

การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไฟฟ้ากำลัง



นางสาวอรรรณ กังวาฬ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2560  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HARMONIC ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS



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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University



อรรถวรรณ กังวาล : การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไฟฟ้ากำลัง (HARMONIC ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ธวัชชัย เตชสุนันต์, 216 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยพิจารณาดัชนีทางฮาร์มอนิก อันได้แก่ ค่าร้อยละค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion) และค่าฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ (Individual Harmonic) โดยพิจารณาอยู่ภายใต้ ข้อกำหนดการเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า ของการไฟฟ้านครหลวง พ.ศ. 2558

ในการทดสอบจะทำการทดสอบจากการเชื่อมต่อบระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้า 3 แห่ง ของการไฟฟ้านครหลวง ที่มีระดับแรงดันแตกต่างกัน ได้แก่ ระดับแรงดันสูง (115 kV) ระดับแรงดันปานกลาง (24 kV) และระดับแรงดันต่ำ (230/400 V) ที่มีโครงสร้างทั้งแบบเรเดียลและโครงข่าย ผลการจำลองแบบที่ได้อยู่ในรูปแบบของค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion) และค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง และจากนั้นจะทำการหาปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ยอมให้ติดตั้งได้โดยไม่เกินค่าวางแผนนั้น เพื่อเสนอแนะปริมาณกำลังผลิตติดตั้งที่เหมาะสมใหม่ให้แก่การไฟฟ้าด้วยโปรแกรม DiGSILENT PowerFactory

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบพบว่าระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั้ง 3 ระดับแรงดัน มีค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับแตกต่างกันไปตามกรณีและรูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิก โดยปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ จะติดตั้งได้มากที่สุด ในกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง และมีการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์แบบที่ 3 (ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จ่ายกระแสฮาร์มอนิกตามข้อมูลการทดสอบอินเวอร์เตอร์จากบริษัทผู้ผลิตอินเวอร์เตอร์ โดยปรับปริมาณกระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับให้มีผลรวมความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 5%) ทั้งนี้ในวิทยานิพนธ์นี้ยังได้ทำการศึกษาและสรุปข้อกำหนดการเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้าเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับข้อกำหนดการเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงอีกด้วย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2560

# # 5770574421 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: HARMONIC ANALYSIS / PHOTOVOLTAIC SYSTEM / TOTAL HARMONIC DISTORTION / INDIVIDUAL HARMONIC / DIGSILENT POWER FACTORY

ORAWAN KANGWAL: HARMONIC ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS. ADVISOR: THAVATCHAI TAYJASANANT, 216 pp.

This thesis presented harmonic analysis of photovoltaic systems in electrical power systems by considering harmonic indices namely Total Harmonic Distortion (THD) and Individual Harmonic to comply with an acceptable limit in Connection Code of Metropolitan Electricity Authority (MEA) B.E. 2558.

Case studies were conducted on 3 distribution systems in MEA, High Voltage (115 kV), Medium Voltage (24 kV) and Low Voltage (230/400 V, both radial and network configurations). Results were shown in Total Harmonic Distortion Voltage (THDv) and Individual Harmonic Voltage and compared with MEA's planning levels. After that installed PV capacities under allowable limits were calculated in order to recommend optimal installed PV capacity to MEA by using DIgSILENT PowerFactory program.

Simulation results showed that three distribution levels have different values of Total Harmonic Distortion Voltage (THDv) and Individual Harmonic Voltage based on different scenarios and harmonic current injection patterns. The installed PV capacity is the largest when there is no harmonic background and with harmonic current injection pattern 3 (PV system generates harmonic current injection by adjusting individual harmonic current such that total harmonic current distortion equals to 5%). In addition, this thesis studied and summarized connection codes from other countries to compare with Connection Code of MEA.

Department: Electrical Engineering      Student's Signature .....

Field of Study: Electrical Engineering      Advisor's Signature .....

Academic Year: 2017

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษารองศาสตราจารย์ ดร.วิชชัย เตชะสอนันต์ สำหรับความอนุเคราะห์ในการให้คำแนะนำ คำปรึกษา และชี้แนะแนวทางที่เป็นประโยชน์ตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้ ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่ง ประกอบด้วย อ.ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล (ประธานกรรมการ) ผศ.ดร.สุรัชย์ ชัยทัศนีย์ (กรรมการ) และดร.จักรเพชร มัทราช (กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย) ที่ได้สละเวลาตรวจสอบและให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จ

ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ขอขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้อง ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยให้คำแนะนำและข้อมูลที่สำคัญสำหรับการจัดทำวิทยานิพนธ์ตลอดระยะเวลาที่ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ได้ศึกษาอยู่ในมหาวิทยาลัย รวมถึงขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยดำเนินการความสะดวกในการติดต่อประสานงานและการดำเนินการต่าง ๆ เกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วย

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการอนุเคราะห์ข้อมูลระบบจำหน่ายไฟฟ้า ข้อมูลผู้ใช้ไฟฟ้า และข้อมูลอินเวอร์เตอร์ จากการไฟฟ้านครหลวง ทางผู้เขียนวิทยานิพนธ์จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ผู้ที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คอยสนับสนุน ให้กำลังใจ และเป็นแรงผลักดันตลอดระยะเวลาการศึกษาในระดับมหาบัณฑิต ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	4
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและแนวคิดที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า (Power System Harmonic).....	8
2.1.1 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก [8].....	9
2.1.2 ปัญหาของฮาร์มอนิกต่อระบบไฟฟ้า [9].....	12
2.2 การไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง (Harmonic Load Flow) .....	13
2.2.1 ค่ากระแสฮาร์มอนิกรวม และค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม .....	18
2.2.2 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกรวม และค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม.....	18
2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ .....	19
2.3.1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทแยกตัวอิสระ (Photovoltaic Standalone system) .....	19

2.3.2 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้า (Photovoltaic Grid-connected system).....	20
2.3.3 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทผสมผสาน (Photovoltaic hybrid system) .....	21
2.4 อินเวอร์เตอร์ (Inverter) .....	22
2.4.1 ประเภทของอินเวอร์เตอร์.....	22
2.4.2 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ [12].....	23
2.4.3 ข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์[12].....	26
2.4.4 รูปแบบการทำงานของอินเวอร์เตอร์[12] .....	30
2.5 การใช้งานโปรแกรม DigSILENT PowerFactory สำหรับแบบจำลองโปรแกรมวิเคราะห์ ฮาร์มอนิก [15].....	35
2.5.1 การสร้างแบบจำลองสถานีไฟฟ้า.....	38
2.5.2 การสร้างแหล่งจ่ายฮาร์มอนิก.....	39
2.5.2 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ.....	42
2.5.3 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEC 61000-3-6.....	44
บทที่ 3 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของประเทศไทย และต่างประเทศ .....	45
3.1 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง .....	45
3.2 ข้อกำหนดสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าประเภทเชื่อมต่อกับโครงข่าย.....	50
3.3 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของต่างประเทศ .....	51
3.3.1 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของประเทศอังกฤษ .....	51
3.3.2 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของประเทศเยอรมัน .....	54
บทที่ 4 ระบบทดสอบ .....	58
4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบ ไฟฟ้ากำลัง.....	58



4.1.1 ข้อมูลโครงสร้างระบบจำหน่ายไฟฟ้า สถานีไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า และสายส่ง/ สายจำหน่าย.....	58
4.1.2 ข้อมูลฮาร์มอนิกเบื้องหลัง (Background Harmonic).....	63
4.1.3 ข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์.....	64
4.1.4 ข้อมูลตัวเก็บประจุ (Capacitor).....	67
4.1.5 ข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า.....	68
4.1.6 ข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	69
บทที่ 5 ตัวอย่าง การวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิก.....	76
5.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV).....	76
5.2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV).....	80
5.3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400V-Radial).....	83
5.4 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400V-Network).....	86
5.5 สรุป.....	87
บทที่ 6 ผลการทดสอบ การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบ ไฟฟ้ากำลัง.....	88
6.1 วิธีการทดสอบ.....	88
6.2 ผลการทดสอบ.....	92
6.2.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV).....	92
6.2.2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV).....	102
6.2.3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V).....	113
6.2.4 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network).....	124
6.3 สรุปผลการทดสอบ.....	129
บทที่ 7 สรุปวิทยานิพนธ์.....	133

7.1 สรุป .....	133
7.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต .....	135
รายการอ้างอิง .....	137
ภาคผนวก ก.....	140
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	216



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 การรวมสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่มูลฐานกับคลื่นไซน์ที่ฮาร์มอนิก อันดับที่ 3, 5 และ 7 .....	9
รูปที่ 2.2 แสดงการผิดเพี้ยนของกระแสภายใต้เงื่อนไขการอิ่มตัวของหม้อแปลง [8] .....	9
รูปที่ 2.3 แสดงการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน[10] .....	14
รูปที่ 2.4 แสดงการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์มอนิก[10].....	14
รูปที่ 2.5 แสดงวงจรสมมูลของระบบที่ความถี่ฮาร์มอนิก[10] .....	15
รูปที่ 2.6 ระบบตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์หาการไหลของกระแสฮาร์มอนิก.....	16
รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลจากรูปที่ 2.6 เพื่อสร้าง $Y_{BUS}$ .....	16
รูปที่ 2.8 การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทแยกตัวอิสระ .....	20
รูปที่ 2.9 การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบ .....	21
รูปที่ 2.10 การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทผสมผสาน.....	21
รูปที่ 2.11 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันและแบบแหล่งจ่ายกระแส.....	22
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการทำงานพื้นฐานของวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่มีสวิตช์ 2 ตัว.....	25
รูปที่ 2.13 หลักการสร้างสัญญาณแบบมอดูเลตความกว้างพัลส์ .....	25
รูปที่ 2.14 โครงสร้างการทำงานของการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	26
รูปที่ 2.15 จุดทำงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ .....	31
รูปที่ 2.16 การหาจุดทำงานสูงสุดโดยวิธีรบกวนและสังเกต .....	32
รูปที่ 2.17 การข้ามผ่านความผิดพร่อง .....	34
รูปที่ 2.18 ภาพตัวอย่างโปรแกรม DigSILENT PowerFactory ในการเลือกวิเคราะห์ฮาร์มอนิก.....	36
รูปที่ 2.19 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจำลองโปรแกรม .....	37
รูปที่ 2.20 หน้าต่างการสร้างแบบจำลองสถานีไฟฟ้าที่ External Grid.....	38
รูปที่ 2.21 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองสถานีไฟฟ้าในส่วนของกริดวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิก.....	38

รูปที่ 2.22 การใส่ข้อมูลแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบ Balanced, Phase Correct .....	40
รูปที่ 2.23 การใส่ข้อมูลแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบ Unbalanced, Phase Correct.....	40
รูปที่ 2.24 การใส่ข้อมูลแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบ IEC 61000.....	41
รูปที่ 2.25 การใส่ข้อมูลแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกรูปแบบ Phase Correct .....	42
รูปที่ 2.26 การใส่ข้อมูลแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกรูปแบบ IEC 61000.....	42
รูปที่ 2.27 ปุ่มคำสั่งการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิก และการสร้างกราฟของปริมาณฮาร์มอนิก.....	43
รูปที่ 2.28 หน้าต่างเลือกการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิก.....	43
รูปที่ 2.29 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ปริมาณกระแสฮาร์มอนิก .....	43
รูปที่ 4.1 Single Line Diagram ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV).....	58
รูปที่ 4.2 Single Line Diagram ของระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV).....	60
รูปที่ 4.3 โครงสร้างของสายจำหน่ายสำหรับใช้ในการจ่ายไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV).....	61
รูปที่ 4.4 แผนภาพ Single Line Diagram ของระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V).....	62
รูปที่ 4.5 โครงสร้างของระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network).....	63
รูปที่ 4.6 Harmonic Current Spectrum ของการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 3 (แรงดันสูง 115 kV และแรงดันปานกลาง 24 kV).....	66
รูปที่ 4.7 Harmonic Current Spectrum ของการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 3 (แรงดันต่ำ 230/400V, Radial + Network).....	67
รูปที่ 4.8 แบบจำลองการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	69
รูปที่ 4.9 แสดงตำแหน่งการเชื่อมต่อบริษัทผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115kV) ในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory.....	71
รูปที่ 4.10 แสดงตำแหน่งการเชื่อมต่อบริษัทผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) ในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory.....	72

รูปที่ 4.11 แสดงตำแหน่งการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) ในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory .....	74
รูปที่ 4.12 แสดงตำแหน่งการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network) ในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory .....	75
รูปที่ 5.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) ในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory .....	76
รูปที่ 5.2 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่มูลฐาน (50 Hz) ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) .....	78
รูปที่ 5.3 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) .....	79
รูปที่ 5.4 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) ในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory .....	80
รูปที่ 5.5 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่มูลฐาน ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) .....	81
รูปที่ 5.6 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) .....	82
รูปที่ 5.7 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V-Radial) ในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory .....	83
รูปที่ 5.8 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่มูลฐาน ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V-Radial) .....	84
รูปที่ 5.9 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V-Radial) .....	85
รูปที่ 5.10 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V-Network) ในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory .....	86
รูปที่ 5.11 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่มูลฐาน ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V-Network) .....	87
รูปที่ 5.12 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V-Network) .....	87
รูปที่ 6.1 แผนผังแสดงการทำงานของโปรแกรมการคำนวณผลการทดสอบ .....	90





หลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกแบบที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV).....	108
รูปที่ 6.18 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง กรณีระบบไม่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกแบบที่ 3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV).....	108
รูปที่ 6.19 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง กับ กรณีระบบไม่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกแบบที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV).....	109
รูปที่ 6.20 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง กับ กรณีระบบไม่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกแบบที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV).....	110
รูปที่ 6.21 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง กับ กรณีระบบไม่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกแบบที่ 3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV).....	110
รูปที่ 6.22 การวิเคราะห์ความถี่เรโซแนนซ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV).....	111
รูปที่ 6.23 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ กรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง กับ ปริมาณตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริษัทไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV).....	112
รูปที่ 6.24 แสดงข้อผิดพลาดในการคำนวณ Load Flow ของโปรแกรม DigSILENT PowerFactory.....	113
รูปที่ 6.25 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง กรณีระบบมีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่	





กเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) .....	122
รูปที่ 6.33 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง กับ กรณีระบบไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบที่ 3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) .....	122
รูปที่ 6.34 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ กรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง กับ กรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) .....	124
รูปที่ 6.35 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network) .....	126
รูปที่ 6.36 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network) .....	126
รูปที่ 6.37 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบที่ 3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network) .....	127
รูปที่ 6.38 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ กรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง กับ ปริมาณตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า ของการไฟฟ้านครหลวง ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network) .....	128

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 เป้าหมายการใช้พลังงานทดแทนเพื่อผลิตไฟฟ้า: แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (พ.ศ.2558-2579) (Alternative Energy Development Plan: AEDP 2015) [1].....	1
ตารางที่ 2.1 ข้อมูลอินเวอร์เตอร์รุ่น Conext TL20000E ของบริษัท Schneider Electric จำกัด [13].....	28
ตารางที่ 2.2 ข้อมูลอินเวอร์เตอร์รุ่น SUN2000-12KTL ของบริษัท HUAWEI จำกัด[14].....	29
ตารางที่ 2.3 ค่า Alpha ฮาร์มอนิกแต่ละลำดับในมาตรฐาน IEC 61000-3-6 .....	44
ตารางที่ 3.1 ขีดจำกัดปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์.....	46
ตารางที่ 3.2 ข้อกำหนดขนาดกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อในระบบของการไฟฟ้านครหลวง.....	47
ตารางที่ 3.3 ค่าวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับของระบบแรงดันสูง 69 และ 115 kV.....	48
ตารางที่ 3.4 ค่าวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับของระบบแรงดันปานกลาง 12, 22, 24 และ 33 kV.....	48
ตารางที่ 3.5 ค่าวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับของระบบแรงดันต่ำ 400 V .....	49
ตารางที่ 3.6 ข้อกำหนดขนาดกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อในระบบของมาตรฐาน EREC G83 [20] .....	52
ตารางที่ 3.7 กระแสฮาร์มอนิกจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ มาตรฐาน DIN EN 61000-3-2 [20].....	55
ตารางที่ 3.8 สรุปข้อกำหนดระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง และต่างประเทศ.....	57
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง พ.ศ.2558 .....	64
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกตามข้อกำหนดฯ ปรับปริมาณกระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับให้มีผลรวมความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 5% .....	65
ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง.....	68







ตารางที่ ก.1 ค่าพารามิเตอร์ของสถานีไฟฟ้าต้นทางที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV).....	140
ตารางที่ ก.2 ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า สถานีไฟฟ้าต้นทาง 115_A .....	140
ตารางที่ ก.3 ค่าพารามิเตอร์ของสายส่งในระบบจำหน่ายไฟฟ้า สถานีไฟฟ้าต้นทาง 115_A .....	140
ตารางที่ ก.4 ค่าพารามิเตอร์ของสถานีไฟฟ้าต้นทางที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV).....	141
ตารางที่ ก.5 ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) .....	141
ตารางที่ ก.6 ค่าพารามิเตอร์ของสถานีไฟฟ้าต้นทางที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400V -Radial).....	142
ตารางที่ ก.7 ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V -Radial).....	142
ตารางที่ ก.8 ค่าพารามิเตอร์ของชนิดของสายจำหน่ายในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ.....	142
ตารางที่ ก.9 ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำรูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network).....	143
ตารางที่ ก.10 ค่าพารามิเตอร์ของชนิดของสายจำหน่ายในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ.....	143
ตารางที่ ก.11 ข้อมูลแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งบัสต้นทางในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV).....	143
ตารางที่ ก.12 ข้อมูลแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งบัสต้นทางในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24kV).....	145
ตารางที่ ก.13 ข้อมูลแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งบัสต้นทางในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ .....	147
ตารางที่ ก.14 ตารางข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส รุ่น Conext TL 20000 E ของบริษัท Schneider Electric ซึ่งปรับเพิ่มค่ากระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับจนกระทั่งมีค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 5% ที่การจ่ายกระแสไฟฟ้า 100% ของค่าพิกัดกระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ .....	149

ตารางที่ ก.15 ตารางข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์โมนิกของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส รุ่น SUN2000-12KTL ของบริษัท HUAWEI ซึ่งปรับเพิ่มค่ากระแสฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ จนกระทั่งมีความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกรวมเท่ากับ 5% ที่การจ่ายกระแสไฟฟ้า 100% ของค่าพิกัดกระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์.....	151
ตารางที่ ก.16 ตารางข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV).....	152
ตารางที่ ก.17 ตารางข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV).....	152
ตารางที่ ก.18 ตารางข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V).....	160
ตารางที่ ก.19 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกรูปแบบที่ 1.....	166
ตารางที่ ก.20 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกรูปแบบที่ 2.....	168
ตารางที่ ก.21 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกรูปแบบที่ 3.....	171
ตารางที่ ก.22 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกรูปแบบที่ 1.....	173
ตารางที่ ก.23 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกรูปแบบที่ 2.....	176
ตารางที่ ก.24 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกรูปแบบที่ 3.....	178







# บทที่ 1

## บทนำ

เนื้อหาของบทนี้จะนำเสนอที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษาวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

จากสถานการณ์พลังงานในปัจจุบัน จะเห็นว่า แหล่งพลังงานที่นำมาใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า พลังงานความร้อนหรือเป็นแหล่งเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีอยู่ เริ่มมีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่อง และมีแนวโน้มว่าจะสูญหาย หรือหมดไป โดยในการนำแหล่งพลังงานเหล่านี้มาใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า จำเป็นต้องมีการสร้างโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ซึ่งเป็นไปได้ยากในปัจจุบัน ความยากในการสร้างโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ ส่งผลกระทบต่อการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ปัจจุบันภาครัฐบาลจึงมีนโยบายที่จะส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) เพิ่มมากขึ้น เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น โดยในประเทศไทย นโยบายที่จะส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนจะเป็นไปตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (Alternative Energy Development Plan: AEDP 2015) โดยได้มีการกำหนดเป้าหมายของการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ จำนวน 6,000 MW รวมอยู่ด้วย ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 เป้าหมายการใช้พลังงานทดแทนเพื่อผลิตไฟฟ้า: แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (พ.ศ.2558-2579) (Alternative Energy Development Plan: AEDP 2015) [1]

ประเภทเชื้อเพลิง	สถานภาพ สิ้นปี 2557*	เป้าหมายปี 2579
	(MW)	(MW)
1. ชยะชุมชน	65.72	500
2. ชยะอุตสาหกรรม	-	50
3. ชีวมวล	2,451.82	5,570
4. ก๊าซชีวภาพ(น้ำเสีย/ของเสีย)	311.5	600
5. พลังงานน้ำขนาดเล็ก	142.01	376
6. ก๊าซชีวภาพ(พืชพลังงาน)	-	680

7.พลังงานลม	224.47	3,002
8.พลังงานแสงอาทิตย์	1,298.51	6,000
9.พลังงานน้ำขนาดใหญ่	-	2,906.40
<b>รวมเมกะวัตต์ติดตั้ง (เมกะวัตต์)</b>	4,494.03	19,684.40
<b>รวมพลังงานไฟฟ้า (ล้านหน่วย)</b>	17,217	65,588.07
<b>ความต้องการพลังงานไฟฟ้าทั้งประเทศ (ล้านหน่วย)</b>	174,467	326,119
<b>สัดส่วนผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน (%)</b>	9.87	20.11

ในการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้ามาในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะเห็นว่าผู้เชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แต่ละราย อาจมีการใช้เทคโนโลยีในการผลิตที่ต่างกัน ทำให้เมื่อเชื่อมต่อเข้ามา ส่งผลให้ระบบไฟฟ้ากำลังได้รับผลกระทบในด้านต่างๆ และผลกระทบที่เป็นปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งของระบบไฟฟ้าคือ ผลกระทบด้านคุณภาพไฟฟ้า โดยคุณภาพไฟฟ้าที่สำคัญประการหนึ่งคือ ฮาร์มอนิก (Harmonic) โดยสาเหตุของการเกิดฮาร์มอนิกอาจเกิดจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์หลายตำแหน่งในระบบ อาจส่งผลให้ผลรวมของกระแสฮาร์มอนิกในระบบจำหน่ายมีค่าสูงขึ้นและอาจเกิดจากการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นต้น

โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกที่เกิดจากการมีระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เชื่อมต่อเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้า 3 แห่ง ของการไฟฟ้านครหลวง ที่มีระดับแรงดันแตกต่างกัน ได้แก่ ระดับแรงดันสูง (115 kV) ระดับแรงดันปานกลาง (24 kV) และระดับแรงดันต่ำ (230/400 V) ซึ่งในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกนั้น จะทำการวิเคราะห์โดยการประเมินดัชนีทางด้านฮาร์มอนิก อันได้แก่ ค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ และ ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม โดยคำนึงถึงข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง จากการทดสอบผลกระทบด้านฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า และทำการหาปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อเสนอแนะปริมาณกำลังผลิตติดตั้งที่เหมาะสมใหม่ให้แก่การไฟฟ้า ในการปรับปรุงข้อกำหนดในส่วนของปริมาณกำลังผลิตติดตั้งที่สามารถติดตั้งได้ในระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ด้วยโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาการเชื่อมต่อบรรยากาศผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากข้อกำหนดการเชื่อมต่อไฟฟ้า (Grid code) หรือมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง ของไทยและต่างประเทศ
- 2) เพื่อศึกษาการสร้างฮาร์มอนิกที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์ประเภทต่างๆของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์
- 3) เพื่อวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิกที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์หลายแหล่งที่เชื่อมต่ออยู่ในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 4) เพื่อประเมินดัชนีทางฮาร์มอนิกที่เกิดจากระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ในระบบไฟฟ้ากำลัง
- 5) เพื่อเสนอแนะประเด็นอื่นที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิกจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ให้กับทางการไฟฟ้า

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ศึกษาการสร้างฮาร์มอนิก เป็นอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแสงอาทิตย์ประเภทติดตั้งบนหลังคา และโซลาร์ฟาร์มเท่านั้น
- 2) พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังในระดับแรงดันต่ำ 230/400 V แรงดันปานกลาง 24 kV และแรงดันสูง 115 kV ของการไฟฟ้านครหลวง ทั้งที่เป็นโครงสร้างแบบ Radial (แรงดันต่ำ, แรงดันปานกลาง และแรงดันสูง) และแบบ Network (แรงดันต่ำ)
- 3) ดัชนีที่ประเมินได้แก่ ค่าฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ (Individual Harmonic) และค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวม (Total Harmonic Distortion: THD)
- 4) จำกัดค่าฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์แต่ละลำดับตามที่มาตรฐาน IEEE 1547 และ IEC 61727 กำหนดไว้เพื่อไม่ให้ปริมาณฮาร์มอนิกในระบบมีค่าสูงเกินกำหนด

## 1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาบทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ดังนี้
  - 1.1) ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า
  - 1.2) ศึกษาสาเหตุของการเกิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า
  - 1.3) ศึกษาข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์
  - 1.4) ศึกษาหลักการพื้นฐานของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

1.5) ศึกษาข้อกำหนด มาตรฐาน ที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิก

1.6) ศึกษาการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ DigSILENT PowerFactory

2) วิเคราะห์และระบุปัญหาที่จะศึกษา ดังนี้

2.1) วิเคราะห์ผลกระทบด้านฮาร์มอนิกจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า

2.2) วิเคราะห์การใช้งาน การคำนวณปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่จะใช้ทดสอบ

2.3) วิเคราะห์ ศึกษา มาตรฐานที่ใช้ในการประเมินดัชนีทางฮาร์มอนิก

3) กำหนดขอบเขตงานวิจัย

4) ขอข้อมูลระบบจำหน่ายไฟฟ้าและข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากการไฟฟ้านครหลวง

5) เก็บขอข้อมูลระบบจำหน่ายไฟฟ้าและข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากการไฟฟ้านครหลวง

6) ทำการทดสอบผลกระทบด้านฮาร์มอนิกของระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั้ง 3 แห่ง ของการไฟฟ้านครหลวง

7) เก็บข้อมูลผลการทดสอบระบบ

8) ประเมินดัชนีทางฮาร์มอนิกของผลการทดสอบ

9) หาปริมาณกำลังผลิตติดตั้งที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

10) สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1) ได้รับความรู้เกี่ยวกับการไหลของฮาร์มอนิกที่เกิดกับระบบไฟฟ้ากำลัง

2) ได้ทราบถึงความแตกต่างของการไหลของฮาร์มอนิก เมื่อมีระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ต่ออยู่ที่ระบบไฟฟ้ากำลังหลายระบบ ณ ตำแหน่งเดียวกัน

3) สามารถประเมินผลกระทบด้านฮาร์มอนิกที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระดับแรงดันต่างกัน

4) สามารถประเมินดัชนีทางฮาร์มอนิกที่สำคัญในระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยประเมินให้อยู่ภายใต้ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า

5) ได้ทราบถึงปริมาณกำลังผลิตติดตั้งที่เหมาะสมกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ทำการทดสอบ และทำการเสนอแนะปริมาณกำลังผลิตติดตั้งที่เหมาะสมให้กับทางการไฟฟ้านครหลวง โดยยังอยู่ภายใต้ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายของการไฟฟ้านครหลวง

## 1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องและสามารถนำมาเป็นต้นแบบ และแรงจูงใจในการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งในตอนต้นได้ทำการศึกษาบทความที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบด้านฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของบทความ [2] เป็นบทความที่ทำการศึกษาระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำที่มีการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งตามบ้านเรือน มีอินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดผลกระทบด้านฮาร์มอนิก โดยการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ที่ทำการศึกษานำมาจากการวัดข้อมูลจากงานวิจัยที่ได้ศึกษาและค่าจากมาตรฐาน ซึ่งมาตรฐานที่งานวิจัยนี้ได้ใช้เป็นเกณฑ์กำหนดปริมาณแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกจะมาจาก Handbook 264 หรือก็คือมาตรฐาน AN/NZS 61000.3.6 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้อยู่ในประเทศออสเตรเลีย โดยการทดสอบระบบจำหน่ายของบทความนี้จะทดสอบด้วยชนิดของสายส่งที่มีความแตกต่างกันคือ overhead conductor (OH) , aerial bundle conductor (ABC) และ underground cabling (UG) โดยค่าพารามิเตอร์ของสายแต่ละชนิดจะมีอิมพีแดนซ์ของสายที่แตกต่างกัน และอาจส่งผลกระทบต่อฮาร์มอนิกในระบบด้วย การแผ่ขยายของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของบทความนี้จะขึ้นอยู่กับตัวแปรสองชนิดคือ ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม และค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ เช่นเดียวกับวิทยานิพนธ์นี้ ที่ใช้ตัวแปรสองชนิดนี้ในการประเมินดัชนีทางด้านฮาร์มอนิก แต่ทั้งนี้ ผลของการทดลองในบทความนี้เน้นความสำคัญในเรื่องชนิดของสายส่งแทนชนิดของอินเวอร์เตอร์ ผู้วิจัยจึงได้นำความรู้ในส่วนของการจำลองรูปแบบพื้นฐานของระบบที่บทความนี้ใช้ทดลองไปปรับใช้ในวิทยานิพนธ์เท่านั้น

จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการศึกษาคำแนะนำที่[3],[4] และ[5] ในเรื่องของการหาปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ที่พิจารณาถึงปริมาณทางด้านฮาร์มอนิก จากการศึกษาบทความดังกล่าว สิ่งที่เหมาะสมกันทั้ง 3 บทความนั้น คือการกำหนดเกณฑ์ของระดับของฮาร์มอนิกด้วยมาตรฐาน IEEE 519-1992 แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้เกณฑ์จาก ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งอ้างอิงมาจากมาตรฐาน IEEE 1547 เป็นมาตรฐานที่

ทันสมัยและสอดคล้องกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ผู้วิจัยนำมาวิเคราะห์ แต่ทั้งนี้ บทความที่ศึกษาดังกล่าว ไม่ได้กล่าวถึงเพียงมาตรฐานที่ใช้เป็นเกณฑ์กำหนดปริมาณทางฮาร์มอนิกเท่านั้น โดยบทความ [3] ทำการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทหลังคาที่เหมาะสม ที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้ากระจายตัวแบบไม่สมดุล ซึ่งพิจารณาถึงปริมาณด้านฮาร์มอนิกด้วย โดยคำนวณการไหลของฮาร์มอนิก (Harmonic Power Flow) ด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบ Particle Swarm และระบบทดสอบที่ใช้ปรับปรุงมาจากระบบ IEEE 13 บัส 3 เฟสไม่สมดุล มีลักษณะระบบไฟฟ้าแบบเรเดียล (13-Bus-RDS) ในส่วนของผลการหาขนาดและตำแหน่งติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ยังไม่แสดงตำแหน่งและขนาดที่ชัดเจนให้เห็นว่า ผลสุดท้ายแล้วขนาดและตำแหน่งใดที่เหมาะสมกับระบบทดสอบนี้ และในการใช้ระบบทดสอบ IEEE 13 บัส มาทำการทดสอบนั้น ผลที่ได้อาจไม่เสมือนจริง และเกิดความคลาดเคลื่อนของผลได้ กล่าวคือ ผลการทดสอบอาจให้ผลลัพธ์ที่ดีเกินกว่าความเป็นจริงได้ แต่ในบทความ [4] ทำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกที่เป็นตัวกำหนดปริมาณของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ที่เชื่อมต่ออยู่กับระบบไฟฟ้าแรงดัน 12.47 kV โดยที่ระบบมีตัวเก็บประจุติดตั้งอยู่ที่สถานีไฟฟ้าย่อย ซึ่งในการพิจารณาฮาร์มอนิกของมาตรฐานดังกล่าว มีการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงฮาร์มอนิกแต่ละลำดับให้แนวโน้มถูกต้องตามความเป็นจริง และใช้ค่าที่เปลี่ยนแปลงนี้เปรียบเทียบกับค่าตามเกณฑ์มาตรฐานจริงด้วย ในการทดสอบระบบมีการใช้อินเวอร์เตอร์ 2 ชนิด ที่มีการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกที่แตกต่างกัน แต่ไม่ได้ระบุถึงรุ่นของอินเวอร์เตอร์ให้ชัดเจน และซึ่งถ้าปริมาณของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ส่งผลให้ค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกไม่อยู่ในเกณฑ์ข้อกำหนดตามมาตรฐาน บทความนี้เสนอให้ทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกในระบบ ขนานเข้ากับตัวเก็บประจุ เพื่อทำการลดค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกดังกล่าว และหากการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกดังกล่าวไม่สามารถลดทอนแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกที่เกินได้ จะเสนอให้พิจารณาจำกัดปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ลงแทน และในบทความที่ [5] บทความนี้ได้ศึกษาปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยสมมติระบบทดสอบและข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ขึ้น จำลองด้วยโปรแกรม MiPowerTM และไม่พิจารณาระดับฮาร์มอนิกเบื้องหลังในระบบไฟฟ้า ซึ่งผลที่ได้จากบทความนี้อาจจะให้ค่าที่ผิดพลาดจากความเป็นจริงอย่างมาก เนื่องจากทั้งระบบที่ใช้ทำการทดสอบและข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกเป็นการสมมติขึ้นมา แต่ในการแสดงการอธิบายถึงการคำนวณค่าแรงดันฮาร์มอนิกของระบบทดสอบ มีการอธิบายที่เป็นขั้นตอนและง่ายต่อการเข้าใจ เพราะเป็นการคำนวณของระบบทดสอบที่ไม่ซับซ้อน

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น ทำให้ผู้วิจัยได้นำแนวคิด และวิธีการ ที่เกี่ยวข้องกับการหาปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ใช้ผลกระทบต่อฮาร์มอนิก



เป็นเกณฑ์ข้อจำกัดในการหาปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อมิให้ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ทำการพิจารณา เกิดผลกระทบต่อทั้งระบบและผู้ใช้ไฟฟ้าเอง อีกทั้งบทความเหล่านี้ยังเป็นข้อมูลในการเน้นให้เห็นว่า ผลกระทบด้านฮาร์มอนิก ในส่วนของ ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม และค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ มีความสำคัญต่อการกำหนดปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แต่ทั้งนี้ วิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการพิจารณาวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าจริงของการไฟฟ้านครหลวง และใช้ข้อกำหนดการเชื่อมต่อบรรยากาศของทางไฟฟ้านครหลวงเองจึงอาจมีบางส่วนแตกต่างจากการศึกษาดังบทความข้างต้น ซึ่งจะนำเสนอไว้ในบทถัดไปของวิทยานิพนธ์



## บทที่ 2

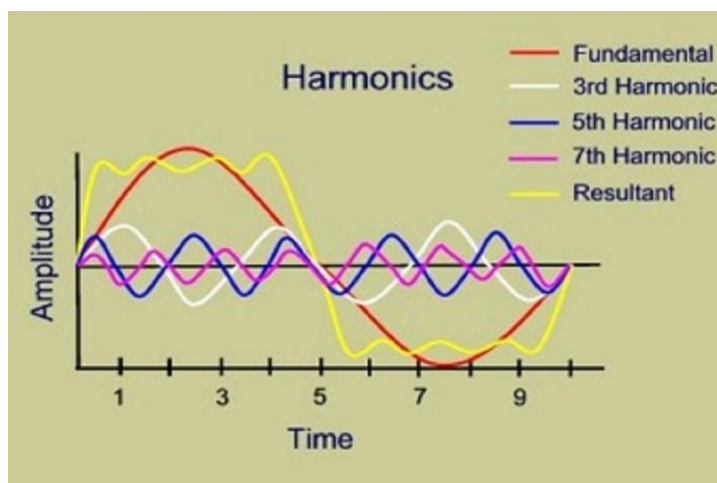
### ทฤษฎีและแนวคิดที่เกี่ยวข้อง

ในการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้ากับระบบไฟฟ้ากำลังอาจส่งผลกระทบต่อด้านคุณภาพไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้ากำลังในกรณีต่างๆ เช่น การกระเพื่อมขอแรงดันและไฟกะพริบ ฮาร์มอนิก การจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบด้านคุณภาพไฟฟ้า เฉพาะในกรณีการเกิดฮาร์มอนิก เท่านั้น โดยได้นำทฤษฎีและแนวคิดที่เหมาะสมมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

#### 2.1 ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า (Power System Harmonic)

ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า เป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality) ที่สำคัญปัญหาหนึ่งที่เกิดจากการผิดเพี้ยนของรูปคลื่น (Waveform Distortions) คือ การเบี่ยงเบนในสภาวะคงตัวของรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ทางกำลังไฟฟ้า ซึ่งความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นนี้ เป็นผลของคุณลักษณะของอุปกรณ์ไฟฟ้า หรือโหลด ประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Load) [6]

ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า ของการไฟฟ้านครหลวง พ.ศ. 2558 [7] ให้ค่านิยาม ฮาร์มอนิก ไว้ว่า ฮาร์มอนิก คือ ส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (sine wave) ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใดๆ ซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่มูลฐาน (fundamental frequency) สำหรับระบบไฟฟ้าในประเทศไทยความถี่หลักมูลมีค่าเท่ากับ 50 Hz ดังนั้น ส่วนประกอบที่มีความถี่เป็น 100 Hz เรียกว่า ฮาร์มอนิกที่ 2 (Second Harmonic) ส่วนประกอบที่มีความถี่เป็น 150 Hz เรียกว่า ฮาร์มอนิกที่ 3 (Third Harmonic) โดยที่สัญญาณใดๆ ทางไฟฟ้าสามารถนำมาวิเคราะห์ เพื่อแยกออกให้อยู่ในรูปของสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ต่างกัน รวมกันได้ด้วยหลักการของอนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier series) สามารถแสดงรูปสัญลักษณ์ผิดเพี้ยนที่มีส่วนประกอบผลรวมคลื่นไซน์ที่มีความถี่มูลฐานกับคลื่นไซน์ที่ฮาร์มอนิก ได้ดังรูปที่ 2.1



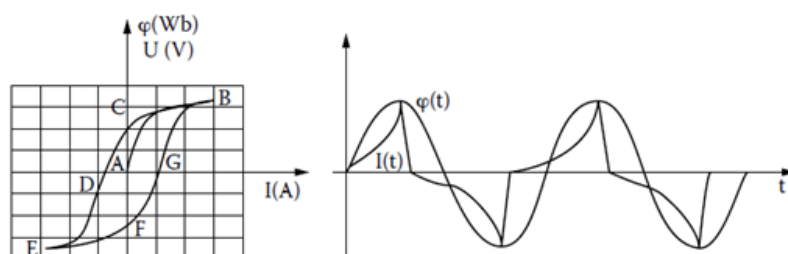
รูปที่ 2.1 การรวมสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่มูลฐานกับคลื่นที่ฮาร์โมนิก อันดับที่ 3, 5 และ 7  
(ที่มา: <https://www.techelectro.in/harmonic-analysis/>)

### 2.1.1 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิก [8]

ฮาร์โมนิก มีแหล่งกำเนิดหลักมาจากโหลดใดๆที่ไม่เป็นเชิงเส้น ที่เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดแรงดันและกระแสฮาร์โมนิก ซึ่งจะยกตัวอย่างโหลดไม่เป็นเชิงเส้นได้ดังนี้

#### 1) หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformers)

หม้อแปลงไฟฟ้าสามารถเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกได้จากการเกิดสถานะอิ่มตัวของแกนหม้อแปลง จากกรณีตัวอย่าง : เมื่อหม้อแปลงทำงานที่สูงกว่าพิกัดกำลังไฟฟ้า และสูงกว่าพิกัดแรงดันไฟฟ้า การทำงานเกินพิกัดดังกล่าวสามารถเกิดได้ในช่วงเวลาความต้องการโหลดสูงสุด และเกิดระหว่างกรณีความต้องการโหลดต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าตัวเก็บประจุไม่สามารถหยุดการเชื่อมต่อได้อย่างปกติ และการจ่ายแรงดันไฟฟ้ามากกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าปกติ การผิดเพี้ยนของกระแสอยู่ภายใต้เงื่อนไขการอิ่มตัวของหม้อแปลง ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการผิดเพี้ยนของกระแสภายใต้เงื่อนไขการอิ่มตัวของหม้อแปลง [8]

จากรูปที่ 2.2 เห็นได้ว่าการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าที่สภาวะอิ่มตัว จะเกิดความไม่เป็นเชิงเส้นของกระแสสร้างอำนาจแม่เหล็ก (Magnetizing current) ซึ่งเกิดฮาร์มอนิกลำดับคี่ โดยความผิดเพี้ยนของกระแสจะยิ่งมากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มโหลด การสร้างฟลักซ์แม่เหล็กและการสร้างกระแสจะขึ้นอยู่กับกระแสสร้างอำนาจแม่เหล็กของวัสดุเหล็กที่ใช้เป็นแกนเหล็กในหม้อแปลงไฟฟ้า โดยหากเราทำการสร้างกราฟระหว่างกระแสสร้างอำนาจแม่เหล็กกับเวลา ของทุกฟลักซ์ที่พิจารณา ผลของคลื่นกระแสจะห่างจากการเป็นคลื่นรูปไซน์ คลื่นรูปไซน์ของกระแสสร้างอำนาจแม่เหล็กจะไม่สมมาตร ถ้าทำการพิจารณาที่ค่าสูงสุดอันเนื่องมาจากผลของฮิสเทอรีซิส ซึ่งการบิดเบือนของรูปคลื่นส่วนใหญ่จะเกิดกับฮาร์มอนิกลำดับสาม (3<sup>rd</sup>, 9<sup>th</sup>, 15<sup>th</sup> เป็นต้น)

## 2) เครื่องจักรหมุน (Rotating Machines)

เครื่องจักรหมุนสามารถเกิดกระแสฮาร์มอนิกได้เนื่องจาก สลิตโรเตอร์ หรือ การเกิดความผิดปกติเล็กน้อยในการพันขดลวดของขดลวดสามเฟสของเครื่องจักรหมุน หรือ ความไม่สมมาตรเล็กน้อยของเครื่องจักร โดยฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive force : emf) บนขดลวดสเตเตอร์ที่ความถี่เท่ากับ อัตราส่วนของ ความเร็วต่อความยาวคลื่น และผลของการกระจายของแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magneto motive force : mmf) ในเครื่องจักรก็เป็นตัวทำให้เกิดฮาร์มอนิกเช่นกัน ซึ่งต้นเหตุทั้งสองนี้เป็นส่วนของฟังก์ชันความเร็วของเครื่องจักร นอกจากนี้กระแสฮาร์มอนิกสามารถเกิดจากการอิ่มตัวของแกนเหล็กในเครื่องจักรได้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเหล่านี้ยังมีขนาดเล็กกว่ากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากเครื่องจักรที่มีชุดขับแบบปรับความถี่ได้ (Variable Frequency Drives : VFDs)

## 3) คอนเวอร์เตอร์ (Converter)

การใช้งานพาราเมเตอร์ เช่น แรงดันไฟฟ้า และ ความถี่ ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีการแปรเปลี่ยนไปตามอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์ โดยการเปลี่ยนตามนี้ส่งผลให้คอนเวอร์เตอร์มีการใช้งานเพิ่มขึ้นและเป็นตัวสร้างฮาร์มอนิกขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้า คอนเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสามารถหนึ่งในการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ความถี่ 50/60 Hz เป็น ไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันไฟฟ้า จะแตกต่างกันไปตามการปรับมุม firing angle ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สวิตซ์ซึ่ง

โดยทั่วไปแล้ว กระบวนการแปลงกระแส จะอนุญาตให้กระแสไหลผ่านอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์เพียงช่วงรอบของความถี่มูลฐาน ซึ่งสำหรับคอนเวอร์เตอร์กำลัง มักจะถือว่าเป็นอุปกรณ์เก็บพลังงาน ถ้าพลังงานที่เก็บนี้ถูกใช้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ(แต่ที่ต่างความถี่) ไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกแปลง

ออกมาจากคอนเวอร์เตอร์จะไหลผ่านสวิตช์ซึ่งอินเวอร์เตอร์ และนำไฟฟ้ากระแสตรงกลับมาเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

สามารถแบ่งประเภทของคอนเวอร์เตอร์ได้ดังนี้

- Large Power Converters
- Medium-Size Power Converters
- Low-Power Converters
- Variable Frequency Drives

#### 4) หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent Lamps)

ระบบไฟฟ้ากำลังจะถูกออกแบบ เพื่อความสมบูรณ์และควมมีเสถียรภาพของคลื่นไซน์ของแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากการเติบโตของความต้องการการใช้ไฟฟ้า ระดับความผิดพลาดของคลื่นแรงดันและกระแสในระบบไฟฟ้ากำลังจึงมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ความผิดพลาดของฮาร์มอนิกส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์

หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ที่เป็นโพลดไม่เป็นเชิงเส้น จะทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกลำดับคี่ ในหลอดไฟจะมีตัวนำแกนเหล็ก หรือโซลิด ที่บรรจุในบัลลาสต์ที่มีฟังก์ชันในการจำกัดกระแส ในทำนองเดียวกันจะมีการใช้ตัวเก็บประจุในการเพิ่มประสิทธิภาพของบัลลาสต์ในการเพิ่มตัวประกอบกำลังไฟฟ้า โดยบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จะทำงานที่ความถี่สูง ซึ่งอนุญาตให้ใช้รีแอคเตอร์และตัวเก็บประจุขนาดเล็ก การใช้ความถี่สูงช่วยเพิ่มปริมาณแสงไฟโดยใช้กำลังไฟฟ้าเข้าเท่าเดิม

#### 5) อุปกรณ์ที่มีการทำงานประเภอาร์ค (Arcing Devices)

คุณลักษณะแรงดันและกระแสของอาร์คไฟฟ้าจะมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นสูง ในการเผาไหม้ของอาร์ค แรงดันจะลดลงเนื่องจากกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ซึ่งถูกจำกัดด้วยอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้ากำลัง แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกหลักของอุปกรณ์ทำงานประเภอาร์คนั้นคือ เตอาอาร์คไฟฟ้า

โดยการเกิดฮาร์มอนิกจากเตอาอาร์คไฟฟ้านั้น ไม่สามารถคาดการณ์ถึงปริมาณได้อย่างแน่นอน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณวัสดุที่ป้อนให้กับเตอาอาร์คไฟฟ้า และเนื่องจากปรากฏการณ์ทางกายภาพของการหลอมละลายกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรดและวัสดุหลอมละลาย ทำให้หลอดของเตอาหลอมให้ความผิดพลาดที่แย่ที่สุด โดยคลื่นกระแสของอาร์คจะแตกต่างกันไปในแต่ละรอบต่อรอบ

## 2.1.2 ปัญหาของฮาร์มอนิกต่อระบบไฟฟ้า [9]

### 2.1.2.1 ปัญหากระแสฮาร์มอนิกต่อระบบไฟฟ้า

- 1) ทำให้กำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงเพิ่มขึ้นทั้งจากลวดตัวนำและแกนแม่เหล็ก
- 2) กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลอยู่ในระบบทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในสายตัวนำมากขึ้น เนื่องจากกระแส ฮาร์มอนิกทำให้ค่ากระแสและความต้านทานของสายสูงขึ้น
- 3) ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในคาปาซิเตอร์ (Capacitor Bank) และทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้น
- 4) กระแสฮาร์มอนิกลำดับสาม (Triplen Harmonic) (ลำดับที่ 3, 6, 9,... ) จะรวมกันไหลอยู่ในสายนิวทรัล ทำให้เกิดความร้อนสูง
- 5) ทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายเนื่องจากได้รับกระแสและแรงดันเกินปกติ
- 6) ผลของกระแสฮาร์มอนิกต่อเครื่องจักรไฟฟ้าโดยเฉพาะอย่างยิ่งมอเตอร์และอุปกรณ์ที่มีการทำงานโดยใช้ผลของสนามแม่เหล็กทำให้กำลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้เครื่องจักรร้อนและมีอายุการใช้งานสั้นกว่าปกติ
- 7) ทำให้รีเลย์และอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าทำงานผิดพลาด
- 8) ทำให้มิเตอร์วัดค่าไฟฟ้า (Watt-Hour Meter) ทำการวัดค่าผิดพลาดได้
- 9) ทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) ในระบบสื่อสารและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำงานผิดพลาด

### 2.1.2.2 ปัญหาแรงดันฮาร์มอนิกต่อระบบไฟฟ้า

- 1) ทำให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกจากจุดต่อร่วมมีส่วนประกอบฮาร์มอนิกออกไป แม้ว่าโหลดที่นำมาต่อมีคุณสมบัติเชิงเส้น
- 2) ถ้ามีแรงดันฮาร์มอนิกในลำดับที่ 5 และ 11 ซึ่งเป็นเนกาทีฟซีแควนซ์ จะทำให้มอเตอร์ที่ได้รับแรงดันนี้เข้าไปจะเกิดแรงหมุนในทิศทางกลับหรือต้านกับทิศทางการหมุนปกติ ทำให้มอเตอร์ร้อนเนื่องจากต้องใช้กำลังงานเพื่อต้านแรงนี้
- 3) อุปกรณ์ที่ทำงานโดยผลของสนามแม่เหล็ก เช่น บัลลาสต์แกนเหล็ก แม่เหล็กไฟฟ้า หม้อแปลงจะร้อนผิดปกติเนื่องจากผลของแรงดันฮาร์มอนิกในลำดับที่ 5 และ 11 จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กต้านภายในแกนเหล็กทำให้ต้องการกระแสไฟฟ้าขาเข้าและใช้กำลังงานไฟฟ้ามากกว่าปกติ

4) เป็นสาเหตุของการเกิดเรโซแนนซ์ทางกลของมอเตอร์ทำให้มอเตอร์ทำงานสั้นอย่างผิดปกติ

5) เป็นสาเหตุให้อุปกรณ์ที่ต้องทำงานเข้าจังหวะ (Synchronization) กับความถี่สายกำลัง เช่นเครื่องสำรองไฟฟ้า (UPS) สวิตช์ถ่ายโอนอัตโนมัติ (ATS) วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง-ไทรสเตอร์ ชนิดควบคุมเฟส ระบบการสื่อสารข้อมูล ทำงานผิดพลาดได้

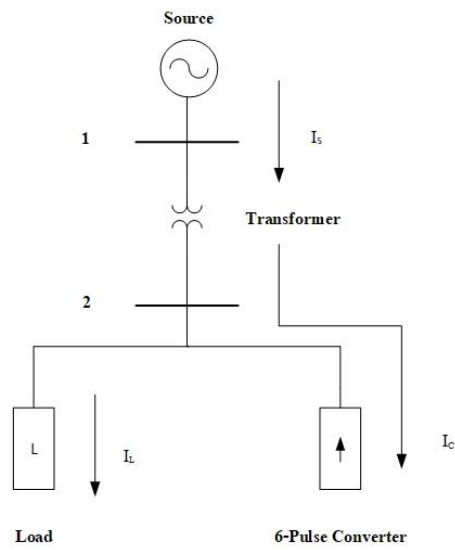
6) เป็นสาเหตุให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์คอมพิวเตอร์ทำงานผิดพลาดหรือเสียหายได้

สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ฮาร์มอนิกจะเกิดขึ้นจากอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ คือ อินเวอร์เตอร์ เนื่องจากปริมาณฮาร์มอนิกเป็นส่วนประกอบที่ความถี่ต่างๆของความถี่มูลฐาน การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาองค์ประกอบของฮาร์มอนิกที่ความถี่ต่างๆ โดยใช้หลักการของอนุกรมฟูเรียร์ (Fourier Series) ประกอบกับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ (Harmonic Load Flow) เนื่องจากคุณลักษณะของระบบไฟฟ้าจะมีค่าเปลี่ยนไปตามความถี่ไฟฟ้าด้วย

## 2.2 การไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง (Harmonic Load Flow)

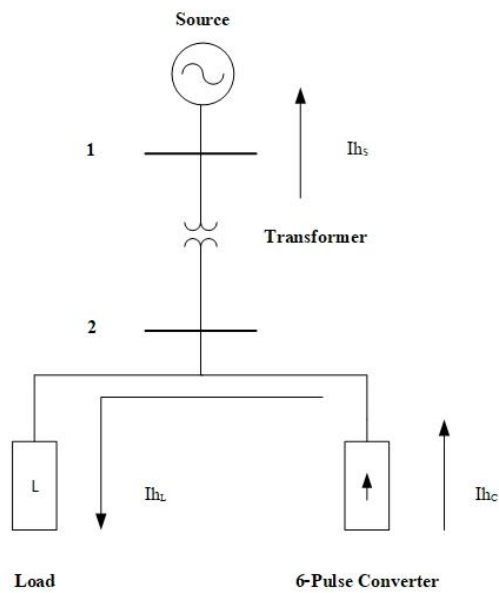
ในปัจจุบันแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเชื่อมต่ออยู่ในระบบไฟฟ้ากำลังเป็นจำนวนมาก จึงทำให้เกิดผลกระทบขึ้นกับระบบไฟฟ้ากำลังทั้งในส่วนของผู้ใช้ไฟฟ้า และผู้ดูแลระบบไฟฟ้า ดังนั้นการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิกจึงเป็นการวิเคราะห์ว่า กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกเกิดขึ้นจากตำแหน่งไหน และสร้างผลกระทบไปยังตำแหน่งใดบ้างจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นมาก[10]

ที่ความถี่มูลฐานแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกนั้นเปรียบเสมือนโหลดต่ออยู่กับระบบไฟฟ้า ซึ่งรับพลังงานจากระบบไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.3



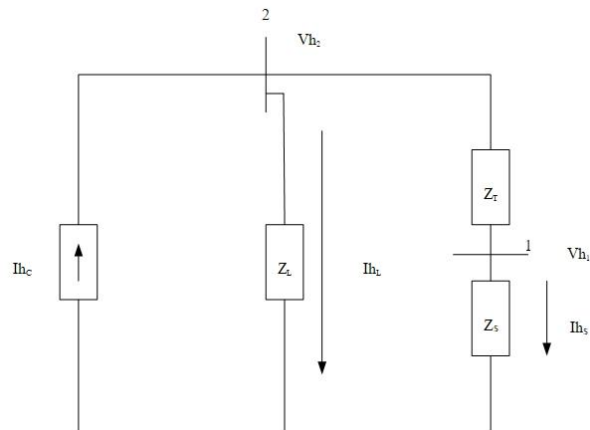
รูปที่ 2.3 แสดงการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน[10]

สำหรับที่ความถี่ฮาร์มอนิก แหลงกำเนิดฮาร์มอนิกนั้นเปรียบเสมือนแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบไฟฟ้าดังรูปที่ 2.4 และสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 แสดงการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์มอนิก[10]





