7	0.1	50.01	1.22	0.97	1.19	0.87	0.87	0.87	0	1645	10893	19	11114
6	50:00.1 SP1	0.6	0.6	0.6	0.1	50.01	0.81	0.6	0.68	0.87	0.87	0.87	0	1818	11623	5	11852
7	00:00.1 SP1	0.5	0.5	0.6	0.1	50.01	0.29	0.32	0.32	0.87	0.87	0.87	0	330	13711	167	13745
8	10:00.1 SP1	0.6	0.6	0.6	0.1	50.02	0.92	0.93	0.95	0.87	0.87	0.87	0	330	13711	167	13745
9	20:00.1 SP1	0.5	0.6	0.6	0.1	50.02	1.2	1.21	1.03	0.87	0.87	0.87	0	671	13533	311	13619
10	30:00.1 SP1	0.5	0.6	0.6	0.1	49.99	0.68	0.69	0.68	0.87	0.87	0.87	0	1486	11825	42	12015
11	40:00.1 SP1	0.6	0.6	0.7	0.1	50.01	1.17	1.08	1.17	0.87	0.87	0.87	0	608	13602	52	13649
12	50:00.1 SP1	0.6	0.6	0.7	0.1	50.02	1.06	1.01	0.94	0.87	0.87	0.87	0	2138	11928	4	12224
13	00:00.1 SP1	0.6	0.6	0.6	0.1	50.03	0.38	0.34	0.35	0.99	0.93	0.97	0	2138	11928	4	12224
14	10:00.1 SP1	0.6	0.6	0.7	0.2	50	1.18	1.13	1.08	0.99	0.93	0.97	0	1785	10124	0	10370
15	20:00.1 SP1	0.6	0.6	0.6	0.1	49.98	0.85	0.9	0.7	0.99	0.93	0.97	0	1785	10124	0	10370
16	30:00.1 SP1	0.6	0.6	0.6	0.1	50	0.85	0.9	0.7	0.99	0.93	0.97	0	814	12793	49	12870
17	40:00.1 SP1	0.6	0.6	0.6	0.1	50.02	1.24	1.07	1.1	0.99	0.93	0.97	0	1393	11022	1	11175
18	50:00.1 SP1	0.6	0.6	0.6	0.1	50.01	0.91	0.84	0.75	0.99	0.93	0.97	0	1427	11713	0	11867
19	00:00.1 SP1	0.6	0.6	0.6	0.1	50.01	1.14	0.98	0.66	0.99	0.93	0.97	0	2600	10417	4	10834

รูปที่ 3-24 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จาก PQ Meter ที่ติดตั้งที่สถานีไฟฟ้าวิหารแดง จังหวัดสระบุรี

ในการศึกษาเกี่ยวกับชุดตัวเก็บประจุในสถานีไฟฟ้า (Automatic Switching Capacitor Bank) ของสถานีไฟฟ้าระดับแรงดัน 22 กิโลโวลต์นี้ อุปกรณ์ชุดตัวเก็บประจุที่ใช้แบบของบริษัท NISSIN ตามแบบไฟฟ้าเลขที่ PEA-STD-22-001 สำหรับชุดตัวเก็บประจุที่ใช้ในสถานีย่อยของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งอุปกรณ์ชุดตัวเก็บประจุนี้ได้ผ่านการทดสอบตามมาตรฐานสำหรับอุปกรณ์สถานีไฟฟ้าและระบบควบคุมมาตรฐาน (Schematic Diagram) ภายในสถานี ข้อมูลดังตารางที่ 3


ตารางที่ 3-3 ชุดตัวเก็บประจุที่ใช้ในสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ลำดับ	รายชื่ออุปกรณ์	โรงงานที่ผลิต	Type/Model	แบบเลขที่
1	22 kV Automatic Switching Capacitor Bank	NISSIN	22 kV 3x2.4 Mvar	PEA-STD-22-001

จพาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

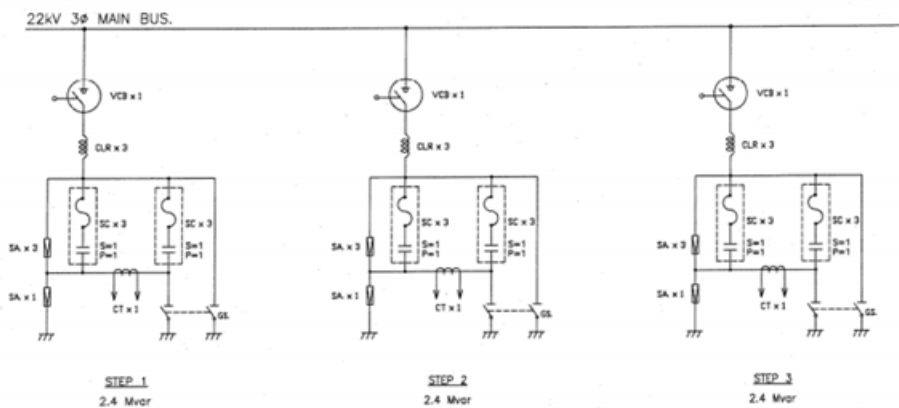
PEA

22kV AUTOMATIC SWITCHING CAPACITOR BANK

Project Name	: PROVINCIAL ELECTRICITY AUTHORITY
Contract No.	:
BASIC DATA	
DESIGNATION TYPE	Y-Y UNGROUNDED
RATED OUTPUT	3 X 2.4 Mvar
RATED VOLTAGE	22 KV.
RATED FREQUENCY	50 Hz.
NUMBER OF PHASE	3 Phase
INSULATION LEVEL	125 KV.
TEMPERATURE CATEGORY	-5/D °C
CONTROL VOLTAGE	220VAC & 125VDC
 NISSIN ELECTRIC (THAILAND) CO.,LTD.	

รูปที่ 3-25 ข้อมูลชุดตัวเก็บประจุ (Name Plate) ที่ใช้ในสถานีไฟฟ้า ระบบ 22 kV

SINGLE LINE DIAGRAM



0	SINGLE LINE DIAGRAM	PEA-STD-22-001	1						
No	Parts Name	Drawing No.	Qty	Material	Material Code	Dimension	Remarks		
△				Product Name		SINGLE LINE DIAGRAM	Part Name		
△				Ref.Dwg No.			Scale	App'd	Ch'kd
△				Revision			Unit	Des'g	Ek'aphot
△				Date	Revision	Des'g		Ek'aphot	CS2
△				Surface Treatment			Dwg No.		
△				Remarks			PEA-STD-22-001		
△				Projection					

รูปที่ 3-26 Single line diagram ชุดตัวเก็บประจุที่ใช้ในสถานีไฟฟ้า ระบบ 22 kV

3.1.1 ข้อมูลพื้นฐานการทำงานของชุดตัวเก็บประจุของสถานีไฟฟ้าวิหารแดง จังหวัดสระบุรี

การทำงานของชุดตัวเก็บประจุที่สถานีวิหารแดงปัจจุบันมี 2 วิธี คือ การทำงานด้วยตัวเอง (Manual) และการทำงานแบบอัตโนมัติ (Automatic) คือ

1. การทำงานด้วยตัวเอง (Manual) จะใช้ในกรณีที่อุปกรณ์บางตัวมีการทำงานผิดพลาดหรือไม่ทำงาน และจะใช้ในกรณีฉุกเฉิน

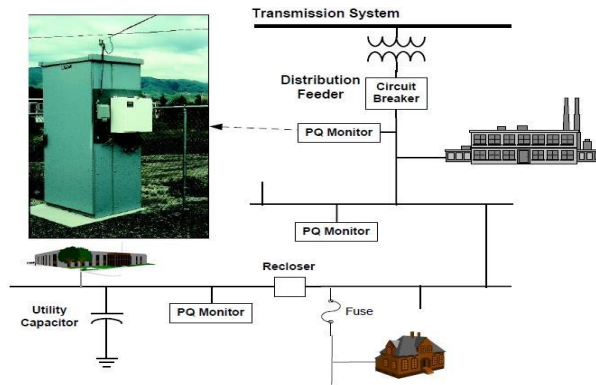
2. การทำงานแบบอัตโนมัติ (Automatic) ระบบจะมีการตั้งค่า PFR (Power Factor Controller) ที่ค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ 0.95 lagging โดยที่เมื่อค่าในระบบต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ ชุดตัวเก็บประจุ ลำดับชุดที่ 1 (ขนาด 2.4 MVA) จะทำงานสับเข้าไปเพื่อเพิ่มค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ในระบบ โดยที่ชุดตัวเก็บประจุ 1 ชุดจะมี 4 ตัวในระบบ 1 เฟส และจำนวน 12 ตัว ในระบบ 3 เฟส ตัวละ 200 kVar รวมเป็น 2,400 kVar เมื่อมีการทำงานในชุดตัวเก็บประจุ ลำดับชุดที่ 1 แล้วค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ยังคงต่ำกว่า 0.95 อีกชุดตัวเก็บประจุ ลำดับชุดที่ 2 และ 3 จะทำงานต่ออีกครั้งกรณีที่ค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์มีค่าสูงเกินค่าที่ตั้งไว้ ชุดตัวเก็บประจุ ลำดับชุดที่ 1 จะถูกปลดออกก่อนเสมอการหน่วงเวลาการทำงาน ของชุดตัวเก็บประจุที่สถานีนั้น ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปต้องรอเวลาประมาณ 15 นาทีเพื่อให้ชุดตัวเก็บประจุมีการคายพลังงานเสียก่อน (Capacitor Discharge) และจะมีการตั้งเวลาดังกล่าวไว้

(Timer) ทุกกรณีโดยที่ชุดตัวเก็บประจุจะทำงานในห้องควบคุมระบบไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ (Switch Gear 22 kV) โดยที่ชุดตัวเก็บประจุแต่ละชุดจะประกอบไปด้วยสวิตช์ 3 ตัว คอยควบคุมการทำงานคือ Reactor , Fuse และ CT ทุกครั้งที่มีการทำงานของชุดตัวเก็บประจุจะต้องมีการตรวจสอบกระแสสมดุลจาก CT ก่อนทุกครั้ง ถ้าเกิดกระแสไม่สมดุลเกิดขึ้นจะสั่งปลดชุดตัวเก็บประจุทุกตัวสำหรับปัญหาที่เคยเกิดขึ้นที่สถานี คือ ชุดตัวเก็บประจุนั้งเดิมจะไม่มีอุปกรณ์ป้องกัน (Surge Arrester Protection) ทำให้เกิดปัญหาจากการสับ/ปลดชุดตัวเก็บประจุพร้อมกัน (Back to Back) ทำให้เกิดความเสียหายเกิดขึ้น ปัจจุบันชุดตัวเก็บประจุจะทำงานแบบอัตโนมัติ

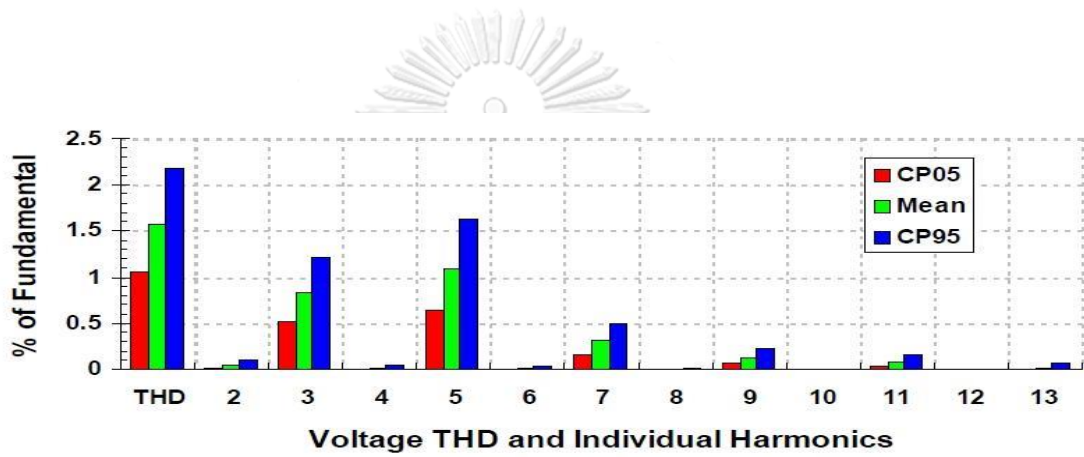
3.1.2 การใช้ข้อมูลฮาร์มอนิกส์จากฐานข้อมูลทางคุณภาพไฟฟ้า

ฐานข้อมูลทางคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality Database) เป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดที่จุดต่างๆในระบบไฟฟ้า ข้อมูลหลักทางไฟฟ้าที่มักจะตรวจวัดได้แก่ แรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า ตัวประกอบกำลัง ส่วนข้อมูลทางคุณภาพไฟฟ้าที่มักจะตรวจวัด ได้แก่ ข้อมูลด้านฮาร์มอนิกส์ (Harmonic) แรงดันตกชั่วขณะ (Voltage Dip หรือ Voltage Sag) ไฟกระพริบ (Flicker) และแรงดันไม่สมดุล (Unbalance) เช่น แรงดันและกระแสฮาร์มอนิกส์ THDv ดัชนีไฟกะพริบระยะสั้น (Short-Term Severity Index; Pst) ดัชนีไฟกะพริบระยะยาว (Long-Term Severity Index; Plt) ค่าดัชนีที่เกี่ยวข้องกับแรงดันตกชั่วขณะ เช่น System Average RMSVariation Frequency Index (SARFI) ค่า Unbalance factor เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้จะมีความสำคัญในการตรวจสอบสภาพระบบไฟฟ้ากำลังทำให้สามารถทำการป้องกันปัญหาทางคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแล้วหรืออาจจะเกิดขึ้นได้ในอนาคตและยังช่วยในการวางแผนที่จะปรับปรุงระดับคุณภาพไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้นได้ การวิเคราะห์ข้อมูล (Data analytic) เหล่านี้จะมีความสำคัญมากขึ้นเรื่อยๆ เพราะสามารถนำไปใช้งานในด้านต่างๆ อีกมากมาย

เครื่องมือวัดที่ใช้ คือ Basic Measuring Instruments (BMI) 8010 PQNode และใช้ PQView ในการรวบรวมข้อมูลจากแหล่งต่างๆ และวิเคราะห์ข้อมูล โดยจะมีส่วนประกอบหลัก คือ Power Quality Data Manager (PQDM) และ Power Quality Data Analyzer (PQDA)

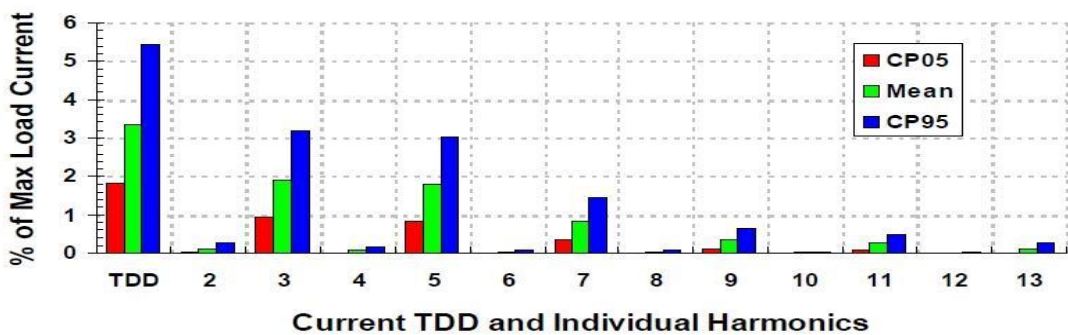


รูปที่ 3-27 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัด



รูปที่ 3-28 ค่าเฉลี่ยของTHDvและแรงดันฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ต่างๆของทุกตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 3-29 ค่าเฉลี่ยของTDD และกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ต่างๆของทุกตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัด

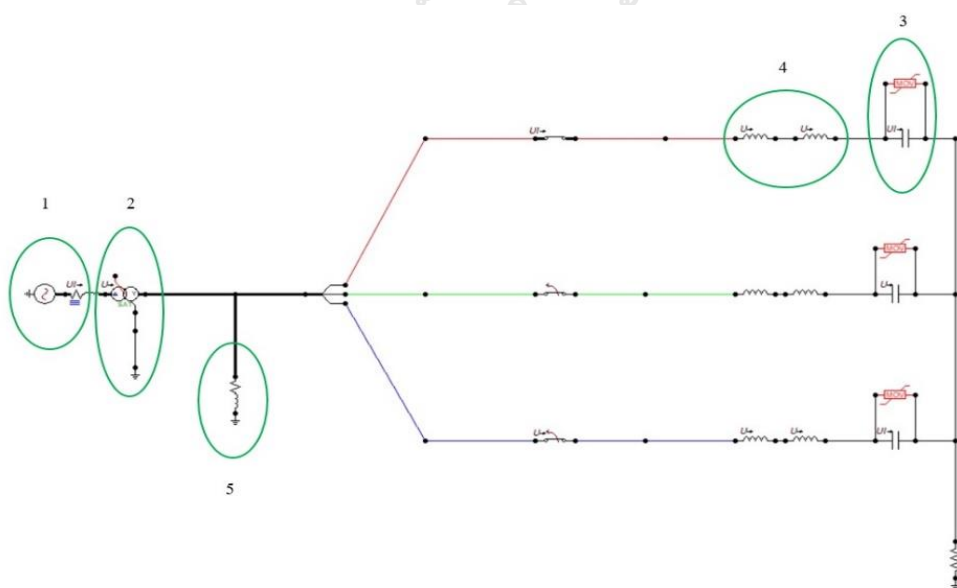
3.2 การจำลองชุดตัวเก็บประจุกรณีวิเคราะห์ทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้าที่สถานีวิทยุแดงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ EMTP/ATP

ในการจำลองแบบเป็นการศึกษาและวิเคราะห์ผลเกี่ยวกับปัญหาทางด้านทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้า กำลังด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยทำการศึกษาถึงแรงดันเกินสวิตช์ซึ่งที่เกิดจากการสับและปลดของชุดตัวเก็บประจุในสถานีไฟฟ้า ซึ่งแบบจำลองที่ใช้จะอิงตามวิทยานิพนธ์ การศึกษาผลของการสับและปลดสวิตช์ชนิดสูญญากาศต่อชุดเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าย่อยระดับแรงดันปานกลางของอรรถพันธ์ จันทสมิต ปี 2545 [2] แต่การใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะใช้จากข้อมูลของสถานีวิทยุแดง จังหวัดสระบุรีได้แก่ค่าค่ากระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้าสถานีวิทยุแดงของกองแผนงานระบบไฟฟ้า ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ปี 2562 ซึ่งในการศึกษาผลของแรงดันเกินนี้สามารถทำได้โดยจำลองเหตุการณ์ด้วยโปรแกรม ATP/EMTP โดยแบ่งเป็น 2 กรณีใหญ่ๆ คือ

3.2.1 กรณีการปลด/สับสวิตช์แบบแยกเดี่ยว (Isolate Bank) รวมถึงกรณีกระแสกระชาก (Inrush Current)

3.2.2 กรณีการปลด/สับสวิตช์แบบหลายตัว (Back to Back)

ผลที่ได้จากการจำลองพร้อมทั้งศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่างๆในระบบเมื่อสับและปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุโดยเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อดูผลที่เกิดขึ้น จะนำข้อมูลที่ไดมาสร้างแบบจำลองของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ใช้ในโปรแกรม EMTP/ ATP ซึ่งจะไดแบบจำลองดังรูปที่ 3-9



รูปที่ 3-30 แบบจำลองสถานีไฟฟ้าย่อยจากโปรแกรม EMTP/ ATP

เมื่อ

จุดที่ 1	คือ	สถานีไฟฟ้าย่อย (Grid)
จุดที่ 2	คือ	หม้อแปลง (Transformer)
จุดที่ 3	คือ	ชุดตัวเก็บประจุ (Capacitors Bank)
จุดที่ 4	คือ	ตัวเหนี่ยวนำ (Inductance)
จุดที่ 5	คือ	โหลดของสถานีไฟฟ้า (Load)

3.2.1 พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลอง

โดยสามารถคำนวณกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อจำลองแบบในสถานีไฟฟ้าวิหารแดงได้ ดังนี้

1. อิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Short circuit impedance)

แบบจำลองที่แทนวงจรป้อนด้วยค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรต่อชานานกับค่าอิมพีแดนซ์เสิร์จของสายส่ง ในกรณีศึกษาที่ใช้ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจร (Diving Point) ที่ระดับแรงดัน 115 kV หนาหม้อแปลงลดแรงดัน 115kV/22 kV ของกองแผนงานระบบไฟฟ้า ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ปี 2562

ตารางที่ 3-4 ค่ากระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้าสถานีวิหารแดงของกองแผนงานระบบไฟฟ้า ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ปี 2562

สถานีไฟฟ้าในเขต กฟภ.1 (กฟภ.)

รายชื่อสถานีไฟฟ้า	BUS KV	หม้อแปลง MVA	3 P Fault kA	SLG Fault kA	R1 pu.	X1 pu.	R2 pu.	X2 pu.	R0 pu.	X0 pu.
68 วิหารแดง	115		10.280	6.424	0.00604	0.04846	0.00551	0.04888	0.02032	0.13492
	22-TP1	50	7.472	7.871	0.01307	0.35099	0.01249	0.35144	0.00638	0.29733

จากตารางจะได้

$$Z_1 = R_1 + jX_1 = 0.00604 + j0.04846 \text{ p.u.}$$

$$Z_2 = R_2 + jX_2 = 0.00551 + j0.04888 \text{ p.u.}$$

$$Z_0 = R_0 + jX_0 = 0.02032 + j0.13492 \text{ p.u.}$$

เมื่อคำนวณโดย กำหนดให้ $S_{base} = 100 \text{ MVA}$

$$Z_{base} = 115^2/100 = 132.25 \Omega$$

ดังนั้น

$$Z_1 = (R_1 + jX_1) * Z_{base} = (0.00604 + j0.04846 \text{ p.u.}) * 132.25 \Omega = 0.79879 + j6.40883$$

$$Z_2 = (R_2 + jX_2) * Z_{base} = (0.00551 + j0.04888 \text{ p.u.}) * 132.25 \Omega = 0.72869 + j6.46438$$

$$Z_0 = (R_0 + jX_0) * Z_{base} = (0.02032 + j0.13492 \text{ p.u.}) * 132.25 \Omega = 2.68732 + j17.84317$$

คำนวณหาค่า L จาก $X_L = 2\pi fL$ จะได้

$$R_1 = 0.79879 \Omega \quad \text{และ} \quad L_1 = 20.39993 \text{ mH}$$

$$R_2 = 0.72869 \Omega \quad \text{และ} \quad L_2 = 20.57676 \text{ mH}$$

$$R_0 = 2.68732 \Omega \quad \text{และ} \quad L_0 = 56.79657 \text{ mH}$$

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดนำค่ากรอกลงในโปรแกรม

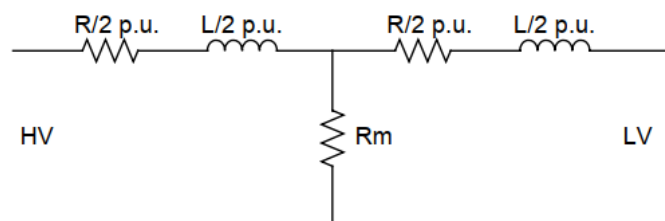
2. หม้อแปลง (Transformer)

พารามิเตอร์ที่อยู่ในจุดที่ 2 ของรูปที่ 3-9 ซึ่งหม้อแปลงที่ใช้เป็นหม้อแปลงขนาด 115 kV/ 22 kV ตอแบบ Dyn1 ขนาด 50 MVA มีค่า %Z เท่ากับ 12.28 % โดยกำหนดให้มีค่า ratio หม้อแปลง $\frac{X}{R} = 10$ [19] สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ ได้ดังนี้

$$R = \sqrt{\frac{\left(\frac{\%Z}{100}\right)^2}{1 + \left(\frac{X}{R}\right)^2}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{12.28}{100}\right)^2}{101}} = 0.012219 \text{ p.u.}$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{0.1228^2 - 0.012219^2} = 0.12219 \text{ p.u.}$$

แบ่งค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำที่ได้ข้างต้นออกเป็นสองส่วนเท่าๆกันเพื่อแทนค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำของขดลวดด้านแรงสูงและด้านแรงต่ำดัง รูปที่ 3-10



รูปที่ 3-31 วงจรสมมูลของหม้อแปลง

ดังนั้นจะได้พารามิเตอร์ค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

วงจรสมมูลด้านแรงสูง

$$Z_{\text{base}} = 115^2/50 = 264.5 \Omega$$

$$R_{\text{HV}} = \frac{0.012219}{2} \times 264.5 = 1.616 \Omega$$

$$L_{\text{HV}} = \frac{0.12219}{2} \times 264.5 \times 100\pi = 51.4182 \text{ mH}$$

$$V_{\text{HV}} = \frac{115}{\sqrt{3}} \text{ kV} = 66.395 \text{ kV}$$

วงจรสมมูลด้านแรงต่ำ

$$Z_{\text{base}} = \frac{22^2}{50} = 9.68 \Omega$$

$$R_{\text{LV}} = \frac{0.012219}{2} \times 9.68 = 0.0591 \Omega$$

$$L_{\text{LV}} = \frac{0.012219}{2} \times 9.68 \times 100\pi = 1.8818 \text{ mH}$$

$$V_{\text{LV}} = \frac{22}{\sqrt{3}} \text{ kV} = 12.701 \text{ kV}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3-5 ค่าพารามิเตอร์ของระบบหม้อแปลงที่ใช้ในการจำลองแบบในโปรแกรม EMTP/ATP

พารามิเตอร์ในหม้อแปลง	วงจรสมมูลด้านแรงสูง	วงจรสมมูลด้านแรงต่ำ
$Z_{\text{base}} (\Omega)$	264.5	9.68
$R (\Omega)$	1.616	0.0591
$L (\text{mH})$	51.4182	1.8818
$V (\text{kV})$	66.395	12.701

เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดนำค่ากรอกลงในโปรแกรม ดังรูป 3.32

	Prim.	Sec.
U [V]	66395	12701
R [ohm]	1.616	0.0591
L [mH,ohm]	51.4182	1.8818

NODE	PHASE	NAME
Primary	ABC	X0015
Secondary	ABC	X0001
Starpoint	ABC	X0003
Sec-N	1	XX0009

รูปที่ 3-32 ค่าพารามิเตอร์หม้อแปลงในโปรแกรม EMTP/ATP

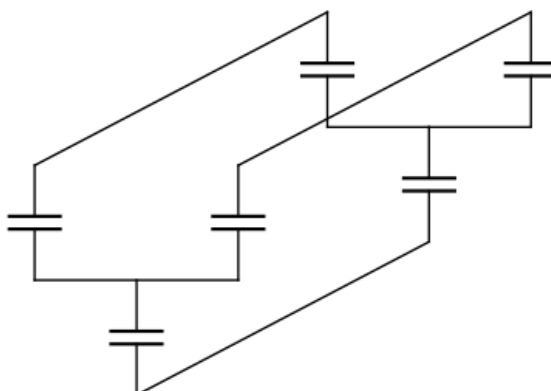
3. ชุดตัวเก็บประจุ (Capacitors Bank) ณ์มหาวิทยาลัย

ชุดตัวเก็บประจุ (Capacitors Bank) จะแสดงในส่วนที่ 3 ของรูปที่ 3-9 ซึ่งเป็นชุดตัวเก็บประจุระดับแรงดันที่ 12.7 kV ขนาด 2.4 Mvar จำนวน 3 ชุด ต่อแบบดับเบิลวายไมต่อลงดิน (doubleunground-wye) และกำหนดให้มีกำลังสูญเสีย (Power loss) 0.2 W/kvar จะสามารถคำนวณหาความเก็บประจุ โดย

$$C = \frac{\text{Mvar}_{1\phi}}{2\pi f \left(\frac{kV_{LL}}{\sqrt{3}}\right)^2} = \frac{2.4/3}{2\pi \times 50 \times \left(\frac{22}{\sqrt{3}}\right)^2} = 15.783 \mu\text{F}$$

โดยความต้านทานของตัวเก็บประจุ คือ

$$R_{\text{phase}} = \frac{P_{\text{loss phase}}}{I_{FL\phi}^2} = \frac{800\text{kVar} \times 0.2}{(\text{kvar}_{\text{bank}} / (\sqrt{3} \times kV_{LL}))^2} = \frac{160}{63^2} = 0.0403 \Omega$$



รูปที่ 3-33 การต่อชุดตัวเก็บประจุแบบดับเบิ้ลวายไม่ต่อลงดิน

จากวิทยานิพนธ์ [2] พบว่าค่าตัวเก็บประจุได้จากการวัดค่าที่หน้างานจริง กำหนดให้กระแสที่ไหลแต่ละเฟสไม่สมดุลกัน แต่เนื่องจากข้อมูลที่สถานีบริหารแดงไม่เพียงพอ ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่าชุดตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่แต่ละสแต๊ปและค่าความต้านทานต่อเฟสมีค่าคงที่ คือ ค่าความเก็บประจุ (C) = 15.783 μF และความต้านทานตัวเก็บประจุต่อเฟส $R_{\text{phase}} = 0.0403 \Omega$

4. ตัวเหนี่ยวนำ

จากวิทยานิพนธ์ [2] พบว่าค่าตัวเหนี่ยวนำในส่วนที่ 4 ของรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นค่าความเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุในสถานีไฟฟ้าย่อยเท่ากับ 0.1 mH และค่าความเหนี่ยวนำกระแสกระชาก (Inrush Reactor) เท่ากับ 0.1 mH เช่นกัน

$$\text{ฉะนั้น ได้ } R = \frac{0.1\text{mH} \times 2\pi \times 50}{15} = 0.0021 \Omega$$

5. โหลดของสถานีไฟฟ้า

จากวิทยานิพนธ์ [2] ค่าโหลดของสถานีไฟฟ้าที่ใช้ คือ 21.7 MW แสดงไว้ในรูปที่ 5 ซึ่งเป็นที่ได้จากการโหลดเมื่อในช่วงวันที่ 18 มกราคม 2562 เวลา 00.00 น. จนถึงวันที่ 18 กุมภาพันธ์ 2562 เวลา 00.00 น. ซึ่งเป็นการเก็บข้อมูลการตรวจวัดในทุกๆ 10 นาที ที่ได้ทำการทดลอง กำหนดให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่สถานีมีค่า 0.875 ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาขนาดค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน (Q) โดย

$$\text{p.f.} = \cos \theta$$

$$0.85 = \cos \theta$$

$$\text{ดังนั้น } \theta = 28.955^\circ$$

$$\text{จากสูตร } Q = P \tan \theta = (21.7 \text{ MW}) \tan(28.955^\circ)$$

$$= 12.006 \text{ MVAR}$$

$$\text{ค่าความต้านทานหาได้จาก } \frac{V^2}{P} \text{ นั่นคือ } \frac{22^2}{21.7} = 22.304 \ \Omega$$

$$\text{และค่าความเหนี่ยวนำจะหาได้จาก } \frac{V^2}{Q} \text{ นั่นคือ } \frac{22^2}{12.006} = 40.313 \ \Omega \text{ หรือ } 128.32 \text{ mH}$$

ตารางที่ 3-6 ค่าพารามิเตอร์ของโหลด

P (MW)	Q (MVAR)	S (MVA)	p.f.	R (W)	L (mH)
21.7	12.006	24.799	0	22.304	128.32

การทดลองจะทำการจำลองด้วยโปรแกรม EMTP/ATP แบบจำลองที่แทนวงจรป้อนจะแทนด้วยค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรจะได้จากรายงานค่ากระแสลัดวงจรของระบบไฟฟ้าของกองแผนงานระบบไฟฟ้า เนื่องจากเป็นแบบจำลองนั้นสะดวกต่อการใช้งานและยุ่งยากในการจำลองน้อยกว่าแบบอื่น

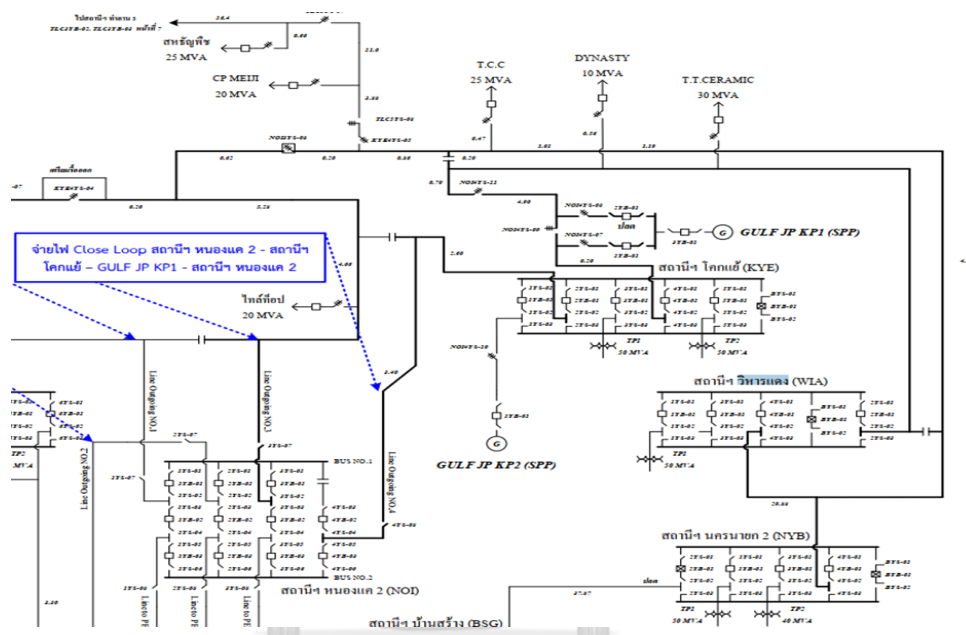
เมื่อ

- V1 คือ แรงดันระหว่างบัสเทียบกับกราวด์
 V2 คือ แรงดันระหว่างหน้าตัวเหนี่ยวนำกับกราวด์
 V3 คือ แรงดันตกคร่อมชุดตัวเก็บประจุ
 C3 คือ กระแสไหลผ่านชุดตัวเก็บประจุ

3.3 การจำลองชุดตัวเก็บประจุกรณีวิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์

3.3.1 การวิเคราะห์สาเหตุปัญหาด้านฮาร์มอนิกส์จากข้อมูลคุณภาพไฟฟ้าด้วยโปรแกรม PQView

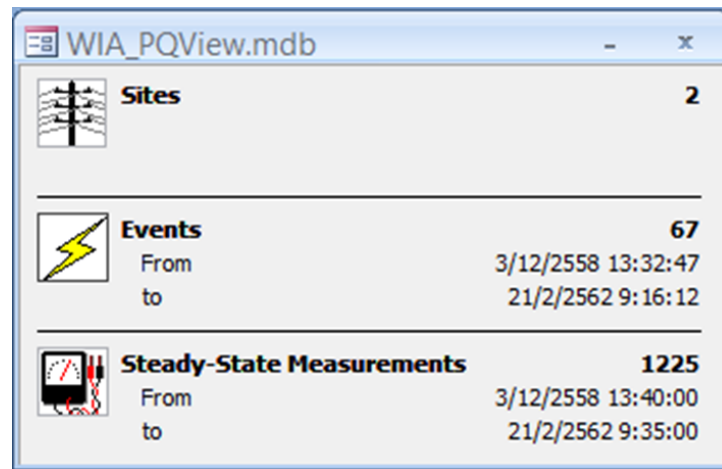
พื้นที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ พื้นที่สถานีไฟฟ้าย่อยวิหารแดง อำเภอวิหารแดง จังหวัดสระบุรี ซึ่งข้อมูลจากการตรวจวัดที่นำมาใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วงวันที่ 3 ธันวาคม 2561 เวลา 00.00 น. จนถึงวันที่ 21 กุมภาพันธ์ 2562 เวลา 00.00 น. ซึ่งเป็นการเก็บข้อมูลการตรวจวัดในทุกๆ 10 นาที



รูปที่ 3-34 แผนผังการจ่ายไฟฟ้าสถานีวิหารแดง

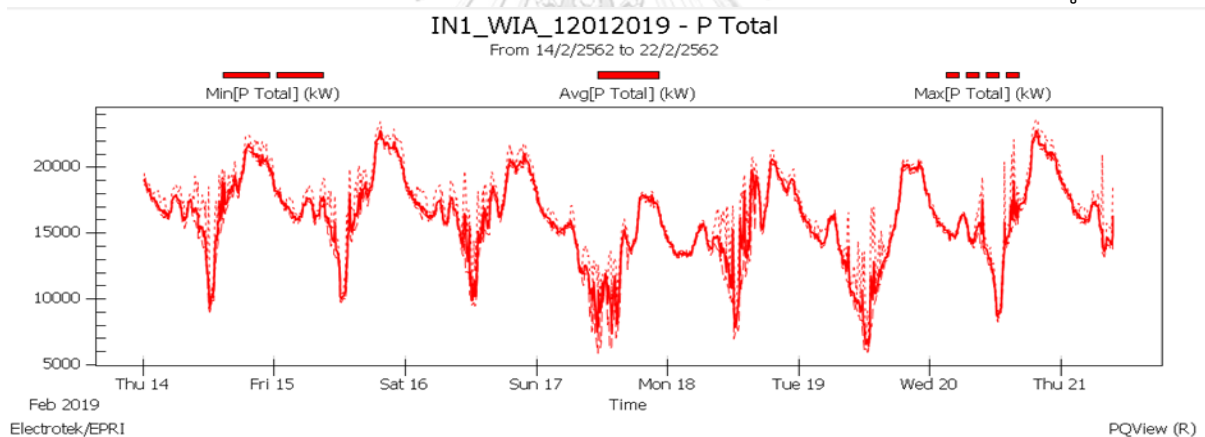


รูปที่ 3-35 ตัวอย่างแผนผังภูมิสารสนเทศที่นำมาใช้วิเคราะห์

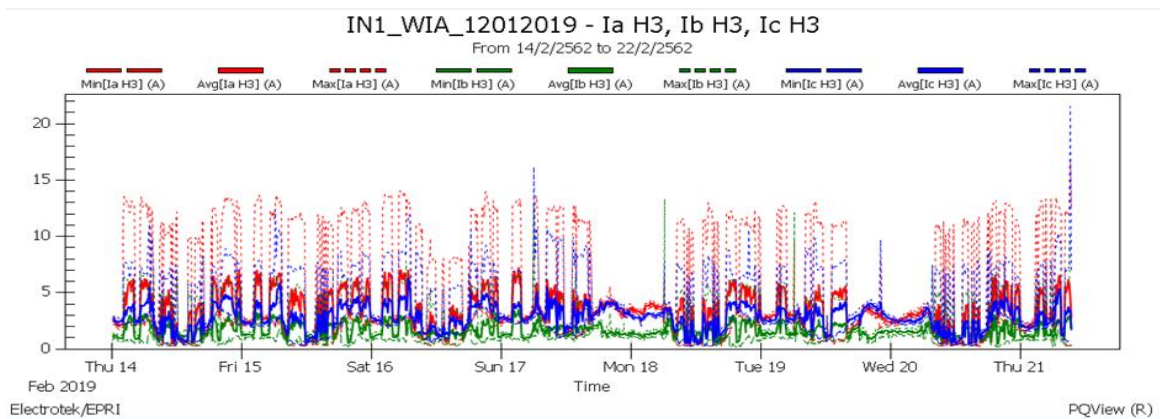


รูปที่ 3-36 ข้อมูลที่ได้จากมิเตอร์คุณภาพไฟฟ้าที่ติดตั้งที่สถานีบริหารแดง

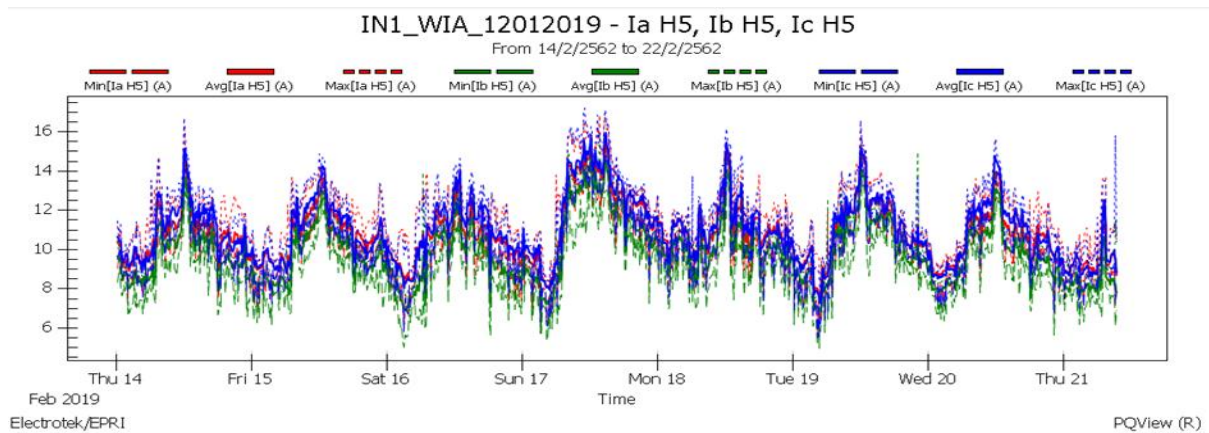
ข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์จากโปรแกรม PQview Power Quality Data Analyzer โดยข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์คือข้อมูลด้านกำลังไฟฟ้าจริงทั้งหมด (Pall) และ กระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละลำดับที่ใช้ในการวิเคราะห์ ในเบื้องต้นจะวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกส์ที่ลำดับที่ 3, 5 และ 7 จะได้ดังรูป



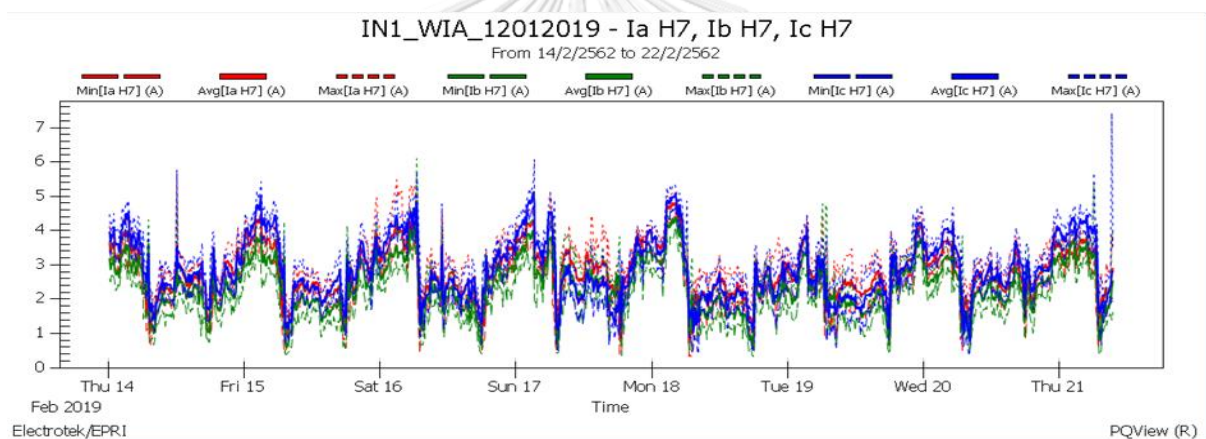
รูปที่ 3-37 กำลังไฟฟ้าจริงที่น่ามาวิเคราะห์จากโปรแกรม PQview



รูปที่ 3-38 กระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่สามจากโปรแกรม PQview



รูปที่ 3-39 กระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่ห้าจากโปรแกรม PQview



รูปที่ 3-40 กระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่เจ็ดจากโปรแกรม PQview

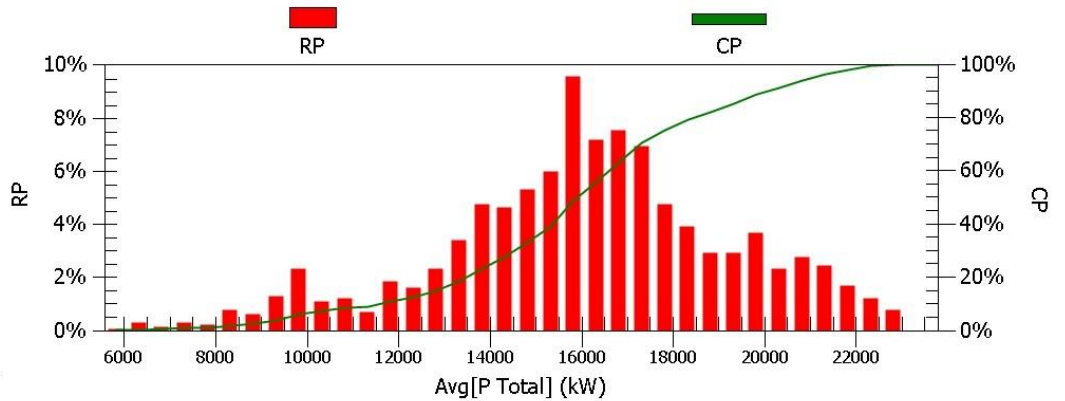
จะเห็นว่าเบื้องต้นกระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับจะมีค่าแปรตามกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ยิ่งกำลังไฟฟ้ามากขึ้นกระแสฮาร์มอนิกยิ่งมากขึ้นตามไปด้วย

การประเมินคุณภาพ โดยนำผลข้อมูลมาประเมินตามมาตรฐาน EN50160 เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานการจ่ายไฟของ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ใช้หลักการเชิงสถิติ กล่าวคือ ใช้ค่า CP95 Percentile ของข้อมูลในการเปรียบเทียบกับเกณฑ์ ตามมาตรฐาน EN50160 โดยนำค่ากระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับมาวิเคราะห์เบื้องต้นจะได้ดังรูป 3-20 ถึง 3-26

IN1_WIA_12012019 - P Total

From 14/2/2562 to 22/2/2562

Count	1294
Min	6413
Avg	16511
Max	23430
Range	17017
σ	3204
Avg +3 σ	26123
Avg -3 σ	6900
CP00.5	7488
CP01	8115
CP05	10359
CP25	14706
CP50	16596
CP75	18462
CP95	21712
CP99	22785
CP99.5	23146
SI Range	1878



Electrotek/EPRI

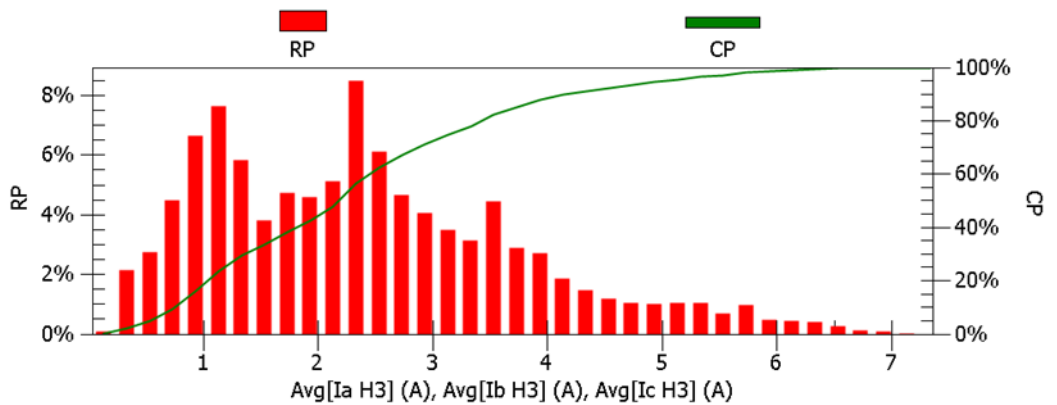
PQView (R)

รูปที่ 3-41 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยหลังจากทำ CP95 Percentile

IN1_WIA_12012019 - Ia H3, Ib H3, Ic H3

From 14/2/2562 to 22/2/2562

Count	3195
Min	0.3727
Avg	2.581
Max	7.213
Range	6.840
σ	1.359
Avg +3 σ	6.659
Avg -3 σ	-1.497
CP00.5	0.4597
CP01	0.5107
CP05	0.7973
CP25	1.445
CP50	2.453
CP75	3.424
CP95	5.305
CP99	6.379
CP99.5	6.554
SI Range	0.9892



Electrotek/EPRI

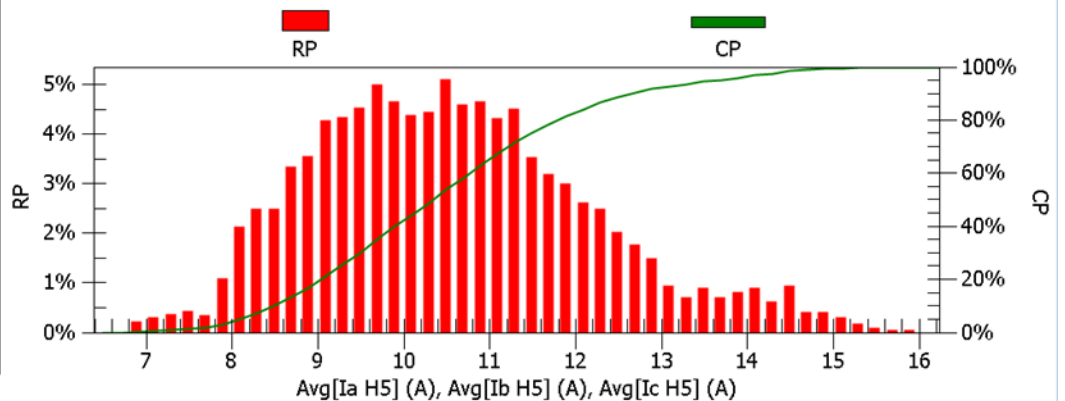
PQView (R)

รูปที่ 3-42 กระแสฮาร์มอนิกสัณในลำดับที่สามหลังจากทำ CP95 Percentile

IN1_WIA_12012019 - Ia H5, Ib H5, Ic H5

From 14/2/2562 to 22/2/2562

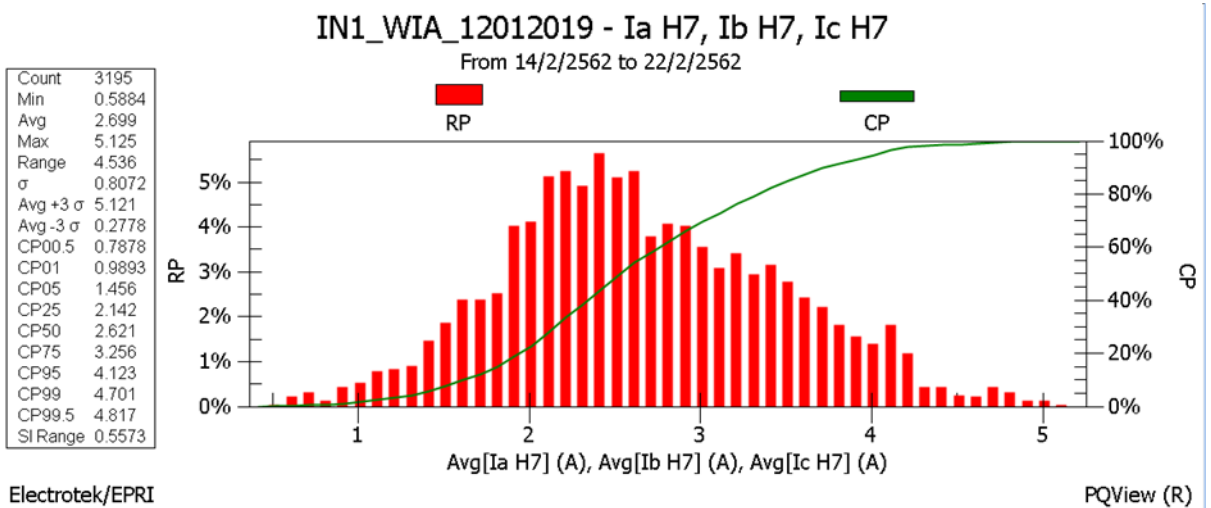
Count	3195
Min	6.843
Avg	10.59
Max	15.97
Range	9.128
σ	1.633
Avg +3 σ	15.49
Avg -3 σ	5.688
CP00.5	7.190
CP01	7.459
CP05	8.208
CP25	9.379
CP50	10.45
CP75	11.58
CP95	13.75
CP99	14.84
CP99.5	15.11
SI Range	1.103



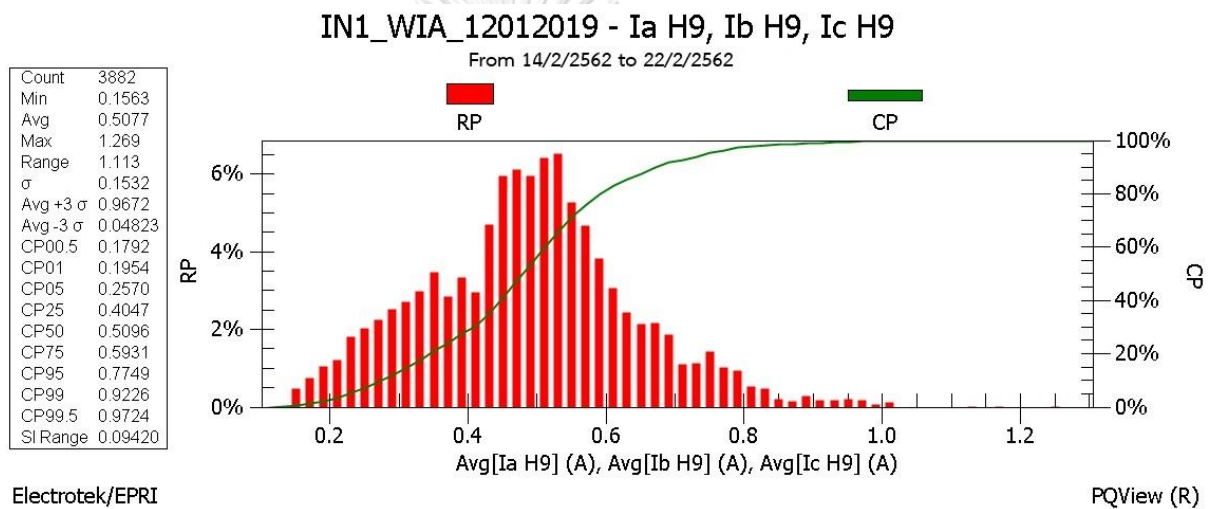
Electrotek/EPRI

PQView (R)

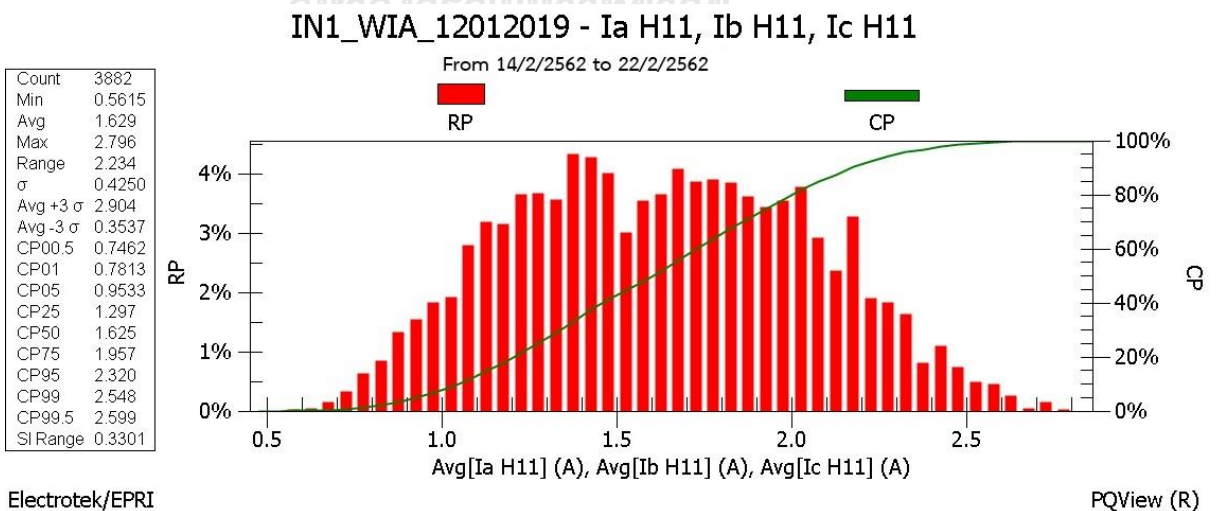
รูปที่ 3-43 กระแสฮาร์มอนิกสัณในลำดับที่ห้าหลังจากทำ CP95 Percentile