รูปที่ 2.5 แสดงวงจรสมมูลของระบบที่ความถี่ฮาร์โมนิก[10]

สำหรับแรงดันไฟฟ้าฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นที่บัสต่างๆ นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$[V(h)] = [Z(h)][I(h)] \quad (1)$$

เมื่อ  $[V(h)]$  คือ เมตริกซ์ของแรงดันฮาร์โมนิกที่บัส

$[Z(h)]$  คือ เมตริกซ์ของอิมพีแดนซ์บัส

$[I(h)]$  คือ เมตริกซ์ของกระแสฮาร์โมนิกที่บัส

ในกรณีที่มีแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกแบบเฟสเดียวสามารถหาแรงดันไฟฟ้าฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในระบบได้โดยใช้องค์ประกอบสมมาตรเพื่อแยกคิดในแต่ละลำดับฮาร์โมนิกขององค์ประกอบสมมาตร ดังนี้

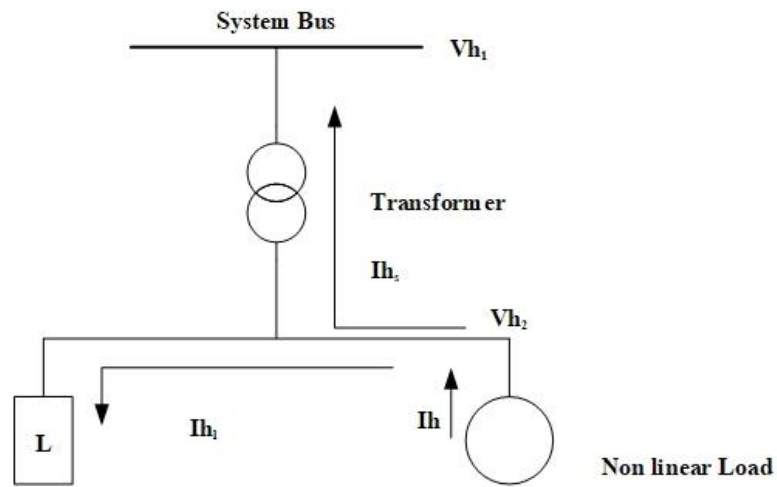
$$[V(h)]_1 = [Z(h)]_1 [I(h)]_1$$

$$[V(h)]_2 = [Z(h)]_2 [I(h)]_2$$

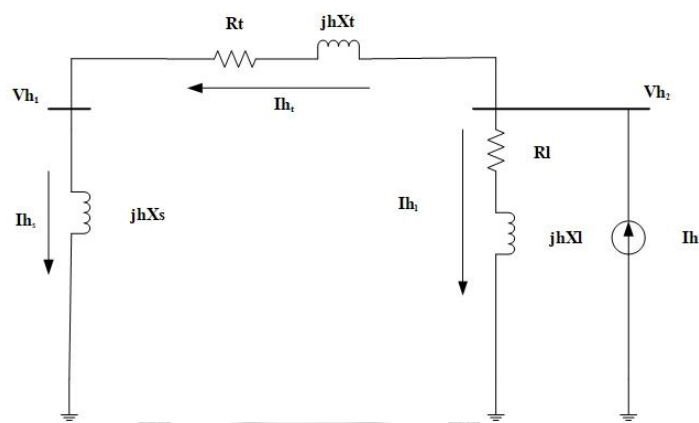
$$[V(h)]_0 = [Z(h)]_0 [I(h)]_0 \quad (2)$$

จากนั้นนำแรงดันไฟฟ้าฮาร์โมนิกในแต่ละองค์ประกอบสมมาตรคิดกลับเป็นองค์ประกอบของเฟสต่อไป

การวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์โมนิกในลักษณะนี้ จะสามารถใช้ได้กับระบบไฟฟ้าที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ ( $Z(h)$ ) จากการยุบวงจรในกรณีที่มีระบบมีขนาดใหญ่ หรือมีแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์โมนิก หลายจุดจะทำให้ลำบาก และเกิดความยุ่งยากต่อการวิเคราะห์อย่างมาก ดังนั้นจึงควรใช้การวิเคราะห์โดยใช้เมตริกซ์ความนำแทน (Admittance Matrix :  $Y_{BUS}$ ) [11]



รูปที่ 2.6 ระบบตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์หาการไหลของกระแสฮาร์มอนิก



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลจากรูปที่ 2.6 เพื่อสร้าง Y<sub>BUS</sub>

จะได้ Y<sub>BUS</sub> ดังสมการที่ (3)

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} \frac{1}{jhX_s} + \frac{1}{R_t + jhX_t} & -\frac{1}{R_t + jhX_t} \\ -\frac{1}{R_t + jhX_t} & \frac{1}{R_t + jhX_t} + \frac{1}{R_l + jhX_l} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ I_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{jhX_s} + \frac{1}{R_t + jhX_t} & -\frac{1}{R_t + jhX_t} \\ -\frac{1}{R_t + jhX_t} & \frac{1}{R_t + jhX_t} + \frac{1}{R_l + jhX_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{h1} \\ V_{h2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ตามสมการที่ (4) สามารถหาผลเฉลี่ยของแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่  $h$  ที่บัสที่ 1 ( $V_{h1}$ ) และแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่  $h$  ที่บัสที่ 2 ( $V_{h2}$ ) ได้ จากนั้นจึงสามารถหาค่า  $I_{h1}$ ,  $I_{ht}$  และ  $I_{hs}$  ได้ดังนี้

$$I_{h1} = \frac{V_{h2}}{Rl + jhXl} \quad (5)$$

$$I_{ht} = \frac{V_{h2} - V_{h1}}{Rt + jhXt} \quad (6)$$

$$I_{hs} = \frac{V_{h1}}{jhXs} \quad (7)$$

- เมื่อ
- $Rl$  = ค่าความต้านทานของโหลด
  - $Xl$  = ค่ารีแอกแตนซ์ (Reactance) ของโหลดที่ความถี่หลักมูล
  - $Rt$  = ค่าความต้านทานของหม้อแปลง
  - $Xt$  = ค่ารีแอกแตนซ์ของหม้อแปลงที่ความถี่หลักมูล
  - $Xs$  = ค่ารีแอกแตนซ์ของระบบที่ความถี่หลักมูล
  - $I_h$  = ค่ากระแสฮาร์โมนิกลำดับที่  $h$  จากโหลดไม่เป็นเชิงเส้น
  - $I_{h1}$  = ค่ากระแสฮาร์โมนิกลำดับที่  $h$  ที่ไหลเข้าโหลด
  - $I_{hs}$  = ค่ากระแสฮาร์โมนิกลำดับที่  $h$  ที่ไหลเข้าระบบ
  - $I_{ht}$  = ค่ากระแสฮาร์โมนิกลำดับที่  $h$  ที่ไหลผ่านหม้อแปลง
  - $V_{h1}$  = ค่าแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่  $h$  ที่บัสที่ 1
  - $V_{h2}$  = ค่าแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่  $h$  ที่บัสที่ 2

ซึ่งสมการที่ (5) ถึง (7) หากแทนค่าแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่  $h$  ของบัสที่ 1 และบัสที่ 2 ตามสมการที่ (4) จะพบว่ารูปแบบสมการผลลัพธ์ที่ได้จะเหมือนกับวิธีการคำนวณแบบอาศัยการยุบวงจรเช่นกรณีผลลัพธ์ของสมการที่ (5) ซึ่งจะตรงกับสมการที่ (8) นั่นเอง

$$I_{h1} = \frac{Rt + jh(Xt + Xs)}{(Rl + Rt) + jh(Xl + Xt + Xs)} I_h \quad (8)$$

จากผลที่ได้จากการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกจะทำให้สามารถหาค่าต่างๆ เพื่อใช้ในการประเมินดัชนีทางฮาร์มอนิก ได้ดังนี้

### 2.2.1 ค่ากระแสฮาร์มอนิกรวม และค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม

$$I_H = \sqrt{\sum_{h=2}^{49} I_h^2} \quad (9)$$

$$THD_i = \frac{I_H}{I_1} \times 100\% \quad (10)$$

- เมื่อ  $I_H$  = ค่ากระแสฮาร์มอนิกรวม  
 $I_1$  = ค่ากระแสที่ความถี่หลักมูล  
 $I_h$  = ค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h  
 $THD_i$  = ค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม  
 $h$  = ลำดับของฮาร์มอนิก

### 2.2.2 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกรวม และค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม

$$V_H = \sqrt{\sum_{h=2}^{49} V_h^2} \quad (11)$$

$$THD_v = \frac{V_H}{V_1} \times 100\% \quad (12)$$

- เมื่อ  $V_H$  = ค่าแรงดันฮาร์มอนิกรวมที่บัสต่างๆ

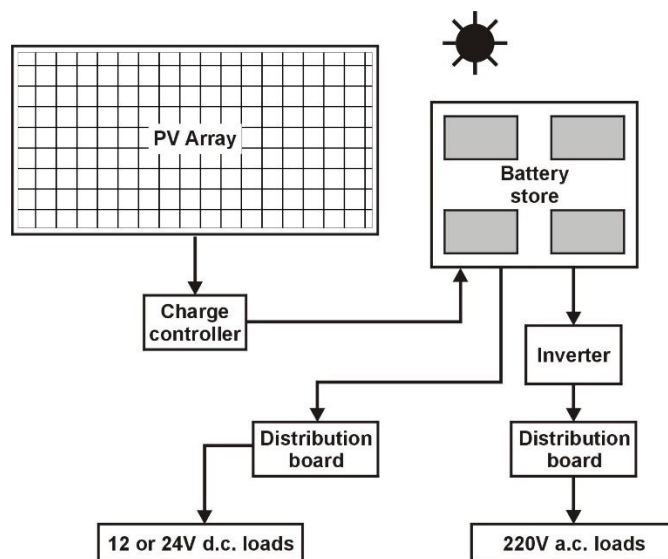
- $V_1$  = ค่าแรงดันที่ความถี่หลักมูลที่บัสต่างๆ  
 $V_h$  = ค่าแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่  $h$  ที่บัสต่างๆ  
 $THD_V$  = ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมที่บัสต่างๆ  
 $h$  = ลำดับของฮาร์มอนิก

## 2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เมื่อจะทำการเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้ากำลัง จะต้องมีการต่ออุปกรณ์ เพื่อทำการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เนื่องจากในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จะมีเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าในรูปของ กำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) ซึ่งในการเชื่อมต่อของแต่ละอุปกรณ์นั้นเรียกรวมกัน คือ ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถแบ่งประเภทของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ออกเป็น 3 ประเภท คือ

### 2.3.1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทแยกตัวอิสระ (Photovoltaic Standalone system)

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทนี้เป็นระบบที่ไม่ได้ทำการเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้า หรืออีกนัยหนึ่งคือ ไม่ต้องการรับไฟจากการไฟฟ้านั้นเอง เป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ที่ห่างไกลมากๆ หรือในบริเวณพื้นที่ที่การสร้างระบบสายส่งไฟฟ้าทำได้ยาก โดยระบบจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ คือ เซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ อุปกรณ์เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ หรือ อินเวอร์เตอร์ และบางกรณีอาจมีการเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรองได้ด้วย และในระบบประเภทนี้ แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์สำคัญอย่างมาก เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าส่วนที่เกินที่ผลิตได้ในช่วงเวลากลางวันเพื่อนำมาใช้ในเวลากลางคืนที่ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ โดยมีรูปแบบการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทแยกตัวอิสระดังรูปที่ 2.8

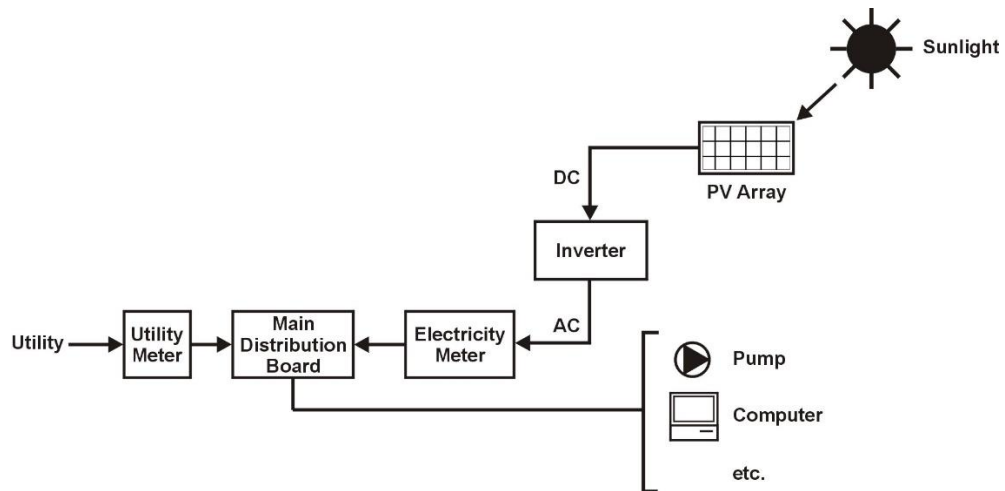


รูปที่ 2.8 การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทแยกตัวอิสระ  
(ที่มา : [http://re.emsd.gov.hk/english/solar/solar\\_ph/solar\\_ph\\_to.html](http://re.emsd.gov.hk/english/solar/solar_ph/solar_ph_to.html))

จากรูปที่ 2.8 จะแสดงถึงการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทแยกตัวอิสระ โดยหลักการทำงานของแบตเตอรี่และอินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีความสามารถในการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อเก็บพลังงานที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มาไว้ในแบตเตอรี่ หรือแปลงไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อเก็บพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไว้ในแบตเตอรี่ แล้วจึงใช้อินเวอร์เตอร์แปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่ไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ แล้วจึงส่งพลังงานไปยังโหลดที่ต้องการ

### 2.3.2 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้า (Photovoltaic Grid-connected system)

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทนี้ถูกออกแบบไว้สำหรับเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้า หรือภายในพื้นที่ที่สาธารณูปโภคไฟฟ้าสามารถเข้าถึงได้ โดยอุปกรณ์สำคัญของระบบจะประกอบด้วย เซลล์แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และอุปกรณ์ป้องกันต่างๆตามแต่ข้อกำหนดการเชื่อมต่อ โดยระบบผลิตไฟฟ้าประเภทนี้จะผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้งานในช่วงเวลากลางวัน และหากมีพลังงานไฟฟ้าเหลือเกินจากความต้องการใช้ไฟฟ้า ก็จะจ่ายพลังงานนั้นกลับเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้า และในบางกรณีการเชื่อมต่อประเภทนี้อาจจะมีการติดตั้งแบตเตอรี่ไว้ด้วยเพื่อสำรองพลังงานหากเกิดเหตุการณ์ที่ระบบของการไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายไฟได้ โดยรูปแบบการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9

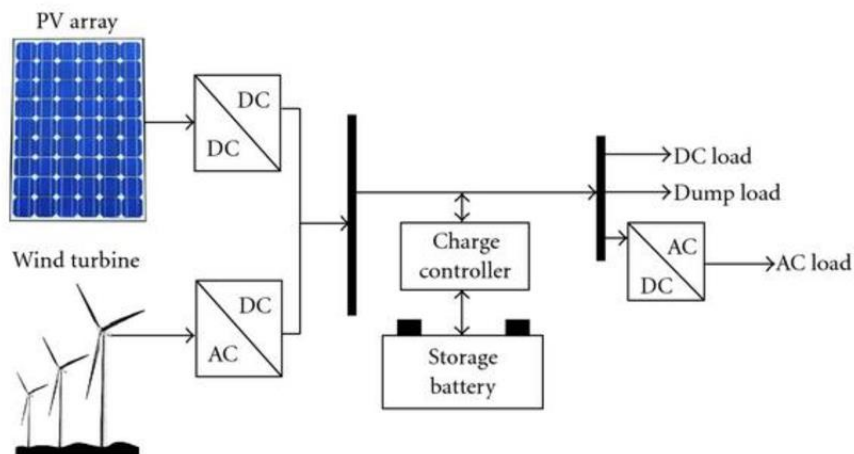


รูปที่ 2.9 การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบ

(ที่มา : [http://re.emsd.gov.hk/english/solar/solar\\_ph/solar\\_ph\\_to.html](http://re.emsd.gov.hk/english/solar/solar_ph/solar_ph_to.html))

### 2.3.3 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทผสมผสาน (Photovoltaic hybrid system)

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทนี้ ออกแบบมาเพื่อทำงานร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าประเภทอื่นๆ เช่น ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม เครื่องยนต์ดีเซล และกังหันน้ำ เป็นต้น ซึ่งมีรูปแบบแตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์แต่ละกรณีดังตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.10

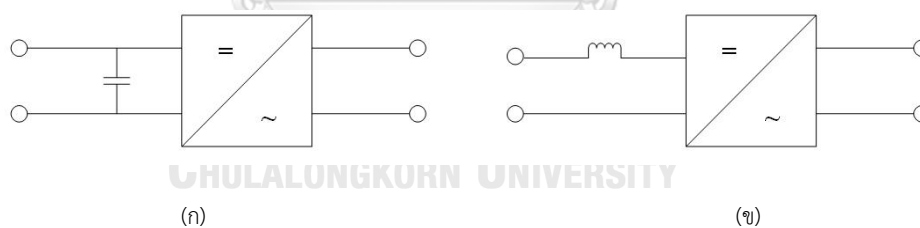


รูปที่ 2.10 การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทผสมผสาน

(ที่มา : [https://www.researchgate.net/figure/Typical-components-of-a-hybrid-PV-wind-System\\_fig8\\_258389216](https://www.researchgate.net/figure/Typical-components-of-a-hybrid-PV-wind-System_fig8_258389216))

## 2.4 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายของการไฟฟ้านครหลวง ให้คำนิยามของอินเวอร์เตอร์ไว้ว่า “เป็นอุปกรณ์ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรง (DC) จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์หรือแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงอื่นๆไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ซึ่งมีความเหมาะสมและสามารถนำไปใช้งานต่อโดยการไฟฟ้าได้” ซึ่งปัจจุบันมีความหลากหลายในประเภทและคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์ โดยแตกต่างกันไปตามผู้ผลิต หากพิจารณาการทำงานของอินเวอร์เตอร์เป็นหลัก ซึ่งปัจจุบันสามารถแบ่งอินเวอร์เตอร์ออกเป็น 2 แบบ คือ อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage-source inverter) และอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (Current-source inverter) สำหรับอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันจะมีตัวเก็บประจุเชื่อมต่อแบบขนานระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันและวงจรแปรผันดังรูปที่ 2.11 (ก) ซึ่งตัวเก็บประจุดังกล่าวประพุดิตัวเสมือนเป็น ฟิวเตอร์ (Filter) ทำหน้าที่กรองแรงดันให้เรียบขึ้น จึงทำให้แรงดันก่อนเข้าวงจรแปรผันมีการกระเพื่อมของสัญญาณที่น้อยลง ส่วนอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส จะมีตัวเหนี่ยวนำเชื่อมต่อแบบอนุกรมระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสและวงจรแปรผัน ดังรูปที่ 2.11 (ข) โดยจะประพุดิตัวเสมือนเป็นฟิวเตอร์เช่นเดียวกัน และมีหน้าที่คล้ายตัวเก็บประจุในอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน แต่แตกต่างกันที่ตัวเหนี่ยวนำจะช่วยกรองกระแสก่อนเข้าวงจรแปรผันให้เรียบขึ้น[12] ในส่วนนี้จะกล่าวถึง ประเภทของอินเวอร์เตอร์ หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ และ ตัวอย่างคุณสมบัติของอินเวอร์เตอร์ของผู้ผลิตที่มีจำหน่ายและมีการใช้งานอยู่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ดังนี้



รูปที่ 2.11 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันและแบบแหล่งจ่ายกระแส

### 2.4.1 ประเภทของอินเวอร์เตอร์

#### 2.4.1.1 แบ่งตามรูปแบบของรูปคลื่น

แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่แปลงได้จากอินเวอร์เตอร์ จะมีรูปแบบของลักษณะคลื่นที่ผลิตได้อยู่สองแบบใหญ่ๆด้วยกัน คือ

- 1.) รูปคลื่นสแควร์เวฟ (Square Wave) มีลักษณะเป็นทรงเหลี่ยม อีกรูปแบบที่ใกล้เคียงกับรูปคลื่นสแควร์เวฟก็คือโมดิฟายซายน์เวฟ (Modified-Sinewave) ซึ่งจุดที่เปลี่ยนระหว่างคลื่นบวกกับ



ลบจะมีความชันน้อยกว่า ส่วนใหญ่แล้วจะเจอกับอินเวอร์เตอร์ที่มีราคาถูก หาซื้อได้โดยทั่วไป อินเวอร์เตอร์ที่มีแรงดันขาออกเป็นแบบสองลูกคลื่นนี้จะนำไปใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ไม่ค่อยมีผลกับรูปแบบของลูกคลื่นมากนัก เช่นหลอดไฟ เป็นต้น แต่ถ้านำไปใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีส่วนประกอบของเส้นลวดพัน เช่นมอเตอร์พัดลม จะทำให้เกิดเสียงฮัมและความร้อนจากตัวมอเตอร์ ส่งผลให้มอเตอร์เสียหายได้ เนื่องจากรูปแบบลูกคลื่นไม่สอดคล้องกับหลักการทำงานของตัวมอเตอร์นั่นเอง

2.) รูปลคลื่นไซน์เวฟ (Sine Wave) หรือที่เรียกตามทั่วไปคือ เพียวไซน์เวฟ(Pure-Sine Wave) อินเวอร์เตอร์ที่ผลิตรูปลคลื่นแบบนี้ออกมาจะมีราคาที่สูงกว่า เพราะรูปลคลื่นซาย์จะรองรับการนำไปใช้งานกับเครื่องใช้ไฟฟ้าได้ทุกชนิดโดยไม่ทำให้เกิดปัญหา และมีรูปร่างของคลื่นที่ผลิตได้เหมือนกับรูปลคลื่นไฟฟ้าตามบ้านทุกประการ การนำเอาที่พุดของอินเวอร์เตอร์ซาย์เวฟนี้ไปจ่ายให้กับพัดลม พัดลมจะทำงานปกติไม่เกิดเสียงฮัมแต่อย่างใด

#### 2.4.1.2 แบ่งตามลักษณะระบบไฟฟ้าที่ทำการเชื่อมต่อ

1.) อินเวอร์เตอร์ที่ใช้กับระบบสแตนโอลน (Stand-Alone System) หรือระบบอิสระที่ไม่มีปฏิสัมพันธ์กับการไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์แบบนี้จะมีหลักการทำงานเบื้องต้นที่กล่าวไปคือ รับพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้จากแผงโซลาร์เซลล์ หรือไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่ (เวลากลางคืนจากพลังงานที่ซาร์จไว้โดยแผงโซลาร์เซลล์ในเวลากลางวัน) แล้วแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ จ่ายให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับต่อไป

2.) อินเวอร์เตอร์ที่ใช้กับระบบออนกริด (On-grid System) หรือระบบที่ทำงานสัมพันธ์กับการไฟฟ้า มีชื่อเรียกอินเวอร์เตอร์ชนิดนี้โดยทั่วไปว่า กริดไทน์อินเวอร์เตอร์ (Grid-Tied Inverter) ลักษณะการทำงานของอินเวอร์เตอร์ระบบนี้จะเหมือนกับอินเวอร์เตอร์โดยปกติทั่วไปแต่จะต้องมีแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจากการไฟฟ้าป้อนให้กับอินเวอร์เตอร์อีกทางหนึ่งด้วย ตัวอินเวอร์เตอร์แบบนี้ถึงจะทำงาน ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงโซลาร์เซลล์จะถูกใช้ไปกับเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆภายในบ้าน (สำหรับระบบออนกริดแบบลดภาระค่าไฟฟ้า) หรืออาจจะแปลงไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงโซลาร์เซลล์ป้อนตรงให้กับสายส่งเพื่อขายไฟให้การไฟฟ้าตามโครงการVSPPIได้ ซึ่งปัจจุบันจะตัดการทำงานตัวมันเองทันทีที่ไฟจากการไฟฟ้าดับเพื่อป้องกันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงโซลาร์เซลล์ผ่านไปยังสายไฟของการไฟฟ้าซึ่งจะเป็นอันตรายต่อช่างไฟฟ้าที่จะมาซ่อมได้

#### 2.4.2 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ [12]

หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ อินเวอร์เตอร์รูปลคลื่นสี่เหลี่ยม และอินเวอร์เตอร์แบบมอดูเลตความกว้างพัลส์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

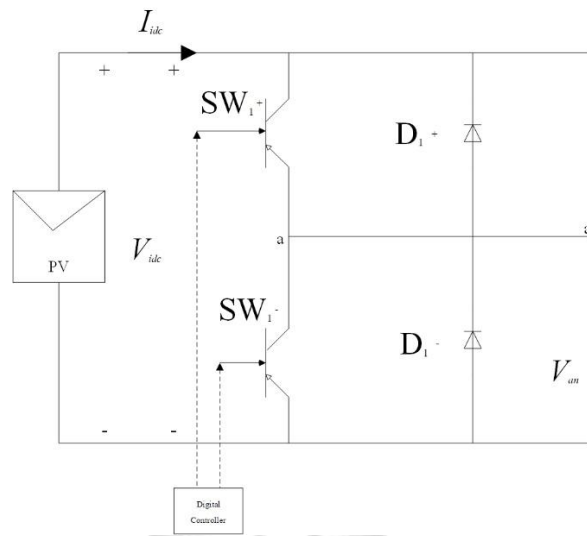
2.4.2.1 อินเวอร์เตอร์รูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square-wave inverter) หรืออินเวอร์เตอร์รูปขั้นบันได (Step-wave inverter) เป็นอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักในการแปลงผันไฟฟ้า และยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดย่อยอีก คือ อินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่น 6 ขั้น (Six-step inverter) และอินเวอร์เตอร์แบบรูปคลื่น 12 ขั้น (Twelve-step inverter) อย่างไรก็ตามเนื่องจากในปัจจุบันไม่นิยมใช้งานอินเวอร์เตอร์ประเภทเหล่านี้เพราะเป็นเทคโนโลยีที่ค่อนข้างเก่าและสัญญาณขาออกที่ได้มีคุณภาพต่ำกว่าอินเวอร์เตอร์ประเภทที่จะได้กล่าวถัดไป จึงจะไม่กล่าวเพิ่มเติมในรายละเอียด

2.4.2.2 อินเวอร์เตอร์แบบมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation inverter: PWM inverter) อาศัยหลักการของ PWM โดยจะนำสัญญาณรูปคลื่นไซน์มามอดูเลต (Modulate) กับสัญญาณคลื่นสามเหลี่ยม โดยสัญญาณไซน์จะเป็นสัญญาณของความถี่มูลฐาน ส่วนสัญญาณสามเหลี่ยมจะเป็นคลื่นพาหะซึ่งจะมีหน้าที่ปรับระดับแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปให้มีลักษณะคงที่ (อัตราส่วนของแรงดันและความถี่คงที่) เมื่อนำสัญญาณคลื่นรูปไซน์ความถี่เท่ากับความถี่ที่ต้องการมามอดูเลตกับคลื่นพาหะรูปสามเหลี่ยมที่มีความสูงกว่าสัญญาณรูปคลื่นไซน์หลายเท่า สัญญาณ PWM จะเกิดจากการเปรียบเทียบจุดตัดกันของสัญญาณทั้งสอง ซึ่งจุดตัดนี้จะเป็นตัวกำหนดการเปิดปิดของชุดสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในอินเวอร์เตอร์ (Switching)

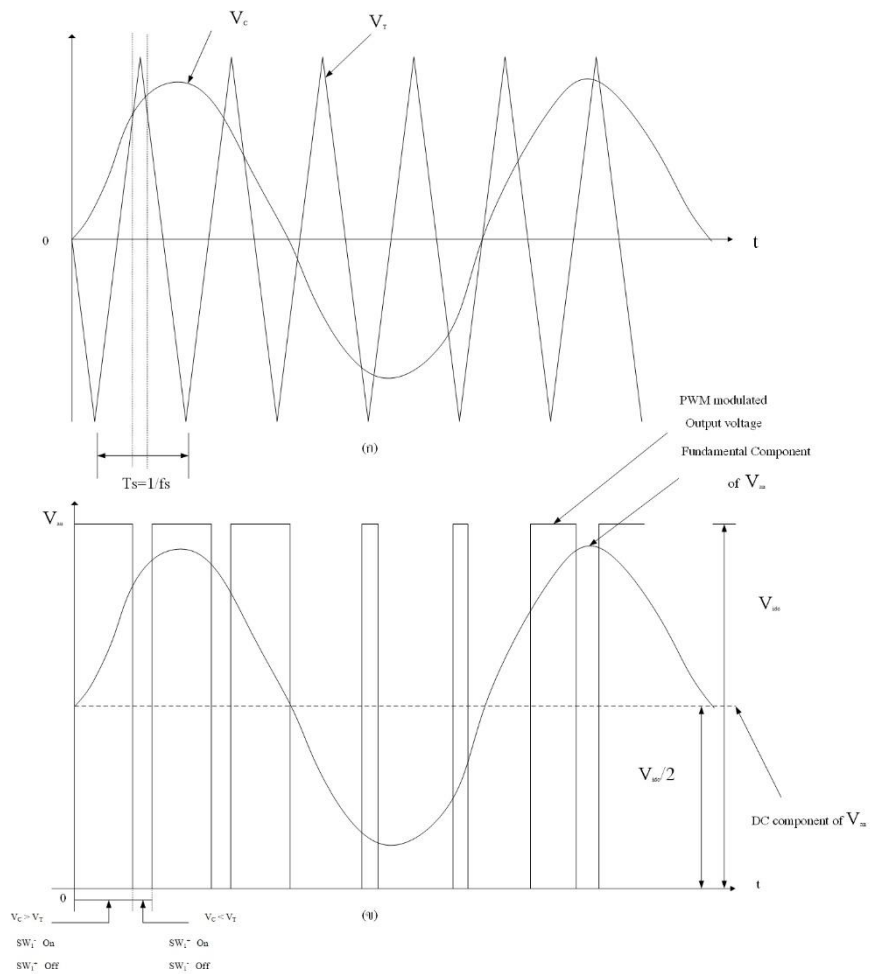
โดยหากพิจารณาตัวอย่างการทำงานพื้นฐานของวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่มีสวิตซ์ 2 ตัว ดังรูปที่ 2.12 จะพบว่าเมื่อแรงดันสัญญาณไซน์ ( $V_c$ ) มากกว่าแรงดันสัญญาณสามเหลี่ยม ( $V_T$ )  $SW_1^-$  จะเปิด ส่วน  $SW_1^+$  จะปิด และหากเมื่อแรงดันสัญญาณไซน์ ( $V_c$ ) น้อยกว่าแรงดันสัญญาณสามเหลี่ยม ( $V_T$ )  $SW_1^+$  จะเปิด ส่วน  $SW_1^-$  จะปิด โดยชุดสวิตซ์ในแต่ละเฟสของอินเวอร์เตอร์เมื่อทำงานตามหลักการเปรียบเทียบสัญญาณนี้ก็จะทำให้เกิดแรงดันดังรูปที่ 2.13 (ข) ทั้งนี้สัญญาณแรงดันที่ได้จากการมอดูเลตความกว้างพัลส์นี้จะมีค่าดังสมการที่ (13)

$$V_{an} = \frac{V_{idc}}{2} + \frac{V_{idc}}{2} M_a \cdot \sin \omega_e t + \text{harmonics} \quad (13)$$

โดย 
$$M_a = \frac{V_{C(\max)}}{V_{T(\max)}}$$

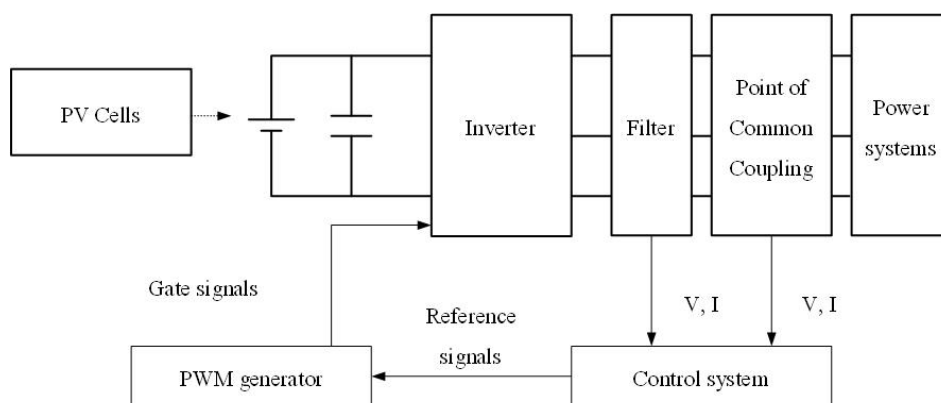


รูปที่ 2.12 ตัวอย่างการทำงานพื้นฐานของวงจรอินเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสที่มีสวิตช์ 2 ตัว



รูปที่ 2.13 หลักการสร้างสัญญาณแบบมอดูเลตความกว้างพัลส์

สำหรับเชื่อมต่อการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบไฟฟ้าจะนิยมใช้อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่ใช้วิธีการแบบมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) เพราะวิธีการนี้จะก่อให้เกิดฮาร์มอนิกน้อยที่สุด ทั้งนี้โดยทั่วไปโครงสร้างการทำงานของการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 โครงสร้างการทำงานของการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

### 2.4.3 ข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์[12]

ข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์ คือ รายละเอียดพารามิเตอร์ต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์แต่ละรุ่นที่ผู้ผลิตนำเสนอ เพื่อเป็นข้อมูลในการพิจารณาตัดสินใจเลือกใช้อินเวอร์เตอร์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน โดยในอินเวอร์เตอร์แต่ละรุ่นจะมีข้อมูลทางเทคนิคที่คล้ายกัน จากการสำรวจและสรุปข้อมูลทางเทคนิคที่สำคัญของผู้ผลิตอินเวอร์เตอร์ในปัจจุบัน สามารถสรุปรายละเอียดข้อมูลทางเทคนิคได้ดังนี้

#### 2.4.3.1 ข้อมูลขาเข้า (Input)

ข้อมูลขาเข้า (Input) เป็นพารามิเตอร์ของอินเวอร์เตอร์ด้านที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน (ด้านที่รับไฟฟ้ากระแสตรง) โดยมีพารามิเตอร์ดังนี้

- กำลังขาเข้าสูงสุด (Maximum dc power)
- แรงดันสูงสุด-ต่ำสุด (DC voltage range)
- กระแสขาเข้าพิกัด (Maximum dc current)

#### 2.4.3.2 ข้อมูลขาออก (Output)

ข้อมูลขาออกจากอินเวอร์เตอร์จะเป็นข้อมูลเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งจะเชื่อมต่อกับหม้อแปลงไฟฟ้าหรือโหลดโดยตรง โดยพารามิเตอร์ข้อมูลขาออกมีดังนี้

- กำลังขาออกสูงสุด (Maximum ac power)
- แรงดันขาออกปกติ (Nominal ac voltage)
- แรงดันสูงสุด-ต่ำสุด (AC voltage range)
- กระแสขาออกพิกัด (Maximum ac current)
- ความถี่ไฟฟ้า (Frequency)

#### 2.4.3.3 ประสิทธิภาพ

ประสิทธิภาพ (Efficiency) เป็นพารามิเตอร์ที่บอกถึงกำลังที่สูญเสียไประหว่างการเปลี่ยนแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งการสูญเสียอาจเกิดจากสาเหตุหลายอย่าง เช่น อุปกรณ์สวิตช์ในอินเวอร์เตอร์ การจัดการด้านการใช้กำลังงานของอินเวอร์เตอร์ เป็นต้น โดยประสิทธิภาพจะสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของกำลังขาออก ( $P_{ac}$ ) และกำลังขาเข้า ( $P_{dc}$ ) ของอินเวอร์เตอร์ดังสมการที่ (14)

$$\eta = \frac{P_{ac}}{P_{dc}} \times 100\% \quad (14)$$

ข้อมูลทางเทคนิคในส่วนของประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

- ประสิทธิภาพสูงสุด (Peak efficiency) ซึ่งเป็นประสิทธิภาพที่สูงที่สุดที่อินเวอร์เตอร์แต่ละรุ่นสามารถทำงานได้
- ประสิทธิภาพจากการทดสอบอินเวอร์เตอร์ ค่าประสิทธิภาพชนิดนี้จะสามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของอินเวอร์เตอร์ได้ดีกว่าประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากเป็นประสิทธิภาพที่ได้มาจากการเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักในแต่ละช่วงกำลังการผลิตของอินเวอร์เตอร์นั้นๆ โดยในปัจจุบันอินเวอร์เตอร์เกือบทุกรุ่นจะใช้ค่าประสิทธิภาพลักษณะนี้ในการแสดงถึงข้อมูลทางเทคนิคทั้งสิ้น อย่างไรก็ตาม ค่าประสิทธิภาพจากการทดสอบอินเวอร์เตอร์สามารถคำนวณได้ 2 รูปแบบ คือ ประสิทธิภาพแบบ Euro eta หรือ Euro efficiency และประสิทธิภาพแบบ California Energy Commission (CEC) ซึ่งมีการถ่วงน้ำหนักที่ต่างกัันดังสมการที่ (15) และ (16) ตามลำดับ

$$\eta_{euro} = 0.03 * \eta_{5\%} + 0.06 * \eta_{10\%} + \dots + 0.13 * \eta_{20\%} + 0.1 * \eta_{30\%} + 0.48 * \eta_{50\%} + 0.2 * \eta_{100\%} \quad (15)$$

$$\eta_{CEC} = 0.04 * \eta_{10\%} + 0.05 * \eta_{20\%} + \dots + 0.12 * \eta_{30\%} + 0.21 * \eta_{50\%} + 0.53 * \eta_{75\%} + 0.05 * \eta_{100\%} \quad (16)$$

โดย  $\eta_{euro}$  คือ ประสิทธิภาพแบบ Euro eta หรือ Euro efficiency (%)

$\eta_{CEC}$  คือ ประสิทธิภาพแบบ California Energy Commission (CEC) (%)

$\eta_{X\%}$  คือ ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ขณะทำงานที่กำลังการผลิต X% ใดๆ (%)

#### 2.4.3.4 แรงดันเริ่มต้น

แรงดันเริ่มต้น (Start voltage) เป็นค่าแรงดันขาเข้าอินเวอร์เตอร์ที่ต่ำที่สุดที่จะทำให้อินเวอร์เตอร์เริ่มแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับได้ แรงดันเริ่มต้นเป็นข้อมูลที่สำคัญในการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนมาก ตัวอย่างเช่น ในกรณีของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ การออกแบบจำเป็นต้องคำนวณจำนวนแผงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่พอเหมาะกับค่าแรงดันเริ่มต้น แต่ข้อมูลของแรงดันเริ่มต้นมักไม่แสดงอยู่ในข้อมูลเทคนิคอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นผู้ออกแบบจึงมักกำหนดให้แรงดันเริ่มต้นมีค่าเท่ากับแรงดันขาเข้าต่ำสุดของอินเวอร์เตอร์แต่ละรุ่น

ทั้งนี้ตัวอย่างข้อมูลเทคนิคของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นรายละเอียดของอินเวอร์เตอร์ที่สามารถหาได้จากเอกสารข้อมูลของผู้ผลิตอินเวอร์เตอร์ โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะยกตัวอย่างข้อมูลเทคนิคของอินเวอร์เตอร์ รุ่น Conext TL20000E ของบริษัท Schneider Electric จำกัด และ รุ่น SUN2000-12KTL ของบริษัท HUAWEI จำกัด ซึ่งอินเวอร์เตอร์ทั้งสองรุ่นดังกล่าว ได้ผ่านการทดสอบอินเวอร์เตอร์ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า ของการไฟฟ้านครหลวง และมีการใช้งานอยู่จริงในปัจจุบัน แสดงได้ดังตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลอินเวอร์เตอร์รุ่น Conext TL20000E ของบริษัท Schneider Electric จำกัด[13]

Conext TL20000E	
Input (DC)	
กำลังไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุด	20.8 kW
แรงดันขาเข้าสูงสุด	1,000 V
ช่วงแรงดัน MPPT	350 - 800 V
จำนวนของ MPPT	2

กระแสขาเข้าสูงสุด ต่อ MPPT	30 A
<b>Output (AC)</b>	
กำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุด	21.0 kVA
ช่วงแรงดันปกติ	184 - 276 V
ความถี่	50/60 Hz
ความเพี้ยนฮาร์มอนิก	<3 %
กระแสขาออกสูงสุด	32.0 A
ช่วงตัวประกอบกำลังที่ปรับค่าได้	0.8 leading to 0.8 lagging

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลอินเวอร์เตอร์รุ่น SUN2000-12KTL ของบริษัท HUAWEI จำกัด[14]

SUN2000-12KTL	
<b>Input (DC)</b>	
กำลังไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุด	12,240 W
แรงดันขาเข้าสูงสุด	1,000 V
ช่วงแรงดัน MPPT	200 - 950 V
จำนวนของ MPPT	2
กระแสขาเข้าสูงสุด ต่อ MPPT	18 A
<b>Output (AC)</b>	
กำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุด	13,200 VA
ช่วงแรงดันปกติ	220 V / 380 V, 230 V / 400 V
ความถี่	50/60 Hz
ความเพี้ยนฮาร์มอนิก	<3 %
กระแสขาออกสูงสุด	19.1 A
ช่วงตัวประกอบกำลังที่ปรับค่าได้	0.8 leading to 0.8 lagging

#### 2.4.4 รูปแบบการทำงานของอินเวอร์เตอร์[12]

ในหัวข้อย่อหน้านี้จะนำเสนอรูปแบบการทำงาน (โหมด) เบื้องต้นของอินเวอร์เตอร์ที่สามารถสนับสนุนระบบไฟฟ้าได้ โดยแบ่งการนำเสนอออกเป็น 5 รูปแบบการทำงาน คือ รูปแบบการทำงานกำลังไฟฟ้าจริง, รูปแบบการทำงานกำลังไฟฟ้าเสมือน, รูปแบบการทำงานในเวลากลางคืน, รูปแบบการทำงานข้ามผ่านความผิดปกติ และ รูปแบบการทำงานตรวจจับการแยกตัวอิสระ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 2.4.4.1 รูปแบบการทำงานกำลังไฟฟ้าจริง (Active power control mode)

อินเวอร์เตอร์สามารถเลือกรูปแบบการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงที่ออกจากอินเวอร์เตอร์เข้าสู่ระบบไฟฟ้าได้ โดยในทีนี้ยังสามารถจำแนกการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงออกเป็น 2 รูปแบบ คือ (1) รูปแบบการทำงานจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด และ (2) รูปแบบการทำงานจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง

##### (1) โหมดจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power point mode: MPP)

ในขณะที่ระบบไฟฟ้าอยู่ในสภาวะปกติ ผู้ผลิตที่มีอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าจะต้องการให้อินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดที่ควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่มีค่าสูงสุด เพราะจะทำให้ผู้ผลิตสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงที่สุด (สามารถขายไฟฟ้าได้มากที่สุด) โดยในตัวอย่างของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์จะเลือกคู่อันดับของกระแสและแรงดันที่จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าที่จุดสูงสุดได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งมีสมการในการคำนวณระดับแรงดันและกระแสเพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดดังสมการที่ (17) และ (18) ตามลำดับ

$$V_{mpp} = V_{OC} - I_{mpp}R_s + n_s V_t U \quad (17)$$

$$I_{mpp} = \frac{\left(\frac{V_{mpp}Q}{n_s V_t R_{sh}}\right) + \left(\frac{V_{mpp}}{R_{sh}}\right)}{1 + \left(\frac{QR_s}{n_s V_t R_{sh}}\right) + \left(\frac{R_s}{R_{sh}}\right)} \quad (18)$$

โดย 
$$U = \ln \left\{ \frac{I_{SC} - I_{mpp}(R_s + R_{sh}) - V_{mpp}}{I_{SC}(R_s + R_{sh}) - V_{OC}} \right\}$$

$$Q = (I_{SC}(R_s + R_{sh}) - V_{OC}) \exp \left\{ \frac{V_{mpp} + I_{mpp}R_s - V_{OC}}{n_s V_t} \right\}$$



$V_{mpp}$  คือ แรงดันที่ออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V)

$I_{mpp}$  คือ กระแสที่ออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (A)

$V_{OC}$  คือ แรงดันเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ (V)

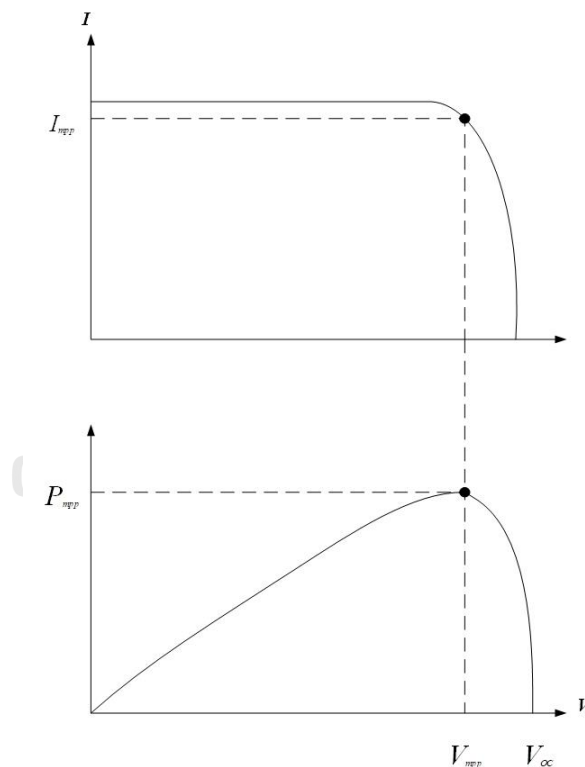
$I_{SC}$  คือ กระแสลัดวงจร ณ สภาพแวดล้อมขณะนั้น (A)

$V_t$  คือ ขีดความต่างศักย์เริ่มเปลี่ยน (Threshold voltage) (V) หรือค่าของแรงดันจุดเปลี่ยนของไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์ (V)

$R_{sh}$  คือ ความต้านทานแบบขนานของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\Omega$ )

$R_s$  คือ ความต้านทานแบบอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\Omega$ )

$n_s$  คือ จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมกันเป็นโมดูล

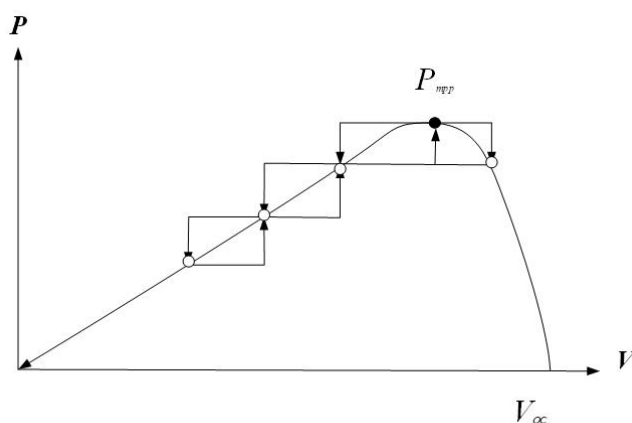


รูปที่ 2.15 จุดทำงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

วิธีการหาจุดทำงานสูงสุดของอินเวอร์เตอร์ในปัจจุบันมีหลายรูปแบบ เช่น วิธี Perturb and Observe (P&O) ซึ่งเป็นวิธีที่ปรับค่าแรงดันไปเรื่อยๆ เพื่อให้ได้จุดที่ได้กำลังไฟฟ้ามากขึ้น หรือวิธี

Constant voltage and current ซึ่งเป็นวิธีที่ทำได้โดยการตั้งค่าแรงดันหรือกระแสเป็นอัตราส่วนต่อแรงดันเปิดวงจรหรือกระแสลัดวงจร หรือวิธี Incremental conductance ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้อนุพันธ์เพื่อหาจุดทำงานสูงสุด เป็นต้น ซึ่งในที่นี้จะอธิบายเพียงวิธี Perturb and Observe เท่านั้น

วิธีรบกวนและสังเกต (Perturb and Observe: P&O) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากข้อดีของวิธีนี้คือ กระบวนการทำงานสามารถเข้าใจได้ง่ายและนำไปใช้งานได้ไม่ยากเช่นกัน โดยในตัวอย่างกรณีของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ หลักการพื้นฐานของวิธีรบกวนและสังเกตคือ เริ่มจากจุดทำงานเริ่มต้นของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ยังไม่ใช่จุดทำงานสูงสุด แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกรบกวนโดยการเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยหากกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหลังจากการรบกวนก็หมายความว่าจุดทำงานนั้นกำลังเข้าใกล้จุดทำงานสูงสุดมากขึ้น และการรบกวนครั้งต่อไปจะทำในทิศทางเดิมกับครั้งก่อนหน้า แต่หากกำลังไฟฟ้ามีค่าลดลงก็หมายความว่า จุดทำงานนั้นกำลังออกห่างจากจุดทำงานสูงสุด การรบกวนครั้งต่อไปจึงจะต้องมีทิศทางที่กลับกันกับครั้งก่อนหน้า เพื่อให้จุดทำงานเข้าใกล้จุดทำงานสูงสุดมากขึ้น ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การหาจุดทำงานสูงสุดโดยวิธีรบกวนและสังเกต

อย่างไรก็ตาม วิธีรบกวนและสังเกตมีข้อเสียที่ไม่สามารถหาจุดทำงานสูงสุดได้เมื่อลักษณะของกำลังไฟฟ้าและแรงดัน (P-V curve) มีส่วนโค้งที่ลดลง เพราะการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าจะน้อยมากเมื่อถูกรบกวนแล้ว นอกจากนี้วิธีการนี้จะไม่สามารถหาจุดกำลังสูงสุดจริงๆได้ แต่จะมีการรบกวนในทิศทางกลับไปกลับมารอบจุดกำลังสูงสุดแทน และข้อเสียอีกประการหนึ่ง คือ การหาจุดทำงานสูงสุดอาจเกิดการผิดพลาดได้ในกรณีที่ระดับความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

(2) รูปแบบการทำงานจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง (Real power limitation mode)

การทำงานในรูปแบบการทำงานจำกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของอินเวอร์เตอร์อาจทำให้แรงดันหรือความถี่ของระบบที่อยู่ในสภาวะผิดปกติมีขนาดเพิ่มมากขึ้นได้ ซึ่งการกระทำดังกล่าวอินเวอร์เตอร์จำเป็นต้องถูกลดกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงลง เพื่อช่วยลดระดับแรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าลง ซึ่งการทำงานในลักษณะนี้จะเป็นการช่วยสนับสนุนการทำงานของระบบไฟฟ้าได้

#### 2.4.4.2 รูปแบบการทำงานกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power control mode)

การรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนของอินเวอร์เตอร์มีหลากหลายลักษณะ ขึ้นอยู่กับการปรับตั้งค่าของอินเวอร์เตอร์ โดยในที่นี้จะสรุปโหมดการรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้แอกทีฟเป็น 5 ลักษณะ ดังนี้

(1) ปรับการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าเสมือนตามค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า การปรับในลักษณะนี้เป็นการตั้งค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าไว้ที่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง และอินเวอร์เตอร์จะปรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนตามเพื่อให้ได้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่กำหนดไว้

(2) ปรับการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อให้แรงดันมีค่าคงที่ การปรับในลักษณะนี้เป็นการตั้งค่าแรงดัน และอินเวอร์เตอร์จะปรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนตาม เพื่อให้แรงดันขาออกจากอินเวอร์เตอร์ได้ค่าตามที่กำหนดไว้

(3) ปรับการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าเสมือนเป็นร้อยละของกำลังไฟฟ้าจริง การปรับในลักษณะนี้จะทำให้กำลังไฟฟ้าเสมือนมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้ในขณะนั้น

(4) ปรับการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าเสมือนโดยตรง การปรับลักษณะนี้จะสามารถกำหนดการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าเสมือนเป็นค่าที่ต้องการได้โดยตรง ไม่จำเป็นต้องกำหนดให้การจ่ายหรือรับขึ้นอยู่กับค่าอื่น

(5) ปรับการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าเสมือนตามค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป การปรับในลักษณะนี้จะกำหนดให้อินเวอร์เตอร์ปรับการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าเสมือนเมื่อค่าแรงดันขาออกมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไป

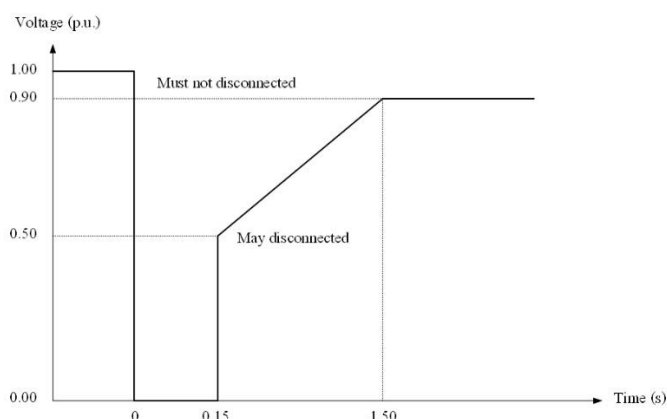
#### 2.4.4.3 รูปแบบการทำงานในเวลากลางคืน (Night mode)

ในช่วงเวลากลางคืนหรือช่วงที่ความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์ไม่เพียงพอต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ อินเวอร์เตอร์สามารถเปลี่ยนมาทำงานในรูปแบบการทำงานในเวลากลางคืนได้ ซึ่งในรูปแบบการทำงานนี้ อินเวอร์เตอร์จะสามารถผลิตได้เฉพาะกำลังไฟฟ้าเสมือนเท่านั้น ซึ่งสามารถปรับตั้งได้เช่นเดียวกับโหมดกำลังไฟฟ้าเสมือน แต่การปรับตั้งจะสามารถทำได้เพียง 3 ลักษณะ คือ (1) ปรับการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าคงที่, (2) ปรับการจ่าย

หรือรับกำลังไฟฟ้าเสมือนโดยตรง และ (3) ปรับการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าเสมือนตามค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไป