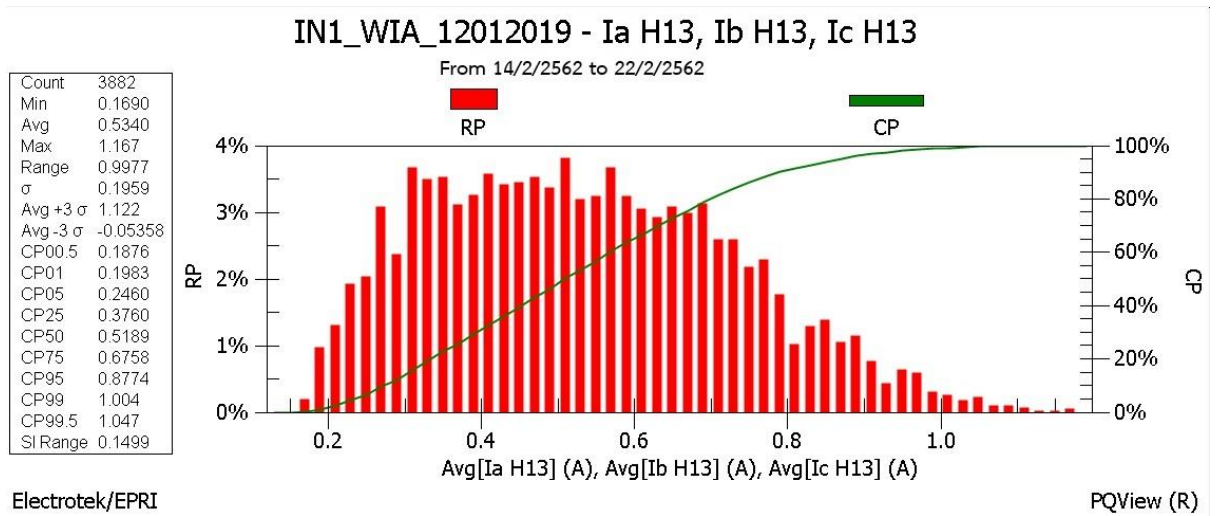
รูปที่ 3-44 กระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่เจ็ดหลังจากทำ CP95 Percentile



รูปที่ 3-45 กระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่เก้าหลังจากทำ CP95 Percentile



รูปที่ 3-46 กระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่สิบเอ็ดหลังจากทำ CP95 Percentile



รูปที่ 3-47 กระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่สิบสามหลังจากทำ CP95 Percentile

ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้ารายใดๆที่จุดต่อร่วม *

ระดับแรงดันไฟฟ้า ที่จุดต่อร่วม (kV)	อันดับฮาร์มอนิกและขีดจำกัดของกระแส (A rms)																		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
0.400	48	34	22	56	11	40	9	8	7	19	6	16	5	5	5	6	4	6	
11 and 12	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1	
22 , 24 and 33	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1	1	
69	8.8	5.9	4.3	7.3	3.3	4.9	2.3	1.6	1.6	4.9	1.6	4.3	1.6	1	1	1.6	1	1	
115 and above	5	4	3	4	2	3	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1	

* : ยอมให้นำค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 10 หรือ 0.5 A (ค่าที่มากกว่าค่าใดค่าหนึ่ง) มาใช้กับขีดจำกัดของกระแสแต่ละอันดับได้ไม่เกิน 2 อันดับ

รูปที่ 3-48 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกสำหรับผู้ใช้ไฟของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ผลที่ได้จากการจำลองโมเดลในโปรแกรม PQView

จากการวิเคราะห์เบื้องต้นเมื่อนำมาเทียบกับค่าเกณฑ์มาตรฐานการจ่ายไฟของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 22 kV เมื่อพิจารณาเฉพาะค่ากระแสฮาร์มอนิกส์บางตัวหลังจากทำ CP95 Percentile ช่วงวันที่ 14 กุมภาพันธ์ 2562 เวลา 0.00 น. ถึง 22 กุมภาพันธ์ 2562 เวลา 24.00 น. จะได้

- กระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่สามอยู่ในเกณฑ์ปกติ (ค่าที่วัดได้ 5.305 A จากค่าเกณฑ์มาตรฐาน 7 A)
- กระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่ห้าเกินเกณฑ์ปกติ (ค่าที่วัดได้ 13.75 A จากค่าเกณฑ์มาตรฐาน 9 A)
- กระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่เจ็ดอยู่ในเกณฑ์ปกติ (ค่าที่วัดได้ 4.123 A จากค่าเกณฑ์มาตรฐาน 6 A)
- กระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่เก้าอยู่ในเกณฑ์ปกติ (ค่าที่วัดได้ 0.703 A จากค่าเกณฑ์มาตรฐาน 2 A)
- กระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่สิบเอ็ดอยู่ในเกณฑ์ปกติ (ค่าที่วัดได้ 2.011 A จากค่าเกณฑ์มาตรฐาน 6 A)
- กระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่สิบสามอยู่ในเกณฑ์ปกติ (ค่าที่วัดได้ 0.879 A จากค่าเกณฑ์มาตรฐาน 5 A)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

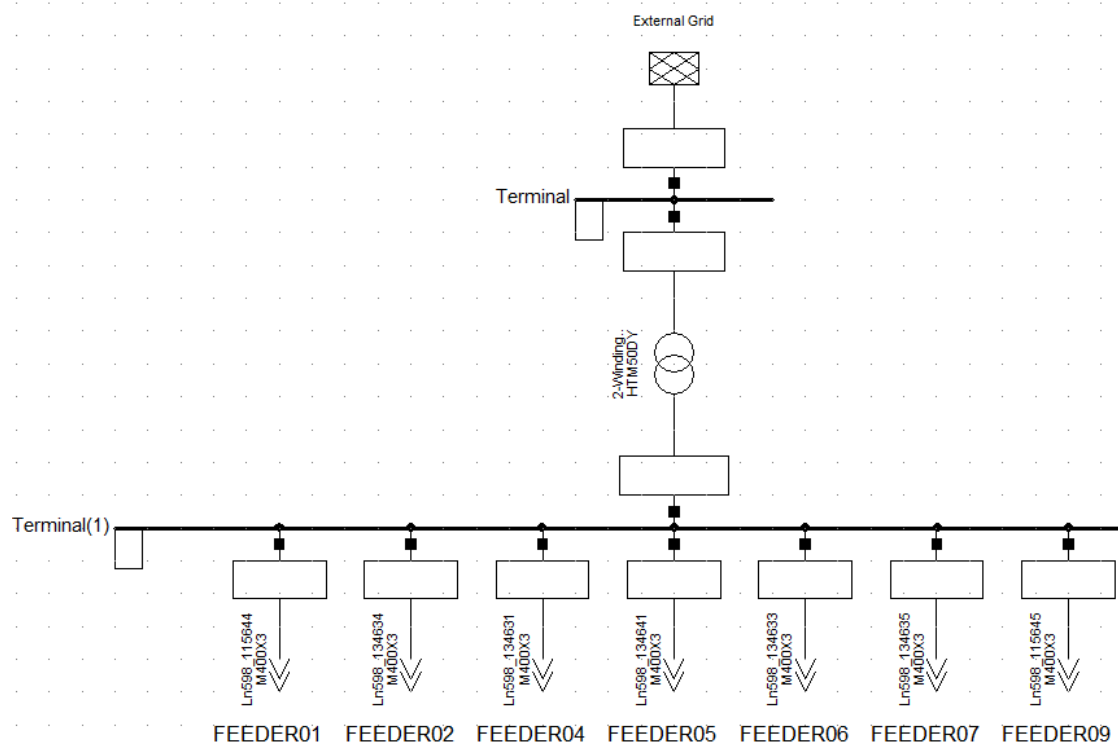
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หมายเหตุ: ผลจากการวิเคราะห์เทียบกับค่ามาตรฐานของการไฟฟ้าในกรณีลูกค้าต่อร่วมกับระบบของการไฟฟ้าไม่ใช่มาตรฐานด้านคุณภาพไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า

3.3.2 การวิเคราะห์สาเหตุปัญหาด้านฮาร์มอนิกส์ด้วยการจำลองแบบด้วยโปรแกรม

DIGSILENT PowerFactory

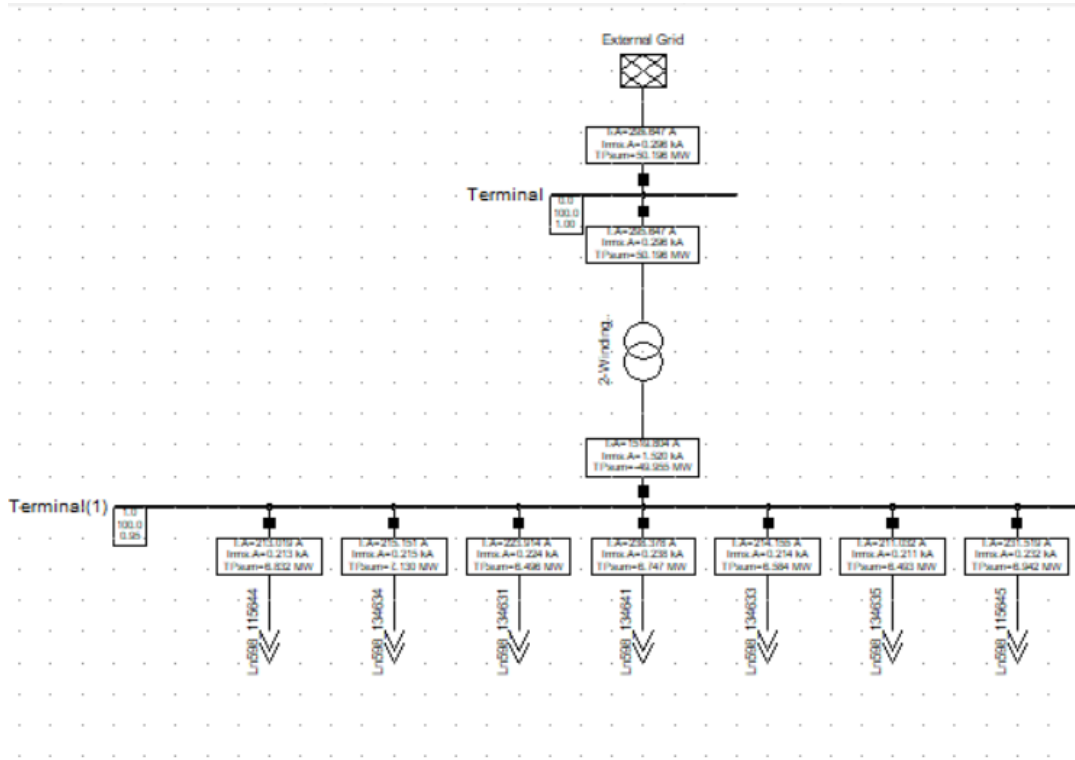
มีการใช้ข้อมูลแผนที่ภูมิศาสตร์สารสนเทศสถานีไฟฟ้าย่อยวิหารแดง อำเภอวิหารแดง จังหวัดสระบุรี มาวิเคราะห์ในโปรแกรม โดยมีการจำลองแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์ในรูปแบบต่างๆจากข้อมูลจริง และมีการจำลองผ่านโปรแกรม Digsilent PowerFactory เพื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นในระบบต่อชุดตัวเก็บประจุในสถานี



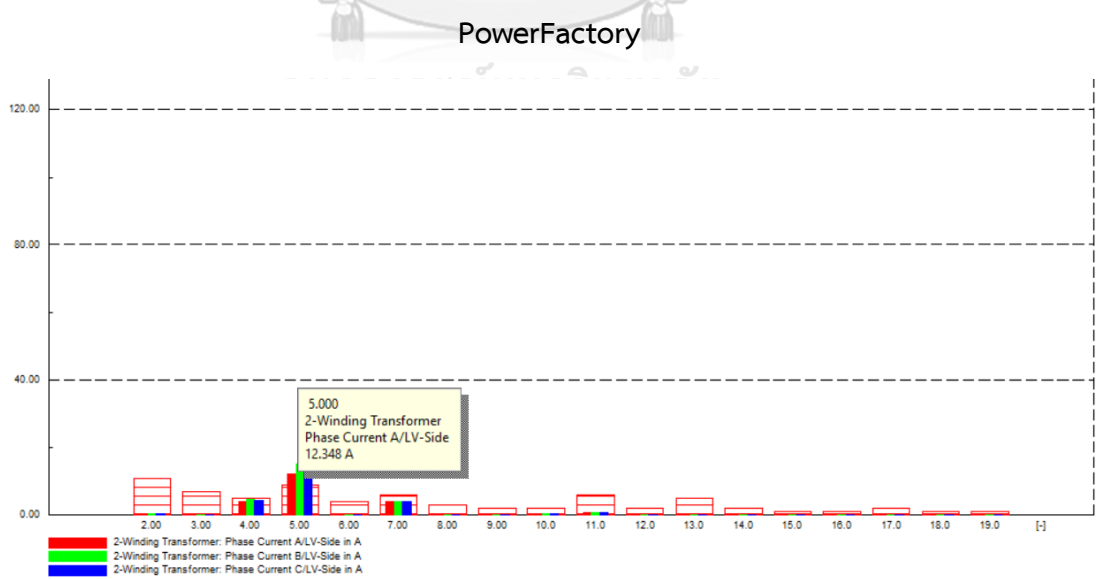
รูปที่ 3-49 โมเดลจากการจำลองระบบที่สถานีวิหารแดงในโปรแกรม Digsilent

PowerFactory

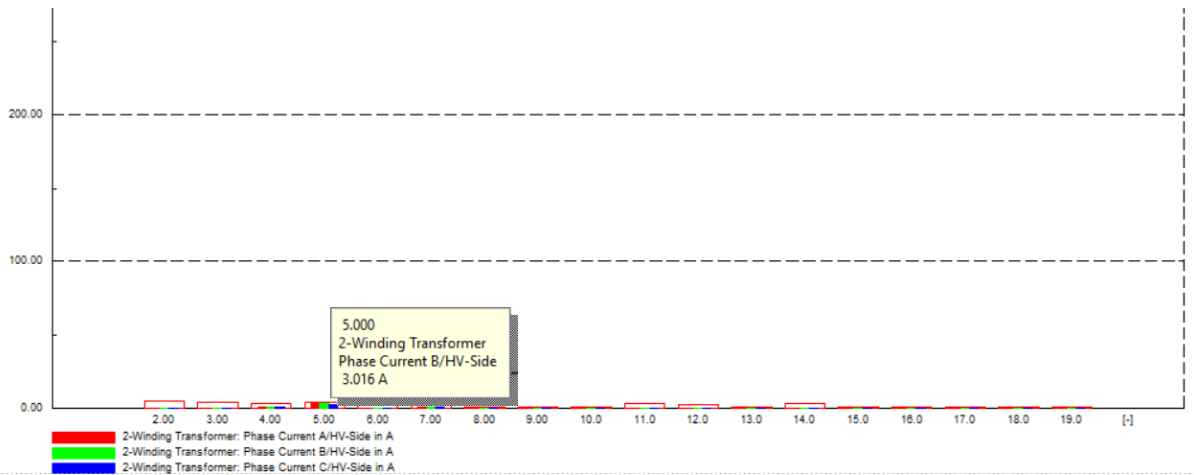
1. กรณีที่โหลดเต็มพิกัด (Base Case at full load)



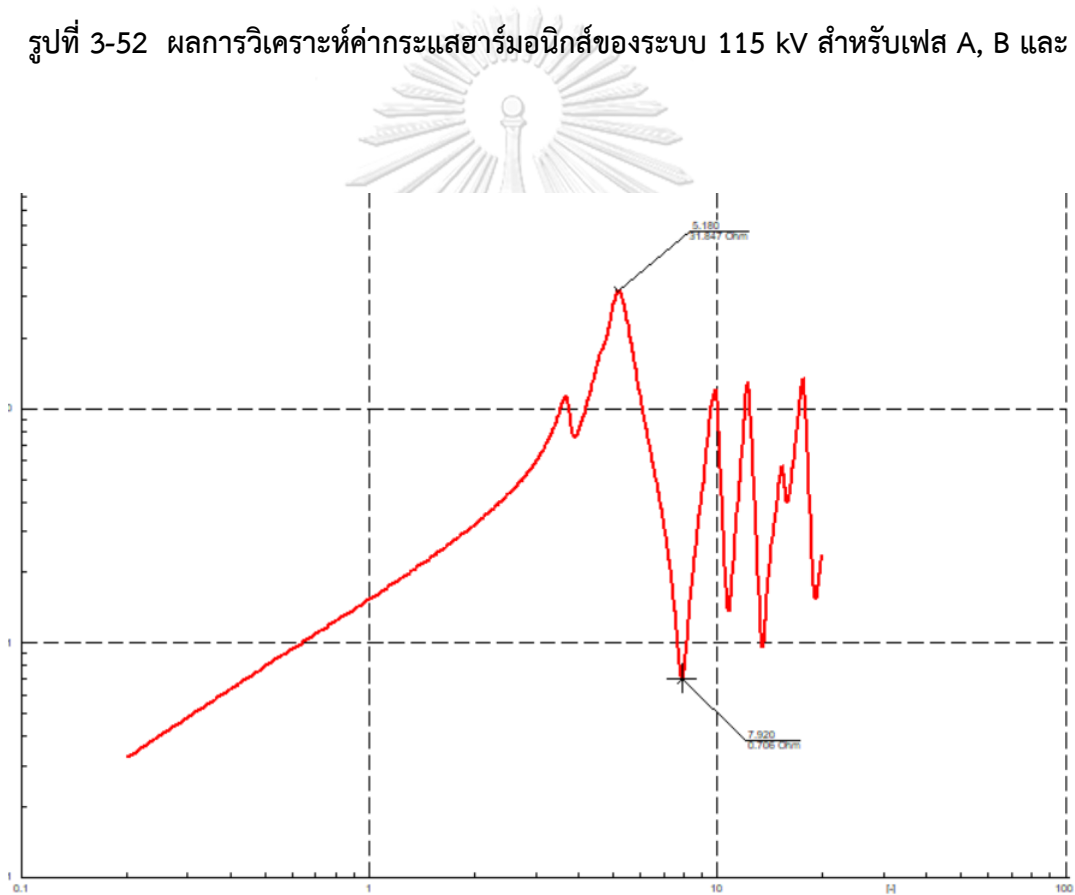
รูปที่ 3-50 การวิเคราะห์โมเดลจากการจำลองระบบที่สถานีบริหารแดงในโปรแกรม DigSILENT



รูปที่ 3-51 ผลการวิเคราะห์ค่ากระแสฮาร์มอนิกของระบบ 22 kV สำหรับเฟส A, B และ C



รูปที่ 3-52 ผลการวิเคราะห์ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ของระบบ 115 kV สำหรับเฟส A, B และ C



รูปที่ 3-53 การวิเคราะห์จากกราฟ frequency scan ของระบบ (Base Case at full load) ที่
สถานีบริหารแดง

เมื่อเปรียบเทียบค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ที่ได้จากการจำลองแบบ (DigSILENT PowerFactory) และค่าที่ได้จากการวัดจากมิเตอร์คุณภาพไฟฟ้า (PQ Meter) ที่สถานีมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 3-7 แสดงค่าเปรียบเทียบกระแสฮาร์โมนิกส์ที่ได้จากการวัดที่สถานีและค่าจากการจำลองโมเดลผ่าน DigSILENT PowerFactory ที่โหลดเต็มพิกัด (Base Case at full load)

อันดับกระแสฮาร์โมนิกส์	3	5	7	9	11	13
มาตรฐานการเชื่อมต่อระบบ 22 กิโลโวลต์	7	9	6	2	6	5
ค่าที่วัดได้จากสถานี (PQ Meter)	5.305	13.75	4.123	0.703	2.061	0.879
ค่าที่ได้จากการจำลองโมเดล (DigSILENT PowerFactory)Base Case ที่ full load	-	12.348	4.103	-	2.154	0.96

Terminal - WIAtotal\...\Terminal(1).ElmTerm

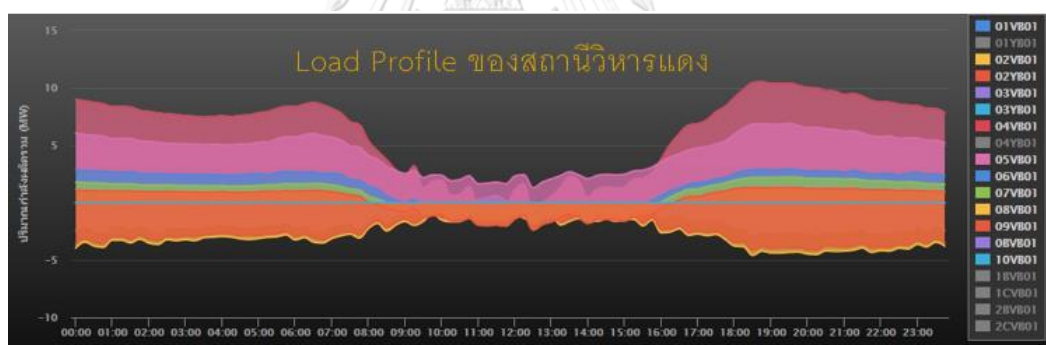
Basic Data	Name	Terminal(1)		OK
Load Flow	Type	...		Cancel
VDE/IEC Short-Circuit	Zone	...		Jump to ...
Complete Short-Circuit	Area	...		Cubicles
ANSI Short-Circuit	<input type="checkbox"/> Out of Service			
IEC 61363	System Type	AC	Usage	Busbar
DC Short-Circuit	Phase Technology	ABC		
RMS-Simulation	Nominal Voltage			
EMT-Simulation	Line-Line	22.	kV	
Hamonics/Power Quality	Line-Ground	12.70171	kV	
Protection	<input type="checkbox"/> Earthed			
Optimal Power Flow				
Reliability				
Generation Adequacy				
Tie Open Point Opt.				
Description				

รูปที่ 3-54 การต่อของบัสที่ 22 กิโลโวลต์ ของสถานีไฟฟ้าบริหารแดง

จากตารางที่ได้จากการทดลองจะสังเกตได้ว่าค่ากระแสฮาร์โมนิกที่สามหารลงตัว (Triplen Harmonic) ในการจำลองโมเดลผ่านทาง DIgSILENT PowerFactory ไม่สามารถระบุได้ เนื่องจากไม่มีกระแสไหลในสายนิวทรัล (Neutral) สำหรับระบบที่ต่อหม้อแปลงแบบสตาร์ (Star Connection) และสายส่งต่างๆที่ได้จากการจำลองโมเดลต่อแบบ ABC ไม่มีสายนิวทรัลเช่นกัน โดยค่ากระแสฮาร์โมนิกอันดับดังกล่าวจะไหลวนในหม้อแปลงฝั่งเดลต้าทำให้กระแสฮาร์โมนิกไม่ส่งผลออกไปสู่ระบบข้างนอกดังนั้นจะไม่พิจารณาผลของกระแสฮาร์โมนิกที่สามหารลงตัว (Triplen Harmonic) เช่น 3,6,9... เป็นต้น แต่ค่าที่ได้จากมิเตอร์คุณภาพไฟฟ้าสามารถตรวจจับค่ากระแสดังกล่าวได้

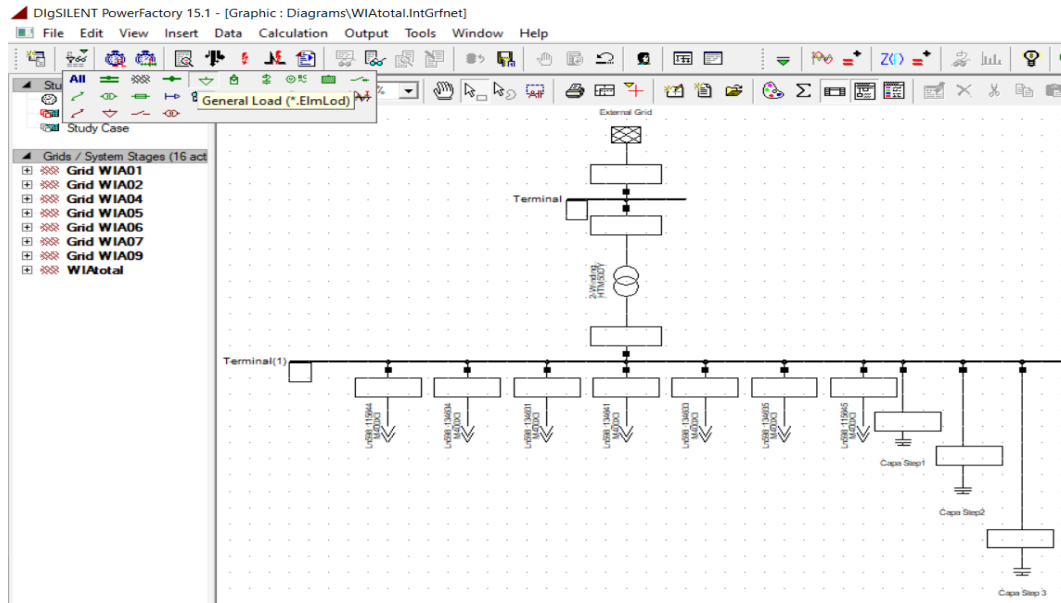
2. กรณีที่โหลดจริง (Base Case at Active Power CP95 Percentile)

จะพบว่าค่ากำลังจริงที่ใช้ (Power Consumption) ที่ได้จากการวัดที่สถานี ในช่วงเวลาดังกล่าว หลังจากการห้วงค่าทางสถิติด้วย CP 95 Percentile แล้วนั้นพบว่า มีค่าประมาณ 21.71 MW. เมื่อเลือกช่วงเวลาเดียวกันเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ในโปรแกรม DIgSILENT พบว่า ค่ากำลังที่ใช้จริงในระบบและค่ากระแสฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบมีความสอดคล้องกับค่าที่วัดได้จากที่สถานีไฟฟ้าวิหารแดง จังหวัดสระบุรีจากการติดตั้งมิเตอร์คุณภาพไฟฟ้า



รูปที่ 3-55 โหลดโปรไฟล์ของสถานีวิหารแดงจากระบบ SCADA

เลือกช่วงของข้อมูลสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (GIS) มาวิเคราะห์ โดยเลือกช่วงเวลาตรงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงที่สถานีไฟฟ้าวิหารแดง (WIA) ผ่านทางมิเตอร์คุณภาพไฟฟ้าที่ติดตั้งที่สถานี (PQ Meter) ค่าที่ได้จากช่วงเวลาดังกล่าวนั้น มีค่ากำลังไฟฟ้ารวมของระบบ (P total) หลังจากห้วงทางสถิติด้วย CP95 Percentile แล้วพบว่ามีค่าประมาณ 21.71 MW ดังรูปที่ 4.41 จากนั้นจะนำข้อมูลดังกล่าวมาทำการ Scaling Load เพื่อตั้งสมมุติฐานเป็น Base Case



รูปที่ 3-56 การทำ Scaling Load ในการตั้ง Base Case ที่อิงตามโหลดโปรไฟล์

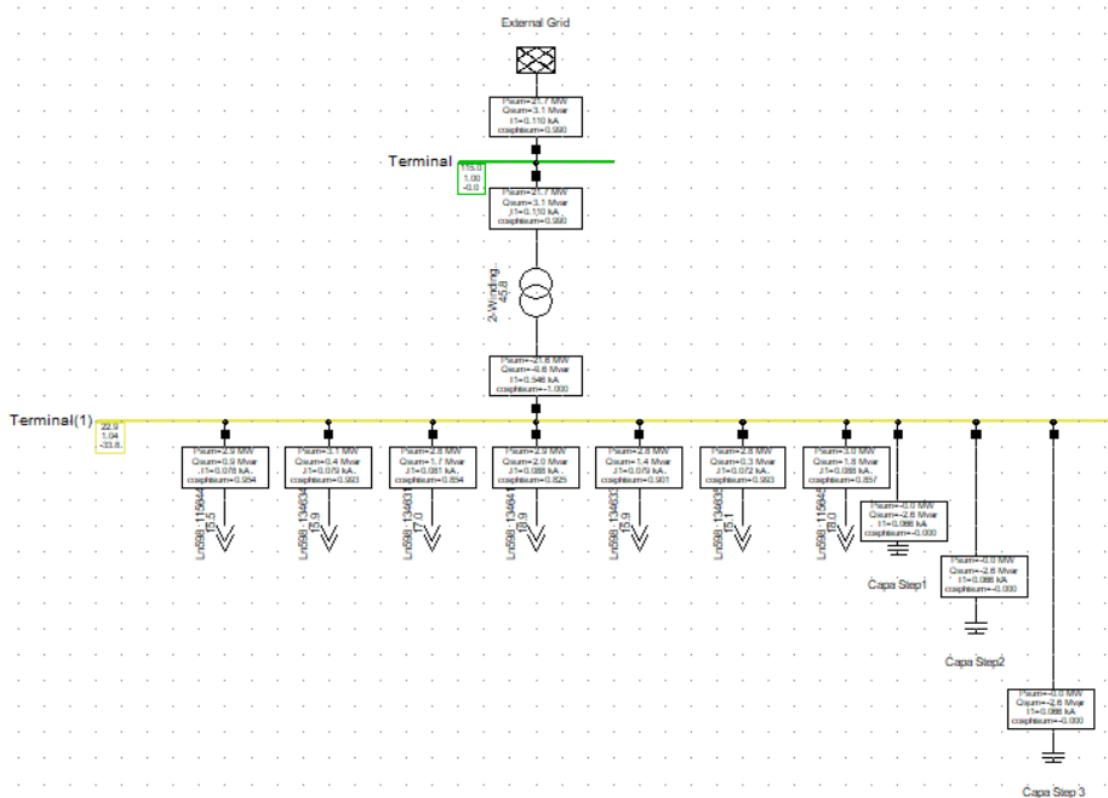
Name	Grid	Terminal StaCubic	Terminal Busbar	Act.Pow. MW	React.Pow. Mvar	App.Pow. MVA	Pow.Fact.	Out of Service
Ld604_66076	Grid WIA06		604_66076	0.	0.	0.	0.	<input type="checkbox"/>
Ld604_69673	Grid WIA04		604_69673	0.	0.	0.	0.	<input type="checkbox"/>
Ld604_80955	Grid WIA04		604_80955	0.12533	0.07767	0.14745	0.85000	<input type="checkbox"/>
Ld604_81418	Grid WIA09		604_81418	0.	0.	0.	0.	<input type="checkbox"/>
Ld604_81419	Grid WIA05		604_81419	0.	0.	0.	0.	<input type="checkbox"/>
Ld604_81498	Grid WIA05		604_81498	0.	0.	0.	0.	<input type="checkbox"/>
Ld604_81499	Grid WIA05		604_81499	0.	0.	0.	0.	<input type="checkbox"/>
Ld604_81500	Grid WIA02		604_81500	0.	0.	0.	0.	<input type="checkbox"/>
Ld604_81501	Grid WIA05		604_81501	0.	0.	0.	0.	<input type="checkbox"/>
Ld604_88140	Grid WIA09		604_88140	0.	0.	0.	0.	<input type="checkbox"/>
LdLd599_103993	Grid WIA04		599_103993	0.00417	0.00258	0.00490	0.84999	<input type="checkbox"/>
LdLd599_104142	Grid WIA05		599_104142	0.00595	0.00369	0.00700	0.84999	<input type="checkbox"/>
LdLd599_104147	Grid WIA05		599_104147	0.00595	0.00369	0.00700	0.84999	<input type="checkbox"/>
LdLd599_109569	Grid WIA07		599_109569	0.03252	0.02015	0.03826	0.85000	<input type="checkbox"/>
LdLd599_109570	Grid WIA07		599_109570	0.01779	0.01102	0.02093	0.84999	<input type="checkbox"/>
LdLd599_109571	Grid WIA06		599_109571	0.02585	0.01602	0.03041	0.84999	<input type="checkbox"/>
LdLd599_114378	Grid WIA05		599_114378	0.05316	0.03294	0.06254	0.84999	<input type="checkbox"/>
LdLd599_144478	Grid WIA05		599_144478	0.00593	0.00368	0.00698	0.84999	<input type="checkbox"/>
LdLd599_147279	Grid WIA04		599_147279	0.04200	0.02603	0.04942	0.84999	<input type="checkbox"/>
LdLd599_147280	Grid WIA04		599_147280	0.05267	0.03264	0.06197	0.84999	<input type="checkbox"/>
LdLd599_147281	Grid WIA04		599_147281	0.16811	0.10418	0.19777	0.85	<input type="checkbox"/>
LdLd599_147282	Grid WIA04		599_147282	0.05267	0.03264	0.06197	0.84999	<input type="checkbox"/>
LdLd599_147283	Grid WIA04		599_147283	0.08340	0.05169	0.09812	0.85000	<input type="checkbox"/>
LdLd599_147284	Grid WIA04		599_147284	0.08340	0.05169	0.09812	0.85000	<input type="checkbox"/>
LdLd599_147285	Grid WIA04		599_147285	0.08310	0.05150	0.09777	0.85000	<input type="checkbox"/>
LdLd599_147286	Grid WIA04		599_147286	0.01670	0.01035	0.01965	0.84999	<input type="checkbox"/>
LdLd599_147288	Grid WIA04		599_147288	0.04153	0.02574	0.04886	0.84999	<input type="checkbox"/>
LdLd599_147289	Grid WIA04		599_147289	0.16622	0.10301	0.19556	0.84999	<input type="checkbox"/>
LdLd599_147370	Grid WIA04		599_147370	0.16622	0.10301	0.19555	0.85	<input type="checkbox"/>
LdLd599_147371	Grid WIA04		599_147371	0.24934	0.15452	0.29334	0.84999	<input type="checkbox"/>

รูปที่ 3-57 การทำ Flexible Data เพื่อนำมาตั้งค่า Load Flow สำหรับ Base Case

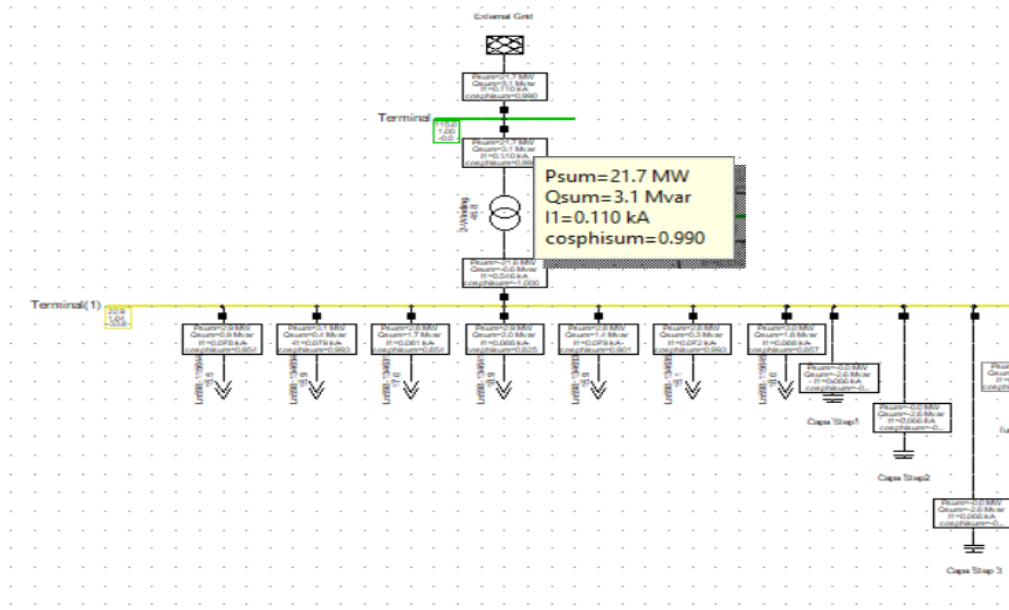
Object Filter: *.ElmLod

Name	Grid	Input Mode	Balanced/Unbala...	Act. Pow. MW	React. Pow. Mvar	App. Pow. MVA	I kA	Pow. Fact.	cos(phi)/nd.cap	Power Direction	Voltage p.u.	Scaling Factor	Adjusted by Load ...
Ld604_38140	Grid WIA09	PC		0	0	0	0	0	nd.	P>=0	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_103983	Grid WIA04	PC		0	0.00417	0.00258	0.00490	0.01066	0.84999	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_104142	Grid WIA05	PC		0	0.00595	0.00369	0.00700	0.01523	0.84999	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_104147	Grid WIA05	PC		0	0.00595	0.00369	0.00700	0.01523	0.84999	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_109569	Grid WIA07	PC		0	0.03252	0.02015	0.03826	0.05523	0.85000	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_109570	Grid WIA07	PC		0	0.01779	0.01102	0.02093	0.04551	0.84999	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_109571	Grid WIA06	PC		0	0.02585	0.01602	0.03041	0.04389	0.84999	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_114378	Grid WIA05	PC		0	0.05316	0.03294	0.06254	0.09027	0.84999	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_144478	Grid WIA05	PC		0	0.00593	0.00368	0.00698	0.01518	0.84999	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_147279	Grid WIA04	PC		0	0.04200	0.02603	0.04942	0.07133	0.84999	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_147280	Grid WIA04	PC		0	0.05267	0.03264	0.06197	0.08945	0.84999	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_147281	Grid WIA04	PC		0	0.16811	0.10418	0.19777	0.28547	0.85	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_147282	Grid WIA04	PC		0	0.05267	0.03264	0.06197	0.08945	0.84999	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_147283	Grid WIA04	PC		0	0.08340	0.05169	0.09812	0.14163	0.85000	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_147284	Grid WIA04	PC		0	0.08340	0.05169	0.09812	0.14163	0.85000	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_147285	Grid WIA04	PC		0	0.08310	0.05150	0.09777	0.14112	0.85000	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_147286	Grid WIA04	PC		0	0.01670	0.01035	0.01965	0.02836	0.84999	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_147288	Grid WIA04	PC		0	0.04153	0.02574	0.04886	0.07053	0.84999	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_147289	Grid WIA04	PC		0	0.16622	0.10301	0.19556	0.28226	0.84999	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_147370	Grid WIA04	PC		0	0.16622	0.10301	0.19556	0.28226	0.85	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_147371	Grid WIA04	PC		0	0.24934	0.15452	0.29334	0.42340	0.84999	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_182964	Grid WIA01	PC		0	0.03400	0.02107	0.04001	0.05775	0.85000	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_183252	Grid WIA04	PC		0	0.00733	0.00454	0.00863	0.01245	0.85000	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_183601	Grid WIA07	PC		0	0.20496	0.12702	0.24113	0.34805	0.84999	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_184233	Grid WIA01	PC		0	0.02205	0.01367	0.02595	0.03745	0.84999	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_184237	Grid WIA07	PC		0	0.10376	0.06430	0.12207	0.17620	0.85000	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_184239	Grid WIA07	PC		0	0.10376	0.06430	0.12207	0.17619	0.85	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_184241	Grid WIA07	PC		0	0.10376	0.06430	0.12207	0.17619	0.85000	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_184242	Grid WIA09	PC		0	0.05962	0.03694	0.07014	0.10124	0.84999	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>
LdLd599_184243	Grid WIA09	PC		0	0.07513	0.04656	0.08838	0.12757	0.84999	nd.	1.	1.	<input checked="" type="checkbox"/>

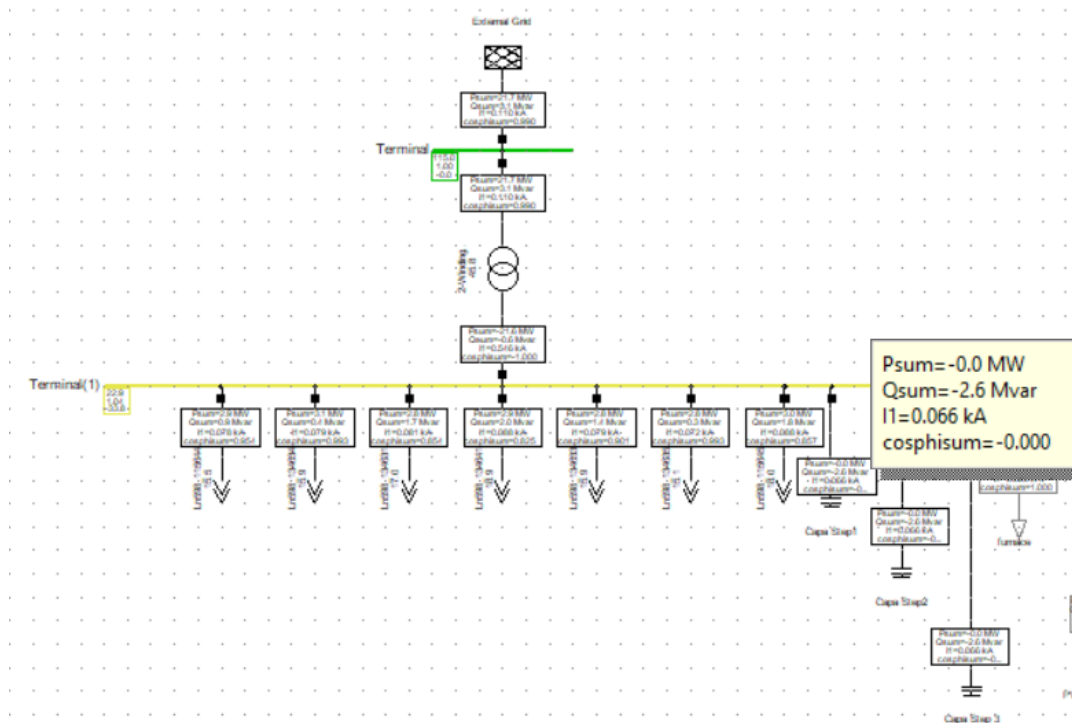
รูปที่ 3-58 การตั้งค่า Load Flow สำหรับ Base Case



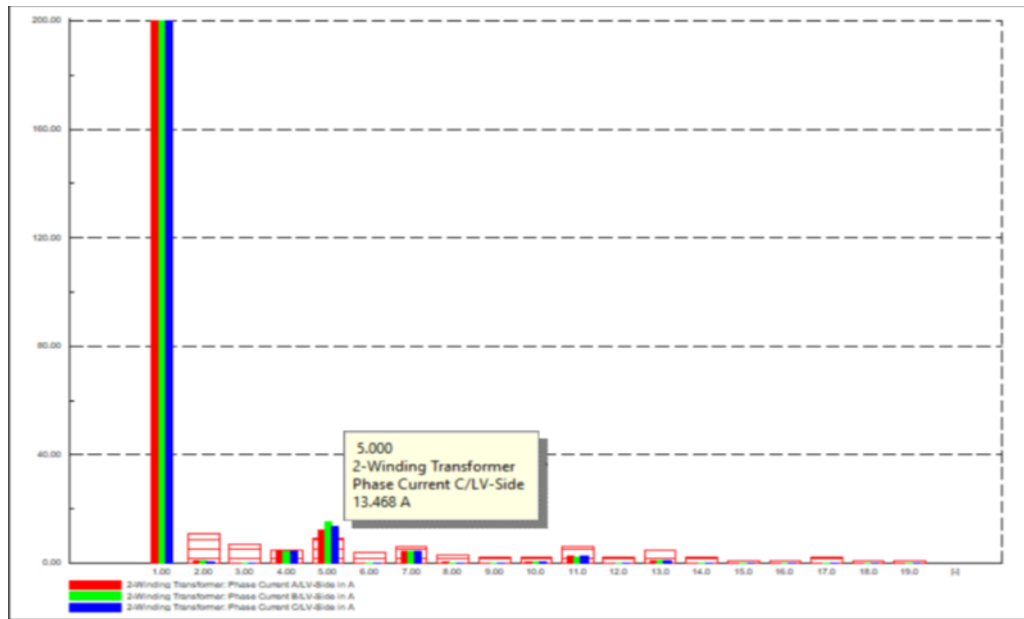
รูปที่ 3-59 การวิเคราะห์หิมเดลจากการจำลอง Base Case (CP 95 Percentile) ระบบที่สถานี
 วิทยารแดงในโปรแกรม DigSILENT



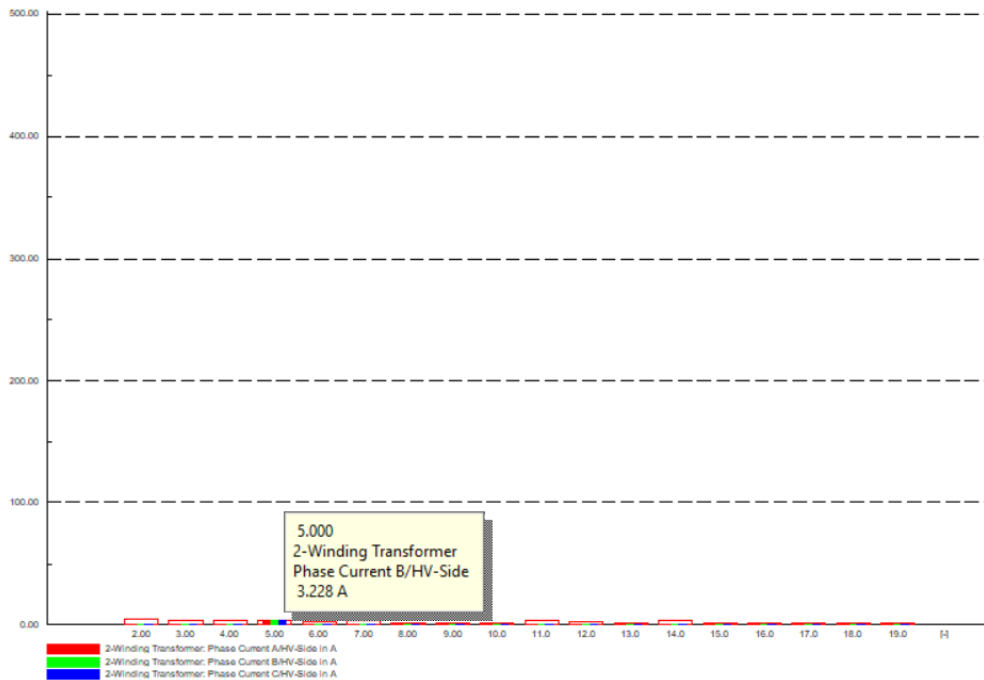
รูปที่ 3-60 ค่ากำลังรวมที่หม้อแปลงไฟฟ้าของBase Case (CP95 Percentile)เมื่อจำลองโมเดลผ่านโปรแกรม DigSILENT



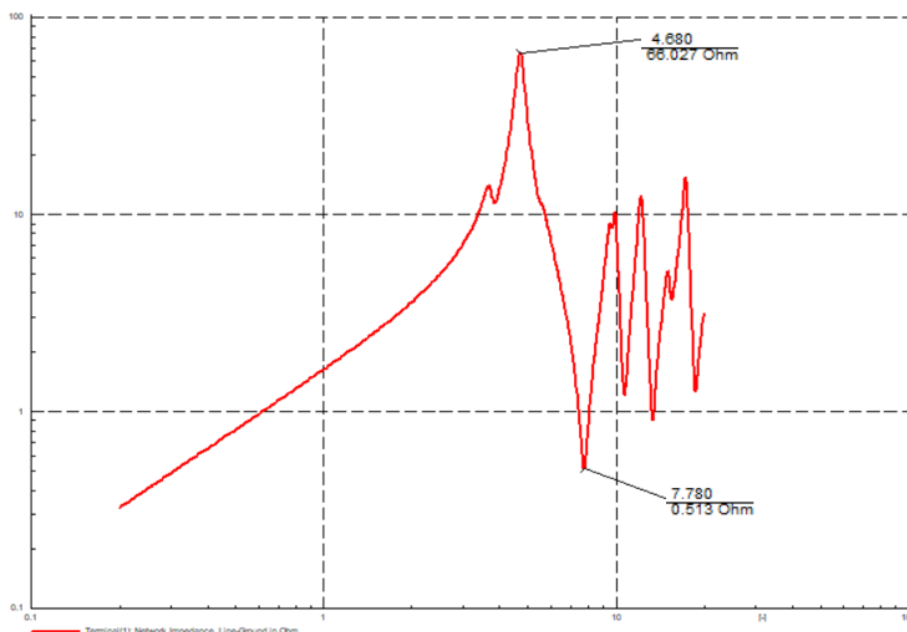
รูปที่ 3-61 ค่ากระแสที่ไหลผ่านชุดตัวเก็บประจุที่สถานีของBase Case (CP95 Percentile)เมื่อจำลองโมเดลผ่านโปรแกรม DigSILENT



รูปที่ 3-62 ผลการวิเคราะห์ค่ากระแสฮาร์มอนิกของระบบ 22 kV สำหรับเฟส A, B และ C



รูปที่ 3-63 ผลการวิเคราะห์ค่ากระแสฮาร์มอนิกของระบบ 115 kV สำหรับเฟส A, B และ C



รูปที่ 3-64 การวิเคราะห์จากกราฟ frequency scan ของระบบ (CP 95 Percentile) ที่สถานี
วิหารแดง

จากรูปที่ 3-40 พบว่าค่ากำลังไฟฟ้ารวมที่บัสของสถานี ประมาณ 21.7 MW เมื่อทำการวิเคราะห์
โหลดโพล์ของระบบ

ตารางที่ 3-8 ค่าที่ได้จากการวัดที่สถานีเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลองโมเดลผ่าน Base Case CP95
Percentile

อันดับฮาร์มอนิกส์	3	5	7	9	11	13
มาตรฐานการเชื่อมต่อระบบ 22 กิโล โวลต์	7	9	6	2	6	5
ค่าที่วัดได้จากสถานี (PQ Meter)	5.305	13.75	4.123	0.703	2.061	0.879
ค่าที่ได้จากการจำลองโมเดล (DigSILENT PowerFactory) Base Case CP95 Percentile	-	13.468	4.058	-	2.471	0.987

ตารางที่ 3-9 ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับในสถานีไฟฟ้าวิหารแดงจากการจำลองผ่านโปรแกรม
DigSILENT ของ Base Case CP 95 Percentile

กำลังไฟฟ้าสูงสุดของสถานีวิหารแดง (MW)	ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับที่พิจารณา (A) ที่ระดับแรงดัน 22 กิโลโวลต์					
21.7	2	4	5	7	11	13
	0.572	4.41	13.468	4.058	2.471	0.987

บทที่ 4

การทดลองการวิเคราะห์สาเหตุปัญหาด้านทรานเซียนต์และฮาร์มอนิกส์ด้วยการจำลองแบบ

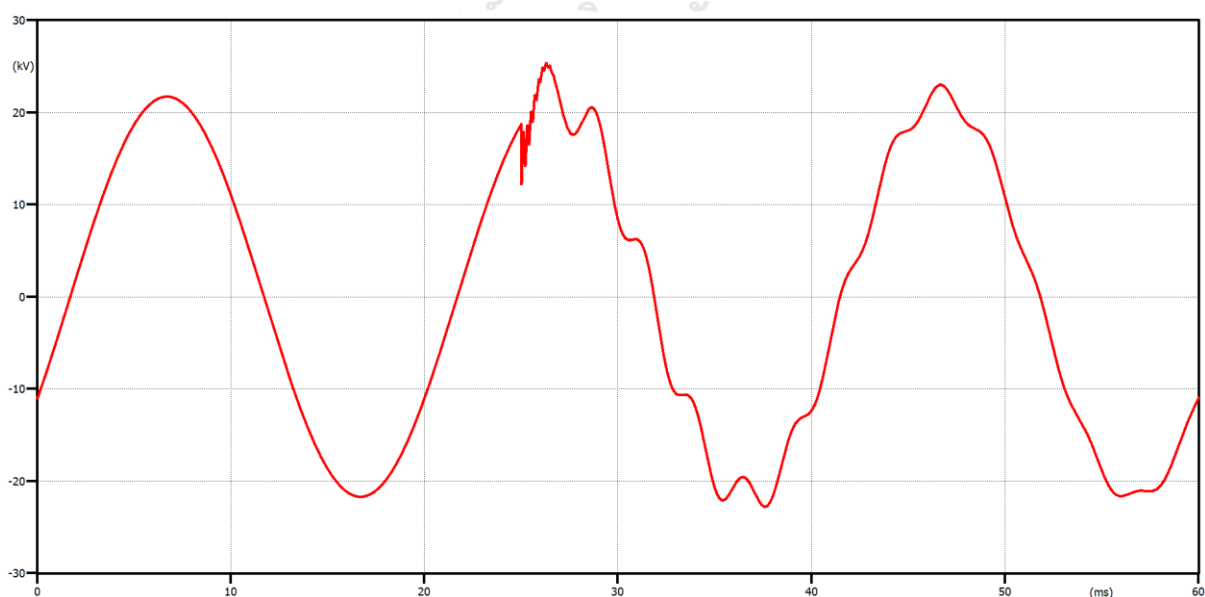
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษาแบบที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ คือ EMTP/ATP และ DigSILENT PowerFactory ซึ่งทำการวิเคราะห์สาเหตุต่างๆโดยแบ่งออกเป็น 2 กรณีหลัก คือ

1. การศึกษาการจำลองแบบสถานีไฟฟ้าด้วยโปรแกรม EMTP/ATP จะจำลองแบบซึ่งประกอบไปด้วย
 - 1.1 การสับ/ปลดชุดตัวเก็บประจุแบบเดี่ยว (Isolated Bank) สถานีวิหารแดง
 - 1.2 การสับ/ปลดชุดตัวเก็บประจุแบบหลายตัว (Back to Back) สถานีวิหารแดง
2. การศึกษาการจำลองแบบสถานีไฟฟ้าด้วยโปรแกรม DigSILENT PowerFactory จะจำลองแบบซึ่งประกอบไปด้วย
 - 2.1 Base Case สถานีวิหารแดง with PV ที่บริเวณการติดตั้งต่างๆ
 - 2.2 Base Case สถานีวิหารแดง with Non-linear Load ที่บริเวณการติดตั้งต่างๆ
 - 2.3 Base Case สถานีวิหารแดง with Fixed Capacitor ที่บริเวณการติดตั้งต่างๆ

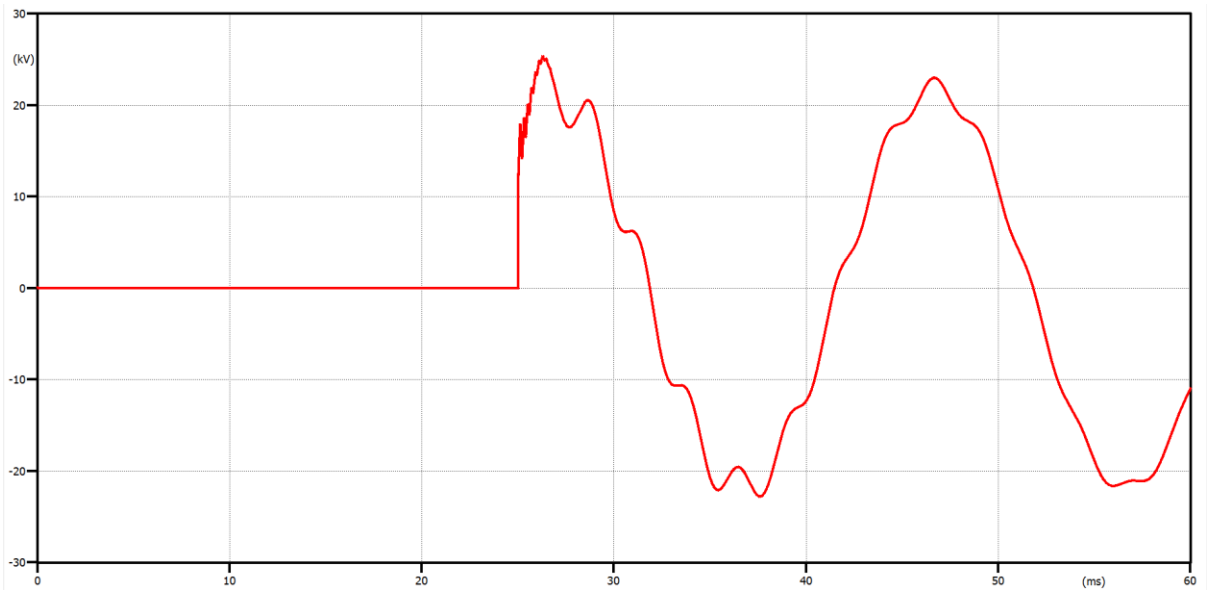
4.1 การจำลองแบบสถานีไฟฟ้าด้วยโปรแกรม EMTP/ATP เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ชุดตัวเก็บประจุ

1. การสับสวิตชชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1

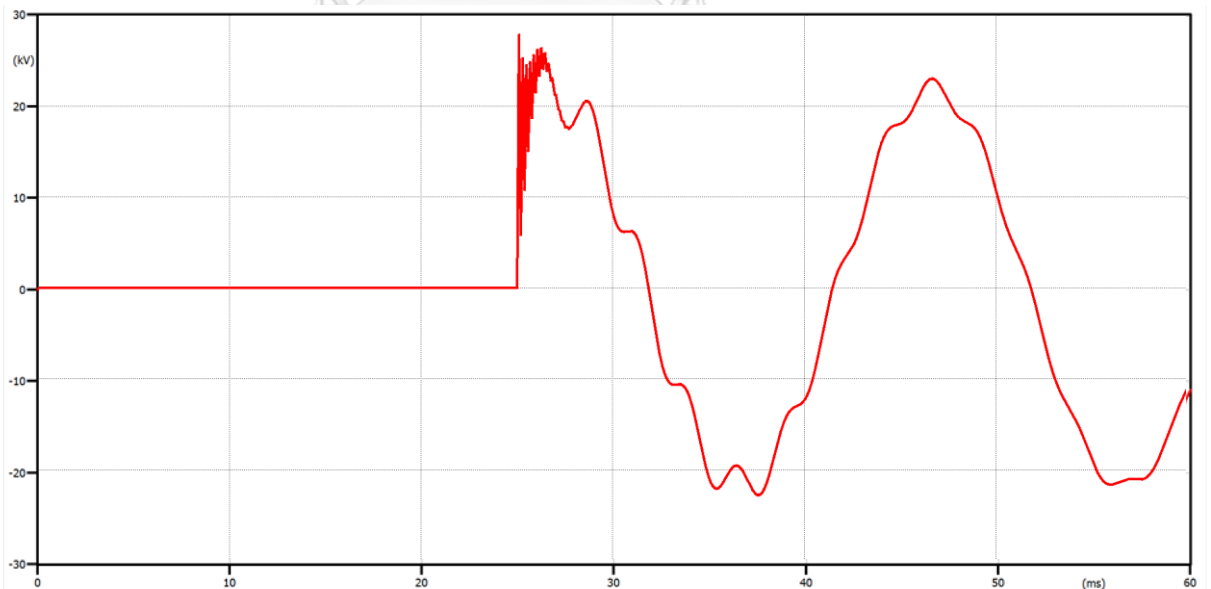
การจำลองจะสับสวิตชชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 เพียงชุดเดียว โดยเป็นการสับชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว



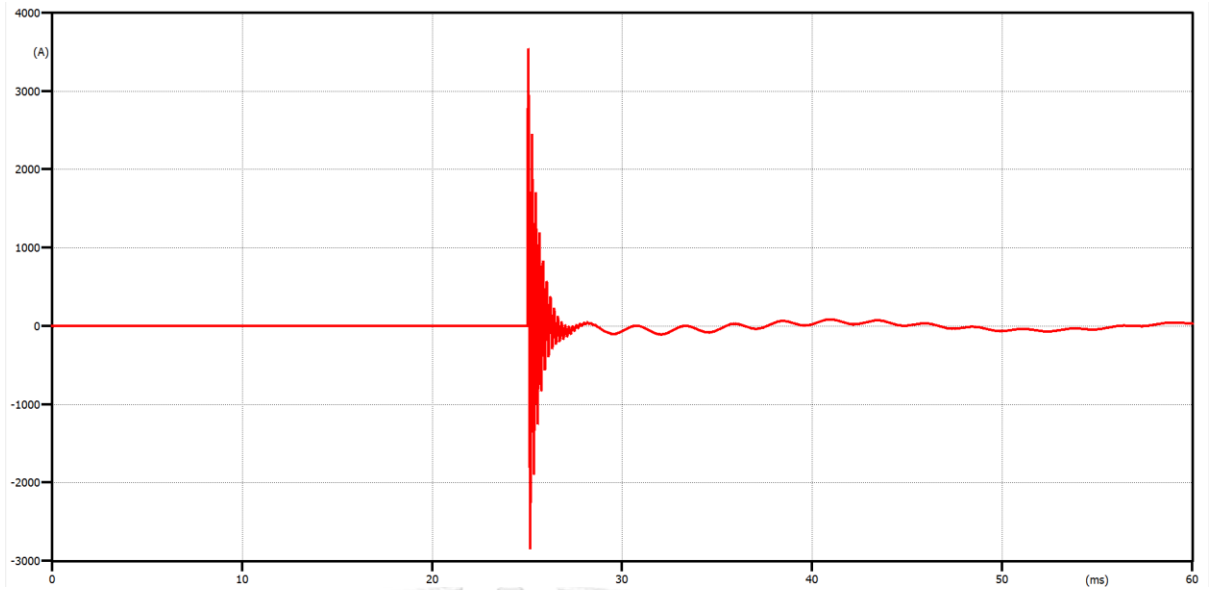
รูปที่ 4-65 รูปคลื่นแรงดันที่จุด V1 (สับสวิตชชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1)



รูปที่ 4-66 รูปคลื่นแรงดันที่จุด V2 (สับสวิตชชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1)

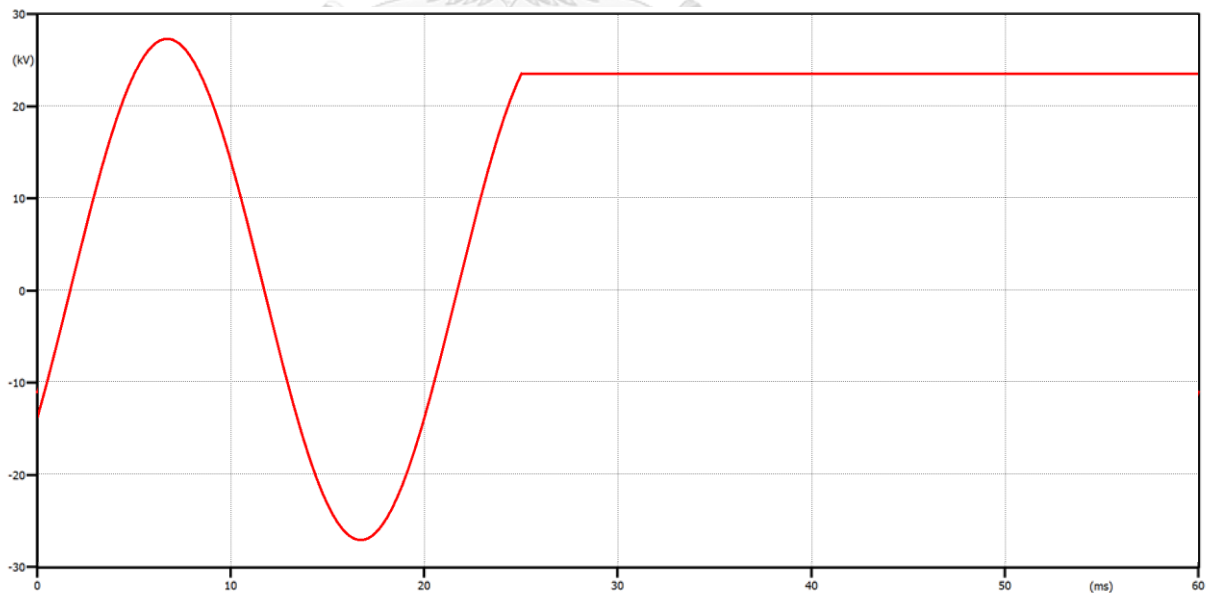


รูปที่ 4-67 รูปคลื่นแรงดันที่จุด V3 (สับสวิตชชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1)



รูปที่ 4-68 รูปคลื่นกระแสที่จุด C3 (สับสวิตชชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1)

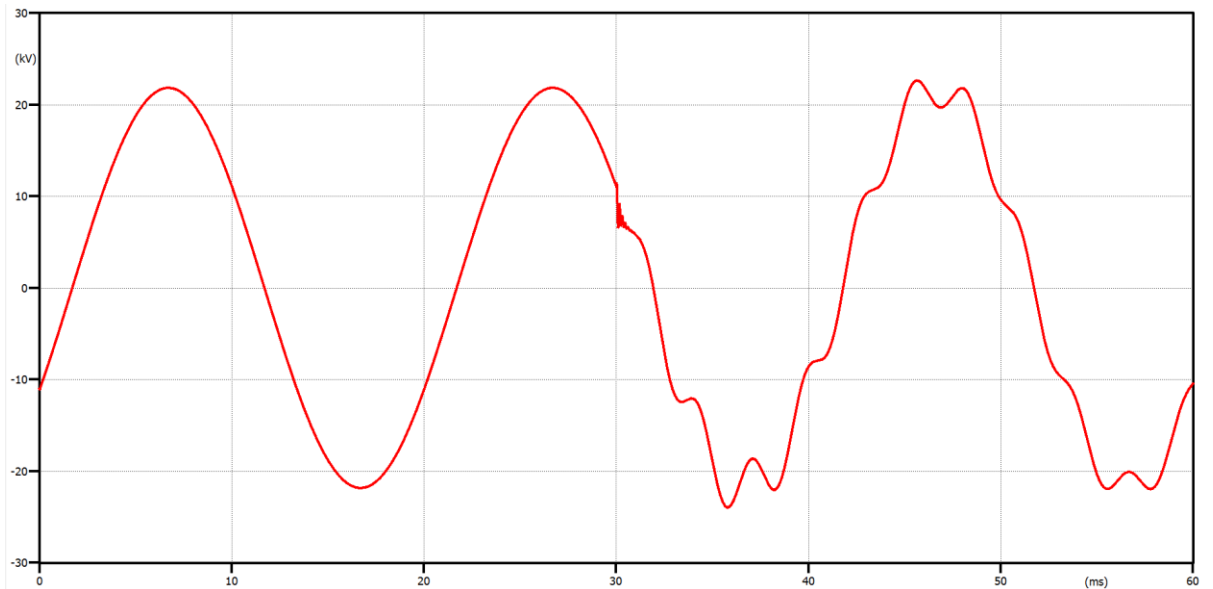
2. การปลดสวิตชชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1



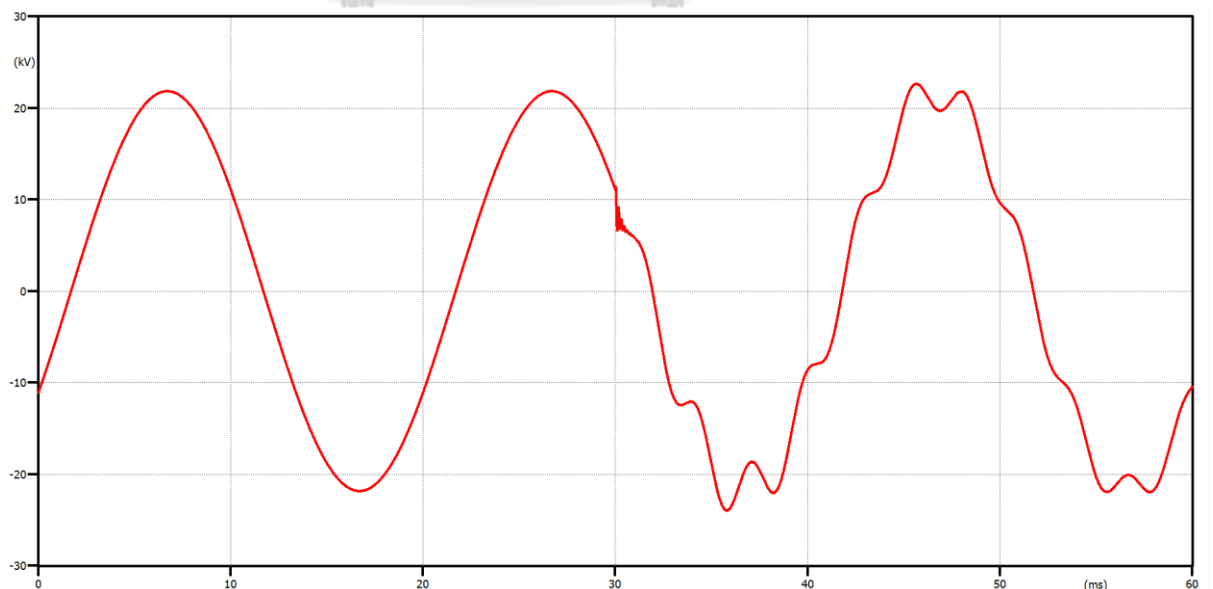
รูปที่ 4-69 รูปคลื่นแรงดันที่จุด V3 (ปลดสวิตชชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1)

3. การสับสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3

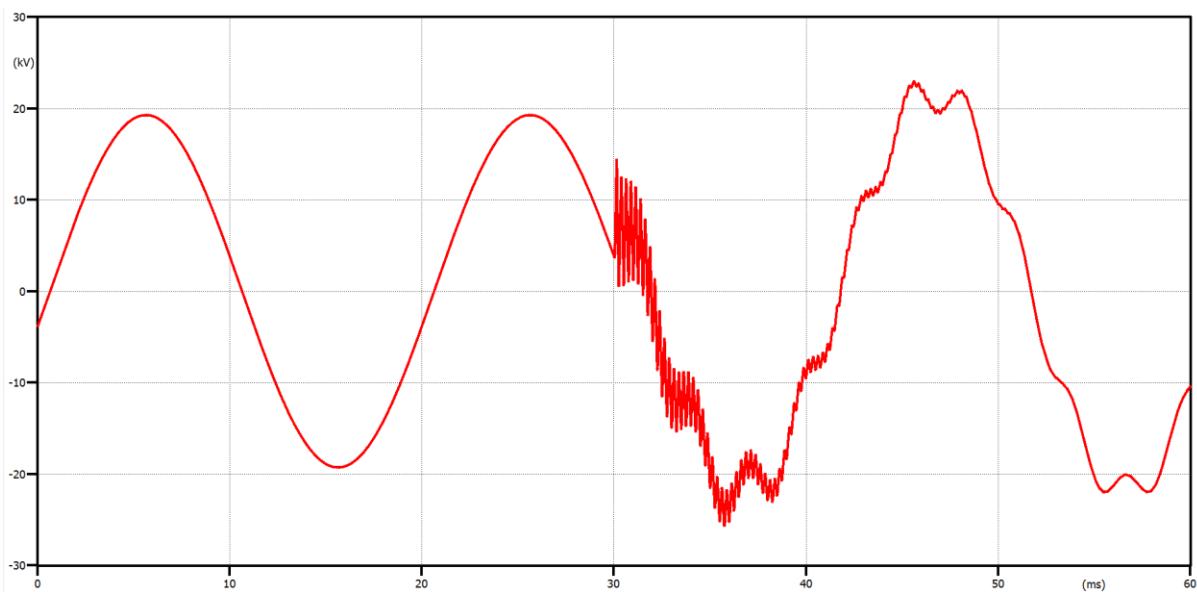
เป็นกรณีการสับสวิตซ์ตัวเก็บประจุแบบ back to back โดยทำการสับสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 และ 2 ก่อนแล้วจึงสับสวิตซ์ตัวเก็บประจุชุดที่ 3 เป็นชุดสุดท้ายสำหรับรูปคลื่นแรงดันและกระแสจากการการจำลอง



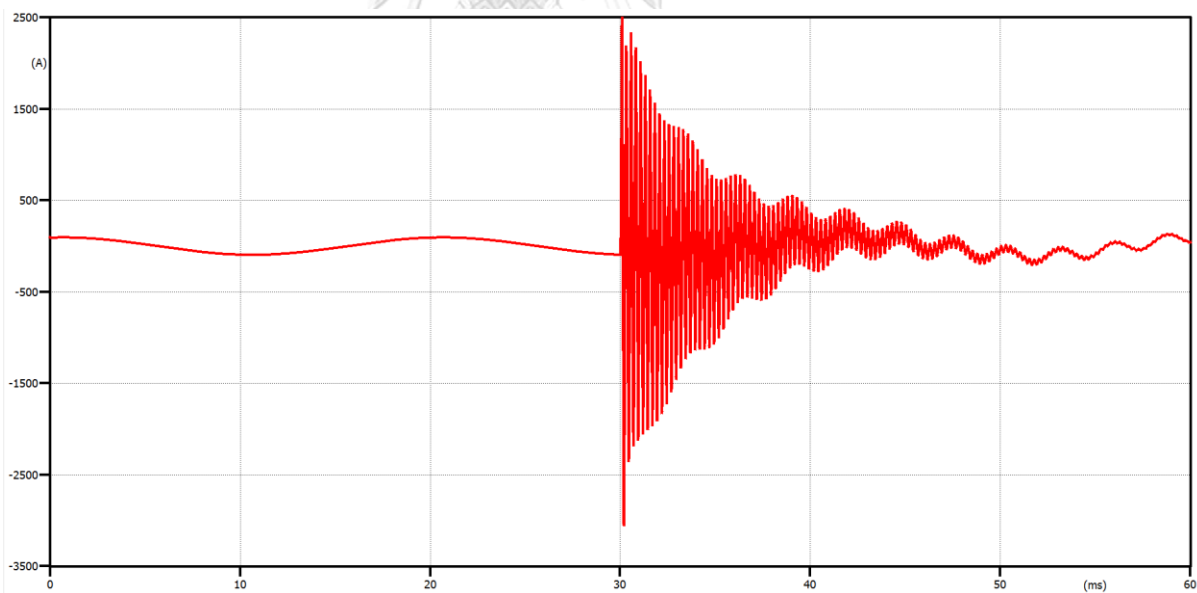
รูปที่ 4-70 รูปคลื่นแรงดันที่จุด V1 (สับสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3)



รูปที่ 4-71 รูปคลื่นแรงดันที่จุด V2 (สับสวิตซ์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3)



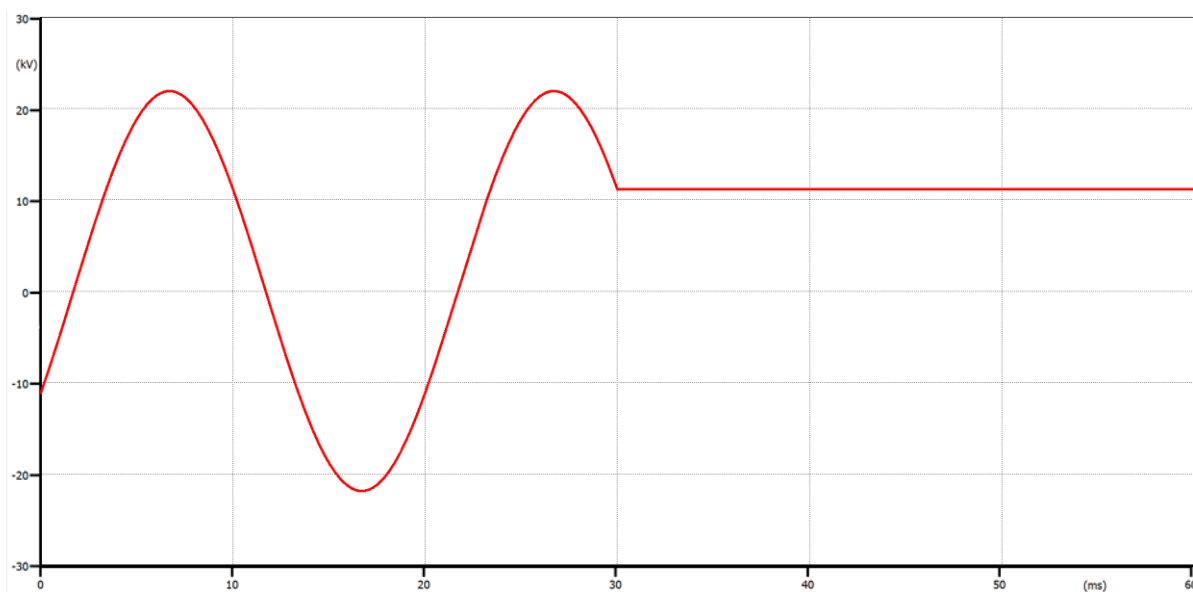
รูปที่ 4-72 รูปคลื่นแรงดันที่จุด V3 (สับสวิตชชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3)



รูปที่ 4-73 รูปคลื่นกระแส C3 (สับสวิตชชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3)

4. การปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3

สำหรับการปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3 นั้นจะปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3 โดยชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 1 และ 2 ยังคงต่ออยู่กับวงจร



รูปที่ 4-74 รูปคลื่นแรงดันที่จุด V3 (ปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุชุดที่ 3)

หมายเหตุ ข้อมูลการทดลองที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ในระบบจริงโหนดจะเป็นโหนดไม่สมดุล
2. ขนาดของพารามิเตอร์และโหนดในระบบจริงอาจมีค่าเปลี่ยนไปที่ใช้ในแบบจำลอง
3. เวลาในการสับสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุของเฟสอื่นๆไม่ทราบแน่ชัด

4.2 การจำลองแบบสถานีไฟฟ้าด้วยโปรแกรม DigSILENT PowerFactory เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ชุดตัวเก็บประจุ

จากการทดลอง Base Case ที่ค่าสถิติ CP95 Percentile พบว่าค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ที่ไหลในระบบ 22 กิโลโวลต์มีค่าบางอันดับที่มีค่าสูงและมีค่าเกินมาตรฐานบางอันดับดังตารางที่ 6 เมื่อนำผลรวมของกระแสทั้งหมดค่ากระแสทั้งหมดที่ไหลผ่านชุดตัวเก็บประจุที่สถานีมีค่าเท่ากับ 65.124 แอมป์ จากการเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE 18 std.2012 พบว่าค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ยังไม่เกิน 135% ของกระแสพิกัดหากนำมาเปรียบเทียบจะพบว่าค่ากระแสทั้งหมดเมื่อรวมกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุนี้ยังไม่เกินขีดจำกัดซึ่งกระแสฮาร์มอนิกส์นี้อาจจะไม่ได้ส่งผลทำให้อุปกรณ์เสียหาย

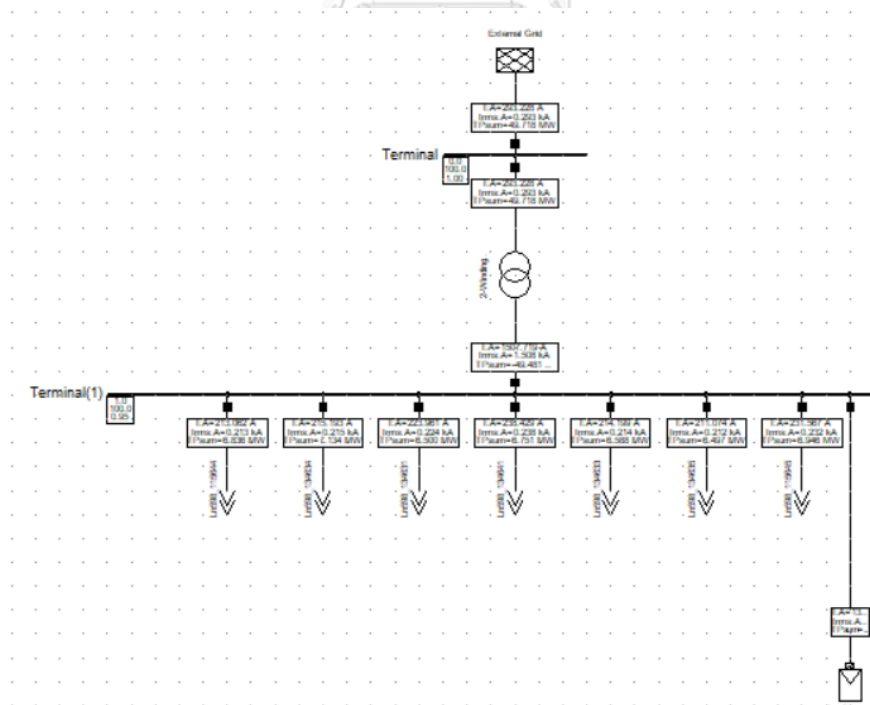
พื้นที่ไหนใดถ้าไม่เกินค่าพิกัดแต่ยิ่งใช้งานไปจะทำให้เกิดความร้อนสะสมที่ตัวอุปกรณ์อายุการทำงานของอุปกรณ์บางชนิดที่สถานีลดลง ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษารณอื่นเพิ่มขึ้นเพื่อดูผลกระทบที่เกิดขึ้นชุดตัวเก็บประจุที่สถานีและเป็นแนวทางในการศึกษาด้านฮาร์มอนิกส์แยกเป็นกรณี ได้แก่

1. Base Case with PV
2. Base Case with Non-linear Load
3. Base Case with Fixed Capacitor

ตารางที่ 4-10 ตารางแสดงการจำลองระบบที่สถานีบริหารแดง

WIA Load (MW)	PV (MW)	Non-Linear Load (MW)	Fix Capacitor (kVar)
21.7	Variable MW	Variable MW	Variable Capacitor

4.2.1 การศึกษาผลกระทบเมื่อกำหนดให้มีโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ (PV) เชื่อมต่อในระบบ 22 กิโลโวลต์ (Base Case CP95 Percentile with PV)



รูปที่ 4-75 การวิเคราะห์โมเดลจากการจำลองระบบสถานีบริหารแดงในโปรแกรม DigSILENT ที่

Base Case เข้ากับระบบโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์

การทดลองเมื่อสถานีไฟฟ้าบริหารแดง จังหวัดสระบุรีเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าโซลาร์ฟาร์มตามขนาดต่างๆที่ระบบ โดยใช้วงจรสมมูลแหล่งจ่ายกระแส (Current Source) แทนแหล่งจ่ายที่ทำให้เกิดฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้น โดยอ้างอิงจากอินเวอร์เตอร์ของผลิตภัณฑ์ที่ใช้จริงระบบไฟฟ้า โดยค่าคุณสมบัติเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ในระบบ (Total Harmonic Distortion) ได้จากรายการเฉพาะของผู้ผลิตรายนั้นๆ ในส่วนผลการทดลองที่นำมาใช้คือ ใช้ค่า THD \leq 4% โดยใช้ผลรวมค่ากระแสฮาร์โมนิกส์ถึงลำดับ 19 กำหนดให้สำหรับค่าคุณสมบัติเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ในระบบ (THD) วัดหน้าโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ที่ใช้มีค่า 3.85% (อิงจากข้อมูลคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ SMA รุ่น SUNNY BOY 3600/5000 Smart Energy Battery Pack Smart Energy)

AC Output

	SB 3600SE-10	SB 5000SE-10
Rated power at 230 V, 50 Hz	3,680 W	4,600 W
Maximum apparent AC power	3,680 VA	5,000 VA
Rated grid voltage	230 V	230 V
Nominal AC voltage	220 V, 230 V, 240 V	220 V, 230 V, 240 V
AC voltage range*	180 V to 280 V	180 V to 280 V
Nominal AC current at 220 V	16 A	20.9 A
Nominal AC current at 230 V	16 A	20 A
Nominal AC current at 240 V	15.3 A	19.2 A
Maximum output current	16 A	22 A
Total harmonic distortion of the output current with total harmonic distortion of the AC voltage < 2%, and AC power > 50% of the rated power	\leq 4%	\leq 4%
Maximum output current under fault conditions	34 A	34 A

รูปที่ 4-76 ค่าคุณสมบัติเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ในระบบ (Total Harmonic Distortion) ของอินเวอร์เตอร์สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการจำลองกับระบบโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์

Description

Type of Harmonic Sources

Balanced, Phase Correct

Unbalanced, Phase Correct

IEC 61000

Hamonics:

	Hamonic Order	la_h/la_1 %	lb_h/lb_1 %	lc_h/lc_1 %	phiA_h-h*phiA_1 deg	phiB_h-h*phiB_1 deg	ph
▶ 1	2	0.04	0.04	0.04	0.	0.	▶
2	3.	0.35	0.35	0.35	0.	0.	
3	4.	0.08	0.08	0.08	0.	0.	
4	5.	1.13	1.13	1.13	0.	0.	
5	6.	0.08	0.08	0.08	0.	0.	
6	7.	0.75	0.75	0.75	0.	0.	
7	8.	0.1	0.1	0.1	0.	0.	
8	9.	0.48	0.48	0.48	0.	0.	
9	10.	0.03	0.03	0.03	0.	0.	
10	11.	0.09	0.09	0.09	0.	0.	
11	12.	0.17	0.17	0.17	0.	0.	
12	13	0.05	0.05	0.05	0	0	

รูปที่ 4-77 ค่ากระแสเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ในระบบ (Total Harmonic Distortion) ที่ใช้ในการจำลองกับระบบโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์

Basic Data	Hammonic Current Injections
Load Flow	Hammonic Source
VDE/IEC Short-Circuit	Hammonic Currents <input type="button" value="▼"/> <input type="button" value="→"/> ... ent Type Library\Hammonic Sources(8)
Complete Short-Circuit	Type of Hammonic Sources Unbalanced, Phase Correct
ANSI Short-Circuit	Hammonic currents referred to <input type="text" value="Fundamental Current"/>
IEC 61363	
DC Short-Circuit	
RMS-Simulation	Norton Equivalent
EMT-Simulation	Resistance, r1h <input type="text" value="99999."/> p.u. 48399511552 Ohm
Hamonics/Power Quality	Reactance, x1h <input type="text" value="99999."/> p.u. 48399511552 Ohm
Optimal Power Flow	Frequency-Dependence, r1h(f) <input type="button" value="▼"/> <input type="button" value="→"/> ...
State Estimation	Frequency-Dependence, x1h(f) <input type="button" value="▼"/> <input type="button" value="→"/> ...
Reliability	Resistance, r2h <input type="text" value="99999."/> p.u. 48399511552 Ohm
Generation Adequacy	Reactance, x2h <input type="text" value="99999."/> p.u. 48399511552 Ohm
Description	Frequency-Dependence, r2h(f) <input type="button" value="▼"/> <input type="button" value="→"/> ...
	Frequency-Dependence, x2h(f) <input type="button" value="▼"/> <input type="button" value="→"/> ...
	Resistance, r0h <input type="text" value="99999."/> p.u. 48399511552 Ohm
	Reactance, x0h <input type="text" value="99999."/> p.u. 48399511552 Ohm
	Frequency-Dependence, r0h(f) <input type="button" value="▼"/> <input type="button" value="→"/> ...
	Frequency-Dependence, x0h(f) <input type="button" value="▼"/> <input type="button" value="→"/> ...

รูปที่ 4 -78 การตั้งค่าระบบ Hamonics/Power Quality ของโรงไฟฟ้าโซล่าเซลล์ที่ใช้ในการจำลองโมเดล

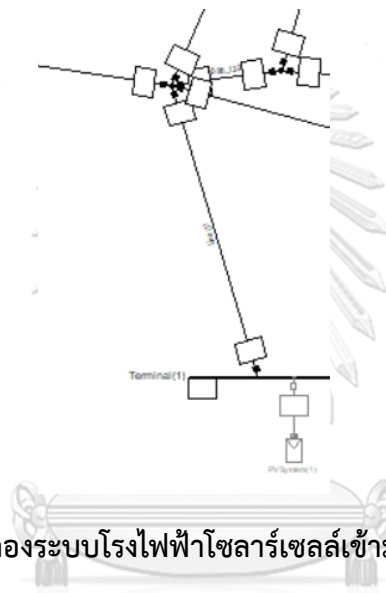
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Basic Data	General Operational Limits Environment Data Advanced Automatic Dispatch
Load Flow	<input type="checkbox"/> Reference Machine Local Controller <input type="text" value="Power Factor"/>
VDE/IEC Short-Circuit	Corresponding Bus Type: PQ
Complete Short-Circuit	External Station Controller <input type="button" value="▼"/> <input type="button" value="→"/> ...
ANSI Short-Circuit	Operating Point
IEC 61363	Active Power
DC Short-Circuit	Active Power <input type="text" value="500."/> kW
RMS-Simulation	Prim. Frequency Bias <input type="text" value="0."/> kW/Hz

รูปที่ 4 -79 การตั้งค่าขนาดโรงไฟฟ้าโซล่าเซลล์ที่ใช้ในการจำลองโมเดลในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

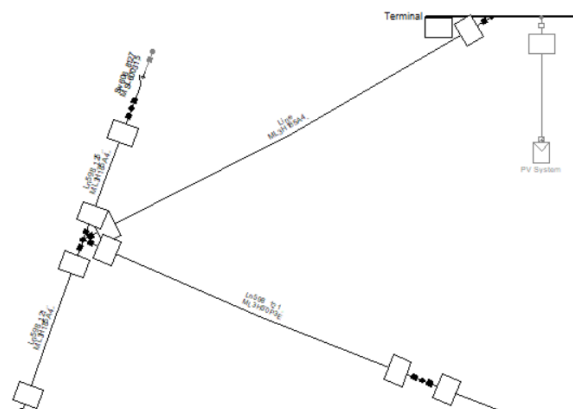
การจำลองระบบโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์เข้ากับระบบไฟฟ้าสถานีวิทยุแดงนั้น จะจำลองโรงไฟฟ้าขนาดต่างๆ โดยเริ่มจากโรงไฟฟ้าขนาด 0.5 MW โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5 MW ไปจนถึง 8 MW การศึกษาการจำลองโมเดลโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์เข้ามาที่สายป้อน 1 โดยการเพิ่มระยะทางของการเชื่อมต่อของโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ เพื่อดูผลของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบว่าส่งผลกระทบต่อชุดตัวเก็บประจุที่สถานี ดังนี้

1. จำลองบริเวณต้นสายติดกับสถานี
2. จำลองบริเวณกลางสายสายป้อนห่างจากสถานี
3. จำลองบริเวณที่ปลายสายห่างจากสถานี



รูปที่ 4 -80 การจำลองระบบโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์เข้ามาบริเวณกลางสายสายป้อน 1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4 -81 การจำลองระบบโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์เข้ามาที่ปลายสายสายป้อน 1

1. การจำลองโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาดต่างๆบริเวณต้นทางติดกับสถานี

ตารางที่ 4-11 ผลจากการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาดต่างๆบริเวณต้นสายสายป้อน 1 เข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

ลำดับ	ขนาดโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ที่จำลองเพื่อเชื่อมต่อในระบบ (MW)	เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกส์ (%THD)	พารามิเตอร์เมื่อมีโซลาเซลล์ติดตั้งที่จุดติดตั้งต้นสาย สายป้อน 1			
			ปริมาณกำลังรวมที่หม้อแปลง (MW)	กระแสที่หม้อแปลงจ่าย (A)	กระแสที่ไหลผ่านชุดตัวเก็บประจุ (A)	กระแสที่ PV จ่าย (A)
1	0.5	3.85	21.199	103.465	65.307	12.6
2	1	3.85	20.697	100.933	65.379	25.197
3	1.5	3.85	20.196	98.404	65.388	37.791
4	2	3.85	19.695	95.875	65.397	50.318
5	2.5	3.85	19.194	93.349	65.406	62.968
6	3	3.85	18.692	90.824	65.414	75.552
7	3.5	3.85	18.191	88.302	65.422	88.133
8	4	3.85	17.69	85.781	65.43	100.711
9	4.5	3.85	17.189	83.262	65.438	113.286
10	5	3.85	16.688	80.746	65.446	125.859
11	5.5	3.85	16.187	78.232	65.454	138.429
12	6	3.85	15.646	75.72	65.461	150.996
13	6.5	3.85	15.185	73.21	65.469	163.561
14	7	3.85	14.684	70.703	65.476	176.124
15	7.5	3.85	14.183	68.199	65.483	188.684
16	8	3.85	13.682	65.699	65.489	201.242

จากผลการทดลองเมื่อมีการจำลองระบบโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์เข้ามาในระบบไฟฟ้าแรงสูง ที่สถานีบริหารแดง สายป้อน 1 บริเวณบริเวณต้นสายใกล้สถานี จะพบว่าโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์จะทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายในขณะเดียวกันก็จะจ่ายกระแสฮาร์โมนิกส์ด้วย โดยขนาดปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์สูงสุดที่กำหนดให้ไม่เกิน 4% ตามข้อมูลทางเทคนิคเฉพาะของผลิตภัณฑ์นั้น และสมมุติค่าที่ได้จากการวัดจริงมีค่า 3.85% ซึ่งจะพบว่าปริมาณกำลังรวมของหม้อแปลงที่จ่ายให้ระบบมีค่าสัมพันธ์ตามขนาดกำลังของโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ (MW) โดยที่ค่าปริมาณกำลังรวมหม้อแปลงสูงสุดมีค่า 21.199 เมกะวัตต์เมื่อมีโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาด 0.5 เมกะวัตต์เชื่อมต่ออยู่และค่ากำลังรวมที่หม้อแปลงจ่ายต่ำสุดมีค่า 13.682 เมกะวัตต์เมื่อมีโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาด 8 เมกะวัตต์เชื่อมต่ออยู่ ส่วนค่ากระแสที่หม้อแปลงจ่ายและค่ากระแสที่โรงไฟฟ้าโซลาเซลล์จ่ายจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดกำลังของโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ (MW) ตามลำดับ

ตารางที่ 4-12 ผลของกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่พิจารณาเกิดขึ้นเนื่องจากจากการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาดต่างๆบริเวณต้นสายสายป้อน 1 เข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

ลำดับ	ขนาดโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ที่จำลอง เพื่อเชื่อมต่อในระบบ (MW)	ปริมาณกระแสฮาร์โมนิกที่พิจารณา (A)							
		2	4	5	7	8	10	11	13
1	0.5	0.286	3.295	15.639	4.607	0.081	0.123	1.223	0.968
2	1	0.281	3.264	14.826	4.558	0.077	0.113	1.235	0.954
3	1.5	0.275	3.216	14.013	4.443	0.075	0.112	1.234	0.953
4	2	0.267	3.186	13.201	4.395	0.072	0.111	1.232	0.951
5	2.5	0.261	3.156	12.39	4.346	0.069	0.11	1.231	0.95
6	3	0.256	3.126	11.579	4.294	0.066	0.108	1.23	0.949
7	3.5	0.25	3.096	10.769	4.248	0.062	0.107	1.228	0.948
8	4	0.245	3.066	9.959	4.2	0.059	0.106	1.227	0.947
9	4.5	0.239	3.036	9.15	4.151	0.056	0.104	1.226	0.946
10	5	0.234	3.006	8.342	4.102	0.053	0.103	1.225	0.944
11	5.5	0.228	2.976	7.534	4.054	0.05	0.102	1.223	0.943
12	6	0.223	2.946	6.726	4.005	0.047	0.1	1.222	0.942
13	6.5	0.217	2.916	5.919	3.957	0.044	0.099	1.221	0.941
14	7	0.212	2.886	5.113	3.908	0.041	0.098	1.219	0.94
15	7.5	0.206	2.856	4.307	3.86	0.038	0.097	1.218	0.938
16	8	0.201	2.826	3.501	3.811	0.035	0.095	1.217	0.937

ผลการทดลองเมื่อมีการจำลองระบบโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์เข้ามาในระบบไฟฟ้าแรงสูง ที่สถานีบริหาร แดง สายป้อน 1 บริเวณต้นสายสายป้อน 1 เมื่อพิจารณาผลของกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง แปรผกผันกับขนาดโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ที่เชื่อมต่อในระบบไฟฟ้า (MW) โดยที่ค่ากระแสฮาร์โมนิก อันดับที่ 5 มีปริมาณมากที่สุด คือ 15.639 แอมป์ เมื่อเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาด 0.5 เมกกะ วัตต์ และค่ากระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 8 มีปริมาณน้อยสุด คือ 0.035 แอมป์ เมื่อเชื่อมต่อกับ โรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาด 8 เมกกะวัตต์ ตามลำดับ

2. การจำลองโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาดต่างๆบริเวณกลางสายสายป้อน 1

ตารางที่ 4-13 ผลจากการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาดต่างๆบริเวณกึ่งกลางสายป้อน 1 เข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

ลำดับ	ขนาดโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ที่จำลองเพื่อเชื่อมต่อในระบบ (MW)	เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิก (%THD)	จุดติดตั้งกลางสาย สายป้อน 1			
			ปริมาณกำลังรวมที่หม้อแปลง (MW)	กระแสที่หม้อแปลงจ่าย (A)	กระแสที่ไหลผ่านชุดตัวเก็บประจุ (A)	กระแสที่ PV จ่าย (A)
1	0.5	3.85	21.195	103.44	65.372	12.667
2	1	3.85	20.691	100.888	65.383	25.313
3	1.5	3.85	20.188	98.342	65.393	37.938
4	2	3.85	19.685	95.803	65.402	50.541
5	2.5	3.85	19.183	93.27	65.412	63.125
6	3	3.85	18.682	90.744	65.42	75.688
7	3.5	3.85	18.181	88.224	65.429	88.232
8	4	3.85	17.682	85.711	65.437	100.757
9	4.5	3.85	17.182	83.205	65.444	113.263
10	5	3.85	16.684	80.705	65.451	125.751
11	5.5	3.85	16.186	78.212	65.457	138.221
12	6	3.85	15.689	75.727	65.463	150.674
13	6.5	3.85	15.193	73.249	65.469	163.11
14	7	3.85	14.697	70.778	65.474	175.529
15	7.5	3.85	14.202	68.316	65.478	187.931
16	8	3.85	13.702	65.861	65.483	200.318

จากผลการทดลองเมื่อมีการจำลองระบบโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์เข้ามาในระบบไฟฟ้าแรงสูง ที่สถานีบริหารแดง สายป้อน 1 บริเวณบริเวณกึ่งกลางสายป้อน จะพบว่าโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์จะทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายในขณะเดียวกันก็จะจ่ายกระแสฮาร์โมนิกด้วย โดยขนาดปริมาณกระแสฮาร์โมนิกสูงสุดที่กำหนดให้ไม่เกิน 4% ตามข้อมูลทางเทคนิคเฉพาะของผลิตภัณฑ์นั้น และสมมุติค่าที่ได้จากการวัดจริงมีค่า 3.85% ซึ่งจะพบว่าปริมาณกำลังรวมของหม้อแปลงที่จ่ายให้ระบบมีค่าสัมพันธ์ตามขนาดกำลังของโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ (MW) โดยที่ค่าปริมาณกำลังรวมหม้อแปลงสูงสุดมีค่า 21.195 เมกะวัตต์เมื่อมีโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาด 0.5 เมกะวัตต์เชื่อมต่ออยู่และค่ากำลังรวมที่หม้อแปลงจ่ายต่ำสุดมีค่า 13.702 เมกะวัตต์เมื่อมีโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาด 8 เมกะวัตต์เชื่อมต่ออยู่ ส่วนค่ากระแสที่หม้อแปลงจ่ายและค่ากระแสที่โรงไฟฟ้าโซลาเซลล์จ่ายจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดกำลังของโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ (MW) ตามลำดับ

ตารางที่ 4-14 ผลของกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่พิจารณาเกิดขึ้นเนื่องจากการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาดต่างๆบริเวณบริเวณกลางสายสายป้อน 1 เข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

ลำดับ	ขนาดโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ที่จำลอง เพื่อเชื่อมต่อในระบบ (MW)	ปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับที่พิจารณา (A)							
		2	4	5	7	8	10	11	13
1	0.5	0.284	3.274	15.551	4.529	0.08	0.114	1.235	0.951
2	1	0.278	3.242	14.65	4.467	0.076	0.111	1.232	0.946
3	1.5	0.272	3.211	13.752	4.406	0.071	0.109	1.23	0.94
4	2	0.267	3.18	12.856	4.354	0.067	0.107	1.227	0.935
5	2.5	0.261	3.148	11.962	4.284	0.063	0.104	1.224	0.93
6	3	0.256	3.117	11.07	4.224	0.059	0.102	1.222	0.924
7	3.5	0.25	3.086	10.181	4.163	0.055	0.1	1.219	0.919
8	4	0.245	3.054	9.294	4.103	0.05	0.097	1.216	0.913
9	4.5	0.239	3.023	8.409	4.042	0.046	0.095	1.214	0.908
10	5	0.234	2.992	7.528	3.982	0.042	0.093	1.211	0.903
11	5.5	0.228	2.961	6.651	3.922	0.038	0.091	1.209	0.897
12	6	0.223	2.93	5.779	3.863	0.034	0.088	1.206	0.892
13	6.5	0.217	2.899	4.915	3.804	0.03	0.086	1.204	0.886
14	7	0.212	2.868	4.061	3.744	0.026	0.084	1.201	0.881
15	7.5	0.206	2.837	3.226	3.689	0.022	0.082	1.199	0.876
16	8	0.201	2.806	2.429	3.624	0.018	0.079	1.196	0.871

ผลการทดลองเมื่อมีการจำลองระบบโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์เข้ามาในระบบไฟฟ้าแรงสูง ที่สถานีวิทยารแดง สายป้อน 1 บริเวณกลางสายสายป้อน 1 เมื่อพิจารณาผลของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงแปรผกผันกับขนาดโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ที่เชื่อมต่อในระบบไฟฟ้า (MW) โดยที่ค่ากระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 มีปริมาณมากที่สุด คือ 15.551 แอมป์ เมื่อเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาด 0.5 เมกกะวัตต์ และค่ากระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 8 มีปริมาณน้อยที่สุด คือ 0.018 แอมป์ เมื่อเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาด 8 เมกกะวัตต์ ตามลำดับ

3. การจำลองโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาดต่างๆบริเวณปลายสายสายป้อน 1

ตารางที่ 4-15 ผลจากการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาดต่างๆบริเวณปลายสายสายป้อน 1 เข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

ลำดับ	ขนาดโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ที่จำลองเพื่อเชื่อมต่อในระบบ (MW)	เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิก (%THD)	จุดติดตั้งปลายสาย สายป้อน 1			
			ปริมาณกำลังรวมที่หม้อแปลง (MW)	กระแสที่หม้อแปลงจ่าย (A)	กระแสที่ไหลผ่านชุดตัวเก็บประจุ (A)	กระแสที่ PV จ่าย (A)
1	0.5	3.85	21.192	103.42	65.373	12.762
2	1	3.85	20.687	100.861	65.384	25.454
3	1.5	3.85	20.184	98.322	65.393	38.08
4	2	3.85	19.684	95.803	65.402	50.642
5	2.5	3.85	19.187	93.302	65.409	63.142
6	3	3.85	18.692	90.82	65.414	75.583
7	3.5	3.85	18.199	88.358	65.419	87.968
8	4	3.85	17.709	85.915	65.422	100.299
9	4.5	3.85	17.222	83.491	65.424	112.577
10	5	3.85	16.736	81.087	65.425	124.806
11	5.5	3.85	16.254	78.703	65.425	136.988
12	6	3.85	15.773	76.34	65.423	149.123
13	6.5	3.85	15.295	73.997	65.42	161.215
14	7	3.85	14.819	71.677	65.416	173.266
15	7.5	3.85	14.345	69.379	65.411	185.276
16	8	3.85	13.873	67.105	65.405	197.248

จากผลการทดลองเมื่อมีการจำลองระบบโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์เข้ามาในระบบไฟฟ้าแรงสูง ที่สถานีบริหารแดง สายป้อน 1 บริเวณปลายสาย จะพบว่าโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์จะทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายในขณะเดียวกันก็จะจ่ายกระแสฮาร์มอนิกด้วย โดยขนาดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกสูงสุดที่กำหนดให้ไม่เกิน 4% ตามข้อมูลทางเทคนิคเฉพาะของผลิตภัณฑ์นั้น และสมมติค่าที่ได้จากการวัดจริงมีค่า 3.85% ซึ่งจะพบว่าปริมาณกำลังรวมของหม้อแปลงที่จ่ายให้ระบบมีค่าสัมพันธ์ตามขนาดกำลังของโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ (MW) โดยที่ค่าปริมาณกำลังรวมหม้อแปลงสูงสุดมีค่า 21.192 เมกะวัตต์เมื่อมีโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาด 0.5 เมกะวัตต์เชื่อมต่ออยู่และค่ากำลังรวมที่หม้อแปลงจ่ายต่ำสุดมีค่า 13.873 เมกะวัตต์เมื่อมีโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาด 8 เมกะวัตต์เชื่อมต่ออยู่ ส่วนค่ากระแสที่หม้อแปลงจ่ายและค่ากระแสที่โรงไฟฟ้าโซลาเซลล์จ่ายจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดกำลังของโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ (MW) ตามลำดับ

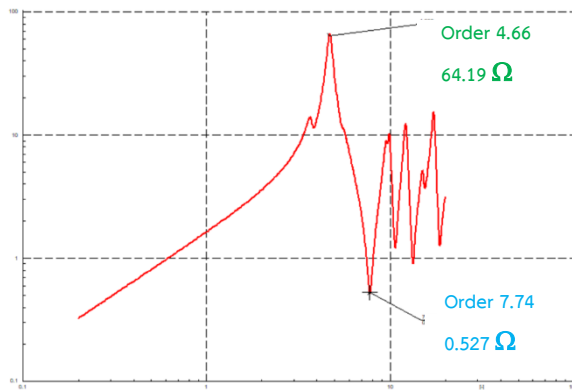
ตารางที่ 4-16 ผลของกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับที่พิจารณาเกิดขึ้นเนื่องจากการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาดต่างๆบริเวณบริเวณปลายสายสายป้อน 1 เข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT

PowerFactory

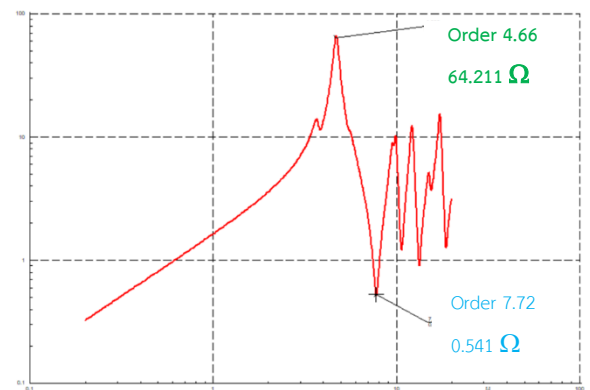
ลำดับ	ขนาดโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ที่จำลองเพื่อเชื่อมต่อในระบบ (MW)	ปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับที่พิจารณา (A)							
		2	4	5	7	8	10	11	13
1	0.5	0.284	3.274	15.538	4.527	0.079	0.114	1.235	0.95
2	1	0.278	3.243	14.629	4.464	0.075	0.111	1.232	0.944
3	1.5	0.273	3.212	13.725	4.401	0.071	0.109	1.229	0.938
4	2	0.267	3.181	12.83	4.339	0.067	0.106	1.226	0.931
5	2.5	0.262	3.15	11.946	4.278	0.062	0.104	1.223	0.925
6	3	0.256	3.12	11.075	4.218	0.058	0.101	1.221	0.919
7	3.5	0.251	3.089	10.222	4.16	0.054	0.099	1.218	0.913
8	4	0.245	3.06	9.393	4.103	0.05	0.097	1.216	0.908
9	4.5	0.24	3.03	8.596	4.048	0.047	0.095	1.214	0.903
10	5	0.235	3.001	7.841	3.995	0.044	0.093	1.212	0.898
11	5.5	0.23	2.972	7.143	3.944	0.042	0.092	1.21	0.894
12	6	0.224	2.944	6.522	3.897	0.04	0.09	1.208	0.89
13	6.5	0.219	2.916	6.003	3.852	0.039	0.089	1.207	0.887
14	7	0.214	2.889	5.618	3.81	0.039	0.088	1.206	0.885
15	7.5	0.209	2.863	5.395	3.772	0.039	0.088	1.205	0.884
16	8	0.204	2.837	5.358	3.738	0.041	0.088	1.204	0.883

ผลการทดลองเมื่อมีการจำลองระบบโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์เข้ามาในระบบไฟฟ้าแรงสูง ที่สถานีบริหาร แดง สายป้อน 1 บริเวณปลายสาย เมื่อพิจารณาผลของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงแปรผกผันกับขนาดโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ที่เชื่อมต่อในระบบไฟฟ้า (MW) โดยที่ค่ากระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 มีปริมาณมากที่สุด คือ 15.538 แอมป์ เมื่อเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาด 0.5 เมกกะวัตต์ และค่าค่ากระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 8 มีปริมาณน้อยที่สุด คือ 0.041 แอมป์ เมื่อเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาด 8 เมกกะวัตต์ ตามลำดับ

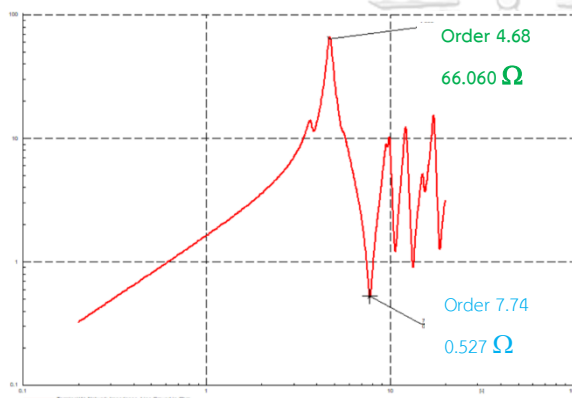
ผลของ Frequency Scan เมื่อมีการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาดต่างๆ ณ บริเวณที่กำหนด



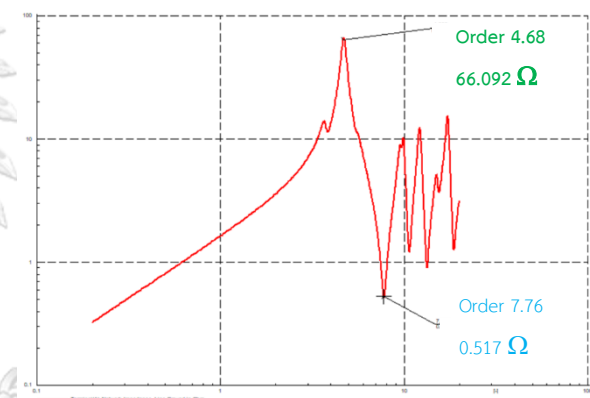
4 -18a บริเวณต้นสาย



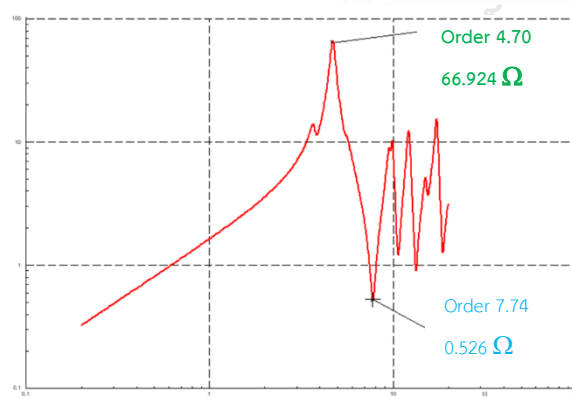
4 -19a บริเวณต้นสาย



4 -18b บริเวณกลางสาย



4 -19b บริเวณกลางสาย



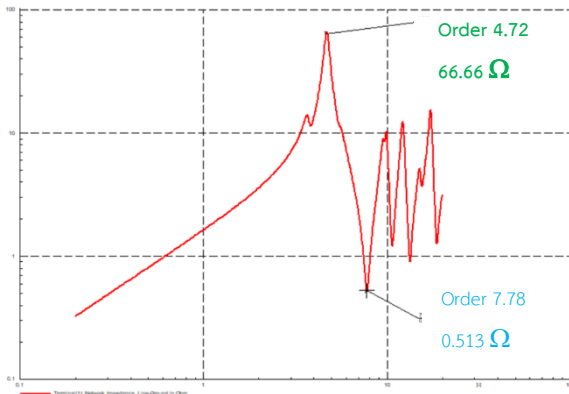
4 -18c บริเวณปลายสาย



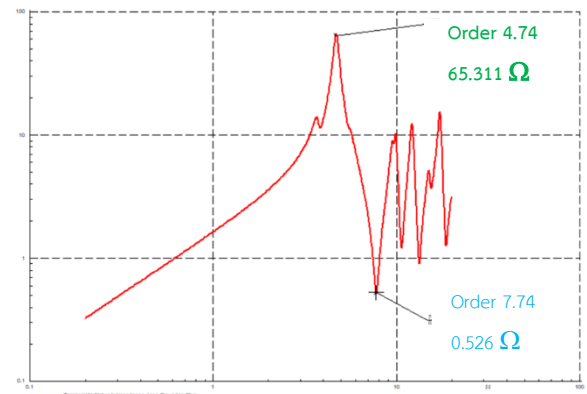
4 -19c บริเวณปลายสาย

รูปที่ 4- 82 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 0.5 MW

รูปที่ 4-83 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 1 MW



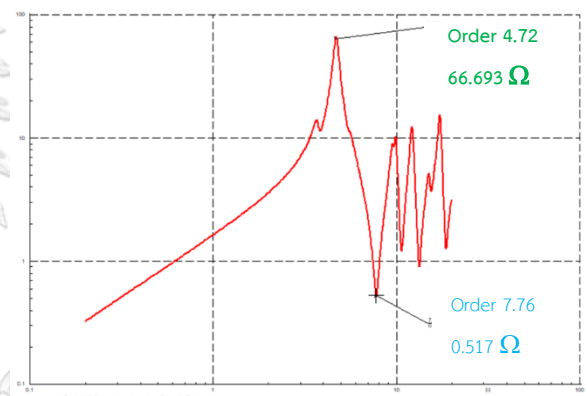
4 -20a บริเวณต้นสาย



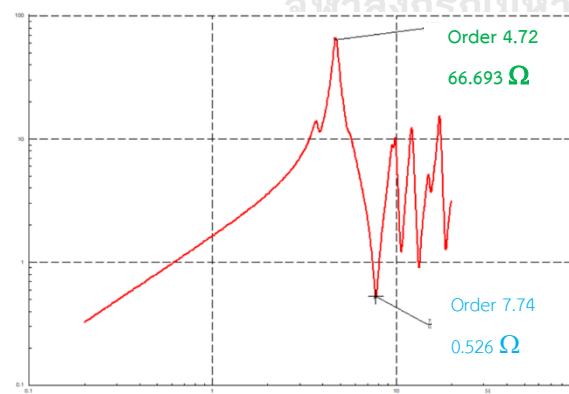
4 -21a บริเวณต้นสาย



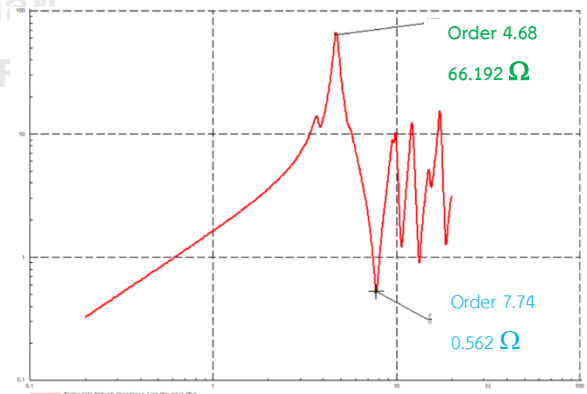
4 -20b บริเวณกลางสาย



4 -21b บริเวณกลางสาย



4 -20c บริเวณปลายสาย



4 -21c บริเวณปลายสาย

รูปที่ 4 -84 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 1.5 MW

รูปที่ 4 -85 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 2 MW



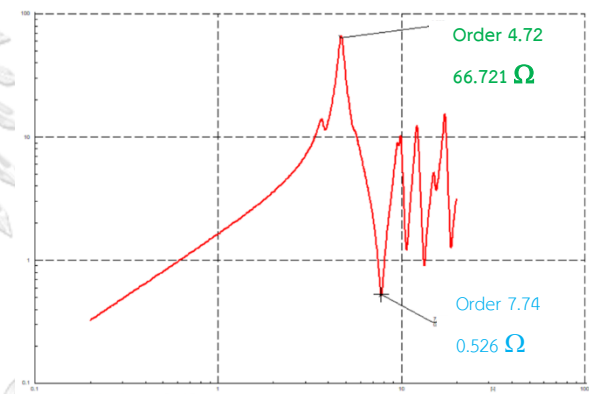
4 -22a บริเวณต้นสาย



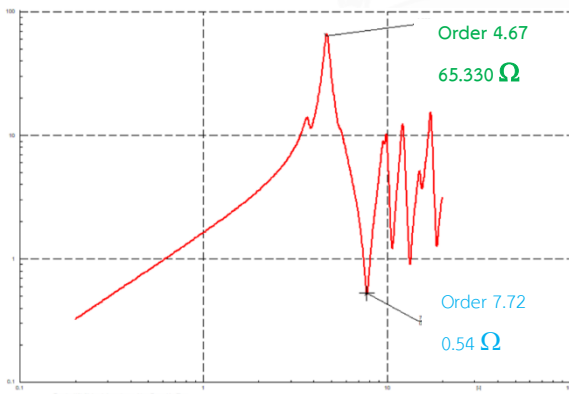
4 -23a บริเวณต้นสาย



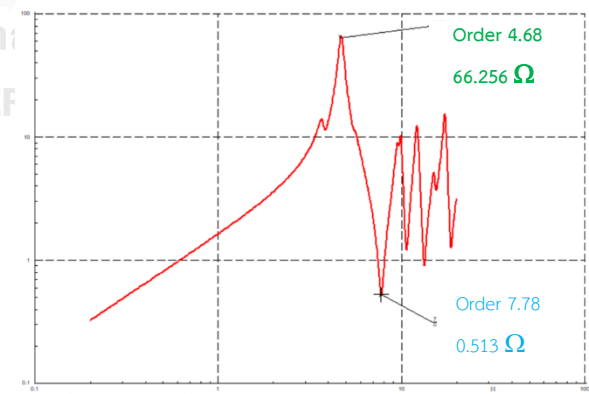
4 -22b บริเวณกลางสาย



4 -23b บริเวณกลางสาย



4 -22c บริเวณปลายสาย



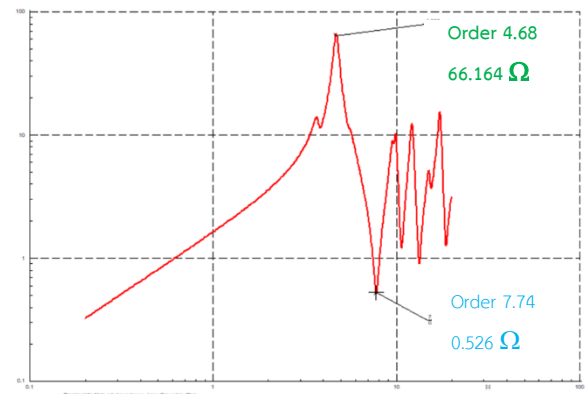
4 -23c บริเวณปลายสาย

รูปที่ 4 -86 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 2.5 MW

รูปที่ 4 -87 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 3 MW



4 -24a บริเวณต้นสาย



4 -25a บริเวณต้นสาย



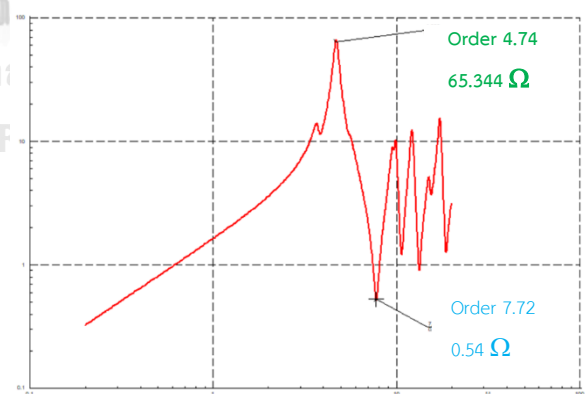
4 -24b บริเวณกลางสาย



4 -25b บริเวณกลางสาย



4 -24c บริเวณปลายสาย



4 -25c บริเวณปลายสาย

รูปที่ 4 -88 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 3.5 MW

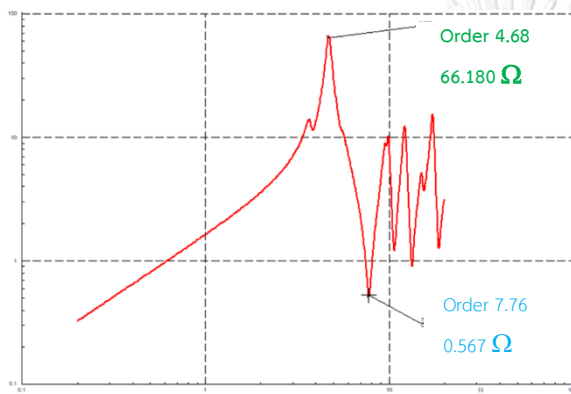
รูปที่ 4- 89 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 4 MW



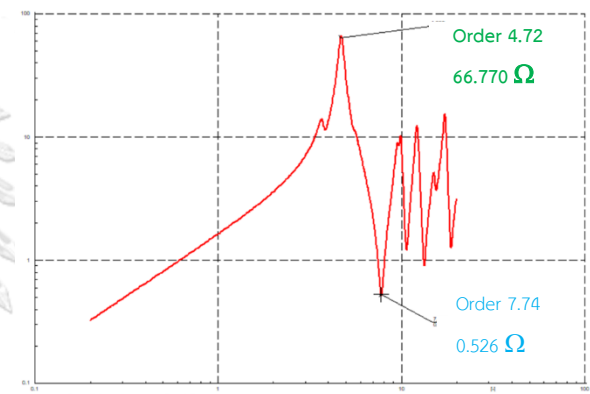
4 -26a บริเวณต้นสาย



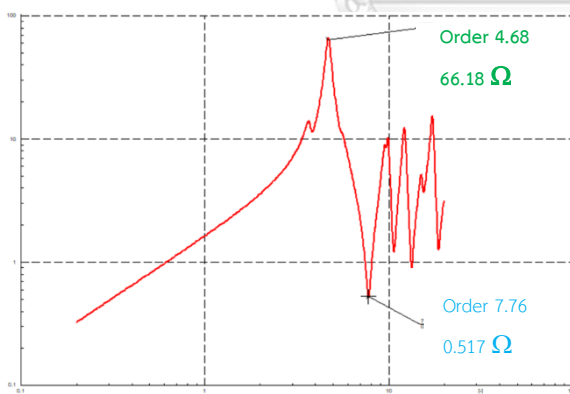
4 -27a บริเวณต้นสาย



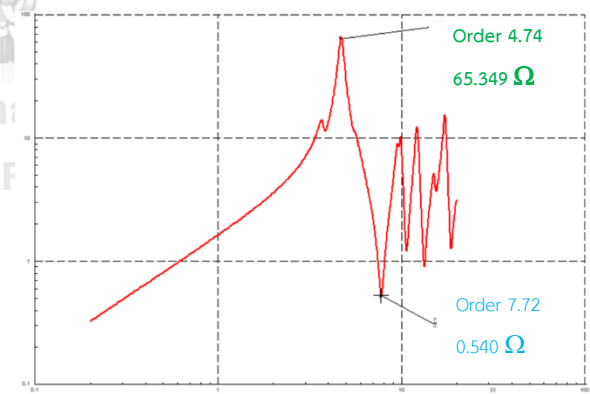
4 -26b บริเวณกลางสาย



4 -27b บริเวณกลางสาย



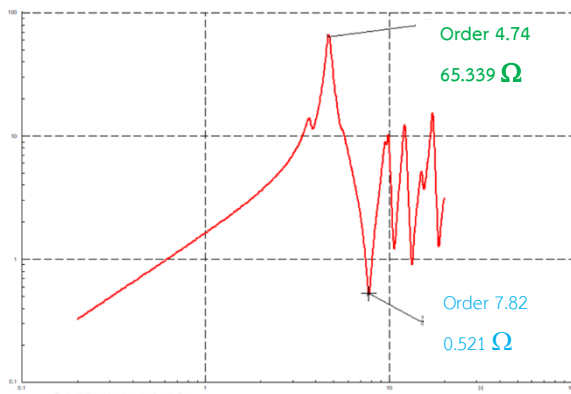
4 -26c บริเวณปลายสาย



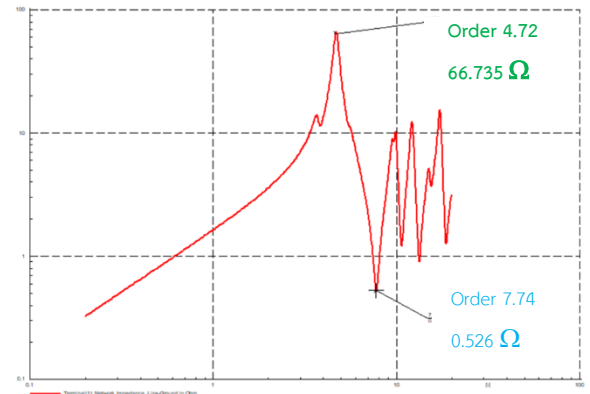
4 -27c บริเวณปลายสาย

รูปที่ 4 -90 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 4.5 MW

รูปที่ 4 -91 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 5 MW



4 -28a บริเวณต้นสาย



4 -29a บริเวณต้นสาย



4 -28b บริเวณกลางสาย



4 -29b บริเวณกลางสาย



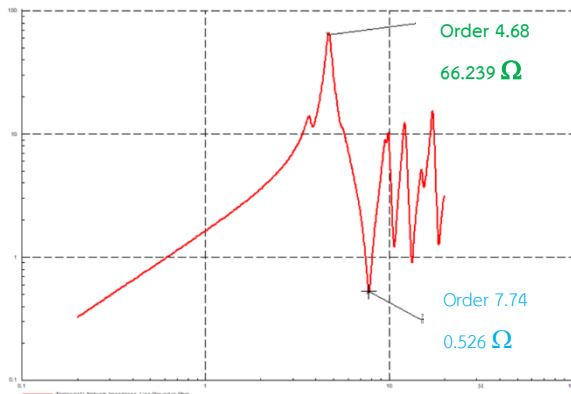
4 -28c บริเวณปลายสาย



4 -29c บริเวณปลายสาย

รูปที่ 4 -92 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 5.5 MW

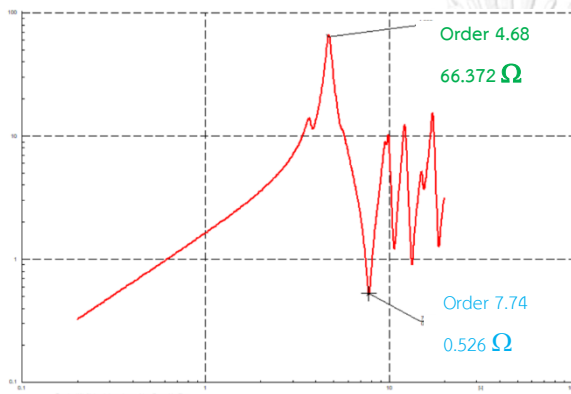
รูปที่ 4 -93 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 6 MW



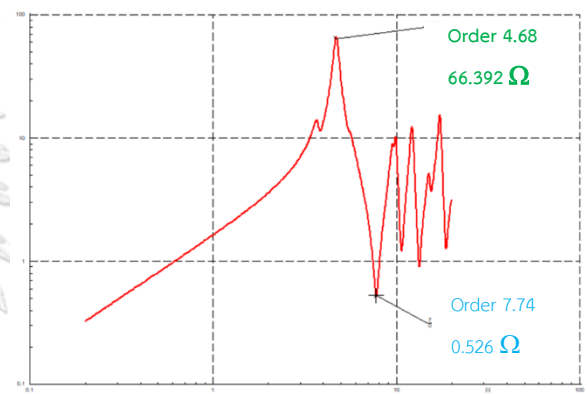
4 -30a บริเวณต้นสาย



4 -31a บริเวณต้นสาย



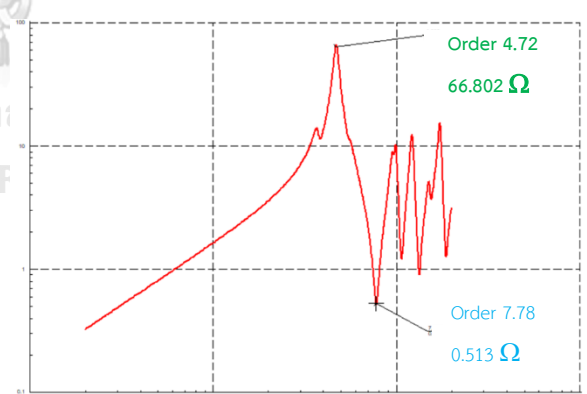
4 -30b บริเวณกลางสาย



4 -31b บริเวณกลางสาย



4 -30c บริเวณปลายสาย



4 -31c บริเวณปลายสาย

รูปที่ 4 -94 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 6.5 MW

รูปที่ 4 -95 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 7 MW



4 -32a บริเวณต้นสาย



4 -33a บริเวณต้นสาย



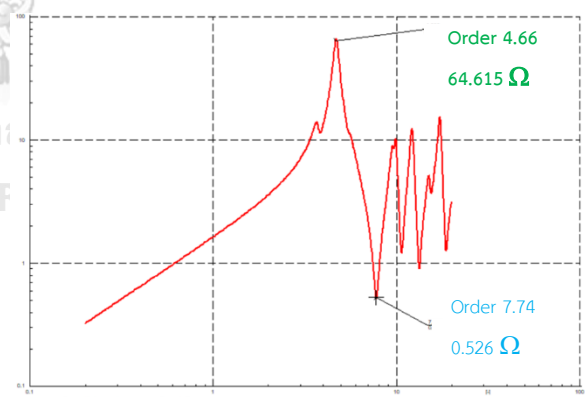
4 -32b บริเวณกลางสาย



4 -33b บริเวณกลางสาย



4 -32c บริเวณปลายสาย



4 -33c บริเวณปลายสาย

รูปที่ 4 -96 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 7.5 MW

รูปที่ 4 -97 (a,b,c) ติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ ขนาด 8 MW

ตารางที่ 4-17 ผลของ Frequency Scan ที่เกิดขึ้น เมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ที่บริเวณต้นสาย สายป้อน 1

ลำดับ	ขนาดโรงไฟฟ้า โซลาเซลล์ (MW)	ติดตั้งโรงไฟฟ้าต้นสาย สายป้อน 1			
		Maximum Palarell Resonance		Maximum Series Resonance	
		Order	Impedance (Ohm)	Order	Impedance (Ohm)
1	0.5	4.660	64.190	7.740	0.527
2	1	4.660	64.211	7.720	0.541
3	1.5	4.720	66.660	7.780	0.513
4	2	4.740	65.311	7.740	0.526
5	2.5	4.740	65.315	7.740	0.526
6	3	4.740	65.319	7.720	0.541
7	3.5	4.680	66.148	7.760	0.517
8	4	4.680	66.164	7.740	0.526
9	4.5	4.680	66.180	7.760	0.517
10	5	4.700	67.021	7.780	0.513
11	5.5	4.740	65.339	7.820	0.521
12	6	4.720	66.735	7.740	0.526
13	6.5	4.680	66.239	7.740	0.526
14	7	4.660	64.426	7.760	0.517
15	7.5	4.680	66.266	7.740	0.526
16	8	4.740	65.357	7.840	0.533

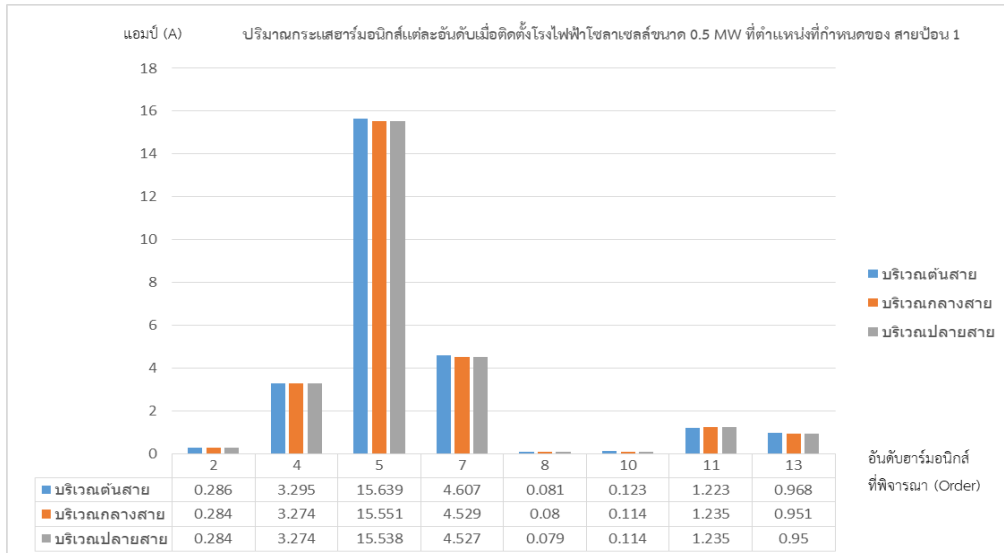
ตารางที่ 4 -18 ผลของ Frequency Scan ที่เกิดขึ้น เมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ที่กลางสาย สายป้อน 1

ลำดับ	ขนาดโรงไฟฟ้า โซลาเซลล์ (MW)	ติดตั้งโรงไฟฟ้ากลางสาย สายป้อน 1			
		Maximum Palarell Resonance		Maximum Series Resonance	
		Order	Impedance (Ohm)	Order	Impedance (Ohm)
1	0.5	4.680	66.060	7.740	0.527
2	1	4.680	66.092	7.760	0.517
3	1.5	4.660	64.279	7.760	0.517
4	2	4.720	66.693	7.760	0.517
5	2.5	4.680	66.180	7.780	0.513
6	3	4.720	66.721	7.740	0.526
7	3.5	4.700	67.049	7.760	0.517
8	4	4.700	67.068	7.740	0.526
9	4.5	4.680	66.180	7.760	0.567
10	5	4.720	66.770	7.740	0.526
11	5.5	4.720	66.770	7.740	0.526
12	6	4.680	66.352	7.720	0.540
13	6.5	4.680	66.372	7.740	0.526
14	7	4.680	66.392	7.740	0.526
15	7.5	4.700	67.183	7.740	0.526
16	8	4.660	64.633	7.740	0.526

ตารางที่ 4-19 ผลของ Frequency Scan ที่เกิดขึ้น เมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ที่ปลายสาย สายบ่อน 1

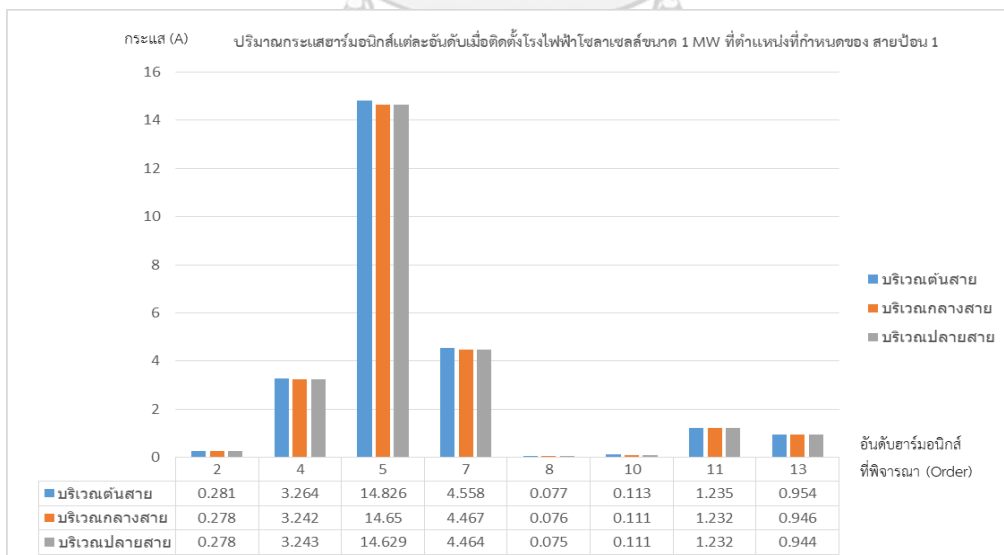
ลำดับ	ขนาดโรงไฟฟ้า โซลาเซลล์ (MW)	ติดตั้งโรงไฟฟ้าปลายสายสายบ่อน 1			
		Maximum Parallel Resonance		Maximum Series Resonance	
		Order	Impedance (Ohm)	Order	Impedance (Ohm)
1	0.5	4.700	66.924	7.740	0.526
2	1	4.740	65.310	7.740	0.526
3	1.5	4.720	66.693	7.740	0.526
4	2	4.680	66.192	7.740	0.562
5	2.5	4.470	65.330	7.720	0.540
6	3	4.680	66.256	7.780	0.513
7	3.5	4.720	66.753	7.740	0.526
8	4	4.740	65.344	7.720	0.540
9	4.5	4.680	66.180	7.760	0.517
10	5	4.740	65.349	7.720	0.540
11	5.5	4.740	65.351	7.740	0.526
12	6	4.720	66.795	7.820	0.521
13	6.5	4.740	65.353	7.740	0.526
14	7	4.720	66.802	7.780	0.513
15	7.5	4.740	65.353	7.740	0.526
16	8	4.660	64.615	7.740	0.526

กราฟความสัมพันธ์แต่ละกรณีเมื่อมีการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาดต่างๆที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา
กรณีที่ 1 เมื่อมีการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 0.5 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่
พิจารณา



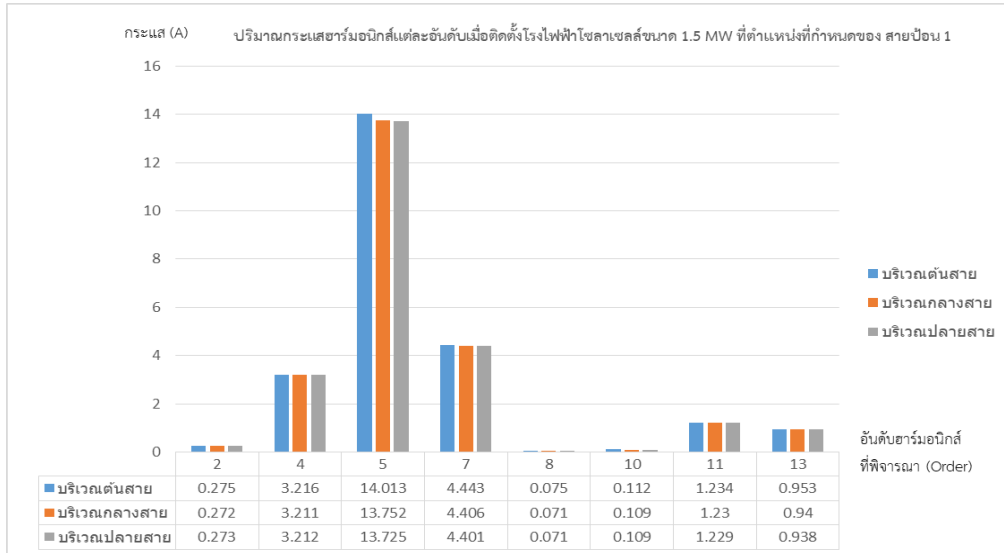
รูปที่ 4-98 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์
ขนาด 0.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 2 เมื่อมีการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 1 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่
พิจารณา



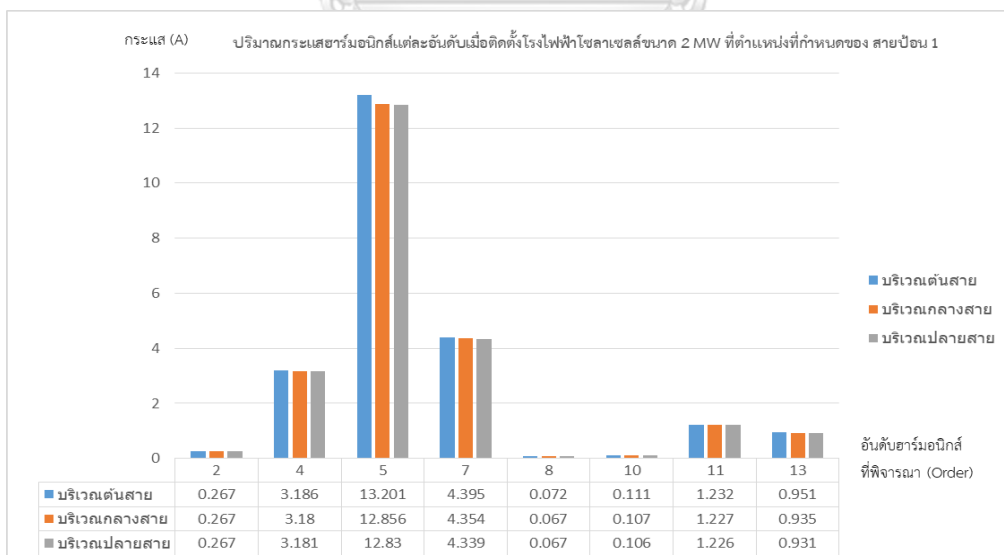
รูปที่ 4-99 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์
ขนาด 1 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 3 เมื่อมีการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 1.5 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



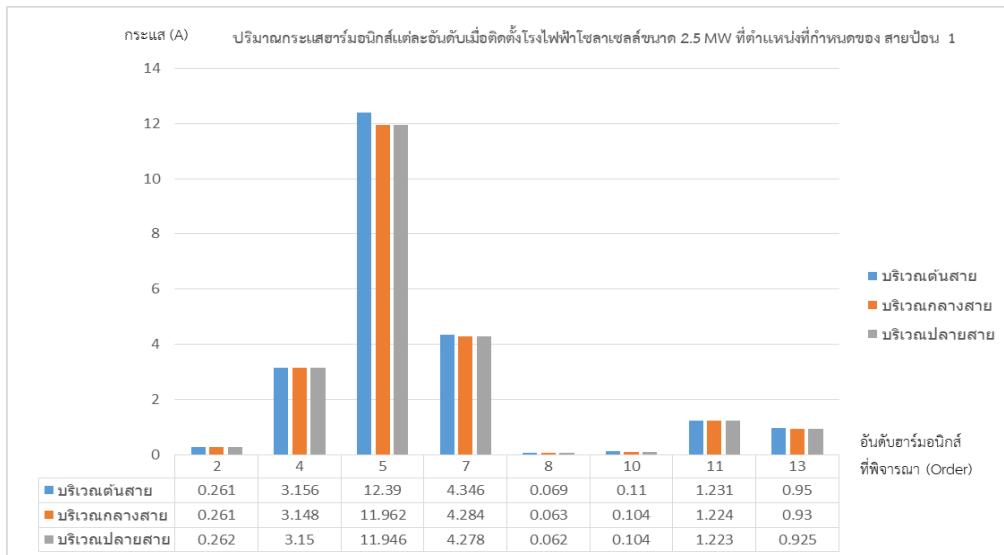
รูปที่ 4-100 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 1.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 4 เมื่อมีการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 2 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



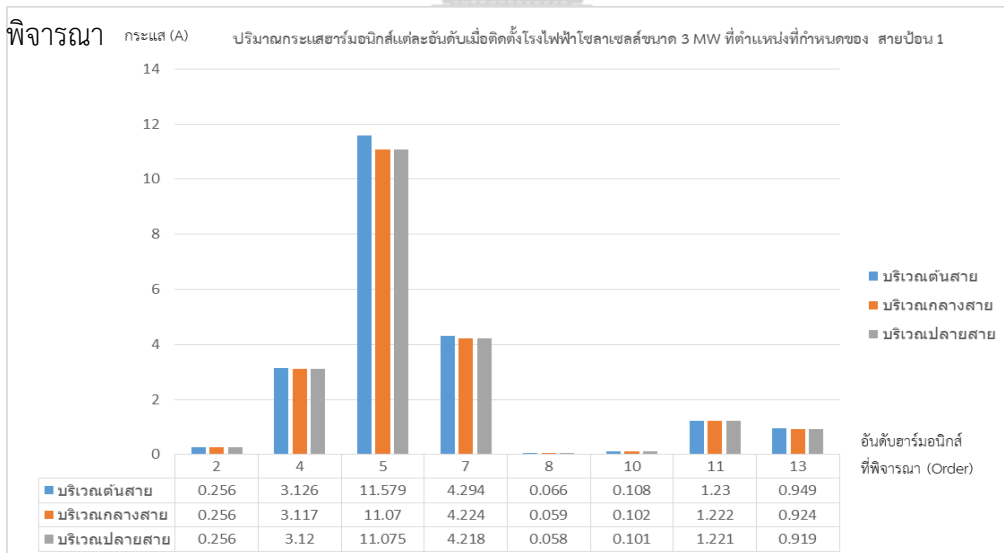
รูปที่ 4-101 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 2 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 5 เมื่อมีการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 2.5 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



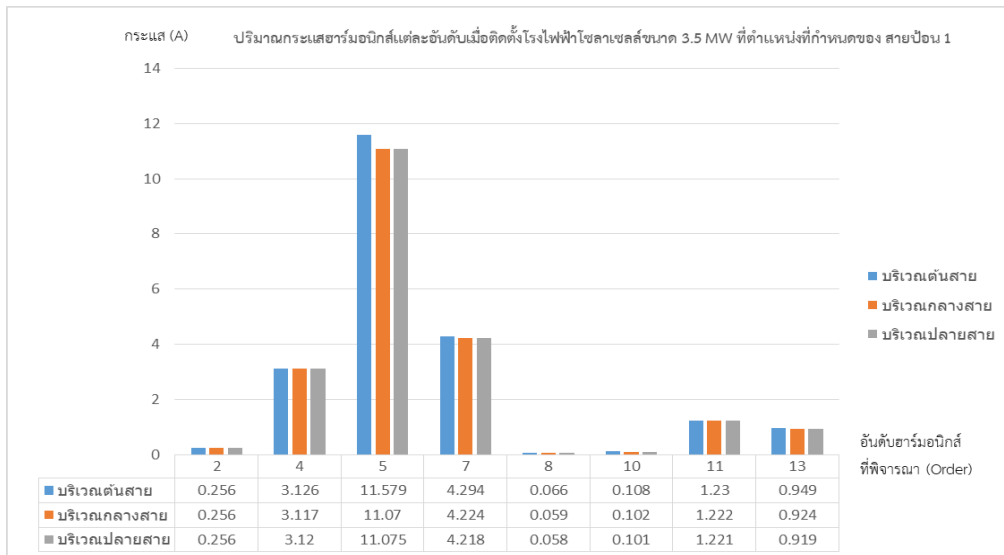
รูปที่ 4-102 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 2.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 6 เมื่อมีการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 3 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



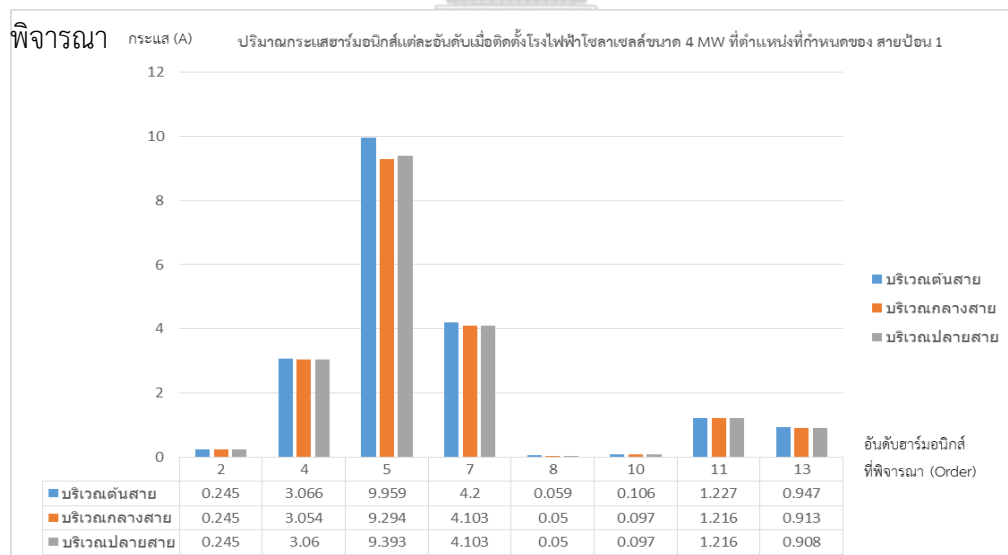
รูปที่ 4-103 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 3 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 7 เมื่อมีการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 3.5 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



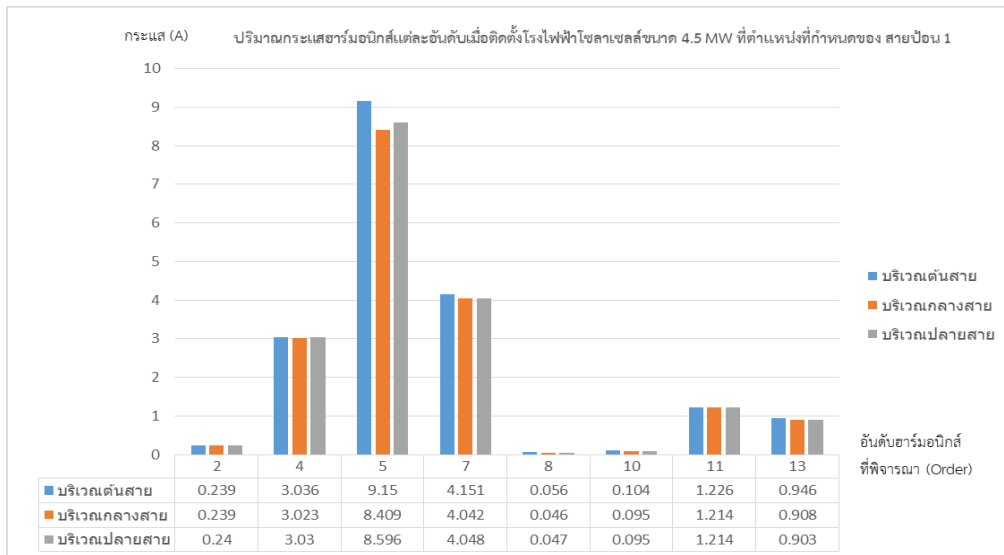
รูปที่ 4-104 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 3.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 8 เมื่อมีการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 4 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



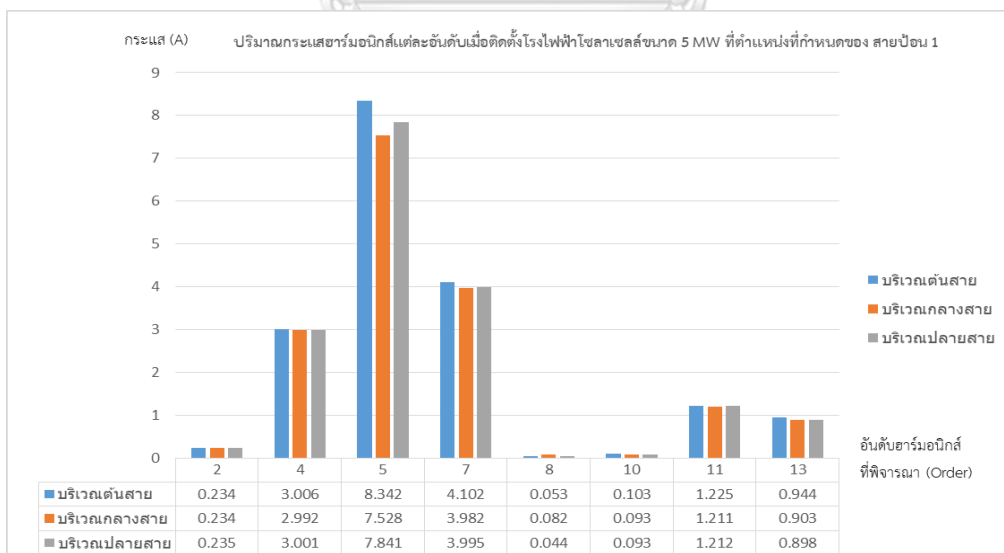
รูปที่ 4-105 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 4 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 9 เมื่อมีการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 4.5 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



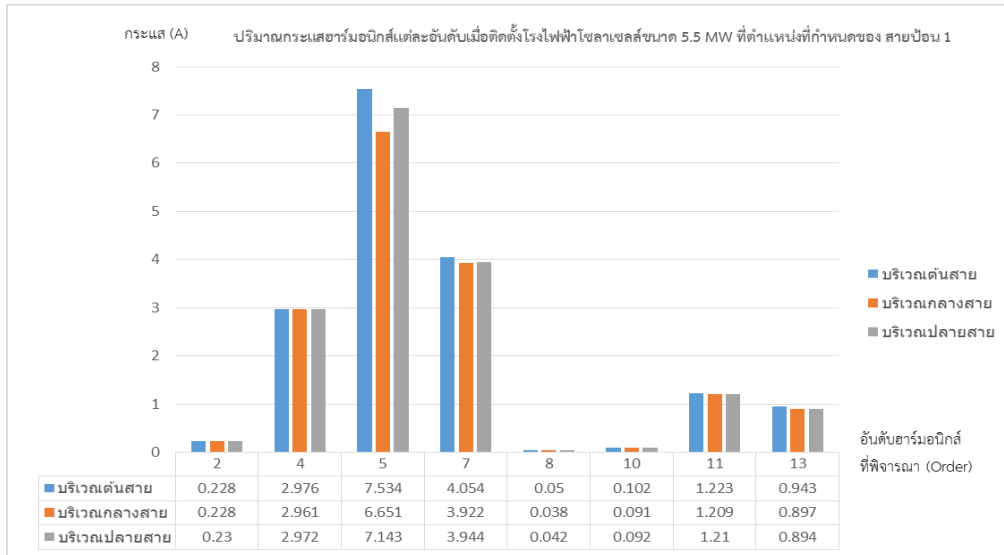
รูปที่ 4-106 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 4.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 10 เมื่อมีการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 5 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



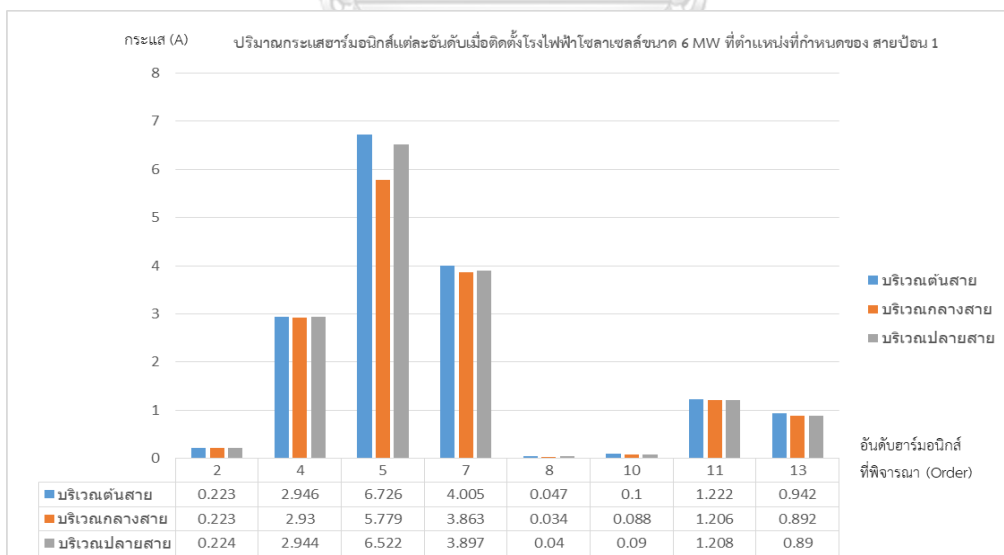
รูปที่ 4-107 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 11 เมื่อมีการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 5.5 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



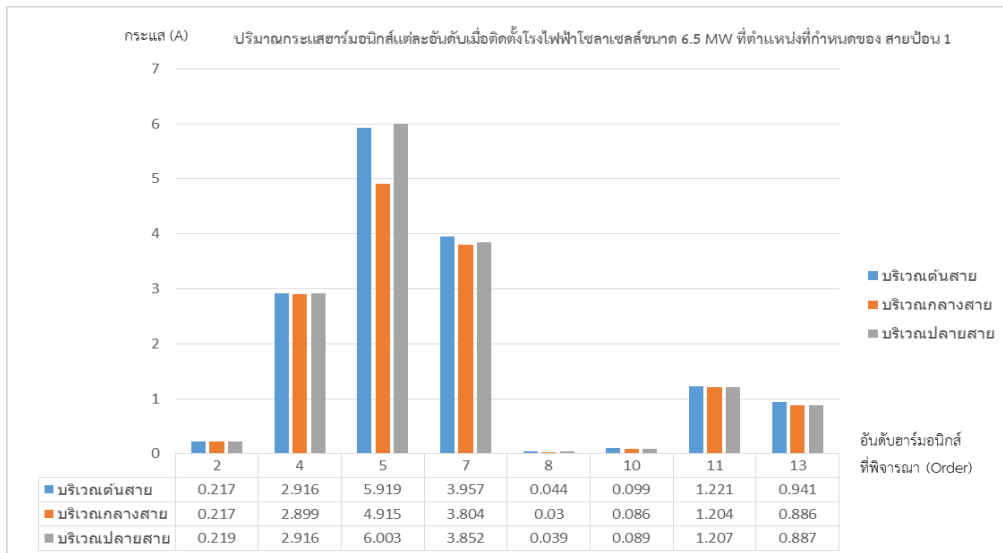
รูปที่ 4-108 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 5.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 12 เมื่อมีการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 6 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



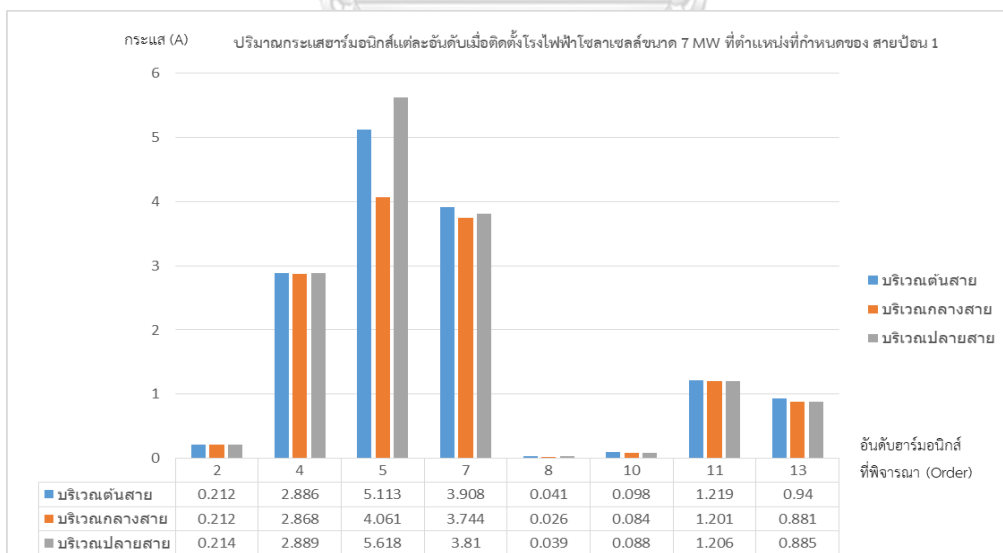
รูปที่ 4-109 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 6 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 13 เมื่อมีการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาด 6.5 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



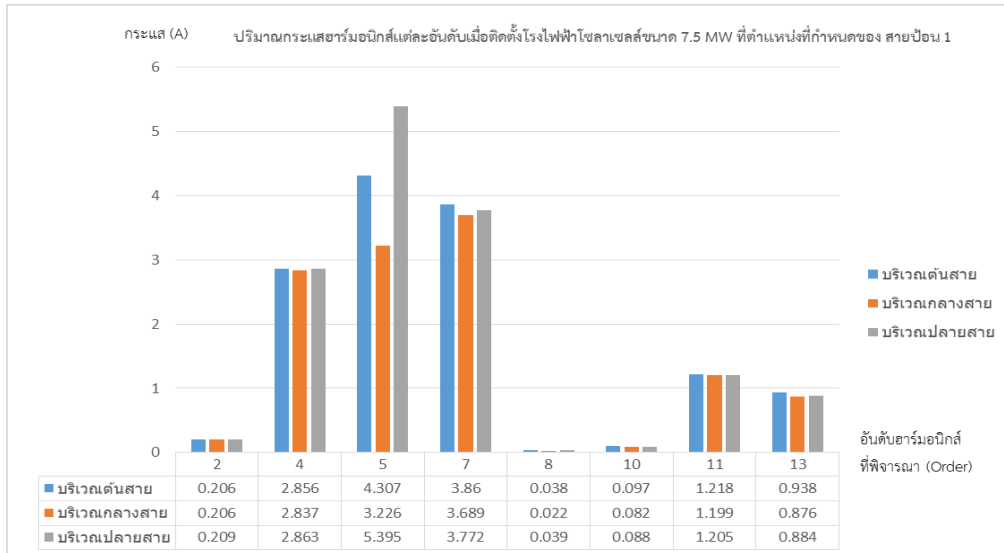
รูปที่ 4-110 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาด 6.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 14 เมื่อมีการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาด 7 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



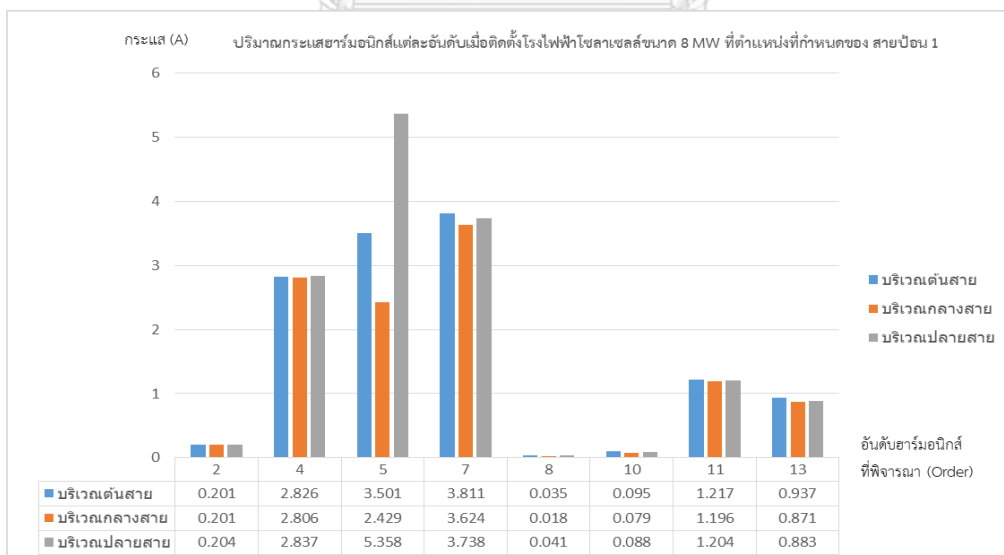
รูปที่ 4-111 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาด 7 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 15 เมื่อมีการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 7.5 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



รูปที่ 4-112 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 7.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 16 เมื่อมีการจำลองโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 8 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



รูปที่ 4-113 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ขนาด 8 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

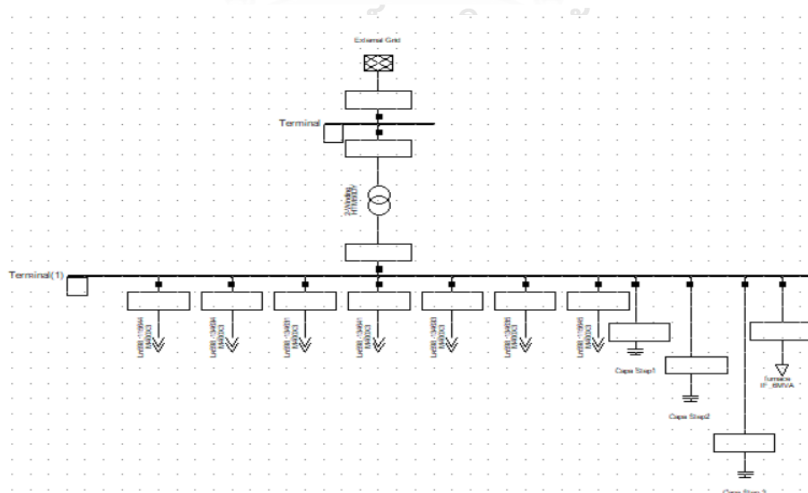
จากการจำลองระบบโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์เข้ามาที่ระบบไฟฟ้าของสถานีวิหารแดง บริเวณสายป้อน 1 ผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory พบว่าค่ากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นได้ไหลผ่านชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าวิหารแดงมีค่าดังกราฟแผนภูมิแท่งรูปที่ 4-34 ถึง รูปที่ 4-49 และการศึกษาผลกระทบระยะทางของการเชื่อมต่อโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ในระบบ เมื่อวิเคราะห์ผลจากกราฟ Harmonic Scan และ Frequency Scan พบว่าค่าที่เกิดขึ้นไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่ออยู่ในระบบดังกล่าว โดยมีค่า ดังนี้

- Harmonic Scan จากการวิเคราะห์ระบบดังกล่าว ค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 2, 4, 5,7,8,10,11 และ 13 ที่จุดติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ตามระยะทางบริเวณที่กำหนด คือ ต้นสาย กลางสาย และปลายสายของสายป้อน 1 พบว่าจะมีค่าลดลงโดยอันดับกระแสฮาร์มอนิกที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด คือ กระแสฮาร์มอนิก อันดับที่ 5 เมื่อนำผลรวมของกระแสที่ไหลผ่านชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าแต่ชุดอุปกรณ์ ดังตารางที่ 11 ถึง ตารางที่ 13 พบว่าค่ากระแสที่วัดได้จากการจำลองข้อมูลผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory มีค่าไม่เกิน 135%ของค่ากระแสมาตรฐาน คือ ซึ่งจะไม่ส่งผลทำให้ชุดตัวเก็บประจุระเบิดได้เนื่องจากผลของกระแสฮาร์มอนิกที่ระบบดังกล่าว ดังนั้นการติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ตามระยะทางบริเวณที่กำหนด คือ ต้นสาย กลางสาย และปลายสายของสายป้อน 1 แทบจะไม่ส่งผลทำให้ค่าฮาร์มอนิกเกินผลรวมของกระแสซึ่งจะทำให้ชุดตัวเก็บประจุระเบิดได้
- Frequency Scan จากการวิเคราะห์ระบบพบว่าระบบมีการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (parallel resonance) มักจะเกิดในช่วงอันดับ 4.68 ถึง 4.74 มีอิมพีแดนซ์ระหว่าง 66.392 ถึง 65.357 ซึ่งรูปแบบการเกิดของระบบจะเหมือนกัน คือ เปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นการติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ตามระยะทางบริเวณที่กำหนด คือ ต้นสาย กลางสาย และปลายสายของสายป้อน 1 แทบไม่มีผลต่อคุณลักษณะเฉพาะดังกล่าว

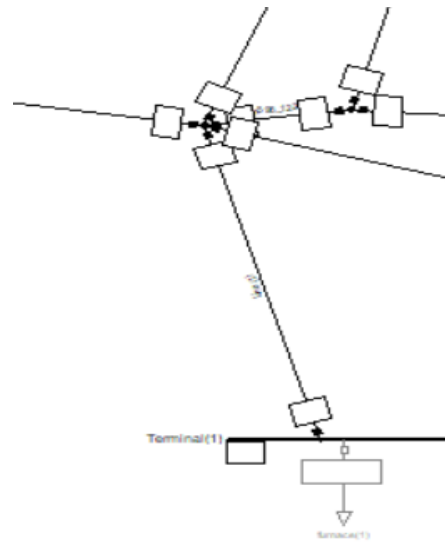
4.2.2 การศึกษาผลกระทบเมื่อกำหนดให้มีโรงงานไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Load) ประเภทโรงเหล็ก เชื่อมต่อในระบบ 22 กิโลโวลต์ (Base Case at CP95 Percentile with Non-linear Load)

ทดลองจำลองการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าวิหารแดง จังหวัดสระบุรี เมื่อมีการเชื่อมต่อโรงงานประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear load) โดยสมมติให้โรงงานเป็นประเภทโรงงานหลอมเหล็ก ซึ่งมีค่าการตรวจวัดคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality) หน้าโรงงานเป็นข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจริงเมื่อมีการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพื่อดูปริมาณฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นว่าส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าอย่างไร โดยการจำลองการจะใช้วงจรสมมูลจากโปรแกรม DigSILENT PowerFactory ให้แหล่งจ่าย (Current Source) แทนแหล่งจ่ายที่ทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้น โดยค่าคุณสมบัติเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ในระบบ (Total Harmonic Distortion) ที่ได้จากการตรวจวัดผ่านเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้า (Disturbance Meter) หน้าโรงงาน โดยค่าคุณสมบัติเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ในระบบ (THD) ใช้ผลรวมค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ถึงลำดับที่ 19 (อ้างอิงจากรายงานการตรวจวัดที่ได้รับของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค) จะจำลองขนาดของโรงงานหลอมเหล็ก โดยเริ่มจากโรงงานหลอมเหล็กขนาดตั้งแต่ 0.5 เมกกะวัตต์โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5 เมกกะวัตต์ ไปจนถึง 8 เมกกะวัตต์ และการศึกษาการจำลองโมเดลนี้โรงงานหลอมเหล็กจะติดตั้งเข้ามาที่สายป้อน 1 โดยจะมีการเพิ่มระยะทางของการเชื่อมต่อของโรงงานหลอมเหล็ก เพื่อดูผลของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบว่าส่งผลกระทบต่อชุดตัวเก็บประจุที่สถานี แบ่งออกได้ ดังนี้

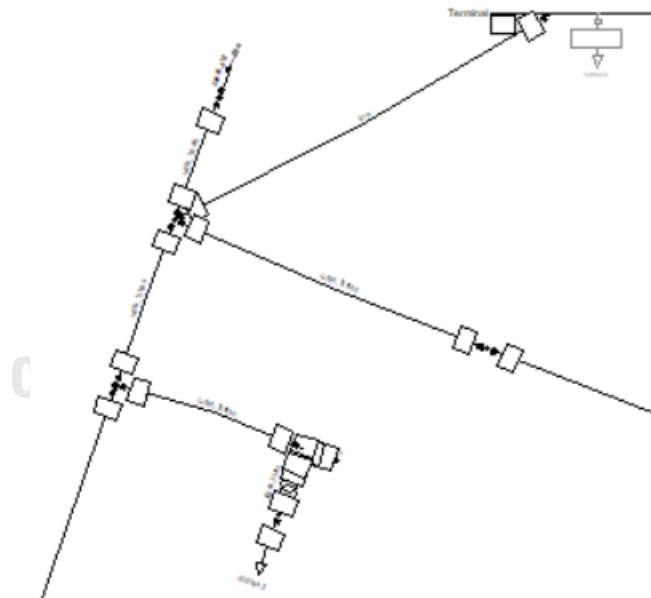
1. จำลองบริเวณต้นสายสายป้อน 1
2. จำลองบริเวณกลางสายสายป้อน 1
3. จำลองบริเวณที่ปลายสายสายป้อน 1