#### 2.4.4.4 รูปแบบการทำงานข้ามผ่านความผิดปกติ (Fault ride through: FRT)

เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในวงจรไฟฟ้าส่วนอื่นที่ไม่ได้เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้งาน อินเวอร์เตอร์โดยตรง ระบบผลิตไฟฟ้านี้จำเป็นต้องการไม่ให้ไม่ปลดตัวเองออกจากระบบในระยะเวลาหนึ่ง หรือที่เรียกว่า การข้ามผ่านความผิดปกติ ทั้งนี้ การทำงานของอินเวอร์เตอร์ในลักษณะนี้มีจุดประสงค์เพื่อลดปัญหาไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้างเนื่องจากการปลดตัวเองออกของระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้ งานอินเวอร์เตอร์นี้ในระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่เป็นจำนวนมาก ข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้กำหนดระบบผลิตไฟฟ้าที่เชื่อมต่อที่ระดับแรงดันไฟฟ้าปานกลางหรือระดับสูงคงการเชื่อมต่อไว้ช่วงเวลาหนึ่ง ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การข้ามผ่านความผิดปกติ

#### 2.4.4.5 รูปแบบการทำงานตรวจจับการแยกตัวอิสระ (Anti-islanding detection mode)

เมื่อเกิดการลัดวงจรขึ้นในระบบไฟฟ้า ระบบผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว เช่น ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ อาจถูกต้องการให้ปลดตัวเองออกจากระบบไฟฟ้าเพื่อความปลอดภัยและการป้องกันความเสียหาย โดยการป้องกันการแยกตัวอิสระในอินเวอร์เตอร์มี 2 แบบ คือ (1) การตรวจจับแบบพาสซีฟ (Passive anti-islanding detection) และ (2) การตรวจจับแบบแอคทีฟ (Active anti-islanding detection)

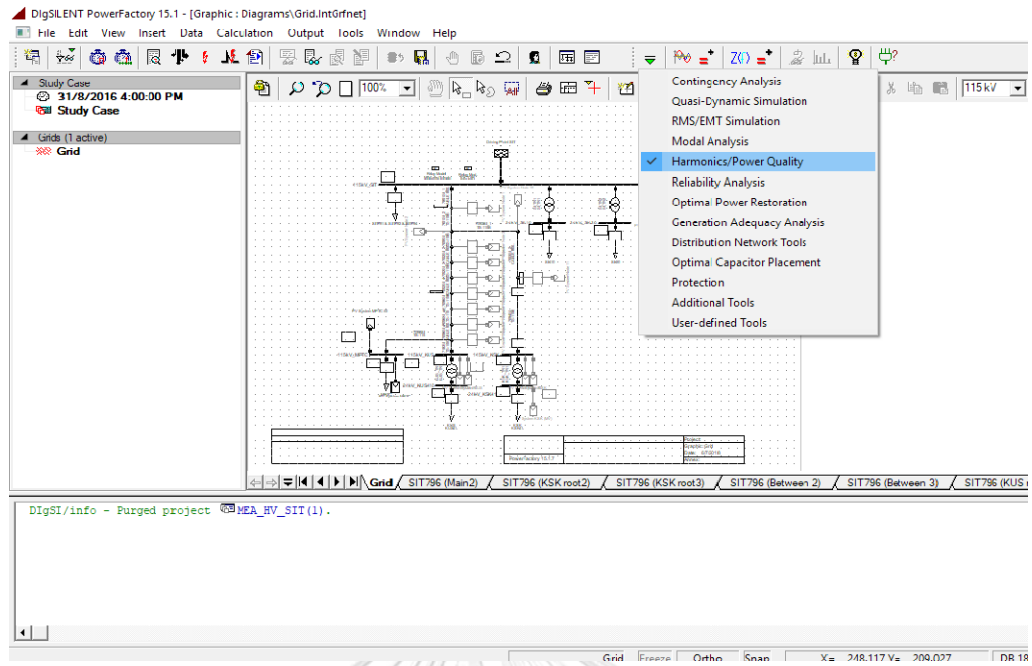
การตรวจจับแบบพาสซีฟเป็นการตรวจจับการเกิดการแยกตัวอิสระโดยอาศัยอุปกรณ์ป้องกันพื้นฐาน คือ รีเลย์แรงดันและรีเลย์ความถี่ ซึ่งเมื่อเกิดการแยกตัวอิสระขึ้น อาจทำให้เกิดแรงดันและความถี่มีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าปกติ ดังนั้นรีเลย์จะสามารถตรวจจับความผิดปกตินี้ได้ แต่ในบาง

กรณี เช่น กำลังไฟฟ้าที่จ่ายจากแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวมีขนาดใกล้เคียงกับโหลด การแยกตัวอิสระในลักษณะนี้อาจทำให้ค่าแรงดันและความถี่เปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ทำให้รีเลย์ไม่สามารถตรวจจับการแยกตัวอิสระได้ หรือที่เรียกว่า บริเวณที่ไม่สามารถตรวจจับการแยกตัวอิสระได้ (Non detection zone)

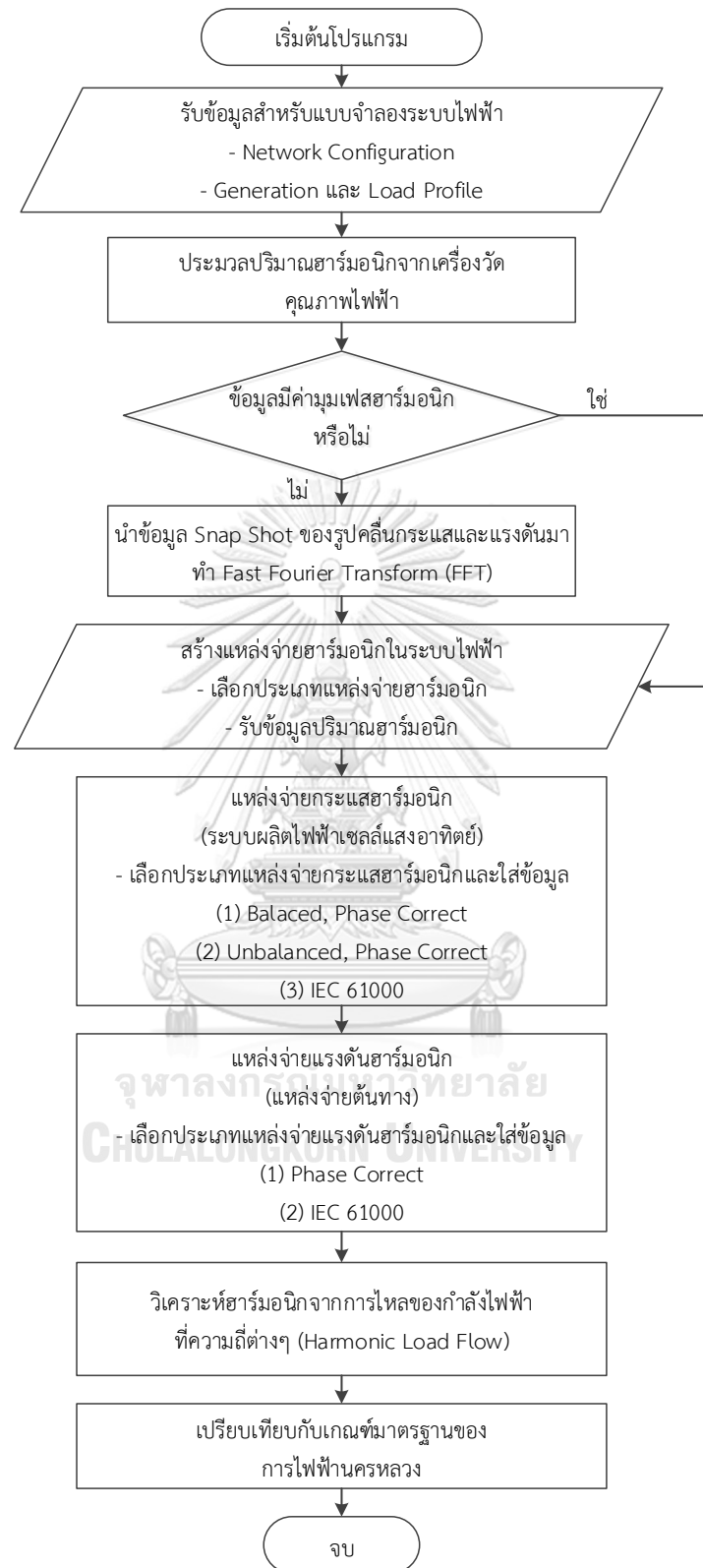
การตรวจจับแบบแอคทีฟเป็นการตรวจจับการแยกตัวอิสระโดยใช้อุปกรณ์เพื่อการตรวจการแยกตัวอิสระโดยเฉพาะ ซึ่งการทำงานของอุปกรณ์นี้จะใช้การป้อนสัญญาณเข้าไปในระบบ เพื่อตรวจหาการแยกตัวอิสระซึ่งการตรวจจับแบบแอคทีฟนี้จะไม่มีปัญหาเรื่องบริเวณที่ไม่สามารถตรวจจับการแยกตัวอิสระได้ แต่จะมีปัญหาเนื่องจากสัญญาณที่ป้อนเข้าไปอาจทำให้ระบบกระแสไฟฟ้าได้

## 2.5 การใช้งานโปรแกรม DigSILENT PowerFactory สำหรับแบบจำลองโปรแกรมวิเคราะห์ฮาร์มอนิก [15]

ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการจำลอง ทดสอบ และวิเคราะห์ ระบบจำหน่ายไฟฟ้า ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่เรียกว่า โปรแกรม DigSILENT PowerFactory โดยโปรแกรมจะทำหน้าที่ในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิก (Harmonic Load Flow Analysis) ซึ่งในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงบางส่วนของกรวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกด้วยโปรแกรม DigSILENT PowerFactory เช่น การสร้างแหล่งจ่ายฮาร์มอนิก การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ และตัวอย่างผลการวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า เป็นต้น โดยจะแสดงเป็นภาพหน้าต่างของโปรแกรมในตัวอย่างดังรูปที่ 2.18 และจะแสดงแผนภาพการทำงานของโปรแกรมในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิกได้ดังรูปที่ 2.19




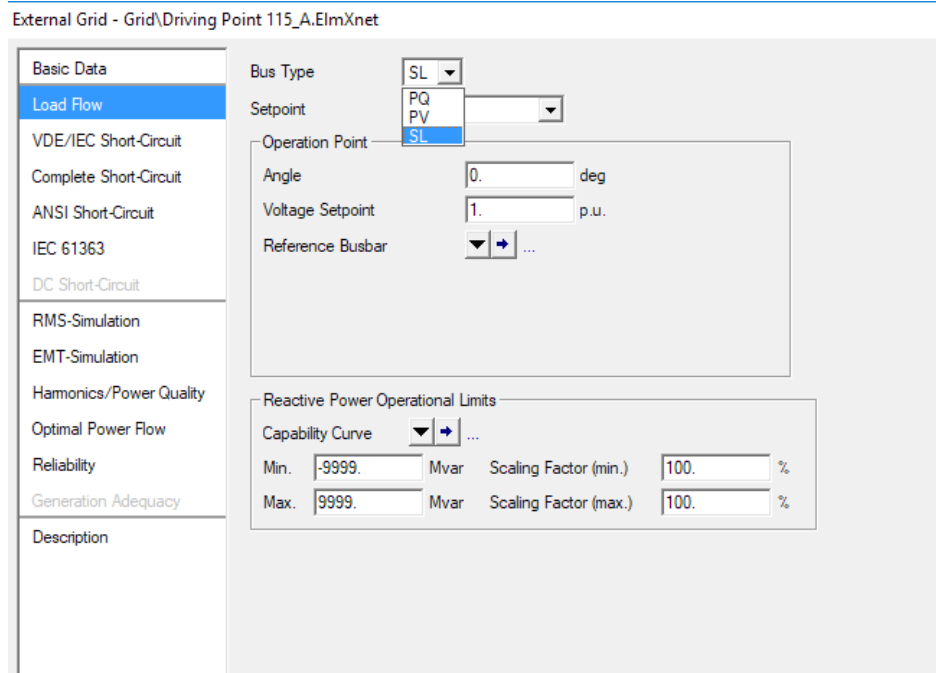
รูปที่ 2.18 ภาพตัวอย่างโปรแกรม DigSILENT PowerFactory ในการเลือกวิเคราะห์ฮาร์มอนิก



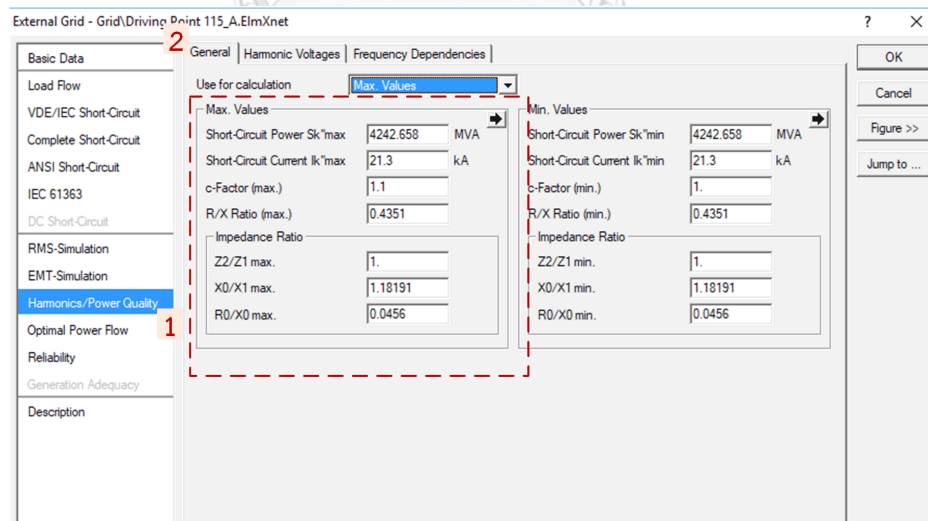
รูปที่ 2.19 แผนภาพแสดงขั้นตอนการจำลองโปรแกรม

## 2.5.1 การสร้างแบบจำลองสถานีไฟฟ้า

สำหรับการสร้างแบบจำลองสถานีไฟฟ้า จะถูกสร้างที่ External Grid  ภายในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory มีหน้าต่างโปรแกรม และขั้นตอนดังรูปที่ 2.20 และ รูปที่ 2.21



รูปที่ 2.20 หน้าต่างการสร้างแบบจำลองสถานีไฟฟ้าที่ External Grid



รูปที่ 2.21 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองสถานีไฟฟ้าในส่วนของกรวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิก



จากรูปที่ 2.20 แสดงหน้าต่างโปรแกรมในส่วนของการจำลองสถานีไฟฟ้าด้วยเครื่องมือ External Grid โดยโปรแกรมจะสามารถเลือกชนิดของบัสในการคำนวณโหลดโพลได้ 3 รูปแบบคือ (1) PQ Bus (2) PV Bus และ (3) SL Bus ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จำลองด้วย SL Bus

ในส่วนของแบบจำลองสถานีไฟฟ้าสำหรับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิก จะต้องเลือก และป้อนข้อมูลดังรูปที่ 2.21 มีขั้นตอนดังนี้

- ขั้นตอนที่ (1) ทำการเลือกในส่วนของ Harmonics/Power Quality
- (2) เลือก Tap “General”
- (3) ป้อนข้อมูล กำลังไฟฟ้าลัดวงจรสูงสุด ( $Sk''$ ), กระแสลัดวงจรสูงสุด ( $Ik''$ ), R/X Ratio และ ค่า Short Circuit Impedance (ตั้งข้อมูลตาม *ภาคผนวก ก.*) โปรแกรมจะเลือกใช้ค่า Max. Values ในการคำนวณ Harmonic Load Flow จากนั้นกดปุ่ม OK

## 2.5.2 การสร้างแหล่งจ่ายฮาร์มอนิก

แหล่งจ่ายฮาร์มอนิกในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก และแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิก

### 2.5.1.1 แหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิก

แหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจะใช้สำหรับออกแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการสร้างแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในโปรแกรมสามารถเลือกได้ 3 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

- (1) Balanced, Phase Correct
- (2) Unbalanced, Phase Correct
- (3) IEC 61000

โดยในแต่ละรูปแบบต่างๆ จะมีการใส่ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบ Balanced, Phase Correct และ Unbalanced, Phase Correct จะมีการใส่ข้อมูลในส่วนของมุมเฟสของฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับสำหรับการวิเคราะห์ แต่สำหรับรูปแบบ IEC 61000 จะไม่ต้องการมุมเฟสของฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับ ซึ่งจะใช้การวิเคราะห์ด้วยหลักการตาม Second Summation Law โดยการใส่ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละรูปแบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.22 ถึงรูปที่ 2.24

Harmonic Sources - Equipment Type Library\PV limitation scale down.TypHmccur \*

Name: PV limitation scale down

Type of Harmonic Sources:

- Balanced, Phase Correct
- Unbalanced, Phase Correct
- IEC 61000

Harmonics:

	$I_h/I_1$ %	$\phi_{h-h} \phi_{h-1}$ deg
f/fn=5	0.	0.

OK Cancel

รูปที่ 2.22 การใส่ข้อมูลแหล่งจ่ายกระแสฮาร์โมนิรูปแบบ Balanced, Phase Correct

Harmonic Sources - Equipment Type Library\PV limitation scale down.TypHmccur \*

Name: PV limitation scale down

Type of Harmonic Sources:

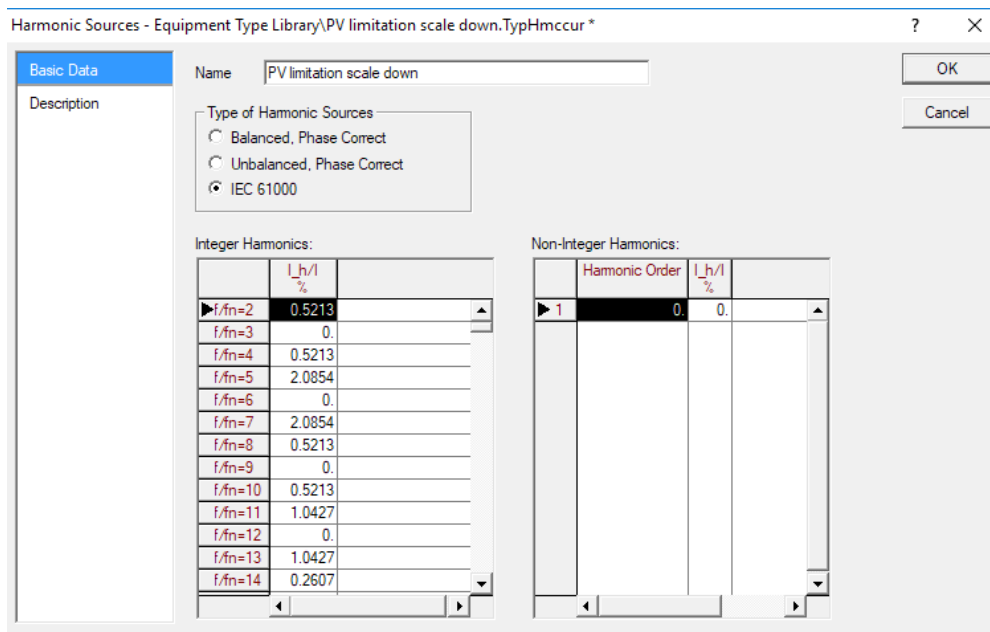
- Balanced, Phase Correct
- Unbalanced, Phase Correct
- IEC 61000

Harmonics:

	Harmonic Order	$I_a/I_{a1}$ %	$I_b/I_{b1}$ %	$I_c/I_{c1}$ %	$\phi_{A_h-h} \phi_{A_1}$ deg	$\phi_{B_h-h} \phi_{B_1}$ deg	$\phi_{C_h-h} \phi_{C_1}$ deg
1	1	0.	0.	0.	0.	0.	0.

OK Cancel

รูปที่ 2.23 การใส่ข้อมูลแหล่งจ่ายกระแสฮาร์โมนิรูปแบบ Unbalanced, Phase Correct



รูปที่ 2.24 การใส่ข้อมูลแหล่งจ่ายกระแสฮาร์มอนิกแบบ IEC 61000

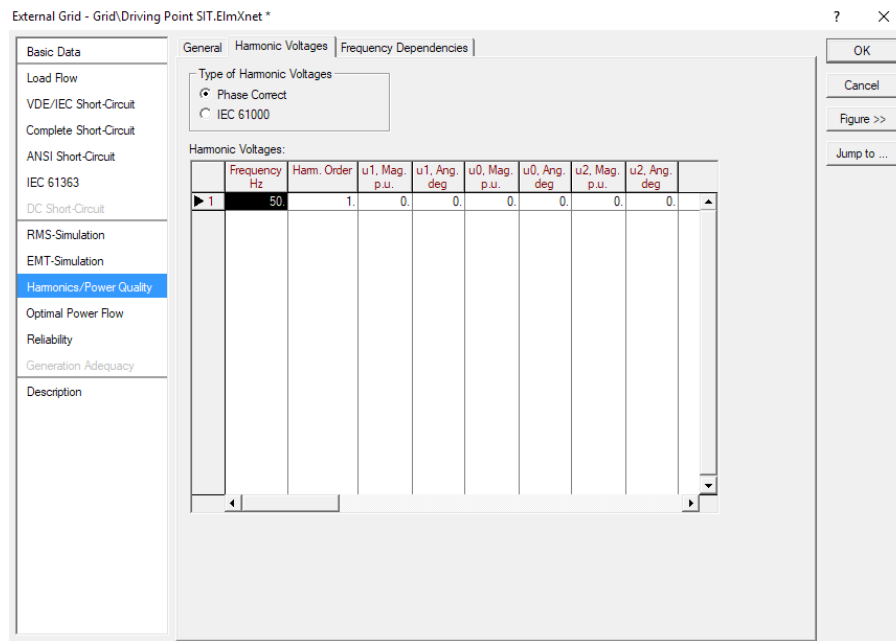
### 2.5.1.2 แหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิก

แหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกจะใช้สำหรับออกแบบการจ่ายฮาร์มอนิกที่แหล่งจ่ายต้นทางของระบบไฟฟ้า โดยพิจารณาให้เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเบื้องหลัง (Background Harmonic Source) ซึ่งจะถูกรวมอยู่ในส่วนของ External Grid ในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory การสร้างแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิกในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory สามารถเลือกได้ 3 รูปแบบดังต่อไปนี้

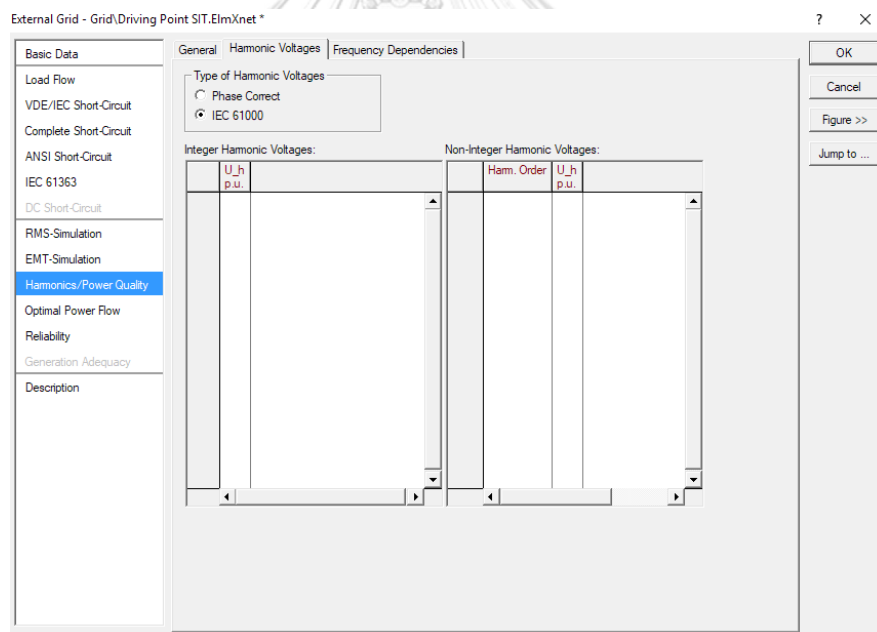
(1) Phase Correct

(2) IEC 61000

โดยในแต่ละรูปแบบต่างๆ จะมีการใส่ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบ Phase Correct จะมีการใส่ข้อมูลในส่วนของมุมเฟสของฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับ สำหรับรูปแบบ IEC 61000 Summation Law โดยการใส่ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกในแต่ละรูปแบบสามารถแสดง ได้ดังรูปที่ 2.25 และ รูปที่ 2.26



รูปที่ 2.25 การใส่ข้อมูลแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์โมนิรูปแบบ Phase Correct



รูปที่ 2.26 การใส่ข้อมูลแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์โมนิรูปแบบ IEC 61000

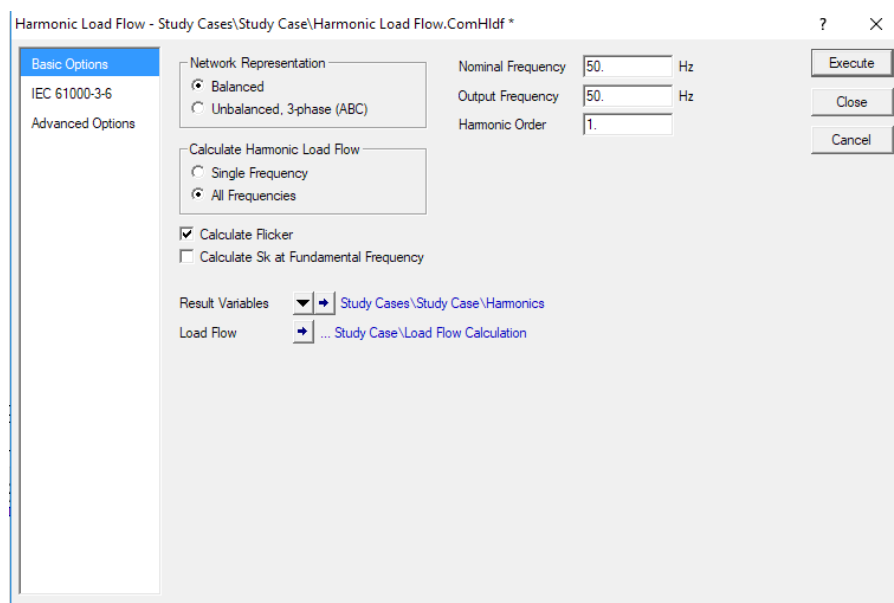
## 2.5.2 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ ในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory สามารถวิเคราะห์ได้โดยการใช้คำสั่ง Calculate Harmonic Load Flow ตามรูปที่ 2.27 ซึ่งจะสามารถเลือกวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ความถี่เดียว หรือที่ทุกความถี่ก็ได้ ดังแสดงในรูปที่

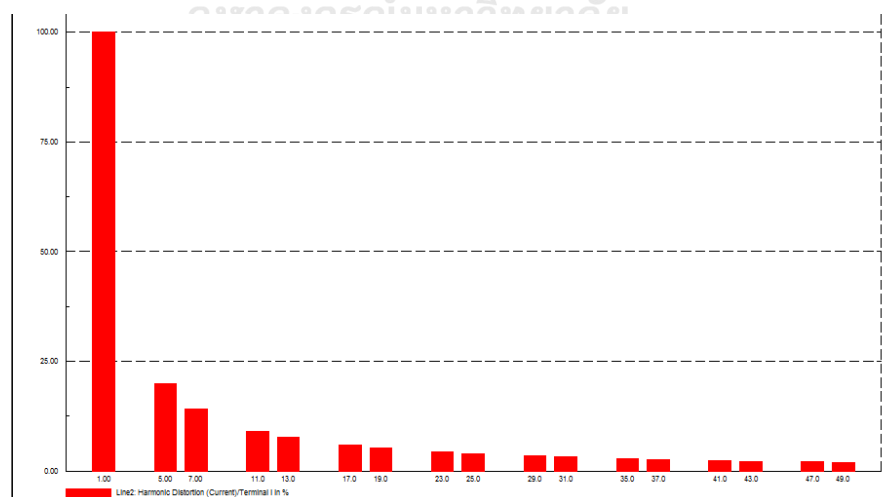
2.28 และสามารถเลือกผลลัพธ์ของปริมาณฮาร์มอนิกที่ตำแหน่งต่างๆ ในระบบไฟฟ้าในรูปแบบกราฟ โดยการใช้คำสั่ง Create Distortion Plot ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ปริมาณฮาร์มอนิกได้ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.27 ปุ่มคำสั่งการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิก และการสร้างกราฟของปริมาณฮาร์มอนิก



รูปที่ 2.28 หน้าต่างเลือกการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิก



รูปที่ 2.29 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ปริมาณกระแสฮาร์มอนิก

### 2.5.3 การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิกตามมาตรฐาน IEC 61000-3-6

สำหรับการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิก ของโปรแกรม DigSILENT PowerFactory จะวิเคราะห์ที่อยู่ภายใต้มาตรฐานของ IEC 61000 ซึ่งในส่วนของฮาร์มอนิก คือ มาตรฐาน IEC 61000-3-6 ในการคำนวณหาแรงดันฮาร์มอนิก จะคำนวณด้วย “Second summation law” ดังสมการที่ (19) [16]

$$U_h = \sqrt{\sum_{m=0}^N U_{h,m}^\alpha} \quad (19)$$

เมื่อ  $N, m$  คือ แหล่งจ่ายฮาร์มอนิก

$h$  คือ ลำดับฮาร์มอนิก

$\alpha$  กำหนดได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่า Alpha ฮาร์มอนิกแต่ละลำดับในมาตรฐาน IEC 61000-3-6

Alpha Exponent Value	Harmonic Order
1	$h < 5$
1.4	$5 \leq h \leq 10$
2	$h > 10$

### บทที่ 3

## ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของประเทศไทย และต่างประเทศ

ในการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้านั้น เพื่อให้เกิดความเท่าเทียมกันของผู้เชื่อมต่อแต่ละราย ประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการเชื่อมต่อ และเพื่อคุณภาพไฟฟ้าในการจ่ายไฟสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าแล้วนั้น ผู้ดูแลระบบโครงข่ายไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องมีการออกข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า สำหรับผู้ขอใช้บริการที่ต้องการจะเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยในบทนี้ จะกล่าวถึง ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า ของประเทศไทย ซึ่งคือ การไฟฟ้านครหลวง และข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า ของต่างประเทศ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 3.1 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณา ระเบียบการไฟฟ้านครหลวงว่าด้วย ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2558 และข้อกำหนดสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าประเภทเชื่อมต่อกับโครงข่าย ของการไฟฟ้านครหลวง สำหรับผู้เชื่อมต่อประเภท ผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก (Small Power Producer, SPP) ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (Very Small Power Producer, VSPP) ผู้ใช้ไฟฟ้าที่เดินขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และผู้ประกอบการไฟฟ้ารายอื่น โดยเน้นในส่วนที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพไฟฟ้าด้านฮาร์มอนิก ที่เกี่ยวข้องกับเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งมีรายละเอียดของข้อกำหนดของการไฟฟ้านครหลวง ดังนี้

- ปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละระดับแรงดัน  
สรุปได้ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ขีดจำกัดปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ประเภทระดับแรงดันไฟฟ้า	ขีดจำกัดตามปริมาณกำลังไฟฟ้าสูงสุด	ขีดจำกัดตามค่าพิกัดของสายส่ง/สายจำหน่าย	ขีดจำกัดตามค่าพิกัดของหม้อแปลง
ระดับแรงดันต่ำ (ระบบ 230/400 V)	เทคโนโลยีการเชื่อมต่อแบบ 1 เฟส		
	ไม่เกิน 5 kW	(ไม่ได้กำหนด)	ไม่เกิน 15%
	เทคโนโลยีการเชื่อมต่อแบบ 3 เฟส		
	ความแตกต่างระหว่างคู่เฟสใดๆ ไม่เกิน 5 kW	(ไม่ได้กำหนด)	ไม่เกิน 15%
ระดับแรงดันปานกลาง (ระบบ 12 หรือ 24 kV)	(ไม่ได้กำหนด)	ไม่เกิน 4 MW ต่อสายจำหน่าย (12 kV)	ไม่เกิน 20%
		ไม่เกิน 8 MW ต่อสายจำหน่าย (24 kV)	
ระดับแรงดันสูง (ระบบ 115 kV)	(ไม่ได้กำหนด)	ไม่เกิน 180 MW ต่อสายส่ง	(ไม่ได้กำหนด)

- การควบคุมคุณภาพไฟฟ้าด้านฮาร์มอนิก

เมื่ออินเวอร์เตอร์จ่ายไฟให้โหลดเชิงเส้นที่สมดุล (Balanced Linear Load) อินเวอร์เตอร์จะต้องไม่สร้างกระแสฮาร์มอนิกจ่ายเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าเกินขีดจำกัดดังตารางที่ 3.2 (แสดงค่าเป็น % เทียบกับกระแสพิกัดของอินเวอร์เตอร์) ซึ่งการไฟฟ้านครหลวงจะอ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 1547 (2003) โดยผู้เชื่อมต่อนระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จะต้องใช้อินเวอร์เตอร์จากผู้ผลิตในรุ่นที่ได้รับอนุญาตให้เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งได้ผ่านการทดสอบการออกแบบ (Design Test) ตามที่การไฟฟ้านครหลวงกำหนดไว้ โดยอ้างอิงวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE 1547.1 (2005)



ตารางที่ 3.2 ข้อกำหนดขนาดกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อในระบบของการไฟฟ้านครหลวง

ลำดับที่	ขนาดการจ่ายกระแส (%)	ลำดับคู่	ขนาดการจ่ายกระแส (%)
3-9	4.0	2-10	1.0
11-15	2.0	12-16	0.5
17-21	1.5	18-22	0.375
23-33	0.6	24-34	0.15
≥35	0.3	≥36	0.075
<b>ความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (THDi) 5.0%</b>			
<b>หมายเหตุ แสดงค่าเป็นร้อยละเทียบกับกระแสฟลักซ์ของอินเวอร์เตอร์</b>			

นอกจากนี้ในการประเมินดัชนีทางด้านฮาร์มอนิกของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ ค่าวางแผน (Planning Level) ของแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ และ ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม ของการไฟฟ้านครหลวง มาเป็นเกณฑ์ในการประเมินดัชนีทางด้านฮาร์มอนิก [17],[18] ซึ่งการไฟฟ้านครหลวงปรับปรุงมาจากมาตรฐาน Engineering Recommendation G5/4 (2001) โดยการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จะต้องไม่ก่อให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง ค่าวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิก อย่างไรก็ตาม เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินดัชนีทางด้านฮาร์มอนิกนี้ ไม่ได้ระบุไว้ในตัวข้อกำหนดการเชื่อมต่ออย่างชัดเจน แต่ผู้วิจัยเข้าใจว่า การไฟฟ้านครหลวงใช้ค่าวางแผนนี้เพื่อเป็นการควบคุมปริมาณฮาร์มอนิกในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงเอง สามารถแบ่งตามระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไฟฟ้าดังแสดงตารางที่ 3.3 ถึง ตารางที่ 3.5 [19]

ตารางที่ 3.3 ค่าวางแผนของแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับของระบบแรงดันสูง 69 และ 115 kV

ฮาร์โมนิกลำดับที่ (ไม่ใช่ Triplen)		ฮาร์โมนิกลำดับที่ (Triplen)		ฮาร์โมนิกลำดับคู่	
ลำดับ ฮาร์โมนิก (h)	แรงดันฮาร์โมนิก (%)	ลำดับ ฮาร์โมนิก (h)	แรงดันฮาร์โมนิก (%)	ลำดับ ฮาร์โมนิก (h)	แรงดันฮาร์โมนิก (%)
5, 7	2.0	3	2.0	2	1.0
11	1.5	9	1.0	4	0.8
13	1.5	15	0.3	6	0.5
17	1.0	21	0.2	8, 10	0.4
19, 23	1.0	>21	0.2	12	0.2
25	0.7			>12	0.2
>25	$0.2+0.5*(25/h)$				
ความเพี้ยนแรงดันฮาร์โมนิกรวม (%THDv) 3.0%					

ตารางที่ 3.4 ค่าวางแผนของแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับของระบบแรงดันปานกลาง 12, 22, 24 และ 33 kV

ฮาร์โมนิกลำดับที่ (ไม่ใช่ Triplen)		ฮาร์โมนิกลำดับที่ (Triplen)		ฮาร์โมนิกลำดับคู่	
ลำดับ ฮาร์โมนิก (h)	แรงดันฮาร์โมนิก (%)	ลำดับ ฮาร์โมนิก (h)	แรงดันฮาร์โมนิก (%)	ลำดับ ฮาร์โมนิก (h)	แรงดันฮาร์โมนิก (%)
5, 7	3.0	3	3.0	2	1.5
11	2.0	9	1.2	4	1.0
13	2.0	15	0.3	6	0.5
17	1.6	21	0.2	8, 10	0.4
19, 23	1.2	>21	0.2	12	0.2
25	0.7			>12	0.2

>25	$0.2+0.5*(25/h)$				
ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (%THDv) 4%					

ตารางที่ 3.5 ค่าวางแผนของแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับของระบบแรงดันต่ำ 400 V

ฮาร์มอนิกลำดับคี่ (ไม่ใช่ Triplen)		ฮาร์มอนิกลำดับคี่ (Triplen)		ฮาร์มอนิกลำดับคู่	
ลำดับ ฮาร์มอนิก (h)	แรงดันฮาร์มอนิก (ร้อยละ)	ลำดับ ฮาร์มอนิก (h)	แรงดันฮาร์มอนิก (ร้อยละ)	ลำดับ ฮาร์มอนิก (h)	แรงดันฮาร์มอนิก (ร้อยละ)
5, 7	4	3	4	2	1.6
11	3	9	1.2	4	1
13	2.5	15	0.3	6	0.5
17	1.6	21	0.2	8, 10	0.4
19, 23	1.2	>21	0.2	12	0.2
25	0.7			>12	0.2
>25	$0.2+0.5*(25/h)$				
ความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (%THDv) 5%					

- การควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor)

การไฟฟ้านครหลวงกำหนดให้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่จะเชื่อมต่อเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ต้องควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดเพื่อการควบคุมและรักษาคุณภาพแรงดันในระบบ ทั้งนี้ค่าตัวประกอบกำลังที่การไฟฟ้านครหลวงกำหนดอาจเปลี่ยนแปลงได้ตามความจำเป็นของระบบโครงข่ายไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา ดังนี้

1) กรณีระบบที่ไม่มีอินเวอร์เตอร์ ต้องสามารถปรับค่าตัวประกอบกำลังในช่วงระหว่าง 0.85 นำหน้า ถึง 0.85 ตามหลัง

2) กรณีระบบที่มีอินเวอร์เตอร์ ต้องสามารถปรับค่าตัวประกอบกำลังในช่วง 0.95 นำหน้า ถึง 0.95 ตามหลัง หากเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 230/400 V หรือระหว่าง 0.9 นำหน้า ถึง 0.9 ตามหลัง หากเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 12 kV ขึ้นไป

- การควบคุมความถี่ไฟฟ้า

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจะเป็นผู้ควบคุมความถี่ของระบบโครงข่ายไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์  $50 \pm 0.5$  รอบต่อวินาที ในกรณีที่ความถี่ของระบบไม่อยู่ในช่วง 47.00 – 52.00 รอบต่อวินาที ต่อเนื่องเกิน 0.1 วินาที ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จะต้องออกแบบให้ปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่จุดเชื่อมต่อด้วยระบบอัตโนมัติที่เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าทันที สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จะต้องปฏิบัติตามที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตกำหนด

### 3.2 ข้อกำหนดสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าประเภทเชื่อมต่อกับโครงข่าย

สำหรับข้อกำหนดสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าประเภทเชื่อมต่อกับโครงข่ายที่จะกล่าวถึงในบทนี้ จะกล่าวถึงแนวทางการทดสอบอินเวอร์เตอร์ และวิธีการทดสอบและเกณฑ์การประเมินด้านฮาร์มอนิก ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- สถาบันหรือหน่วยงานที่ทดสอบ

อินเวอร์เตอร์จะต้องผ่านการทดสอบโดยหน่วยงานหรือสถาบันทดสอบที่เป็นกลาง และได้รับการรับรองตามมาตรฐานห้องทดสอบจาก ISO/IEC 17025 (สำหรับอินเวอร์เตอร์) หรือได้รับการตรวจสอบและยอมรับจากการไฟฟ้านครหลวง

- ประเภทของการทดสอบ

การทดสอบการออกแบบ (Design Test) เป็นการทดสอบกับอินเวอร์เตอร์เพียงตัวเดียวที่เป็นตัวแทนของรุ่น เพื่อยืนยันว่าอินเวอร์เตอร์รุ่นที่จะนำมาติดตั้งใช้งานมีการออกแบบที่เหมาะสมสอดคล้องตามข้อกำหนดทั้งในด้านการควบคุมคุณภาพไฟฟ้าและการตอบสนองต่อระบบไฟฟ้า อินเวอร์เตอร์รุ่นที่เคยผ่านการทดสอบการออกแบบแล้วไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบการออกแบบซ้ำอีก

การทดสอบประจำเครื่อง (Routine Test) เป็นการทดสอบที่ต้องดำเนินการกับอินเวอร์เตอร์ทุกเครื่องที่จะนำไปติดตั้งใช้งาน เพื่อให้เกิดความมั่นใจในความปลอดภัยสูงสุดและป้องกันผลเสียที่อาจมีต่อระบบไฟฟ้า

### 3) วิธีการทดสอบและเกณฑ์การประเมินด้านฮาร์มอนิก

เป็นการทดสอบประเภท Design Test โดยให้อ้างอิงขั้นตอนวิธีการทดสอบและเกณฑ์การประเมินตามมาตรฐาน IEEE 1547.1 (2005) ข้อ 5.11.1 ซึ่งกำหนดให้ทดสอบวัดค่ากระแสฮาร์มอนิกเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานที่ 33% 66% และ 100% ของพิกัดกระแส

### 3.3 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของต่างประเทศ

ในต่างประเทศมีการออกข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า เพื่อให้เกิดความเท่าเทียมกันของผู้เชื่อมต่อแต่ละราย ประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการเชื่อมต่อ และเพื่อคุณภาพไฟฟ้าในการจ่ายไฟสำหรับผู้บริโภคใช้ไฟฟ้า เช่นเดียวกันกับข้อกำหนดระบบโครงข่ายไฟฟ้าในประเทศไทย โดยเนื้อหาในข้อกำหนดจะแตกต่างกันไปตามแต่ละประเทศ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของประเทศไทย และประเทศเยอรมัน เนื่องจากประเทศดังกล่าวนี้ มีการกำหนดใช้ความถี่ระบบ ที่ 50 Hz เช่นเดียวกันกับประเทศไทย เพื่อให้เห็นถึงข้อแตกต่างของข้อกำหนดฯ ของประเทศไทยและต่างประเทศ โดยเน้นในส่วนที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพไฟฟ้าด้านฮาร์มอนิก เช่นเดียวกับข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง

#### 3.3.1 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของประเทศไทย

ประเทศไทยมีหน่วยงาน Energy Network Association (ENA) เป็นผู้ออกข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยแบ่งตามขนาดพิกัดกระแส ดังนี้

1) 16 A ต่อเฟส หรือต่ำกว่า (กำลังผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 3.68 kW หรือต่ำกว่า การเชื่อมต่อไฟฟ้าแบบ 1 เฟส หรือ กำลังผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 11.04 kW หรือต่ำกว่า การเชื่อมต่อไฟฟ้าแบบ 3 เฟส) ใช้ข้อกำหนดการเชื่อมต่อ “Engineering Recommendations (EREC) G83”

2) 75 A ต่อเฟส หรือต่ำกว่า (กำลังผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 17 kW หรือต่ำกว่า การเชื่อมต่อไฟฟ้าแบบ 1 เฟส หรือ กำลังผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 50 kW หรือต่ำกว่า การเชื่อมต่อไฟฟ้าแบบ 3 เฟส) ใช้ข้อกำหนดการเชื่อมต่อ “Engineering Recommendations (EREC) G59”

##### 3.3.1.1 Engineering Recommendations (EREC) G83

ข้อกำหนดการเชื่อมต่อ EREC G83 เป็นข้อกำหนดสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภท Small-Scale Embedded Generation (SSEG) ที่มีพิกัดกระแส 16 A ต่อเฟส หรือต่ำกว่า ตามข้อมูลข้างต้น โดยมีการออกฉบับล่าสุดคือ EREC G83/2 ซึ่งมีรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเน้นในส่วนของคุณภาพไฟฟ้าด้านฮาร์มอนิก ดังนี้

- ปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ไม่มีการกำหนดปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง เพียงแต่มีข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าในการกำหนดเงื่อนไขการเชื่อมต่อเท่านั้น

- การควบคุมคุณภาพไฟฟ้าด้านฮาร์มอนิก

ประเทศอังกฤษนำมาตรฐาน BS EN 61000-3-2 Class A (equipment input current  $\leq 16$  A per phase) มาเป็นเกณฑ์กำหนดการจ่ายกระแสฮาร์มอนิก ของระบบผลิตไฟฟ้าที่มีอินเวอร์เตอร์ ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ข้อกำหนดขนาดกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อในระบบของมาตรฐาน IEC 61000-3-2 [20]

ลำดับที่	ขนาดการจ่ายกระแส (%)	ลำดับคู่	ขนาดการจ่ายกระแส (%)
3	2.3	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	$8 \leq h \leq 40$	$0.23 \times (8/h)$
11	0.33		
13	0.21		
$15 \leq h \leq 39$	$0.15 \times (15/h)$		
<b>หมายเหตุ แสดงค่าเป็นร้อยละเทียบกับกระแสฟักัดของอินเวอร์เตอร์</b>			

- การควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor)

IEC 61000-3-2 กำหนดให้ต้องสามารถปรับค่าตัวประกอบกำลังในช่วง 0.95 นำหน้า ถึง 0.95 ตามหลัง

- การควบคุมความถี่ไฟฟ้า

ต้องควบคุมความถี่ของระบบโครงข่ายไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์  $50 \pm 1$  รอบต่อวินาที ในกรณีที่ความถี่ไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วง

47 Hz – 47.5 Hz ทำงานต่อเนื่องได้ไม่เกิน 20 วินาที

47.5 Hz – 51.5 Hz ต้องปลดอุปกรณ์ออกจากการเชื่อมต่อทันที

51.5 Hz – 52 Hz ทำงานต่อเนื่องได้ไม่เกิน 90 วินาที

### 3.3.1.2 Engineering Recommendations (EREC) G59

ข้อกำหนดการเชื่อมต่อ EREC G59 เป็นข้อกำหนดสำหรับกรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าที่จะมาเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้ามีเงื่อนไขที่ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อ EREC G83 ที่มีกำลังผลิต 17 kW หรือต่ำกว่า ในการเชื่อมต่อไฟฟ้า 1 เฟส หรือ 50 kW ในการเชื่อมต่อไฟฟ้า 3 เฟส โดยมีการออกฉบับล่าสุดคือ EREC G59/3 ซึ่งมีรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเน้นในส่วนของคุณภาพไฟฟ้าด้านฮาร์มอนิก ดังนี้

- ปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ไม่มีการกำหนดปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง เพียงแต่มีข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าในการกำหนดเงื่อนไขการเชื่อมต่อเท่านั้น

- การควบคุมคุณภาพไฟฟ้าด้านฮาร์มอนิก

ประเทศอังกฤษนำมาตรฐาน BS EN 61000-3-12 (equipment input current > 16 A and ≤ 75 A per phase) มาเป็นเกณฑ์กำหนดการจ่ายกระแสฮาร์มอนิก ของระบบผลิตไฟฟ้าที่มีอินเวอร์เตอร์

- การควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor)

EREC G59 กำหนดให้ต้องสามารถปรับค่าตัวประกอบกำลังในช่วง 0.95 นำหน้า ถึง 0.95 ตามหลัง

- การควบคุมความถี่ไฟฟ้า

ความถี่สูงสุด 51.3 Hz ไม่จำกัดเวลา, 51.8 Hz ไม่เกิน 89.98 วินาที และ 52.2 Hz ไม่เกิน 0.48 วินาที

ความถี่ต่ำสุด 47.7 Hz ไม่จำกัดเวลา, 47.2 Hz ไม่เกิน 19.98 วินาที และ 46.8Hz ไม่เกิน 0.48 วินาที

ทั้งนี้ ประเทศอังกฤษมีการใช้มาตรฐาน Engineering Recommendation G5/4-1 (2005) เป็นค่าวางแผน (Planning Level) สำหรับแรงดันฮาร์มอนิกฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ และค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม เช่นเดียวกับประเทศไทย แต่เป็นมาตรฐานเวอร์ชันใหม่กว่า แต่ไม่มีความแตกต่างกันในส่วนของข้อมูลแรงดันฮาร์มอนิก ดังตารางที่ 3.3 ถึง ตารางที่ 3.5 ข้างต้น

### 3.3.2 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของประเทศเยอรมัน

สำหรับประเทศเยอรมัน จะมีหน่วยงานที่ชื่อ Verband der Netzbetreiber (VDN) เป็นผู้ดูแลและออกข้อกำหนดการเชื่อมต่อ ระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งสำหรับข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าในระดับแรงดันต่ำ ประเทศเยอรมนีจะใช้ข้อกำหนดการเชื่อมต่อ VDE-AR-N 4015 : 2011 จาก Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (VDE) และ Act on Granting Priority to Renewable Energy Sources จาก Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) สำหรับข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าในระดับแรงดันปานกลาง ประเทศเยอรมนีจะใช้ข้อกำหนดการเชื่อมต่อ Technical Guideline for the Connection and Parallel Operation of Generators Connected to the Medium Voltage Network จาก Bundesverband der Energieund Wasserwirtschaft (BDEW) และ สำหรับข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าในระดับแรงดันสูง คือ Transmission Code 2007 จาก Verband der Netzbetreiber (VDN) และ Grid Code High and Extra High Voltage จาก Tennet ซึ่งเป็น Transmission System Operator (TSO) ของประเทศเยอรมนี

โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าในส่วนที่เกี่ยวข้องกับ คุณภาพไฟฟ้าด้านฮาร์มอนิกเท่านั้น ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- ปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ที่ระดับแรงดันปานกลาง กำหนดให้ปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ หรือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่จะเชื่อมต่อในระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลางอยู่ในช่วงตั้งแต่ 100 kVA ถึง 10 MVA

ที่ระดับแรงดันต่ำ กำหนดให้ปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ หรือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่จะเชื่อมต่อในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ สำหรับระบบ 3 เฟส ปริมาณกำลังผลิตติดตั้งจะต้องไม่เกิน 100 kVA โดยที่ความแตกต่างของปริมาณกำลังผลิตติดตั้งในแต่ละเฟสมีค่าไม่เกิน 4.6 kVA และ สำหรับระบบ 1 เฟส ปริมาณกำลังผลิตติดตั้งจะต้องไม่เกิน 13.8 kVA

- การควบคุมคุณภาพไฟฟ้าด้านฮาร์มอนิก

ประเทศเยอรมันมีการใช้มาตรฐาน DIN EN 61000-3-2 (equipment input current  $\leq 16$  A per phase) ในการกำหนดเกณฑ์ของกระแสฮาร์มอนิกจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยแสดงค่าดังตารางที่ 3.7



ตารางที่ 3.7 กระแสฮาร์มอนิกจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ มาตรฐาน DIN EN 61000-3-2 [20]

ลำดับที่	ขนาดการจ่ายกระแส (%)	ลำดับคู่	ขนาดการจ่ายกระแส (%)
3	3	$h < 40$	1.5/h
5	1.5	$42 < h < 178$	4.5/h
7	1		
9	0.7		
11	0.5		
13	0.4		
17	0.3		
19	0.25		
23	0.2		
25	0.15		
$25 < h < 40$	0.15-25/h		
$42 < h < 178$	4.5/h		
หมายเหตุ แสดงค่าเป็นร้อยละเทียบกับกระแสฟักัดของอินเวอร์เตอร์			

- การควบคุมค่าตัวประกอบกำลัง (Power Factor)

ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจะต้องอยู่ในช่วง 0.95 ตามหลัง ถึง 1 (Unity Power Factor) - สำหรับระดับแรงดันสูง

ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจะต้องอยู่ในช่วง 0.95 นำหน้า ถึง 0.95 ตามหลัง - สำหรับระดับแรงดันปานกลาง และ

สำหรับระดับแรงดันต่ำ จะแบ่งตามค่าฟักัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งแบ่งได้ดังต่อไปนี้

- 1) ค่าฟักัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์น้อยกว่า 3.68 kVA

ต้องควบคุมค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแบบคงที่ให้มีค่าอยู่ในช่วง 0.95 นำหน้า ถึง 0.95 ตามหลัง

2) ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ระหว่าง 3.68 ถึง 13.8 kVA

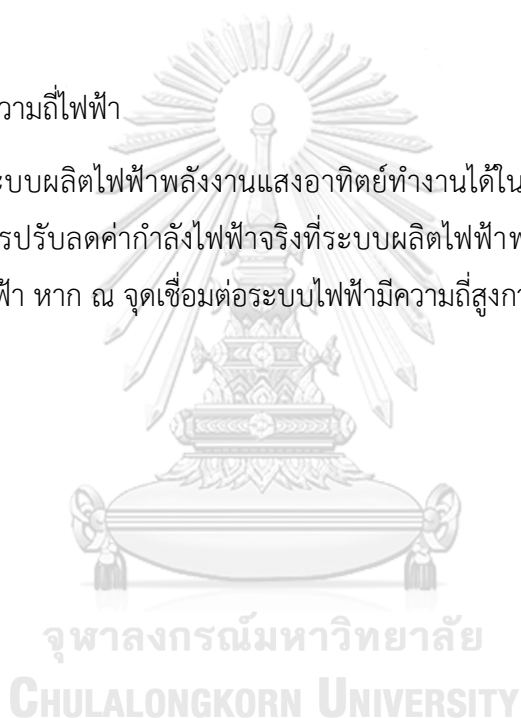
ต้องสามารถควบคุมค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้มีค่าอยู่ในช่วง 0.95 นำหน้า – 0.95 ตามหลัง

3) ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์มากกว่า 13.8 kVA

ต้องสามารถควบคุมค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้มีค่าอยู่ในช่วง 0.90 นำหน้า – 0.90 ตามหลัง

- การควบคุมความถี่ไฟฟ้า

อนุญาตให้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทำงานได้ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 47.5 Hz ถึง 51.5 Hz ทั้งนี้จะมีการปรับลดค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ผลิตได้เพื่อรักษาระดับความถี่ไฟฟ้า หาก ณ จุดเชื่อมต่อระบบไฟฟ้ามีความถี่สูงกว่า 50.2 Hz