รูปที่ 4-114 การจำลองโรงหลอมเหล็กเข้ามาบริเวณต้นทางสายป้อน 1 ติดกับสถานี



รูปที่ 4-115 การจำลองโรงหลอมเหล็กเข้ามาบริเวณกลางสายสายป้อน 1 ที่ห่างจากสถานี

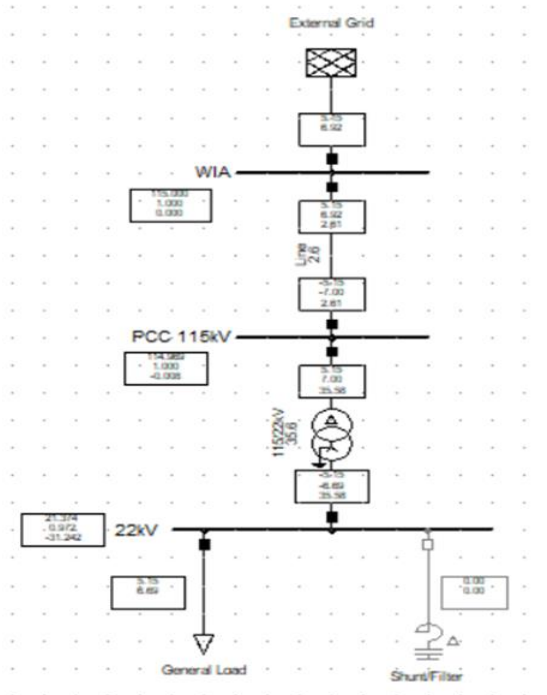


รูปที่ 4-116 การจำลองโรงหลอมเหล็กเข้ามาบริเวณปลายสายสายป้อน 1 ที่ห่างจากสถานี

ตารางที่ 4-20 ค่าคุณสมบัติเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ในระบบ (THD) ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า (Disturbance Meter) ในการกำหนดให้โรงงานหลอมเหล็กที่ใช้ในแบบจำลอง

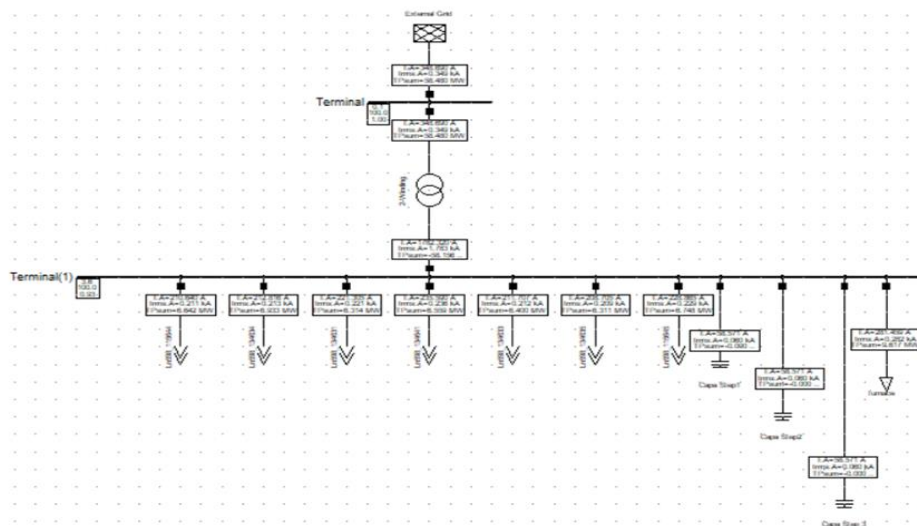
order	L1	L2	L3
2	0	0	0
3	0.33	0.33	0.33
4	0	0	0
5	1.15	1.15	1.15
6	0.02	0.02	0.02
7	1.12	1.12	1.12
8	0.08	0.08	0.08
9	0.21	0.21	0.21
10	0.11	0.11	0.11
11	1.62	1.62	1.62
12	0.11	0.11	0.11
13	0.9	0.9	0.9
14	0.01	0.01	0.01
15	0.09	0.09	0.09
16	0	0	0
17	0.29	0.29	0.29
18	0	0	0
19	0.16	0.16	0.16

การทดลองได้มีการกำหนดใช้ค่าคุณสมบัติเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์โมนิกส์ในระบบ (THD) ดังตารางที่ 4-11 กับโรงงานหลอมเหล็กที่ได้จำลองในระบบที่มีการเชื่อมต่อบนระบบของสถานีไฟฟ้าวิหารแดง จังหวัดสระบุรีดังกล่าว



รูปที่ 4-117 การจำลองการเชื่อมต่อโรงงานหลอมเหล็กเข้าต่อระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคผ่านทางโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

มีโรงหลอมเหล็กเชื่อมต่อในระบบ 22 กิโลโวลต์ ในแบบจำลองของสถานี (Base Case at CP95 Percentile with Non-linear Load)



รูปที่ 4-118 การวิเคราะห์โหมดเดลจากการจำลองระบบของสถานีบริหารแดงในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory ผ่าน Base Case เข้ากับระบบโรงงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ประเภทโรงงานหลอมเหล็ก

1. การจำลองโรงหลอมเหล็กขนาดต่างๆบริเวณต้นสายสายป้อน 1

ตารางที่ 4-21 ผลจากการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาดต่างๆบริเวณต้นทางติดกับสถานีเข้ามาในระบบผ่าน

โปรแกรม DigSILENT PowerFactory

ลำดับ	ขนาดโรงหลอมเหล็กที่จำลองเพื่อเชื่อมต่อในระบบ (MW)	จุดติดตั้งต้นสาย สายป้อน 1			
		ปริมาณกำลังรวมที่หม้อแปลง (MW)	กระแสที่หม้อแปลงจ่าย (A)	กระแสที่ไหลผ่านชุดตัวเก็บประจุ (A)	กระแสที่จ่าย Furnace (A)
1	0.5	22.616	110.628	65.343	23.018
2	1	23.531	115.264	65.325	46.048
3	1.5	24.447	119.904	65.306	69.091
4	2	25.363	124.55	65.287	92.148
5	2.5	26.279	129.201	65.267	115.221
6	3	27.195	133.857	65.247	138.308
7	3.5	28.111	138.519	65.226	161.411
8	4	29.027	143.185	65.204	184.53
9	4.5	29.943	147.857	65.182	207.667
10	5	30.86	152.534	65.159	230.821
11	5.5	31.777	157.217	65.136	253.993
12	6	32.693	161.905	65.112	277.185
13	6.5	33.61	166.599	65.087	300.397
14	7	34.527	171.299	65.062	323.628
15	7.5	35.444	176.004	65.036	346.881
16	8	36.361	180.715	65.01	370.156

จากผลการทดลองเมื่อมีการจำลองระบบโรงหลอมเหล็กเข้ามาในระบบไฟฟ้าแรงสูง ที่สถานีบริหารแดง สายป้อน 1 บริเวณต้นสายใกล้สถานี จะพบว่าโรงหลอมเหล็กจะทำหน้าที่เสมือนภาระในระบบ (Load) ในขณะเดียวกันก็จะจ่ายกระแสฮาร์โมนิกส์เข้าไปในระบบด้วย โดยสมมุติขนาดปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์สูงสุดที่ได้จากการวัดจริงมีค่า 6.2 % ซึ่งจะพบว่าปริมาณกำลังรวมของหม้อแปลงที่จ่ายให้ระบบมีค่าแปรตรงตามขนาดกำลังของโรงหลอมเหล็ก (MW) โดยที่ค่าปริมาณกำลังรวมหม้อแปลงสูงสุดมีค่า 36.361 เมกะวัตต์เมื่อมีโรงหลอมเหล็กขนาด 8 เมกะวัตต์เชื่อมต่ออยู่และค่ากำลังรวมที่หม้อแปลงจ่ายต่ำสุดมีค่า 22.616 เมกะวัตต์เมื่อมีโรงหลอมเหล็กขนาด 0.5 เมกะวัตต์เชื่อมต่ออยู่ ส่วนค่ากระแสที่หม้อแปลงจ่ายและค่ากระแสที่โรงหลอมเหล็กจ่ายจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดกำลังของโรงหลอมเหล็ก (MW) ตามลำดับ

ตารางที่ 4-22 ผลของกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่พิจารณาเกิดขึ้นเนื่องจากจากการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาดต่างๆบริเวณต้นทางติดกับสถานีเข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

ลำดับ	ขนาดโรงงานหลอมเหล็กที่จำลองเพื่อเชื่อมต่อในระบบ (MW)	ปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับที่พิจารณา (A)							
		2	4	5	7	8	10	11	13
1	0.5	0.289	3.306	17.967	4.723	0.089	0.125	1.274	0.991
2	1	0.289	3.306	19.484	4.856	0.093	0.133	1.31	1.025
3	1.5	0.289	3.306	21.003	4.989	0.098	0.142	1.347	1.06
4	2	0.289	3.306	22.524	5.122	0.102	0.151	1.383	1.095
5	2.5	0.289	3.306	24.049	5.255	0.107	0.159	1.42	1.129
6	3	0.29	3.306	25.576	5.389	0.111	0.168	1.456	1.164
7	3.5	0.29	3.306	27.106	5.522	0.116	0.177	1.493	1.199
8	4	0.29	3.306	28.639	5.656	0.12	0.185	1.529	1.234
9	4.5	0.29	3.307	30.175	5.79	0.125	0.194	1.566	1.268
10	5	0.29	3.307	31.715	5.924	0.129	0.203	1.603	1.303
11	5.5	0.29	3.307	33.258	6.058	0.134	0.212	1.64	1.338
12	6	0.29	3.307	34.805	6.193	0.139	0.22	1.677	1.373
13	6.5	0.29	3.307	36.355	6.328	0.143	0.229	1.713	1.408
14	7	0.29	3.307	37.909	6.463	0.148	0.238	1.75	1.443
15	7.5	0.29	3.308	39.466	6.598	0.152	0.247	1.788	1.478
16	8	0.29	3.308	41.028	6.733	0.157	0.255	1.825	1.514

ผลการทดลองเมื่อมีการจำลองระบบโรงหลอมเหล็กเข้ามาในระบบไฟฟ้าแรงสูง ที่สถานีบริหารแดงสายป้อน 1 บริเวณกลางสายสายป้อน เมื่อพิจารณาผลของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงแปรตามกับขนาดโรงหลอมเหล็กที่เชื่อมต่อในระบบไฟฟ้า (MW) โดยที่ค่ากระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 มีปริมาณมากที่สุด คือ 41.028 แอมป์ เมื่อเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ขนาด 8 เมกกะวัตต์ และค่ากระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 8 มีปริมาณน้อยสุด คือ 0.089 แอมป์ เมื่อเชื่อมต่อกับโรงหลอมเหล็กขนาด 0.5 เมกกะวัตต์ ตามลำดับ

2. การจำลองโรงหลอมเหล็กขนาดต่างๆบริเวณกลางสาย สายป้อน 1

ตารางที่ 4-23 ผลจากการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาดต่างๆบริเวณกลางสายสายป้อน 1 เข้ามาในระบบผ่าน

โปรแกรม DigSILENT PowerFactory

ลำดับ	ขนาดโรงหลอมเหล็กที่จำลองเพื่อเชื่อมต่อในระบบ (MW)	จุดติดตั้งกลางสาย สายป้อน 1			
		ปริมาณกำลังรวมทั้งหม้อแปลง (MW)	กระแสที่หม้อแปลงจ่าย (A)	กระแสที่ไหลผ่านชุดตัวเก็บประจุ (A)	กระแสที่จ่าย Furnace (A)
1	0.5	22.624	110.687	65.339	23.188
2	1	23.55	115.397	65.316	46.452
3	1.5	24.478	120.128	65.29	69.797
4	2	25.41	124.882	65.264	93.224
5	2.5	26.343	129.659	65.235	116.737
6	3	27.28	134.458	65.205	140.338
7	3.5	28.218	139.282	65.173	164.003
8	4	29.16	144.129	65.139	187.823
9	4.5	30.104	149.001	65.103	211.713
10	5	31.051	153.899	65.066	235.707
11	5.5	32.001	158.823	65.027	259.807
12	6	32.953	163.774	64.985	284.019
13	6.5	33.908	168.753	64.942	308.346
14	7	34.867	173.761	64.896	332.793
15	7.5	35.828	178.799	64.849	357.365
16	8	36.792	183.867	64.799	382.066

จากผลการทดลองเมื่อมีการจำลองระบบโรงหลอมเหล็กเข้ามาในระบบไฟฟ้าแรงสูง ที่สถานีบริหารแดง บริเวณกลางสายสายป้อน 1 จะพบว่าโรงหลอมเหล็กจะทำหน้าที่เสมือนภาระในระบบ (Load) ในขณะเดียวกันก็จะจ่ายกระแสฮาร์มอนิกส์เข้าไปในระบบด้วย โดยสมมุติขนาดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์สูงสุดที่ได้จากการวัดจริงมีค่า 6.2 % ซึ่งจะพบว่าปริมาณกำลังรวมทั้งหม้อแปลงที่จ่ายให้ระบบมีค่าแปรตรงตามขนาดกำลังของโรงหลอมเหล็ก (MW) โดยที่ค่าปริมาณกำลังรวมทั้งหม้อแปลงสูงสุดมีค่า 36.792 เมกะวัตต์เมื่อมีโรงหลอมเหล็กขนาด 8 เมกะวัตต์เชื่อมต่ออยู่และค่ากำลังรวมทั้งหม้อแปลงจ่ายต่ำสุดมีค่า 22.624 เมกะวัตต์เมื่อมีโรงหลอมเหล็กขนาด 0.5 เมกะวัตต์เชื่อมต่ออยู่ ส่วนค่ากระแสที่หม้อแปลงจ่ายและค่ากระแสที่โรงหลอมเหล็กจ่ายจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดกำลังของโรงหลอมเหล็ก (MW) ตามลำดับ

ตารางที่ 4-24 ผลของกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่พิจารณาเกิดขึ้นเนื่องจากจากการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาด
ต่างๆบริเวณบริเวณกลางสายสายป้อน 1 เข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

ลำดับ	ขนาดโรงงานหลอมเหล็กที่จำลอง เพื่อเชื่อมต่อในระบบ (MW)	ปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับที่พิจารณา (A)							
		2	4	5	7	8	10	11	13
1	0.5	0.289	3.305	18.135	4.757	0.09	0.132	1.317	1.12
2	1	0.289	3.305	19.824	4.923	0.096	0.147	1.396	1.283
3	1.5	0.289	3.304	21.521	5.09	0.103	0.162	1.474	1.446
4	2	0.289	3.304	23.226	5.257	0.109	0.178	1.552	1.609
5	2.5	0.29	3.304	24.938	5.427	0.115	0.193	1.63	1.771
6	3	0.29	3.303	26.66	5.592	0.121	0.209	1.707	1.933
7	3.5	0.29	3.303	28.39	5.759	0.127	0.224	1.784	2.095
8	4	0.29	3.303	30.13	5.926	0.134	0.239	1.86	2.257
9	4.5	0.29	3.302	31.879	6.093	0.14	0.255	1.936	2.418
10	5	0.29	3.302	33.639	6.26	0.146	0.27	2.012	2.579
11	5.5	0.29	3.301	35.41	6.426	0.152	0.286	2.087	2.739
12	6	0.29	3.301	37.192	6.593	0.158	0.301	2.161	2.9
13	6.5	0.29	3.301	38.987	6.759	0.165	0.316	2.235	3.06
14	7	0.291	3.3	40.794	6.926	0.171	0.332	2.309	3.22
15	7.5	0.291	3.3	42.614	7.092	0.177	0.347	2.382	3.38
16	8	0.291	3.3	44.449	7.258	0.183	0.363	2.454	3.54

ผลการทดลองเมื่อมีการจำลองระบบโรงหลอมเหล็กเข้ามาในระบบไฟฟ้าแรงสูง ที่สถานีบริหารแดง
สายป้อน 1 บริเวณกลางสายสายป้อน เมื่อพิจารณาผลของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงแปร
ตามกับขนาดโรงหลอมเหล็กที่เชื่อมต่อในระบบไฟฟ้า (MW) โดยที่ค่ากระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 มี
ปริมาณมากที่สุด คือ 44.449 แอมป์ เมื่อเชื่อมต่อกับโรงหลอมเหล็กขนาด 8 เมกกะวัตต์ และค่า
ค่ากระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 8 มีปริมาณน้อยสุด คือ 0.09 แอมป์ เมื่อเชื่อมต่อกับโรงไฟฟ้าโซลา
เซลล์ขนาด 0.5 เมกกะวัตต์ ตามลำดับ

3. การจำลองโรงหลอมเหล็กขนาดต่างๆ บริเวณปลายสาย สายป้อน 1

ตารางที่ 4-25 ผลจากการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาดต่างๆบริเวณปลายทางสายป้อน 1 เข้ามาในระบบผ่าน

โปรแกรม DigSILENT PowerFactory

ลำดับ	ขนาดโรงหลอมเหล็กที่ จำลองเพื่อเชื่อมต่อใน ระบบ (MW)	จุดติดตั้งปลายสาย สายป้อน 1			
		ปริมาณกำลังรวมที่ หม้อแปลง (MW)	กระแสที่หม้อ แปลงจ่าย (A)	กระแสที่ไหลผ่าน ชุดตัวเก็บประจุ (A)	กระแสที่จ่าย Furnace (A)
1	0.5	22.634	110.759	65.335	23.492
2	1	23.579	115.588	65.304	47.246
3	1.5	24.531	120.491	65.268	71.283
4	2	25.495	125.471	65.227	95.625
5	2.5	26.469	130.532	65.18	120.298
6	3	27.454	135.679	65.128	145.332
7	3.5	28.451	140.92	65.069	170.757
8	4	29.46	146.261	65.004	196.61
9	4.5	30.482	151.711	64.933	229.931
10	5	31.517	157.28	64.854	249.766
11	5.5	32.568	162.979	64.767	277.168
12	6	33.634	168.821	64.672	305.198
13	6.5	34.718	174.822	64.564	333.928
14	7	35.821	181.008	64.452	363.468
15	7.5	36.944	187.392	64.326	393.886
16	8	38.091	194.006	64.188	425.326

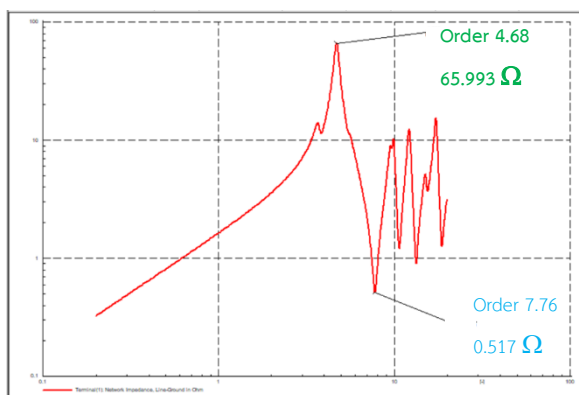
จากผลการทดลองเมื่อมีการจำลองระบบโรงหลอมเหล็กเข้ามาในระบบไฟฟ้าแรงสูง ที่สถานีบริหารแดง บริเวณ ปลายสายสายป้อน 1 จะพบว่าโรงหลอมเหล็กจะทำหน้าที่เสมือนภาระในระบบ (Load) ในขณะเดียวกันก็จะจ่าย กระแสฮาร์โมนิกส์เข้าไปในระบบด้วย โดยสมมุติขนาดปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์สูงสุดที่ได้จากการวัดจริงมีค่า 6.2 % ซึ่งจะพบว่าปริมาณกำลังรวมของหม้อแปลงที่จ่ายให้ระบบมีค่าแปรตรงตามขนาดกำลังของโรงหลอมเหล็ก (MW) โดยที่ค่าปริมาณกำลังรวมหม้อแปลงสูงสุดมีค่า 38.091 เมกะวัตต์เมื่อมีโรงหลอมเหล็กขนาด 8 เมกะวัตต์ เชื่อมต่ออยู่และค่ากำลังรวมที่หม้อแปลงจ่ายต่ำสุดมีค่า 22.634 เมกะวัตต์เมื่อมีโรงหลอมเหล็กขนาด 0.5 เมกะ วัตต์เชื่อมต่ออยู่ ส่วนค่ากระแสที่หม้อแปลงจ่ายและค่ากระแสที่โรงหลอมเหล็กจ่ายจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาด กำลังของโรงหลอมเหล็ก (MW) ตามลำดับ

ตารางที่ 4-26 ผลของกระแสฮาร์โมนิกอันดับที่พิจารณาเกิดขึ้นเนื่องจากจากการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาด
ต่างๆบริเวณบริเวณปลายสายสายป้อน 1 เข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

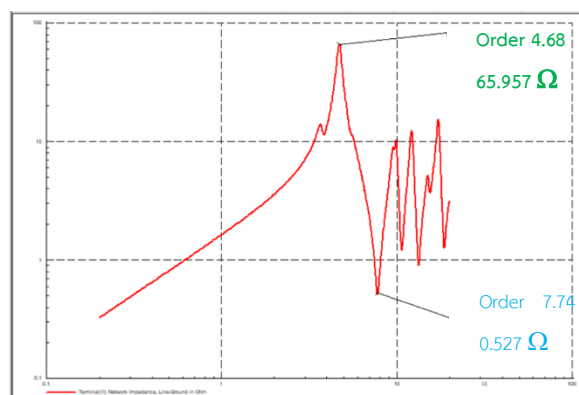
ลำดับ	ขนาดโรงงานหลอมเหล็กที่จำลอง เพื่อเชื่อมต่อในระบบ (MW)	ปริมาณกระแสฮาร์โมนิกแต่ละอันดับที่พิจารณา (A)							
		2	4	5	7	8	10	11	13
1	0.5	0.289	3.305	18.162	4.761	0.09	0.132	1.322	1.135
2	1	0.289	0.304	19.879	4.931	0.097	0.148	1.403	1.303
3	1.5	0.289	3.303	21.602	5.097	0.103	0.164	1.478	1.46
4	2	0.29	3.302	23.328	5.258	0.109	0.178	1.546	1.605
5	2.5	0.29	3.301	25.056	5.413	0.115	0.192	1.607	1.737
6	3	0.29	3.3	26.787	5.56	0.12	0.205	1.658	1.857
7	3.5	0.29	3.299	28.519	5.698	0.125	0.218	1.699	1.965
8	4	0.29	3.297	30.253	5.826	0.13	0.229	1.729	2.061
9	4.5	0.29	3.296	31.989	5.941	0.134	0.24	1.747	2.147
10	5	0.291	3.295	33.728	6.042	0.138	0.249	1.751	2.223
11	5.5	0.291	3.294	35.472	6.128	0.141	0.258	1.741	2.293
12	6	0.291	3.292	37.22	6.197	0.144	0.265	1.716	2.361
13	6.5	0.291	3.291	38.976	6.245	0.147	0.272	1.674	2.43
14	7	0.292	3.289	40.743	6.272	0.148	0.278	1.616	2.508
15	7.5	0.292	3.288	42.521	6.273	0.149	0.283	1.54	2.602
16	8	0.293	3.286	44.314	6.245	0.15	0.288	1.446	2.722

ผลการทดลองเมื่อมีการจำลองระบบโรงหลอมเหล็กเข้ามาในระบบไฟฟ้าแรงสูง ที่สถานีบริหารแดง
บริเวณปลายสายสายป้อน 1 เมื่อพิจารณาผลของกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงแปรตามกับ
ขนาดโรงหลอมเหล็กที่เชื่อมต่อในระบบไฟฟ้า (MW) โดยที่ค่ากระแสฮาร์โมนิกอันดับที่ 5 มีปริมาณ
มากที่สุด คือ 41.028 แอมป์ เมื่อเชื่อมต่อกับโรงหลอมเหล็กขนาด 8 เมกกะวัตต์ และค่ากระแสฮาร์
โมนิกอันดับที่ 8 มีปริมาณน้อยสุด คือ 0.089 แอมป์ เมื่อเชื่อมต่อกับโรงหลอมเหล็กขนาด 0.5
เมกกะวัตต์ ตามลำดับ

ผลของ Frequency Scan เมื่อมีการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาดต่างๆ ณ บริเวณที่กำหนด



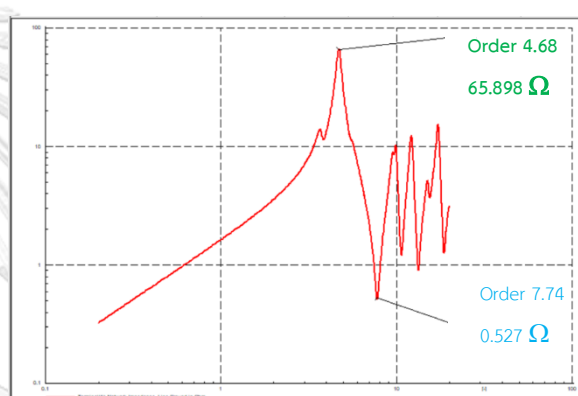
4-55a บริเวณต้นสาย



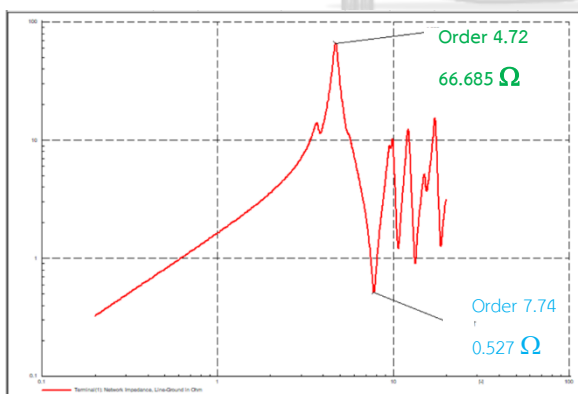
4-56a บริเวณต้นสาย



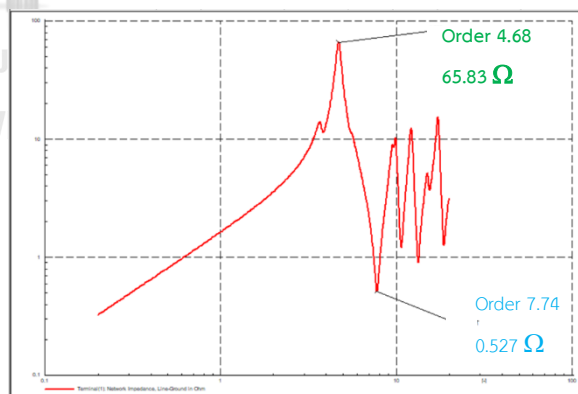
4-55b บริเวณกลางสาย



4-56b บริเวณกลางสาย



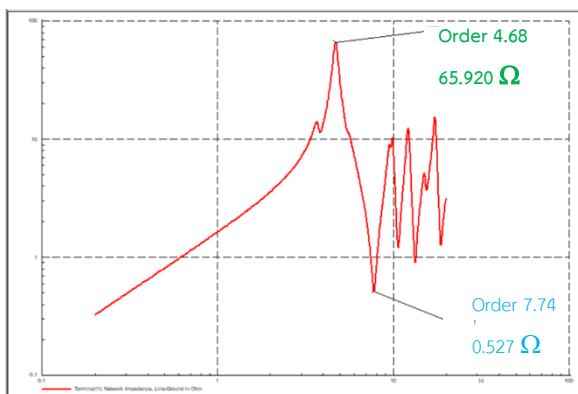
4-55c บริเวณปลายสาย



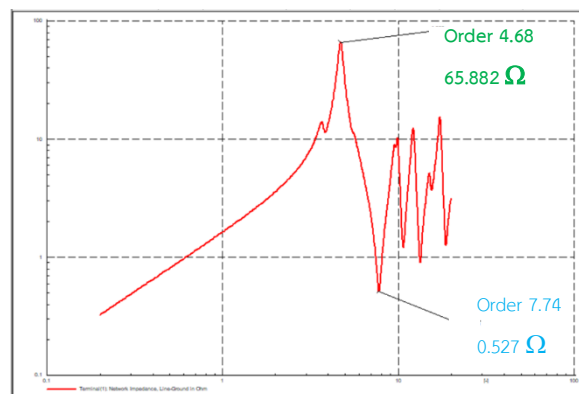
4-56c บริเวณปลายสาย

รูปที่ 4-119 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 0.5 MW

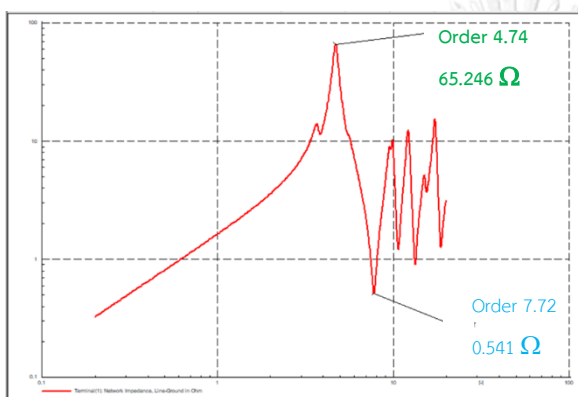
รูปที่ 4-120 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 1 MW



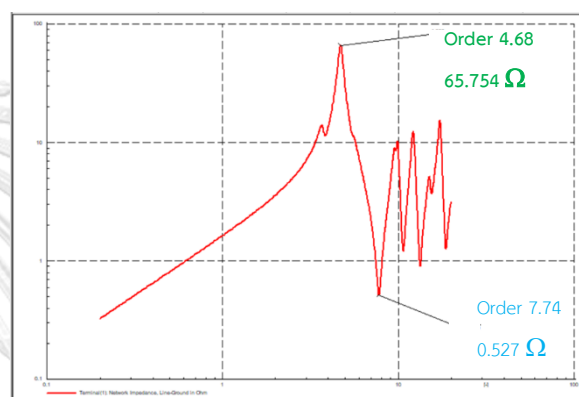
4-57a บริเวณต้นสาย



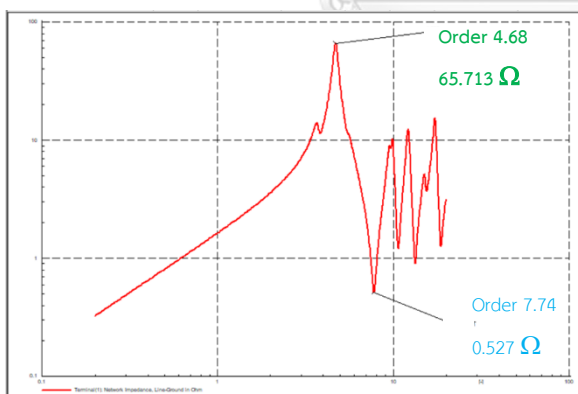
4-58a บริเวณต้นสาย



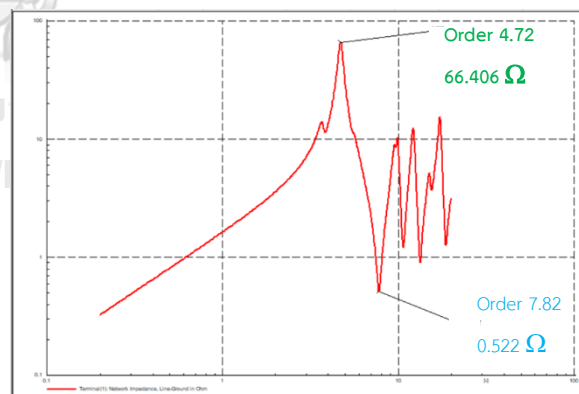
4-57b บริเวณกลางสาย



4-58b บริเวณกลางสาย



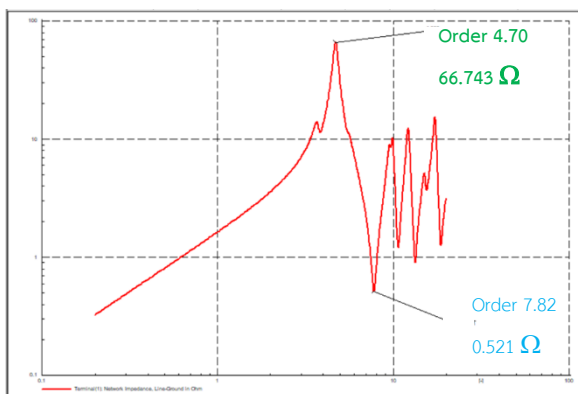
4-57c บริเวณปลายสาย



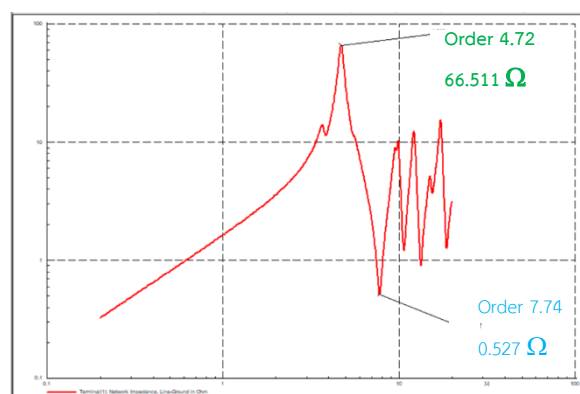
4-58c บริเวณปลายสาย

รูปที่ 4-121 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 1.5 MW

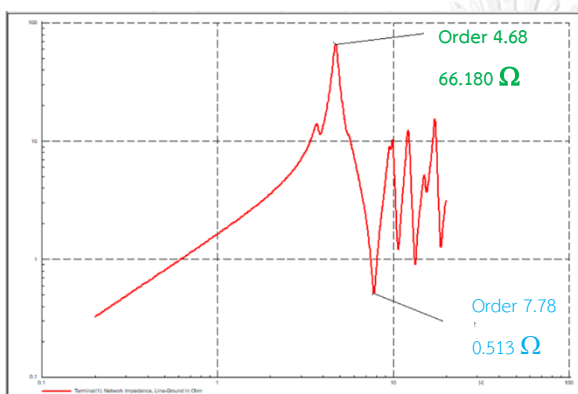
รูปที่ 4-122 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 2 MW



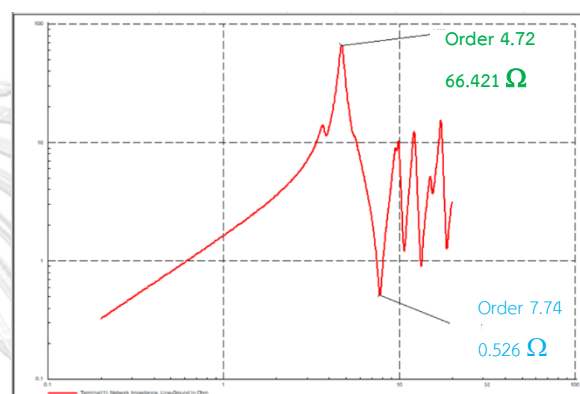
4-59a บริเวณต้นสาย



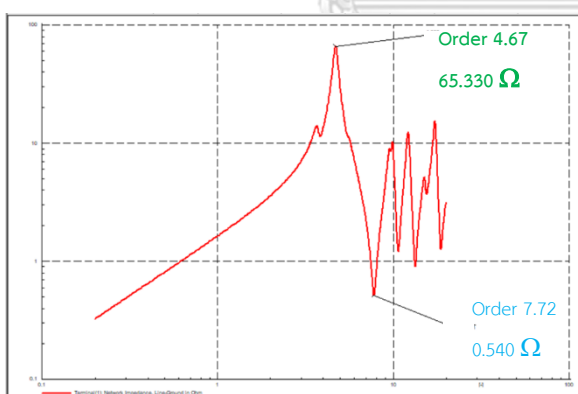
4-60a บริเวณต้นสาย



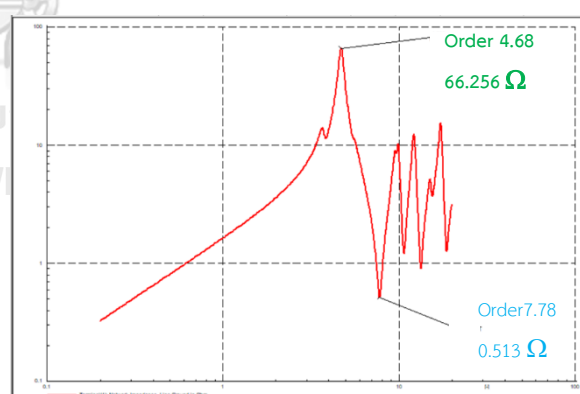
4-59b บริเวณกลางสาย



4-60b บริเวณกลางสาย



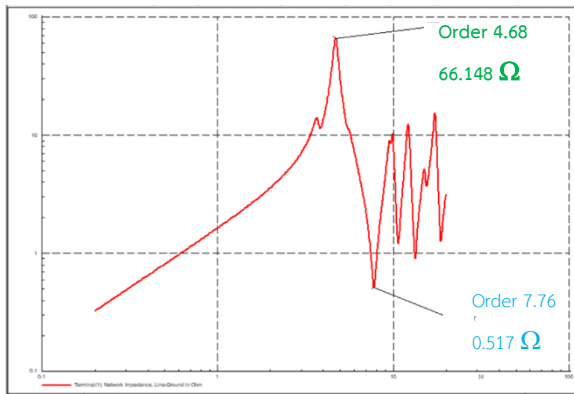
4-59c บริเวณปลายสาย



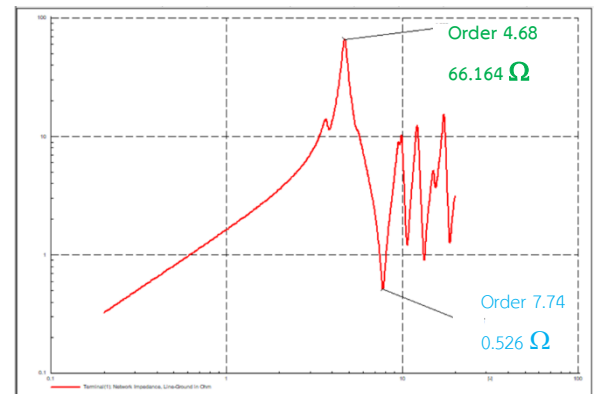
4-60c บริเวณปลายสาย

รูปที่ 4-123 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 2.5 MW

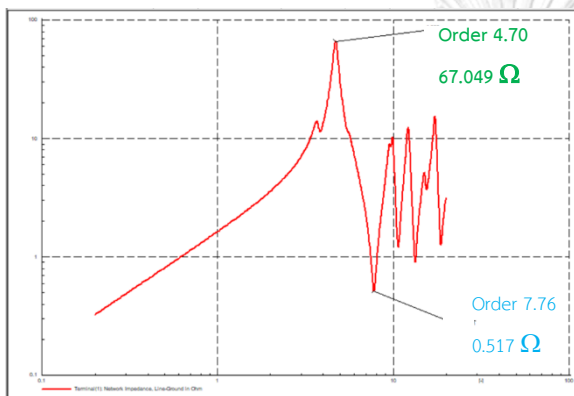
รูปที่ 4-124 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 3 MW



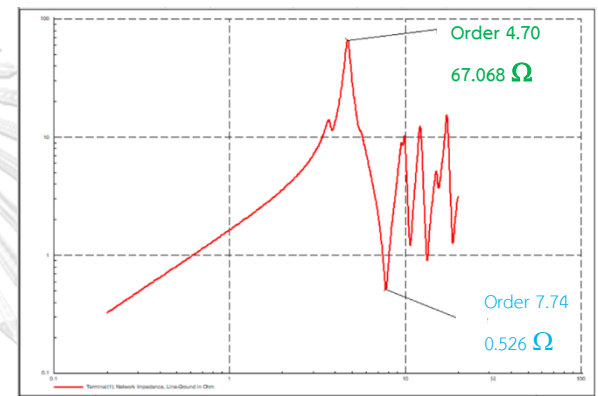
4-61a บริเวณต้นสาย



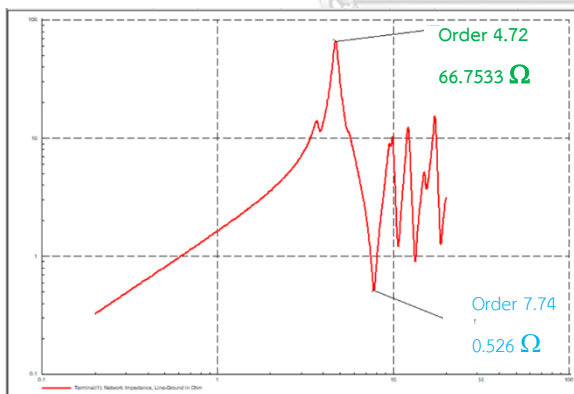
4-62a บริเวณต้นสาย



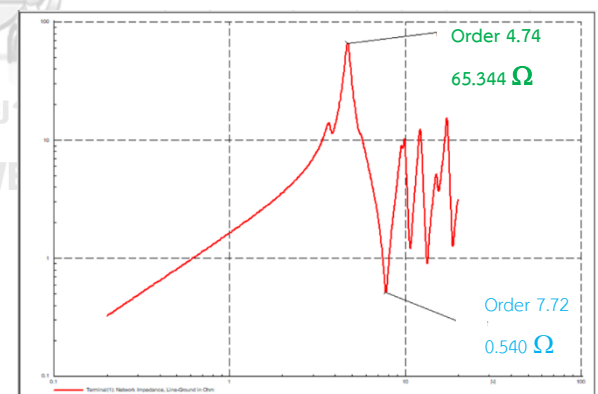
4-61b บริเวณกลางสาย



4-62b บริเวณกลางสาย



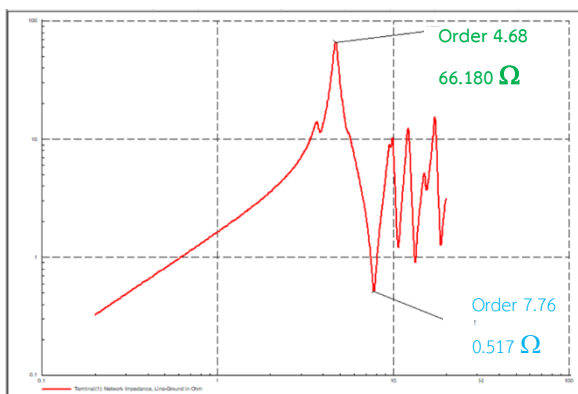
4-61c บริเวณปลายสาย



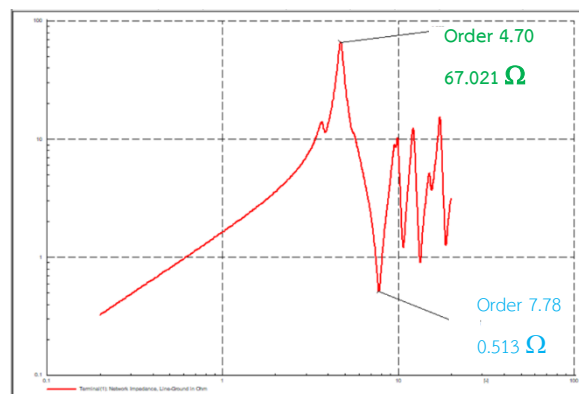
4-62c บริเวณปลายสาย

รูปที่ 4-125 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 3.5 MW

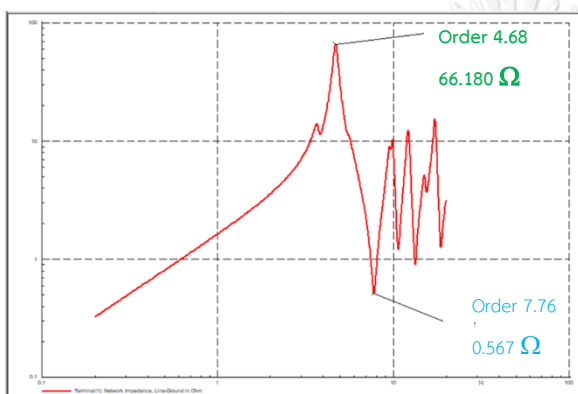
รูปที่ 4-126 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 4 MW



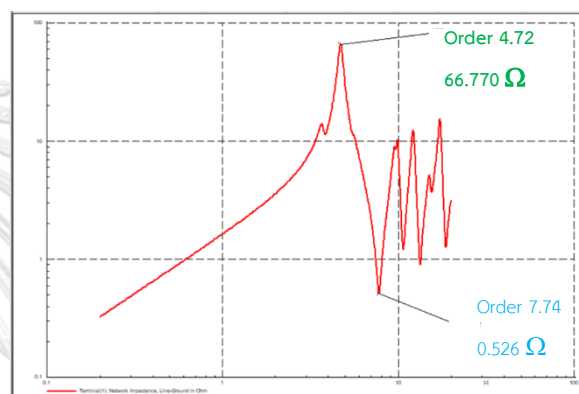
4-63a บริเวณต้นสาย



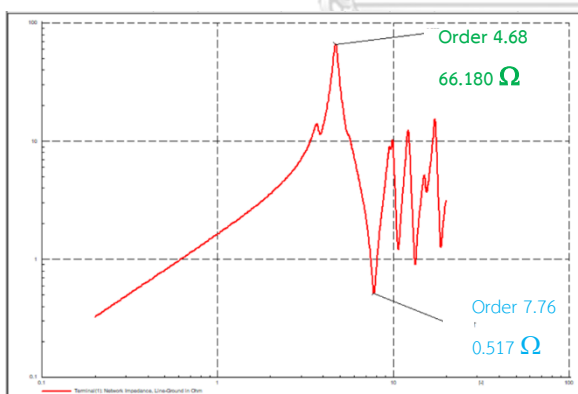
4-64a บริเวณต้นสาย



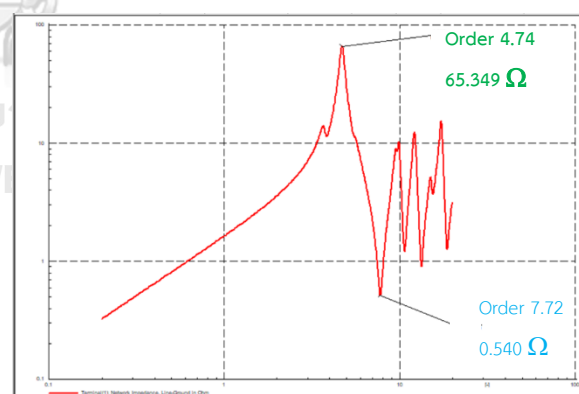
4-63b บริเวณกลางสาย



4-64b บริเวณกลางสาย



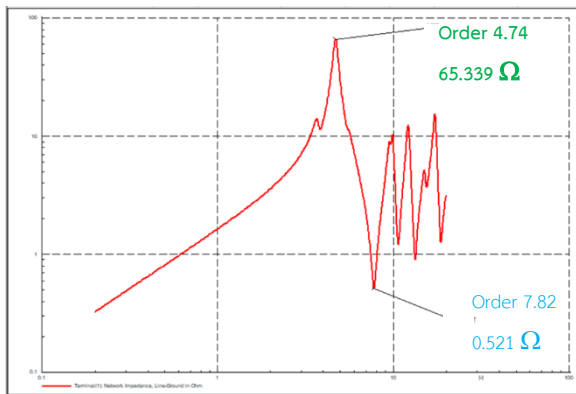
4-63c บริเวณปลายสาย



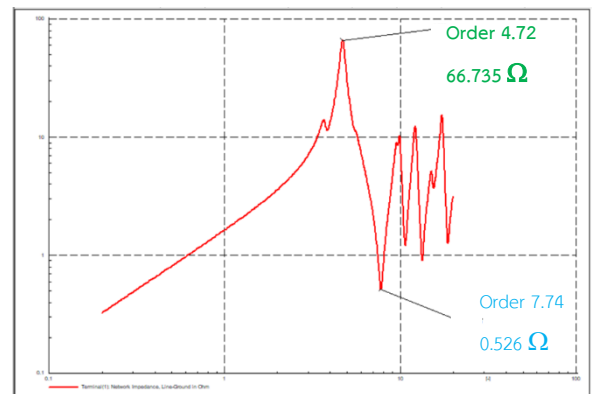
4-64c บริเวณปลายสาย

รูปที่ 4-127 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 4.5 MW

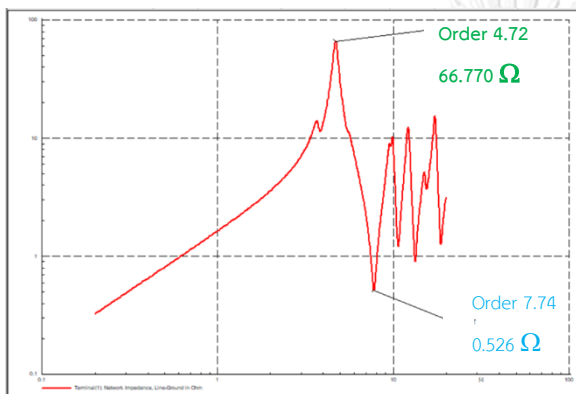
รูปที่ 4-128 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 5 MW



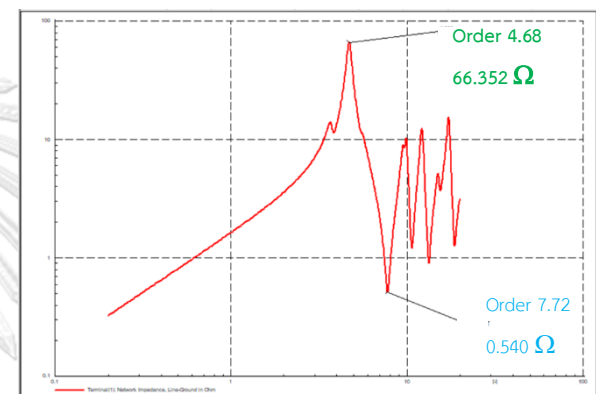
4-65a บริเวณต้นสาย



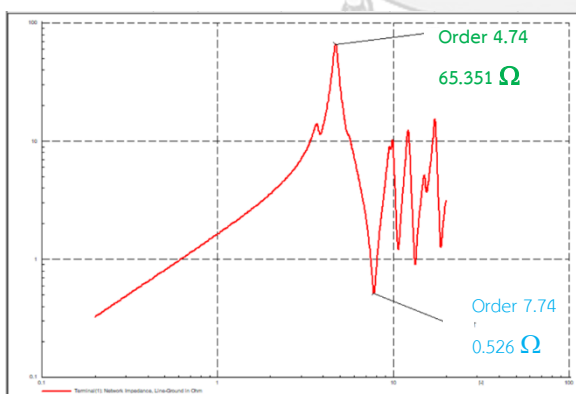
4-66a บริเวณต้นสาย



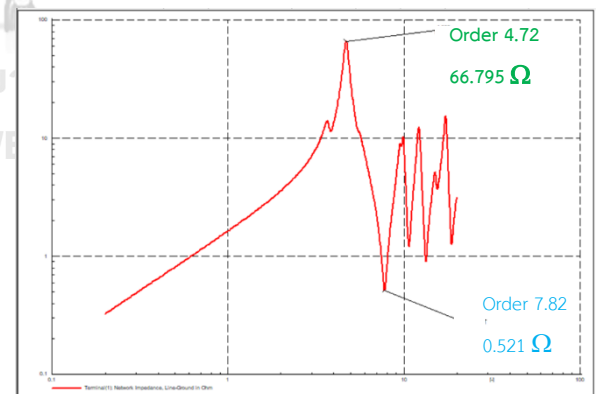
4-65b บริเวณกลางสาย



4-66b บริเวณกลางสาย



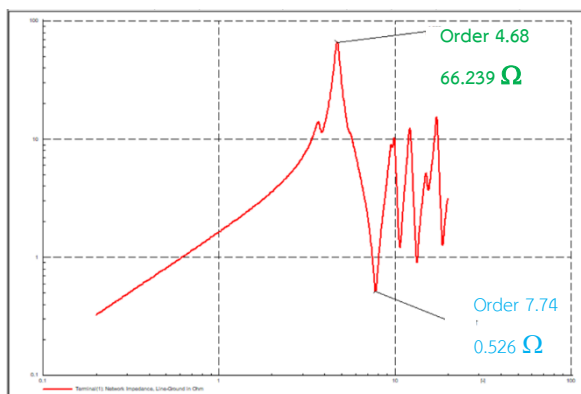
4-65c บริเวณปลายสาย



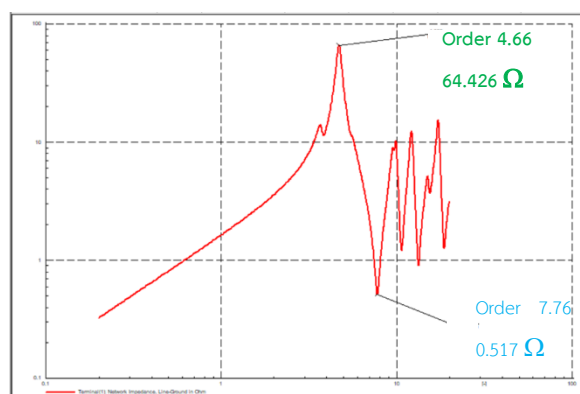
4-66c บริเวณปลายสาย

รูปที่ 4-129 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 5.5 MW

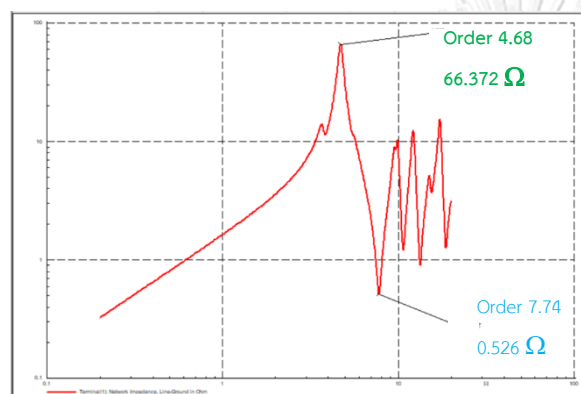
รูปที่ 4-130 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 6 MW



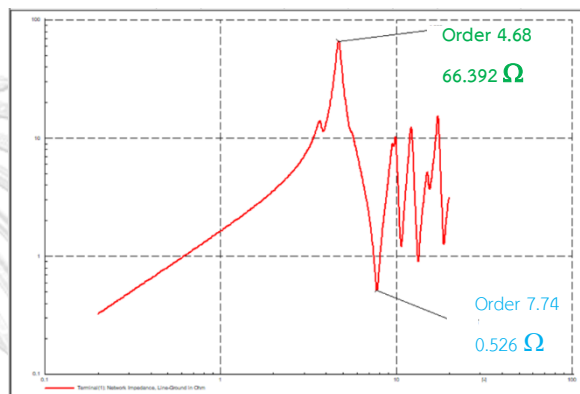
4-67a บริเวณต้นสาย



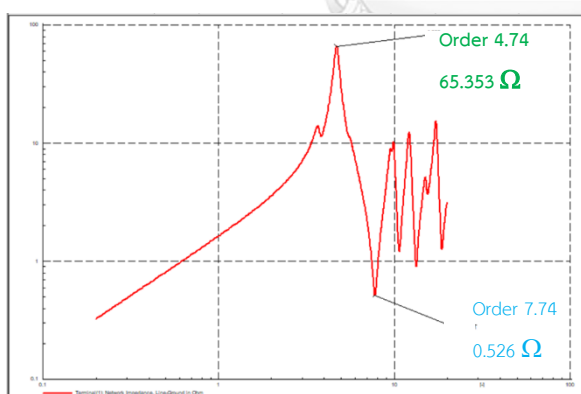
4-68a บริเวณต้นสาย



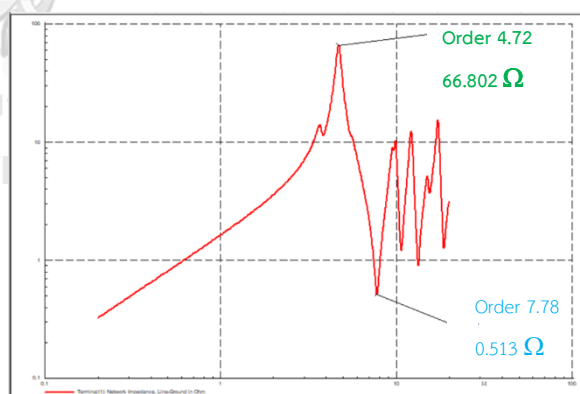
4-67b บริเวณกลางสาย



4-68b บริเวณกลางสาย



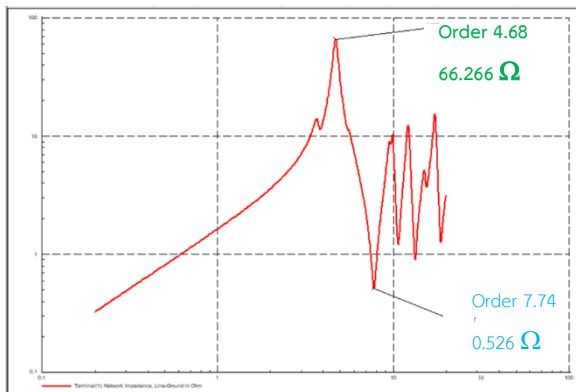
4-67c บริเวณปลายสาย



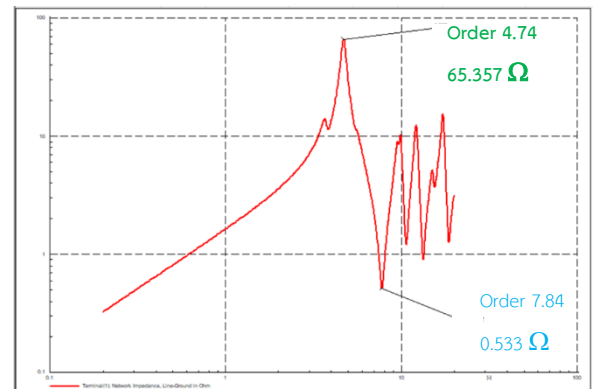
4-68c บริเวณปลายสาย

รูปที่ 4-131 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 6.5 MW

รูปที่ 4-132 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 7 MW



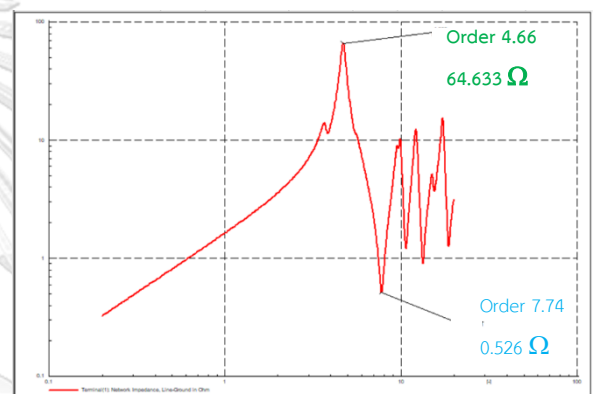
4-69a บริเวณต้นสาย



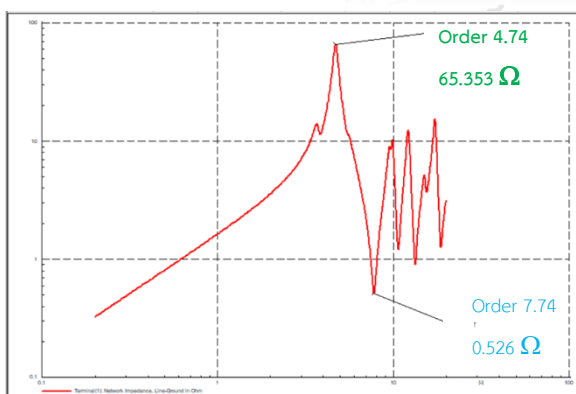
4-70a บริเวณต้นสาย



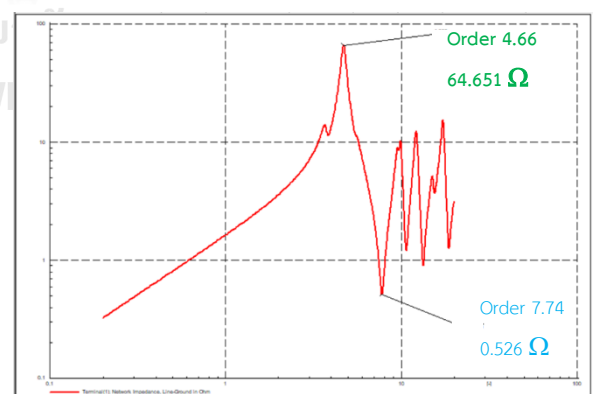
4-69b บริเวณกลางสาย



4-70b บริเวณกลางสาย



4-69c บริเวณปลายสาย



4-70c บริเวณปลายสาย

รูปที่ 4-133 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 7.5 MW

รูปที่ 4-134 (a,b,c) ติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 8 MW

ตารางที่ 4-27 ผลของ Frequency Scan ที่เกิดขึ้น เมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กที่ต้นทาง สายป้อน 1

ลำดับ	ขนาดโรงหลอมเหล็ก (MW)	ติดตั้งโรงหลอมเหล็กต้นสาย สายป้อน 1			
		Maximum Palarell Resonance		Mimimum Series Resonance	
		Order	Impedance (Ohm)	Order	Impedance (Ohm)
1	0.5	4.680	65.993	7.760	0.517
2	1	4.680	65.957	7.740	0.527
3	1.5	4.680	65.920	7.740	0.527
4	2	4.680	65.882	7.740	0.527
5	2.5	4.700	66.743	7.820	0.521
6	3	4.720	66.511	7.740	0.527
7	3.5	4.680	65.761	7.800	0.515
8	4	4.700	66.644	7.740	0.527
9	4.5	4.700	66.609	7.800	0.515
10	5	4.680	65.629	7.760	0.518
11	5.5	4.680	65.582	7.740	0.528
12	6	4.680	65.534	7.740	0.528
13	6.5	4.700	66.458	7.780	0.514
14	7	4.740	65.127	7.760	0.519
15	7.5	4.700	66.375	7.740	0.528
16	8	4.700	66.332	7.760	0.519

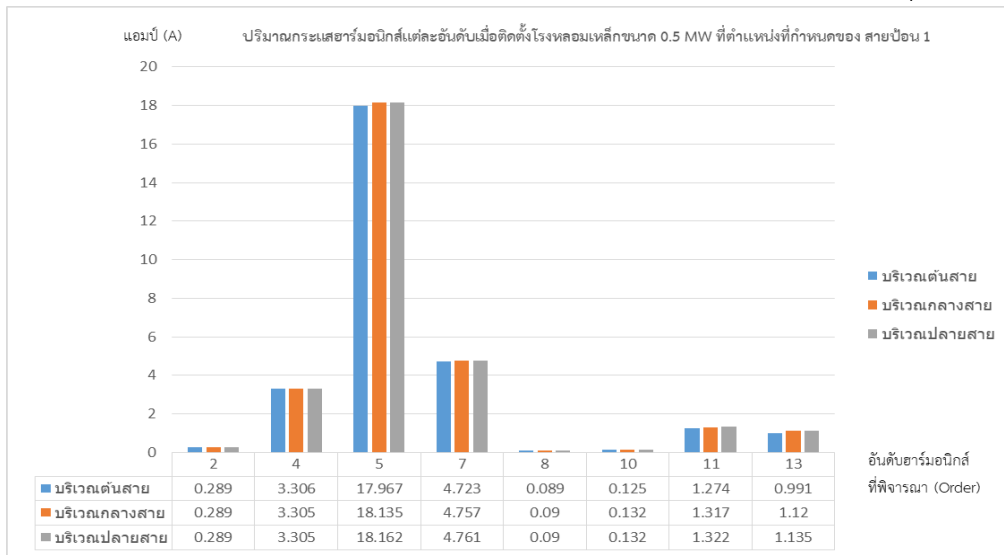
ตารางที่ 4-28 ผลของ Frequency Scan ที่เกิดขึ้น เมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กที่กลางสาย สายป้อน 1

ลำดับ	ขนาดโรงหลอมเหล็ก (MW)	ติดตั้งโรงหลอมเหล็กกลางสาย สายป้อน 1			
		Maximum Palarell Resonance		Mimimum Series Resonance	
		Order	Impedance (Ohm)	Order	Impedance (Ohm)
1	0.5	4.740	65.278	7.840	0.533
2	1	4.680	65.898	7.740	0.527
3	1.5	4.740	65.246	7.720	0.541
4	2	4.680	65.754	7.740	0.527
5	2.5	4.720	66.451	7.740	0.527
6	3	4.680	65.595	7.740	0.528
7	3.5	4.680	65.509	7.740	0.528
8	4	4.740	65.141	7.740	0.528
9	4.5	4.680	65.324	7.740	0.528
10	5	4.680	65.225	7.680	0.550
11	5.5	4.720	66.152	7.760	0.519
12	6	4.740	65.027	7.780	0.515
13	6.5	4.680	64.901	7.760	0.520
14	7	4.700	65.901	7.740	0.529
15	7.5	4.680	64.660	7.740	0.530
16	8	4.740	64.879	7.780	0.516

ตารางที่ 4-29 ผลของ Frequency Scan ที่เกิดขึ้น เมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กที่ปลายสาย สายป้อน 1

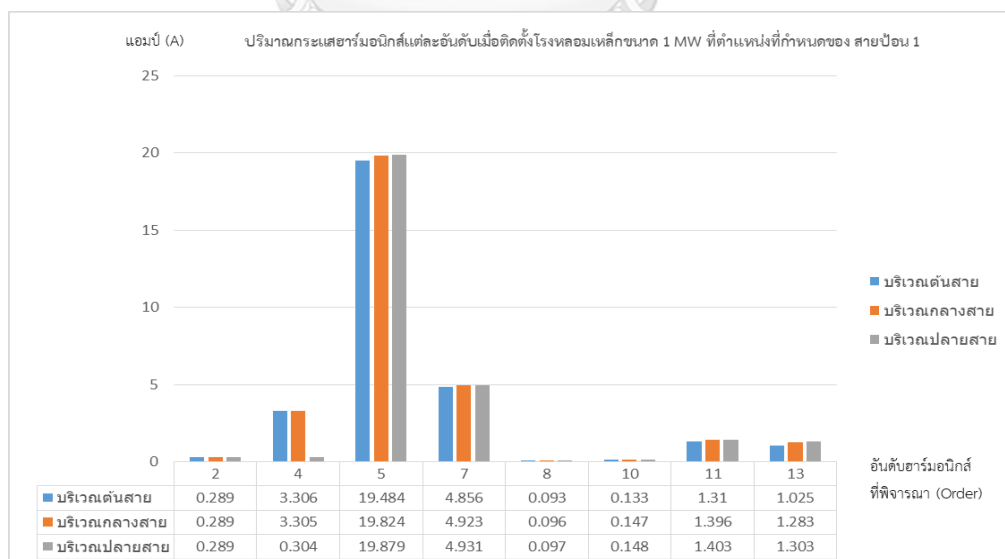
ลำดับ	ขนาดโรงหลอมเหล็ก (MW)	ติดตั้งโรงหลอมเหล็กปลายสาย สายป้อน 1			
		Maximum Parallel Resonance		Minimum Series Resonance	
		Order	Impedance (Ohm)	Order	Impedance (Ohm)
1	0.5	4.720	66.685	7.740	0.527
2	1	4.680	65.830	7.740	0.527
3	1.5	4.680	65.713	7.740	0.527
4	2	4.720	66.406	7.820	0.522
5	2.5	4.700	66.430	7.740	0.528
6	3	4.720	66.246	7.780	0.515
7	3.5	4.680	65.104	7.720	0.543
8	4	4.740	65.011	7.780	0.515
9	4.5	4.700	65.840	7.740	0.530
10	5	4.700	65.653	7.760	0.520
11	5.5	4.740	64.792	7.740	0.531
12	6	4.700	65.217	7.760	0.521
13	6.5	4.680	63.635	7.820	0.520
14	7	4.700	64.683	7.740	0.533
15	7.5	4.700	64.371	7.740	0.534
16	8	4.740	64.164	7.720	0.550

กราฟความสัมพันธ์แต่ละกรณีเมื่อมีการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาดต่างๆที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา
 กรณีที่ 1 เมื่อมีการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาด 0.5 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



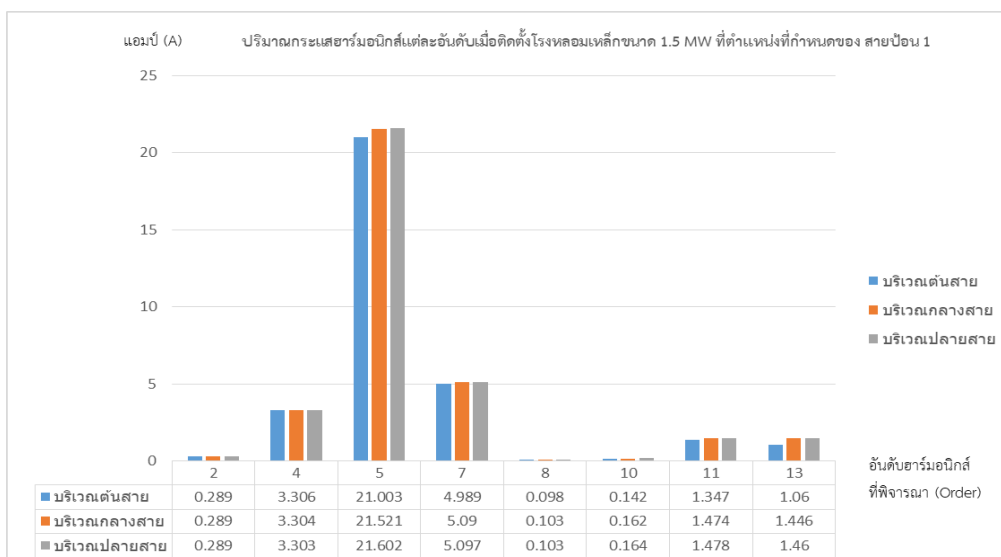
รูปที่ 4-135 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกแต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 0.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 2 เมื่อมีการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาด 1 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



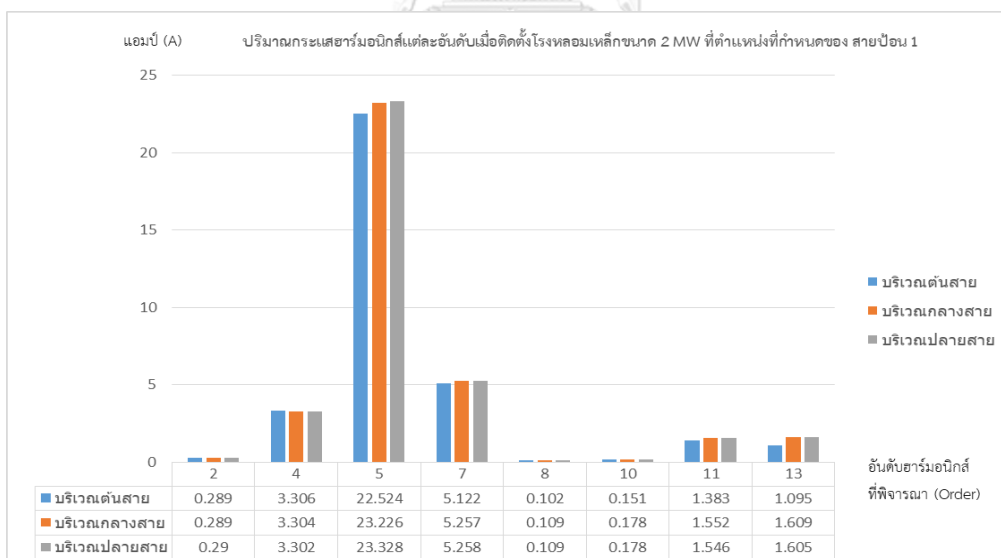
รูปที่ 4-136 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกแต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 1 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 3 เมื่อมีการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาด 1.5 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



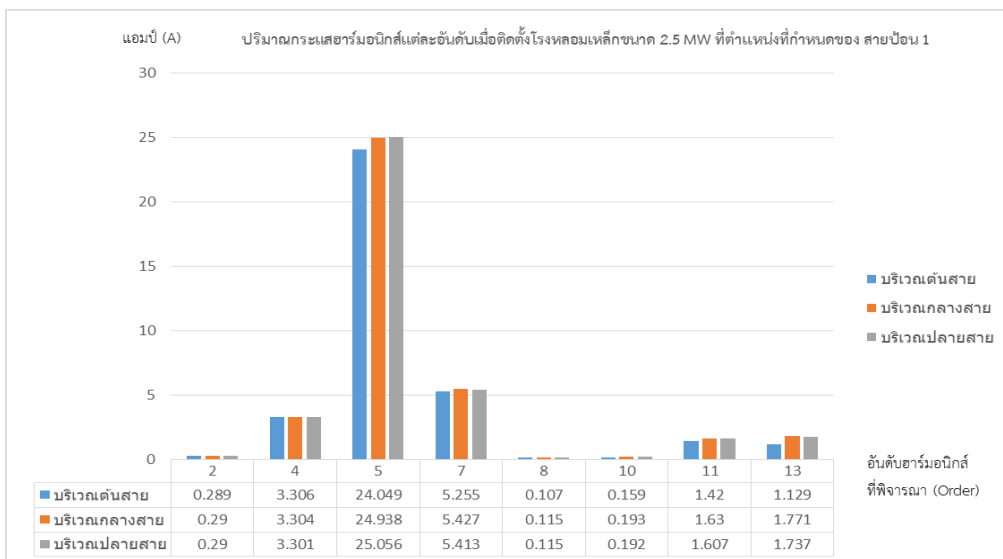
รูปที่ 4-137 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 1.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 4 เมื่อมีการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาด 2 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



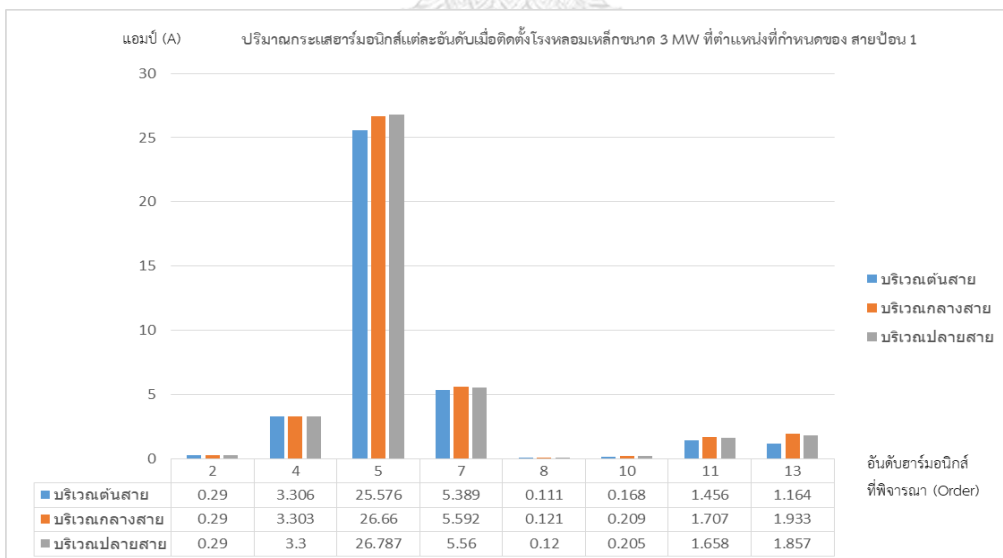
รูปที่ 4-138 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 2 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 5 เมื่อมีการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาด 2.5 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



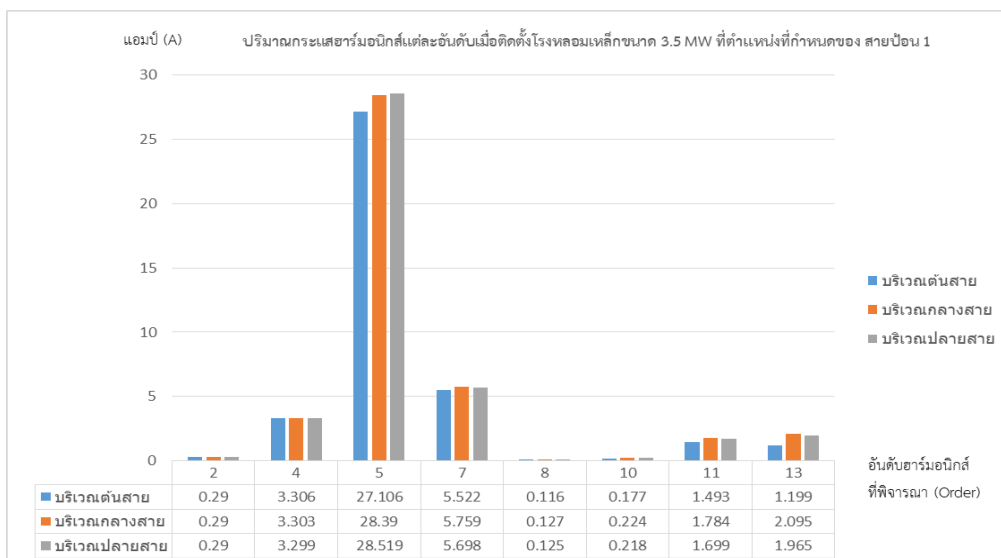
รูปที่ 4-139 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 2.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 6 เมื่อมีการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาด 3 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



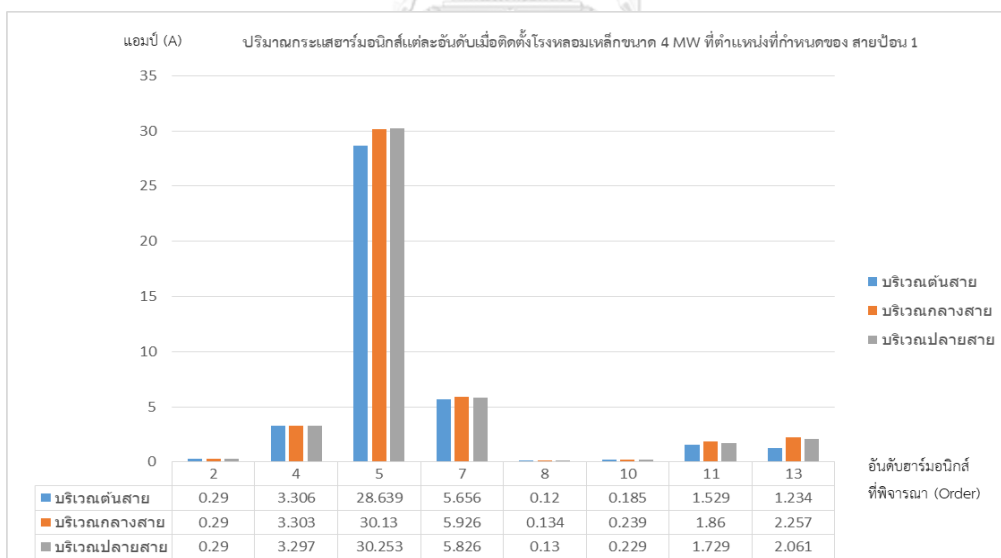
รูปที่ 4-140 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 3 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 7 เมื่อมีการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาด 3.5 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



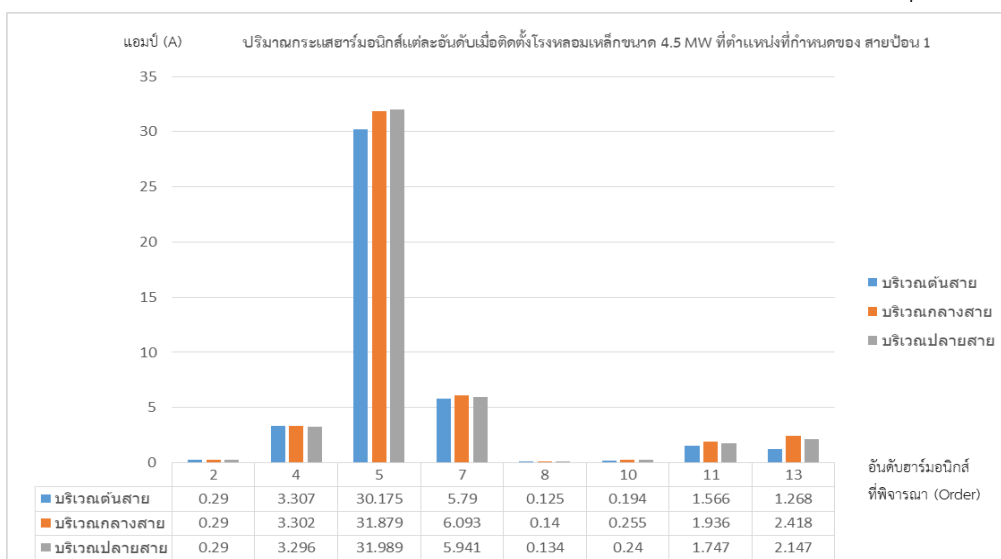
รูปที่ 4-141 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 3.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 8 เมื่อมีการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาด 4 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



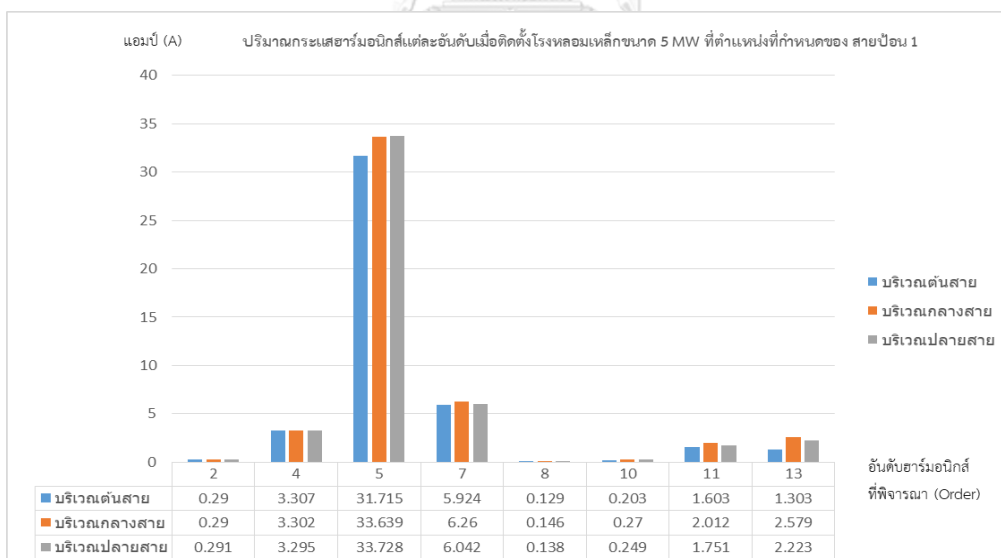
รูปที่ 4-142 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 4 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 9 เมื่อมีการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาด 4.5 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



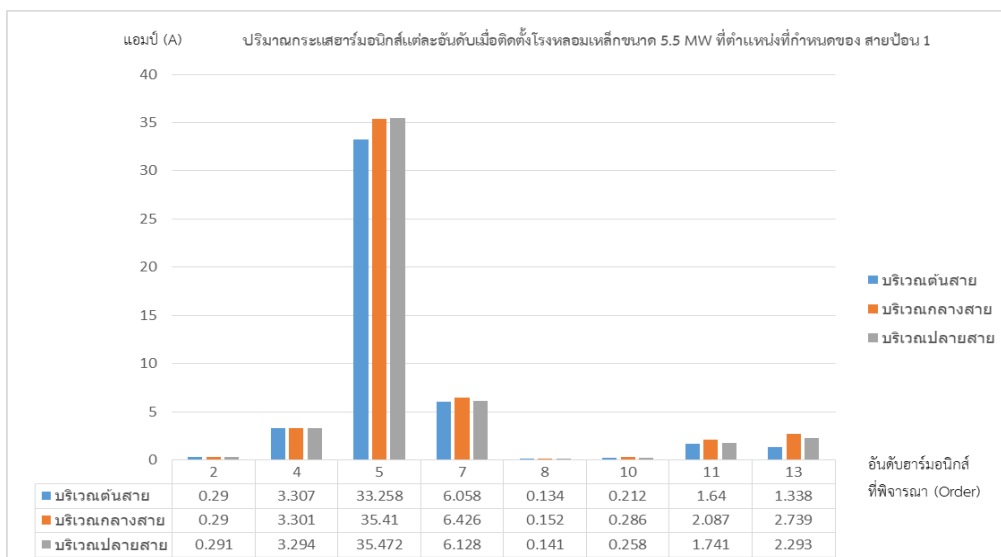
รูปที่ 4-143 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 4.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 10 เมื่อมีการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาด 5 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



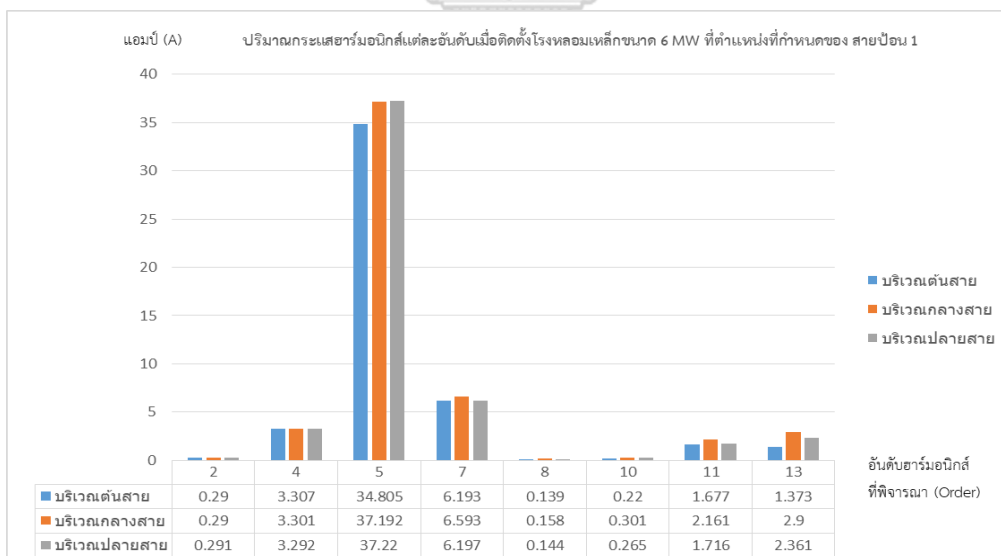
รูปที่ 4-144 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 11 เมื่อมีการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาด 5.5 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



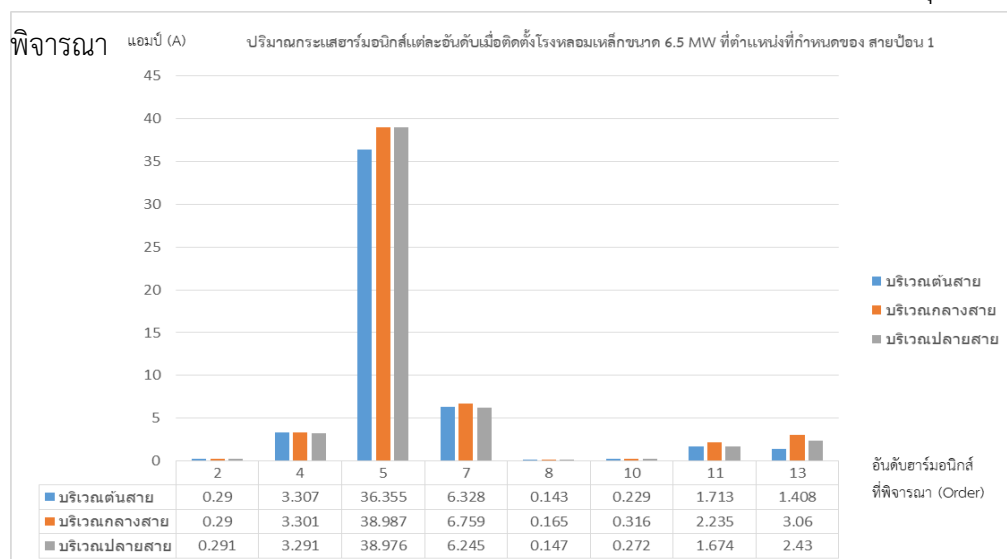
รูปที่ 4-145 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 5.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 12 เมื่อมีการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาด 6 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



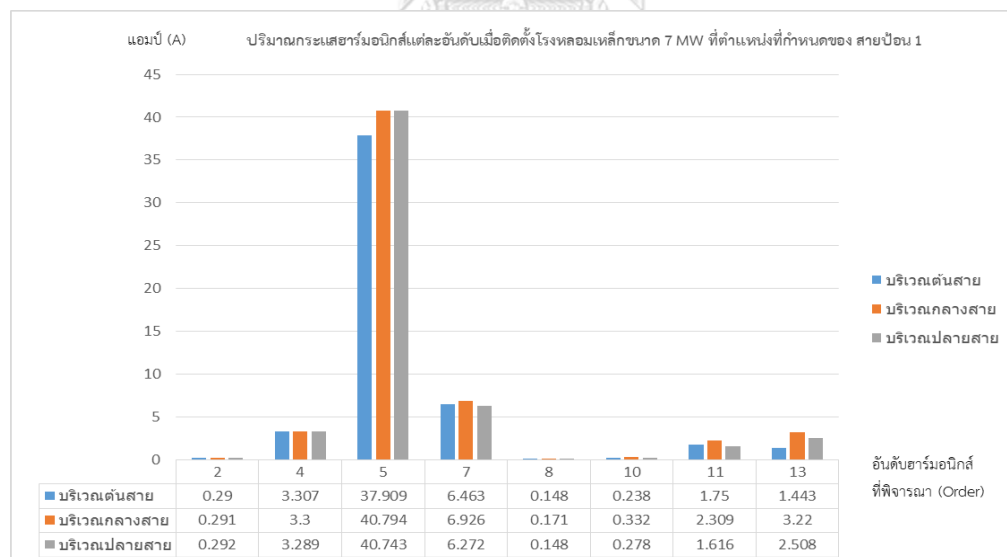
รูปที่ 4-146 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 6 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 13 เมื่อมีการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาด 6.5 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่



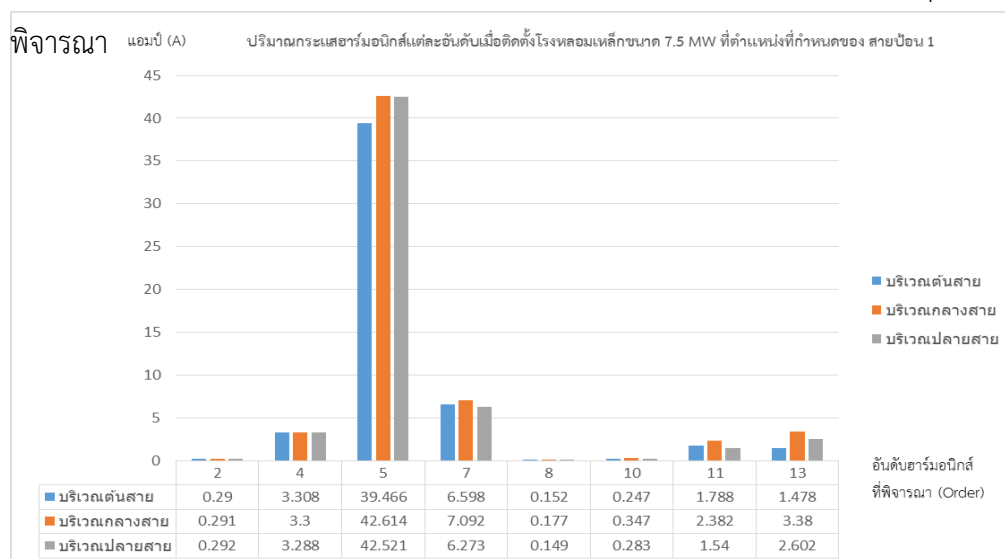
รูปที่ 4-147 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 6.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 14 เมื่อมีการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาด 7 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



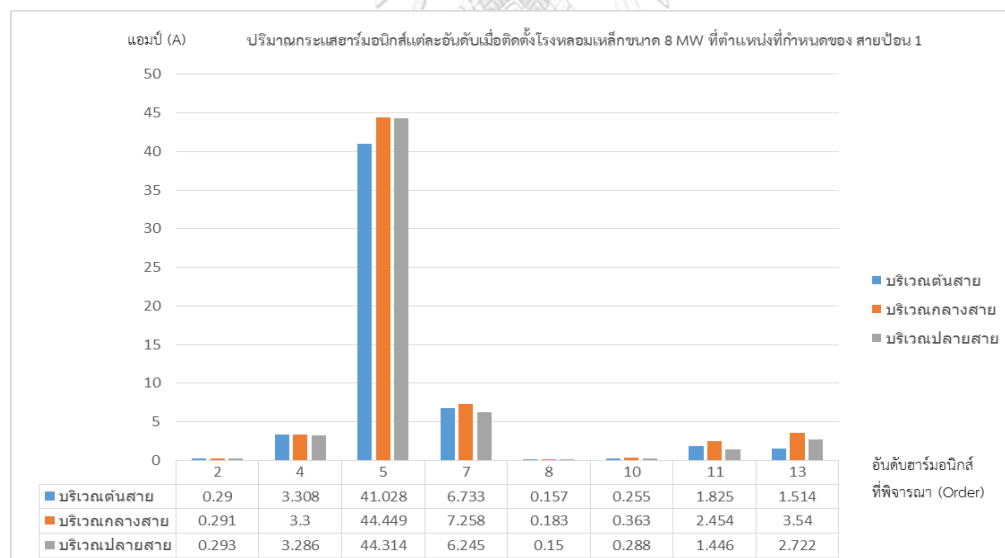
รูปที่ 4-148 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 7 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 15 เมื่อมีการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาด 7.5 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่



รูปที่ 4-149 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 7.5 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

กรณีที่ 16 เมื่อมีการจำลองโรงหลอมเหล็กขนาด 8 MW เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



รูปที่ 4-150 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์แต่ละอันดับเมื่อติดตั้งโรงหลอมเหล็กขนาด 8 MW ที่บริเวณการติดตั้งแต่ละจุด

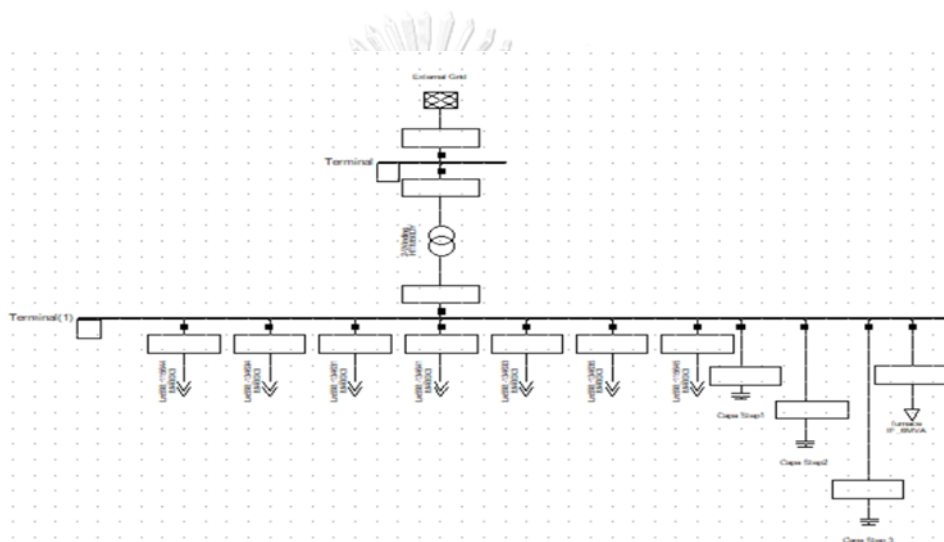
จากการจำลองระบบโรงหลอมเหล็กเข้ามาที่ระบบไฟฟ้าของสถานีวิหารแดง บริเวณสายป้อน 1 ผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory พบว่าค่ากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นได้ไหลผ่านชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าวิหารแดงมีค่าดังกราฟแผนภูมิแท่งรูปที่ 4-71 ถึง รูปที่ 4-86 และการศึกษาผลกระทบระยะทางของการเชื่อมต่อโรงหลอมเหล็กในระบบ เมื่อวิเคราะห์ผลจากกราฟ Harmonic Scan และ Frequency Scan พบว่าค่าที่เกิดขึ้นไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่ออยู่ในระบบดังกล่าว โดยมีค่า ดังนี้

Harmonic Scan จากการวิเคราะห์ระบบดังกล่าว ค่ากระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 2, 4, 5,7,8,10,11 และ 13 ที่จุดติดตั้งโรงหลอมเหล็กตามระยะทางบริเวณที่กำหนด คือ ต้นสาย กลางสาย และปลายสายของสายป้อน 1 พบว่าจะมีค่าลดลงโดยอันดับกระแสฮาร์มอนิกที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด คือ กระแสฮาร์มอนิก อันดับที่ 5 เมื่อนำผลรวมของกระแสที่ไหลผ่านชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าแต่ชุดอุปกรณ์ ดังตารางที่ 19,21 และ 23 พบว่าค่ากระแสที่วัดได้จากการจำลองข้อมูลผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory มีค่าไม่เกิน 135%ของค่ากระแสมาตรฐาน ซึ่งจะส่งผลทำให้ชุดตัวเก็บประจุระเบิดได้เนื่องจากผลของกระแสฮาร์มอนิกที่ระบบดังกล่าว ดังนั้นการติดตั้งโรงหลอมเหล็กตามระยะทางบริเวณที่กำหนด คือ ต้นสาย กลางสาย และปลายสายของสายป้อน 1 แทบไม่ส่งผลทำให้ค่าฮาร์มอนิกเกินและที่จะทำให้ระเบิดได้

Frequency Scan จากการวิเคราะห์ระบบพบว่าระบบมีการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (parallel resonance) มักจะเกิดในช่วงอันดับ 4.68 ถึง 4.74 มีอิมพีแดนซ์ระหว่าง 64.660 โอห์ม ถึง 65.127 โอห์ม ซึ่งรูปแบบการเกิดของระบบจะเหมือนกัน คือ เปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นการติดตั้งโรงหลอมเหล็กตามระยะทางบริเวณที่กำหนด คือ ต้นสาย กลางสาย และปลายสายของสายป้อน 1 แทบไม่มีผลต่อระบบดังกล่าว

4.2.3 ศึกษาผลกระทบเมื่อกำหนดให้มีอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูง (Fixed Capacitor) เชื่อมต่อในระบบ 22 กิโลโวลต์ ของสถานีไฟฟ้าบริหารแดง

การทดลองเมื่อสถานีไฟฟ้าบริหารแดง จังหวัดสระบุรีมีการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) เพื่อยกแรงดันระดับไฟฟ้าตามขนาดต่างๆ เพื่อศึกษาที่เกิดขึ้นว่ามีผลต่อฮาร์มอนิกส์ของชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้า(Capacitor Bank) อย่างไร การศึกษานี้ได้กำหนดให้มีการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูง (Fixed Capacitor) ในสายป้อน ที่ 1 โดยการติดตั้งอุปกรณ์นี้ระบุตามมาตรฐานที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้งาน สำหรับขนาดที่ทำการทดลองได้แก่ 300,600,900,1200 และ 1500 kVar สามารถแสดงได้ ดังนี้

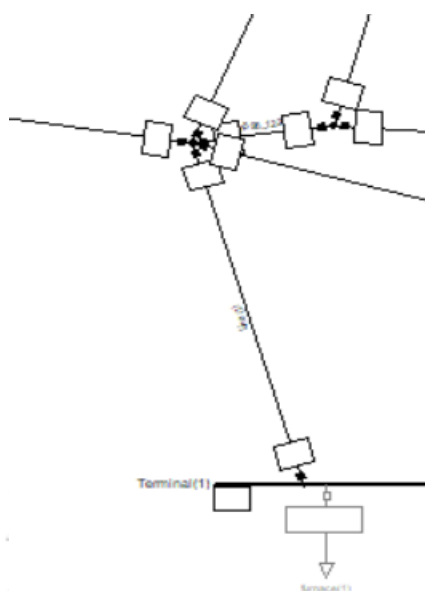


รูปที่ 4-151 การวิเคราะห์โมเดลจากการจำลองระบบสถานีบริหารแดงในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory ผ่าน Base Case เมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) เชื่อมต่อในระบบ 22 กิโลโวลต์ ของสถานีไฟฟ้าบริหารแดง

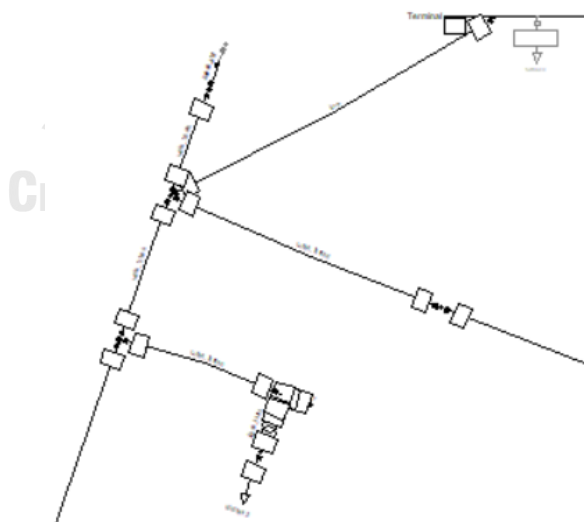
โดยที่เมื่อติดตั้งเข้าไปในระบบแล้วจะจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบรีแอกทีฟเข้าสู่ระบบตลอดเวลา โดยไม่สามารถที่จะทำการควบคุมการจ่ายกำลังแบบไฟฟารีแอกทีฟได้ เวลาติดตั้งไปใช้งานไม่ต้องคำนึงถึงช่วงเวลาที่มีการใช้โหลดน้อยกว่าอาจทำให้เกิดแรงดันเกินที่จุดติดตั้งได้ ส่วนใหญ่จะเหมาะกับระบบสายส่งที่อยู่ไกลจากสถานีไฟฟ้าช่วยให้ป้องกันแรงดันตกได้ การศึกษาการจำลองโมเดลนี้ได้ทำการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) เข้ามาที่สายป้อน 1 โดยการเพิ่มระยะทางของการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูง (Fixed Capacitor) เพื่อดูผลของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบว่าส่งผลกระทบต่อชุดตัวเก็บประจุที่สถานีหรือไม่ ดังนี้

1. จำลองบริเวณต้นสายสายป้อน 1 ติดกับสถานี

2. จำลองบริเวณกลางสายสายป้อน 1 จากสถานี
3. จำลองบริเวณที่ปลายสายสายป้อน 1 จากสถานี



รูปที่ 4-152 การจำลองอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) เข้ามาบริเวณกึ่งกลางสายป้อน 1



รูปที่ 4-153 การจำลองอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) เข้ามาบริเวณปลายสายสายป้อน 1

ตารางที่ 4-30 ผลจากการจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ขนาดต่างๆบริเวณต้นสายสายป้อน 1 ติดกับสถานีเข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

ลำดับ	ขนาดคาปาซิเตอร์ แรงสูงในระบบ (kVar)	จุดติดตั้งต้นสาย สายป้อน 1			
		ปริมาณกำลัง รวมทั้งหม้อ แปลง (MW)	กระแสที่หม้อ แปลงจ่าย (A)	กระแสที่ไหล ผ่านชุดตัว เก็บประจุ (A)	กระแสที่ไหล ผ่านคาปาซิ เตอร์แรงสูง (A)
1	300	21.699	105.2	65.575	24.591
2	600	21.699	104.674	65.79	49.343
3	900	21.698	104.43	66.007	74.258
4	1200	21.698	104.475	66.225	99.337
5	1500	21.698	104.814	66.444	124.583

ตารางที่ 4-31 ผลจากการจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fix Capacitor) ขนาดต่างๆบริเวณกลางสายสายป้อน 1 ในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

ลำดับ	ขนาดคาปาซิเตอร์ แรงสูงในระบบ (kVar)	จุดติดตั้งกลางสาย สายป้อน 1			
		ปริมาณกำลัง รวมทั้งหม้อ แปลง (MW)	กระแสที่หม้อ แปลงจ่าย (A)	กระแสที่ไหล ผ่านชุดตัว เก็บประจุ (A)	กระแสที่ไหล ผ่านคาปาซิ เตอร์แรงสูง (A)
1	300	21.698	105.195	65.575	24.507
2	600	21.7	104.675	65.791	49.307
3	900	21.704	104.455	66.01	74.407
4	1200	21.711	104.544	66.232	99.81
5	1500	21.721	104.955	66.456	125.522

ตารางที่ 4-32 ผลจากการจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fix Capacitor) ขนาดต่างๆบริเวณปลายสายสายป้อน 1 ในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

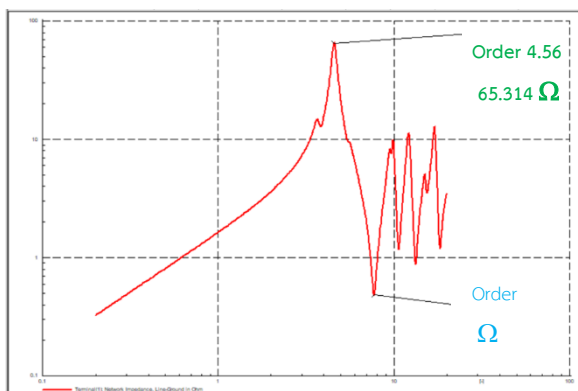
ลำดับ	ขนาดคาปาซิเตอร์แรงสูงในระบบ (kVar)	จุดติดตั้งปลายสาย สายป้อน 1			
		ปริมาณกำลังรวมที่หม้อแปลง (MW)	กระแสที่หม้อแปลงจ่าย (A)	กระแสที่ไหลผ่านชุดตัวเก็บประจุ (A)	กระแสที่ไหลผ่านคาปาซิเตอร์แรงสูง (A)
1	300	21.696	105.185	65.574	24.453
2	600	21.702	104.686	65.793	49.559
3	900	21.72	104.531	66.018	75.342
4	1200	21.749	104.749	66.248	101.828
5	1500	21.791	105.366	66.484	129.042

ตารางที่ 4-33 ผลของกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่พิจารณาเกิดขึ้นเนื่องจากจากการจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ขนาดต่างๆ ณ บริเวณจุดติดตั้งที่กำหนดเข้ามาในระบบผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

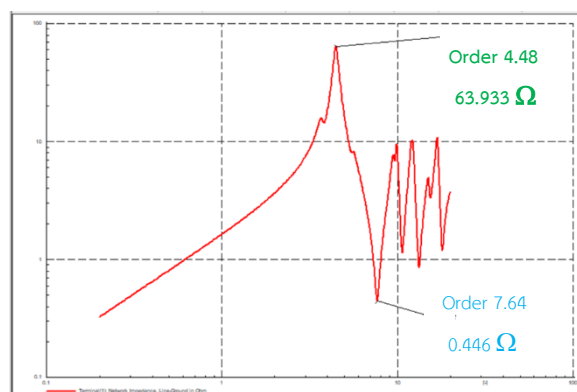
ลำดับ	ขนาดคาปาซิเตอร์แรงสูงที่จำลองเพื่อเชื่อมต่อในระบบ (kVar)	บริเวณจุดติดตั้ง	ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกแต่ละอันดับที่พิจารณา (A)							
			2	4	5	7	8	10	11	13
1	300	ต้นสาย สายป้อน1	0.292	3.851	11.631	4.247	0.08	0.105	1.194	0.879
		กลางสาย สายป้อน 1	0.292	3.952	10.624	4.003	0.075	0.071	0.811	1.053
		ปลายสาย สายป้อน 1	0.292	4.042	9.74	3.644	0.064	0.109	1.636	6.749
2	600	ต้นสาย สายป้อน1	0.296	4.607	8.906	3.95	0.076	0.096	1.152	0.813
		กลางสาย สายป้อน 1	0.296	4.999	7.428	3.375	0.063	0.018	1.758	2.683
		ปลายสาย สายป้อน 1	0.296	5.766	5.305	1.611	0.145	0.206	1.452	4.172
3	900	ต้นสาย สายป้อน1	0.299	5.708	7.184	3.69	0.073	0.088	1.113	0.756
		กลางสาย สายป้อน 1	0.3	6.878	5.457	2.702	0.046	0.059	1.918	3.918
		ปลายสาย สายป้อน 1	0.301	8.667	2.345	11.673	0.111	0.184	1.415	3.648
4	1200	ต้นสาย สายป้อน1	0.303	7.412	6.006	3.461	0.07	0.081	1.076	0.705
		กลางสาย สายป้อน 1	0.303	10.131	4.131	1.986	0.023	0.123	1.785	4.807
		ปลายสาย สายป้อน 1	0.305	3.461	0.806	8.303	0.105	0.176	1.396	3.429
5	1500	ต้นสาย สายป้อน1	0.306	10.133	5.152	3.257	0.067	0.075	1.041	0.661
		กลางสาย สายป้อน 1	0.308	10.349	3.183	1.24	0.038	0.176	1.715	5.44
		ปลายสาย สายป้อน 1	0.311	1.215	1.762	7.359	0.102	0.171	1.382	3.305

ผลของ Frequency Scan เมื่อมีการการจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ขนาดต่างๆ ณ บริเวณจุดติดตั้งที่กำหนด

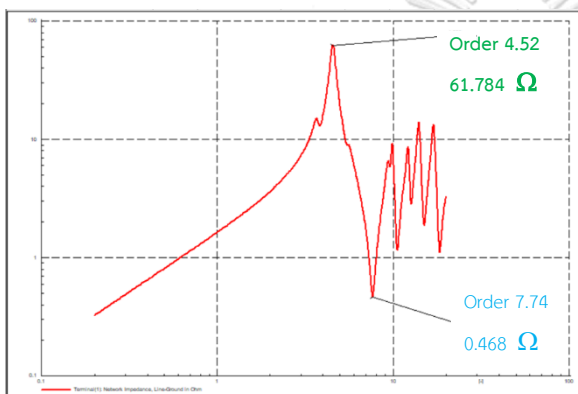
ขนาด 300 kVAR



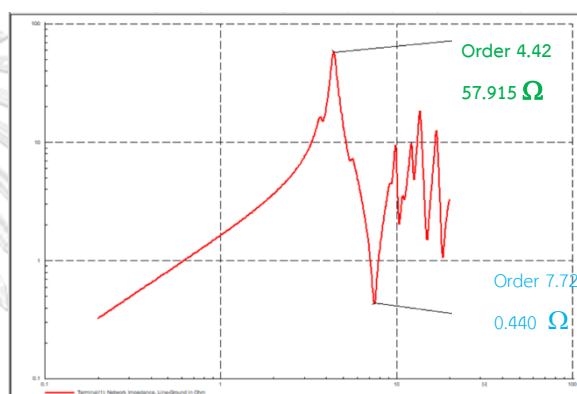
ขนาด 600 kVAR



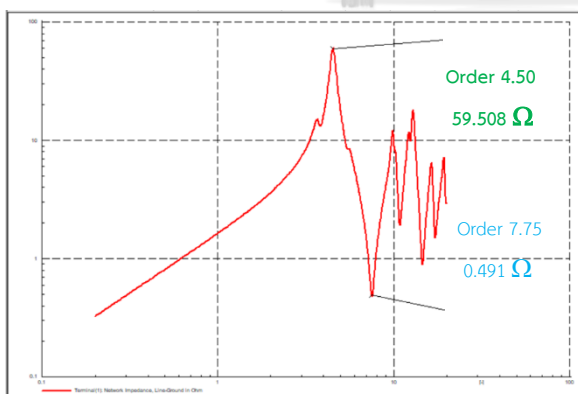
4-90a บริเวณต้นสาย



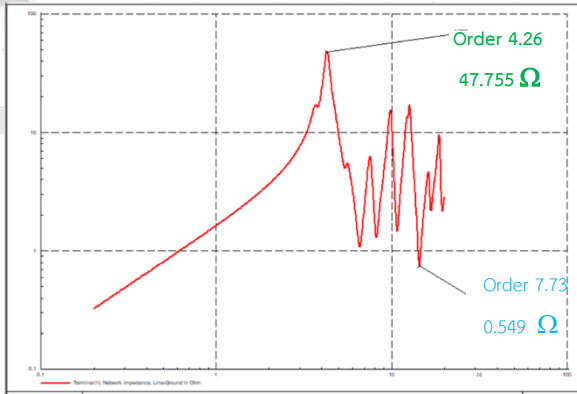
4-91a บริเวณต้นสาย



4-90b บริเวณกลางสาย



4-91b บริเวณกลางสาย



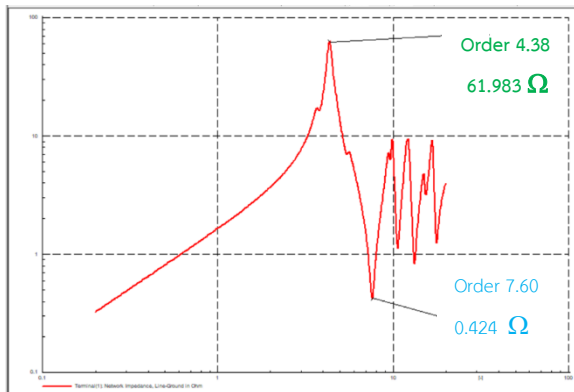
4-90c บริเวณปลายสาย

4-91c บริเวณปลายสาย

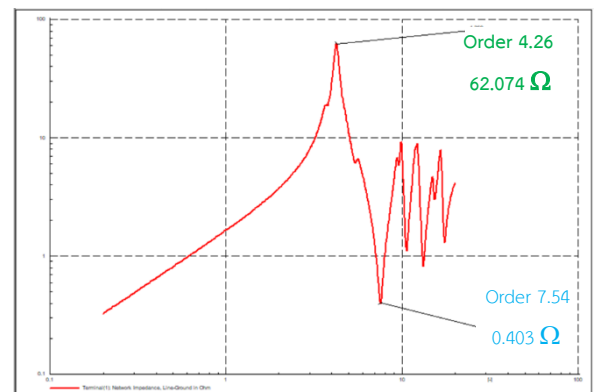
รูปที่ 4-154 (a,b,c) ติดตั้ง Fixed Capacitor ขนาด 300 kVar