ตารางที่ 3.8 สรุปข้อกำหนดระบบไฟฟ้าของอาคารไฟฟ้านครหลวง และต่างประเทศไทย

	การไฟฟ้านครหลวง ประเทศไทย	ประเทศอังกฤษ	ประเทศเยอรมัน
ปริมาณกำลังผลิตติดตั้ง	LV: 15% ของพิกัดหม้อแปลง MV: 20% ของพิกัดหม้อแปลง HV: 180 MW ต่อสายส่ง	≤3.68 kW (1 เฟส) หรือ ≤ 11.04 kW (3 เฟส) : EREC G83 ≤17 kW (1 เฟส) หรือ ≤ 50 kW (3 เฟส) : EREC G59	LV: ≤13.8 kVA (1เฟส), ≤100 kVA (3เฟส) MV: 100 kVA ถึง 10 MVA
ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	ไม่มีอินเวอร์เตอร์ 0.85 นำหน้า ถึง 0.85 ตามหลัง มีอินเวอร์เตอร์ 0.95 นำหน้า ถึง 0.95 ตามหลัง (230/400 V) 0.9 นำหน้า ถึง 0.9 ตามหลัง (12 kV ขึ้นไป)	0.95 นำหน้า ถึง 0.95 ตามหลัง	HV: 0.95 ตามหลัง ถึง 1 (Unity Power Factor) MV: 0.95 นำหน้า ถึง 0.95 ตามหลัง LV: 0.95 นำหน้า ถึง 0.95 ตามหลัง (3.68-13.8 kVA) 0.90 นำหน้า – 0.90 ตามหลัง (≥13.8 kVA)
ความถี่ไฟฟ้า	50±0.5 รอบต่อวินาที	50±1 รอบต่อวินาที	47.5 - 51.5 รอบต่อวินาที
การจ่ายกระแสอาร์มอนิก	IEEE 1547 (2003)	BS EN 61000-3-2 : EREC G83 BS EN 61000-3-12 : EREC G59	DIN EN 61000-3-2

## บทที่ 4

### ระบบทดสอบ

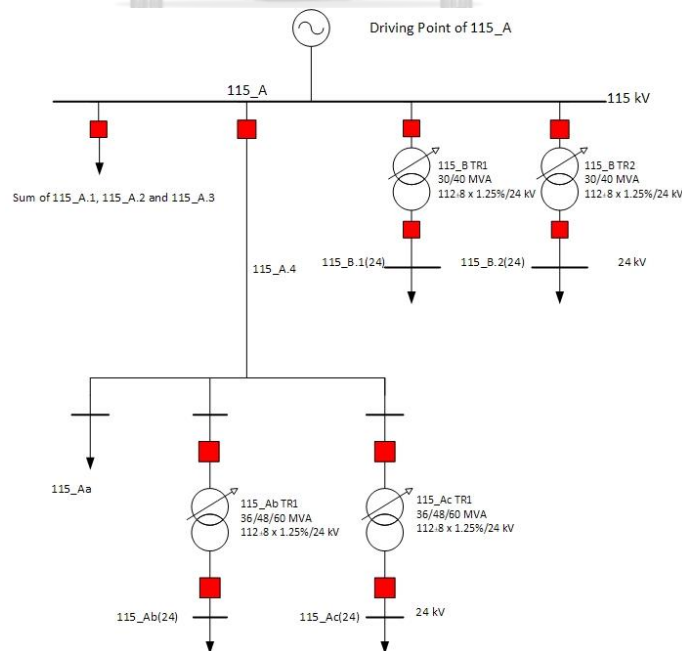
#### 4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไฟฟ้ากำลังของวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจากผลการทดสอบระบบจำหน่ายไฟฟ้า 3 แห่ง ของการไฟฟ้านครหลวง ได้แก่ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ที่ระดับแรงดัน 115 kV ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง ที่ระดับแรงดัน 24 kV และระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ ที่ระดับแรงดัน 230/400 V โดยในการทดสอบผู้วิจัยทำการจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ทำการทดสอบด้วยโปรแกรม DigSILENT PowerFactory ซึ่งมีข้อมูลที่จำเป็นต่อการจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า ดังนี้

##### 4.1.1 ข้อมูลโครงสร้างระบบจำหน่ายไฟฟ้า สถานีไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า และสายส่ง/สายจำหน่าย

###### 1) ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ระดับแรงดัน 115 kV ที่ผู้วิจัยใช้ในการทดสอบ เป็นระบบไฟฟ้าแห่งหนึ่งของการไฟฟ้านครหลวง ที่มีรูปแบบการจ่ายไฟฟ้าเป็นแบบเรเดียล (Radial) มีโครงสร้างของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.1



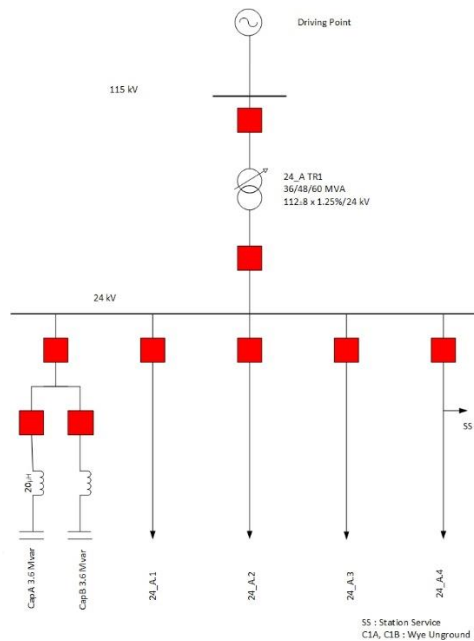
รูปที่ 4.1 Single Line Diagram ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ที่มีรูปแบบการจ่ายไฟฟ้าเป็นแบบเรเดียล ที่ระดับแรงดัน 115 kV ภายในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ประกอบด้วย สถานีไฟฟ้า 6 สถานี ได้แก่ 1.) 115\_A 2.) 115\_Ab(24) 3.) 115\_Ac(24) 4.) 115\_Aa 5.) 115\_B.1(24) และ 6.) 115\_B.2(24) และเนื่องด้วยสถานีไฟฟ้าทั้ง 6 สถานีดังกล่าว สามารถแบ่งรูปแบบการสร้างแบบจำลองสถานีไฟฟ้าได้เป็น 2 รูปแบบ คือ แบบจำลองสถานีไฟฟ้าต้นทาง 115\_A และแบบจำลองสถานีไฟฟ้าย่อยอีก 4 สถานี ผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองในแต่ละสถานีไฟฟ้าย่อยให้เป็นหม้อแปลงสถานีไฟฟ้า (HV/MV Transformer) เนื่องด้วยสถานีไฟฟ้าย่อยภายในจะประกอบไปด้วยหม้อแปลงสถานีไฟฟ้า โดยค่าพารามิเตอร์ของสถานีไฟฟ้าต้นทาง 115\_A และ หม้อแปลงสถานีไฟฟ้าจะแสดงไว้ใน *ภาคผนวก ก.* (ไม่มีค่าพารามิเตอร์ของสถานีไฟฟ้าย่อย 115\_Aa เนื่องจากการไฟฟ้านครหลวงไม่ได้เป็นเจ้าของสถานีไฟฟ้า)

ในส่วนถัดไปจะกล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ของสายส่งในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูงที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งจะเห็นว่าจากรูปที่ 4.1 สายส่ง 115\_A4 เป็นสายที่เชื่อมต่อระหว่างตำแหน่งบัสในสถานีไฟฟ้าต้นทาง 115\_A กับสถานีไฟฟ้าย่อยทั้งหมด 3 สถานี ได้แก่ สถานีไฟฟ้าย่อย 115\_Aa สถานีไฟฟ้าย่อย 115\_Ab(24) และสถานีไฟฟ้าย่อย 115\_Ac(24) ความยาวของสายส่งโดยรวมจากตำแหน่งบัสในสถานีไฟฟ้าต้นทาง 115\_A ไปยังสถานีไฟฟ้าย่อย 115\_Aa จะมีความยาวเท่ากับ 18.250 km ความยาวสายส่งโดยรวมจากตำแหน่งบัสในสถานีไฟฟ้าต้นทาง 115\_A ไปยังสถานีไฟฟ้าย่อย 115\_Ab(24) จะมีความยาวเท่ากับ 14.850 km และความยาวสายส่งโดยรวมจากตำแหน่งบัสในสถานีไฟฟ้าต้นทาง 115\_A ไปยังสถานีไฟฟ้าย่อย 115\_Ac(24) จะมีความยาวเท่ากับ 14.158 km ซึ่งชนิดของสายส่งที่เชื่อมต่ออยู่ระหว่างสถานีไฟฟ้าต้นทางและสถานีไฟฟ้าย่อยแต่ละแห่งนั้น จะมีชนิดและค่าพารามิเตอร์ของสายส่งดังแสดงใน *ภาคผนวก ก.*

## 2) ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง ระดับแรงดัน 24 kV ที่ผู้วิจัยใช้ในการทดสอบ เป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้าแห่งหนึ่งของการไฟฟ้านครหลวง ที่มีรูปแบบการจ่ายไฟฟ้าเป็นแบบเรเดียล (Radial) มีโครงสร้างของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 Single Line Diagram ของระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง ที่มีรูปแบบการจ่ายไฟฟ้าเป็นแบบเรเดียล ที่ระดับแรงดัน 24 kV โดยประกอบไปด้วย สถานีไฟฟ้าย่อย 1 สถานี

**หมายเหตุ: ค่าพารามิเตอร์สถานีไฟฟ้าย่อยและหม้อแปลงสถานีไฟฟ้า ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) จะแสดงไว้ใน ภาคผนวก ก.**

ทั้งนี้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) ที่ทำการทดสอบมีข้อมูลของจำนวนสายจำหน่ายมากกว่า 1 เส้น ที่ใช้เป็นเส้นทางหลักในการจ่ายไฟฟ้าจากหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบ ซึ่งลักษณะโครงสร้างของสายจำหน่ายสำหรับใช้ในการจ่ายไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลางนั้น จะแสดงไว้ในรูปที่ 4.3

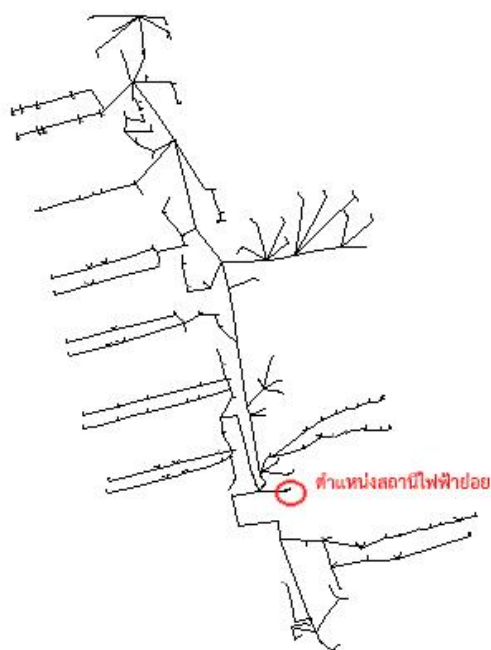


รูปที่ 4.3 โครงสร้างของสายจำหน่ายสำหรับการจ่ายไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)

จากรูปที่ 4.3 ได้แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของสายจำหน่ายสำหรับการจ่ายไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าที่เชื่อมต่อในตัวแทนระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) ซึ่งจำนวนสายจำหน่ายที่ติดตั้งในระบบนี้จะมีอยู่เป็นจำนวนมาก และชนิดของสายจำหน่ายที่การไฟฟ้านครหลวงใช้จะมีทั้งชนิดสายพาดอากาศ และ สายเคเบิลใต้ดิน ดังนั้นจะพบว่ามีหลากหลายของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลางนี้ ผู้วิจัยจึงขอละเอียดการแสดงค่าพารามิเตอร์ของสายจำหน่ายในตัวแทนระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)

### 3) ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V)

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ ระดับแรงดัน 230/400 V ที่ผู้วิจัยใช้ในการทดสอบ เป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้าแห่งหนึ่งของการไฟฟ้านครหลวง ที่มีรูปแบบการจ่ายไฟฟ้าเป็นแบบเรเดียล (Radial) มีโครงสร้างของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แผนภาพ Single Line Diagram ของระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V)

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ ที่มีรูปแบบการจ่ายไฟฟ้าเป็นแบบเรเดียล ที่ระดับแรงดัน 230/400 V โดยตำแหน่งต้นทางของระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำนี้ จะติดตั้งหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าเอาไว้สำหรับรับปริมาณกำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง 24 kV และลดระดับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับ 230/400 V ซึ่งผู้วิจัยได้จำลองหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้านี้ด้วยค่าพารามิเตอร์ ดังแสดงใน *ภาคผนวก ก*.

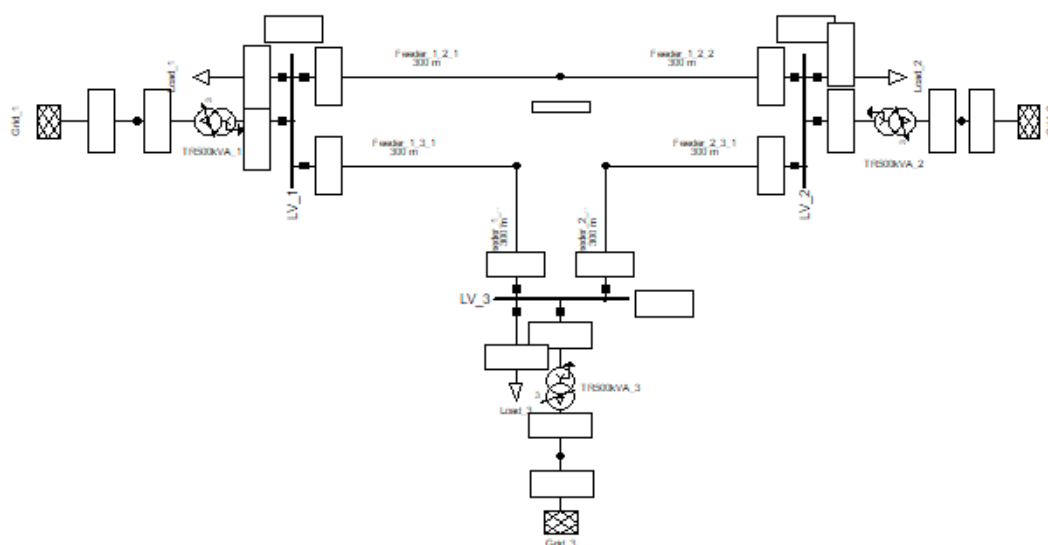
จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของสายจำหน่ายสำหรับการจ่ายไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำที่ใช้ทดสอบ ซึ่งจำนวนสายในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) นี้ มีอยู่เป็นจำนวนมากเช่นเดียวกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) แต่ประเภทของสายจำหน่ายที่การไฟฟ้านครหลวงใช้นั้นมีอยู่เพียงประเภทเดียวเท่านั้น คือ ประเภทสายพาดอากาศ โดยมีด้วยกัน 2 ชนิดคือ ชนิด MLINK3 และ 400AW185OH3

**หมายเหตุ:** ค่าพารามิเตอร์สายจำหน่าย ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) จะแสดงไว้ใน *ภาคผนวก ก*.

4) ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network)

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ ระดับแรงดัน 230/400 V ที่ผู้วิจัยใช้ในการทดสอบ เป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั่วไป (Typical System) ที่มีรูปแบบการจ่ายไฟฟ้าเป็นแบบโครงข่าย (Network) มีโครงสร้างของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.5





รูปที่ 4.5 โครงสร้างของระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network)

จากรูปที่ 4.5 แสดงระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ ที่มีรูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network) ที่มีการจำลองระบบเป็นแบบระบบไฟฟ้าทั่วไป (Typical System) โดยกำหนดให้จำนวนบัสในระบบมี 3 บัส และทุกบัสจะถูกเชื่อมต่อกันด้วยสายแรงต่ำประกอบกันในลักษณะรูปสามเหลี่ยม และแต่ละบัสจะมีการเชื่อมต่อหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้า และผู้ใช้ไฟฟ้า

**หมายเหตุ:** ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าและสายจำหน่าย ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network) จะแสดงไว้ในภาคผนวก ก.

#### 4.1.2 ข้อมูลฮาร์มอนิกเบื้องหลัง (Background Harmonic)

ในการจำลองระบบทดสอบผู้วิจัยมีกรณีทดสอบที่จำลองในส่วนของคุณค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง (Background Harmonic) ให้กับระบบทดสอบด้วย ซึ่งข้อมูลดังกล่าวผู้วิจัยใช้ข้อมูลจากการวัดข้อมูลแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งบัสต้นทางในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ในสภาวะก่อนที่จะติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ที่ทำการวัดข้อมูลในวันธรรมดา และวันหยุดสุดสัปดาห์ ที่เวลา 12.00 น. โดยจะเห็นถึงปริมาณที่เกี่ยวข้องกับแรงดันฮาร์มอนิก ได้แก่ ร้อยละความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม และร้อยละของแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ (ตั้งแต่ลำดับที่ 1 ถึง 49) โดยแบ่งข้อมูลตามระดับแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงใน ภาคผนวก ก. ใน

ส่วนของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network) จะไม่มีข้อมูลฮาร์โมนิกเบื้องหลัง (Background Harmonic) เนื่องจาก เป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั่วไป ที่ทำการจำลองขึ้นมาเพื่อทดสอบเพียงอย่างเดียว จึงไม่มีการวัดข้อมูลในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ทำการทดสอบนี้

#### 4.1.3 ข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์โมนิกจากอินเวอร์เตอร์

ผู้วิจัยได้ทำการจำลองรูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์โมนิกจากอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบทดสอบ โดยแบ่งการจ่ายกระแสฮาร์โมนิกจากอินเวอร์เตอร์ ออกเป็น 3 รูปแบบดังนี้

##### **รูปแบบที่ 1 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จ่ายกระแสฮาร์โมนิกตามเกณฑ์ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง**

การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกในรูปแบบนี้จะเป็นการจ่ายกระแสฮาร์โมนิกตามเกณฑ์ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง พ.ศ. 2558 ซึ่งผู้วิจัยจะใช้ในการทดสอบทั้งในระบบไฟฟ้าแรงดันสูง แรงดันปานกลาง แรงดันต่ำ และแรงดันต่ำ รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network) ซึ่งสามารถแสดงค่ากระแสฮาร์โมนิกแต่ละลำดับเทียบกับค่าพิกัดกระแสของอินเวอร์เตอร์ได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์โมนิกตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง พ.ศ.2558

ลำดับที่	ขนาดการจ่ายกระแส (%)	ลำดับคู่	ขนาดการจ่ายกระแส (%)
3-9	4.0	2-10	1.0
11-15	2.0	12-16	0.5
17-21	1.5	18-22	0.375
23-33	0.6	24-34	0.15
≥35	0.3	≥36	0.075
<b>ความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกรวม (THDi) 5.0%</b>			
<b>หมายเหตุ แสดงค่าเป็นร้อยละเทียบกับกระแสพิกัดของอินเวอร์เตอร์</b>			

**รูปแบบที่ 2 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จ่ายกระแสฮาร์มอนิกตามเกณฑ์ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง โดยปรับปริมาณกระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับให้มีผลรวมความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมที่ 5%**

การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบนี้จะเป็นการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกตามเกณฑ์ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง พ.ศ. 2558 โดยปรับปริมาณกระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับให้มีผลรวมความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 5% ซึ่งผู้วิจัยจะใช้ในการทดสอบทั้งในระบบไฟฟ้าแรงดันสูง แรงดันปานกลาง แรงดันต่ำ และแรงดันต่ำ รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network) ซึ่งสามารถแสดงค่ากระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับเทียบกับค่าพิกัดกระแสของอินเวอร์เตอร์ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกตามข้อกำหนดฯ ปรับปริมาณกระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับให้มีผลรวมความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 5%

ลำดับที่	ขนาดการจ่ายกระแส (%)	ลำดับคู่	ขนาดการจ่ายกระแส (%)
3-9	2.0854	2-10	0.5213
11-15	1.0427	12-16	0.2607
17-21	0.7802	18-22	0.1955
23-33	0.3128	24-34	0.0782
≥35	0.1564	≥36	0.0391
ความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (THDi) 5.0%			
หมายเหตุ แสดงค่าเป็น%เทียบกับกระแสพิกัดของอินเวอร์เตอร์			

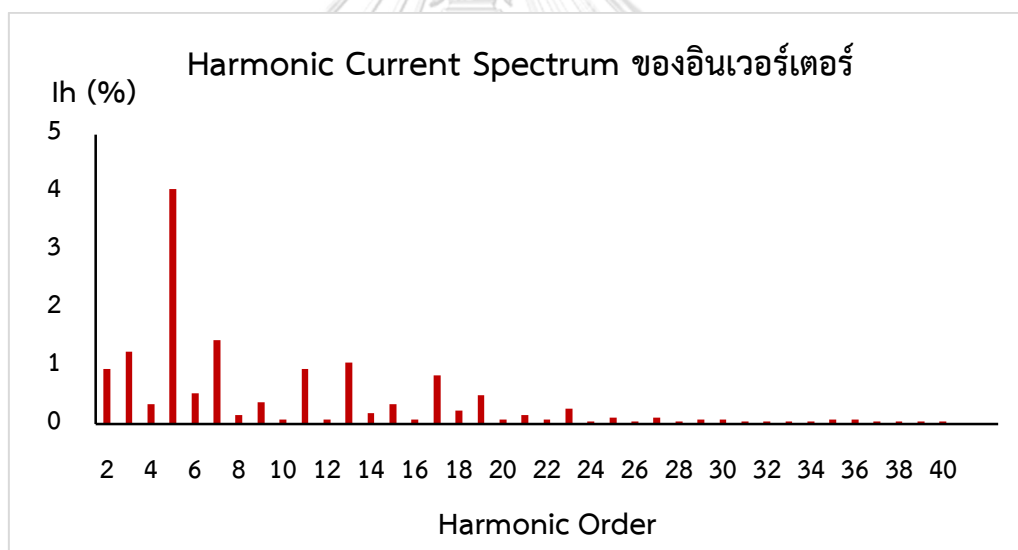
**รูปแบบที่ 3 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จ่ายกระแสฮาร์มอนิกจามข้อมูลการทดสอบอินเวอร์เตอร์จากบริษัทผู้ผลิตอินเวอร์เตอร์ โดยปรับปริมาณกระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับให้มีผลรวมความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 5%**

การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์รูปแบบที่ 3 นั้น จะอ้างอิงจากอินเวอร์เตอร์ที่ได้รับอนุญาตให้เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าในระดับแรงดันสูง แรงดันปานกลาง แรงดันต่ำ และแรงดันต่ำ รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network) ของการไฟฟ้า

นครหลวง ซึ่งแสดงการจ่ายกระแสฮาร์โมนิกแต่ละลำดับของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์รูปแบบที่ 3 โดยแบ่งตามระบบไฟฟ้าที่ทำการทดสอบได้ดังนี้

(1) ระบบไฟฟ้าแรงดันสูง และ แรงดันปานกลาง

ผู้วิจัยจะพิจารณาการจ่ายกระแสฮาร์โมนิกแต่ละลำดับของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากอินเวอร์เตอร์ประเภท 3 เฟส รุ่น Conext TL 20000 E ของบริษัท Schneider Electric ซึ่งผู้วิจัยจะเลือกข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์โมนิกแต่ละลำดับตามข้อมูลการทดสอบที่การจ่ายกระแสไฟฟ้า 100% ในเฟสที่มีผลรวมร้อยละความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกรวมสูงที่สุด และปรับเพิ่มค่ากระแสฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ จนกระทั่งมีค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกรวมเท่ากับ 5% ซึ่งในการเลือกข้อมูลจากการทดสอบอินเวอร์เตอร์ที่การจ่ายกระแสไฟฟ้า 100% เนื่องจากจะให้ข้อมูลการจ่ายกระแสจากอินเวอร์เตอร์ที่มากที่สุด ซึ่งผู้วิจัยต้องการวิเคราะห์ผลการทดสอบจากกรณีที่แย่ที่สุดที่สามารถจะเกิดขึ้นได้กับระบบที่ทำการทดสอบ ซึ่งแสดงสเปคตรัมการจ่ายกระแสฮาร์โมนิกจากอินเวอร์เตอร์ได้ดังรูปที่ 4.6

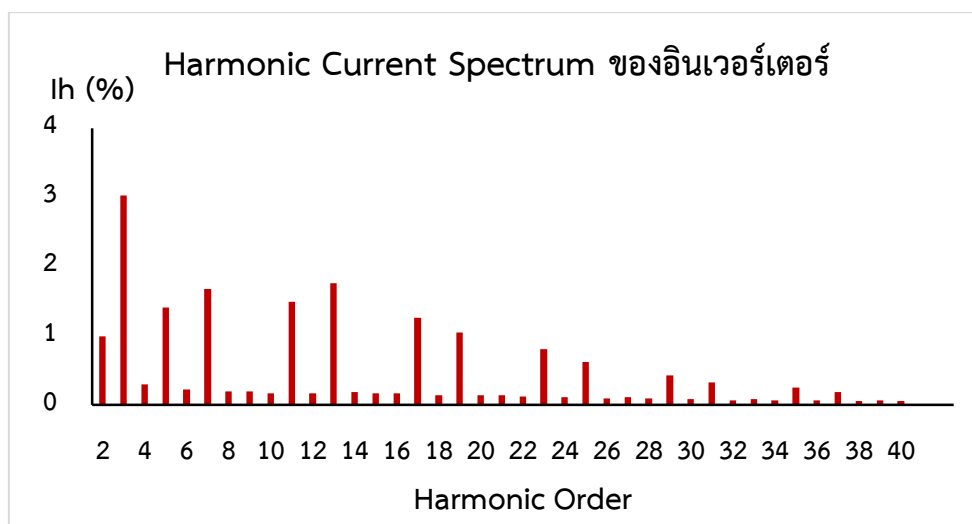


รูปที่ 4.6 Harmonic Current Spectrum ของการจ่ายกระแสฮาร์โมนิกรูปแบบที่ 3 (แรงดันสูง 115 kV และแรงดันปานกลาง 24 kV)

(2) ระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ และแรงดันต่ำ รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network)

ผู้วิจัยจะพิจารณาการจ่ายกระแสฮาร์โมนิกแต่ละลำดับของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากอินเวอร์เตอร์ประเภท 3 เฟส รุ่น SUN2000-12KTL ของบริษัท HUAWEI ซึ่งผู้วิจัยจะเลือกข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์โมนิกแต่ละลำดับตามข้อมูลการทดสอบที่การจ่ายกระแสไฟฟ้า 100% ในเฟสที่มีผลรวมร้อยละความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกรวมสูงที่สุด และปรับเพิ่มค่ากระแสฮาร์โมนิกแต่

ละลำดับ จนกระทั่งมีค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 5% ซึ่งในการเลือกข้อมูลจากการทดสอบอินเวอร์เตอร์ที่การจ่ายกระแสไฟฟ้า 100% เนื่องจากจะให้ข้อมูลการจ่ายกระแสจากอินเวอร์เตอร์ที่มากที่สุด ซึ่งผู้วิจัยต้องการวิเคราะห์ผลการทดสอบจากกรณีที่แย่ที่สุดที่สามารถจะเกิดขึ้นได้กับระบบที่ทำการทดสอบ ซึ่งแสดงสเปคตรัมการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์ได้ ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 Harmonic Current Spectrum ของการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 3 (แรงดันต่ำ 230/400V, Radial + Network)

หมายเหตุ : ตารางข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์ รูปแบบที่ 3 ของระบบไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) แรงดันปานกลาง (24 kV) แรงดันต่ำ (230/400 V) และแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network) จะแสดงไว้ใน ภาคผนวก ก.

#### 4.1.4 ข้อมูลตัวเก็บประจุ (Capacitor)

ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ผู้วิจัยนำมาทดสอบนี้ ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) และแรงดันต่ำ (230/400 V) จะไม่พบอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งก็คือ ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ในระบบ แต่จะพบอยู่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) ถูกติดตั้งแบบ 3 เฟส Wyed-Neutral (3PH-YN) โดยกระจายไปในแต่ละช่วงของสายจำหน่าย เพื่อช่วยยกระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบนับตั้งแต่นั้นที่จุดเชื่อมต่อตัวเก็บประจุเป็นต้นไปให้มีค่าสูงขึ้น ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของตัวเก็บประจุในระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง

ตัวเก็บประจุ	ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า (kVar)	ค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้า (kV)	ชนิดการควบคุม
Cap180_134	600	24	Fixed
Cap180_141	600	24	Fixed
Cap180_148	600	24	Fixed
Cap180_42083	600	24	Fixed
Cap180_44273	600	24	Fixed
Cap180_44276	600	24	Fixed
Cap180_58051	600	24	Switching

#### 4.1.5 ข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า

ผู้วิจัยนำข้อมูลที่ได้รับจากการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งเป็นข้อมูลลักษณะเป็นช่วงเวลาของพฤติกรรมการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในแต่ละประเภทตามอัตราค่าไฟฟ้าที่มีความละเอียดของข้อมูลคิดเป็นราย 10 นาที, 15 นาที และ 1 ชั่วโมง มาใช้ในการทดสอบระบบ

ข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้ายราย 10 นาที เป็นข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้า (Power Quality Meter : PQ Meter) ที่การไฟฟ้านครหลวงได้ทำการตรวจวัดที่หม้อแปลงไฟฟ้าที่ติดตั้ง ณ ตำแหน่งต้นทางในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) และแรงดันปานกลาง (24 kV)

ข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้ายราย 15 นาที โดยเป็นข้อมูลที่ได้จากการนำข้อมูลบิลค่าไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้ามาจับคู่ให้ตรงกับข้อมูลสถิติการศึกษาลักษณะการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในแต่ละประเภทของการไฟฟ้านครหลวง ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24kV) และแรงดันต่ำ (230/400 V)

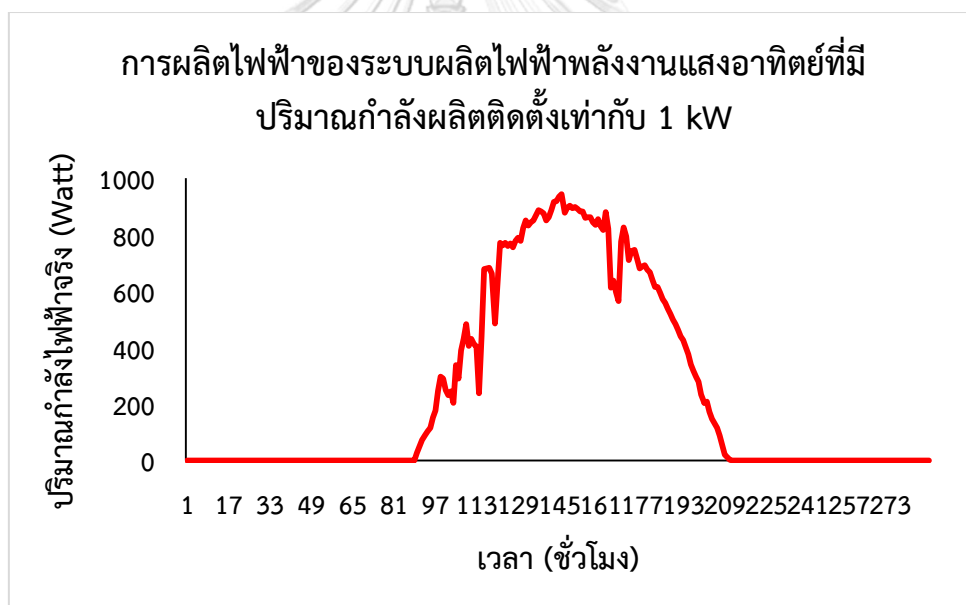
และข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้ายราย 1 ชั่วโมงเป็นข้อมูลที่ได้จากฐานข้อมูลการตรวจวัดค่าความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าของศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้า (Power System Control Center) โดยศูนย์ควบคุมฯ จะใช้ระบบ Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) ในการเก็บและบันทึกข้อมูล จากการไฟฟ้านครหลวง โดยเป็นข้อมูลในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง สถานีไฟฟ้าต้นทาง 115\_A

ทั้งนี้ ในส่วนของข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network) ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าเท่ากับ 15% ของพิกัดหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าต้นทาง ซึ่งเท่ากับ 75 kW โดยเชื่อมต่อที่บัสทั้ง 3 บัส ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ทำการทดสอบ

**หมายเหตุ :** สำหรับตารางข้อมูลการความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า ในแต่ละระดับแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ จะแสดงไว้ใน ภาคผนวก ก.

#### 4.1.6 ข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

การสร้างแบบจำลองการผลิตระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ผู้วิจัยได้นำข้อมูลการผลิตไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อ ณ ชั้นตาดฟ้า อาคารเจริญวิศวกรรม (ตึก 4) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มาใช้ในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งข้อมูลการผลิตไฟฟ้านี้จะมีความละเอียดคิดเป็นราย 5 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แบบจำลองการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

จากรูปที่ 4.8 ได้แสดงให้เห็นถึงการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีปริมาณกำลังผลิตติดตั้งเท่ากับ 1 kW กล่าวคือ ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จะผลิตปริมาณกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ 1 kW ซึ่งจากรูปได้แสดงช่วงเวลาที่ทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่า 90% ของปริมาณกำลังผลิตติดตั้ง โดยจะเริ่มตั้งแต่ 11.00 น. ถึง 14.00 น. ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวจะมีนัยสำคัญต่อการเกิดผลกระทบต่อระบบไฟฟ้ามาก ถ้าหาก

ระบบมีตำแหน่งผู้ใช้ไฟฟ้าใกล้เคียงกับตำแหน่งติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และผู้ใช้ไฟฟ้าที่ตำแหน่งนั้นมีความต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำสุดเกิดในช่วงเวลานี้

ผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ จะอ้างอิงตามขีดจำกัดของปริมาณกำลังผลิตติดตั้งในข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าในแต่ละระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ดังที่ผู้วิจัยจะได้กล่าวไว้ในส่วนถัดไป และสำหรับข้อมูลตำแหน่งติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ผู้วิจัยจะทำการติดตั้ง ณ ตำแหน่งปลายสายของระบบในระบบไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) แรงดันปานกลาง (24 kV) และแรงดันต่ำ (230/400 V) และติดตั้ง ณ ช่วงบริเวณกึ่งกลางสาย ในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network) โดยเป็นตำแหน่งที่จะทำให้เกิดผลกระทบด้านฮาร์มอนิกเลวร้ายมากที่สุด เนื่องจากยิ่งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีตำแหน่งการเชื่อมต่อห่างไกลจากสถานีไฟฟ้าต้นทางมากเท่าไร ก็จะมีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดผลกระทบด้านฮาร์มอนิกต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้มากขึ้นเท่านั้น

ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการสรุปปริมาณกำลังผลิตติดตั้ง และ ตำแหน่งการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ใช้ในการทดสอบ โดยแบ่งตามระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทำการทดสอบ ดังนี้

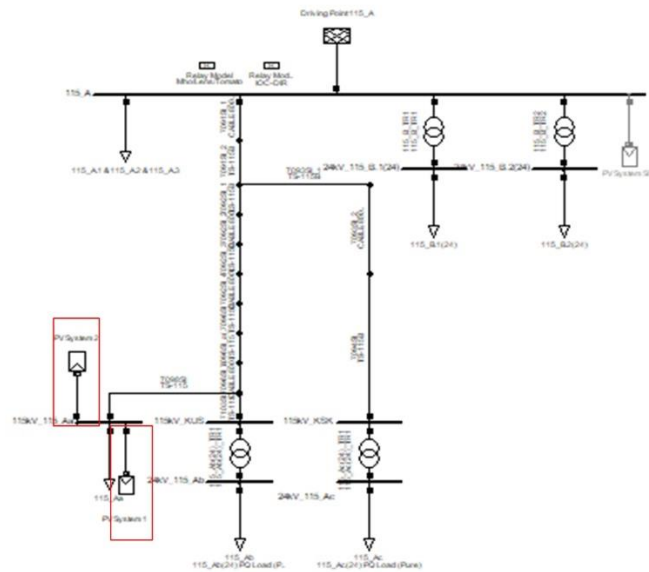
#### 1) ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)

ตารางที่ 4.4 สรุปปริมาณกำลังผลิตติดตั้งและตำแหน่งเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)

ปริมาณกำลังผลิตติดตั้ง (MW/ระบบ)	จำนวนระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	Feeder ที่เชื่อมต่อ	ตำแหน่งเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์
90	2	115_A4	บัส 115_Aa

จากตารางที่ 4.4 ได้แสดงให้เห็นว่าผู้วิจัยทำการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า สถานีไฟฟ้าต้นทาง 115\_A รวม 180 MW โดยแบ่งออกเป็น 2 ระบบ ระบบละ 90 MW ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อฯ ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกพิจารณาให้ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ทั้ง 2 ระบบ เชื่อมต่อที่ตำแหน่งบัส 115\_Aa ดังรูปที่ 4.9





รูปที่ 4.9 แสดงตำแหน่งการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115kV) ในโปรแกรม DIgSILENT PowerFactory

## 2) ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)

ตารางที่ 4.5 สรุปปริมาณกำลังผลิตติดตั้งและตำแหน่งเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง

ปริมาณกำลังผลิตติดตั้ง (MW/ระบบ)	จำนวนระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	Feeder ที่เชื่อมต่อ	ตำแหน่งเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์
1	8	24_A.2	196_1512896
1	4	24_A.1	197_9089_C

จากตารางที่ 4.5 ได้แสดงให้เห็นว่าผู้วิจัยทำการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไฟฟ้าแรงดันปานกลาง รวม 12 MW ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อ กำหนดปริมาณกำลังผลิตติดตั้ง 20% ของขนาดพิกัดหม้อแปลงต้นทาง และแบ่งติดตั้ง 12 ระบบ ระบบละ 1 MW ตามข้อจำกัดของข้อมูลหม้อแปลงของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดย 8 ระบบแรกจะเชื่อมต่อที่ปลายสายป้อน 24\_A.2 ที่ตำแหน่ง 196\_1512896 ซึ่งมีความยาวสายมากกว่าสายป้อน 24\_A.1 ซึ่งจะติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้า 4 ระบบที่ตำแหน่ง 197\_9089\_C ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงตำแหน่งการเชื่อมต่อบรรบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) ในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

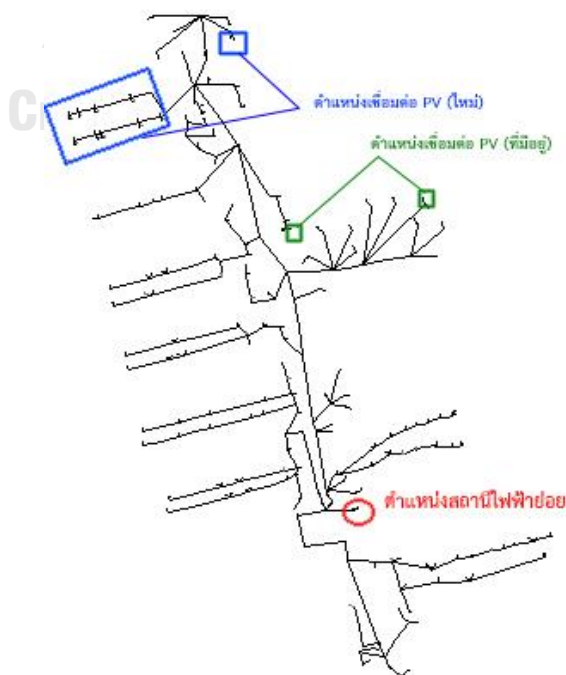
### 3) ระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ

ตารางที่ 4.6 สรุปปริมาณกำลังผลิตติดตั้งและตำแหน่งเชื่อมต่อบรรบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ

ปริมาณกำลังผลิตติดตั้ง (kW/ระบบ)	จำนวนระบบผลิตไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์	ตำแหน่งเชื่อมต่อบรรบบผลิตไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์
10	9	196_658288
		2562_694931
		196_658294
		2562_695372
		2562_695447
		2562_696252

ปริมาณกำลังผลิตติดตั้ง (kW/ระบบ)	จำนวนระบบผลิตไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์	ตำแหน่งเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์
		2562_696481 196_658290 2529_1633548
9.8	1	196_658283
9.9*	1	196_658061
2.8*	1	2529_3899046

จากตารางที่ 4.6 ได้แสดงให้เห็นว่าผู้วิจัยทำการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ มีปริมาณกำลังผลิตติดตั้งรวม 112.5 kW ตามข้อกำหนดปริมาณกำลังผลิตติดตั้ง 15% ของขนาดพิกัดหม้อแปลงจำหน่าย ซึ่งมีขนาด 750 kVA และแบ่งติดตั้ง 12 ระบบ โดย 10 ระบบแรก มีขนาด 10 kW 9 ระบบ และ 9.8 kW 1 ระบบ เชื่อมต่อที่ปลายสายจำหน่าย และอีก 2 ระบบ ขนาด 9.9 kW และ 2.8 kW คือ ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอยู่แต่เดิมในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ ซึ่งแสดงตำแหน่งการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 4.11



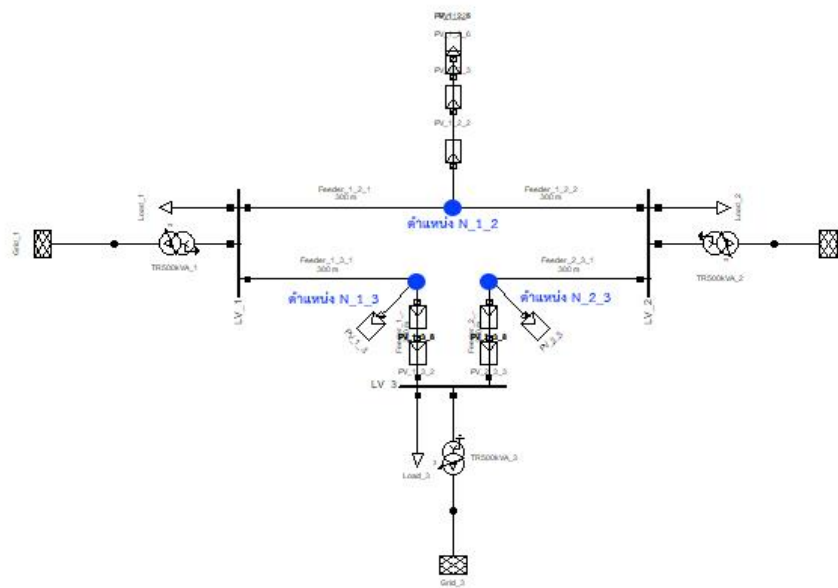
รูปที่ 4.11 แสดงตำแหน่งการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) ในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

4) ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network)

ตารางที่ 4.7 สรุปปริมาณกำลังผลิตติดตั้งและตำแหน่งเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network)

ปริมาณกำลังผลิตติดตั้ง (kW/ระบบ)	จำนวนระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์	ตำแหน่งเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์
10	21	N_1_2 N_1_3 N_2_3
5	3	N_1_2 N_1_3 N_2_3

จากตารางที่ 4.7 ได้แสดงให้เห็นว่าผู้วิจัยทำการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network) มีปริมาณกำลังผลิตติดตั้งรวม 225 kW (ต่อจำนวนสายเชื่อมต่อบัส 3 สาย) ตามข้อกำหนดปริมาณกำลังผลิตติดตั้ง 15% ของขนาดพิกัดหม้อแปลงจำหน่าย ซึ่งมีขนาด 500 kVA (ต่อ 1 ลูก ติดตั้ง 3 ลูก ตามจำนวนบัสของระบบ) และแบ่งติดตั้ง 24 ระบบ โดย 21 ระบบแรก มีขนาด 10 kW (โดยแบ่งติดตั้งกลางสายสายละ 7 ระบบ) และอีก 3 ระบบ ขนาด 5 kW (โดยแบ่งติดตั้งกลางสายสายละ 1 ระบบ) ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แสดงตำแหน่งการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network) ในโปรแกรม DIGSILENT

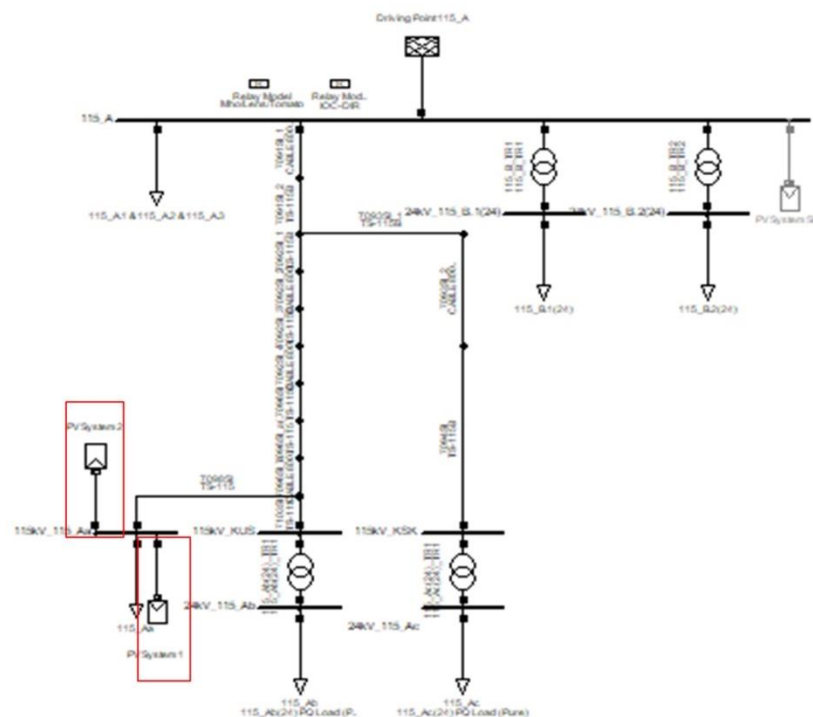
PowerFactory

## บทที่ 5

### ตัวอย่าง การวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิก

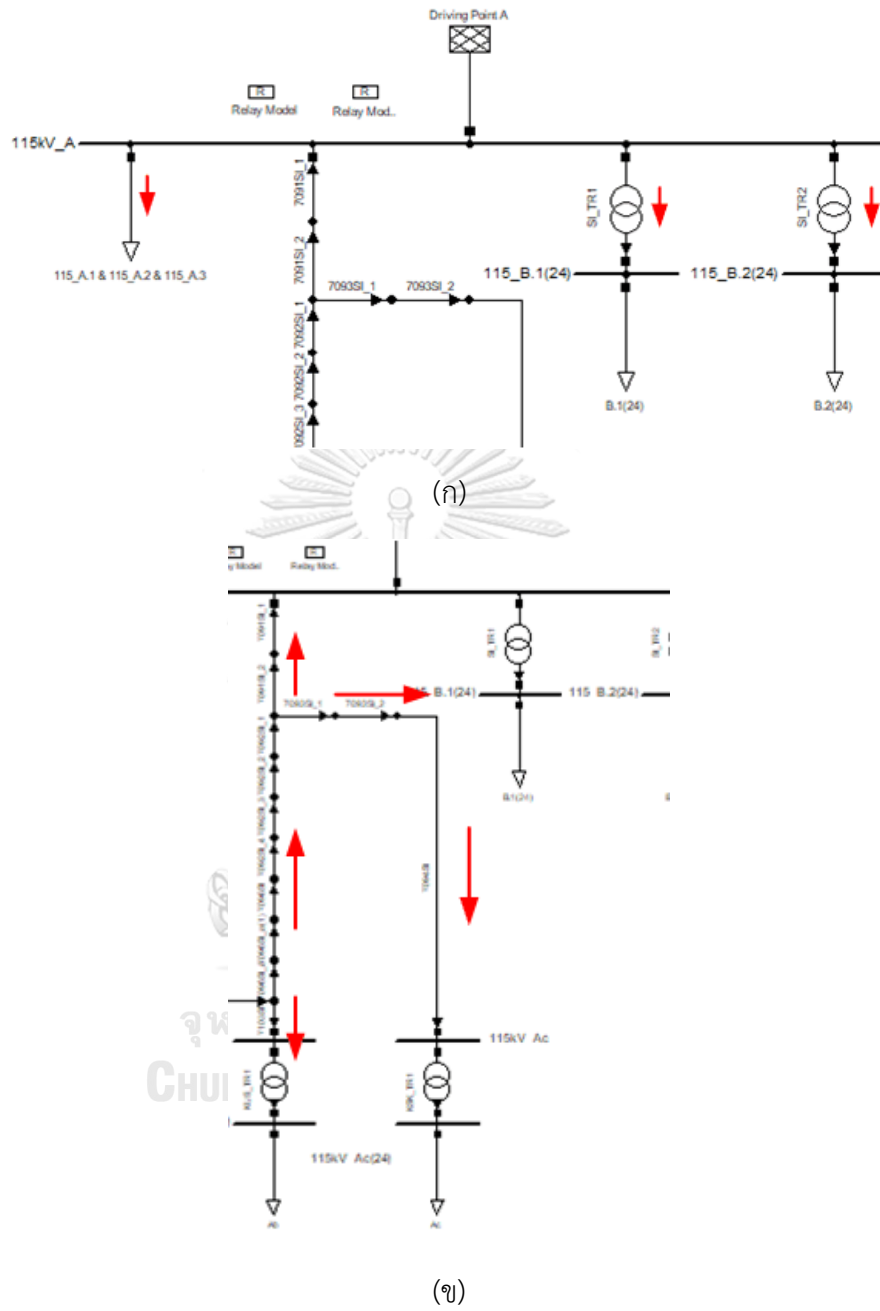
ในบทนี้จะเสนอตัวอย่างการวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิก ของระบบทดสอบ โดยแสดงเป็นแผนภาพทิศทางกรไหลของกระแสฮาร์มอนิกของแต่ละระบบทดสอบ ด้วยการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่มูลฐานกับการไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่มีการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกค่าสูงที่สุดของแต่ละระบบทดสอบ ซึ่งในการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกจะทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

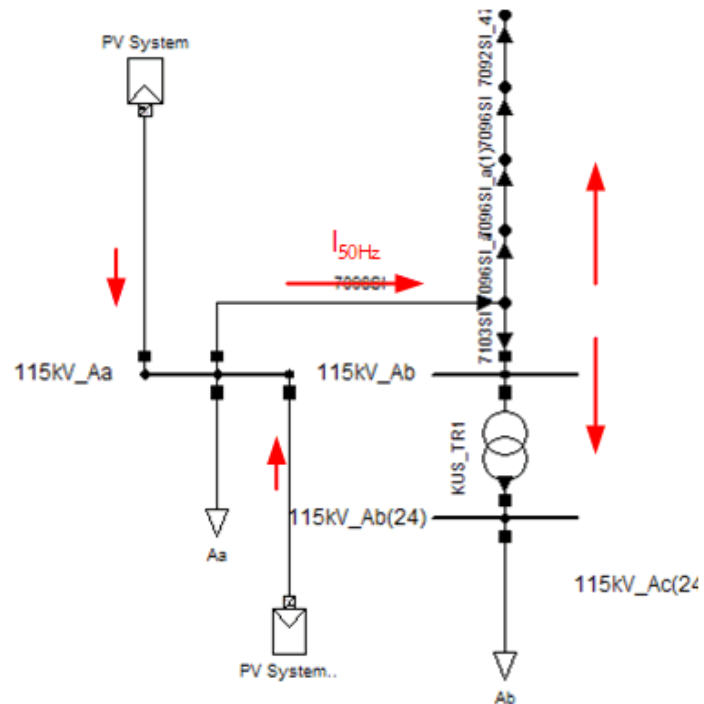
#### 5.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)



รูปที่ 5.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) ในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

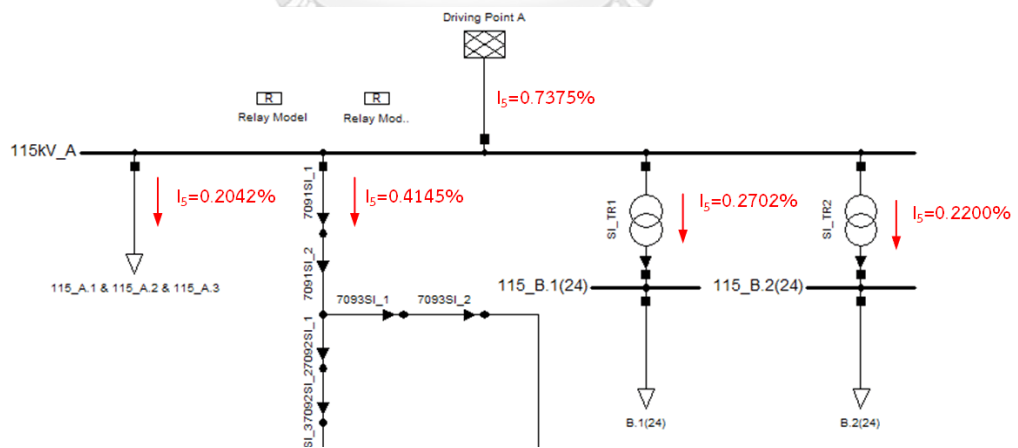
จากรูปที่ 5.1 โครงสร้างระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) มีจำนวนบัสทั้งหมด 19 บัส ทำการวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิก ของข้อมูลวันหยุดสุดสัปดาห์ ที่เวลา 12:00 น. โดยอินเวอร์เตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จ่ายกระแสฮาร์มอนิกแบบที่ 3 (ข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์ แสดงไว้ใน **บทที่ 4** หัวข้อ **4.1.3 ข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์**) มีลักษณะการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่มูลฐานและลำดับที่ 5 ( $I_5$ ) ดังรูปที่ 5.3





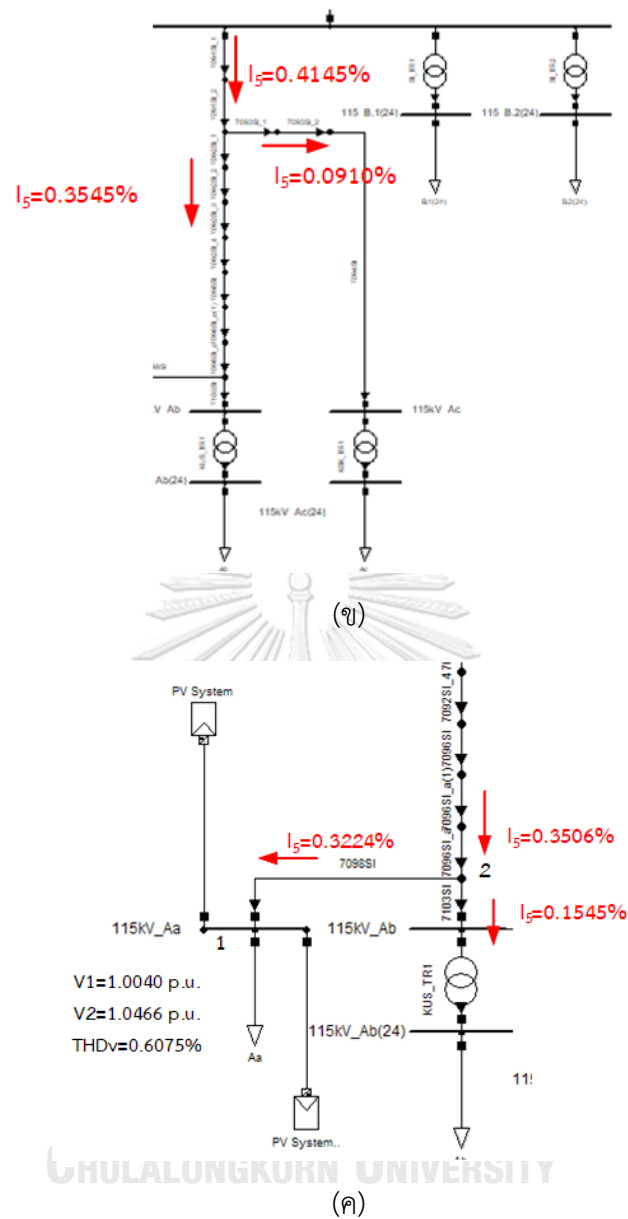
(ค)

รูปที่ 5.2 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่มูลฐาน (50 Hz) ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 KV)



(ก)





รูปที่ 5.3 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)

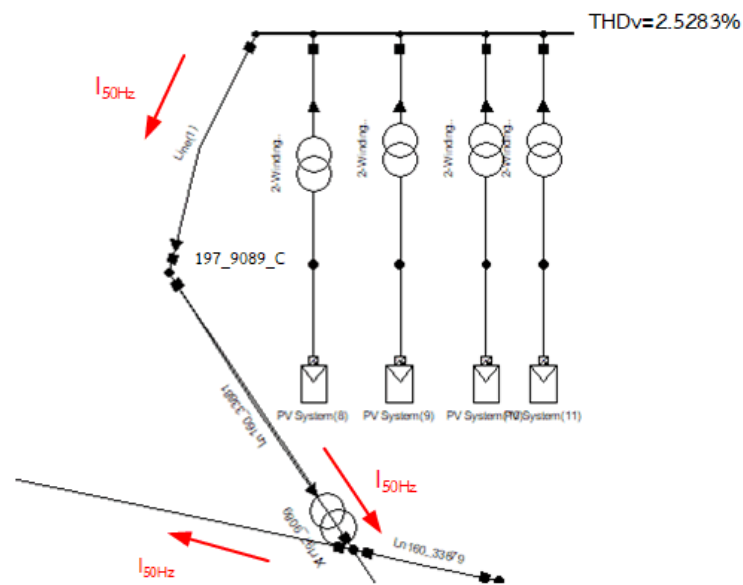
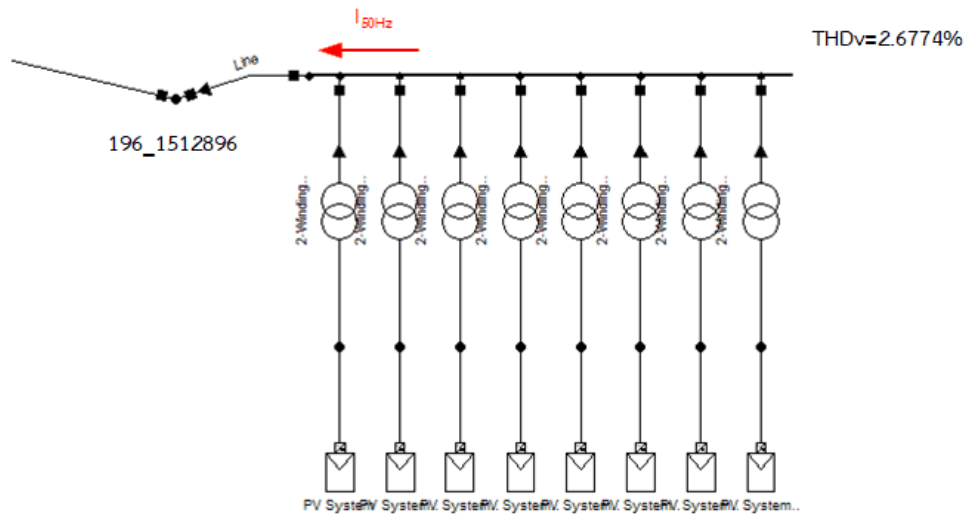
จากรูปที่ 5.2 (ก), (ข) และ (ค) แสดงการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่มูลฐาน ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) ที่การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 3 ทางผู้วิจัยทำการแบ่งระบบออกเป็น 3 รูปย่อย เพื่อให้เห็นถึงทิศทางการไหลของกระแสฮาร์มอนิก เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 5.3 (ก), (ข) และ (ค) ที่แสดงการไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 จะพบว่า ที่ความถี่มูลฐานกระแสจะไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับที่ความถี่ฮาร์มอนิกลำดับ 5 ที่มีค่ากระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 เท่ากับ 0.3224%

## 5.2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)



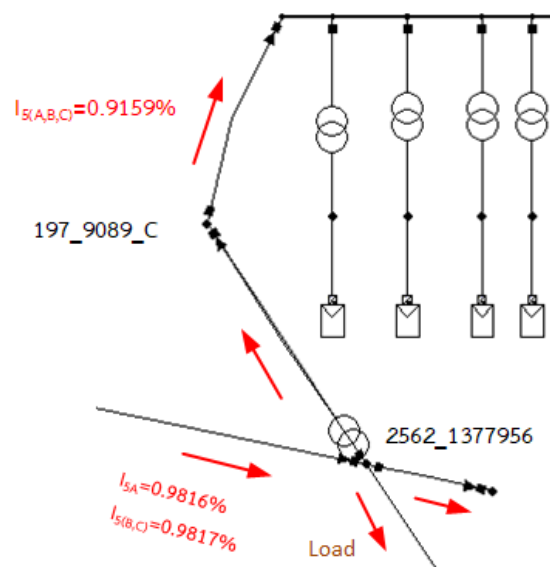
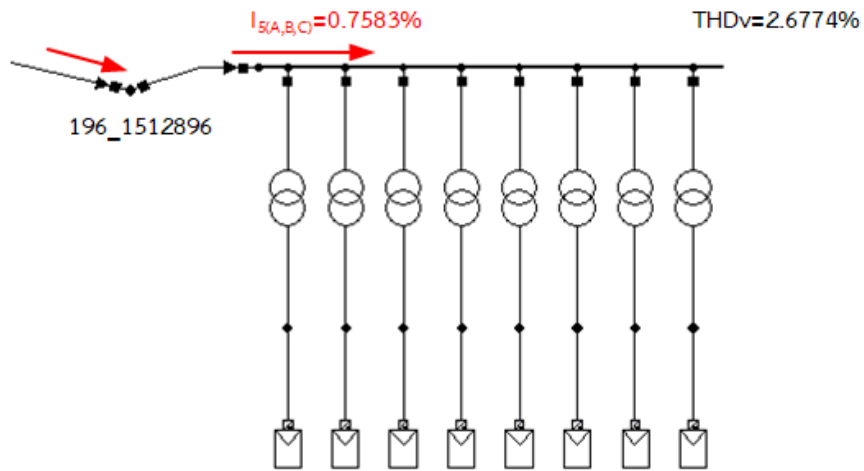
รูปที่ 5.4 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) ในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

จากรูปที่ 5.4 โครงสร้างระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) มีจำนวนบัสทั้งหมด 1,176 บัส ทำการวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิก ของข้อมูลวันหยุดสุดสัปดาห์ ที่เวลา 12:00 น. โดยอินเวอร์เตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 3 (ข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์ แสดงไว้ใน **บทที่ 4** หัวข้อ **4.1.3 ข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์**) มีลักษณะการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่มูลฐานและลำดับที่ 5 (I<sub>5</sub>) ดังรูปที่ 5.5 และ รูปที่ 5.6



(ข)

รูปที่ 5.5 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่มูลฐาน ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)



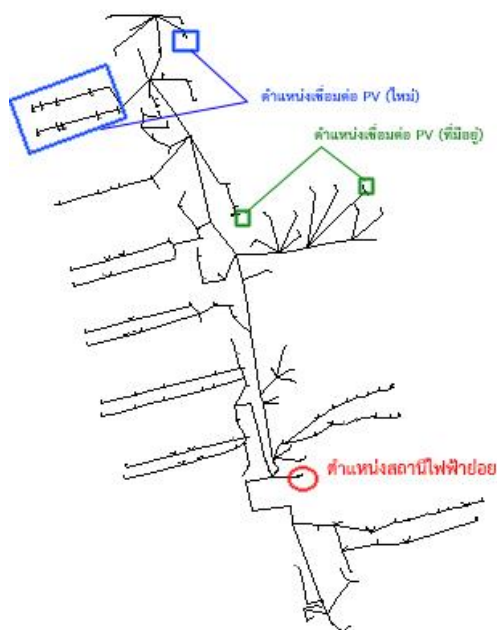
(ข)

รูปที่ 5.6 การไหลของกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 5 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)

จากรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 แสดงการไหลของกระแสฮาร์โมนิกที่ความถี่มูลฐานและฮาร์โมนิกลำดับที่ 5 ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) ที่การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกรูปแบบที่ 3 ทางผู้วิจัยทำการแบ่งระบบออกเป็น 2 รูปย่อย เพื่อให้เห็นถึงทิศทางการไหลของกระแสฮาร์โมนิก จะเห็นได้ว่าที่ความถี่มูลฐาน กระแสฮาร์โมนิกจะไหลในทิศทางตรงข้ามกับการไหลของกระแสฮาร์โมนิกลำดับที่ 5 และทั้งนี้จากระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลางที่มีจำนวนบัสอยู่

มาก ผู้วิจัยจึงแสดงการไหลของกระแสฮาร์มอนิกในบริเวณที่มีการเชื่อมต่อบรรยากาศไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และบริเวณใกล้เคียงเท่านั้น

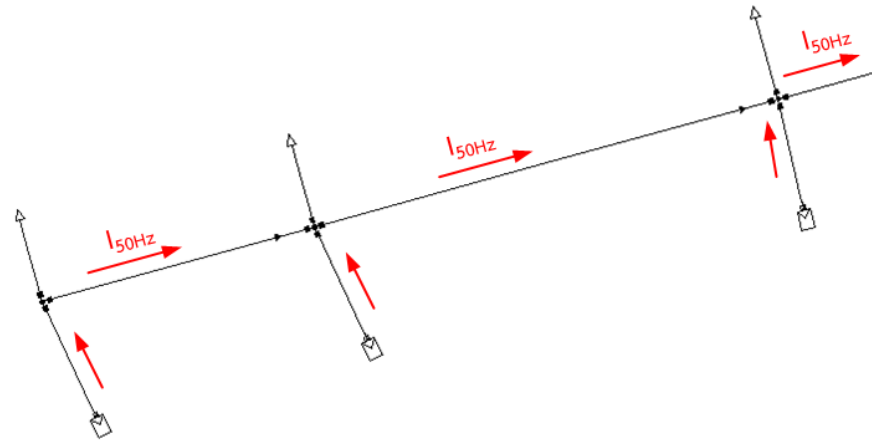
### 5.3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400V-Radial)



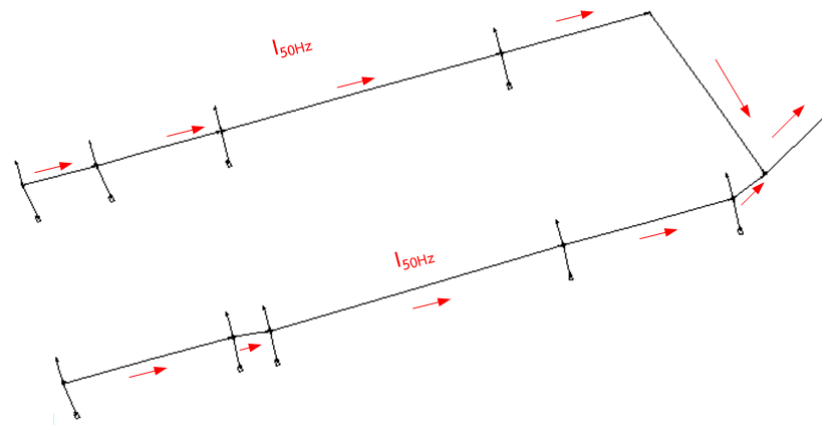
รูปที่ 5.7 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V-Radial) ในโปรแกรม DigSILENT

PowerFactory

จากรูปที่ 5.7 โครงสร้างระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V-Radial) มีจำนวนบัสทั้งหมด 192 บัส ทำการวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิก ของข้อมูลวันหยุดสุดสัปดาห์ ที่เวลา 12:00 น. โดยอินเวอร์เตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จ่ายกระแสฮาร์มอนิกแบบที่ 3 (ข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์ แสดงไว้ใน **บทที่ 4 หัวข้อ 4.1.3 ข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์**) มีลักษณะการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่มูลฐานและลำดับที่ 5 (1<sub>5</sub>) ดังรูปที่ 5.8 และ รูปที่ 5.9

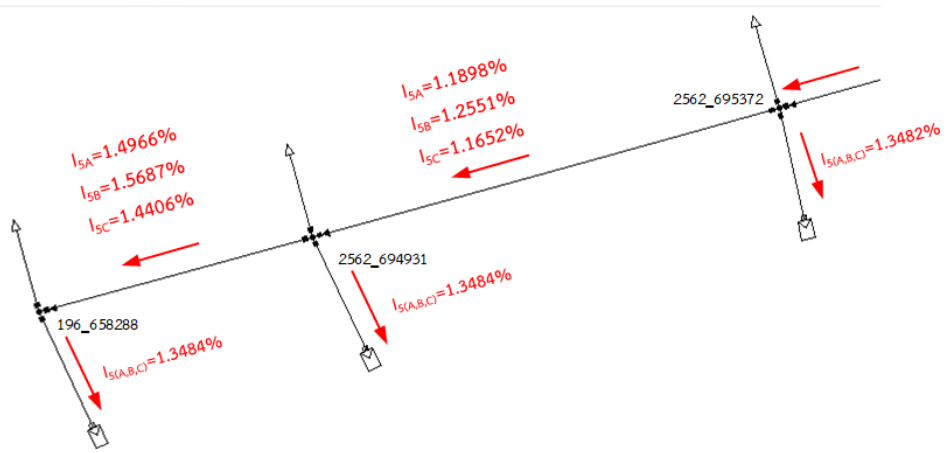


(ก)

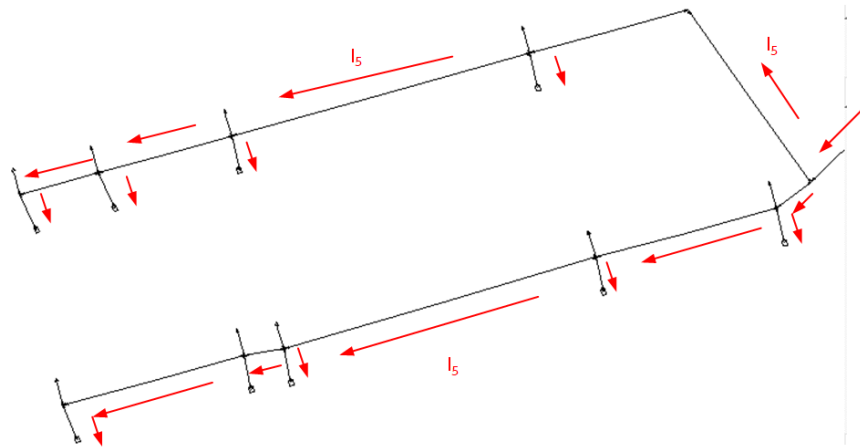


(ข)

รูปที่ 5.8 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่มีความถี่มูลฐาน ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V-Radial)



(ก)

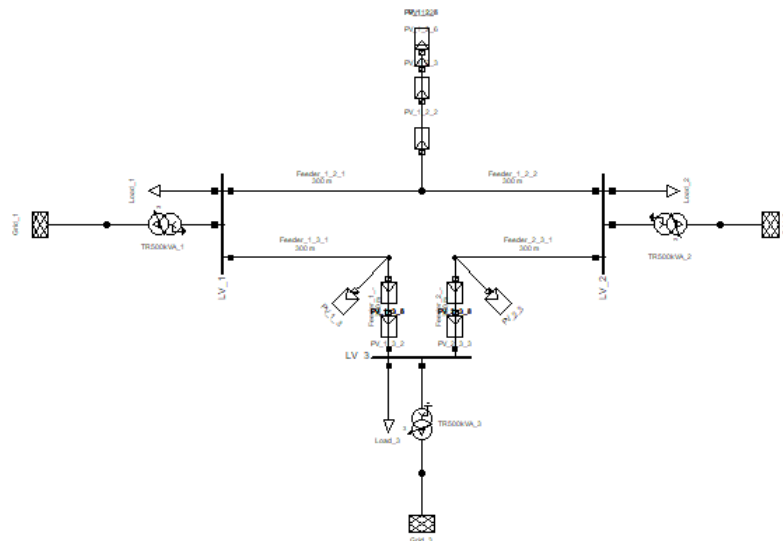


(จ)

รูปที่ 5.9 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V-  
Radial)

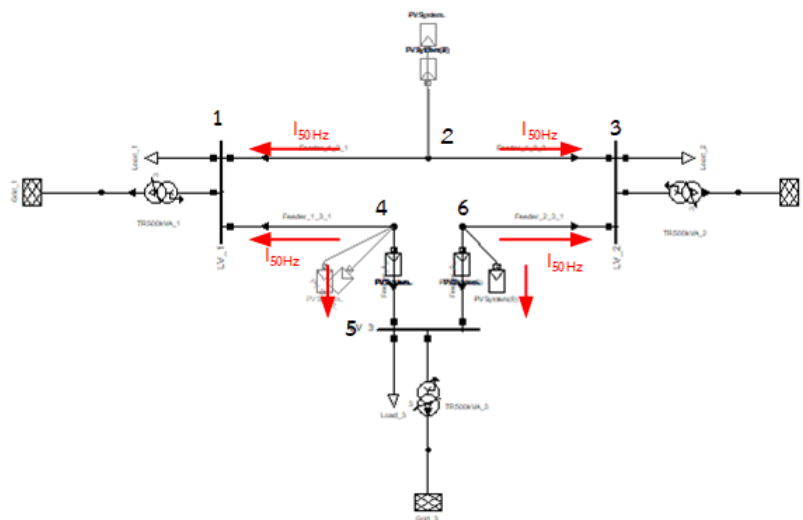
จากรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 แสดงทิศทางการไหลของกระแสฮาร์มอนิก จากการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์รูปแบบที่ 3 โดยในรูปที่ 5.8 เป็นทิศทางการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่มูลฐาน จะเห็นว่าทิศทางการไหลของกระแสจะไหลจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบ ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ดังรูปที่ 5.9 ทั้งนี้จากระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำที่มีจำนวนบัสอยู่มาก ผู้วิจัยจึงแสดงการไหลของกระแสฮาร์มอนิกในบริเวณที่มีการเชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และบริเวณใกล้เคียงเท่านั้น

#### 5.4 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400V-Network)



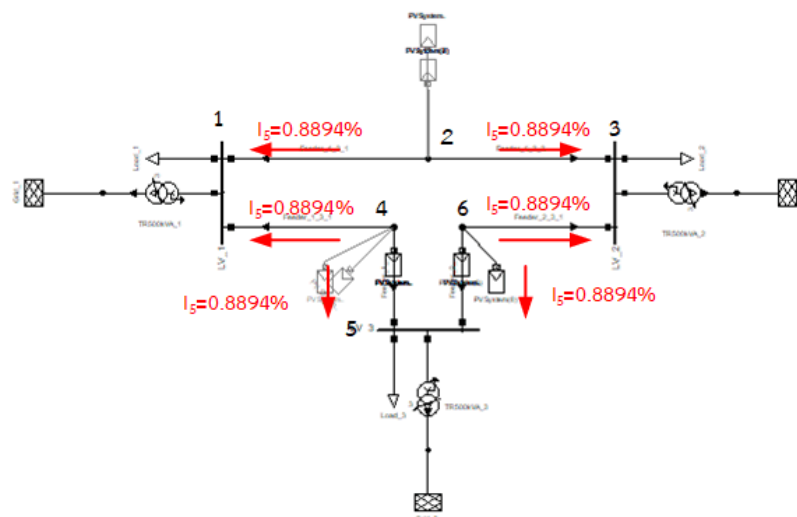
รูปที่ 5.10 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V-Network) ในโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

จากรูปที่ 5.10 โครงสร้างระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V-Network) มีจำนวนบัสทั้งหมด 9 บัส ทำการวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิก ของข้อมูลวันหยุดสุดสัปดาห์ ที่เวลา 12:00 น. โดยอินเวอร์เตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จ่ายกระแสฮาร์มอนิกแบบที่ 3 (ข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์ แสดงไว้ใน **บทที่ 4** หัวข้อ **4.1.3 ข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์**) มีลักษณะการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่มูลฐานและลำดับที่ 5 ( $I_5$ ) ดังรูปที่ 5.11 และ รูปที่ 5.12





รูปที่ 5.11 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่มูลฐาน ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V-Network)



รูปที่ 5.12 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V-Network)

จากรูปที่ 5.11 และ รูปที่ 5.12 แสดงการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่มูลฐานและกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ลำดับ จะเห็นว่าทิศทาง การไหลของกระแสฮาร์มอนิกจะไหลไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งอาจเป็นผลจากลักษณะโครงสร้างของระบบที่เป็นโครงสร้างแบบโครงข่าย (Network) แบบสมมาตร

## 5.5 สรุป

จากการวิเคราะห์การไหลของฮาร์มอนิก โดยทิศทาง การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่มูลฐาน (50 Hz) และการไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 นั้น จะพบว่า ทิศทางการไหลของกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่าง ๆ นั้น ส่วนใหญ่จะไม่เป็นไปตามทิศทาง การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่มูลฐาน เนื่องจากการไหลของกระแสฮาร์มอนิกของระบบนั้นขึ้นอยู่กับมุมเฟสของแรงดันฮาร์มอนิกที่ตกคร่อมบัสนั้นๆ ด้วย แต่ทั้งนี้ทิศทาง การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ทำการวิเคราะห์จากโปรแกรม DigSILENT PowerFactory อาจมีความคลาดเคลื่อน เนื่องจากข้อมูลกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ไม่มีค่ามุมเฟส ถ้ามีข้อมูลมุมเฟสของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกแล้วนั้น จะทำให้ทิศทาง การไหลของกระแสฮาร์มอนิกแม่นยำมากขึ้น

## บทที่ 6

### ผลการทดสอบ การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ใน ระบบไฟฟ้ากำลัง

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไฟฟ้ากำลัง จากผลการทดสอบระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ที่ แรงดันสูง (115 kV) แรงดันปานกลาง (24 kV) และแรงดันต่ำ (230/400 V) โดยในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจากผลการทดสอบระบบนั้น ผู้วิจัยจะทำการประเมินดัชนีทางฮาร์มอนิกที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ อันได้แก่ ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (%THDv) และ ค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ (Individual Harmonic) ว่ามีค่าเกินจากค่าวางแผน (Planning Level) ของการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งการไฟฟ้านครหลวงปรับปรุงมาจากมาตรฐาน Engineering Recommendation G 5/4 (2001) หรือไม่ และปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง พ.ศ. 2558 มีความเหมาะสมต่อระบบจำหน่ายที่ทำการทดสอบหรือไม่

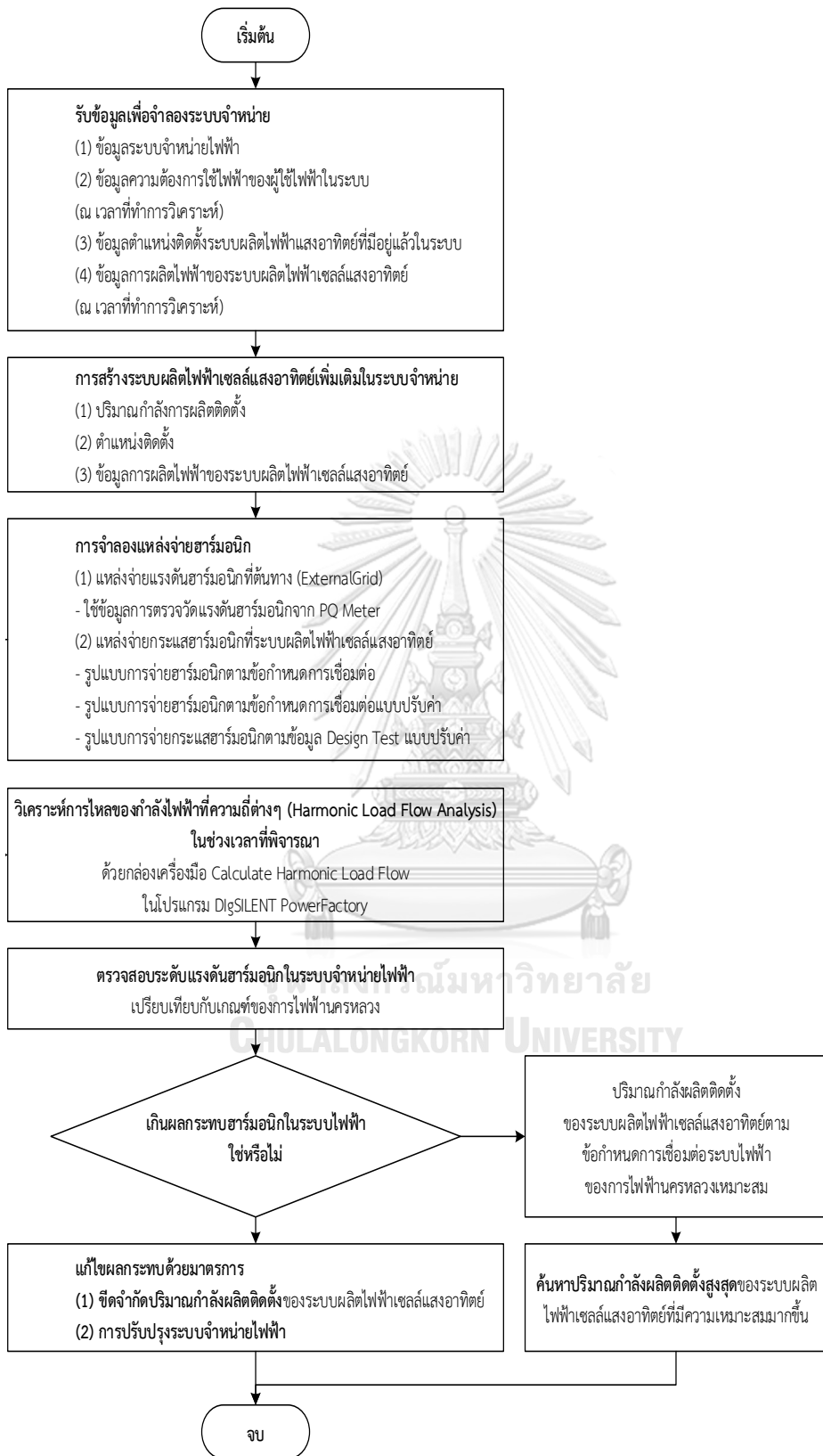
โดยการจ่ายกระแสของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ จะเป็นไปตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง พ.ศ. 2558 ที่ได้กำหนดไว้ว่า อินเวอร์เตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์นั้นจะต้องไม่จ่ายกระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ (Individual Current Harmonic) และค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (Total Current Harmonic Distortion : THDi) เกินค่าที่กำหนดใน “ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง พ.ศ. 2558” ดังตารางที่ 3.2 ซึ่งการไฟฟ้านครหลวงอ้างอิงมาจากมาตรฐาน IEEE 1547 (2003)

#### 6.1 วิธีการทดสอบ

ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ผู้วิจัยจะวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจากผลการทดสอบในกรณีที่ผลการทดสอบเลวร้ายที่สุด คือ การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง และเลือกพิจารณาตำแหน่งติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ช่วงบริเวณปลายสาย (ในกรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีรูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบเรเดียล) และกลางสาย (ในกรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีรูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย) เพราะเป็นตำแหน่งที่มีแนวโน้มจะก่อให้เกิดผลกระทบด้านฮาร์มอนิกในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงมากที่สุด จากนั้นผู้วิจัยจะทำการหาปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมที่

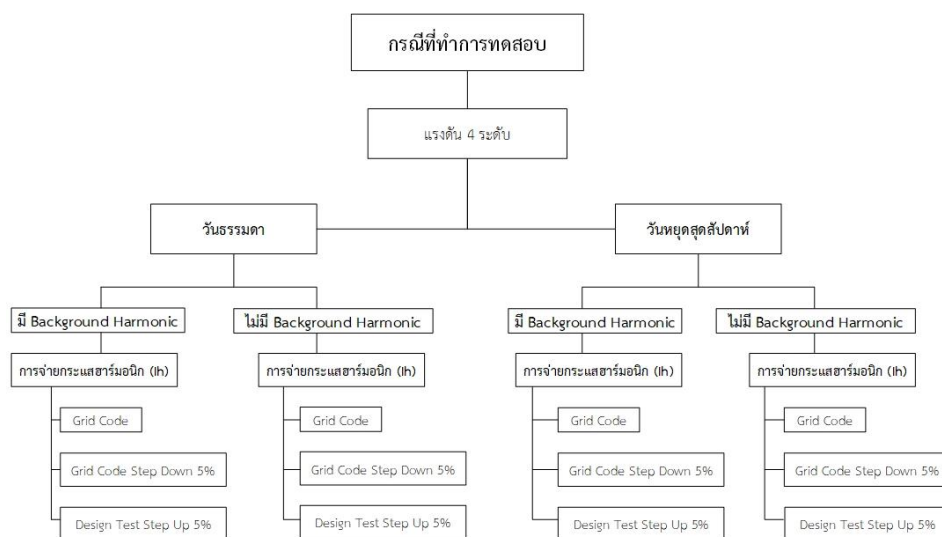
สามารถติดตั้งได้ ในกรณีที่ปริมาณกำลังผลิตติดตั้งจากข้อกำหนดฯ ไม่ทำให้ระบบมีค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม หรือค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง ผู้วิจัยจะทำการหาปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมเพื่อเป็นทางเลือกในการปรับปรุงข้อกำหนดฯ ให้กับทางการไฟฟ้านครหลวง หรือเสนอแนะการลดปริมาณกำลังผลิตติดตั้งหรือข้อเสนออื่นๆ ให้กับทางการไฟฟ้านครหลวงด้วย ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนและวิธีการทำงานของโปรแกรม DigSILENT PowerFactory อย่างง่ายได้ดังรูปที่ 6.1





รูปที่ 6.1 แผนผังแสดงการทำงานของโปรแกรมการคำนวณผลการทดสอบ

จากรูปที่ 6.1 ได้แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนการศึกษาและวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจากผลการทดสอบระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง โดยผู้วิจัยจะทำการแบ่งกรณีการทดสอบระบบจำหน่ายไฟฟ้า ดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 แผนผังแสดงกรณีที่ทำกรทดสอบ

จากรูปที่ 6.2 เป็นแผนผังแสดงกรณีที่ทำกรทดสอบระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงทั้ง 4 ระบบ ซึ่งผู้วิจัยจะทำการทดสอบโดยใช้ข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์ ข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า และข้อมูลฮาร์มอนิกเบื้องหลัง (Background Harmonic) ของวันธรรมดา และวันหยุดสุดสัปดาห์ อย่างละ 1 วัน ที่เวลา 12.00 น. เพื่อเป็นตัวแทนในการใช้วิเคราะห์ฮาร์มอนิกจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระบบไฟฟ้ากำลัง ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่นำมาทดสอบ เนื่องจากในวันและเวลาดังกล่าวความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้ามีค่ามากที่สุด และมีแนวโน้มจะทำให้เกิดผลกระทบด้านฮาร์มอนิกต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ทำกรทดสอบแย่มากที่สุด

ทั้งนี้นอกจากการแบ่งกรณีที่ทำกรทดสอบด้วยวันและเวลาแล้วนั้น ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบทั้งในกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ทำกรทดสอบมีและไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทางอีกด้วย และได้ทำการทดสอบระบบโดยการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์ ตามรูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกทั้ง 3 รูปแบบ ที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1.3 ข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์ ซึ่งผลการทดสอบจะกล่าวไว้ในเนื้อหาถัดไป

## 6.2 ผลการทดสอบ

ผู้วิจัยจะนำเสนอผลการทดสอบโดยแบ่งตามระดับแรงดันของระบบจำหน่ายไฟฟ้า กรณีที่ระบบทดสอบมี และไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง และตามรูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์ ดังนี้

### 6.2.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)

#### 6.2.1.1 กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง

ตารางที่ 6.1 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุดของการทดสอบ กรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแส ฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์รูปแบบที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)

วัน	วันธรรมดา		วันหยุดสุดสัปดาห์	
	เวลา	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส	%THDv
12.00 น.	0.6485	115kV_115_Aa	0.8000	115kV_115_Aa

ตารางที่ 6.2 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุดของการทดสอบ กรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแส ฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์รูปแบบที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)

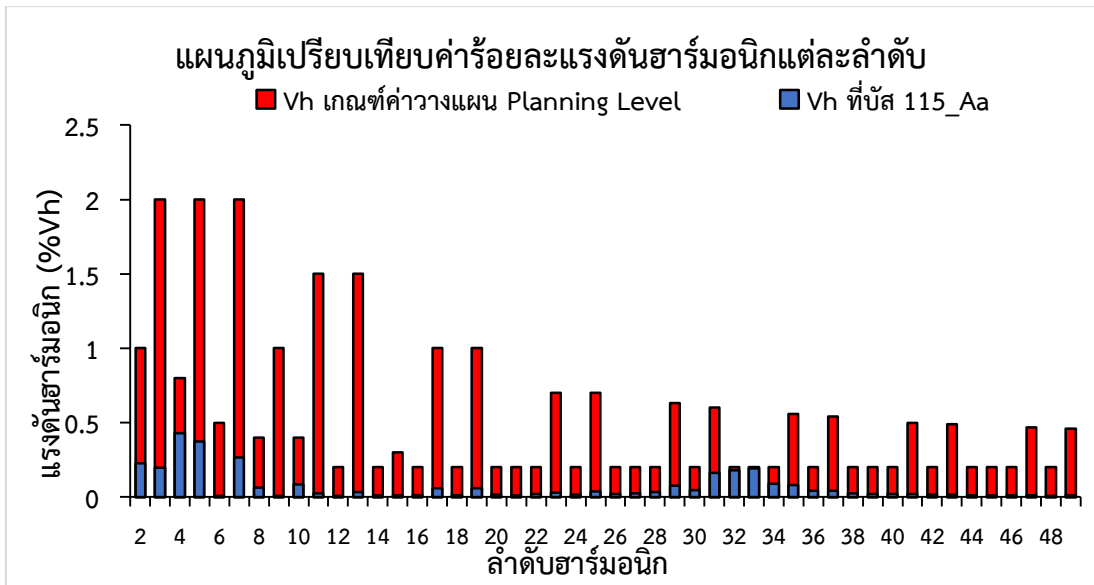
วัน	วันธรรมดา		วันหยุดสุดสัปดาห์	
	เวลา	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส	%THDv
12.00 น.	0.5075	115kV_115_Aa	0.5948	115kV_115_Aa

ตารางที่ 6.3 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุดของการทดสอบกรณีในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแส ฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์รูปแบบที่ 3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)

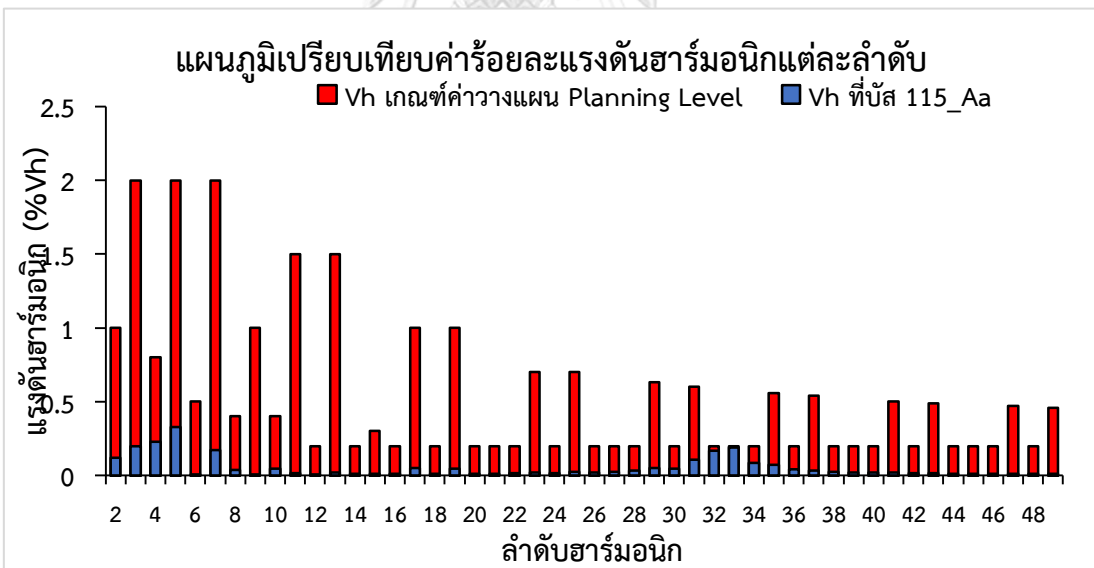
วัน	วันธรรมดา		วันหยุดสุดสัปดาห์	
เวลา	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส
12.00 น.	0.5162	115kV_115_Aa	0.6074	115kV_115_Aa

จากตารางที่ 6.1 ถึง ตารางที่ 6.3 ได้แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยปริมาณกำลังผลิตติดตั้งตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าที่ตำแหน่งปลายระบบจะมีค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมสูงสุดในวันหยุดสุดสัปดาห์ ณ เวลา 12.00 น. ที่ตำแหน่งบัส 115kV\_115\_Aa เช่นเดียวกันทั้ง 3 รูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิก และมีค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมสูงสุดที่การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1 ที่ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 0.6485% ในวันธรรมดา และ 0.8000% ในวันหยุดสุดสัปดาห์

ทั้งนี้ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมที่เกิดขึ้นจากการทดสอบด้วยการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบที่ 1,2 และ 3 นั้น ยังไม่เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งการไฟฟ้านครหลวงกำหนดค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมในระบบแรงดันสูงไว้ที่ 3% และนอกจากค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่จ่ายกระแสฮาร์มอนิกทั้ง 3 รูปแบบ ที่ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด (บัส 115\_Aa) ของวันหยุดสุดสัปดาห์ ที่เวลา 12.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 6.3 ถึง รูปที่ 6.5

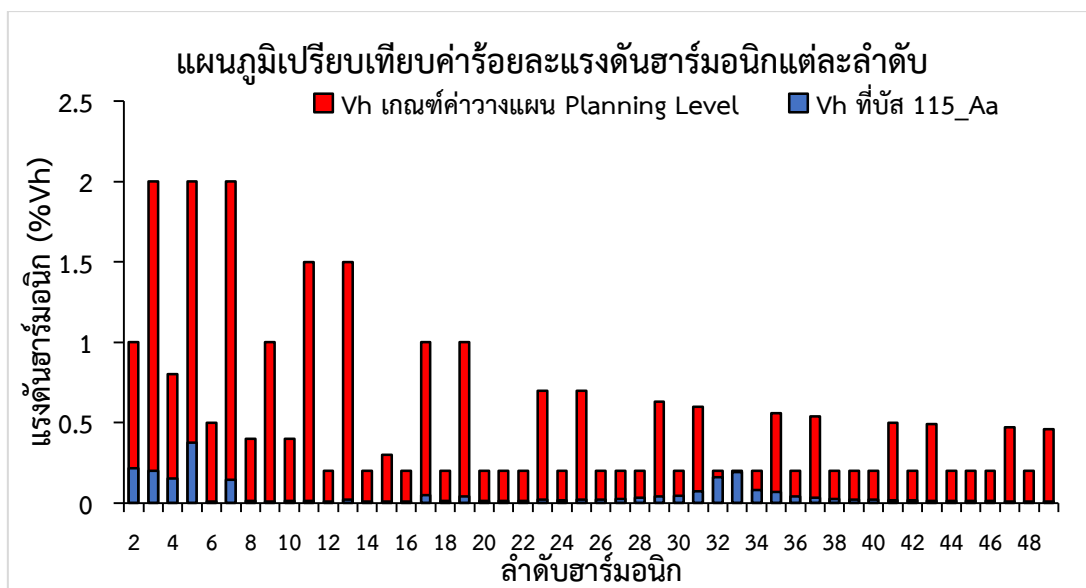


รูปที่ 6.3 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง กรณีระบบมีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)



รูปที่ 6.4 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง กรณีระบบมีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)





รูปที่ 6.5 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง กรณีระบบมีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)

จากรูปที่ 6.3 ถึง รูปที่ 6.5 ได้แสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งบัส 115\_Aa ซึ่งเกิดผลกระทบสูงสุด ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ที่การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกทั้ง 3 รูปแบบ มีค่าไม่เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง ดังนั้นผู้วิจัยจะทำการหาค่าปริมาณกำลังผลิตติดตั้งที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ใหม่ ดังจะแสดงไว้ในส่วนถัดไป

**หมายเหตุ :** ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง จะแสดงไว้ใน ภาคผนวก ก.

6.2.1.2 กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง

ตารางที่ 6.4 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุดของการทดสอบกรณีในระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์รูปแบบที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)

วัน	วันธรรมดา		วันหยุดสุดสัปดาห์	
เวลา	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส
12.00 น.	0.3475	115kV_115_Aa	0.3321	115kV_115_Aa

ตารางที่ 6.5 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุดของการทดสอบกรณีในระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์รูปแบบที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)

วัน	วันธรรมดา		วันหยุดสุดสัปดาห์	
เวลา	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส
12.00 น.	0.1812	115kV_115_Aa	0.1731	115kV_115_Aa

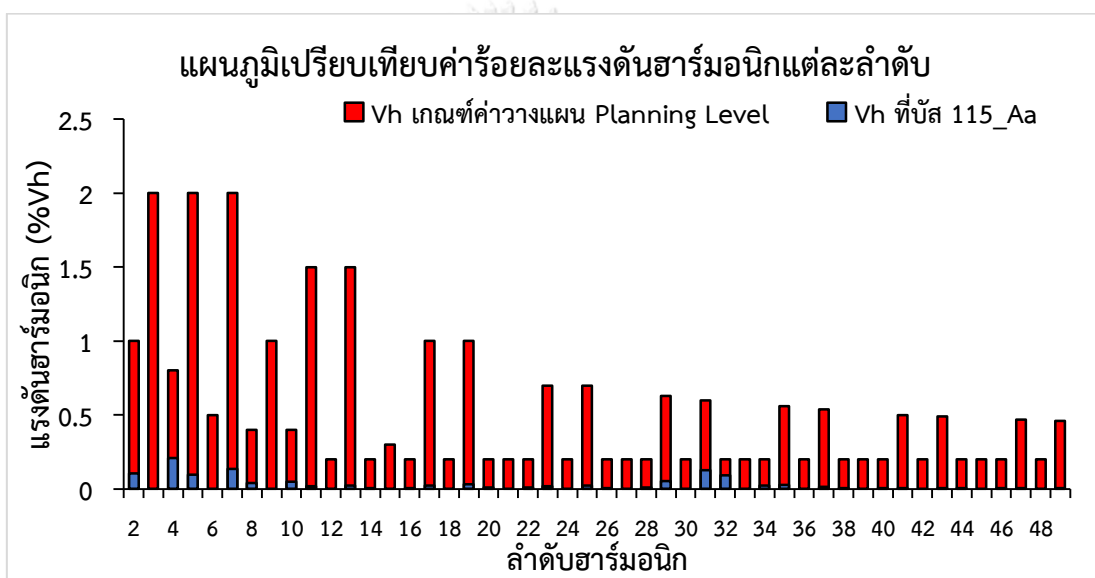
ตารางที่ 6.6 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด ของการทดสอบกรณีในระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์รูปแบบที่ 3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)

วัน	วันธรรมดา		วันหยุดสุดสัปดาห์	
เวลา	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส
12.00 น.	0.1694	115kV_115_Aa	0.1693	115kV_115_Aa

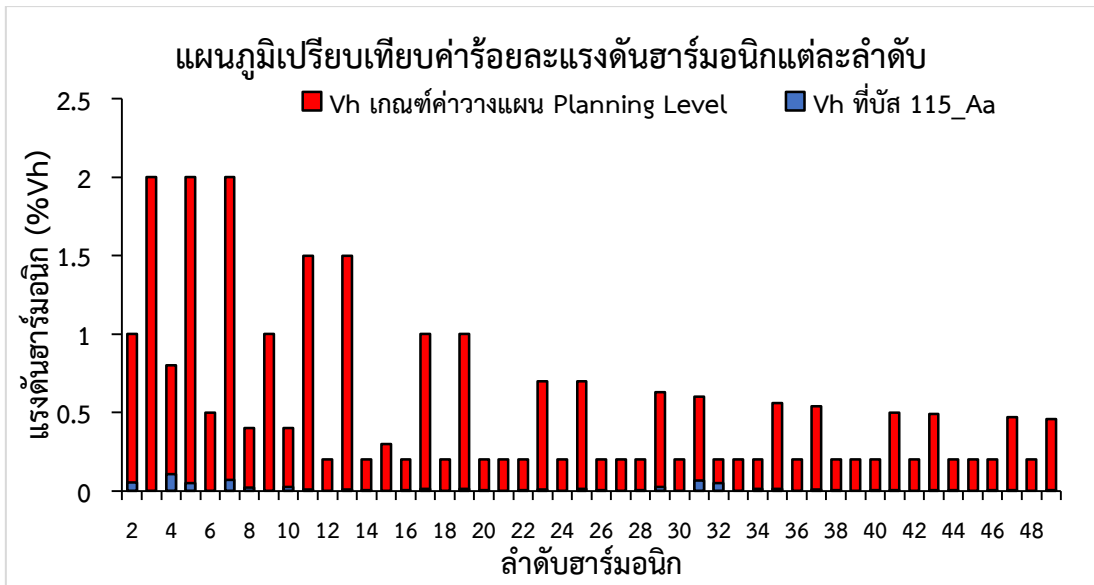
จากตารางที่ 6.4 ถึง ตารางที่ 6.6 ได้แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยปริมาณกำลังผลิตติดตั้งตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าที่ตำแหน่งปลายระบบ จะมีค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมสูงที่สุดในวันธรรมดา ณ เวลา 12.00 น. ที่ตำแหน่งบัส 115\_Aa เช่นเดียวกันทั้ง 3 รูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิก และจะมีค่าความเพี้ยนแรงดัน

ฮาร์มอนิกกรรมสูงที่สุดที่การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1 ที่ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกกรรมเท่ากับ 0.3475% ในวันธรรมดา และ 0.3321% ในวันหยุดสุดสัปดาห์

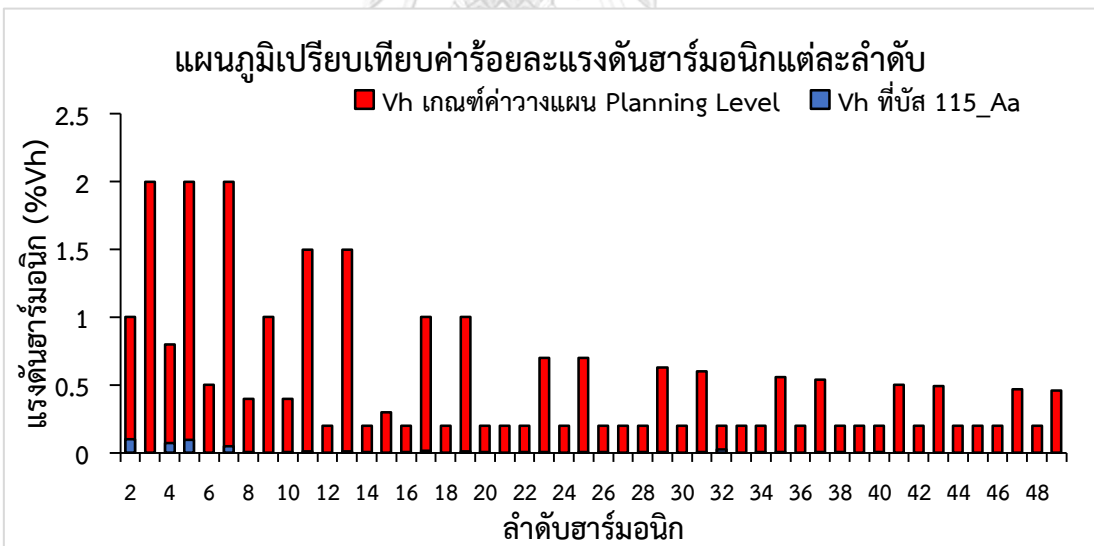
ทั้งนี้ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกกรรมที่เกิดขึ้นจากการทดสอบด้วยการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบที่ 1,2 และ 3 นั้น ยังไม่เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งการไฟฟ้านครหลวงกำหนดค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกกรรมในระบบแรงดันสูงไว้ที่ 3% และนอกจากค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกกรรมแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่จ่ายกระแสฮาร์มอนิกทั้ง 3 รูปแบบ ที่ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด (บัส 115\_Aa) ของวันธรรมดา ที่เวลา 12.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 6.6 ถึง รูปที่ 6.8



รูปที่ 6.6 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง กรณีระบบไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)



รูปที่ 6.7 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง กรณีระบบไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)



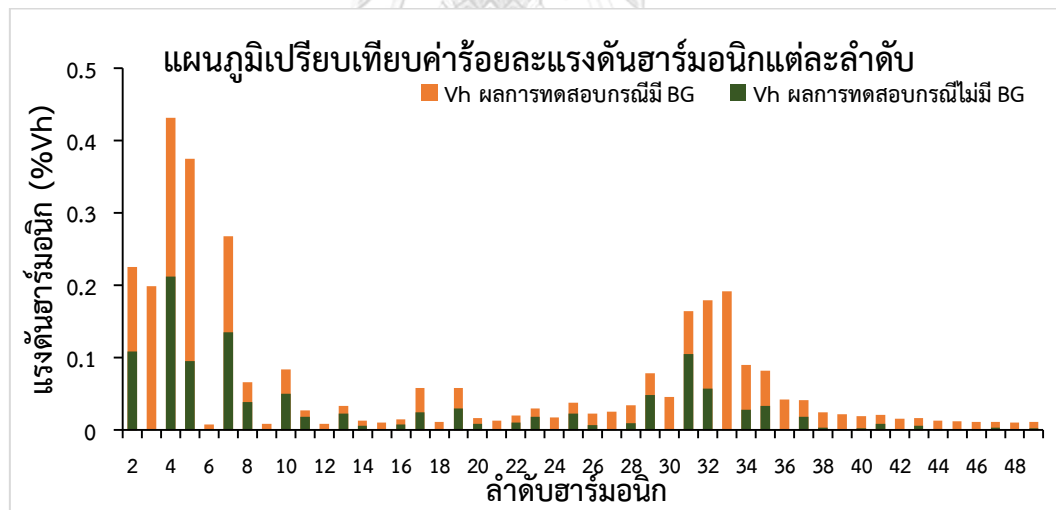
รูปที่ 6.8 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง กรณีระบบไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)

จากรูปที่ 6.6 ถึง รูปที่ 6.8 ได้แสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งบัส 115\_Aa ซึ่งเกิดผลกระทบสูงที่สุด ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) ที่การจ่ายกระแส

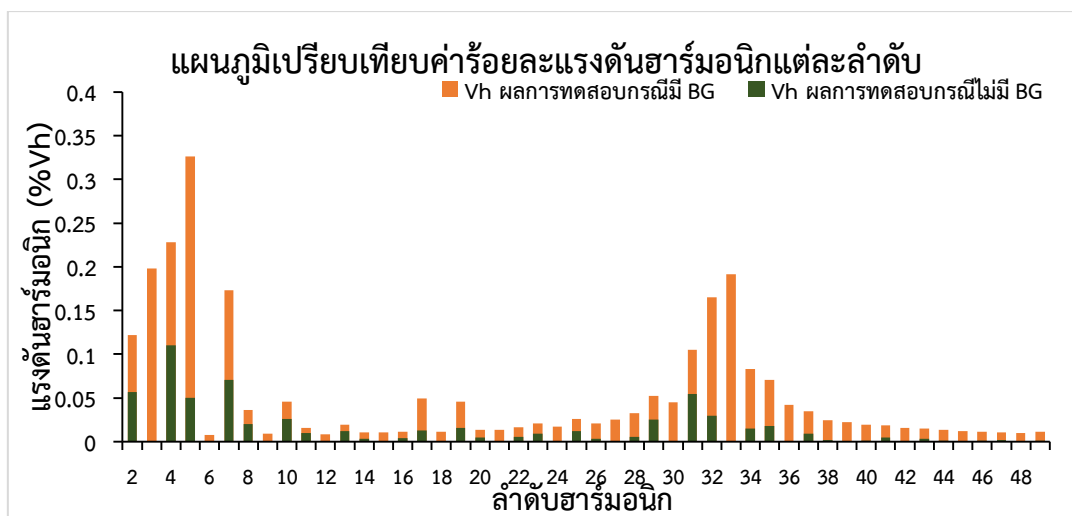
ฮาร์มอนิกทั้ง 3 รูปแบบ มีค่าไม่เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง ดังนั้นผู้วิจัยจะทำการหาค่าปริมาณกำลังผลิตติดตั้งที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ใหม่ ดังจะแสดงไว้ในส่วนถัดไป

**หมายเหตุ : ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง จะแสดงไว้ใน ภาคผนวก ก.**

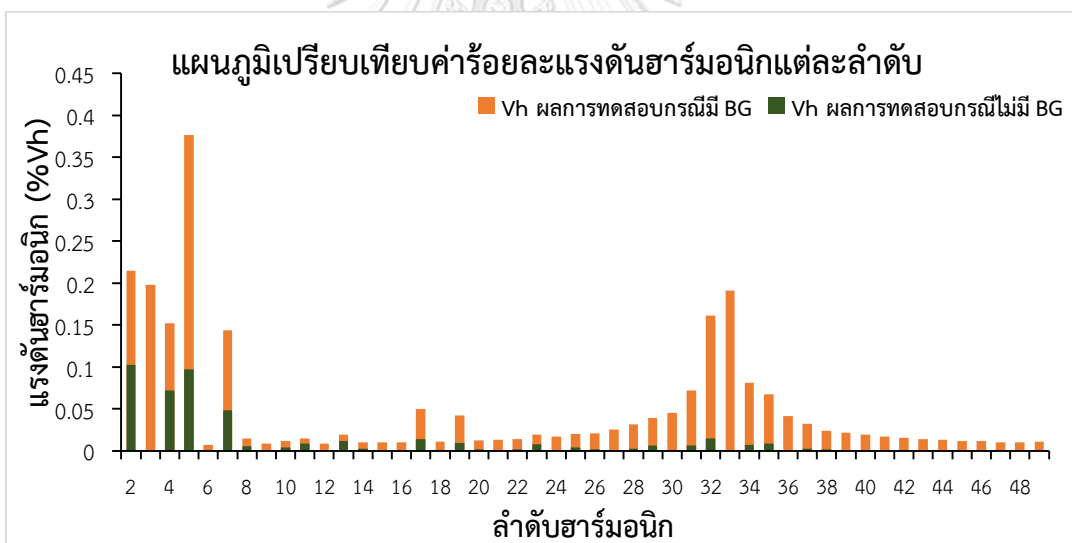
แต่เนื่องจากการทดสอบระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง กรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง วันและเวลาที่ทำการทดสอบที่ให้ค่าร้อยละความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกสูงที่สุดจะอยู่ในวันหยุดสุดสัปดาห์ ที่เวลา 12.00 น. เพื่อให้เห็นถึงข้อแตกต่างของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) กรณีที่ระบบมีและไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง ผู้วิจัยจึงทำการพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดสอบในกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง กับกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง ในวันหยุดสุดสัปดาห์ ที่เวลา 12.00 น. แทนในทุกรูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 6.9 ถึง รูปที่ 6.11