รูปที่ 4-155 (a,b,c) ติดตั้ง Fixed Capacitor ขนาด 600 kVar

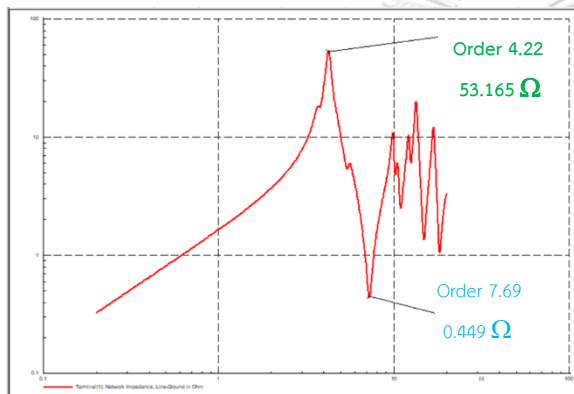
ขนาด 900 kVAR



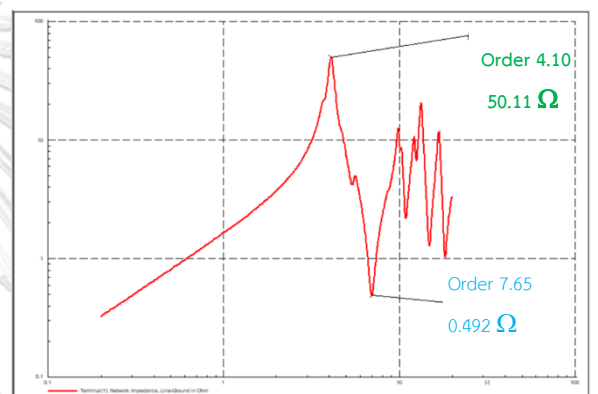
ขนาด 1,200 kVAR



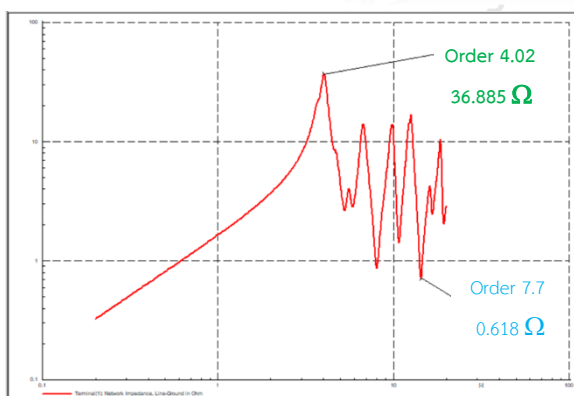
4-92a บริเวณต้นสาย



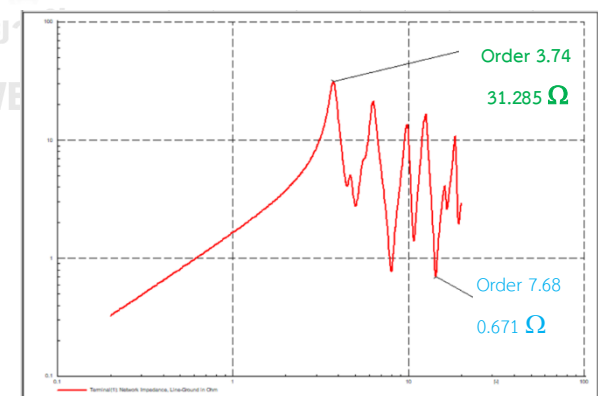
4-93a บริเวณต้นสาย



4-92b บริเวณกลางสาย



4-93b บริเวณกลางสาย



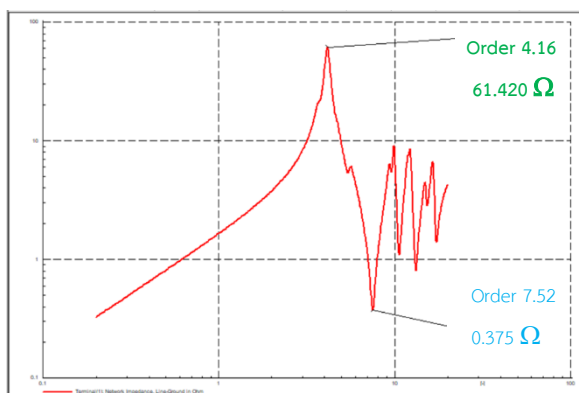
4-92c บริเวณปลายสาย

4-93c บริเวณปลายสาย

รูปที่ 4-156 (a,b,c) ติดตั้ง Fixed Capacitor ขนาด 900 kVar

รูปที่ 4-157 (a,b,c) ติดตั้ง Fixed Capacitor ขนาด 1,200 kVar

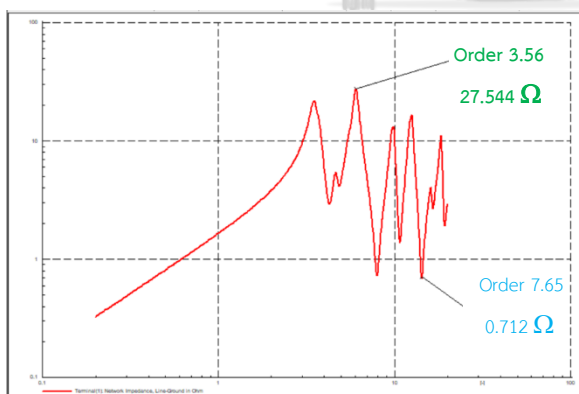
ขนาด 1,500 kVAR



4-94a บริเวณต้นสาย



4-94b บริเวณกลางสาย



4-94c บริเวณปลายสาย

รูปที่ 4-158 (a,b,c) ติดตั้ง Fixed Capacitor ขนาด 1,500 kVar

ตารางที่ 4-34 ผลของ Frequency Scan ที่เกิดขึ้น เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ที่ต้นทาง สายป้อน 1

ลำดับ	ขนาดอุปกรณ์ยกแรงดัน (kVA)	ติดตั้งคาปาซิเตอร์แบบคงที่ ต้นสาย สายป้อน 1			
		Maximum Palarell Resonance		Mimumum Series Resonance	
		Order	Impedance (Ohm)	Order	Impedance (Ohm)
1	300	4.560	65.314	7.640	0.375
2	600	4.480	63.933	7.460	0.403
3	900	4.380	61.983	7.220	0.424
4	1200	4.260	62.074	6.960	0.440
5	1500	4.160	61.420	6.680	0.468

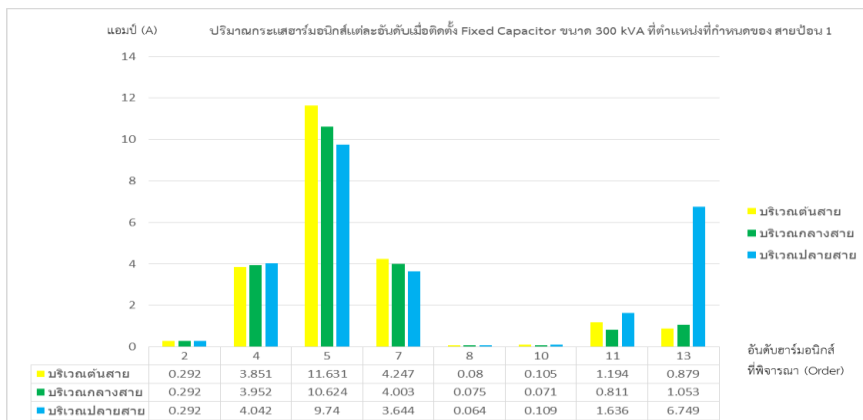
ตารางที่ 4-35 ผลของ Frequency Scan ที่เกิดขึ้น เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ที่กลางสาย สายป้อน 1

ลำดับ	ขนาดอุปกรณ์ยกแรงดัน (kVA)	ติดตั้งคาปาซิเตอร์แบบคงที่ กลางสาย สายป้อน 1			
		Maximum Palarell Resonance		Maximum Series Resonance	
		Order	Impedance (Ohm)	Order	Impedance (Ohm)
1	300	4.520	61.784	7.700	0.484
2	600	4.420	57.915	7.680	0.490
3	900	4.220	53.165	7.660	0.499
4	1200	4.100	50.110	7.600	0.512
5	1500	3.940	46.083	7.520	0.546

ตารางที่ 4-36 ผลของ Frequency Scan ที่เกิดขึ้น เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ที่ปลายสาย สายป้อน 1

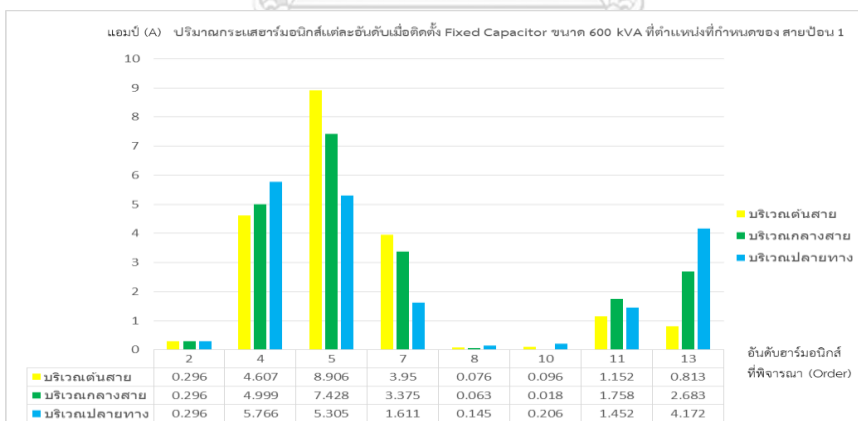
ลำดับ	ขนาดอุปกรณ์ยกแรงดัน (kVA)	ติดตั้งคาปาซิเตอร์แบบคงที่ ปลายสาย สายป้อน 1			
		Maximum Palarell Resonance		Maximum Series Resonance	
		Order	Impedance (Ohm)	Order	Impedance (Ohm)
1	300	4.500	59.508	7.75	0.491
2	600	4.260	47.755	7.73	0.549
3	900	4.020	36.885	7.7	0.618
4	1200	3.740	31.285	7.680	0.671
5	1500	3.560	27.544	7.650	0.712

กราฟความสัมพันธ์เมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) กรณีที่ 1 เมื่อมีการจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ขนาด 300 kVA เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



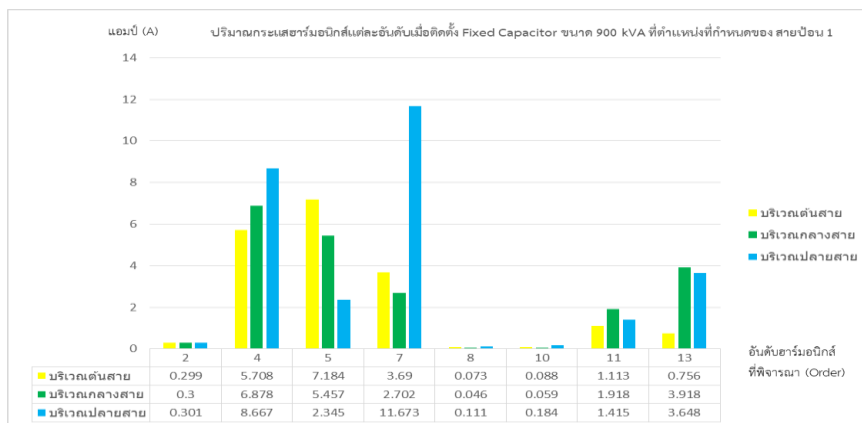
รูปที่ 4-159 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ขนาด 300 kVA ขนาดต่างๆ ณ บริเวณจุดติดตั้งที่กำหนด

กรณีที่ 2 เมื่อมีการจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ขนาด 600 kVA เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



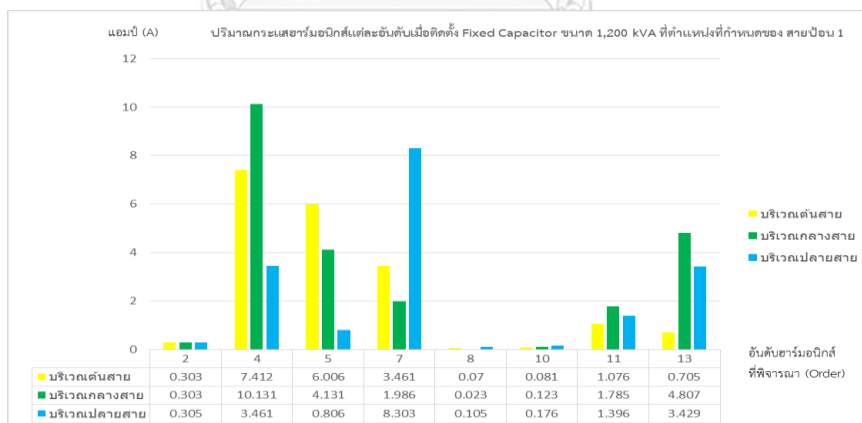
รูปที่ 4-160 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ขนาด 600 kVA ขนาดต่างๆ ณ บริเวณจุดติดตั้งที่กำหนด

กรณีที่ 3 เมื่อมีการจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ขนาด 900 kVA เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



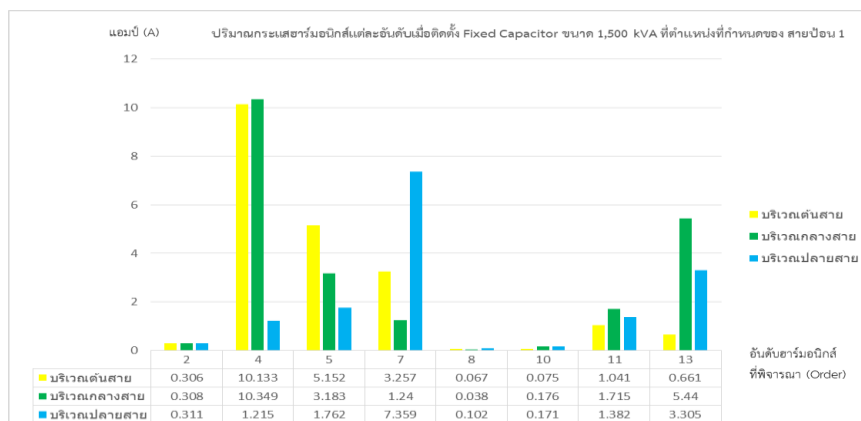
รูปที่ 4-161 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ขนาด 900 kVA ขนาดต่างๆ ณ บริเวณจุดติดตั้งที่กำหนด

กรณีที่ 4 เมื่อมีการจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ขนาด 1,200 kVA เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



รูปที่ 4-162 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ขนาด 1,200 kVA ขนาดต่างๆ ณ บริเวณจุดติดตั้งที่กำหนด

กรณีที่ 5 เมื่อมีการจำลองการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ขนาด 1,500 kVA เข้ามาในระบบที่บริเวณจุดติดตั้งที่พิจารณา



รูปที่ 4-163 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณกระแสฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับเมื่อการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ขนาด 1,500 kVA ขนาดต่างๆ ณ บริเวณจุดติดตั้งที่กำหนด

จากการจำลองติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) เข้ามาที่ระบบไฟฟ้าของสถานีวิหารแดง บริเวณสายป้อน 1 ผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory พบว่าค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ต่างๆที่เกิดขึ้นได้ไหลผ่านชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าวิหารแดงมีค่าดังกราฟแผนภูมิแท่งรูปที่ 4-95 ถึง รูปที่ 4-99 และการศึกษาผลกระทบระยะทางต่อติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) เมื่อวิเคราะห์ผลจากกราฟ Harmonic Scan และ Frequency Scan มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างรวมของระบบเนื่องจากระยะทางติดตั้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง ดังนี้

Harmonic Scanจากการวิเคราะห์ระบบดังกล่าว ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์อันดับที่ 2, 4, 5,7,8,10,11 และ 13 ที่จุดติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ตามระยะทางบริเวณที่กำหนด คือ ต้นสาย กลางสาย และปลายสายของสายป้อน 1 พบว่าจะมีค่าไม่แน่นอนโดยอันดับกระแสฮาร์มอนิกส์จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด คือ กระแสฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้านี้จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นตามขนาดของอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) และตามระยะทางการติดตั้งแต่ละจุด โดยผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจะทำให้ฮาร์มอนิกส์รวมของระบบมีการเปลี่ยนแปลงและเมื่อนำผลรวมของกระแสทั้งหมดที่ไหลผ่านชุดตัวเก็บ

ประจุที่สถานีไฟฟ้า พบว่าค่ากระแสมาตรฐาน IEEE Std.18 ต้องมีค่าไม่เกิน 135% ของค่ากระแสมูลฐานที่วัดได้ไม่เช่นนั้นจะเกิดความเสียหายต่อชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่สถานีได้ จากการจำลองข้อมูลผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory ค่าผลรวมของกระแสดังกล่าวไม่สามารถทำให้ชุดตัวเก็บประจุระเบิดที่สถานีไฟฟ้าวิหารแดง จังหวัดสระบุรีระเบิดได้เนื่องจากผลรวมของกระแสพื้นฐานและกระแสฮาร์โมนิกที่ระบบดังกล่าวไม่เกินค่ามาตรฐาน ดังนั้นการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ตามระยะทางบริเวณที่กำหนด คือ ต้นสาย กลางสาย และปลายสายของสายป้อน 1 จะส่งผลทำให้ค่ากระแสฮาร์โมนิกเกินบางค่าของมาตรฐานการเชื่อมต่อของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (Grid Code) แต่ไม่สามารถจะทำให้ชุดตัวเก็บประจุระเบิดได้

Frequency Scan จากการวิเคราะห์ระบบพบว่ารูปแบบของ Frequency Scan ของระบบมีการเปลี่ยนไปจากเดิมเมื่อเปลี่ยนการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ขนาดต่างๆและระยะทางของจุดติดตั้ง ลักษณะการเกิดฮาร์โมนิกเรโซแนนซ์ (Harmonic Resonance) จะกว้างขึ้นเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงและจะมีการเปลี่ยนแปลงของการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (parallel resonance) ซึ่งมักจะส่งผลกระทบต่อระบบมักจะเกิดในช่วงอันดับ 3.74 ถึง 6.06 มีอิมพีแดนซ์ระหว่าง 27.544 โอห์มถึง 31.285 โอห์ม ดังนั้นการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ตามระยะทางบริเวณที่กำหนด คือ ต้นสาย กลางสาย และปลายสายของสายป้อน 1 แทบมีผลต่อระบบดังกล่าวอย่างมาก ถ้าในสถานีไฟฟ้ามีอุปกรณ์ที่ช่วงการทำงานสอดคล้องกับช่วงการเกิดฮาร์โมนิกเรโซแนนซ์ อาจส่งผลต่ออายุการใช้งานของอุปกรณ์นั้นๆ

4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเพื่อการวิเคราะห์แนวทางการลดการระเบิดของชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าระดับแรงดัน 22 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่สถานีไฟฟ้าวิหารแดง จังหวัดสระบุรี ได้เกิดเหตุการณ์ชุดตัวเก็บประจุที่สถานีระเบิดที่ผ่านมาจึงได้นำปัญหานี้มาทำการศึกษาและวิจัยโดยนำโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์สาเหตุที่เกิดขึ้น ได้แก่ EMTP/ATP, PQView รวมทั้ง DigSILENT PowerFactory ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาสาเหตุที่จะทำให้ชุดตัวเก็บประจุระเบิดมาจาก 2 สาเหตุหลักเท่านั้น คือ 1.การระเบิดที่สภาวะทรานเซียนต์ (Transient State) จากการสับ/ปลดชุดตัวเก็บประจุที่อยู่ในสถานีไฟฟ้า 2.การระเบิดที่สภาวะปกติ (Steady State) เนื่องจากฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ารวมถึงยังศึกษาถึงแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์ในรูปแบบต่างๆที่มีส่วนเกี่ยวข้อง ในอนาคต ได้แก่ โรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ โรงหลอมเหล็ก เป็นต้นรวมถึงยังศึกษาอุปกรณ์ทางไฟฟ้าแรงสูงที่มีผลกระทบต่อฮาร์มอนิกส์รวมที่สถานีไฟฟ้า คือ อุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ว่ามีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าที่จำลองขึ้นอย่างไรบ้าง มาใช้วิเคราะห์สาเหตุต่างๆที่เกิดขึ้นและมีผลต่อตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้า และยังนำข้อมูลของสถานีไฟฟ้าวิหารแดง จังหวัดสระบุรี ที่ได้จากมิเตอร์คุณภาพไฟฟ้า (PQ Meter) ที่ติดตั้งที่สถานีไฟฟ้า ซึ่งจะนำข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านคุณภาพไฟฟ้าในช่วงเวลาทรานเซียนต์ (Transient) และที่สภาวะปกติ (Steady state) และค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านชุดตัวเก็บประจุ (Capacitor Bank) โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE ที่เกี่ยวข้อง จากการศึกษาพบว่า ทั้งในสภาวะทรานเซียนต์ และในสภาวะปกติ การระเบิดของชุดตัวเก็บประจุที่สถานี มีโอกาสเกิดขึ้น ค่ากระแสที่ไหลผ่านชุดตัวเก็บประจุ แรงดันและกระแสขณะเกิดทรานเซียนต์ของชุดตัวเก็บประจุที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐาน IEEE ที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นโอกาสการระเบิดจากปัจจัยดังกล่าวจึงยังมีค่าน้อยอยู่ อย่างไรก็ตามเมื่อมีการวิเคราะห์ปัจจัยอื่นๆ คือ จุดติดตั้งของแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกส์ต่างๆรวมถึงอุปกรณ์ทางไฟฟ้าแรงสูงยังได้กล่าวถึงในการศึกษานี้

โดยในงานวิจัยนี้ส่วนนี้ได้จำลองการออกแบบระบบไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าวิหารแดง จังหวัดสระบุรี ในสภาวะทรานเซียนต์ (Transient) เพื่อวิเคราะห์การระเบิดของชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าผ่านทางโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ EMTP/ATP โดยวิเคราะห์ขั้นตอนการปลด/สับของชุดตัวเก็บประจุและอ้างอิงจากการทำงานจริงของอุปกรณ์ไฟฟ้าชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าวิหารแดงและเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

ส่วนของฮาร์โมนิกส์ได้นำเอาระบบจริงจากฐานข้อมูลทางภูมิศาสตร์สารสนเทศ (GIS) ของสถานีไฟฟ้าวิหารแดง จังหวัดสระบุรี รวมถึงข้อมูลโหลดโปรไฟล์ที่เกิดจริงของสถานีในช่วงเวลาที่เกิดเหตุการณ์ดังกล่าวมาช่วยในการวิเคราะห์และจำลองระบบทางไฟฟ้าดังกล่าวในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory เพื่อทำเป็นกรณีศึกษาของสถานีไฟฟ้าวิหารแดง (Base Case) ให้มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น ในการช่วยวิเคราะห์ในด้านฮาร์โมนิกส์สาเหตุและผลกระทบที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์ รวมถึงวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของสถานีไฟฟ้านั้นๆว่าระบบเดิมมีลักษณะอะไรบ้าง เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยอื่นๆที่เป็นสาเหตุด้านคุณภาพไฟฟ้า และยังเป็นการนำเครื่องมืออุปกรณ์ที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคติดตั้งอยู่แล้วมาใช้วิเคราะห์ร่วมกันให้เกิดประโยชน์สูงสุดโดยจะเห็นจากการนำข้อมูลทางคุณภาพไฟฟ้าที่ได้จากมิเตอร์คุณภาพไฟฟ้า (PQ Meter) ที่ติดตั้งที่สถานีไฟฟ้านั้นมาผ่านทางโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ คือ PQView และนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการจำลองระบบไฟฟ้าจริงของสถานีวิหารแดง ผ่านทางโปรแกรม คือ DigSILENT PowerFactory เปรียบเทียบข้อมูลจากทั้งสองมีความสอดคล้องกัน

และงานวิจัยนี้ยังออกแบบระบบไฟฟ้าที่อาจจะเป็นสาเหตุอื่นๆที่จะทำให้ชุดตัวเก็บประจุระเบิดในอนาคต ทั้งหมดจำนวน 112 เหตุการณ์โดยแบ่งเป็น 3 กรณี คือ

4.3.1 ศึกษาสาเหตุการเพิ่มขึ้นของฮาร์โมนิกส์เนื่องจากโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ที่มีการเชื่อมต่อในระบบ โดยได้มีการเพิ่มขนาดของโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์และสมมติจุดติดตั้งเข้าไปที่สายป้อน 1 คือ ที่ต้นทางสายป้อน 1 กึ่งกลางทางสายป้อน 1 และปลายทางสายป้อน 1 เพื่อเป็นแนวทางการศึกษาว่าผลกระทบที่มีต่อระบบฮาร์โมนิกส์โดยรวมที่สถานีไฟฟ้าเป็นอย่างไร โดยพบว่า

1. จุดติดตั้งต้นทางสายป้อน 1

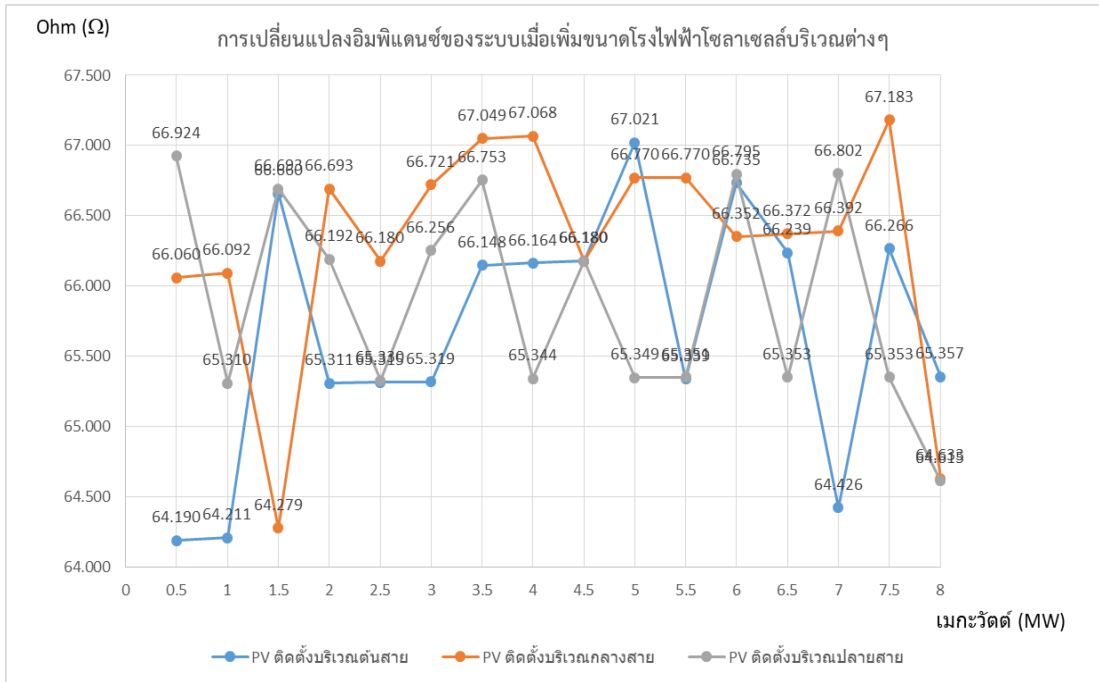
- กระแสฮาร์โมนิกส์ทุกอันดับมีแนวโน้มลดลง โดยกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 มีปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากคุณลักษณะเฉพาะพื้นที่ของระบบที่ใช้วิเคราะห์

2. จุดติดตั้งที่กึ่งกลางทางสายป้อน 1

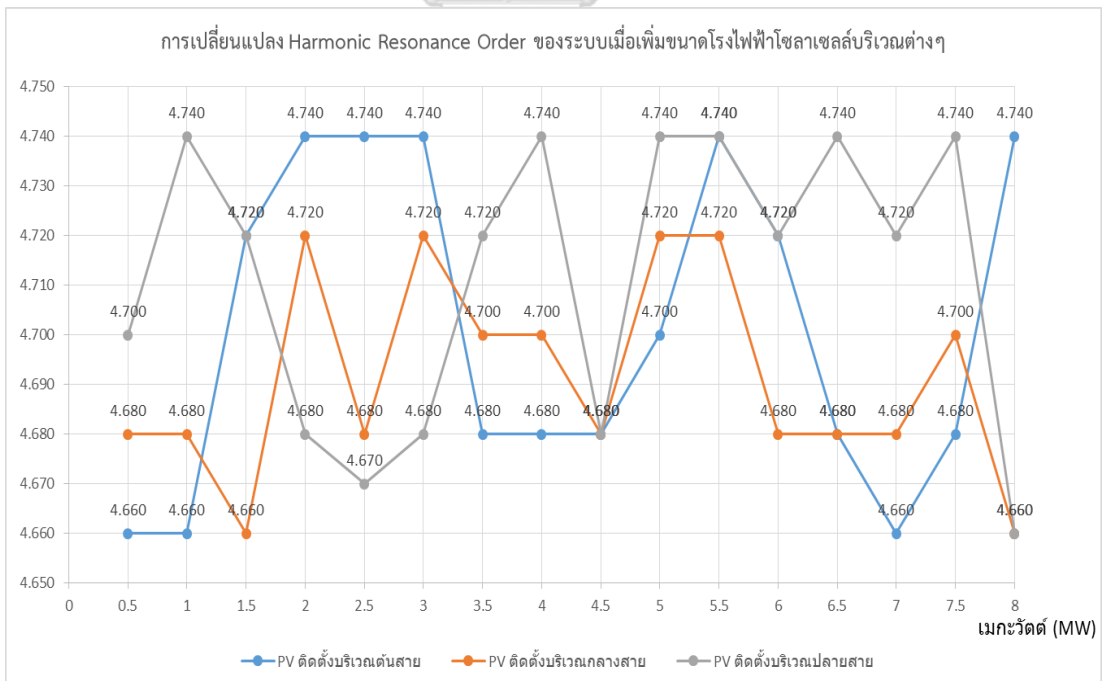
- กระแสฮาร์โมนิกส์ทุกอันดับมีแนวโน้มลดลง โดยกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 มีปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์ลดลงเช่นกัน

3. จุดติดตั้งที่ปลายทางสายป้อน 1

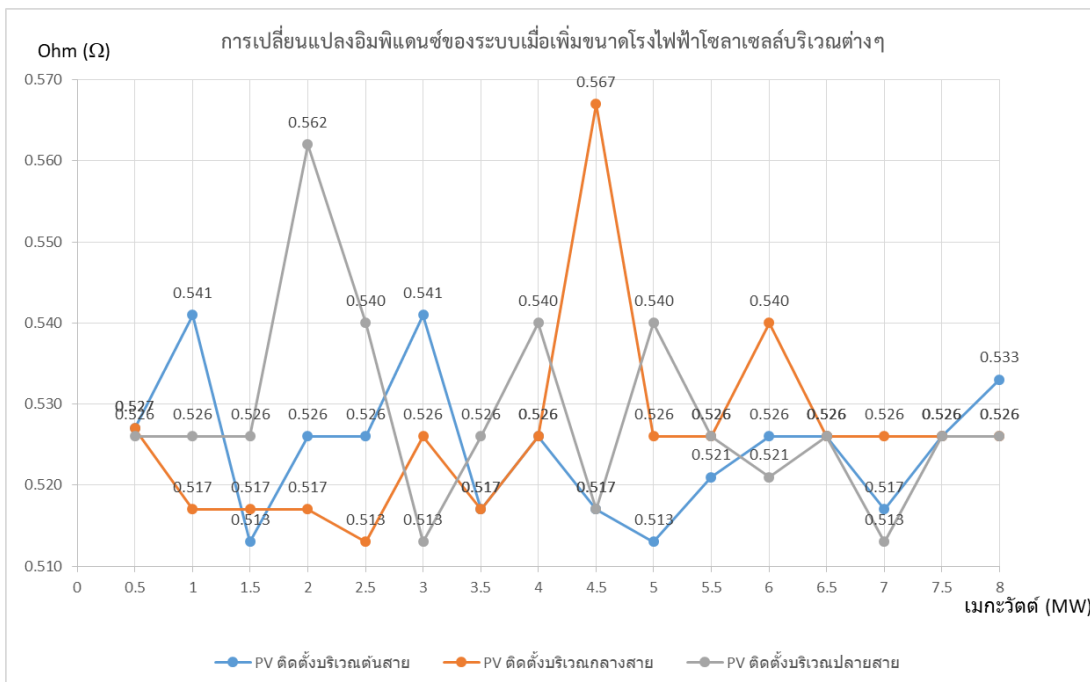
- กระแสฮาร์โมนิกส์ทุกอันดับมีแนวโน้มลดลง โดยกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 มีปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์ลดลงเช่นกัน



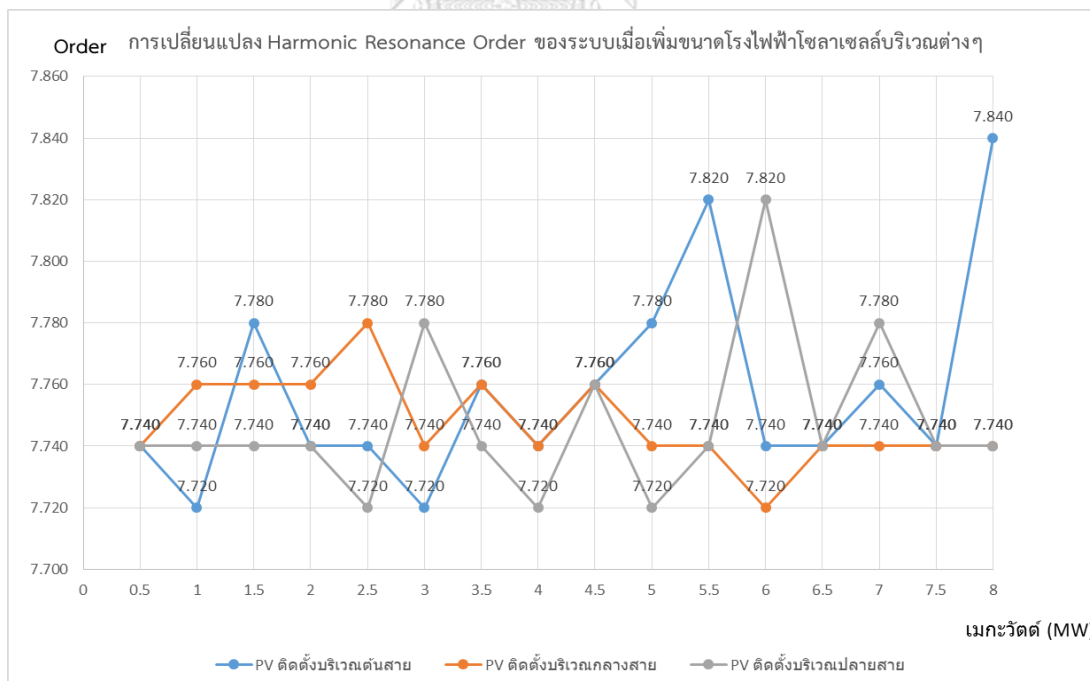
รูปที่ 4-164 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์แบบขนานของระบบเมื่อเพิ่มขนาดโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ



รูปที่ 4-165 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอันดับแบบขนาน (Parallel Harmonic Resonance Order) ของระบบเมื่อเพิ่มขนาดโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ



รูปที่ 4-166 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์แบบอนุกรมของระบบเมื่อเพิ่มขนาดโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ



รูปที่ 4-167 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอันดับแบบอนุกรม (Series Harmonic Resonance Order) ของระบบเมื่อเพิ่มขนาดโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ และ Harmonic Resonance Impedance ต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบที่ระบบไฟฟ้าของสถานีวิหารแดง บริเวณสายป้อน 1 ผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory ดังรูปที่ 4-100 พบว่า

- จุดติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์บริเวณต้นสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance Impedance) ของระบบมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานสูงสุดของระบบ (Maximum Parallel Resonance Impedance) อยู่ที่ 67.021 โอห์ม ที่ขนาดโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ 5 เมกะวัตต์
- จุดติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์บริเวณกลางสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance Impedance) ของระบบมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานสูงสุดของระบบ (Maximum Parallel Resonance Impedance) อยู่ที่ 67.183 โอห์ม ที่ขนาดโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ 7.5 เมกะวัตต์
- จุดติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์บริเวณปลายสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance Impedance) ของระบบมีแนวโน้มลดลง โดยค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานสูงสุดของระบบ (Maximum Parallel Resonance Impedance) อยู่ที่ 66.924 โอห์ม ที่ขนาดโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ 0.5 เมกะวัตต์

และความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอันดับ (Harmonic Resonance Order) ของระบบเมื่อเพิ่มขนาดโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ ดังรูปที่ 4-101 พบว่า

- จุดติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์บริเวณต้นสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (Harmonic Resonance Order) ของระบบมีค่าใกล้เคียงกัน โดยอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานสูงสุดของระบบ (Maximum Harmonic Resonance Order) อยู่ที่ 4.74
- จุดติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์บริเวณกลางสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (Harmonic Resonance Order) ของระบบมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานสูงสุดของระบบ (Maximum Harmonic Resonance Order) อยู่ที่ 4.72
- จุดติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์บริเวณปลายสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (Harmonic Resonance Order) ของระบบมี

ค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานสูงสุดของระบบ (Maximum Harmonic Resonance Order) อยู่ที่ 4.74

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของโรงไฟฟ้าโซลาเซลล์ที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ และ Harmonic Resonance Impedance ต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบที่ระบบไฟฟ้าของสถานีวิหารแดง บริเวณสายป้อน 1 ผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory ดังรูปที่ 4-102 พบว่า

- จุดติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์บริเวณต้นสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series Resonance Impedance) ของระบบมีแนวโน้มลดลง โดยค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมต่ำสุดของระบบ (Minimum Series Resonance Impedance) อยู่ที่ 0.513 โอห์ม ที่ขนาดโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ 1.5 และ 5 เมกะวัตต์
- จุดติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์บริเวณกลางสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series Resonance Impedance) ของระบบมีแนวโน้มลดลง โดยค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมต่ำสุดของระบบ (Minimum Series Resonance Impedance) อยู่ที่ 0.513 โอห์ม ที่ขนาดโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ 2.5 เมกะวัตต์
- จุดติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์บริเวณปลายสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series Resonance Impedance) ของระบบมีแนวโน้มลดลง โดยค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมต่ำสุดของระบบ (Minimum Series Resonance Impedance) อยู่ที่ 0.513 โอห์ม ที่ขนาดโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ 3 และ 7 เมกะวัตต์

และความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอันดับ (Harmonic Resonance Order) ของระบบเมื่อเพิ่มขนาดโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ ดังรูปที่ 4-103 พบว่า

- จุดติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์บริเวณต้นสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Harmonic Resonance Order) ของระบบมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมต่ำสุดของระบบ (Minimum Harmonic Resonance Order) อยู่ที่ 7.72
- จุดติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์บริเวณกลางสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Harmonic Resonance Order) ของระบบมี

แนวโน้มนำสูงขึ้น โดยค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมต่ำสุดของระบบ (Minimum Harmonic Resonance Order) อยู่ที่ 7.72

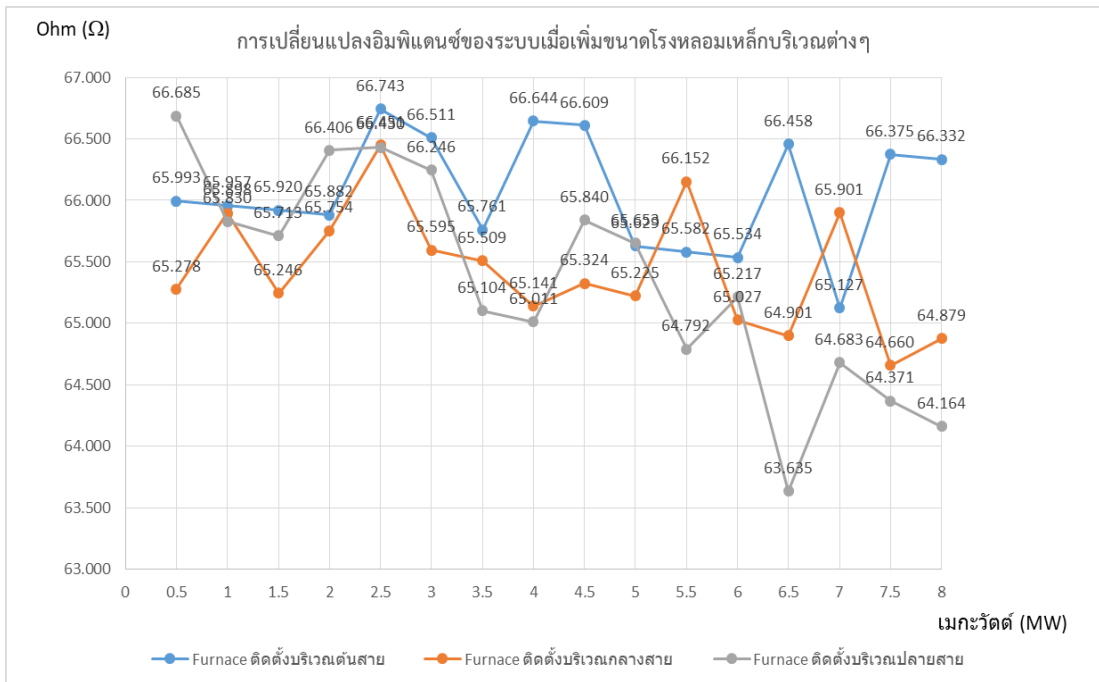
- จุดติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์บริเวณปลายสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Harmonic Resonance Order) ของระบบ มีแนวโน้มลดลง โดยค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมต่ำสุดของระบบ (Minimum Harmonic Resonance Order) อยู่ที่ 7.72

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่าค่าของขนาดโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์และบริเวณจุดติดตั้งต่างๆมีผลอย่างมากต่อการเกิดฮาร์โมนิกเรโซแนนซ์ของระบบ โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่เกิดขึ้นนั้นจะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ขึ้นและทำให้เกิดการขยายตัวของฮาร์โมนิกที่บริเวณดังกล่าว ส่งผลให้ฮาร์โมนิกสรวมของระบบมีค่าสูงขึ้น จะเห็นได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์แบบขนานของระบบจะมีค่าสูงมากกว่าอิมพีแดนซ์อนุกรมของระบบเป็นจำนวนมาก และเมื่อนำผลของจากการวิเคราะห์ฮาร์โมนิก (Harmonic Scan) ของระบบ ที่มีค่ากระแสฮาร์โมนิกอันดับต่างๆ ที่จุดติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ตามระยะทางบริเวณที่กำหนด คือ ต้นสาย กลางสาย และปลายสายของสายป้อน 1 พบว่าค่ากระแสฮาร์โมนิกที่ได้จากระบบจะมีค่าลดลงเมื่อขนาดของโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์เพิ่มขึ้นแต่อันดับกระแสฮาร์โมนิกที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด คือ กระแสฮาร์โมนิก อันดับที่ 5 โดยสำหรับกระแสฮาร์โมนิกที่ลดลงนั้น จากการวิเคราะห์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance) ด้วยโปรแกรม DigSILENT PowerFactory พบว่ากระแสฮาร์โมนิกดังกล่าวไม่ได้หายไปจากระบบ แต่จะมีการไหลไปยังบริเวณที่มีอิมพีแดนซ์ระบบต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้ คือ ค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานจะมีค่ามากกว่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมของระบบหมายความว่ากระแสฮาร์โมนิกจะไหลไปยังบริเวณสถานีไฟฟ้าใกล้เคียงที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำกว่าจะส่งผลให้สถานีไฟฟ้าไฟฟ้านั้นมีผลรวมของกระแสฮาร์โมนิกเกินได้ทั้งที่ไม่ได้มีการไหลที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวเกาะอยู่ ซึ่งเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการระเบิดของชุดตัวเก็บประจุของสถานีไฟฟ้า ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานจะมีความสำคัญมากกว่าในการพิจารณากระแสฮาร์โมนิกของระบบไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ กระแสฮาร์โมนิกส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจะไม่สามารถไหลได้ในบัสที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงกว่าทำให้กระแสฮาร์โมนิกดังกล่าวไหลย้อนเข้าไปสู่ระบบแรงต่ำ ขนาด 400 โวลต์จะส่งผลให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ด้านแรงต่ำที่ต่ออยู่ในระบบ เช่น โรงงานต่างๆที่ต่อกับระบบจากการทดลองกระแสฮาร์โมนิกที่มีค่าประมาณอันดับที่ 5 จะมีผลต่อระบบดังกล่าว ซึ่งการแก้ไข

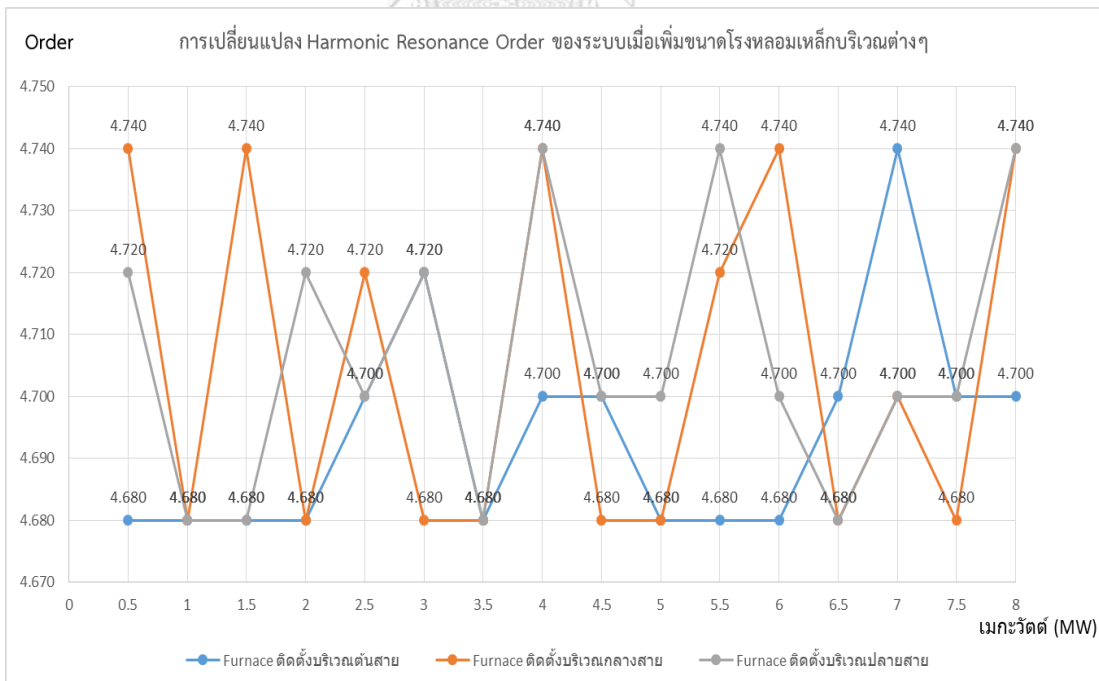
สามารถทำได้โดยใช้วงจรกรองความถี่ (Tuned Filter) โดยกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจะไหลไปยังสายป้อนข้างเคียงหรือสถานีใกล้เคียงถัดไป ส่วนค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมต่ำสุดจะมีผลกับขนาดของตัวเก็บประจุ เนื่องจากมีค่าอิมพีแดนซ์ในระบบต่ำ กระแสฮาร์โมนิกส์จะไหลได้เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ถ้ามีการออกแบบขนาดของตัวเก็บประจุไม่ดีพอจะทำให้เกิดการไหลของกระแสจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดความร้อนและการระเบิดตามมาได้ โดยจากการทดลองกระแสฮาร์โมนิกส์ที่มีค่าประมาณอันดับที่ 7 จะเกิดการไหลในชุดตัวเก็บประจุได้จำนวนมาก ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์ในกรณีระบบ 115 กิโลโวลต์ซึ่งอยู่นอกขอบเขตงานวิจัยนี้

4.3.2 ศึกษาสาเหตุการเพิ่มขึ้นของฮาร์โมนิกส์เนื่องจากโรงงานที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load) คือ โรงหลอมเหล็กที่มีการเชื่อมต่อในระบบ โดยได้มีการเพิ่มขนาดของโรงหลอมเหล็กและสมมุติจุดติดตั้งเข้าไปที่สายป้อน 1 คือ ที่ต้นทางสายป้อน 1 กึ่งกลางทางสายป้อน 1 และปลายทางสายป้อน 1 เพื่อเป็นแนวทางศึกษาว่าผลกระทบที่มีต่อระบบฮาร์โมนิกส์โดยรวมที่สถานีไฟฟ้าเป็นอย่างไร โดยพบว่า

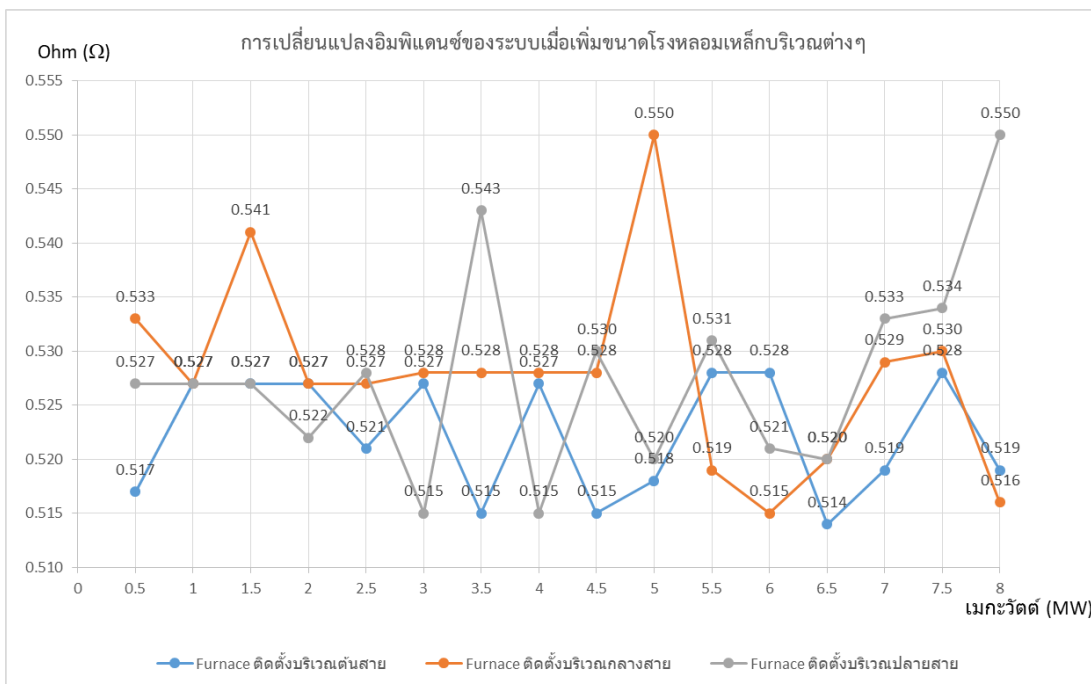
1. จุดติดตั้งต้นทางสายป้อน 1
 - กระแสฮาร์โมนิกส์ทุกอันดับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 มีปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด
2. จุดติดตั้งที่กึ่งกลางทางสายป้อน 1
 - กระแสฮาร์โมนิกส์ทุกอันดับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 มีปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด
3. จุดติดตั้งที่ปลายทางสายป้อน 1
 - กระแสฮาร์โมนิกส์ทุกอันดับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 มีปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด



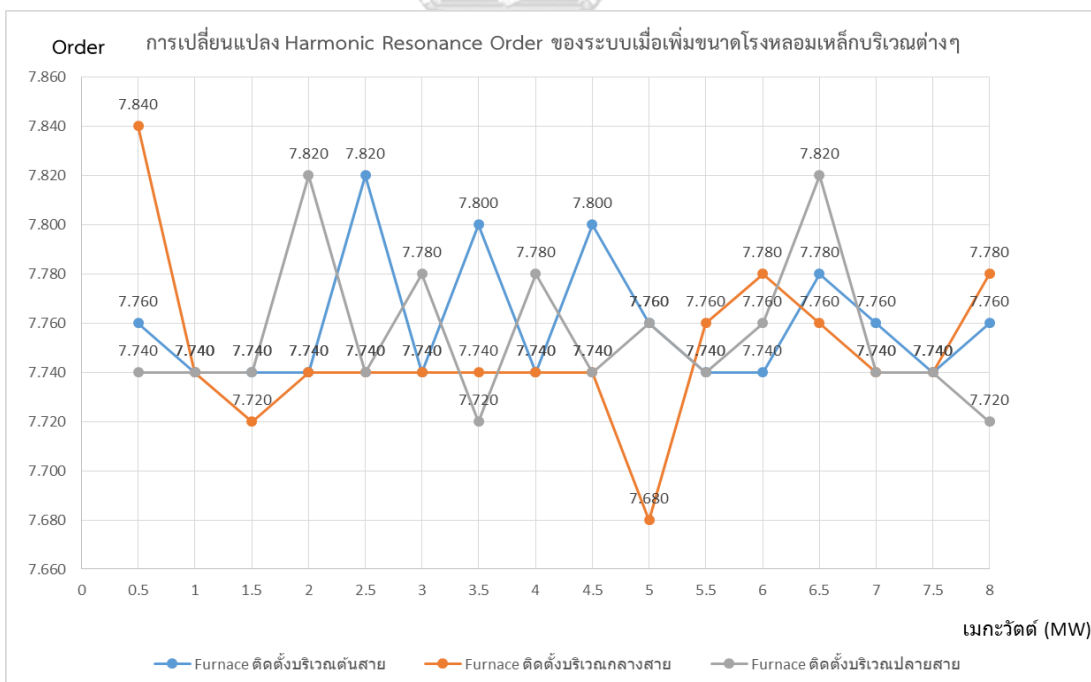
รูปที่ 4-168 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์แบบขนานของระบบเมื่อเพิ่มขนาดโรงหลอมเหล็กที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ



รูปที่ 4-169 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอันดับแบบขนาน (Parallel Harmonic Resonance Order) ของระบบเมื่อเพิ่มขนาดโรงหลอมเหล็กที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ



รูปที่ 4-170 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์แบบอนุกรมของระบบเมื่อเพิ่มขนาดโรงหลอมเหล็กที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ



รูปที่ 4-171 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอันดับแบบอนุกรม (Series Harmonic Resonance Order) ของระบบเมื่อเพิ่มขนาดโรงหลอมเหล็กที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของโรงหลอมเหล็กที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆและ Harmonic Resonance Impedance ต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบที่ระบบไฟฟ้าของสถานีวิหารแดง บริเวณสายป้อน 1 ผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory ดังรูปที่ 4-104 พบว่า

- จุดติดตั้งโรงหลอมเหล็กบริเวณต้นสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงหลอมเหล็กค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance Impedance) ของระบบมีแนวโน้มลดลง โดยค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานสูงสุดของระบบ (Maximum Parallel Resonance Impedance) อยู่ที่ 66.743 โอห์ม ที่ขนาดโรงหลอมเหล็ก 2.5 เมกะวัตต์
- จุดติดตั้งโรงหลอมเหล็กบริเวณกลางสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงหลอมเหล็กค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance Impedance) ของระบบมีแนวโน้มลดลง โดยค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานสูงสุดของระบบ (Maximum Parallel Resonance Impedance) อยู่ที่ 66.456 โอห์ม ที่ขนาดโรงหลอมเหล็ก 2.5 เมกะวัตต์
- จุดติดตั้งโรงหลอมเหล็กบริเวณปลายสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงหลอมเหล็กค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance Impedance) ของระบบมีแนวโน้มลดลง โดยค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานสูงสุดของระบบ (Maximum Parallel Resonance Impedance) อยู่ที่ 66.685 โอห์ม ที่ขนาดโรงหลอมเหล็ก 0.5 เมกะวัตต์

และความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอันดับ (Harmonic Resonance Order) ของระบบเมื่อเพิ่มขนาดโรงหลอมเหล็กที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ ดังรูปที่ 4-105 พบว่า

- จุดติดตั้งโรงหลอมเหล็กบริเวณต้นสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงหลอมเหล็กค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (Harmonic Resonance Order) ของระบบมีค่าคงที่ โดยอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานสูงสุดของระบบ (Maximum Harmonic Resonance Order) อยู่ที่ 4.70 ที่ขนาดโรงหลอมเหล็ก 7 เมกะวัตต์
- จุดติดตั้งโรงหลอมเหล็กบริเวณกลางสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงหลอมเหล็กค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (Harmonic Resonance Order) ของระบบมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานสูงสุดของระบบ (Maximum Harmonic Resonance Order) อยู่ที่ 7.740 ที่ขนาดโรงหลอมเหล็ก 1.5 , 4 , 6 และ 8 เมกะวัตต์

- จุดติดตั้งโรงหลอมเหล็กบริเวณปลายสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงหลอมเหล็กค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (Harmonic Resonance Order) ของระบบมีค่าคงที่ โดยค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานสูงสุดของระบบ (Maximum Harmonic Resonance Order) อยู่ที่ 4.74 ที่ขนาดโรงหลอมเหล็ก 4 , 5.5 และ 8 เมกะวัตต์