รูปที่ 6.9 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง กับ กรณีระบบไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)



รูปที่ 6.10 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง กับ กรณีระบบไม่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกรูปแบบที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)

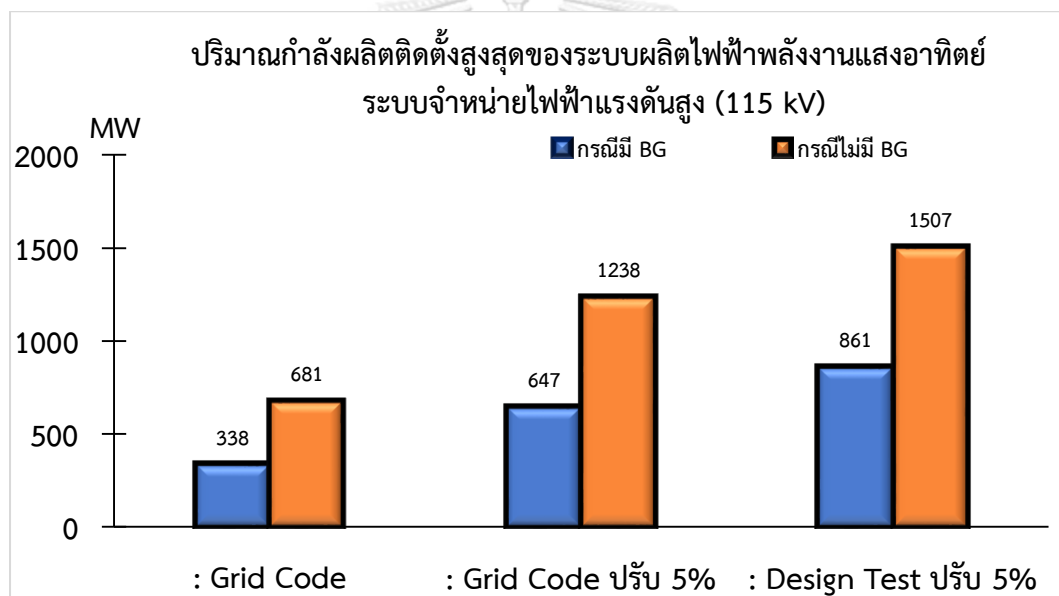


รูปที่ 6.11 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง กับ กรณีระบบไม่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกรูปแบบที่ 3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)

จากรูปที่ 6.9 ถึง รูปที่ 6.11 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับในกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง จะมีค่ามากกว่าค่าแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับในกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง ในทุก

รูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์โมนิกจากอินเวอร์เตอร์ และจากผลการทดสอบ ผู้วิจัยได้นำไปเป็นกรณีของการหาปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมให้แก่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูงนี้ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเสนอแนะการปรับปรุงปริมาณกำลังผลิตติดตั้งภายในข้อกำหนดการเชื่อมต่อของการไฟฟ้านครหลวงต่อไป

ในส่วนถัดไปผู้วิจัยจะแสดงผลการหาปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดที่เหมาะสมกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง โดยการเพิ่มปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในปริมาณที่มากกว่าข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ทั้งนี้ผู้วิจัยจะพิจารณาการทดสอบจากวันหยุดสุดสัปดาห์ ที่เวลา 12.00 น. ของทั้งกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง และกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง โดยผลการค้นหาจะแสดงได้ดังรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.12 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ กรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง กับกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)

จากรูปที่ 6.12 ได้แสดงให้เห็นถึงปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดที่เหมาะสมกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ในกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง เปรียบเทียบกับกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง จะเห็นว่าในกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทางจะสามารถมี

ปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดได้มากกว่ากรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง โดยสามารถติดตั้งได้ถึง 681 MW ในรูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1 ติดตั้งได้ 1,238 MW ในรูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 2 และติดตั้งได้ 1,507 MW ในรูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 3 ซึ่งหากเพิ่มปริมาณกำลังผลิตติดตั้งเกินจากนี้ จะส่งผลให้ค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ได้แก่ ฮาร์มอนิกลำดับที่ 4, 4 และ 2 ตามลำดับ เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งไม่เป็นไปตามการประเมินดัชนีทางฮาร์มอนิกของวิทยานิพนธ์นี้

## 6.2.2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kv)

### 5.2.2.1 กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง

ตารางที่ 6.7 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุดของการทดสอบกรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์รูปแบบที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kv)

วัน	วันธรรมดา		วันหยุดสุดสัปดาห์	
เวลา	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส
12.00 น.	2.1789	2562_1853653 /C	2.7911	2562_1853653 /C

ตารางที่ 6.8 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุดของการทดสอบกรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์รูปแบบที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kv)

วัน	วันธรรมดา		วันหยุดสุดสัปดาห์	
เวลา	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส
12.00 น.	2.1449	2562_1853653 /C	2.7665	2562_1853653 /C



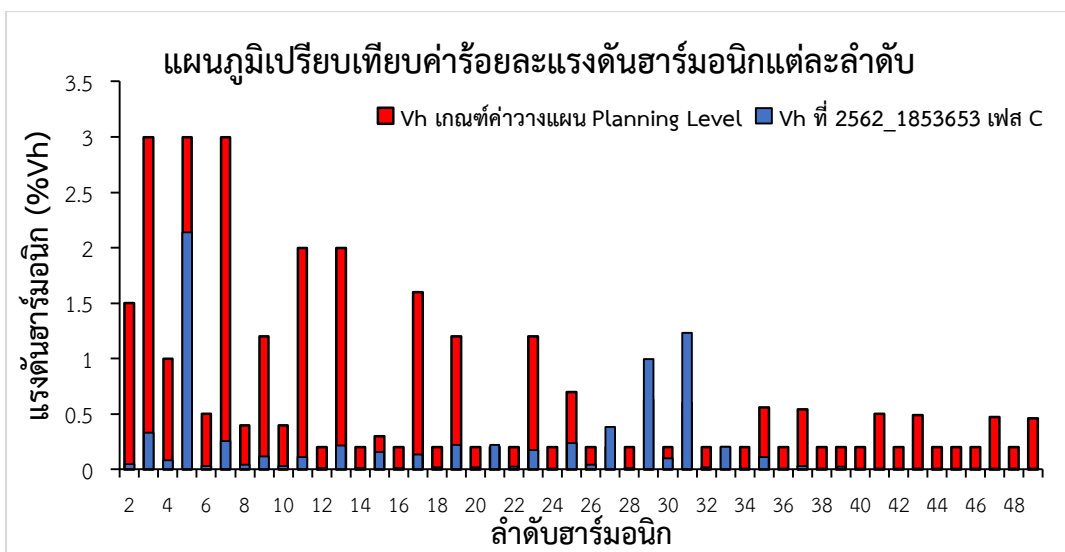
ตารางที่ 6.9 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุดของการทดสอบกรณีในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทางการจ่ายกระแส ฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์รูปแบบที่ 3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)

วัน	วันธรรมดา		วันหยุดสุดสัปดาห์	
เวลา	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส
12.00 น.	2.1410	2562_1853653 /C	2.7630	2562_1853653 /C

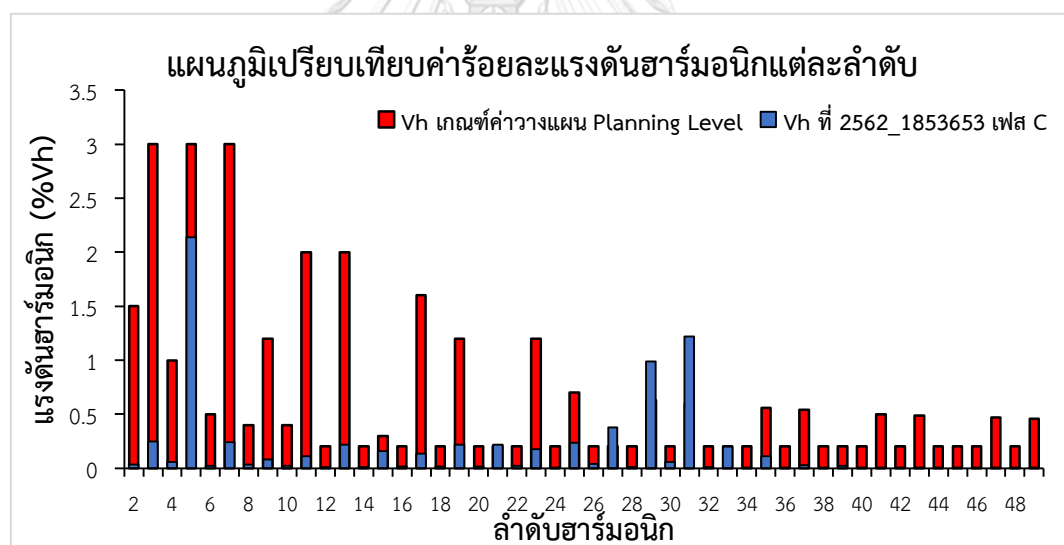
จากตารางที่ 6.7 ถึง

ตารางที่ 6.9 ได้แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยปริมาณกำลังผลิตติดตั้งตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าที่ตำแหน่งปลายระบบ จะมีค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมสูงสุดในวันหยุดสุดสัปดาห์ ณ เวลา 12.00 น. ที่ตำแหน่ง 2562\_1853653 เฟส C เช่นเดียวกันทั้ง 3 รูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิก และจะมีค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมสูงสุดที่การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1 ที่ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 2.1789% ในวันธรรมดา และ 2.7911% ในวันหยุดสุดสัปดาห์

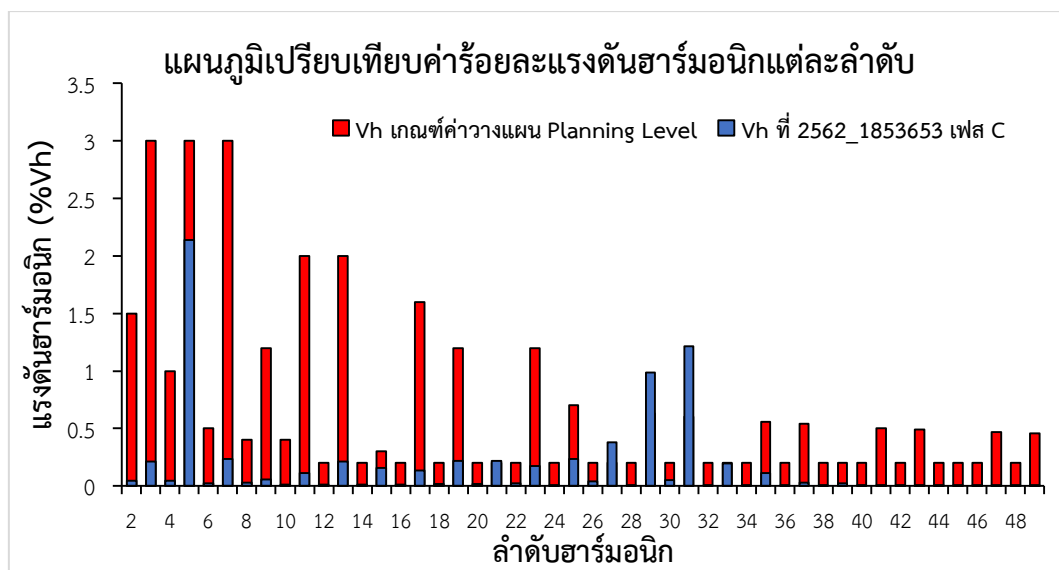
ทั้งนี้ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมที่เกิดขึ้นจากการทดสอบด้วยการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบที่ 1,2 และ 3 นั้น ยังไม่เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งการไฟฟ้านครหลวงกำหนดค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมในระบบแรงดันปานกลางไว้ที่ 4% และนอกจากค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่จ่ายกระแสฮาร์มอนิกทั้ง 3 รูปแบบ ที่ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด (ตำแหน่ง 2562\_1853653 เฟส C) ของวันหยุดสุดสัปดาห์ ที่เวลา 12.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 6.13 ถึง รูปที่ 6.15



รูปที่ 6.13 แผนภูมิแห่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง กรณีระบบมีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)



รูปที่ 6.14 แผนภูมิแห่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง กรณีระบบมีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)



รูปที่ 6.15 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง กรณีระบบมีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)

จากรูปที่ 6.13 ได้แสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่ตำแหน่ง 2562\_1853653 เฟส C ในรูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1 มีค่าเกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวงในลำดับที่ 21, 27, 29, 31 และ 33 ดังนั้นปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อของการไฟฟ้านครหลวง เป็นปริมาณกำลังผลิตติดตั้งที่ไม่เหมาะสมต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)

และจากรูปที่ 6.14 และรูปที่ 6.15 ได้แสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่ตำแหน่ง 2562\_1853653 เฟส C ในรูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 2 และ 3 มีค่าเกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวงในลำดับที่ 21, 27, 29 และ 31 ดังนั้นปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อของการไฟฟ้านครหลวง เป็นปริมาณกำลังผลิตติดตั้งที่ไม่เหมาะสมต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)

**หมายเหตุ :** ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง จะแสดงไว้ใน ภาคผนวก ก.

6.2.2.2 กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง ตารางที่ 6.10 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุดของการทดสอบ กรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์รูปแบบที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)

วัน	วันธรรมดา		วันหยุดสุดสัปดาห์	
	เวลา	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส	%THDv
12.00 น.	0.4287	196_1512896 /C	0.4119	196_1512896 /C

ตารางที่ 6.11 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุดของการทดสอบ กรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์รูปแบบที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)

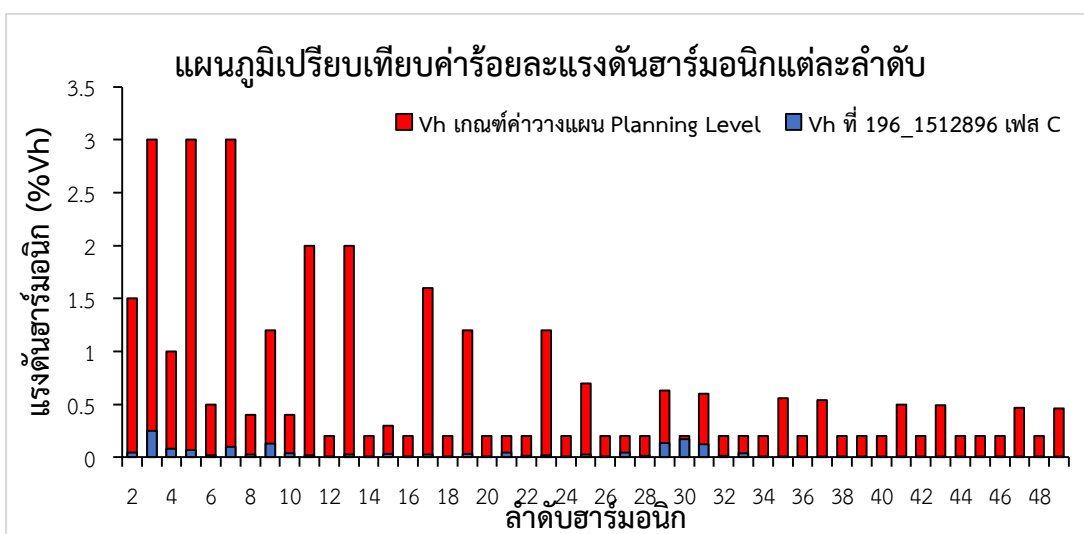
วัน	วันธรรมดา		วันหยุดสุดสัปดาห์	
	เวลา	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส	%THDv
12.00 น.	0.2235	196_1512896 /C	0.2148	196_1512896 /C

ตารางที่ 6.12 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุดของการทดสอบ กรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์รูปแบบที่ 3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)

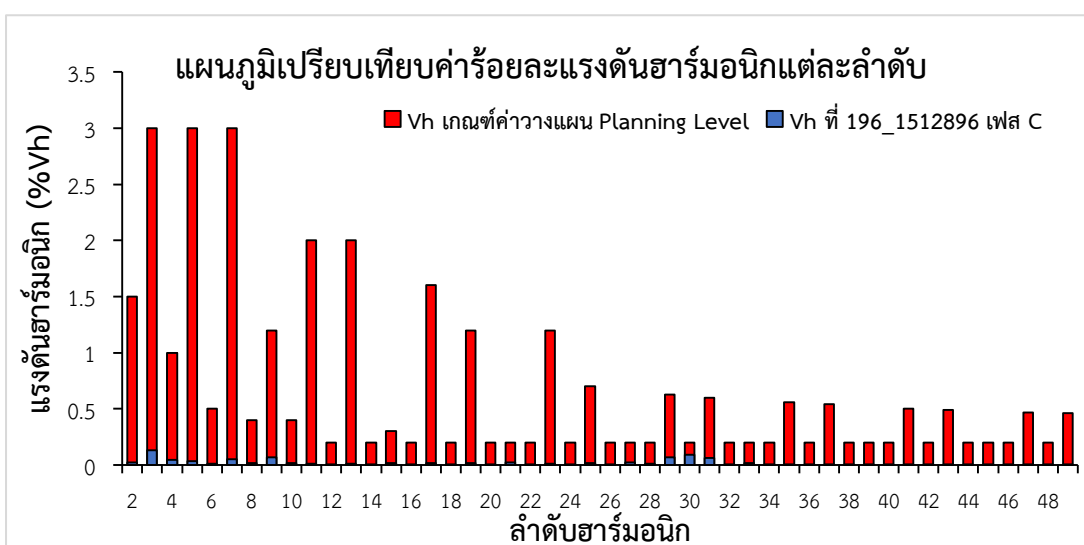
วัน	วันธรรมดา		วันหยุดสุดสัปดาห์	
	เวลา	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส	%THDv
12.00 น.	0.1572	196_1512896 /C	0.1384	196_1512896 /C

จากตารางที่ 6.10 ถึง ตารางที่ 6.12 ได้แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยปริมาณกำลังผลิตติดตั้งตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าที่ตำแหน่งปลายระบบ จะมีค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมสูงที่สุดในวันธรรมดา ณ เวลา 12.00 น. ที่ตำแหน่ง 196\_1512896 เฟส C เช่นเดียวกันทั้ง 3 รูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิก และจะมีค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมสูงที่สุดที่การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1 ที่ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 0.4287% ในวันธรรมดา และ 0.4119% ในวันหยุดสุดสัปดาห์

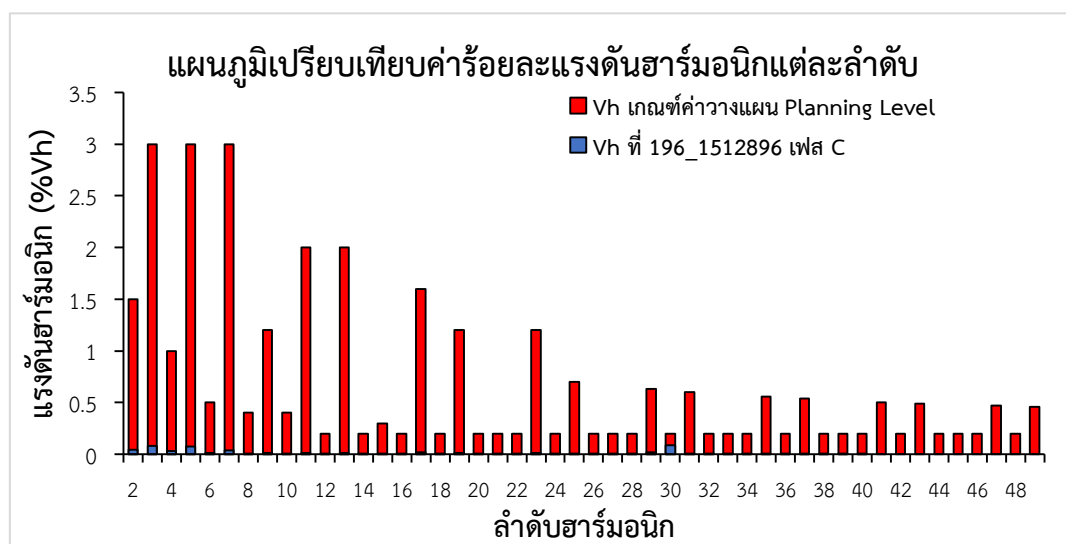
ทั้งนี้ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมที่เกิดขึ้นจากการทดสอบด้วยการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบที่ 1,2 และ 3 นั้น ยังไม่เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งการไฟฟ้านครหลวงกำหนดค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมในระบบแรงดันปานกลางไว้ที่ 4% และนอกจากค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่จ่ายกระแสฮาร์มอนิกทั้ง 3 รูปแบบ ที่ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด (ตำแหน่ง 196\_1512896 เฟส C) ของวันธรรมดา ที่เวลา 12.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 6.16 ถึง รูปที่ 6.18



รูปที่ 6.16 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง กรณีระบบไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)



รูปที่ 6.17 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง กรณีระบบไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)

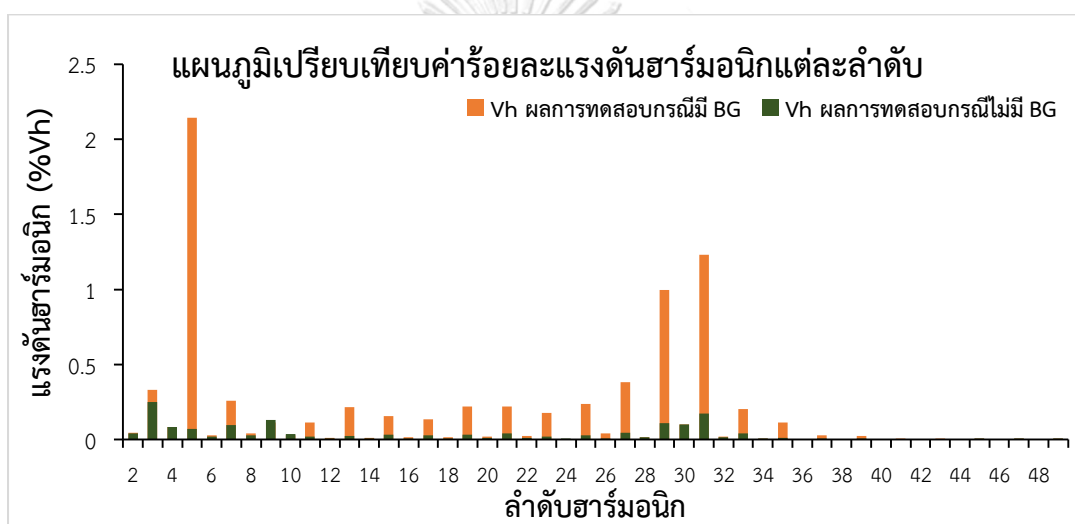


รูปที่ 6.18 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง กรณีระบบไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบที่ 3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)

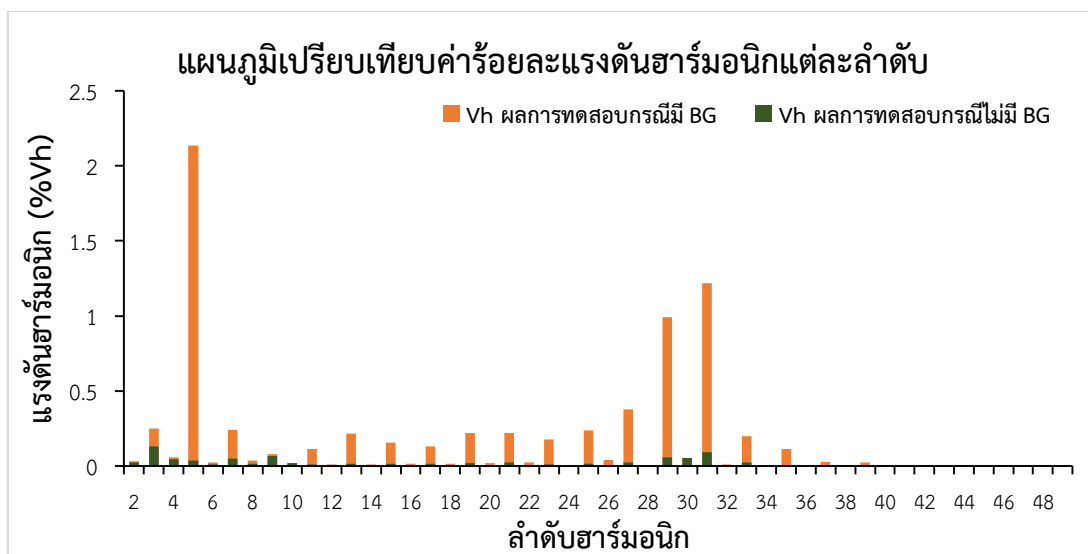
จากรูปที่ 6.16 ถึง รูปที่ 6.18 ได้แสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่ง 196\_1512896 เฟส C ซึ่งเกิดผลกระทบสูงสุด ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) ที่การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกทั้ง 3 รูปแบบ มีค่าไม่เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง โดยจะแตกต่างจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) กรณีที่ระบบมีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง ที่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ 21, 27, 29, 31 และ 33 เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า แนวโน้มของระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทางในระบบอยู่ก่อนแล้ว มีส่วนทำให้ค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับเกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวงได้

**หมายเหตุ :** ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง จะแสดงไว้ใน ภาคผนวก ก.

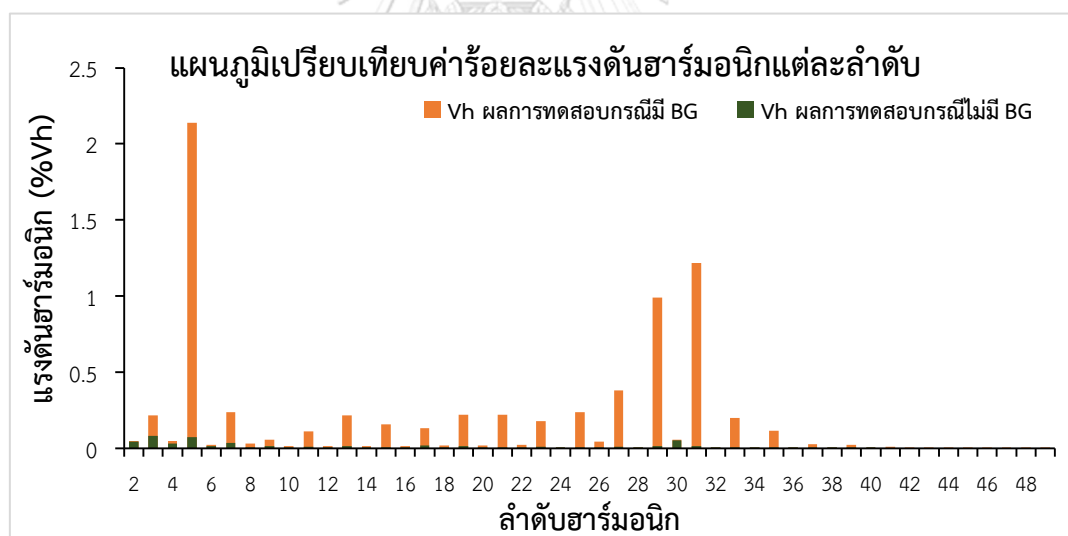
ทั้งนี้ ในการทดสอบระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) กรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง วันและเวลาที่ทำการทดสอบที่ให้ค่าร้อยละความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกสูงที่สุดจะอยู่ใน วันหยุดสุดสัปดาห์ ที่เวลา 12.00 น. เพื่อให้เห็นถึงข้อแตกต่างของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง กรณีที่ระบบมีและไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง ผู้วิจัยจึงทำการพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดสอบในกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง กับกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง ในวันหยุดสุดสัปดาห์ ที่เวลา 12.00 น. แทนในทุกรูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 6.19 ถึง รูปที่ 6.21



รูปที่ 6.19 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง กับ กรณีระบบไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)



รูปที่ 6.20 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง กับ กรณีระบบไม่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกรูปแบบที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kv)

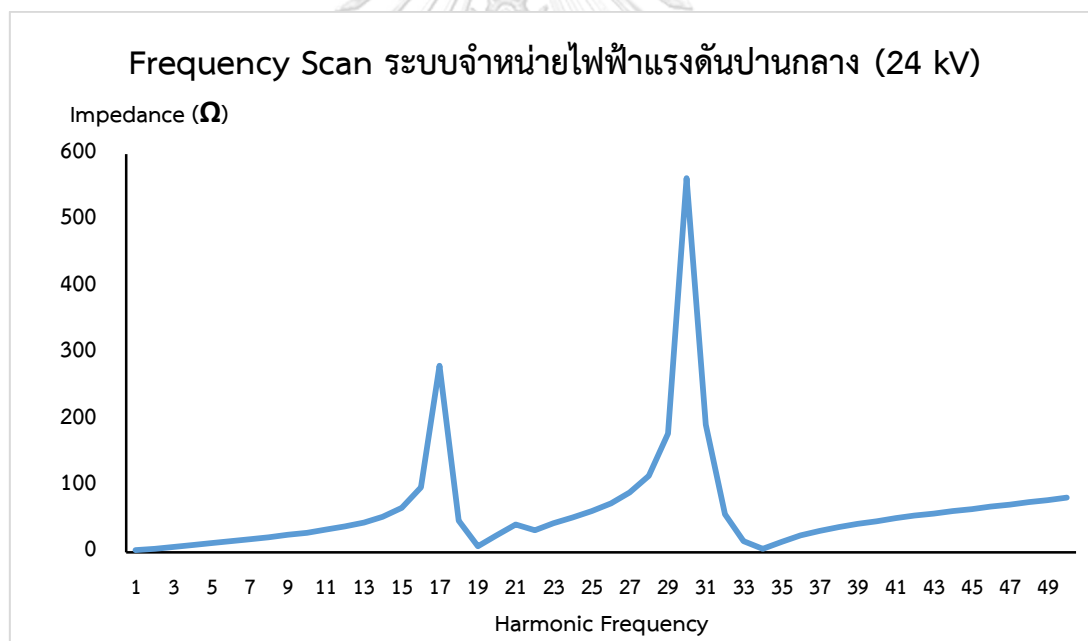


รูปที่ 6.21 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง กับ กรณีระบบไม่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกรูปแบบที่ 3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kv)

จากรูปที่ 6.19 ถึง รูปที่ 6.21 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับในกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง จะมีค่ามากกว่าค่าแรงดันฮาร์โมนิก



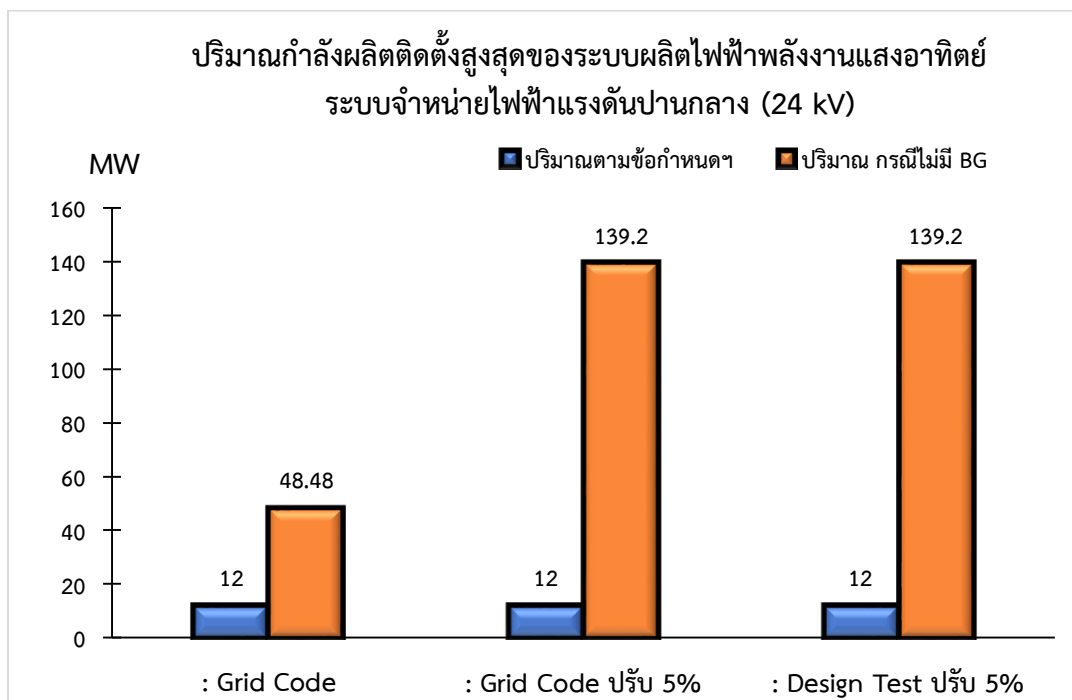
แต่ละลำดับในกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง ในทุกรูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์ และจากผลการทดสอบนี้ ผู้วิจัยได้นำไปเป็นกรณีของการหาปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมให้แก่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) นี้ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเสนอแนะการปรับปรุงปริมาณกำลังผลิตติดตั้งภายในข้อกำหนดการเชื่อมต่อของการไฟฟ้านครหลวงต่อไป ทั้งนี้ผลการทดสอบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) กรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง มีลำดับฮาร์มอนิกที่ 21, 27, 29, 31 และ 33 (ในการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1) จากผลการทดสอบด้วยการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์ทั้ง 3 รูปแบบ พบว่ามีการเกิดเรโซแนนซ์ในระบบ ซึ่งมีสาเหตุทำให้มีฮาร์มอนิกลำดับดังกล่าว เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวงได้ ดังรูปที่ 6.22 จึงเสนอแนะให้ทางการไฟฟ้านครหลวงมีการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิก (Harmonic Filter) เพื่อที่จะกำจัด หรือลดทอนค่าแรงดันฮาร์มอนิกดังกล่าว ไม่เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง



รูปที่ 6.22 การวิเคราะห์ความถี่เรโซแนนซ์ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)

แต่ทั้งนี้ จากผลการทดสอบระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) กรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง จะไม่พบว่ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกในลำดับใดเกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง ผู้วิจัยจึงได้ทำการหาปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดที่เหมาะสมกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) โดยการเพิ่มปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในปริมาณที่มากกว่าข้อกำหนดการเชื่อมต่อนระบบไฟฟ้าของการ

ไฟฟ้านครหลวง ทั้งนี้ผู้วิจัยจะพิจารณาการทดสอบจาก วันหยุดสุดสัปดาห์ ที่เวลา 12.00 น. ของกรณี ที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง โดยผลการค้นหาจะแสดง ได้ดังรูปที่ 6.23



รูปที่ 6.23 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ กรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง กับ ปริมาณตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
จฬาลง แร่งดันปานกลาง (24 kV) ย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากรูปที่ 6.23 ได้แสดงให้เห็นถึงปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดที่เหมาะสมกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) ในกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง กับ ปริมาณตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง จะเห็นว่าในกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทางจะสามารถมีปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดได้มากกว่าปริมาณกำลังผลิตติดตั้งที่กำหนดไว้ในข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า โดยสามารถติดตั้งได้ถึง 48.48 MW ในการจ่ายกระแสฮาร์มอนิก รูปแบบที่ 1, ติดตั้งได้ 139.2 MW ในการจ่ายกระแสฮาร์มอนิก รูปแบบที่ 2 และติดตั้งได้ 139.2 MW ในการจ่ายกระแสฮาร์มอนิก รูปแบบที่ 3 ซึ่งหากเพิ่มปริมาณกำลังผลิตติดตั้งเกินจากนี้จะส่งผลให้มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ 30 เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวงในการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1 และในส่วนของ การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบที่ 2 และ 3 เมื่อเพิ่มปริมาณกำลังผลิตติดตั้งเกิน

ค่าสูงสุดที่หาได้ข้างต้น ผู้วิจัยพบว่า โปรแกรม DigSILENT PowerFactory จะไม่สามารถทำการคำนวณในส่วนของโหลดโฟลว์ (Load Flow) ของระบบได้อีก ซึ่งโปรแกรมจะแสดงผลการทำงานผิดพลาดของโปรแกรกดังรูปที่ 6.24

```

DigSI/info - load flow iteration: 14
DigSI/wrng - Optimal step size for Newton iteration 15 could not be determined. Damping factor 1.000e+000 will be applied.
DigSI/info - load flow iteration: 15
DigSI/info - load flow iteration: 16
DigSI/info - load flow iteration: 17
DigSI/err - Newton algorithm stagnated. Error during the last 10 iterations could not be reduced by a factor 0.50.
DigSI/err - No convergence in load flow!
DigSI/info - Load flow calculation not executed.
DigSI/err - Load flow results not valid.
  
```

รูปที่ 6.24 แสดงข้อผิดพลาดในการคำนวณ Load Flow ของโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

## 6.2.3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V)

### 5.2.3.1 กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง

ตารางที่ 6.13 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุดของการทดสอบกรณีในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลัง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์รูปแบบที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V)

วัน	วันธรรมดา		วันหยุดสุดสัปดาห์	
เวลา	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส
12.00 น.	3.6514	196_658288 / C	3.6918	196_658288 / C

ตารางที่ 6.14 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุดของการทดสอบกรณีในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลัง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์รูปแบบที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V)

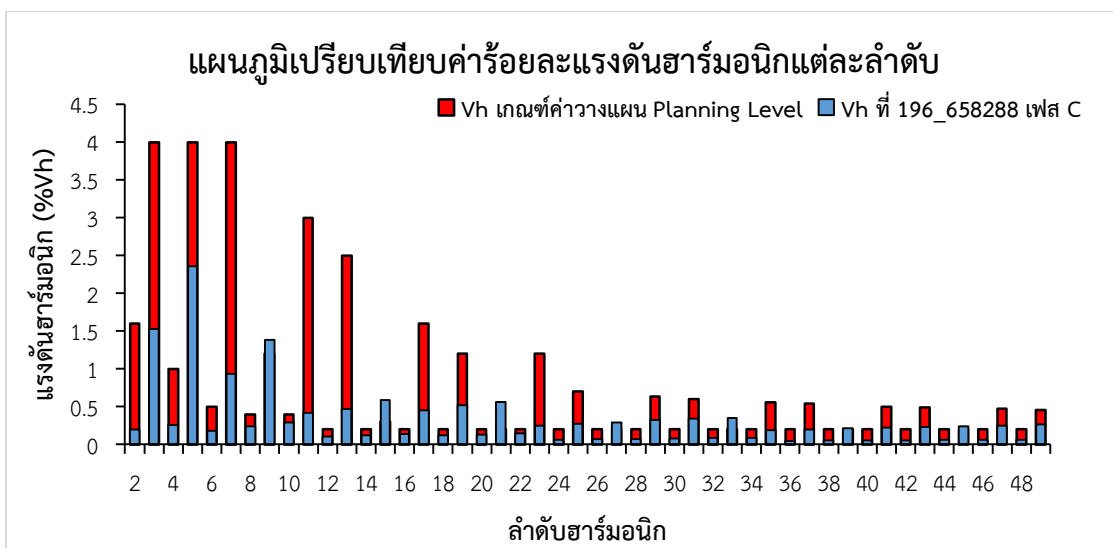
วัน	วันธรรมดา		วันหยุดสุดสัปดาห์	
เวลา	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส
12.00 น.	2.8796	196_658288 / C	2.9150	196_658288 / C

ตารางที่ 6.15 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุดของการทดสอบกรณีในระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลัง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์รูปแบบที่ 3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V)

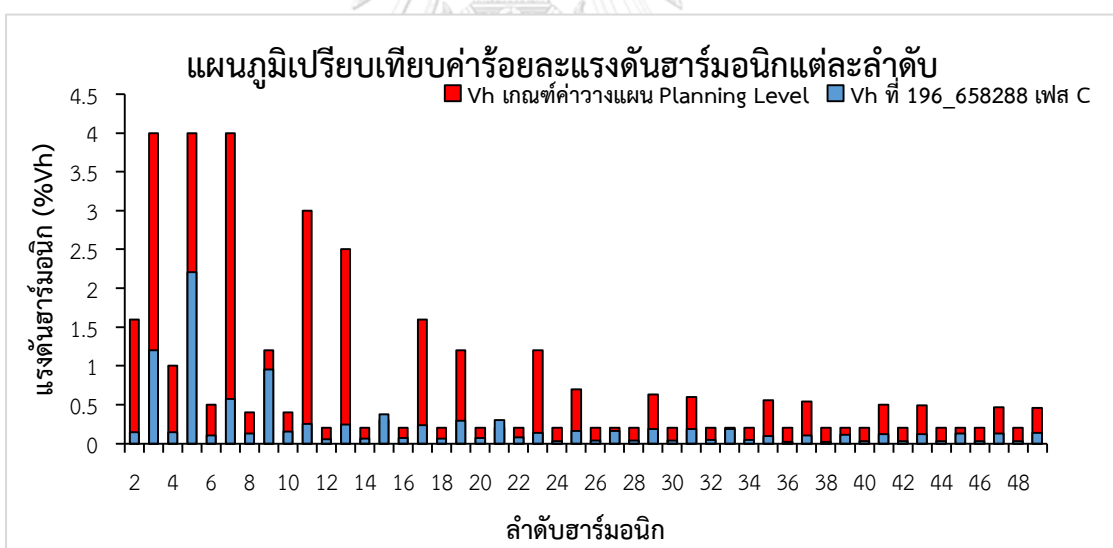
วัน	วันธรรมดา		วันหยุดสุดสัปดาห์	
เวลา	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส
12.00 น.	2.8443	196_658288 / C	2.8793	196_658288 / C

จากตารางที่ 6.13 ถึง ตารางที่ 6.15 ได้แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยปริมาณกำลังผลิตติดตั้งตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าที่ตำแหน่งปลายระบบจะมีค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมสูงสุดใน วันหยุดสุดสัปดาห์ ณ เวลา 12.00 น. ที่ตำแหน่ง 196\_658288 เฟส C เช่นเดียวกันทั้ง 3 รูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิก และจะมีค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมสูงที่สุดที่การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1 ที่ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 3.6514% ในวันธรรมดา (ตำแหน่ง 196\_658288 เฟส C) และ 3.6918% ในวันหยุดสุดสัปดาห์ (ตำแหน่ง 196\_658288 เฟส C)

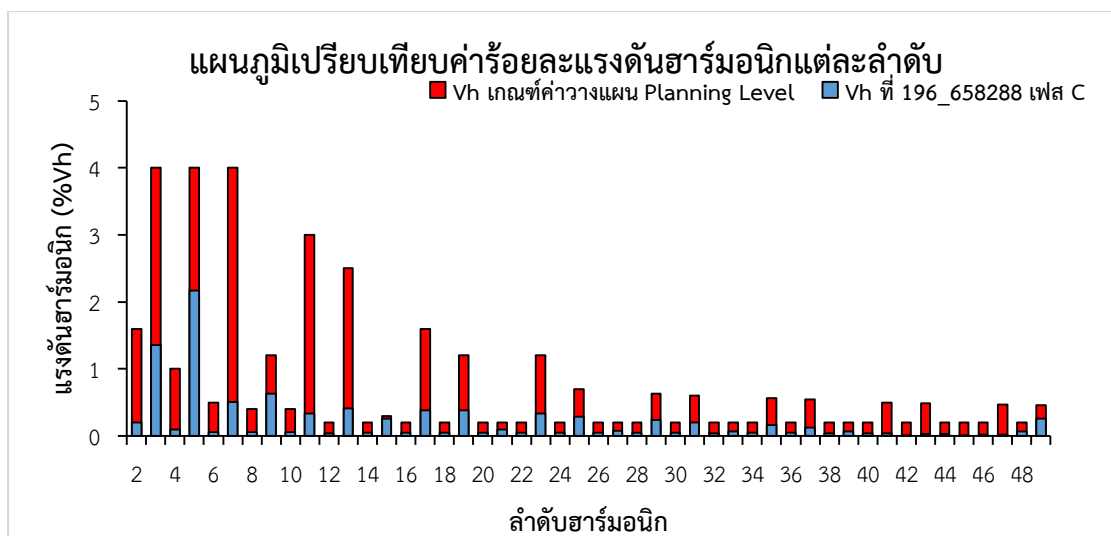
ทั้งนี้ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมที่เกิดขึ้นจากการทดสอบด้วยการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบที่ 1,2 และ 3 นั้น ยังไม่เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งการไฟฟ้านครหลวงกำหนดค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมในระบบแรงดันต่ำไว้ที่ 5% และนอกจากค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่จ่ายกระแสฮาร์มอนิกทั้ง 3 รูปแบบ ที่ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด (ตำแหน่ง 196\_658288 เฟส C) ของวันหยุดสุดสัปดาห์ ที่เวลา 12.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 6.25 ถึง รูปที่ 6.27



รูปที่ 6.25 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง กรณีระบบมีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกประเภทที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V)



รูปที่ 6.26 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง กรณีระบบมีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกประเภทที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V)



รูปที่ 6.27 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง กรณีระบบมีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกประเภทที่ 3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V)

จากรูปที่ 6.25 ได้แสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่ตำแหน่ง 196\_658288 เฟส C ในรูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกประเภทที่ 1 มีค่าเกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวงในลำดับที่ 9, 15, 21, 27, 33, 39 และ 45 ดังนั้นปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อของการไฟฟ้านครหลวง เป็นปริมาณกำลังผลิตติดตั้งที่ไม่เหมาะสมต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) ซึ่งการที่ค่าแรงดันฮาร์มอนิกในลำดับดังกล่าวเกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง อาจมีผลมาจากการที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำนี้มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง ซึ่งผู้วิจัยจะทำการพิจารณาในส่วนถัดไป

จากรูปที่ 6.26 ได้แสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่ตำแหน่ง 196\_658288 เฟส C ในรูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกประเภทที่ 2 มีค่าเกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวงในลำดับที่ 15 และ 21 เกินค่าวางแผน ดังนั้นปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อของการไฟฟ้านครหลวง เป็นปริมาณกำลังผลิตติดตั้งที่ไม่เหมาะสมต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) ซึ่งการที่ค่าแรงดันฮาร์มอนิกในลำดับดังกล่าวเกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง อาจมีผลมาจากการที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำนี้มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง ซึ่งผู้วิจัยจะทำการพิจารณาในส่วนถัดไป

และจากรูปที่ 6.27 ได้แสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่ตำแหน่ง 196\_658288 เฟส C ในรูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกประเภทที่ 3 ซึ่งไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกลำดับใดเกินค่าวางแผน

ของการไฟฟ้านครหลวง ผู้วิจัยจึงจะทำการหาปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดที่เหมาะสมกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำในลำดับถัดไป

**หมายเหตุ : ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ(230/400 V) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง จะแสดงไว้ใน ภาคผนวก ก.**

#### 6.2.3.2 กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง

ตารางที่ 6.16 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุดของการทดสอบ กรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์รูปแบบที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V)

วัน	วันธรรมดา		วันหยุดสุดสัปดาห์	
เวลา	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส
12.00 น.	2.2902	196_658288 / C	2.3098	196_658288 / C

ตารางที่ 6.17 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุดของการทดสอบ กรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์รูปแบบที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V)

วัน	วันธรรมดา		วันหยุดสุดสัปดาห์	
เวลา	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส
12.00 น.	1.1940	196_658288 / C	1.2042	196_658288 / C

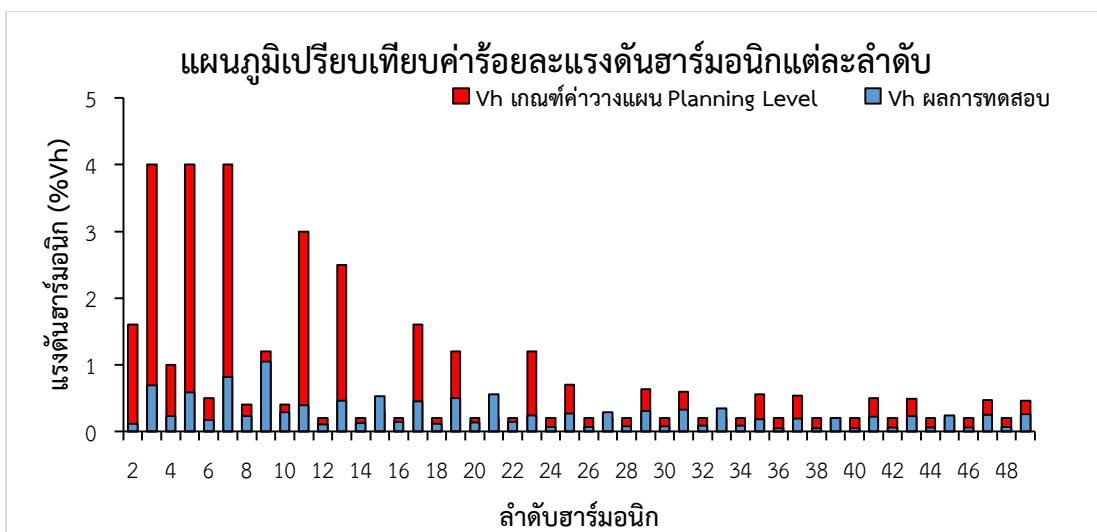
ตารางที่ 6.18 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุดของการทดสอบกรณีในระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์รูปแบบที่ 3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V)

วัน	วันธรรมดา		วันหยุดสุดสัปดาห์	
เวลา	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด / เฟส
12.00 น.	1.1439	196_658288 / C	1.1534	196_658288 / C

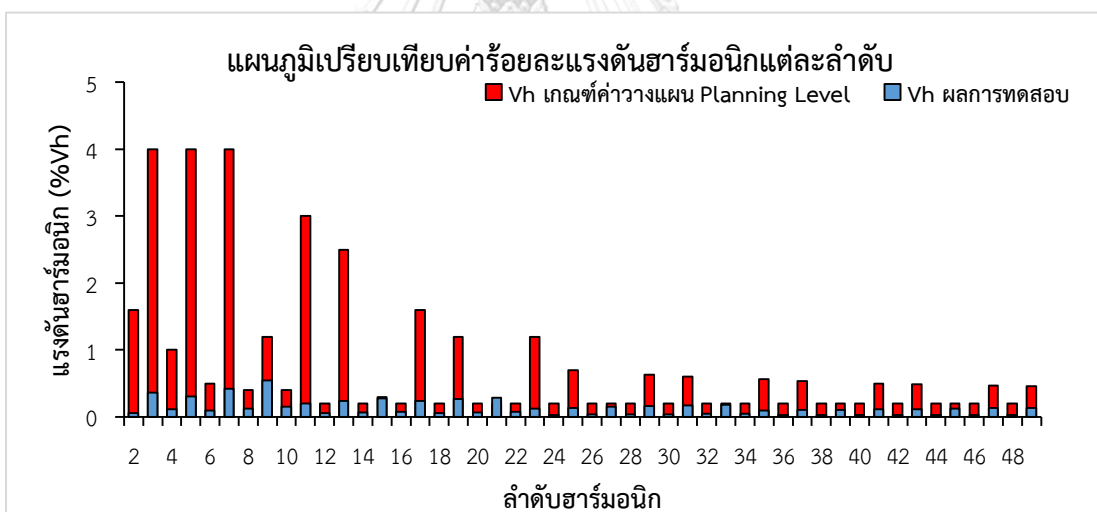
จากตารางที่ 6.16 ถึง ตารางที่ 6.18 ได้แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยปริมาณกำลังผลิตติดตั้งตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าที่ตำแหน่งปลายระบบจะมีค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมสูงสุดในวันหยุดสุดสัปดาห์ ณ เวลา 12.00 น. ที่ตำแหน่ง 196\_658288 เฟส C เช่นเดียวกันทั้ง 3 รูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิก และจะมีค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมสูงสุดที่การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1 ที่ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 2.2902% ในวันธรรมดา (ตำแหน่ง 196\_658288 เฟส C) และ 2.3098% ในวันหยุดสุดสัปดาห์ (ตำแหน่ง 196\_658288 เฟส C)

ทั้งนี้ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมที่เกิดขึ้นจากการทดสอบด้วยการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบที่ 1,2 และ 3 นั้น ยังไม่เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งการไฟฟ้านครหลวงกำหนดค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมในระบบแรงดันต่ำไว้ที่ 5% และนอกจากค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่จ่ายกระแสฮาร์มอนิกทั้ง 3 รูปแบบ ที่ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด (ตำแหน่ง 196\_658288 เฟส C) ของวันหยุดสุดสัปดาห์ ที่เวลา 12.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 6.28 ถึงรูปที่ 6.30

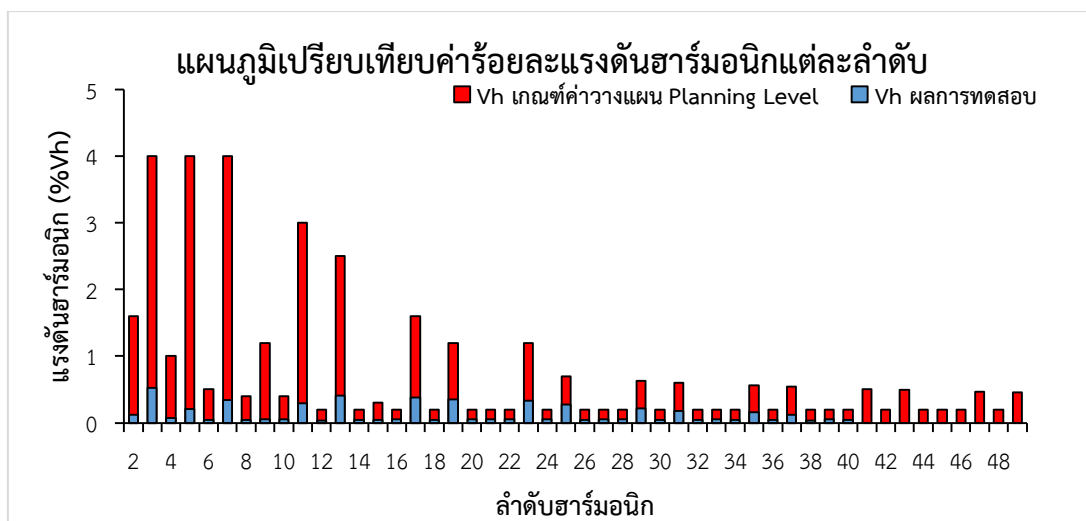




รูปที่ 6.28 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง กรณีระบบไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V)



รูปที่ 6.29 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง กรณีระบบไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V)



รูปที่ 6.30 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง กรณีระบบไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V)

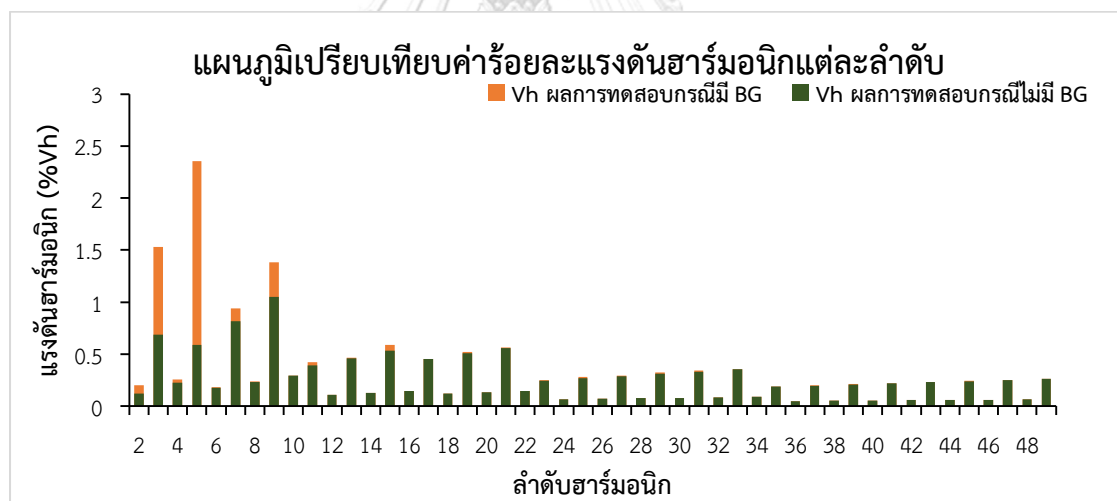
จากรูปที่ 6.28 ได้แสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่ตำแหน่ง 196\_658288 เฟส C ของการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1 มีค่าเกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวงในลำดับที่ 15, 21, 27, 33, 39 และ 45 ดังนั้นปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อของการไฟฟ้านครหลวง เป็นปริมาณกำลังผลิตติดตั้งที่ไม่เหมาะสมต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) และเนื่องจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ทำการทดสอบนี้ ไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทางอยู่ในระบบ แต่ยังคงมีลำดับฮาร์มอนิกที่กล่าวข้างต้นเกินค่าวางแผน ผู้วิจัยพิจารณาเห็นว่า อาจเกิดจากการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในลำดับดังกล่าวมีค่าสูง (หากการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกมีค่าสูง จะส่งผลให้แรงดันฮาร์มอนิกมีค่าสูงได้เช่นกัน ดังการคำนวณค่าแรงดันฮาร์มอนิกในสมการที่ (19) และค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวงที่กำหนดไว้อาจมีค่าต่ำ จึงทำให้แรงดันฮาร์มอนิกของลำดับฮาร์มอนิกดังกล่าวเกินค่าวางแผนได้ อย่างไรก็ตาม ในการหาปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดที่เหมาะสมต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ ในการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1 ผู้วิจัยจะทำการลดปริมาณกำลังผลิตติดตั้งลงจากข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง เพื่อหาปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดที่เหมาะสม โดยทำให้ลำดับฮาร์มอนิกที่เกินดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์

จากรูปที่ 6.29 และรูปที่ 6.30 ได้แสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่ตำแหน่ง 196\_658288 เฟส C ของการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 2 และ 3 ไม่มีฮาร์มอนิกลำดับใดเกินค่า

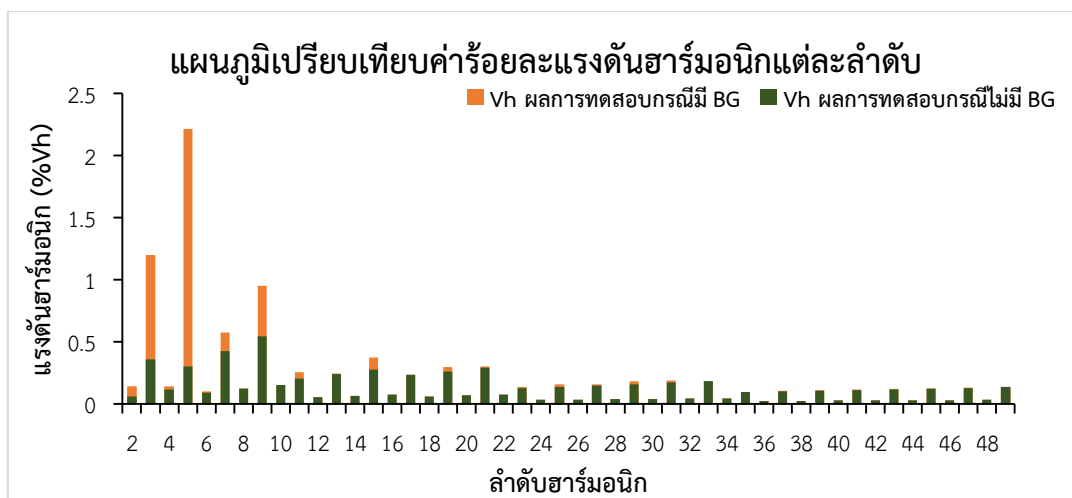
วางแผนของการไฟฟ้านครหลวง ผู้วิจัยจะทำการหาปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดที่เหมาะสมให้แก่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) ในส่วนถัดไป

**หมายเหตุ :** ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ(230/400 V) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง จะแสดงไว้ใน ภาคผนวก ก.

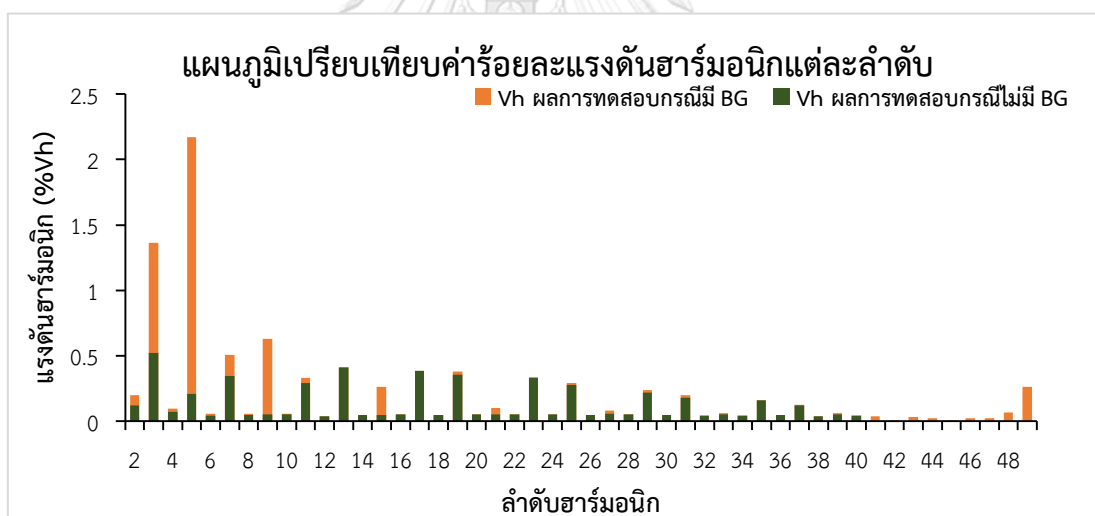
ทั้งนี้ ในการทดสอบระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) กรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง วันและเวลาที่ทำการทดสอบที่ให้ค่าร้อยละความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกสูงสุดจะอยู่ใน วันหยุดสุดสัปดาห์ ที่เวลา 12.00 น. เพื่อให้เห็นถึงข้อแตกต่างของการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ กรณีที่ระบบมีและไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง ผู้วิจัยจึงทำการพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดสอบในกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง กับกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทางใน วันหยุดสุดสัปดาห์ ที่เวลา 12.00 น. ในทุกรูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 6.31 ถึง รูปที่ 6.33



รูปที่ 6.31 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง กับ กรณีระบบไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V)



รูปที่ 6.32 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง กับ กรณีระบบไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V)



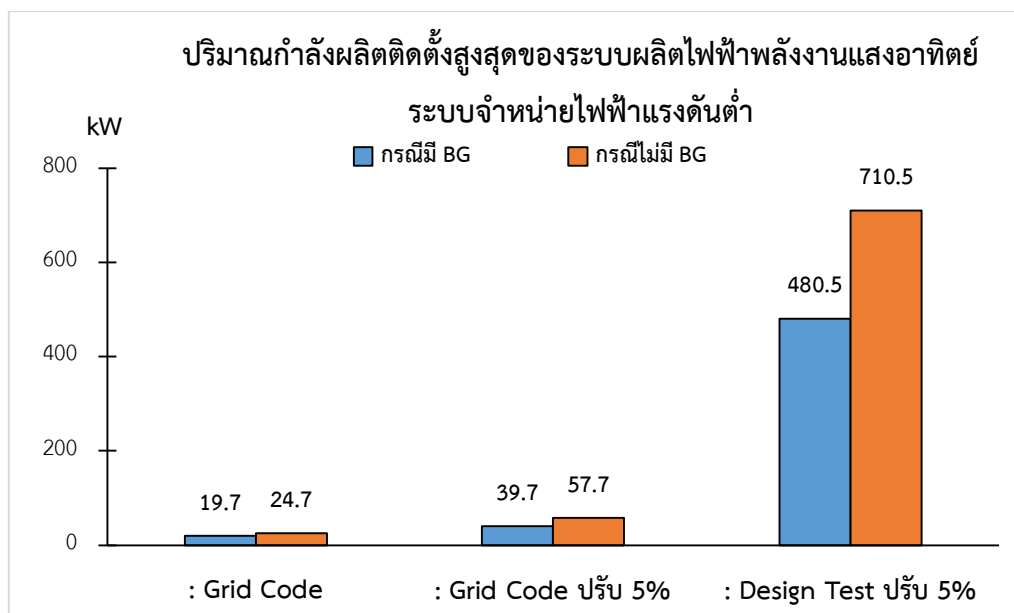
รูปที่ 6.33 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง กับ กรณีระบบไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V)

จากรูปที่ 6.31 ถึง รูปที่ 6.33 จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับในกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง จะมีค่ามากกว่าค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับในกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง ในทุกรูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์ และจากผลการทดสอบนี้ ผู้วิจัยได้นำไปเป็นกรณี

ของการหาปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมให้แก่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) นี้ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเสนอแนะการปรับปรุงปริมาณกำลังผลิตติดตั้งภายในข้อกำหนดการเชื่อมต่อของการไฟฟ้านครหลวงต่อไป

ทั้งนี้ผลการทดสอบของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) สำหรับการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกประเภทที่ 1 กรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง มีลำดับฮาร์มอนิกที่ 9, 15, 21, 27, 33, 39 และ 45 เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง และกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง มีลำดับฮาร์มอนิกที่ 15, 21, 27, 33, 39 และ 45 เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง และการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกประเภทที่ 2 กรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง มีลำดับฮาร์มอนิกที่ 15 และ 21 เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง และกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง มีลำดับฮาร์มอนิกที่ 21 เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งผู้วิจัยพิจารณาเห็นว่าอาจเป็นผลจากการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่เกินดังกล่าวมีค่าสูง และค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวงกำหนดไว้ในเกณฑ์ที่ต่ำ ผู้วิจัยจึงจะทำการลดปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ลง เพื่อที่จะให้ค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่ได้จากผลการทดสอบไม่เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง และนำไปเป็นข้อสรุปปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดที่เหมาะสมต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) ของการไฟฟ้านครหลวงต่อไป ทั้งนี้เพื่อที่จะไม่ต้องลดปริมาณกำลังผลิตติดตั้งจากข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ผู้วิจัยเสนอแนะให้ทางการไฟฟ้านครหลวงมีการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิก (Harmonic Filter) เพื่อที่จะกำจัด หรือลดทอนค่าแรงดันฮาร์มอนิกดังกล่าว

ในส่วนถัดไป ผู้วิจัยได้ทำการหาปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดที่เหมาะสมกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) โดยการเพิ่มปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในปริมาณที่มากกว่าข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ทั้งในกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีและไม่มีแหล่งจ่ายแรงดันฮาร์มอนิก สำหรับการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกประเภทที่ 3 แต่ในการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกประเภทที่ 1 และ 2 ผู้วิจัยจะทำการลดปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ลงจากข้อกำหนดการเชื่อมต่อของการไฟฟ้านครหลวง โดยผลการค้นหาจะแสดงได้ดังรูปที่ 6.34



รูปที่ 6.34 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ กรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง กับ กรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V)

จากรูปที่ 6.34 ได้แสดงให้เห็นถึงปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดที่เหมาะสมกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) ในกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง เปรียบเทียบกับกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง จะเห็นว่าในกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทางจะสามารถมีปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดได้มากกว่ากรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกเบื้องหลัง โดยสามารถติดตั้งได้ 24.7 kW ในการจ่ายกระแสฮาร์มอนิก รูปแบบที่ 1 (ซึ่งเป็นปริมาณกำลังผลิตติดตั้งที่ลดปริมาณลงจากข้อกำหนดการเชื่อมต่อของการไฟฟ้านครหลวงแล้ว) ติดตั้งได้ 57.7 kW ในการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 2 และติดตั้งได้ 710.5 kW ในการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 3 ซึ่งหากเพิ่มปริมาณกำลังผลิตติดตั้งเกินจากนี้ จะส่งผลให้มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ 25 เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวงในการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 3

#### 6.2.4 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network)

ในการทดสอบระบบนี้ ทำการทดสอบในกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกเบื้องหลังเพียงกรณีเดียวเท่านั้น

ตารางที่ 6.19 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุดของการทดสอบกรณีในระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลัง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์รูปแบบที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network)

เวลา	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด
12.00 น.	1.4951	N_1_2 / N_1_3/N_2_3

ตารางที่ 6.20 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุดของการทดสอบกรณีในระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลัง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์รูปแบบที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network)

เวลา	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด
12.00 น.	0.7795	N_1_2 / N_1_3/N_2_3

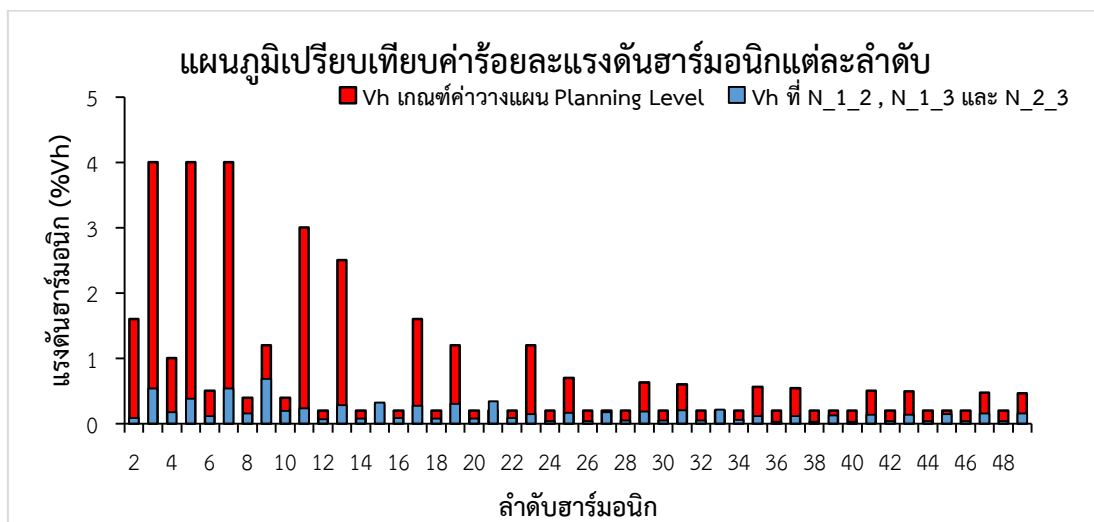
ตารางที่ 6.21 ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมและตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุดของการทดสอบกรณีในระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลัง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์รูปแบบที่ 3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network)

เวลา	%THDv	ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด
12.00 น.	0.7537	N_1_2 / N_1_3/N_2_3

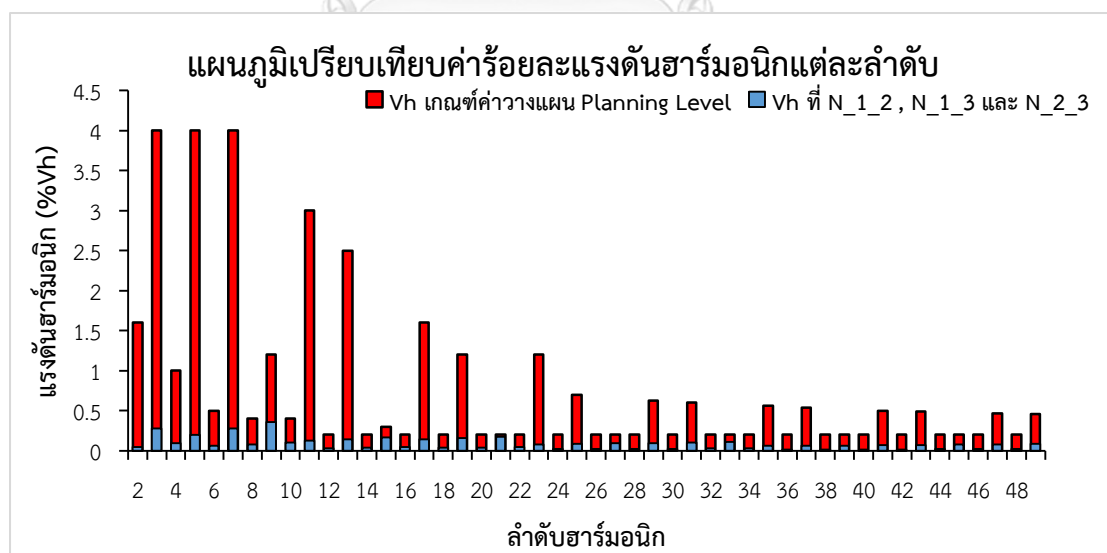
จากตารางที่ 6.19 ถึง ตารางที่ 6.21 ได้แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยปริมาณกำลังผลิตติดตั้งตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อบระบบไฟฟ้าที่ตำแหน่งกลางสายจะมีค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมสูงสุด ณ เวลา 12.00 น. ที่ตำแหน่ง N\_1\_2 , N\_1\_3 และ N\_2\_3 เช่นเดียวกันทั้ง 3 รูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิก และจะมีค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมสูงที่สุดที่การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1 ที่ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 1.4951% (ตำแหน่ง N\_1\_2 , N\_1\_3 และ N\_2\_3)

ทั้งนี้ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมที่เกิดขึ้นจากการทดสอบด้วยการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบที่ 1,2 และ 3 นั้น ยังไม่เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งการไฟฟ้านครหลวงกำหนดค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมในระบบแรงดันต่ำไว้ที่ 5% และนอกจากค่าความ

เพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่จ่ายกระแสฮาร์มอนิกทั้ง 3 รูปแบบ ที่ตำแหน่งที่เกิดผลกระทบสูงสุด (ตำแหน่ง N\_1\_2 , N\_1\_3 และ N\_2\_3) ดังแสดงในรูปที่ 6.35 ถึง รูปที่ 6.37

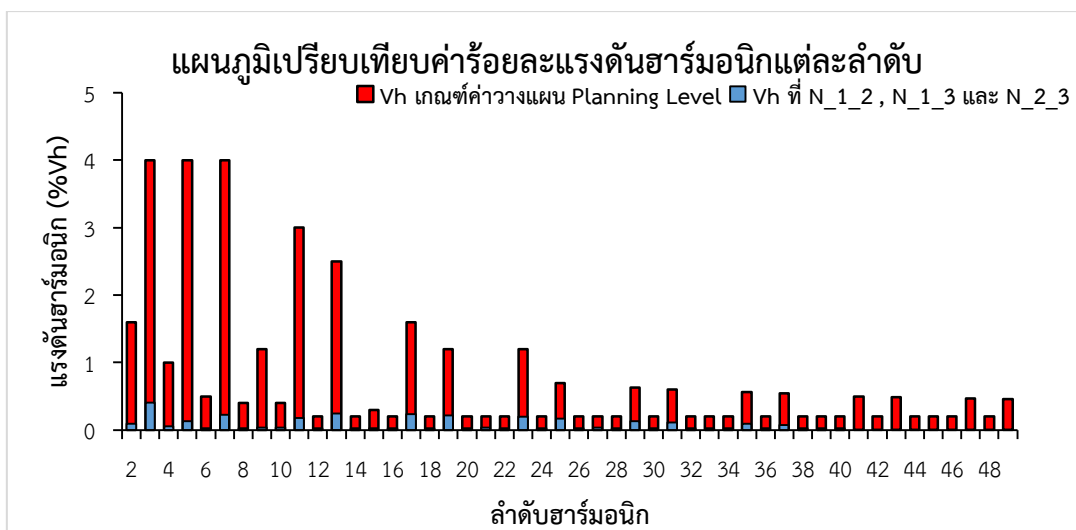


รูปที่ 6.35 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network)



รูปที่ 6.36 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network)



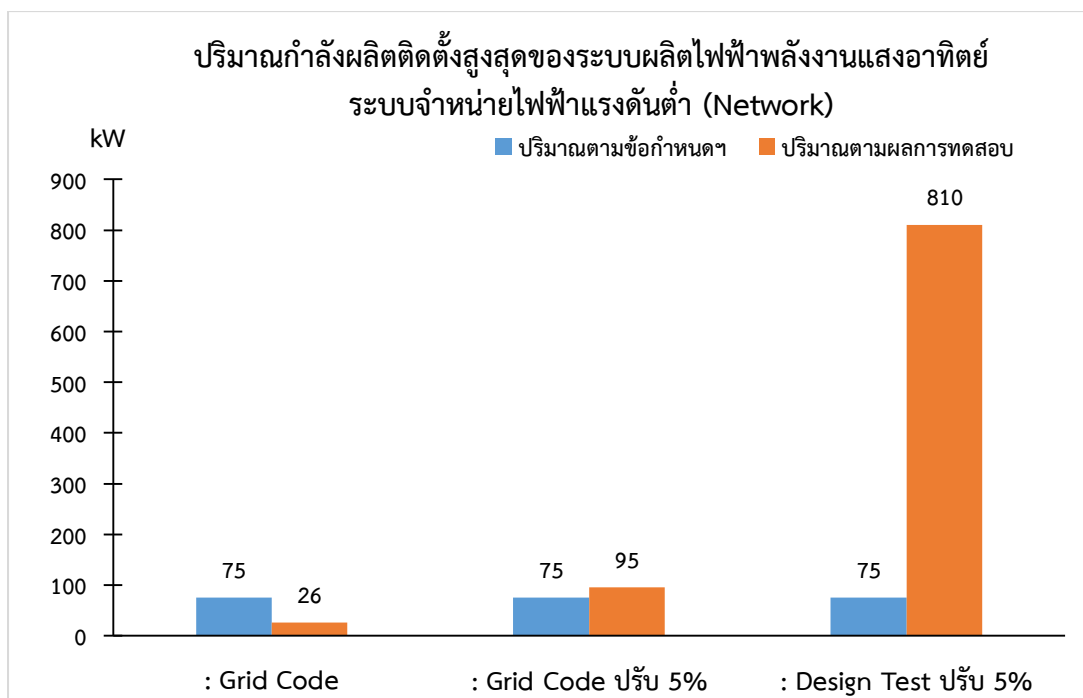


รูปที่ 6.37 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่าร้อยละแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ตำแหน่งเกิดผลกระทบสูงสุด กับค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network)

จากรูปที่ 6.35 ถึง รูปที่ 6.37 จะเห็นว่า ที่การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1 มีผลทำให้ค่าแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ 15, 21 และ 33 เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง ส่วนในการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 2 และ 3 ไม่มีลำดับฮาร์มอนิกที่เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งการที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 15, 21 และ 33 เกินค่าวางแผน ผู้วิจัยพิจารณาเห็นว่าอาจเป็นผลมาจากการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกลำดับดังกล่าว ที่มีการจ่ายกระแสที่สูงอยู่ก่อนแล้ว และค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง กำหนดเกณฑ์ไว้ที่ค่าต่ำ ทำให้ค่าแรงดันฮาร์มอนิกลำดับดังกล่าวนั้นเกินค่าวางแผน

**หมายเหตุ :** ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ(230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องต้นที่แหล่งจ่ายต้นทาง จะแสดงไว้ใน ภาคผนวก ก.

ในส่วนถัดไป ผู้วิจัยได้ทำการหาปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดที่เหมาะสมกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network) โดยการเพิ่มปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในปริมาณที่มากกว่าข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง สำหรับการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 2 และ 3 แต่ในการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1 ผู้วิจัยจะทำการลดปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ลงจากข้อกำหนดการเชื่อมต่อของการไฟฟ้านครหลวง โดยผลการค้นหาจะแสดงได้ดังรูปที่ 6.38



รูปที่ 6.38 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ กรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง กับปริมาณตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า ของการไฟฟ้านครหลวง ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network)

จากรูปที่ 6.38 ได้แสดงให้เห็นถึงปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดที่เหมาะสมกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network) เปรียบเทียบกับปริมาณกำลังผลิตติดตั้งตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อของการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบที่ 1 เพื่อจะมีให้ค่าแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ 15, 21 และ 33 เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง ผู้วิจัยได้ทำการลดปริมาณกำลังผลิตติดตั้งลงจากปริมาณในข้อกำหนดการเชื่อมต่อของการไฟฟ้านครหลวง โดยปริมาณกำลังผลิตติดตั้งที่เหมาะสมกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network) เท่ากับ 26 kW (1 จุดเชื่อมต่อ) และสามารถติดตั้งได้ 95 kW ในการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบที่ 2 และติดตั้งได้ 810 kW ในการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบที่ 3 ซึ่งหากเพิ่มปริมาณกำลังผลิตติดตั้งเกินจากนี้จะส่งผลให้มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ 21 เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวงในการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบที่ 2 และในส่วนของ การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกในรูปแบบที่ 3 เมื่อเพิ่มปริมาณกำลังผลิตติดตั้งเกินค่าสูงสุดที่หาได้ข้างต้น จะส่งผลให้มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 เกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง

### 6.3 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบระบบจำหน่ายไฟฟ้า 3 ระบบ ของการไฟฟ้านครหลวง และ 1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้ารูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่ายทั่วไป สามารถสรุปปริมาณกำลังผลิตติดตั้งที่เหมาะสมของระบบจำหน่ายไฟฟ้างกล่าว ได้ดังตารางที่ 6.22

ตารางที่ 6.22 ตารางสรุปปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ระดับแรงดัน	ปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุด PV (Max PV)	%THDv	ถ้าหาก > Max PV
<b>มี BG</b>			
<b>HV 115 kV</b>			
: Grid Code	338 MW	1.1818	h=4 จะเกินค่า วางแผน
: Grid Code Step Down 5%	647 MW	1.1323	h=4 จะเกินค่า วางแผน
: Design Test Step Up 5%	861 MW	1.4684	h=2 จะเกินค่า วางแผน
<b>MV 24 kV</b>			
: Grid Code	H 21,27,29,31 และ 33 เกินค่าวางแผนตั้งแต่ปริมาณ PV ตาม Grid Code ทำให้ไม่สามารถหาค่า Max PV ใหม่ได้		
: Grid Code Step Down 5%	H 21,27,29 และ 31 เกินค่าวางแผนตั้งแต่ปริมาณ PV ตาม Grid Code ทำให้ไม่สามารถหาค่า Max PV ใหม่ได้		
: Design Test Step Up 5%	H 21,27,29 และ 31 เกินค่าวางแผนตั้งแต่ปริมาณ PV ตาม Grid Code ทำให้ไม่สามารถหาค่า Max PV ใหม่ได้		
<b>LV 230/400 V</b>			
: Grid Code	19.7 kW	2.5417	
: Grid Code Step Down 5%	39.7 kW	2.5839	
: Design Test Step Up 5%	480.5 kW	4.9946	%THDv เกินค่า วางแผน
<b>ไม่มี BG</b>			
<b>HV 115 kV</b>			

ระดับแรงดัน	ปริมาณกำลังผลิตติดตั้งสูงสุด PV (Max PV)	%THDv	ถ้าหาก>Max PV
: Grid Code	681 MW	1.0490	h=4 จะเกินค่า วางแผน
: Grid Code Step Down 5%	1238 MW	1.0003	h=4 จะเกินค่า วางแผน
: Design Test Step Up 5%	1507 MW	1.3537	h=2 จะเกินค่า วางแผน
<b>MV 24 kV</b>			
: Grid Code	48.48 MW	1.2718	h=30 จะเกินค่า วางแผน
: Grid Code Step Down 5%	139.2 MW	1.8400	โปรแกรมไม่สามารถ รัน Load Flow ได้
: Design Test Step Up 5%	139.2 MW	1.2404	โปรแกรมไม่สามารถ รัน Load Flow ได้
<b>LV 230/400 V</b>			
: Grid Code	24.7 kW	0.6653	
: Grid Code Step Down 5%	57.7 kW	0.7503	
: Design Test Step Up 5%	710.5 kW	4.5825	h=25 จะเกินค่า วางแผน
<b>LV Network 400 V</b>			
: Grid Code	26 kW	0.7478	
: Grid Code Step Down 5%	95 kW	0.9131	h=21 จะเกินค่า วางแผน
: Design Test Step Up 5%	810 kW	4.6605	h=3 จะเกินค่า วางแผน

จากตารางที่ 6.22 และผลการทดสอบที่ได้ จะเห็นว่า ในกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีและไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์ใน

รูปแบบที่ 3 ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถติดตั้งได้มากที่สุด ในทุกระบบจำหน่ายไฟฟ้า ที่ทำการทดสอบ โดยหากเพิ่มปริมาณกำลังผลิตติดตั้งเกินจากค่าดังตารางนี้แล้ว จะพบว่า จะมีแรงดันฮาร์มอนิกบางลำดับเกินจากค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งไม่ตรงตามการประเมินดัชนีทางฮาร์มอนิก แต่ในบางรูปแบบการจ่ายกระแสฮาร์มอนิก และบางระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้น จะพบว่า โปรแกรมจะไม่สามารถทำการคำนวณในขั้นตอนของ Load Flow ได้ เนื่องจากปริมาณกำลังผลิตติดตั้งดังกล่าวอาจมีค่ามากเกินไปกว่าองค์ประกอบที่ใช้ในการคำนวณ Load Flow ของโปรแกรม

และในกรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง จะสามารถติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ได้มากกว่ากรณีที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง เนื่องจาก ค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง ดังกล่าว จะส่งผลให้ค่าแรงดันฮาร์มอนิกลัพธ์ของระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้น มีค่าสูงขึ้นได้ และจากผลการทดสอบสามารถสรุปผลการทดสอบในแต่ละระดับแรงดันได้ดังตารางที่ 6.23



ตารางที่ 6.23 สรุปผลการทดสอบในแต่ละระดับแรงดัน

พารามิเตอร์	แรงดันสูง (115 kV)		แรงดันปานกลาง (24 kV)		แรงดันต่ำ (230/400 V - Radial)		แรงดันต่ำ (230/400 V - Network)
	กรณีมี Background Harmonic	กรณีไม่มี Background Harmonic	กรณีมี Background Harmonic	กรณีไม่มี Background Harmonic	กรณีมี Background Harmonic	กรณีไม่มี Background Harmonic	
ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม (%THDv)							
รูปแบบที่ 1	0.8000	0.3321	2.7911	0.4419	3.6918	2.3098	1.4951
รูปแบบที่ 2	0.5948	0.1731	2.7665	0.2148	2.9150	1.2042	0.7795
รูปแบบที่ 3	0.6074	0.1693	2.763	0.1384	2.8793	1.1534	0.7537
การละเมิดค่าวางแผน (Planning Level) เมื่อเชื่อมต่อ PV ตามข้อจำกัด	X	X	✓	✓	✓	✓	✓

## บทที่ 7

### สรุปรูทวิทยานิพนธ์

บทสรุปรูทวิทยานิพนธ์นี้ จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นส่วนสรุปรูทของวิทยานิพนธ์และผลที่ได้จากการทดสอบที่นำเสนอไว้ในบทที่ 5 และส่วนที่สองกล่าวถึงข้อเสนอแนะที่ควรแก้ไข หรือเพิ่มเติมในวิทยานิพนธ์นี้

#### 7.1 สรุปรูท

1) ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีความแตกต่างกันไปในแต่ละประเทศ แต่ในหลายๆประเทศ มีการนำเอามาตรฐานต่างๆ มาใช้ในการอ้างอิงเพื่อเป็นข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของประเทศนั้นๆ จึงทำให้ในการกำหนดเกณฑ์บางอย่างมีข้อมูลที่เหมาะสมกัน และสำหรับปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่จะเข้ามาเชื่อมต่อในระบบนั้น ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับแต่ละประเทศว่าจะกำหนดเกณฑ์ไว้ที่ปริมาณเท่าใด ตามแต่ละเหตุผลที่ต่างกันไป

2) ปัจจัยที่ทำให้เกิดผลกระทบทางด้านฮาร์โมนิกต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า

2.1) แหล่งจ่ายฮาร์โมนิกเบื้องหลัง (Background Harmonic) ที่แหล่งจ่ายต้นทางส่งผลต่อค่าแรงดันฮาร์โมนิกลิฟท์ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยหากระบบที่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทางที่สูงอยู่ก่อนแล้ว จะมีส่วนทำให้ค่าแรงดันฮาร์โมนิกลิฟท์มีค่าสูง และอาจเกินค่าวางแผนของการไฟฟ้านครหลวงได้ แต่ทั้งนี้ในความเป็นจริง ก่อนการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่จะนำระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ไปทำการเชื่อมต่อ อาจจะมีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทางอยู่ก่อนแล้ว โดยฮาร์โมนิกเหล่านี้อาจเกิดจาก อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นเชื่อมต่ออยู่ในระบบโครงข่ายไฟฟ้า จากผู้ผลิตไฟฟ้ารายอื่น เป็นต้น ทั้งนี้การไฟฟ้านครหลวงควรปรับปรุงระบบจำหน่ายไฟฟ้าเดิมโดยอาจจะทำการติดตั้งตัวกรองฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้า หรือ อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับอิมพีแดนซ์ในระบบไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ หรือทำการติดตั้งอุปกรณ์ที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงความถี่ในระบบได้ เช่น ชุดตัวเก็บประจุ หรือตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า เป็นต้น

2.2) ปริมาณกระแสฮาร์โมนิกจากอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์รูปแบบที่มีการจ่ายกระแสฮาร์โมนิกแต่ละลำดับสูง มีแนวโน้มจะก่อให้เกิดผลกระทบด้านฮาร์โมนิกในระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้มากขึ้น โดยที่ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงาน

แสงอาทิตย์ จะมีการใช้อินเวอร์เตอร์ที่ต่างชนิด ต่างยี่ห้อกันไปในแต่ละระบบ ซึ่งโดยทั่วไปนั้น ปริมาณการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับจากอินเวอร์เตอร์ของบริษัทผู้ผลิตแต่ละราย และแต่ละรุ่นจะมีค่าไม่เท่ากัน และรวมถึงเมื่ออินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าในปริมาณที่ ต่างกันเทียบกับขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ สัดส่วนปริมาณการจ่ายกระแส ฮาร์มอนิกแต่ละลำดับของอินเวอร์เตอร์ก็จะมีค่าแตกต่างกันด้วย

ในการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์ทั้ง 3 รูปแบบ จะเห็นว่า ถ้าใช้ ค่ากระแสฮาร์มอนิกจากการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากอินเวอร์เตอร์จริงที่ได้รับการทดสอบ ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า ของการไฟฟ้านครหลวง จะมีการจ่าย กระแสฮาร์มอนิกที่ต่ำ ทำให้ผลการหาปริมาณกำลังผลิตติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงาน แสงอาทิตย์ สามารถมีปริมาณที่มากกว่าในกรณีการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกจากข้อกำหนดการ เชื่อมต่อระบบไฟฟ้าโดยตรง

2.3) ปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ที่มีการ กำหนดไว้ใน ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า ของการไฟฟ้านครหลวง ในการ กำหนดปริมาณนั้น ถ้าหากพิจารณาในส่วนของคุณภาพไฟฟ้า ด้านฮาร์มอนิก จากผลการ ทดสอบจะเห็นว่าระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีปริมาณกำลังผลิตติดตั้งมาก จะมี แนวโน้มที่ก่อให้เกิดผลกระทบด้านฮาร์มอนิกในระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้มากขึ้น

นอกจากนี้พบว่าระบบโครงข่ายไฟฟ้า แรงดันสูง (115kV) ยังสามารถที่จะเพิ่ม ปริมาณกำลังผลิตติดตั้งให้มากกว่าที่กำหนดไว้ในข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า ของการ ไฟฟ้านครหลวงได้อีก โดยที่ดัชนีทางฮาร์มอนิกยังไม่เกินจากเกณฑ์ของค่าวางแผนฯ แต่ใน ส่วนของระบบโครงข่ายไฟฟ้า แรงดันปานกลาง (24kV) ปริมาณกำลังผลิตติดตั้ง 20% ของ พิกัดหม้อแปลงนั้น อาจต้องได้รับการพิจารณาปรับลดปริมาณที่กำหนดไว้ลง แต่ยังคงต้อง อาศัยการพิจารณาปัจจัยในหลายๆด้าน เช่น การจ่ายกระแสของอินเวอร์เตอร์ อุปกรณ์ไฟฟ้า ที่เชื่อมต่ออยู่ก่อนแล้วในระบบ ทั้งนี้ ผู้วิจัยเสนอให้การไฟฟ้านครหลวงมีการปรับปรุงระบบ จำหน่ายไฟฟ้าของทางการไฟฟ้าเอง เนื่องจากการที่ระบบมีตัวเก็บประจุติดตั้งอยู่ในระบบ จำหน่ายไฟฟ้า ส่วนของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) มีทั้งในกรณีสามารถ ปรับเพิ่มปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มากกว่าข้อ กำหนดการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า ของการไฟฟ้านครหลวง และเสนอให้มีการติดตั้งอุปกรณ์ ลดทอนฮาร์มอนิก ที่เรียกว่า ตัวกรองฮาร์มอนิก (Harmonic Filter) ให้กับระบบ เพื่อ ลดทอนฮาร์มอนิกลำดับที่เกินดังกล่าวลง



2.4) ตำแหน่งติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ไว้ ณ ตำแหน่งปลายสายของระบบ มีผลทำให้ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกที่ปลายสายมีค่ามากที่สุด เนื่องจากปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกคำนวณได้จากสมการที่ (1) ยิ่งระยะทางไกลมากเท่าไร อิมพีแดนซ์ที่บัสยิ่งมีค่ามาก ปริมาณแรงดันฮาร์มอนิกที่คำนวณได้มีค่าสูงขึ้น แนวโน้มผลกระทบต่อฮาร์มอนิกต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าก็มีค่ามากขึ้นด้วย

2.5) ค่าลัดวงจร (Short Circuit) จากผลการทดสอบทำให้ทราบว่าหากระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าลัดวงจร (Short Circuit) สูง ระบบจะแข็งแรง ส่งผลให้ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมมีค่าลดลง แต่หากค่าลัดวงจรมีค่าลดลง จะส่งผลให้ค่าความเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวมมีค่าเพิ่มขึ้น

3) ค่าวางแผน (Planning Level) ของการไฟฟ้านครหลวง ในการประเมินดัชนีทางแรงดันฮาร์มอนิก เกณฑ์ที่กำหนดไว้นั้นในบางลำดับอาจมีค่าที่ต่ำมากเกินไป ทำให้ง่ายต่อการละเมิดค่าวางแผนที่ลำดับนั้น ซึ่งในการประเมินดัชนีทางฮาร์มอนิกของแต่ละระบบจำหน่ายไฟฟ้า การละเมิดเกณฑ์ค่าวางแผนจะละเมิดในลำดับฮาร์มอนิกที่แตกต่างกัน ดังนั้น การพิจารณาเลือกค่าที่จะนำมาเป็นเกณฑ์ในการประเมินควรคำนึงถึงเหตุปัจจัยในหลายๆด้าน เช่น แรงดันระบบ โหลดของระบบ ค่าฮาร์มอนิกเบื้องหลัง และการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ เป็นต้น

## 7.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1) ทำการทดสอบโดยการติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิก หรือติดตั้งอุปกรณ์ทางไฟฟ้า เพื่อทำการลดทอนฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ และเป็นการศึกษาเพื่อเสนอแนะทางเลือกในการปรับปรุงระบบให้การไฟฟ้านครหลวงต่อไป

2) เนื่องจากข้อจำกัดในปริมาณกำลังผลิตติดตั้งในการคำนวณ Load Flow ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่วิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ จึงเห็นควรว่าให้มีทดลองการทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ชนิดอื่น อาจจะสามารถคำนวณปริมาณกำลังผลิตติดตั้งได้มากขึ้นจากโปรแกรม DigSILENT PowerFactory

3) ในระบบจำหน่ายไฟฟ้ายังมีปัญหาทางด้านคุณภาพไฟฟ้าอื่น ที่นอกเหนือจากด้านฮาร์มอนิก เช่น แรงดันกระเพื่อม (Voltage Fluctuation) และแรงดันไม่สมดุล (Voltage Unbalance) ดังนั้นในภายหน้า ควรทำการวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าวข้างต้นควบคู่ไปกับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของวิทยานิพนธ์นี้ด้วย

4) การไฟฟ้านครหลวงอาจมีการทำการพิจารณาความถี่เรโซแนนซ์ในระบบก่อนที่จะทำการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการจ่ายกระแสฮาร์โมนิกที่ความถี่เรโซแนนซ์จะส่งผลให้แรงดันฮาร์โมนิกเกินจากค่าวางแผน



## รายการอ้างอิง

1. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์, แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 - 2579, กระทรวงพลังงาน, Editor. 2558, 2558.
2. Latheef, A., et al. *Harmonic impact of photovoltaic inverters on low voltage distribution systems. in the 2006 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC'06)*. 2006.
3. Panaya Sudta, Patiphan Thupphae, and W. Kumwong, *Optimal DG Based on Solar Rooftop PV Placement and Sizing in Balanced Distribution Systems with Harmonics Consideration Using Particle Swarm Optimization*, in *PEACON & INNOVATION*. 2017.
4. Ketut, D., et al., *HARMONICS ISSUES THAT LIMIT SOLAR PHOTOVOLTAIC GENERATION ON DISTRIBUTION CIRCUIT*, in *SOLAR 2012*. 2012: Denver.
5. Kelapure, M.M.a.S., *Aggregated rooftop PV sizing in distribution feeder considering harmonic distortion limit*, in *2016 National Power Systems Conference (NPSC)*. 2016: Bhubaneswar. p. 1-6.
6. Arrillaga, J., et al., *POWER SYSTEM HARMONIC ANALYSIS*. 2000.
7. การไฟฟ้านครหลวง, ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2558. 2558.
8. Imtiaz Ahmed, M.Z.S., Md. Muksudul Alam, *An Overview of Harmonic Sources in Power System*. IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE), 2013. 7(3): p. 01-03.
9. Power Quality Team Co., L. ปัญหาฮาร์มอนิก. 2016; Available from: <http://www.pq-team.com/engineering-zone/harmonic-problem>.
10. วรวิทย์ องค์กรนันท์ และ เกียรติวิทยุท กวีญาณ, โปรแกรมการไหลของกำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง, in การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45. 2550: กรุงเทพมหานคร. p. 121-130.
11. พีรยุทธ แสงศิลป์, การพัฒนาระบบจำลองการไหลของกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง, in ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2540, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
12. สุรัชชัย ชัยทัศน์, พลังงานหมุนเวียนและการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

13. Electric, S., *Conext TL Three-phase grid-tie solar inverter*.
14. HUAWEI, *String Inverter (SUN2000-8/12KTL)*.
15. DIgSILENT, *DIgSILENT PowerFactory 15, User Manual*.
16. Commission, I.E., *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems*, in *IEC 61000-3-6, 2.0*, Editor. 2008, IEC.
17. มนัส อรุณวัฒนาพร, *มาตรฐานคุณภาพไฟฟ้าของประเทศไทยและทิศทางในอนาคต*, in *งานวันวิชาการ กฟน. 2549*.
18. ปริญญา ธรรมวงศ์ และ เกียรติยุทธ กวีญาณ, *หลักการกำหนดมาตรฐานฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย*. วิศวกรรมสาร มก., 2556. 83(26): p. 56-63.
19. Association, E.N., *Engineering Recommendation G5/4-1*. 2005.
20. Yuan-Kang Wu, J.-H.L.a.H.-J.L., *Standards and Guidelines for Grid-Connected Photovoltaic Generation Systems: A Review and Comparison*. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017. 53(4): p. 3205-3216.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ภาคผนวก ก.

## ก.1 ข้อมูลระบบทดสอบ

ตารางที่ ก.1 ค่าพารามิเตอร์ของสถานีไฟฟ้าต้นทางที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)

สถานีไฟฟ้า	แรงดันบัส (kV)	R0/X0 Ratio	R1/X1 Ratio	กำลังไฟฟ้าลัดวงจร สูงสุด (กิโลโวลต์-แอมแปร์)	กระแสลัดวงจร สูงสุด (kA)
115_A	115	0.0465	0.04351	4,242,658	21.3

ตารางที่ ก.2 ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า สถานีไฟฟ้าต้นทาง 115\_A

หม้อแปลง สถานีไฟฟ้า	ค่าพิกัด กำลังไฟฟ้า (MVA)	ค่าพิกัดแรงดัน ด้านปฐมภูมิ (kV)	ค่าพิกัดแรงดัน ด้านทุติยภูมิ (kV)	ค่าพารามิเตอร์ในหม้อแปลง สถานีไฟฟ้า	
				Resistance (p.u.)	Reactance (p.u.)
115_B TR1	40	112-D	24-y	0.000247	0.15679
115_B TR2	40	112-D	24-y	0.000247	0.15679
115_Ab TR1	60	112-D	24-y	0.00416	0.21200
115_Ac TR1	60	112-D	24-y	0.00416	0.19324

ตารางที่ ก.3 ค่าพารามิเตอร์ของสายส่งในระบบจำหน่ายไฟฟ้า สถานีไฟฟ้าต้นทาง 115\_A

ระบบสายส่ง	ค่าพิกัดแรงดัน และ กระแส (kV / kA)	ค่าพารามิเตอร์ในสายส่ง 115_A.4					
		Resistance (Ohm/km)		Reactance (Ohm/km)		Susceptance (uS/km)	
		R1	R0	X1	X0	B1	B0
สายอากาศ Bundle	115/1.32	0.03835	0.21557	0.26715	1.23918	4.23440	1.76862

ระบบสายส่ง	ค่าพิกัดแรงดัน และ กระแส  (kV / kA)	ค่าพารามิเตอร์ในสายส่ง 115_A.4					
		Resistance (Ohm/km)		Reactance (Ohm/km)		Susceptance (uS/km)	
		R1	R0	X1	X0	B1	B0
สายอากาศ Single	116/1.80	0.07671	0.25392	0.36237	1.33440	3.17580	1.58790
สายใต้ดิน Bundle	116/1.80	0.01587	0.28037	0.08861	0.79218	161.1538 8	161.1342 2

ตารางที่ ก.4 ค่าพารามิเตอร์ของสถานีไฟฟ้าต้นทางที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)

สถานีไฟฟ้า	แรงดันบัส (kV)	R0/X0 Ratio	R1/X1 Ratio	กำลังไฟฟ้าลัดวงจร สูงสุด (กิโลโวลต์-แอมแปร์)	กระแส ลัดวงจร สูงสุด (kA)
24_A	115	0.17346	0.19116	1,633,324	8.2

ตารางที่ ก.5 ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงสถานีไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)

หม้อแปลง สถานีไฟฟ้า	ค่าพิกัดกำลังไฟฟ้า (MVA)	ค่าพิกัดแรงดัน ด้านปฐมภูมิ (kV)	ค่าพิกัด แรงดันด้าน ทุติยภูมิ (kV)	ค่าพารามิเตอร์ในหม้อแปลง สถานีไฟฟ้า	
				Resistance (p.u.)	Reactance (p.u.)
24_A TR1	60	112-D	24-y	0.02805	0.14825

ตารางที่ ก.6 ค่าพารามิเตอร์ของสถานีไฟฟ้าต้นทางที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400V -Radial)

สถานีไฟฟ้า	แรงดันบัส (V)	R0/X0 Ratio	R1/X1 Ratio	กำลังไฟฟ้าลัดวงจร สูงสุด (กิโลโวลต์-แอมแปร์)	กระแส ลัดวงจร สูงสุด (kA)
LV_230400	400	0.1	0.1	3,856.40	0.1855411

ตารางที่ ก.7 ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V -Radial)

หม้อแปลง สถานีไฟฟ้า	ค่าพิกัด กำลังไฟฟ้า (kVA)	ค่าพิกัดแรงดัน ด้านปฐมภูมิ (kV)	ค่าพิกัดแรงดัน ด้านทุติยภูมิ (kV)	ค่าพารามิเตอร์ในหม้อแปลง สถานีไฟฟ้า	
				Resistance (p.u.)	Reactance (p.u.)
Xfr197_54381	750	12-D	0.4-y	0.01433	0.0479

ตารางที่ ก.8 ค่าพารามิเตอร์ของชนิดของสายจำหน่ายในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ

ชนิดของสาย จำหน่าย	ค่าพิกัดแรงดัน และ กระแส (kV / kA)	ค่าพารามิเตอร์ชนิดของสายจำหน่าย					
		Resistance (Ohm/km)		Reactance (Ohm/km)		Susceptance (uS/km)	
		R1	R0	X1	X0	B1	B0
MLINK3	0.4/0.1	0.8664	1.3304	0.1149	0.6250	2.2151	2.2151
400AW185OH3	0.4/0.11	0.2008	0.3490	0.2417	1.5840	2.2151	2.2151



ตารางที่ ก.9 ค่าพารามิเตอร์ของหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network)

หม้อแปลง สถานีไฟฟ้า	ค่าพิกัด กำลังไฟฟ้า (kVA)	ค่าพิกัด แรงดันด้าน ปฐมภูมิ (kV)	ค่าพิกัด แรงดันด้าน ทุติยภูมิ (kV)	ค่าพารามิเตอร์ในหม้อแปลงสถานีไฟฟ้า	
				Resistance (p.u.)	Reactance (p.u.)
TR500kVA	500	12-D	0.4-y	0.00086	0.04999261

ตารางที่ ก.10 ค่าพารามิเตอร์ของชนิดของสายจำหน่ายในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ

ชนิดของสาย จำหน่าย	ค่าพิกัด แรงดัน และ กระแส (kV / kA)	ค่าพารามิเตอร์ชนิดของสายจำหน่าย					
		Resistance (Ohm/km)		Reactance (Ohm/km)		Susceptance (uS/km)	
		R1	R0	X1	X0	B1	B0
400AW185OH3	0.4/0.11	0.2008	0.3490	0.2417	1.5840	2.2151	2.2151

ก.2 ข้อมูลแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่ตำแหน่งบัสต้นทาง

ก.2.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งบัสต้นทางในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)

วัน	วันธรรมดา	วันหยุดสุดสัปดาห์
Harmonic order	p.u.	p.u.
1	1	1
2	0	0.00009955
3	0.0016504	0.0022116
4	0	0.00008905
5	0.0029348	0.003346
6	0	0.00008573
7	0.0034	0.0010936
8	0	0.00009006
9	0.000007416	0.00009667

วัน	วันธรรมดา	วันหยุดสุดสัปดาห์
Harmonic order	p.u.	p.u.
10	0	0.00009107
11	0	0.00009107
12	0	0.00008976
13	0.000024579	0.00009507
14	0	0.00009126
15	0	0.00009991
16	0	0.00008997
17	0.000004277	0.0004009
18	0	0.00009196
19	0.000030864	0.00031138
20	0	0.00008905
21	0	0.00008854
22	0	0.00008875
23	0.000004277	0.00009126
24	0	0.00008956
25	0.000004284	0.00009067
26	0	0.00008293
27	0	0.00008803
28	0	0.00009077
29	0.000009569	0.00008626
30	0	0.00007476
31	0	0.00007452
32	0	0.00007632
33	0	0.00007488
34	0	0.00007561
35	0	0.00010259
36	0	0.00009097
37	0.000008562	0.00009017

วัน	วันธรรมดา	วันหยุดสุดสัปดาห์
Harmonic order	p.u.	p.u.
38	0	0.00008183
39	0	0.00008803
40	0	0.00008895
41	0.000004277	0.00009047
42	0	0.00008916
43	0	0.00008875
44	0	0.00009037
45	0.000006053	0.00009047
46	0	0.00009137
47	0.000004281	0.00008369
48	0	0.00008986
49	0	0.00010126
THDv%	0.478526655	0.422869546

### ก.2.2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)

ตารางที่ ก.12 ข้อมูลแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งบัสต้นทางในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24kV)

วัน	วันธรรมดา	วันหยุดสุดสัปดาห์
Harmonic order	p.u.	p.u.
1	1	1
2	0.0001	0.0002
3	0.0015	0.0017
4	0.0001	0.0003
5	0.0196	0.0219
6	0.0001	0.0002
7	0.0039	0.0023
8	0.0001	0.0003
9	0.0004	0.0005

วัน	วันธรรมดา	วันหยุดสุดสัปดาห์
Harmonic order	p.u.	p.u.
10	0.0001	0.0001
11	0.0013	0.001
12	0.0001	0.0001
13	0.0012	0.0018
14	0	0.0001
15	0.0004	0.0012
16	0	0.0001
17	0.0007	0.0009
18	0	0.0001
19	0.0009	0.0013
20	0	0.0001
21	0.0005	0.0011
22	0	0.0001
23	0.0005	0.0007
24	0	0
25	0.0004	0.0007
26	0	0.0001
27	0.0003	0.0007
28	0	0
29	0.0003	0.0007
30	0	0
31	0.0002	0.0005
32	0	0
33	0.0001	0.0003
34	0	0
35	0.0001	0.0003
36	0	0
37	0.0001	0.0001