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของโรงหลอมเหล็กที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆและ Harmonic Resonance Impedance ต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบที่ระบบไฟฟ้าของสถานีวิทยุแดง บริเวณสายป้อน 1 ผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory ดังรูปที่ 4-106 พบว่า

- จุดติดตั้งโรงหลอมเหล็กบริเวณต้นสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงหลอมเหล็กค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series Resonance Impedance) ของระบบ โดยค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมต่ำสุดของระบบ (Minimum Series Resonance Impedance) อยู่ที่ 0.514 โอห์ม ที่ขนาดโรงหลอมเหล็ก 6.5 เมกะวัตต์
- จุดติดตั้งโรงหลอมเหล็กบริเวณกลางสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงหลอมเหล็กค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series Resonance Impedance) ของระบบ โดยค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมต่ำสุดของระบบ (Minimum Series Resonance Impedance) อยู่ที่ 0.515 โอห์ม ที่ขนาดโรงหลอมเหล็ก 6 เมกะวัตต์
- จุดติดตั้งโรงหลอมเหล็กบริเวณปลายสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงหลอมเหล็กค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series Resonance Impedance) ของระบบ โดยค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมต่ำสุดของระบบ (Minimum Series Resonance Impedance) อยู่ที่ 0.515 โอห์ม ที่ขนาดโรงหลอมเหล็ก 3 และ 4 เมกะวัตต์

จากการสังเกตพฤติกรรมของการเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมสูงสุดของระบบโรงหลอมเหล็ก (Maximum Series Resonance Impedance) จะมีค่าไม่คงที่ โดยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะของพื้นที่สถานีไฟฟ้าวิทยุแดงนั้นๆ ดังแสดงดังรูปดังกล่าวและความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอันดับ (Harmonic Resonance Order) ของระบบเมื่อเพิ่มขนาดโรงหลอมเหล็กที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ ดังรูปที่ 4-107 พบว่า

- จุดติดตั้งโรงหลอมเหล็กบริเวณต้นสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงหลอมเหล็กค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Harmonic Resonance Order) ของระบบมีค่าไม่คงที่ โดยอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมต่ำสุดของระบบ (Minimum Harmonic Resonance Order) อยู่ที่ 7.74

- จุดติดตั้งโรงหลอมเหล็กบริเวณกลางสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงหลอมเหล็กค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Harmonic Resonance Order) ของระบบมีแนวโน้มไม่คงที่ โดยค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมต่ำสุดของระบบ (Minimum Harmonic Resonance Order) อยู่ที่ 7.68 ที่โรงหลอมเหล็กขนาด 5 เมกกะวัตต์
- จุดติดตั้งโรงหลอมเหล็กบริเวณปลายสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงหลอมเหล็กค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Harmonic Resonance Order) ของระบบมีแนวโน้มไม่คงที่ โดยค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมต่ำสุดของระบบ (Minimum Harmonic Resonance Order) อยู่ที่ 7.72 ที่โรงหลอมเหล็กขนาด 3.5 และ 8 เมกกะวัตต์

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่าค่าของขนาดโรงหลอมเหล็กและบริเวณจุดติดตั้งต่างๆมีผลอย่างมากต่อการเกิดฮาร์โมนิกเรโซแนนซ์ของระบบ โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่เกิดขึ้นนั้นจะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ขึ้นและทำให้เกิดการขยายตัวของฮาร์โมนิกที่บริเวณดังกล่าว ส่งผลให้ฮาร์โมนิกสรวมของระบบมีค่าสูงขึ้น จะเห็นได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์แบบขนานของระบบจะมีค่าสูงมากกว่าอิมพีแดนซ์อนุกรมของระบบเป็นจำนวนมาก และเมื่อนำผลของการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกสแกน (Harmonic Scan) ของระบบ ที่มีค่ากระแสฮาร์โมนิกอันดับต่างๆ ที่จุดติดตั้งโรงหลอมเหล็กตามระยะทางบริเวณที่กำหนด คือ ต้นสาย กลางสาย และปลายสายของสายป้อน 1 โดยปริมาณขนาดของกระแสฮาร์โมนิกที่สังเกตเห็นได้ชัด คือ เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงหลอมเหล็กในระบบจะพบว่าปริมาณกระแสฮาร์โมนิกจะมีค่าขึ้นสูงแปรตามไปด้วย อันดับกระแสฮาร์โมนิกที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด คือ กระแสฮาร์โมนิก อันดับที่ 5 โดยสำหรับกระแสฮาร์โมนิกที่ลดลงนั้น จากการวิเคราะห์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance) ด้วยโปรแกรม DigSILENT PowerFactory พบว่ากระแสฮาร์โมนิกดังกล่าวไม่ได้หายไปจากระบบ แต่จะมีการไหลไปยังบริเวณที่มีอิมพีแดนซ์ระบบต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้ คือ ค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานจะมีค่ามากกว่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมของระบบหมายความว่ากระแสฮาร์โมนิกจะไหลไปยังบริเวณสายป้อนหรือสถานีไฟฟ้าใกล้เคียงที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำกว่าจะส่งผลให้สถานีไฟฟ้าไฟฟ้านั้นมีผลรวมของกระแสฮาร์โมนิกเกินได้ทั้งที่ไม่ได้มีการไหลที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวเกาะอยู่ ซึ่งเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการระเบิดของชุดตัวเก็บประจุของสถานีไฟฟ้า ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานจะมีความสำคัญมากกว่าในการพิจารณากระแสฮาร์โมนิกของระบบไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ กระแสฮาร์โมนิกส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจะไม่สามารถไหลได้ในบัสที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงกว่า ทำให้กระแสฮาร์โมนิกดังกล่าวไหลย้อนเข้าไปสู่ระบบแรงต่ำ ขนาด 400 โวลต์จะส่งผลให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ด้านแรงต่ำที่ต่ออยู่ในระบบ เช่น โรงงานต่างๆที่ต่อกับระบบ จากการทดลอง

กระแสฮาร์โมนิกส์ที่มีค่าประมาณอันดับที่ 5 จะมีผลต่อระบบดังกล่าว โดยขนาดของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจากโรงหลอมเหล็กมีค่าสูงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงหลอมเหล็กไม่ว่าจะตำแหน่งการติดตั้งบริเวณใดก็ตาม ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาฮาร์โมนิกส์ตามมาและส่งผลกระทบต่อชุดตัวเก็บประจุที่ติดตั้งที่สถานีไฟฟ้าได้และจะเกิดความเสียหายตามมา ซึ่งการแก้ไขสามารถทำได้โดยใช้วงจรกรองความถี่ (Tuned Filter) โดยกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นจะไหลไปยังสายป้อนข้างเคียงหรือสถานีใกล้เคียงถัดไป ส่วนค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมต่ำสุดจะมีผลกับขนาดของตัวเก็บประจุ เนื่องจากมีค่าอิมพีแดนซ์ในระบบต่ำ กระแสฮาร์โมนิกส์จะไหลได้เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ถ้ามีการออกแบบขนาดของตัวเก็บประจุไม่ดีพอจะทำให้เกิดการไหลของกระแสจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดความร้อนและการระเบิดตามมาได้ โดยจากการทดลองกระแสฮาร์โมนิกส์ที่มีค่าประมาณอันดับที่ 7 จะเกิดการไหลในชุดตัวเก็บประจุได้จำนวนมาก ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์ในกรณีระบบ 115 กิโลโวลต์ ซึ่งอยู่นอกขอบเขตงานวิจัยนี้

4.3.3 ศึกษาสาเหตุเมื่อมีการเพิ่มของอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) เข้ามาที่ระบบไฟฟ้าโดยได้มีการเพิ่มขนาดของอุปกรณ์และสมมุติจุดติดตั้งเข้าไปที่สายป้อน 1 คือ ที่ต้นทางสายป้อน 1 กึ่งกลางทางสายป้อน 1 และปลายทางสายป้อน 1 เพื่อเป็นแนวทางศึกษาว่าผลกระทบที่มีต่อระบบฮาร์โมนิกส์โดยรวมที่สถานีไฟฟ้าเป็นอย่างไร โดยพบว่า

1. จุดติดตั้งต้นทางสายป้อน 1

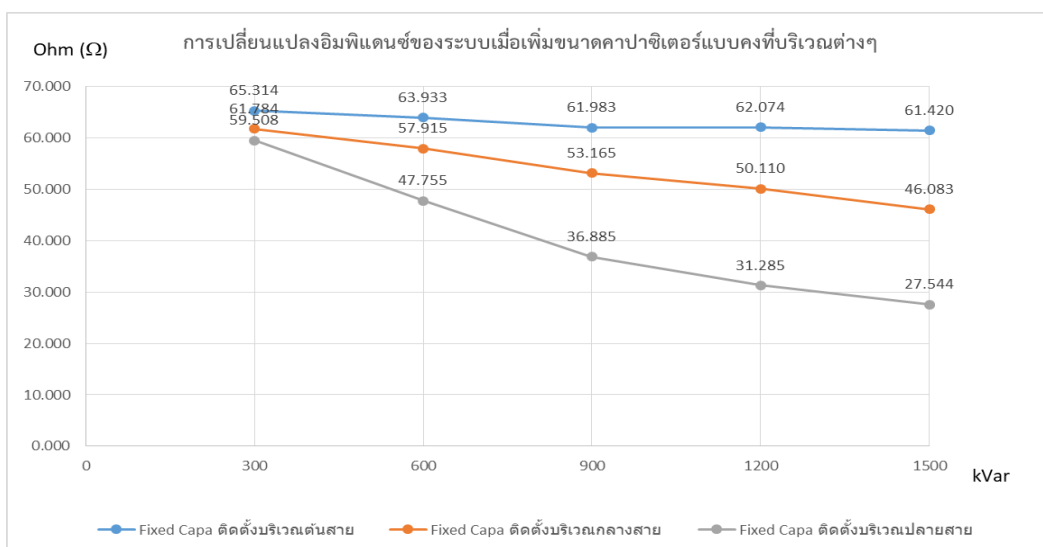
- กระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 2 และ 4 จะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามขนาดของอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) โดยที่ปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 2 นั้นยังเพิ่มขึ้นไม่มากแต่กระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 4 มีการเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด
- กระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5,7,8,10,11 และ 13 มีการลดลงอย่างมากโดยเฉพาะกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 ส่วนอันดับอื่นๆที่เหลือลดลงเหมือนกันแต่ไม่มาก

2. จุดติดตั้งที่กึ่งกลางทางสายป้อน 1

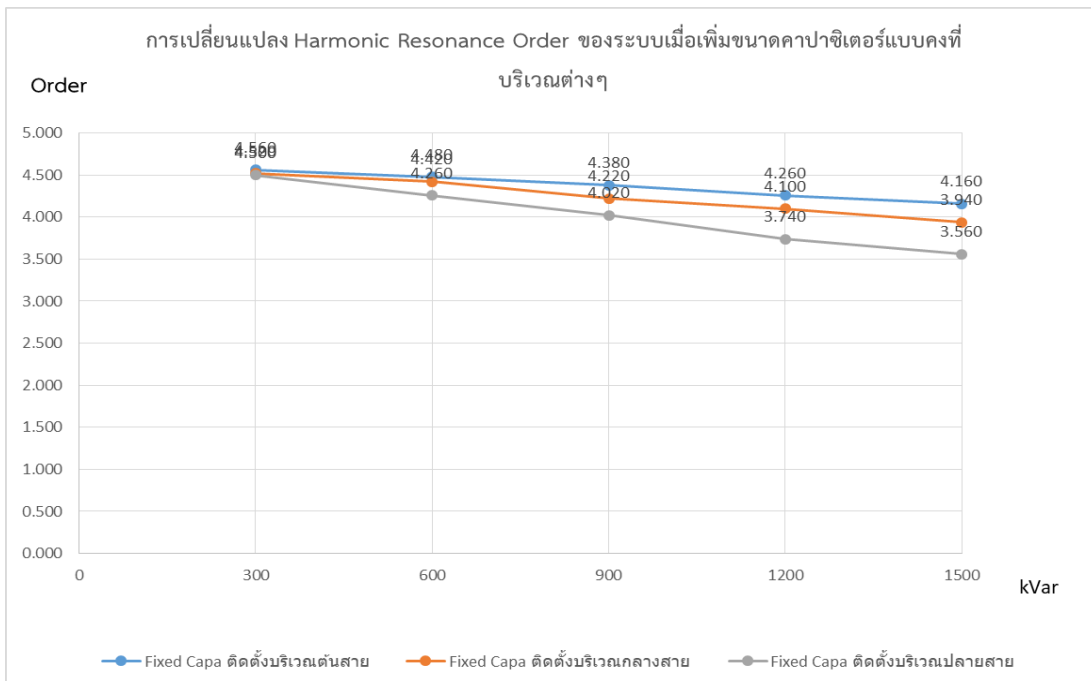
- กระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 2 , 4 และ 13 จะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามขนาดของอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) โดยที่ปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 2 นั้นยังเพิ่มขึ้นไม่มากแต่กระแสฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 4 และ 13 มีการเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด กระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5,7 และ 8 มีค่าลดลงมีการลดลงอย่างมากโดยเฉพาะกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 5 ส่วนกระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่ 10 และ 11 ยังมีการแกว่งขึ้นลงของกระแสฮาร์โมนิกส์

3. จุดติดตั้งที่ปลายทางสายป้อน 1

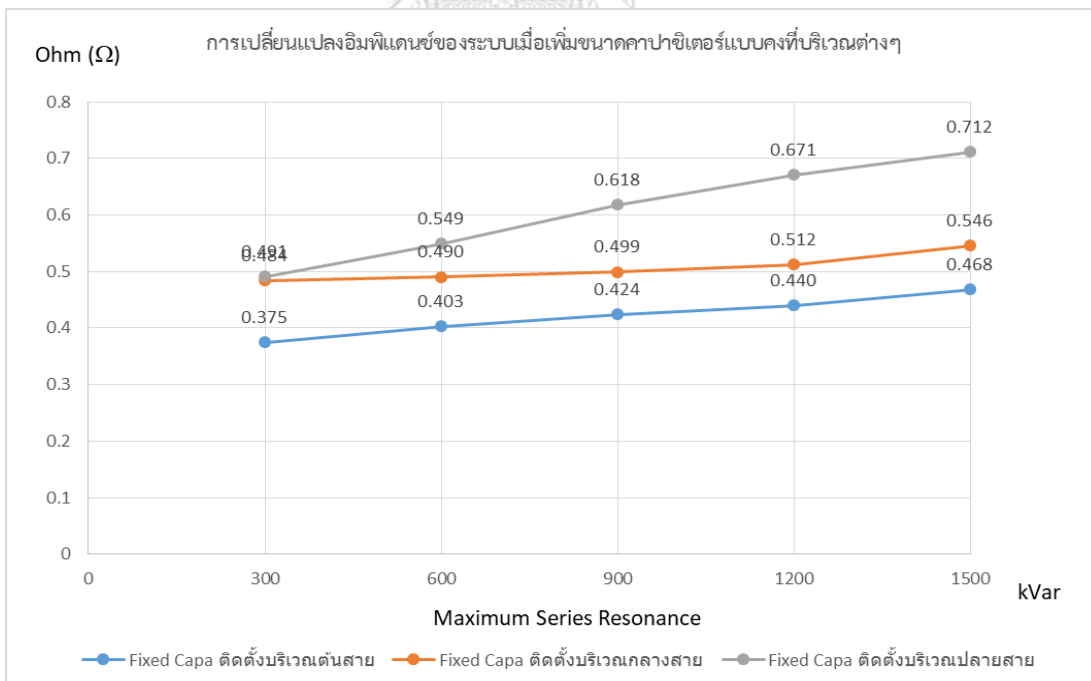
- กระจายหมอนิกส์อันดับที่ 2 จะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามขนาดของอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูง คาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) กระจายหมอนิกส์อันดับที่ 5 , 11 และ 13 มีค่าลดลง ส่วนกระจายหมอนิกส์อันดับที่ 4 , 7 , 8 , 10 และ 11 ยังมีการแกว่งขึ้นลงของกระจายหมอนิกส์



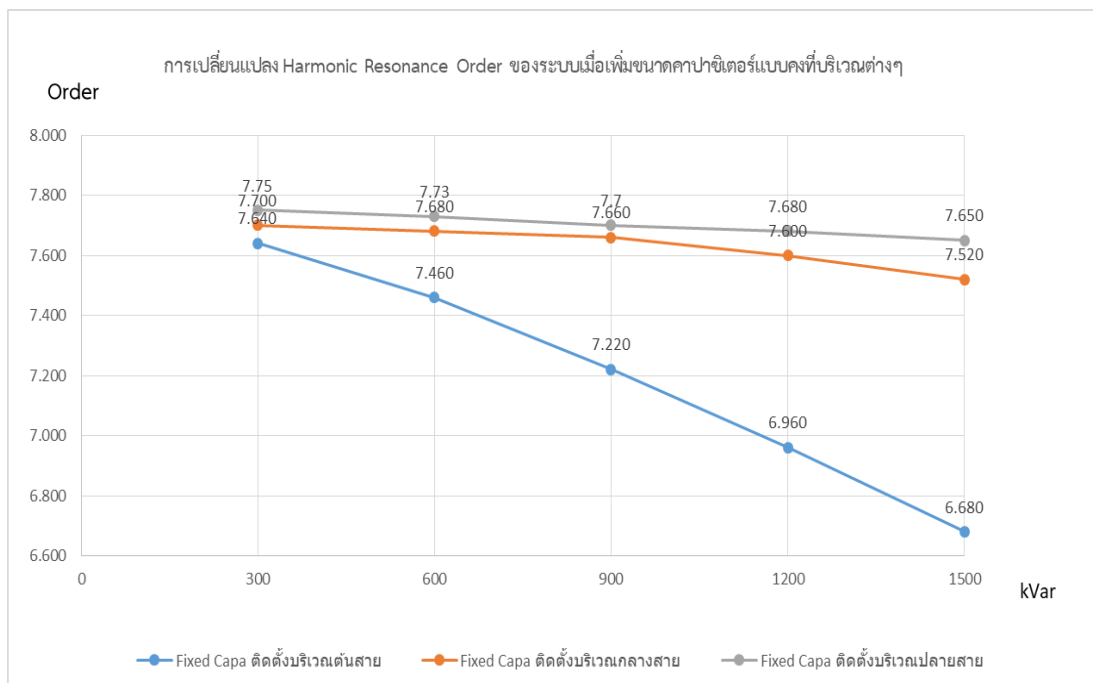
รูปที่ 4-172 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์แบบขนานของระบบเมื่อเพิ่มขนาดอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ



รูปที่ 4-173 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอันดับแบบขนาน (Parallel Harmonic Resonance Order) ของระบบเมื่อเพิ่มขนาดอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ



รูปที่ 4-174 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์แบบอนุกรมของระบบเมื่อเพิ่มขนาดอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ



รูปที่ 4-175 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอันดับแบบอนุกรม (Series Harmonic Resonance Order) ของระบบเมื่อเพิ่มขนาดอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ และ Harmonic Resonance Impedance ต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบที่ระบบไฟฟ้าของสถานีวิหารแดง บริเวณสายป้อน 1 ผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory ดังรูปที่ 4-108 พบว่า

- จุดติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) บริเวณต้นสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดอุปกรณ์ดังกล่าว ค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance Impedance) ของระบบมีแนวโน้มลดลง โดยค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานสูงสุดของระบบ (Maximum Parallel Resonance Impedance) อยู่ที่ 65.314 โอห์ม ที่ขนาด 300 กิโลวาร์
- จุดติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) บริเวณกลางสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดอุปกรณ์ดังกล่าว ค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance Impedance) ของระบบมีแนวโน้มลดลง โดยค่าอิมพีแดนซ์การ

เกิดเรโซแนนซ์แบบขนานสูงสุดของระบบ (Maximum Parallel Resonance Impedance) อยู่ที่ 61.784 โอห์ม ที่ขนาด 300 กิโลวาร์

- จุดติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) บริเวณปลายสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดอุปกรณ์ดังกล่าว ค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance Impedance) ของระบบมีแนวโน้มลดลง โดยค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานสูงสุดของระบบ (Maximum Parallel Resonance Impedance) อยู่ที่ 59.508 โอห์ม ที่ขนาด 300 กิโลวาร์

และความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอันดับ (Harmonic Resonance Order) ของระบบเมื่อเพิ่มขนาดอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ ดังรูปที่ 4-109 พบว่า

- จุดติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) บริเวณต้นสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดอุปกรณ์ดังกล่าว ค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (Harmonic Resonance Order) ของระบบมีค่าคงที่ โดยอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานสูงสุดของระบบ (Maximum Harmonic Resonance Order) อยู่ที่ 4.56 ขนาด 300 กิโลวาร์
- จุดติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) บริเวณกลางสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดอุปกรณ์ดังกล่าว ค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (Harmonic Resonance Order) ของระบบมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานสูงสุดของระบบ (Maximum Harmonic Resonance Order) อยู่ที่ 4.52 ขนาด 300 กิโลวาร์
- จุดติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) บริเวณปลายสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดอุปกรณ์ดังกล่าว ค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (Harmonic Resonance Order) ของระบบมีค่าคงที่ โดยค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานสูงสุดของระบบ (Maximum Harmonic Resonance Order) อยู่ที่ 4.50 ขนาด 300 กิโลวาร์

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ และ Harmonic Resonance Impedance ต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบที่ระบบไฟฟ้าของสถานีบริหารแดง บริเวณสายป้อน 1 ผ่านโปรแกรม DigSILENT PowerFactory ดังรูปที่ 4-110 พบว่า

- จุดติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) บริเวณต้นสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดอุปกรณ์ดังกล่าว ค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series Resonance Impedance) ของระบบ โดยค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมต่ำสุดของระบบ (Minimum Series Resonance Impedance) อยู่ที่ 0.375 โอห์ม ที่ขนาด 1,500 กิโลวาร์
- จุดติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) บริเวณกลางสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดอุปกรณ์ดังกล่าว ค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series Resonance Impedance) ของระบบ โดยค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมต่ำสุดของระบบ (Minimum Series Resonance Impedance) อยู่ที่ 0.446 โอห์ม ที่ขนาด 600 กิโลวาร์
- จุดติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) บริเวณปลายสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดอุปกรณ์ดังกล่าว ค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series Resonance Impedance) ของระบบ โดยค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมต่ำสุดของระบบ (Minimum Series Resonance Impedance) อยู่ที่ 0.491 โอห์ม ที่ขนาด 300 กิโลวาร์

จากการสังเกตพฤติกรรมของการเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมสูงสุดของระบบอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ Fixed Capacitor (Minimum Series Resonance Impedance) จะมีค่าคงที่โดยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะของพื้นที่สถานีไฟฟ้าวิหารแตงนั้นๆ ดังแสดงดังรูปดังกล่าวและความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอันดับ (Harmonic Resonance Order) ของระบบเมื่อเพิ่มขนาดอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ที่จุดติดตั้งบริเวณต่างๆ ดังรูปที่ 4-101 พบว่า

- จุดติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) บริเวณต้นสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดอุปกรณ์ดังกล่าว ค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Harmonic Resonance Order) ของระบบมีค่าคงที่ โดยอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมต่ำสุดของระบบ (Minimum Harmonic Resonance Order) อยู่ที่ 7.520 ที่อุปกรณ์ขนาด 1,500 กิโลวาร์
- จุดติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) บริเวณกลางสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดอุปกรณ์ดังกล่าว ค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Harmonic Resonance Order) ของระบบมีแนวโน้มไม่คงที่ โดยค่าอันดับการเกิดเร

โซ่แนซแบบอนุกรมต่ำสุดของระบบ (Minimum Harmonic Resonance Order) อยู่ที่ 7.61 ที่อุปกรณ์ ขนาด 1,500 กิโลวาร์

- จุดติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) บริเวณปลายสายป้อนเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดอุปกรณ์ดังกล่าว ค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Harmonic Resonance Order) ของระบบมีแนวโน้มไม่คงที่ โดยค่าอันดับการเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมต่ำสุดของระบบ (Minimum Harmonic Resonance Order) อยู่ที่ 7.65 ที่อุปกรณ์ ขนาด 1,500 กิโลวาร์

ความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่าค่าของขนาดอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์มีขนาดตั้งแต่ 300,600,900,1200 และ 1,500 กิโลวาร์ และบริเวณจุดติดตั้งต่างๆมีผลอย่างมากต่อการเกิดฮาร์โมนิกส์เรโซแนนซ์ของระบบ ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวเมื่อติดตั้งในระบบแล้วจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบเปลี่ยนแปลงไปแบบไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากอุปกรณ์ดังกล่าวมีผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์รวมของระบบเปลี่ยนไปขึ้นกับขนาดและจุดที่ติดตั้ง โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่เกิดขึ้นนั้นจะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ขึ้นและทำให้เกิดการขยายตัวของฮาร์โมนิกส์ที่บริเวณดังกล่าว ส่งผลให้ฮาร์โมนิกส์รวมของระบบมีค่าสูงขึ้น จะเห็นได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์แบบขนานของระบบจะมีค่าสูงมากกว่าอิมพีแดนซ์อนุกรมของระบบเป็นจำนวนมาก และเมื่อนำผลของจากการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Scan) ของระบบ ที่มีค่ากระแสฮาร์โมนิกส์อันดับต่างๆ ที่จุดติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ตามระยะทางบริเวณที่กำหนด คือ ต้นสาย กลางสาย และปลายสายของสายป้อน 1 โดยที่เมื่อขนาดของอุปกรณ์ดังกล่าวมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าอิมพีแดนซ์แบบขนานของระบบไฟฟ้าที่สถานีบริหารแดงจะมีค่าน้อยลง

บทที่ 5

สรุปผล

5.1 สรุปแนวทางการวิเคราะห์จากงานวิจัย

ผลการวิเคราะห์การทำให้ชุดตัวเก็บประจุระเบิดเนื่องจากสภาวะทรานเซียนต์ (Transient State) จากการสับ/ปลดชุดตัวเก็บประจุที่อยู่ในสถานีไฟฟ้า ซึ่งจะนำข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์คือ EMTP/ATP มาวิเคราะห์ข้อมูลค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมชุดตัวเก็บประจุ (Capacitor Bank) โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE ที่เกี่ยวข้อง จากการศึกษาพบว่า

- การสับและปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบแยกเดี่ยว (Isolate Bank) แรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมชุดตัวเก็บประจุมีค่า 26,950 v คิดเป็น 1.5 p.u. ที่เวลา 0.1 ms และกระแสที่ไหลผ่านชุดตัวเก็บประจุสูงสุดมีค่า 3,480 A ที่เวลา 0.1 ms
- การสับและปลดสวิตช์ชุดตัวเก็บประจุแบบหลายตัว (Back to Back) แรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมชุดตัวเก็บประจุมีค่า 24,000 v คิดเป็น 1.336 p.u. ที่เวลา 0.1 ms และกระแสที่ไหลผ่านชุดตัวเก็บประจุสูงสุดมีค่า 2,430 A ที่เวลา 0.1 ms

เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE Std. 1036 ปี 2012 ของชุดตัวเก็บประจุเมื่อเวลาอยู่ในช่วงทรานเซียนต์ ทั้งค่ากระแสเกิน (Overcurrent) และค่าแรงดันเกิน (Overvoltage) ไม่เกินมาตรฐานที่กำหนดจะไม่สามารถทำให้ตัวเก็บประจุระเบิดได้

ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะการเกิดฮาร์มอนิกส์ของพื้นที่ (Frequency Scan) พบว่าคุณลักษณะเฉพาะของพื้นที่นั้นเมื่อมีการเพิ่มเข้ามาของ โรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์และโรงหลอมเหล็ก จะมีลักษณะคล้ายเดิม คือ กรณีที่ศึกษาของสถานีไฟฟ้าวิหารแดง (Base Case) จะเปลี่ยนแปลงเฉพาะจุดที่เกิดความถี่ (Parallel Resonance) โดยที่ยังมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนการเพิ่มของอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) เข้ามาที่ระบบไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงทั้งคุณลักษณะเฉพาะการเกิดฮาร์มอนิกส์ของพื้นที่ (Frequency Scan) และค่าความถี่ (Parallel Resonance) ด้วย โดยจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ดังกล่าวพบว่า

5.1.1 โรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ ขนาดและบริเวณจุดติดตั้งต่างๆมีผลอย่างมากต่อการเกิดฮาร์มอนิกส์เรโซแนนซ์ของระบบ โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่เกิดขึ้นนั้นจะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ขึ้นและทำให้เกิดการขยายตัวของฮาร์มอนิกส์ที่บริเวณดังกล่าว ส่งผลให้ฮาร์มอนิกส์รวมของระบบมีค่าสูงขึ้น จะเห็นได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์แบบขนานของระบบจะมีค่าสูงมากกว่าอิมพีแดนซ์อนุกรมของระบบเป็นจำนวนมาก

และเมื่อนำผลของการวิเคราะห์ฮาร์โมนิก (Harmonic Scan) ของระบบ ที่มีค่ากระแสฮาร์โมนิกอันดับต่างๆ ที่จุดติดตั้งโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ตามระยะทางบริเวณที่กำหนด คือ ต้นสาย กลางสาย และปลายสายของสายป้อน 1 พบว่าค่ากระแสฮาร์โมนิกที่ได้จากระบบจะมีค่าลดลงเมื่อขนาดของโรงไฟฟ้าโซลาร์เซลล์เพิ่มขึ้นแต่อันดับกระแสฮาร์โมนิกที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด คือ กระแสฮาร์โมนิก อันดับที่ 5 โดยสำหรับกระแสฮาร์โมนิกที่ลดลงนั้น จากการวิเคราะห์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance) ด้วยโปรแกรม DigSILENT PowerFactory พบว่ากระแสฮาร์โมนิกดังกล่าวไม่ได้หายไปจากระบบ แต่จะมีการไหลไปยังบริเวณที่มีอิมพีแดนซ์ระบบต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้ คือ ค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานจะมีค่ามากกว่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมของระบบหมายความว่ากระแสฮาร์โมนิกจะไหลไปยังบริเวณสถานีไฟฟ้าใกล้เคียงที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำกว่าจะส่งผลให้สถานีไฟฟ้าไฟฟ้านั้นมีผลรวมของกระแสฮาร์โมนิกเกินได้ทั้งที่ไม่ได้มีการไหลที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวเกาะอยู่ ซึ่งเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการระเบิดของชุดตัวเก็บประจุของสถานีไฟฟ้า ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานจะมีความสำคัญมากกว่าในการพิจารณากระแสฮาร์โมนิกของระบบไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ กระแสฮาร์โมนิกส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจะไม่สามารถไหลได้ในบัสที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงกว่าทำให้กระแสฮาร์โมนิกดังกล่าวไหลย้อนเข้าไปสู่ระบบแรงต่ำ ขนาด 400 โวลต์จะส่งผลให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ด้านแรงต่ำที่อยู่ในระบบ เช่น โรงงานต่างๆที่ต่อกับระบบ จากการทดลองกระแสฮาร์โมนิกที่มีค่าประมาณอันดับที่ 5 จะมีผลต่อระบบดังกล่าว ส่วนค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมจะมีผลกับขนาดของตัวเก็บประจุ เนื่องจากมีค่าอิมพีแดนซ์ในระบบต่ำ กระแสฮาร์โมนิกจะไหลได้เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ถ้ามีการออกแบบขนาดของตัวเก็บประจุไม่ดีพอจะทำให้เกิดการไหลของกระแสจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดความร้อนและการระเบิดตามมาได้ โดยจากการทดลองกระแสฮาร์โมนิกที่มีค่าประมาณอันดับที่ 7 จะเกิดการไหลในชุดตัวเก็บประจุได้จำนวนมาก ซึ่งการแก้ไขสามารถทำได้โดยใช้วงจรกรองความถี่ (Tuned Filter)

5.1.2 โรงหลอมเหล็ก บริเวณจุดติดตั้งต่างๆมีผลอย่างมากต่อการเกิดฮาร์โมนิกส์เรโซแนนซ์ของระบบ โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่เกิดขึ้นนั้นจะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ขึ้นและทำให้เกิดการขยายตัวของฮาร์โมนิกส์ที่บริเวณดังกล่าว ส่งผลให้ฮาร์โมนิกส์รวมของระบบมีค่าสูงขึ้น จะเห็นได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์แบบขนานของระบบจะมีค่าสูงมากกว่าอิมพีแดนซ์อนุกรมของระบบเป็นจำนวนมาก และเมื่อนำผลของจากการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Scan) ของระบบ ที่มีค่ากระแสฮาร์โมนิกส์อันดับต่างๆ ที่จุดติดตั้งโรงหลอมเหล็กตามระยะทางบริเวณที่กำหนด คือ ต้นสาย กลางสาย และปลายสายของสายป้อน 1 โดยปริมาณขนาดของกระแสฮาร์โมนิกส์ที่สังเกตเห็นได้ชัด คือ เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของขนาดโรงหลอมเหล็กในระบบจะพบว่าปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์จะมีค่าขึ้นสูงแปรตามไปด้วย อันดับกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด คือ กระแสฮาร์โมนิกส์ อันดับที่ 5 โดยสำหรับกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เพิ่มขึ้นนั้น จากการวิเคราะห์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance) ด้วยโปรแกรม DigSILENT PowerFactory พบว่ากระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดจากโรงงานหลอมเหล็กมีปริมาณมากกว่าแบบอื่นๆ เนื่องจากโรงงานหลอมเหล็กจะทำหน้าที่เสมือนแหล่งจ่ายฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Source) ขนาดใหญ่ในระบบ กระแสฮาร์โมนิกส์จะมีการไหลไปยังบริเวณที่มีอิมพีแดนซ์ระบบต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้ คือ ค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานจะมีค่ามากกว่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมของระบบหมายความว่ากระแสฮาร์โมนิกส์จะไหลไปยังบริเวณสายป้อนหรือสถานีไฟฟ้าใกล้เคียงที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำกว่าจะส่งผลให้สถานีไฟฟ้าไฟฟ้านั้นมีผลรวมของกระแสฮาร์โมนิกส์เกินได้ทั้งที่ไม่ได้มีการไหลที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวเกาะอยู่ ซึ่งเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการระเบิดของชุดตัวเก็บประจุของสถานีไฟฟ้า ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์การเกิดเรโซแนนซ์แบบขนานจะมีความสำคัญมากกว่าในการพิจารณากระแสฮาร์โมนิกส์ของระบบไฟฟ้า 22 กิโลโวลต์ กระแสฮาร์โมนิกส์ส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจะไม่สามารถไหลได้ในบัสที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงกว่าทำให้กระแสฮาร์โมนิกส์ดังกล่าวไหลย้อนเข้าไปสู่ระบบแรงต่ำ ขนาด 400 โวลต์จะส่งผลให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ด้านแรงต่ำที่ต่ออยู่ในระบบปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์เหล่านี้จะส่งผลกระทบเป็นวงกว้างทั้งในพื้นที่ของสถานีไฟฟ้าและสถานีไฟฟ้าที่ใกล้เคียงด้วย นอกจากนี้โรงงานอุตสาหกรรมหรือโรงงานที่มีอุปกรณ์ระบบไฟฟ้าที่มีความไวต่อกระแสฮาร์โมนิกส์บางอันดับ เช่น อันดับที่ 5 จะส่งผลกระทบต่อโรงงานอุตสาหกรรมเหล่านั้นให้ได้รับความเสียหายได้ จึงจะต้องมีการติดตั้งวงจรกรองความถี่ที่โรงงานอุตสาหกรรมเหล่านั้นด้วย แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกส์เมื่อมีโรงงานหลอมเหล็กต่ออยู่จึงส่งผลกระทบต่ออย่างมากเมื่อต่อในระบบ

5.1.3 อุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์หมีขนาดตั้งแต่ 300,600,900,1200 และ 1,500 กิโลวาร์ และบริเวณจุดติดตั้งต่างๆมีผลอย่างมากต่อการเกิดฮาร์โมนิกส์เรโซแนนซ์ของระบบ ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวเมื่อติดตั้งในระบบแล้วจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบเปลี่ยนแปลงไปแบบไม่เป็นเชิงเส้นเนื่องจากอุปกรณ์ดังกล่าวมีผลทำให้ค่าอิมพีแดนซ์รวมของระบบเปลี่ยนไปขึ้นกับขนาดและจุดที่ติดตั้ง โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่เกิดขึ้นนั้นจะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ขึ้นและทำให้เกิดการขยายตัวของฮาร์โมนิกส์ที่บริเวณดังกล่าว ส่งผลให้ฮาร์โมนิกส์รวมของระบบมีค่าสูงขึ้น จะเห็นได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์แบบขนานของระบบจะมีค่าสูงมากกว่าอิมพีแดนซ์อนุกรมของระบบเป็นจำนวนมาก และเมื่อนำผลของจากการวิเคราะห์ฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Scan) ของระบบ ที่มีค่ากระแสฮาร์โมนิกส์อันดับต่างๆ ที่จุดติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ตามระยะทางบริเวณที่กำหนด คือ ต้นสาย กลางสาย และปลายสายของสายป้อน 1 การเพิ่มของอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) เข้ามาที่ระบบไฟฟ้านั้นจะเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่ทั้งในคุณสมบัติของการเกิดความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์และการเปลี่ยนแปลงอันดับการเกิดฮาร์โมนิกส์รวมของระบบ ในส่วนการเกิดฮาร์โมนิกส์ของแบบขนานพบว่าค่าอิมพีแดนซ์รวมของระบบเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ไว้ที่ต้นสายป้อนและกลางสายป้อนจะมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่าอิมพีแดนซ์เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ไว้ที่ปลายสายจะมีค่าน้อยกว่า รวมถึงอันดับในการเกิดฮาร์โมนิกส์เรโซแนนซ์ด้วย ส่วนการเกิดฮาร์โมนิกส์ของแบบอนุกรมค่าอิมพีแดนซ์และอันดับการเกิดฮาร์โมนิกส์รวมของระบบเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวไว้ที่ปลายสายป้อนจะมีค่าสูงกว่าติดตั้งอุปกรณ์ไว้ที่ต้นสายป้อนและกลางสายป้อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การวิเคราะห์ระบบจากการจำลองโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่นำมาวิเคราะห์นั้นสามารถอธิบายถึงสาเหตุของการระเบิดของชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitor Bank) ที่สถานีไฟฟ้าเนื่องจากสภาวะทรานเซียนต์ (Transient) จากการสับ/ปลดเข้าออกของชุดตัวเก็บประจุ และที่สภาวะคงตัว (Steady State) จากผลของฮาร์โมนิกส์เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องเท่านั้น และยังช่วยให้เราทราบถึงคุณลักษณะดั้งเดิมของสถานีในพื้นที่และยังทราบถึงปัจจัยพื้นฐานที่อาจจะมีผลกระทบในอนาคตต่อระบบไฟฟ้า เพื่อการวางแผนในด้านระบบไฟฟ้าการหลีกเลี่ยงปัญหาต่างๆที่จะเกิดขึ้นได้ต่อไป แม้ว่าผลของการศึกษาจะไม่ทำให้ตัวชุดตัวเก็บประจุระเบิดได้จากสาเหตุข้างต้น ทั้งนี้เพื่อวิเคราะห์ถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่มีผลกับระบบไฟฟ้าส่วนภูมิภาคขนาด 22 กิโลโวลต์ การศึกษานี้เป็นการวิเคราะห์ในส่วนของปัจจัยที่ภาระโหลดที่สถานีที่ 21.7 เมกะวัตต์เท่านั้น ถ้าเมื่อมีการกำลังโหลดมากกว่า ซึ่งมีโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นประเภทต่างๆ และมีการเชื่อมต่อของภาระโหลดนั้นกับระบบในหลายสายสายป้อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งการติดตั้งที่ห่างจากสถานีด้วย โดยการติดตั้งที่ระยะ

ปลายสายป้อนจะส่งผลให้ฮาร์โมนิกส์มีผลกระทบมากกว่าตามคุณลักษณะเฉพาะพื้นที่สถานีไฟฟ้า
 วิหารแดง ย่อมส่งผลให้กระแสฮาร์โมนิกส์มีค่ามากขึ้นตาม กระแสฮาร์โมนิกส์เหล่านี้จะส่งผลให้เกิด
 ความร้อนตามมาซึ่งความร้อนนั้นเองเป็นปัจจัยส่งผลให้เกิดการระเบิดของชุดตัวเก็บประจุ ดังมี
 บทความด้านเทคโนโลยีชุดตัวเก็บประจุในต่างประเทศ ได้ทำการวิเคราะห์ ศึกษาปัจจัยที่จะทำให้ชุด
 ตัวเก็บประจุระเบิด นอกจากนี้ยังมีอีกหลายสาเหตุที่สามารถทำให้ชุดตัวเก็บประจุระเบิดได้แต่ได้
 ทำการศึกษาเพียงเท่านี้

เมื่อวิเคราะห์ผลของความร้อนที่เกิดจากทรานเซียนต์พบว่าค่ากระแสถึงมีปริมาณสูงแต่มี
 ช่วงเวลาการเกิดสั้นๆเมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEEE จึงพบว่ามีค่าน้อยที่จะเกิดความ
 ร้อนจากสาเหตุดังกล่าวจะเป็นสาเหตุของการเสื่อมของฉนวนที่อยู่ในชุดตัวเก็บประจุแต่เมื่อวิเคราะห์
 ผลของความร้อนที่เกิดจากฮาร์โมนิกส์ สามารถเห็นได้ชัดยกตัวอย่าง เช่น กระแสฮาร์โมนิกส์อันดับที่
 5 ที่วัดได้ที่สถานีมีค่าเกินมาตรฐานที่การไฟฟ้าตั้งไว้ คือ ประมาณ $13.75 - 9 = 4$ แอมป์ ปริมาณ
 กระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดมาตรฐานจะมีพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นหาได้จาก $W = P \cdot t =$
 $4.752 \cdot 0.0403 = 3,273.36$ จูลต่อชั่วโมง แต่เมื่อคิดถึงปริมาณกระแสฮาร์โมนิกส์ที่สูญเสียที่สถานี
 วิหารแดงอย่างเดียวจะมีค่าพลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นประมาณ 2.45573 เมกะจูลต่อชั่วโมง นั้น
 หมายความว่าเมื่อมีการใช้งานชุดตัวเก็บประจุที่สถานีต่อเวลาหนึ่งชั่วโมงเราจะมีพลังงานสูญเสียใน
 ระบบมากถึง 2.45573 เมกะจูลต่อชั่วโมง ซึ่งพลังงานนี้จะป็นสาเหตุให้เกิดความร้อนสะสมที่ชุดตัว
 เก็บประจุ

5.2 แนวทางการแก้ไขปัญหา

1. การลดผลกระทบเนื่องจากทรานเซียนต์ [6] มีหลายวิธีการ ดังนี้

1.1 การใส่ตัวต้านทานช่วยลดผลของทรานเซียนต์ (Pre-insertion Resistors) หลังจาก
 สับสวิตช์จะมีชุดความต้านทานก่อนชุดตัวเก็บประจุเพื่อช่วยลดผลความรุนแรงจากแรงดันเกินในช่วง
 เริ่มต้นของการสับ/ปลดสวิตช์ และยังช่วยลดค่าสูงสุดของกระแสและแรงดันเกินในช่วงทรานเซียนต์

1.2 การใช้ชุดขดลวดลิมิตกระแส (Current Limiting Reactors) โดยจะต่อชุดขดลวด
 อนุกรมกับชุดตัวเก็บประจุ โดยชุดขดลวดนี้จะช่วยลดค่าสูงสุดของกระแสกระชากให้ลดลง

1.3 ใช้กับดัก Surge Arrester โดยจะต่ออนุกรมกับชุดของความต้านทานที่ไม่เป็นเชิง
 เส้นบริจุดที่มีความเครียดสูง เพื่อป้องกันชุดตัวเก็บประจุ

2. การลดกระแสฮาร์โมนิกส์ [6] มีหลายวิธีการ ดังนี้

2.1 การเพิ่มโหลดรบกวน (Disturbing Load) เข้าไปในช่วงต้นของระบบไฟฟ้า (Placing
 the disturbing load upstream in the system) อย่างไรก็ตามหากอัตราของกระแสโหลดต่อ
 กระแสไฟฟ้ามีปริมาณมาก จะส่งผลให้คุณภาพของกระแสไฟฟ้าลดลง

2.2 การรวมโหลดรบกวนเข้าด้วยกัน (Grouping the disturbing loads) เข้าไปในช่วงต้นของระบบไฟฟ้า เป็นวิธีการที่จะแยกโหลดไม่เป็นเชิงเส้นออกจากโหลดอื่น

2.3 การเพิ่ม line inductors เข้าไปในโหลดไม่เป็นเชิงเส้น (Installing line inductors in series with nonlinear sources) เป็นการเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า ทำให้กระแสฮาร์โมนิกส์ลดลง

2.4 การติดตั้งวงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Filters) เป็นอีกวิธีการหนึ่ง นอกจากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งวงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ที่จะติดตั้งมีให้เลือกหลากหลายแบบ ทำได้ง่ายกว่าการติดตั้งวงจรกรองที่สถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยวงจรกรองมีด้วยกัน 3 แบบ ได้แก่ วงจรกรองแบบพาสซีฟ (Passive Filters) วงจรกรองแบบแอคทีฟ (Active Filters) และวงจรกรองแบบผสม (Hybrid Filters) ในแต่ละแบบจะมีคุณสมบัติข้อดีข้อเสียต่างกันไป ซึ่งในการติดตั้งวงจรกรอง ไร่ที่ฝั่งแรงต่ำของลูกค้า (Customers) ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เนื่องจากเหตุผลด้านขนาดของวงจรกรอง (Sizing) จะมีราคาสูงกว่าติดตั้งบนระบบ 22 กิโลโวลต์และบนระบบ 115 กิโลโวลต์ นอกจากนี้การติดตั้งวงจรกรองแบบ passive จะมีความยืดหยุ่นกว่าสามารถออกแบบรองรับการติดตั้งวงจรกรองกระแสฮาร์โมนิกส์บางอันดับที่มีผลต่อระบบแทนที่จะติดตั้งวงจรกรอง Active ที่สามารถกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ได้หลายอันดับ ซึ่งมีราคาสูงกว่าแบบ passive ยิ่งไปกว่านั้นมิจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวกรองชนิด passive แบบเดี่ยวช่วยแก้ปัญหาได้ดีที่สุดเมื่อมีกระแสฮาร์โมนิกส์ปริมาณมากๆ คือการใช้ตัวกรองแบบนี้หลายๆอัน ทั้งนี้ต้องพิจารณาถึงอันดับฮาร์โมนิกส์ที่จะทำการกรองและขนาดพิกัดของชุดตัวเก็บประจุชนิดนั้นด้วย

3. เมื่อมีภาระโหลดขนาดใหญ่ทั้งในส่วนของลูกค้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคหรือในส่วนของบริษัท โรงไฟฟ้าต่างๆและในส่วนของการติดตั้งอุปกรณ์ยกแรงดันแรงสูงคาปาซิเตอร์แบบคงที่ (Fixed Capacitor) ที่มีขนาดใหญ่เข้ามาในระบบจะต้องมีการวิเคราะห์การออกแบบผ่านระบบ simulation ทุกครั้งเพื่อป้องกันการขยายสัญญาณ (Magnification) ของฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในระบบนั้นๆ เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่จะเกิดขึ้น

4. ในการเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคต้องมีการติดตั้งเครื่องมือวัดค่า Disturbance หน้าโรงงานภาระโหลดขนาดใหญ่ในส่วนของลูกค้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคทุกครั้งเพื่อป้องกันปัญหาด้านฮาร์โมนิกส์ในส่วนของลูกค้าที่จะรบกวนระบบจำหน่าย

5. ในการออกแบบระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะต้องมีการออกแบบภาระโหลดแต่ละสายป้อนไม่เกิน 8 เมกะวัตต์ตามมาตรฐาน

6. เมื่อมีภาระโหลดขนาดใหญ่ในส่วนของลูกค้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่มากกว่าที่ระบบ 22 กิโลโวลต์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาครองรับได้ ต้องมีการซื้อไฟฟ้าในระบบ 115 กิโลโวลต์แทนเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพไฟฟ้า

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์และศึกษาแนวทางแก้ไขการระเบิดของชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพื่อรองรับความต้องการที่ในอนาคตของประเทศไทยที่มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นการใช้พลังงาน เช่น การเพิ่มจำนวนของบ้านเรือนที่อยู่อาศัย ,สถานที่ราชการและเอกชน , โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ รวมถึงนิคมอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้าที่ตามมา ส่งผลให้ระบบไฟฟ้าได้รับผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งจะวิเคราะห์ปัญหาด้านคุณภาพไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องและเป็นสาเหตุที่อาจส่งผลกระทบต่อตัวกลาง โดยมีการจำลองแบบระบบไฟฟ้าจากระบบจริงไว้เป็นกรณีศึกษา ผ่านการวิเคราะห์ทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้แก่ EMT/ATP และ DIgSILENT เพื่อศึกษาผลกระทบกับชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้า ความเหมาะสมในขนาดที่ติดตั้ง ปัจจัยที่ส่งผลทำให้ชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้ามีแนวโน้มเกิดการชำรุดหรือระเบิดเสียหายได้ เพื่อเป็นแผนการรองรับเหตุการณ์ดังกล่าวที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต และจะมีการประยุกต์หาแนวทางการใช้งานข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดมิเตอร์คุณภาพไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้ามาวิเคราะห์ร่วมกันให้เกิดประโยชน์สูงสุด เป็นแนวทางในการป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้นและผลกระทบต่อสายป้อนหรือสถานีไฟฟ้าใกล้เคียง ให้สามารถรองรับความต้องการและเพิ่มความน่าเชื่อถือด้านระบบคุณภาพไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังนี้

1. เพิ่มการติดตั้งมิเตอร์คุณภาพไฟฟ้า (PQ Meter) ให้ทั่วถึงครอบคลุมทุกสถานีไฟฟ้าเพื่อทราบถึงสาเหตุและปัญหาภายในพื้นที่ของสถานีและใช้ในการปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพด้านคุณภาพไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าต่อไป
2. ปรับปรุงและพัฒนาส่วนการแสดงผลของข้อมูล ให้สามารถครอบคลุมถึงขอบเขตมิเตอร์ไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ เอเอ็มอาร์ (AMR) เพื่อใช้ในการเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าในพื้นที่นั้นๆในการเปรียบเทียบกับคุณภาพรวมที่วัดได้จากมิเตอร์คุณภาพ (PQ Meter) ต้นทางของสถานีไฟฟ้า ในระบบภูมิศาสตร์สารสนเทศ (GIS) ให้มีความถูกต้องและแม่นยำ
3. ปรับปรุงและพัฒนาในส่วนของมิเตอร์คุณภาพไฟฟ้า (PQ Meter) แต่ละผลิตภัณฑ์ให้สามารถใช้ภาษาเดียวกันในการติดต่อสื่อสารกันได้ (Interoperability) เพื่อลดระยะเวลาการทำงานและการวิเคราะห์สาเหตุของคุณภาพไฟฟ้า

5.3.1 ประโยชน์ของงานวิจัย

1. การจำลองแบบที่สถานีไฟฟ้านี้เป็นแนวทางช่วยในการศึกษาและวิเคราะห์สาเหตุของชุดตัวเก็บประจุที่ระเบิดในสถานีไฟฟ้าในกรณีของ สภาวะทรานเซียนต์ (Transient) และสภาวะคงตัว (Steady state) ในอนาคตของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเมื่อเกิดปัญหาในลักษณะเดียวกัน
2. เป็นแนวทางในการป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าจากสาเหตุของฮาร์มอนิกส์ในอันดับต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงาน ป้องกันอุปกรณ์เสียหายซ้ำชุดได้ทันท่วงที
3. ใช้เป็นแนวทางในการประเมินสภาพอายุการใช้งาน (Evaluate Lifetime Equipment) หรือวางแผนซ่อมแซม (Preventive Maintenance) ของชุดตัวเก็บประจุที่สถานีไฟฟ้าได้

5.3.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

1. การใช้งานโปรแกรมในการจำลองแบบที่สถานีไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นในส่วนของสภาวะทรานเซียนต์ (Transient) และสภาวะคงตัว (Steady state) จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้แก่ EMTP/ATP, PQView และ DigSILENT PowerFactory มีการใช้งานค่อนข้างเฉพาะกลุ่ม การศึกษาเพื่อใช้งานยังค่อนข้างยากในการเรียนรู้เอง
2. ข้อมูลจากมิเตอร์คุณภาพไฟฟ้า (PQ Meter) ที่สถานีไฟฟ้าบางรุ่นยังยากในการดึงข้อมูลมาใช้งาน ต้องเข้าไปเก็บข้อมูลหน้ามิเตอร์ภายในสถานีเท่านั้น
3. การจำลองระบบด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่นำมาวิเคราะห์นั้น เป็นการจำลองจากข้อมูลจริงในช่วงขณะหนึ่ง ซึ่งในขณะนั้นอาจจะมีปัจจัยภายนอกอื่นที่ไม่ทราบ เช่น การขยายตัวของฮาร์มอนิกส์จากโรงงานข้างเคียงหรือการเชื่อมต่อ/ปลดออกของโหลดขนาดใหญ่ของโรงงานและอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้อุปกรณ์เสียหายได้

บรรณานุกรม

- [1] ภ. สิริวิทยะธนกุล และ พ. ศรียรรยงค์, "ผลกระทบกระแสฟุ้งเข้าจากการสวิตชิงต่อคาปาซิเตอร์ แบงก์แรงดันปานกลาง กรณีศึกษาของ กฟน.," *The Journal of KMUTNB*, vol. 29, pp. 103 - 111, 2561.
- [2] อ. จันทสมิต, "การศึกษาผลของการสับและปลดสวิตซ์ชนิดสูญญากาศต่อชุดตัวเก็บประจุที่ สถานีไฟฟ้าย่อยระดับแรงดันปานกลาง," ปรินญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [3] B. Delfino, F. Fornari, C. Gemme, and A. Moratto, *Power quality improvement in transmission and distribution networks via synchronous switching* vol. 1, 2001.
- [4] "Impact of shunt capacitor banks on substation surge environment and surge arrester applications," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, pp. 1798-1809, 1996.
- [5] น. เตชาติศัย, ศ. คชประเสริฐ, และ บ. สังข์สุวรรณ, "ศึกษาการติดตั้งและทดสอบอุปกรณ์ ออโตเมติกสวิตซ์ซึ่งคาปาซิเตอร์แบงก์ ในสถานีไฟฟ้าย่อยระบบ 115/22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค " หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม, 2555.
- [6] v. m. Rachabattuni, *Capacitor Banks and its effects on the power system with high harmonic loads*, 2018.
- [7] ศ. บัวแก้ว, "การศึกษาผลกระทบของฮาร์โมนิกในสถานีไฟฟ้าย่อย," 2541.
- [8] น. วันทอง, "การวิเคราะห์ทางเลือกในการกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ " หลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2551.
- [9] R. Gallay, *Metallized Film Capacitor Lifetime Evaluation and Failure Mode Analysis*, 2014.
- [10] ส. สังข์สะอาด, *Electrical Transient Overvoltage in Power System.*: ศูนย์เชี่ยวชาญ พิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- [11] IEEE, "IEEE guide for application of shunt power capacitors," in *Std 1036*, ed, 2012.
- [12] ส. บุญชัยศรี, "การวิเคราะห์แรงดันเกินชั่วขณะเนื่องจากการต่อวงจรตัวเก็บประจุที่ระดับ แรงดัน 115 กิโลโวลท์," สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2542.

- [13] ANSI/IEEE, "IEEE Application Guide for Capacitance Current Switching for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Bias," in *C37.012*, ed, 1980.
- [14] IEC, "International Standard Shunt Capacitor for A.C. Power Systems Having a Rated Voltage above 1000 V, 2nd Edition," in *IEC 60871-1* ed, 1997.
- [15] A. Greenwood, *Electrical Transients in Power System. 2nd edition.*: John Wiley & Sons, 1991.
- [16] S. Ananthakrishnan, and Guruprasad, K.P. *Transient Recovery Voltage and Circuit Breakers*: Tata McGraw-Hill, 1999.
- [17] IEEE, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems " vol. Std 519, 2014.
- [18] IEEE, "IEEE Standard for Shunt Power Capacitors," *IEEE Std 18-2012 (Revision of IEEE Std 18-2002)*, pp. 1-39, 2013.
- [19] "Electrolek Concepts Evaluation of Distribution Capacitor Switching Concerns," pp. EPRI TR-107332, October 1997.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	
วัน เดือน ปี เกิด	2 มีนาคม 2530
สถานที่เกิด	ร้อยเอ็ด
วุฒิการศึกษา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	489 หมู่ 1 ตำบลท่าสุต อำเภอเมือง เชียงราย 57100
ผลงานตีพิมพ์	PEA Conference 2019
รางวัลที่ได้รับ	-