วัน	วันธรรมดา	วันหยุดสุดสัปดาห์
Harmonic order	p.u.	p.u.
38	0	0
39	0	0.0001
40	0	0
41	0	0
42	0	0
43	0	0
44	0	0
45	0	0
46	0	0
47	0	0
48	0	0
49	0	0
THDv%	2.0183	2.2365

### ก.2.3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V)

ในส่วนของคุณค่าฮาร์โมนิกเบื้องหลัง (Background Harmonic) ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ ทางผู้วิจัยมีข้อมูลการตรวจวัดในช่วงระยะเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง เท่านั้น จึงทำให้ข้อมูลในส่วนนี้มีเพียงข้อมูลจากการวัดในวันธรรมดา เพียงข้อมูลเดียว ดังแสดงในตารางที่ ก.13

ตารางที่ ก.13 ข้อมูลแรงดันฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งบัสต้นทางในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ

วัน	วันธรรมดา
Harmonic order	p.u.
1	1
2	0.000912080
3	0.009473192
4	0.000303315
5	0.024022247
6	0.000276174
7	0.003117241

วัน	วันธรรมดา
Harmonic order	p.u.
8	0.000257753
9	0.007069188
10	0.000161068
11	0.001751724
12	0.000048570
13	0.000708832
14	0.000108601
15	0.002957508
16	0.000034340
17	0.000336507
18	0.000019831
19	0.001548832
20	0.000028040
21	0.000959956
22	0.000056076
23	0.000555150
24	0.000028040
25	0.000921290
26	0.000065766
27	0.000683426
28	0.000019831
29	0.001024739
30	0.000000000
31	0.000919155
32	0.000000000
33	0.000435328
34	0.000000000
35	0.000134478

วัน	วันธรรมดา
Harmonic order	p.u.
36	0.000000000
37	0.000385006
38	0.000000000
39	0.000428031
40	0.000000000
41	0.000408765
42	0.000019831
43	0.000359110
44	0.000000000
45	0.000271146
46	0.000019826
47	0.000229499
48	0.000000000
49	0.000218999
THDv%	2.7348

หมายเหตุ : ในส่วนของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network) จะไม่มีข้อมูลฮาร์โมนิกเบื้องหลัง (Background Harmonic) เนื่องจากเป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั่วไป ที่ทำการจำลองขึ้นมาเพื่อทดสอบเพียงอย่างเดียว จึงไม่มีการวัดข้อมูลในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ทำการทดสอบนี้

### ก.3 ข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์โมนิกจากอินเวอร์เตอร์

#### ก.3.1 ระบบไฟฟ้าแรงดันสูง และ แรงดันปานกลาง

ตารางที่ ก.14 ตารางข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์โมนิกของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส รุ่น Conext TL 20000 E ของบริษัท Schneider Electric ซึ่งปรับเพิ่มค่ากระแสฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ จนกระทั่งมีค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์โมนิกรวมเท่ากับ 5% ที่การจ่ายกระแสไฟฟ้า 100% ของค่าพิกัดกระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์

ลำดับฮาร์มอนิก	ขนาดการจ่ายกระแส (%)	ลำดับฮาร์มอนิก	ขนาดการจ่ายกระแส (%)
1	100.3274	21	0.151908
2	0.9494	22	0.075954
3	1.2532	23	0.265839
4	0.3418	24	0.037977
5	4.0635	25	0.113931
6	0.5317	26	0.037977
7	1.4431	27	0.113931
8	0.1519	28	0.037977
9	0.3798	29	0.075954
10	0.0760	30	0.075954
11	0.9494	31	0.037977
12	0.0760	32	0.037977
13	1.0634	33	0.037977
14	0.1899	34	0.037977
15	0.3418	35	0.075954
16	0.0760	36	0.075954
17	0.8355	37	0.037977
18	0.2279	38	0.037977
19	0.4937	39	0.037977
20	0.0760	40	0.037977
<b>ความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (%THDi) 5.0%</b>			
<b>หมายเหตุ แสดงค่าเป็น%เทียบกับกระแสฟักัดของอินเวอร์เตอร์</b>			

ก.3.2 ระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ และแรงดันต่ำ รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network)



ตารางที่ ก.15 ตารางข้อมูลการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส รุ่น SUN2000-12KTL ของบริษัท HUAWEI ซึ่งปรับเพิ่มค่ากระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ จนกระทั่งมีค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวมเท่ากับ 5% ที่การจ่ายกระแสไฟฟ้า 100% ของค่าพิกัดกระแสไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์

ลำดับฮาร์มอนิก	ขนาดการจ่ายกระแส (%)	ลำดับฮาร์มอนิก	ขนาดการจ่ายกระแส (%)
1	100	21	0.1423
2	0.9958	22	0.1280
3	3.0300	23	0.8108
4	0.2987	24	0.1138
5	1.4083	25	0.6259
6	0.2276	26	0.0996
7	1.6786	27	0.1138
8	0.1992	28	0.0996
9	0.1992	29	0.4268
10	0.1707	30	0.0854
11	1.4936	31	0.3272
12	0.1707	32	0.0711
13	1.7639	33	0.0854
14	0.1849	34	0.0711
15	0.1707	35	0.2561
16	0.1707	36	0.0711
17	1.2660	37	0.1849
18	0.1423	38	0.0569
19	1.0527	39	0.0711
20	0.1423	40	0.0569
<b>ความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (%THDi) 5.0%</b>			
<b>หมายเหตุ แสดงค่าเป็น%เทียบกับกระแสพิกัดของอินเวอร์เตอร์</b>			

ก.4 ข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า

ตารางที่ ก.16 ตารางข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)

TIME 12.00	Weekday		Weekend	
115_A	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)
115_A.1	55.0374	5.1724	60.4633	7.5005
115_A.2	74.8766	53.6147	65.4208	34.9175
115_A.3	34.9292	-2.0322	33.5320	-2.9213
SUM 115_A	164.8432	56.7549	159.4161	39.4966
115_B.1(24)	28.1212	4.5979	21.0083	0.9399
115_B.2(24)	12.7523	1.6004	12.9809	2.1339
115_Aa	12.3360	6.8560	7.5840	4.8000
115_Ab(24)	16.6562	7.3128	14.8481	6.0918
115_Ac(24)	23.6780	9.3760	23.7300	9.1030
Starting Zone	258.3869	86.4980	239.5674	62.5652
Ending Zone	52.6702	23.5448	46.1621	19.9948

ตารางที่ ก.17 ตารางข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)

TIME 12.00	Weekday	Weekend
Name	P (kW)	P (kW)
Ld189_1303	1415.1830	1335.5574
Ld189_1304	132.6439	127.4203
Ld189_1313	1295.3419	1222.4591
Ld189_1314	83.3276	80.0461
Ld189_1317	151.3501	145.3899
Ld189_1321	1320.0150	1245.7441
Ld189_1323	341.8130	328.3524
Ld189_1336	91.8304	88.2141
Ld189_1341	893.5215	843.2473

TIME 12.00	Weekday	Weekend
Name	P (kW)	P (kW)
Ld189_1342	183.6607	176.4282
Ld189_1343	156.4517	150.2907
Ld189_1344	83.3276	80.0461
Ld189_1346	69.7231	66.9774
Ld189_1347	535.7604	505.6157
Ld189_1366	25.5084	24.5039
Ld189_1371	18.7062	17.9695
Ld189_1372	465.2656	439.0874
Ld189_1373	935.8184	883.1643
Ld189_1374	426.4935	402.4967
Ld189_1375	15.3051	14.7023
Ld189_1376	576.2949	543.8696
Ld189_1377	346.9147	333.2532
Ld189_1394	2500.8028	2360.0945
Ld189_1430	22.1073	21.2367
Ld189_1438	253.3838	243.4055
Ld189_1445	105.4349	101.2828
Ld189_1463	98.6326	94.7485
Ld189_1464	95.2315	91.4813
Ld189_1467	30.6101	29.4047
Ld189_159409	352.0164	338.1540
Ld189_167746	0.0000	0.0000
Ld189_188347	319.7057	307.1157
Ld189_2192	0.0000	0.0000
Ld189_2197	0.0000	0.0000
Ld189_2238	35.7118	34.3055
Ld189_2242	0.0000	0.0000
Ld189_2250	78.2259	75.1453

TIME 12.00	Weekday	Weekend
Name	P (kW)	P (kW)
Ld189_2253	47.6157	45.7406
Ld189_2254	481.1270	454.0562
Ld189_2256	1357.0248	1280.6715
Ld189_232827	45.9152	44.1070
Ld189_233463	278.8922	267.9095
Ld189_245739	120.7399	115.9852
Ld189_245740	94.9430	96.1948
Ld189_248273	15.3051	14.7023
Ld189_249153	183.6607	176.4282
Ld189_255268	4.6569	4.3174
Ld189_300729	0.0000	0.0000
Ld189_320582	57.8191	55.5422
Ld189_354609	335.0108	321.8181
Ld189_358377	435.3054	410.8128
Ld189_358378	1110.2930	1047.8221
Ld189_367297	17.0056	16.3359
Ld189_442099	64.6214	62.0766
Ld189_482102	153.0506	147.0235
Ld189_79681	413.2367	396.9634
Ld189_79699	197.2652	189.4969
Ld189_79700	7.7616	7.1956
Ld189_79701	98.6326	94.7485
Ld189_79702	389.4837	367.5693
Ld189_79704	3.1046	2.8782
Ld189_79706	12.2493	11.3561
LdLd197_100521	42.8128	111.1134
LdLd197_100527	42.8128	111.1134
LdLd197_109857	42.8128	111.1134

TIME 12.00	Weekday	Weekend
Name	P (kW)	P (kW)
LdLd197_13836	42.8128	111.1134
LdLd197_13857	42.8128	111.1134
LdLd197_13858	42.8128	111.1134
LdLd197_13859	42.8128	111.1134
LdLd197_13860	42.8128	111.1134
LdLd197_13873	42.8128	111.1134
LdLd197_13951	42.8128	111.1134
LdLd197_14005	85.6256	222.2267
LdLd197_14006	42.8128	111.1134
LdLd197_14007	42.8128	111.1134
LdLd197_14012	42.8128	111.1134
LdLd197_14013	42.8128	111.1134
LdLd197_14058	42.8128	111.1134
LdLd197_14069	42.8128	111.1134
LdLd197_14071	42.8128	111.1134
LdLd197_14107	19.2658	50.0010
LdLd197_14108	42.8128	111.1134
LdLd197_14109	85.6256	222.2267
LdLd197_149797	42.8128	111.1134
LdLd197_149798	42.8128	111.1134
LdLd197_149799	42.8128	111.1134
LdLd197_151091	42.8128	111.1134
LdLd197_151092	25.6877	66.6680
LdLd197_151746	42.8128	111.1134
LdLd197_151747	42.8128	111.1134
LdLd197_151748	42.8128	111.1134
LdLd197_151751	42.8128	111.1134
LdLd197_152033	25.6877	66.6680

TIME 12.00	Weekday	Weekend
Name	P (kW)	P (kW)
LdLd197_154001	25.6877	66.6680
LdLd197_154002	42.8128	111.1134
LdLd197_154596	42.8128	111.1134
LdLd197_154597	42.8128	111.1134
LdLd197_154598	42.8128	111.1134
LdLd197_154599	42.8128	111.1134
LdLd197_154600	25.6877	66.6680
LdLd197_154601	25.6877	66.6680
LdLd197_154602	64.2192	166.6701
LdLd197_215940	19.2658	50.0010
LdLd197_280307	85.6256	222.2267
LdLd197_284161	25.6877	66.6680
LdLd197_284162	25.6877	66.6680
LdLd197_288940	19.2658	50.0010
LdLd197_341796	42.8128	111.1134
LdLd197_344759	42.8128	111.1134
LdLd197_365201	85.6256	222.2267
LdLd197_368086	42.8128	111.1134
LdLd197_368087	42.8128	111.1134
LdLd197_368088	42.8128	111.1134
LdLd197_368094	42.8128	111.1134
LdLd197_368095	42.8128	111.1134
LdLd197_371923	42.8128	111.1134
LdLd197_371924	42.8128	111.1134
LdLd197_371925	42.8128	111.1134
LdLd197_371926	42.8128	111.1134
LdLd197_371927	42.8128	111.1134
LdLd197_371928	42.8128	111.1134

TIME 12.00	Weekday	Weekend
Name	P (kW)	P (kW)
LdLd197_371929	42.8128	111.1134
LdLd197_403831	19.2658	50.0010
LdLd197_427	85.6256	222.2267
LdLd197_429109	25.6877	66.6680
LdLd197_429110	25.6877	66.6680
LdLd197_456385	42.8128	111.1134
LdLd197_471140	128.4384	333.3401
LdLd197_614820	19.2658	50.0010
LdLd197_614821	19.2658	50.0010
LdLd197_616513	19.2658	50.0010
LdLd197_616514	42.8128	111.1134
LdLd197_616515	42.8128	111.1134
LdLd197_616516	19.2658	50.0010
LdLd197_616517	19.2658	50.0010
LdLd197_61805	42.8128	111.1134
LdLd197_61831	19.2658	50.0010
LdLd197_61832	19.2658	50.0010
LdLd197_642753	42.8128	111.1134
LdLd197_648171	85.6256	222.2267
LdLd197_695667	42.8128	111.1134
LdLd197_697618	128.4384	333.3401
LdLd197_697619	85.6256	222.2267
LdLd197_702164	42.8128	111.1134
LdLd197_74275	42.8128	111.1134
LdLd197_8954	42.8128	111.1134
LdLd197_8955	42.8128	111.1134
LdLd197_8976	42.8128	111.1134
LdLd197_8978	42.8128	111.1134

TIME 12.00	Weekday	Weekend
Name	P (kW)	P (kW)
LdLd197_8979	42.8128	111.1134
LdLd197_8980	42.8128	111.1134
LdLd197_8982	85.6256	222.2267
LdLd197_8994	42.8128	111.1134
LdLd197_8995	42.8128	111.1134
LdLd197_9002	25.6877	66.6680
LdLd197_9003	85.6256	222.2267
LdLd197_9004	85.6256	222.2267
LdLd197_9005	42.8128	111.1134
LdLd197_9006	85.6256	222.2267
LdLd197_9007	64.2192	166.6701
LdLd197_9008	42.8128	111.1134
LdLd197_9009	42.8128	111.1134
LdLd197_9010	42.8128	111.1134
LdLd197_9011	64.2192	166.6701
LdLd197_9012	42.8128	111.1134
LdLd197_9021	25.6877	66.6680
LdLd197_9032	85.6256	222.2267
LdLd197_9042	42.8128	111.1134
LdLd197_9044	42.8128	111.1134
LdLd197_9046	42.8128	111.1134
LdLd197_9047	128.4384	333.3401
LdLd197_9048	42.8128	111.1134
LdLd197_9049	85.6256	222.2267
LdLd197_9051	42.8128	111.1134
LdLd197_9089	85.6256	222.2267
LdLd197_9093	42.8128	111.1134
LdLd197_9095	42.8128	111.1134



TIME 12.00	Weekday	Weekend
Name	P (kW)	P (kW)
LdLd197_9097	42.8128	111.1134
LdLd197_9100	42.8128	111.1134
LdLd197_9101	128.4384	333.3401
LdLd197_9103	42.8128	111.1134
LdLd197_9104	42.8128	111.1134
LdLd197_9105	85.6256	222.2267
LdLd197_9106	42.8128	111.1134
LdLd197_91280	25.6877	66.6680
LdLd197_91593	19.2658	50.0010
LdLd197_9198	42.8128	111.1134
LdLd197_9204	19.2658	50.0010
LdLd197_9206	42.8128	111.1134
LdLd197_9207	25.6877	66.6680
LdLd197_92214	42.8128	111.1134
LdLd197_92215	19.2658	50.0010
LdLd197_92216	25.6877	66.6680
LdLd197_9235	42.8128	111.1134
LdLd197_9253	19.2658	50.0010
LdLd197_92964	25.6877	66.6680
LdLd197_92965	25.6877	66.6680
LdLd197_92966	25.6877	66.6680
LdLd197_92967	42.8128	111.1134
LdLd197_92968	85.6256	222.2267
LdLd197_92969	42.8128	111.1134
LdLd197_92970	64.2192	166.6701
LdLd197_92971	85.6256	222.2267
LdLd197_92972	42.8128	111.1134
LdLd197_92973	42.8128	111.1134

TIME 12.00	Weekday	Weekend
Name	P (kW)	P (kW)
LdLd197_92974	85.6256	222.2267
LdLd197_92975	25.6877	66.6680
LdLd197_92976	25.6877	66.6680
LdLd197_93217	25.6877	66.6680
LdLd197_93221	25.6877	66.6680
LdLd197_9330	128.4384	333.3401
LdLd197_9331	42.8128	111.1134
LdLd197_99810	25.6877	66.6680
Total	26400	36600

ตารางที่ ก.18 ตารางข้อมูลความต้องการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V)

TIME 12.00	Weekday	Weekend
Name	P (kW)	P (kW)
Ld2529_129797	1.7223	1.3606
Ld2529_129812	2.8534	2.2541
Ld2529_130806	1.6296	1.2873
Ld2529_1633465	2.2224	1.7557
Ld2529_1633479	0.6177	0.4880
Ld2529_1633480	0.3710	0.2931
Ld2529_1633481	2.7687	2.7549
Ld2529_1633482	1.2907	1.2842
Ld2529_1633483	0.4890	0.4866
Ld2529_1633484	0.5875	0.5846
Ld2529_1633485	2.0558	2.0456
Ld2529_1633486	1.5729	1.5650
Ld2529_1633487	2.2688	1.7923
Ld2529_1633547	1.1195	0.8844

TIME 12.00	Weekday	Weekend
Name	P (kW)	P (kW)
Ld2529_1633548	0.5415	0.4278
Ld2529_1634377	3.5672	2.8180
Ld2529_1634733	0.7566	0.7529
Ld2529_1634734	0.0000	0.0000
Ld2529_1634783	0.7396	0.7359
Ld2529_1635377	0.0000	0.0000
Ld2529_2082138	1.0133	1.0083
Ld2529_2088383	8.0298	7.9898
Ld2529_2236268	1.2371	1.2310
Ld2529_2248587	5.0113	3.9588
Ld2529_2254966	1.6743	1.3227
Ld2529_2256797	3.5804	2.8285
Ld2529_2262627	5.5942	4.4193
Ld2529_2262632	17.0261	13.4502
Ld2529_2715529	0.0000	0.0000
Ld2529_2789877	2.1529	1.7007
Ld2529_2934920	0.0248	0.0196
Ld2529_2934921	0.0248	0.0196
Ld2529_3443201	2.3135	1.8276
Ld2529_3510052	0.2534	0.2002
Ld2529_3899046	0.0000	0.0000
Ld9999_1	2.7458	2.1691
Ld9999_10	0.0000	0.0000
Ld9999_100	0.8296	0.8255
Ld9999_101	2.5056	1.9794
Ld9999_102	1.8454	1.8362
Ld9999_103	0.4805	0.4781
Ld9999_104	1.5790	1.5711

TIME 12.00	Weekday	Weekend
Name	P (kW)	P (kW)
Ld9999_105	1.8531	1.4639
Ld9999_106	2.3483	1.8551
Ld9999_107	0.7552	0.5966
Ld9999_108	1.1874	0.9380
Ld9999_109	0.0265	0.0209
Ld9999_11	0.0000	0.0000
Ld9999_110	0.0000	0.0000
Ld9999_111	0.0000	0.0000
Ld9999_112	1.7770	1.4038
Ld9999_113	0.8284	0.8243
Ld9999_114	1.3315	1.0518
Ld9999_115	1.7703	1.3985
Ld9999_116	0.4339	0.3428
Ld9999_117	0.5498	0.4343
Ld9999_118	0.8479	0.6698
Ld9999_119	1.2868	1.0165
Ld9999_12	0.6982	0.6948
Ld9999_120	0.0000	0.0000
Ld9999_121	1.1079	0.8752
Ld9999_122	3.6007	3.5828
Ld9999_123	1.2055	1.1995
Ld9999_124	1.2262	1.2201
Ld9999_13	0.0024	0.0024
Ld9999_14	0.0012	0.0012
Ld9999_15	0.3978	0.3958
Ld9999_16	1.7991	1.7902
Ld9999_17	1.2298	1.2237
Ld9999_18	0.3627	0.2865

TIME 12.00	Weekday	Weekend
Name	P (kW)	P (kW)
Ld9999_19	0.0000	0.0000
Ld9999_2	0.8148	0.6437
Ld9999_20	0.2603	0.2590
Ld9999_21	0.8198	0.6476
Ld9999_22	0.2956	0.2941
Ld9999_23	0.2223	0.2554
Ld9999_24	0.0000	0.0000
Ld9999_25	0.0000	0.0000
Ld9999_26	0.6204	0.6173
Ld9999_27	0.7956	0.7916
Ld9999_28	0.5474	0.5447
Ld9999_29	0.3986	0.4580
Ld9999_3	0.7019	0.6984
Ld9999_30	1.0466	0.8268
Ld9999_31	0.4902	0.4878
Ld9999_32	0.6885	0.6851
Ld9999_33	0.5936	0.5907
Ld9999_34	0.9108	0.7195
Ld9999_35	0.8673	0.8630
Ld9999_36	0.7092	0.7057
Ld9999_37	0.0000	0.0000
Ld9999_38	0.1216	0.1210
Ld9999_39	1.4549	1.4476
Ld9999_4	0.2786	0.2772
Ld9999_40	0.3443	0.3425
Ld9999_41	1.6925	1.3370
Ld9999_42	0.7627	0.7589
Ld9999_43	0.0000	0.0000

TIME 12.00	Weekday	Weekend
Name	P (kW)	P (kW)
Ld9999_44	0.7627	0.7589
Ld9999_45	0.5900	0.5870
Ld9999_46	1.3807	1.5864
Ld9999_47	0.9936	0.7850
Ld9999_48	0.0000	0.0000
Ld9999_49	3.0363	3.0212
Ld9999_5	0.0000	0.0000
Ld9999_50	1.4060	1.1107
Ld9999_51	0.9589	0.7575
Ld9999_52	2.6547	2.0971
Ld9999_53	2.3533	1.8590
Ld9999_54	0.0000	0.0000
Ld9999_55	0.0000	0.0000
Ld9999_56	0.9817	0.9768
Ld9999_57	0.6143	0.6113
Ld9999_58	0.3783	0.3764
Ld9999_59	3.8603	3.0496
Ld9999_6	0.5608	0.5580
Ld9999_60	2.1677	2.1569
Ld9999_61	0.0881	0.1013
Ld9999_62	0.1058	0.1053
Ld9999_63	0.1027	0.0811
Ld9999_64	0.7116	0.7081
Ld9999_65	0.0000	0.0000
Ld9999_66	0.0000	0.0000
Ld9999_67	0.9233	0.9187
Ld9999_68	1.0255	1.0204
Ld9999_69	1.5832	1.2507

TIME 12.00	Weekday	Weekend
Name	P (kW)	P (kW)
Ld9999_7	0.0000	0.0000
Ld9999_70	0.7579	0.7541
Ld9999_71	0.0000	0.0000
Ld9999_72	0.6654	0.6621
Ld9999_73	2.2979	2.2864
Ld9999_74	0.0000	0.0000
Ld9999_75	9.6450	7.6193
Ld9999_76	2.4560	1.9402
Ld9999_77	7.4209	5.8623
Ld9999_78	3.3088	3.2923
Ld9999_79	2.7163	2.7028
Ld9999_8	0.0374	0.0429
Ld9999_80	1.2639	1.2576
Ld9999_81	0.1837	0.1828
Ld9999_82	0.0968	0.1112
Ld9999_83	0.3917	0.3897
Ld9999_84	1.1178	0.8831
Ld9999_85	0.7554	0.7517
Ld9999_86	2.5437	2.0095
Ld9999_87	0.2190	0.2179
Ld9999_88	0.3047	0.2407
Ld9999_89	1.2636	0.9982
Ld9999_9	5.9254	4.6810
Ld9999_90	3.6117	3.5937
Ld9999_91	1.7128	1.7042
Ld9999_92	0.0000	0.0000
Ld9999_93	3.5095	3.4920
Ld9999_94	4.3820	3.4617

TIME 12.00	Weekday	Weekend
Name	P (kW)	P (kW)
Ld9999_95	0.0000	0.0000
Ld9999_96	2.3088	2.2973
Ld9999_97	0.0000	0.0000
Ld9999_98	0.2997	0.2368
Ld9999_99	0.4440	0.4418
Total	214.0404	186.6587

## ก.5 ผลการทดสอบ

### ก.5.1 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV)

ตารางที่ ก.19 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
2	1	0.107447	Pass	0.22559	Pass
3	2	0.145966	Pass	0.198368	Pass
4	0.8	0.210378	Pass	0.431135	Pass
5	2	0.341051	Pass	0.374692	Pass
6	0.5	0	Pass	0.007462	Pass
7	2	0.428227	Pass	0.267997	Pass
8	0.4	0.038824	Pass	0.066136	Pass
9	1	0.000672	Pass	0.008641	Pass
10	0.4	0.049787	Pass	0.083852	Pass
11	1.5	0.018353	Pass	0.027221	Pass



H Order	Limitation G5/4  Harmonic Distortion in %	Weekday  115kV_115_Aa  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend  115kV_115_Aa  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
12	0.2	0	Pass	0.008563	Pass
13	1.5	0.031999	Pass	0.03309	Pass
14	0.2	0.006219	Pass	0.012743	Pass
15	0.3	0	Pass	0.010538	Pass
16	0.2	0.007518	Pass	0.014462	Pass
17	1	0.035035	Pass	0.057786	Pass
18	0.2	0	Pass	0.011159	Pass
19	1	0.042571	Pass	0.057922	Pass
20	0.2	0.008266	Pass	0.016786	Pass
21	0.2	0	Pass	0.013018	Pass
22	0.2	0.01019	Pass	0.019997	Pass
23	0.7	0.02585	Pass	0.029876	Pass
24	0.2	0	Pass	0.017231	Pass
25	0.7	0.033473	Pass	0.037934	Pass
26	0.2	0.006886	Pass	0.022504	Pass
27	0.2	0	Pass	0.025393	Pass
28	0.2	0.010106	Pass	0.0344	Pass
29	0.63	0.074398	Pass	0.078485	Pass
30	0.2	0	Pass	0.045242	Pass
31	0.6	0.129187	Pass	0.164287	Pass
32	0.2	0.094561	Pass	0.179161	Pass
33	0.2	0	Pass	0.191377	Pass
34	0.2	0.023275	Pass	0.090094	Pass
35	0.56	0.029292	Pass	0.081519	Pass

H Order	Limitation G5/4  Harmonic Distortion in %	Weekday  115kV_115_Aa  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend  115kV_115_Aa  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
36	0.2	0	Pass	0.041883	Pass
37	0.54	0.023103	Pass	0.040926	Pass
38	0.2	0.003251	Pass	0.024487	Pass
39	0.2	0	Pass	0.021861	Pass
40	0.2	0.002244	Pass	0.019505	Pass
41	0.5	0.010788	Pass	0.020815	Pass
42	0.2	0	Pass	0.015345	Pass
43	0.49	0.005558	Pass	0.016275	Pass
44	0.2	0.001189	Pass	0.013159	Pass
45	0.2	0.000803	Pass	0.012111	Pass
46	0.2	0.000858	Pass	0.011516	Pass
47	0.47	0.00409	Pass	0.010823	Pass
48	0.2	0	Pass	0.010036	Pass
49	0.46	0.001878	Pass	0.01118	Pass
THDv %	3	0.648600117	Pass	0.800121138	Pass

ตารางที่ ก.20 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกรูปแบบที่ 2

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
2	1	0.056012	Pass	0.121993	Pass
3	2	0.145966	Pass	0.198368	Pass
4	0.8	0.10967	Pass	0.228505	Pass
5	2	0.290761	Pass	0.326143	Pass
6	0.5	0	Pass	0.007462	Pass
7	2	0.353094	Pass	0.173256	Pass
8	0.4	0.020239	Pass	0.036343	Pass
9	1	0.000672	Pass	0.008641	Pass
10	0.4	0.025954	Pass	0.045518	Pass
11	1.5	0.009568	Pass	0.015926	Pass
12	0.2	0	Pass	0.008563	Pass
13	1.5	0.016816	Pass	0.019004	Pass
14	0.2	0.003243	Pass	0.010331	Pass
15	0.3	0	Pass	0.010538	Pass
16	0.2	0.00392	Pass	0.011321	Pass
17	1	0.01827	Pass	0.049614	Pass
18	0.2	0	Pass	0.011159	Pass
19	1	0.022469	Pass	0.045584	Pass
20	0.2	0.004309	Pass	0.013598	Pass
21	0.2	0	Pass	0.013018	Pass
22	0.2	0.005312	Pass	0.015936	Pass
23	0.7	0.013493	Pass	0.020643	Pass
24	0.2	0	Pass	0.017231	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
25	0.7	0.017471	Pass	0.025885	Pass
26	0.2	0.00359	Pass	0.021028	Pass
27	0.2	0	Pass	0.025393	Pass
28	0.2	0.005269	Pass	0.032417	Pass
29	0.63	0.038995	Pass	0.052274	Pass
30	0.2	0	Pass	0.045242	Pass
31	0.6	0.06735	Pass	0.105066	Pass
32	0.2	0.049298	Pass	0.165455	Pass
33	0.2	0	Pass	0.191377	Pass
34	0.2	0.012134	Pass	0.083365	Pass
35	0.56	0.015271	Pass	0.070692	Pass
36	0.2	0	Pass	0.041883	Pass
37	0.54	0.012297	Pass	0.034834	Pass
38	0.2	0.001695	Pass	0.024113	Pass
39	0.2	0	Pass	0.021861	Pass
40	0.2	0.00117	Pass	0.019286	Pass
41	0.5	0.005666	Pass	0.018327	Pass
42	0.2	0	Pass	0.015345	Pass
43	0.49	0.002897	Pass	0.014591	Pass
44	0.2	0.00062	Pass	0.013067	Pass
45	0.2	0.000803	Pass	0.012111	Pass
46	0.2	0.000447	Pass	0.011461	Pass
47	0.47	0.002175	Pass	0.010135	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
48	0.2	0	Pass	0.010036	Pass
49	0.46	0.000979	Pass	0.010884	Pass
THDv %	3	0.507598031	Pass	0.594906374	Pass

ตารางที่ ก.21 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกประเภทที่ 3

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
2	1	0.102011	Pass	0.214639	Pass
3	2	0.145966	Pass	0.198368	Pass
4	0.8	0.071907	Pass	0.152524	Pass
5	2	0.342866	Pass	0.376451	Pass
6	0.5	0	Pass	0.007462	Pass
7	2	0.331677	Pass	0.14406	Pass
8	0.4	0.005897	Pass	0.014478	Pass
9	1	0.000672	Pass	0.008641	Pass
10	0.4	0.003784	Pass	0.011928	Pass
11	1.5	0.008712	Pass	0.014917	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday	Verify with limitation	Weekend	Verify with limitation
		115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %		115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	
12	0.2	0	Pass	0.008563	Pass
13	1.5	0.017142	Pass	0.019291	Pass
14	0.2	0.002362	Pass	0.009848	Pass
15	0.3	0	Pass	0.010538	Pass
16	0.2	0.001143	Pass	0.010024	Pass
17	1	0.019519	Pass	0.050079	Pass
18	0.2	0	Pass	0.011159	Pass
19	1	0.014539	Pass	0.042323	Pass
20	0.2	0.001675	Pass	0.012419	Pass
21	0.2	0	Pass	0.013018	Pass
22	0.2	0.002065	Pass	0.014413	Pass
23	0.7	0.011473	Pass	0.019436	Pass
24	0.2	0	Pass	0.017231	Pass
25	0.7	0.006427	Pass	0.02052	Pass
26	0.2	0.001744	Pass	0.020587	Pass
27	0.2	0	Pass	0.025393	Pass
28	0.2	0.00256	Pass	0.031829	Pass
29	0.63	0.010524	Pass	0.039102	Pass
30	0.2	0	Pass	0.045242	Pass
31	0.6	0.008182	Pass	0.071925	Pass
32	0.2	0.023956	Pass	0.161334	Pass
33	0.2	0	Pass	0.191377	Pass
34	0.2	0.005896	Pass	0.081344	Pass
35	0.56	0.007421	Pass	0.067287	Pass
36	0.2	0	Pass	0.041883	Pass
37	0.54	0.004108	Pass	0.032423	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday	Verify with limitation	Weekend	Verify with limitation
		115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %		115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	
38	0.2	0.001647	Pass	0.024105	Pass
39	0.2	0	Pass	0.021861	Pass
40	0.2	0.001137	Pass	0.019281	Pass
41	0.5	0.000801	Pass	0.017308	Pass
42	0.2	0	Pass	0.015345	Pass
43	0.49	0	Pass	0.013911	Pass
44	0.2	0	Pass	0.013033	Pass
45	0.2	0.000803	Pass	0.012111	Pass
46	0.2	0	Pass	0.01144	Pass
47	0.47	0.000502	Pass	0.009867	Pass
48	0.2	0	Pass	0.010036	Pass
49	0.46	0	Pass	0.010771	Pass
THDv %	3	0.516257354	Pass	0.607467427	Pass

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.22 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทางการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกประเภทที่ 1

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday	Verify with limitation	Weekend	Verify with limitation
		115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %		115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	
2	1	0.107447	Pass	0.10823	Pass
3	2	0	Pass	0	Pass
4	0.8	0.210378	Pass	0.211693	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
5	2	0.095111	Pass	0.095539	Pass
6	0.5	0	Pass	0	Pass
7	2	0.134612	Pass	0.13479	Pass
8	0.4	0.038824	Pass	0.038824	Pass
9	1	0	Pass	0	Pass
10	0.4	0.049787	Pass	0.049679	Pass
11	1.5	0.018353	Pass	0.018295	Pass
12	0.2	0	Pass	0	Pass
13	1.5	0.022562	Pass	0.022449	Pass
14	0.2	0.006219	Pass	0.006183	Pass
15	0.3	0	Pass	0	Pass
16	0.2	0.007518	Pass	0.007459	Pass
17	1	0.024773	Pass	0.024551	Pass
18	0.2	0	Pass	0	Pass
19	1	0.029965	Pass	0.029615	Pass
20	0.2	0.008266	Pass	0.008156	Pass
21	0.2	0	Pass	0	Pass
22	0.2	0.01019	Pass	0.01001	Pass
23	0.7	0.018273	Pass	0.017898	Pass
24	0.2	0	Pass	0	Pass
25	0.7	0.023662	Pass	0.02298	Pass
26	0.2	0.006886	Pass	0.006645	Pass
27	0.2	0	Pass	0	Pass
28	0.2	0.010106	Pass	0.009539	Pass
29	0.63	0.052507	Pass	0.048515	Pass



H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
30	0.2	0	Pass	0	Pass
31	0.6	0.129187	Pass	0.104665	Pass
32	0.2	0.094561	Pass	0.056955	Pass
33	0.2	0	Pass	0	Pass
34	0.2	0.023275	Pass	0.028313	Pass
35	0.56	0.029292	Pass	0.033642	Pass
36	0.2	0	Pass	0	Pass
37	0.54	0.016208	Pass	0.017804	Pass
38	0.2	0.003251	Pass	0.003536	Pass
39	0.2	0	Pass	0	Pass
40	0.2	0.002244	Pass	0.002417	Pass
41	0.5	0.007608	Pass	0.008177	Pass
42	0.2	0	Pass	0	Pass
43	0.49	0.005558	Pass	0.005975	Pass
44	0.2	0.001189	Pass	0.001281	Pass
45	0.2	0	Pass	0	Pass
46	0.2	0.000858	Pass	0.000933	Pass
47	0.47	0.00287	Pass	0.003146	Pass
48	0.2	0	Pass	0	Pass
49	0.46	0.001878	Pass	0.002118	Pass
THDv %	3	0.347553258	Pass	0.332117696	Pass

ตารางที่ ก.23 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกรูปแบบที่ 2

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
2	1	0.056012	Pass	0.05642	Pass
3	2	0	Pass	0	Pass
4	0.8	0.10967	Pass	0.110356	Pass
5	2	0.049586	Pass	0.049809	Pass
6	0.5	0	Pass	0	Pass
7	2	0.07018	Pass	0.070273	Pass
8	0.4	0.020239	Pass	0.020239	Pass
9	1	0	Pass	0	Pass
10	0.4	0.025954	Pass	0.025898	Pass
11	1.5	0.009568	Pass	0.009538	Pass
12	0.2	0	Pass	0	Pass
13	1.5	0.011762	Pass	0.011704	Pass
14	0.2	0.003243	Pass	0.003224	Pass
15	0.3	0	Pass	0	Pass
16	0.2	0.00392	Pass	0.003889	Pass
17	1	0.012915	Pass	0.012799	Pass
18	0.2	0	Pass	0	Pass
19	1	0.015622	Pass	0.015439	Pass
20	0.2	0.004309	Pass	0.004252	Pass
21	0.2	0	Pass	0	Pass
22	0.2	0.005312	Pass	0.005219	Pass
23	0.7	0.009526	Pass	0.009331	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
24	0.2	0	Pass	0	Pass
25	0.7	0.012336	Pass	0.01198	Pass
26	0.2	0.00359	Pass	0.003464	Pass
27	0.2	0	Pass	0	Pass
28	0.2	0.005269	Pass	0.004973	Pass
29	0.63	0.027374	Pass	0.025293	Pass
30	0.2	0	Pass	0	Pass
31	0.6	0.06735	Pass	0.054565	Pass
32	0.2	0.049298	Pass	0.029693	Pass
33	0.2	0	Pass	0	Pass
34	0.2	0.012134	Pass	0.01476	Pass
35	0.56	0.015271	Pass	0.017539	Pass
36	0.2	0	Pass	0	Pass
37	0.54	0.00845	Pass	0.009282	Pass
38	0.2	0.001695	Pass	0.001843	Pass
39	0.2	0	Pass	0	Pass
40	0.2	0.00117	Pass	0.00126	Pass
41	0.5	0.003966	Pass	0.004263	Pass
42	0.2	0	Pass	0	Pass
43	0.49	0.002897	Pass	0.003115	Pass
44	0.2	0.00062	Pass	0.000668	Pass
45	0.2	0	Pass	0	Pass
46	0.2	0.000447	Pass	0.000486	Pass
47	0.47	0.001496	Pass	0.00164	Pass
48	0.2	0	Pass	0	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
49	0.46	0.000979	Pass	0.001104	Pass
THDv %	3	0.181186907	Pass	0.173139644	Pass

ตารางที่ ก.24 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (115 kV) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทางการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 3

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
2	1	0.102011	Pass	0.102754	Pass
3	2	0	Pass	0	Pass
4	0.8	0.071907	Pass	0.072357	Pass
5	2	0.09662	Pass	0.097055	Pass
6	0.5	0	Pass	0	Pass
7	2	0.048565	Pass	0.048629	Pass
8	0.4	0.005897	Pass	0.005897	Pass
9	1	0	Pass	0	Pass
10	0.4	0.003784	Pass	0.003776	Pass
11	1.5	0.008712	Pass	0.008685	Pass
12	0.2	0	Pass	0	Pass
13	1.5	0.011996	Pass	0.011936	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
14	0.2	0.002362	Pass	0.002348	Pass
15	0.3	0	Pass	0	Pass
16	0.2	0.001143	Pass	0.001134	Pass
17	1	0.013799	Pass	0.013675	Pass
18	0.2	0	Pass	0	Pass
19	1	0.009862	Pass	0.009747	Pass
20	0.2	0.001675	Pass	0.001653	Pass
21	0.2	0	Pass	0	Pass
22	0.2	0.002065	Pass	0.002029	Pass
23	0.7	0.008095	Pass	0.007929	Pass
24	0.2	0	Pass	0	Pass
25	0.7	0.004492	Pass	0.004362	Pass
26	0.2	0.001744	Pass	0.001683	Pass
27	0.2	0	Pass	0	Pass
28	0.2	0.00256	Pass	0.002417	Pass
29	0.63	0.006651	Pass	0.006145	Pass
30	0.2	0	Pass	0	Pass
31	0.6	0.008182	Pass	0.006629	Pass
32	0.2	0.023956	Pass	0.014429	Pass
33	0.2	0	Pass	0	Pass
34	0.2	0.005896	Pass	0.007173	Pass
35	0.56	0.007421	Pass	0.008523	Pass
36	0.2	0	Pass	0	Pass
37	0.54	0.002053	Pass	0.002255	Pass
38	0.2	0.001647	Pass	0.001792	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 115kV_115_Aa Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
39	0.2	0	Pass	0	Pass
40	0.2	0.001137	Pass	0.001224	Pass
41	0.5	0	Pass	0	Pass
42	0.2	0	Pass	0	Pass
43	0.49	0	Pass	0	Pass
44	0.2	0	Pass	0	Pass
45	0.2	0	Pass	0	Pass
46	0.2	0	Pass	0	Pass
47	0.47	0	Pass	0	Pass
48	0.2	0	Pass	0	Pass
49	0.46	0	Pass	0	Pass
THDv %	3	0.169469156	Pass	0.169278823	Pass

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.5.2 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV)

ตารางที่ ก.25 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1

H Order	Limitation G5/4  Harmonic Distortion in %	Weekday  2562_1853653 /C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend  2562_1853653 /C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
2	1.5	0.038202	Pass	0.047461	Pass
3	3	0.31464	Pass	0.329945	Pass
4	1	0.066059	Pass	0.084485	Pass
5	3	1.94596	Pass	2.140456	Pass
6	0.5	0.019893	Pass	0.027749	Pass
7	3	0.420817	Pass	0.258383	Pass
8	0.4	0.024848	Pass	0.041313	Pass
9	1.2	0.110306	Pass	0.11597	Pass
10	0.4	0.03053	Pass	0.030035	Pass
11	2	0.14789	Pass	0.112102	Pass
12	0.2	0.012417	Pass	0.012174	Pass
13	2	0.14728	Pass	0.215385	Pass
14	0.2	0.005145	Pass	0.013468	Pass
15	0.3	0.058107	Pass	0.158178	Pass
16	0.2	0.006371	Pass	0.015106	Pass
17	1.6	0.107134	Pass	0.133458	Pass
18	0.2	0.005955	Pass	0.016623	Pass
19	1.2	0.157546	Pass	0.21929	Pass
20	0.2	0.00756	Pass	0.019707	Pass
21	0.2	0.108768	Pass	0.221771	Fail
22	0.2	0.009854	Pass	0.024099	Pass
23	1.2	0.132291	Pass	0.177072	Pass
24	0.2	0.005446	Pass	0.004933	Pass
25	0.7	0.146476	Pass	0.239009	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 2562_1853653 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 2562_1853653 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
26	0.2	0.008463	Pass	0.042945	Pass
27	0.2	0.183731	Pass	0.380683	<u>Fail</u>
28	0.2	0.017109	Pass	0.014295	Pass
29	0.63	0.554851	Pass	0.994829	<u>Fail</u>
30	0.2	0.188921	Pass	0.101446	Pass
31	0.6	0.379094	Pass	1.230487	<u>Fail</u>
32	0.2	0.017393	Pass	0.018979	Pass
33	0.2	0.076312	Pass	0.203666	<u>Fail</u>
34	0.2	0.008994	Pass	0.009304	Pass
35	0.56	0.038527	Pass	0.113682	Pass
36	0.2	0.003026	Pass	0.003065	Pass
37	0.54	0.028134	Pass	0.029232	Pass
38	0.2	0.002282	Pass	0.002287	Pass
39	0.2	0.008226	Pass	0.022958	Pass
40	0.2	0.00187	Pass	0.001876	Pass
41	0.5	0.006874	Pass	0.006884	Pass
42	0.2	0.001611	Pass	0.001615	Pass
43	0.49	0.006098	Pass	0.006117	Pass
44	0.2	0.001462	Pass	0.001467	Pass
45	0.2	0.005697	Pass	0.005712	Pass
46	0.2	0.001408	Pass	0.00141	Pass
47	0.47	0.005677	Pass	0.005676	Pass
48	0.2	0.001446	Pass	0.00144	Pass
49	0.46	0.006009	Pass	0.005959	Pass



H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 2562_1853653 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 2562_1853653 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
THDv %	4	2.178851342	Pass	2.791101687	Pass

ตารางที่ ก.26 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกรูปแบบที่ 2

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 2562_1853653 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 2562_1853653 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
2	1.5	0.024572	Pass	0.033955	Pass
3	3	0.233865	Pass	0.250095	Pass
4	1	0.03912	Pass	0.057887	Pass
5	3	1.941493	Pass	2.136231	Pass
6	0.5	0.014317	Pass	0.023081	Pass
7	3	0.407118	Pass	0.241952	Pass
8	0.4	0.016817	Pass	0.035142	Pass
9	1.2	0.0729	Pass	0.080355	Pass
10	0.4	0.019772	Pass	0.019439	Pass
11	2	0.147353	Pass	0.111413	Pass
12	0.2	0.011906	Pass	0.01167	Pass
13	2	0.146436	Pass	0.214828	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 2562_1853653 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 2562_1853653 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
14	0.2	0.002683	Pass	0.012757	Pass
15	0.3	0.054727	Pass	0.157012	Pass
16	0.2	0.003322	Pass	0.014135	Pass
17	1.6	0.105575	Pass	0.132259	Pass
18	0.2	0.003105	Pass	0.015863	Pass
19	1.2	0.155886	Pass	0.218158	Pass
20	0.2	0.003941	Pass	0.018676	Pass
21	0.2	0.104753	Pass	0.219943	<u>Fail</u>
22	0.2	0.005137	Pass	0.022686	Pass
23	1.2	0.131352	Pass	0.17642	Pass
24	0.2	0.002839	Pass	0.002715	Pass
25	0.7	0.144715	Pass	0.238043	Pass
26	0.2	0.004412	Pass	0.042406	Pass
27	0.2	0.17962	Pass	0.379034	<u>Fail</u>
28	0.2	0.00892	Pass	0.007841	Pass
29	0.63	0.541854	Pass	0.990314	<u>Fail</u>
30	0.2	0.098491	Pass	0.055514	Pass
31	0.6	0.359762	Pass	1.219258	<u>Fail</u>
32	0.2	0.009067	Pass	0.010354	Pass
33	0.2	0.064539	Pass	0.198611	Pass
34	0.2	0.004689	Pass	0.005058	Pass
35	0.56	0.036536	Pass	0.112947	Pass
36	0.2	0.001578	Pass	0.001659	Pass
37	0.54	0.026689	Pass	0.027717	Pass
38	0.2	0.00119	Pass	0.00123	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 2562_1853653 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 2562_1853653 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
39	0.2	0.004289	Pass	0.021784	Pass
40	0.2	0.000975	Pass	0.001002	Pass
41	0.5	0.003583	Pass	0.003662	Pass
42	0.2	0.00084	Pass	0.000856	Pass
43	0.49	0.003179	Pass	0.00323	Pass
44	0.2	0.000762	Pass	0.000771	Pass
45	0.2	0.00297	Pass	0.002994	Pass
46	0.2	0.000734	Pass	0.000737	Pass
47	0.47	0.002959	Pass	0.002961	Pass
48	0.2	0.000754	Pass	0.000751	Pass
49	0.46	0.003133	Pass	0.003108	Pass
THDv %	4	2.144909501	Pass	2.766463847	Pass

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.27 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 3

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 2562_1853653 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 2562_1853653 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
2	1.5	0.036762	Pass	0.046033	Pass
3	3	0.198755	Pass	0.215387	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 2562_1853653 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 2562_1853653 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
4	1	0.029019	Pass	0.047913	Pass
5	3	1.946126	Pass	2.140613	Pass
6	0.5	0.014429	Pass	0.023173	Pass
7	3	0.403381	Pass	0.23743	Pass
8	0.4	0.011655	Pass	0.031545	Pass
9	1.2	0.045753	Pass	0.055168	Pass
10	0.4	0.011632	Pass	0.011419	Pass
11	2	0.147318	Pass	0.111369	Pass
12	0.2	0.011726	Pass	0.011492	Pass
13	2	0.146449	Pass	0.214837	Pass
14	0.2	0.001954	Pass	0.012628	Pass
15	0.3	0.053553	Pass	0.156622	Pass
16	0.2	0.000968	Pass	0.013788	Pass
17	1.6	0.105658	Pass	0.132322	Pass
18	0.2	0.003619	Pass	0.015967	Pass
19	1.2	0.155511	Pass	0.217903	Pass
20	0.2	0.001532	Pass	0.018337	Pass
21	0.2	0.103273	Pass	0.219284	Fail
22	0.2	0.001997	Pass	0.02222	Pass
23	1.2	0.131255	Pass	0.176353	Pass
24	0.2	0.00138	Pass	0.001319	Pass
25	0.7	0.14414	Pass	0.23773	Pass
26	0.2	0.002144	Pass	0.042251	Pass
27	0.2	0.178268	Pass	0.378499	Fail
28	0.2	0.004334	Pass	0.00381	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 2562_1853653 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 2562_1853653 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
29	0.63	0.537215	Pass	0.988723	Fail
30	0.2	0.09572	Pass	0.053952	Pass
31	0.6	0.352387	Pass	1.215103	Fail
32	0.2	0.004406	Pass	0.005031	Pass
33	0.2	0.059628	Pass	0.19672	Pass
34	0.2	0.002278	Pass	0.002458	Pass
35	0.56	0.035948	Pass	0.112737	Pass
36	0.2	0.003067	Pass	0.003224	Pass
37	0.54	0.026163	Pass	0.027165	Pass
38	0.2	0.001156	Pass	0.001195	Pass
39	0.2	0.001042	Pass	0.021356	Pass
40	0.2	0.000948	Pass	0.000974	Pass
41	0.5	0	Pass	0.006884	Pass
42	0.2	0	Pass	0.001615	Pass
43	0.49	0	Pass	0.006117	Pass
44	0.2	0	Pass	0.001467	Pass
45	0.2	0	Pass	0.005712	Pass
46	0.2	0	Pass	0.00141	Pass
47	0.47	0	Pass	0.005676	Pass
48	0.2	0	Pass	0.00144	Pass
49	0.46	0	Pass	0.005959	Pass
THDv %	4	2.141004895	Pass	2.763027178	Pass

ตารางที่ ก.28 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกรูปแบบที่ 1

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 196_1512896 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 196_1512896 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
2	1.5	0.043163	Pass	0.042953	Pass
3	3	0.252897	Pass	0.25121	Pass
4	1	0.083817	Pass	0.083179	Pass
5	3	0.070413	Pass	0.069908	Pass
6	0.5	0.021208	Pass	0.021041	Pass
7	3	0.099632	Pass	0.098809	Pass
8	0.4	0.028727	Pass	0.02849	Pass
9	1.2	0.130633	Pass	0.129446	Pass
10	0.4	0.036754	Pass	0.036403	Pass
11	2	0.021805	Pass	0.021615	Pass
12	0.2	0.006041	Pass	0.005982	Pass
13	2	0.026668	Pass	0.026391	Pass
14	0.2	0.007338	Pass	0.007261	Pass
15	0.3	0.032195	Pass	0.03181	Pass
16	0.2	0.008825	Pass	0.00871	Pass
17	1.6	0.029056	Pass	0.028672	Pass
18	0.2	0.007966	Pass	0.007843	Pass
19	1.2	0.035066	Pass	0.034462	Pass
20	0.2	0.009701	Pass	0.009527	Pass
21	0.2	0.043056	Pass	0.042114	Pass
22	0.2	0.012062	Pass	0.011758	Pass
23	1.2	0.021942	Pass	0.021339	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 196_1512896 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 196_1512896 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
24	0.2	0.006304	Pass	0.006082	Pass
25	0.7	0.02977	Pass	0.02848	Pass
26	0.2	0.009169	Pass	0.008692	Pass
27	0.2	0.047368	Pass	0.043818	Pass
28	0.2	0.017207	Pass	0.015284	Pass
29	0.63	0.134727	Pass	0.10791	Pass
30	0.2	0.174133	Pass	0.099219	Pass
31	0.6	0.123101	Pass	0.172806	Pass
32	0.2	0.014519	Pass	0.016751	Pass
33	0.2	0.03789	Pass	0.042421	Pass
34	0.2	0.006782	Pass	0.007391	Pass
35	0.56	0.010279	Pass	0.010932	Pass
36	0.2	0.002083	Pass	0.002201	Pass
37	0.54	0.006958	Pass	0.007267	Pass
38	0.2	0.001506	Pass	0.001551	Pass
39	0.2	0.00546	Pass	0.005577	Pass
40	0.2	0.001283	Pass	0.001297	Pass
41	0.5	0.005012	Pass	0.005032	Pass
42	0.2	0.001254	Pass	0.00125	Pass
43	0.49	0.005146	Pass	0.005108	Pass
44	0.2	0.001348	Pass	0.001337	Pass
45	0.2	0.005645	Pass	0.005581	Pass
46	0.2	0.001496	Pass	0.001478	Pass
47	0.47	0.006406	Pass	0.006339	Pass
48	0.2	0.001701	Pass	0.001679	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 196_1512896 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 196_1512896 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
49	0.46	0.007285	Pass	0.007188	Pass
THDv %	4	0.42868668	Pass	0.411926608	Pass

ตารางที่ ก.29 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกประเภทที่ 2

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 196_1512896 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 196_1512896 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
2	1.5	0.022501	Pass	0.022392	Pass
3	3	0.131848	Pass	0.130968	Pass
4	1	0.043694	Pass	0.043361	Pass
5	3	0.03671	Pass	0.036447	Pass
6	0.5	0.011056	Pass	0.010969	Pass
7	3	0.051943	Pass	0.051514	Pass
8	0.4	0.014975	Pass	0.014852	Pass
9	1.2	0.068105	Pass	0.067487	Pass
10	0.4	0.01916	Pass	0.018977	Pass
11	2	0.011368	Pass	0.011269	Pass
12	0.2	0.00315	Pass	0.003119	Pass
13	2	0.013903	Pass	0.013759	Pass



H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 196_1512896 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 196_1512896 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
14	0.2	0.003826	Pass	0.003786	Pass
15	0.3	0.016785	Pass	0.016584	Pass
16	0.2	0.004601	Pass	0.004542	Pass
17	1.6	0.015148	Pass	0.014948	Pass
18	0.2	0.004153	Pass	0.004089	Pass
19	1.2	0.018281	Pass	0.017966	Pass
20	0.2	0.005058	Pass	0.004967	Pass
21	0.2	0.022447	Pass	0.021955	Pass
22	0.2	0.006288	Pass	0.00613	Pass
23	1.2	0.011439	Pass	0.011125	Pass
24	0.2	0.003287	Pass	0.003171	Pass
25	0.7	0.01552	Pass	0.014848	Pass
26	0.2	0.00478	Pass	0.004531	Pass
27	0.2	0.024694	Pass	0.022844	Pass
28	0.2	0.00897	Pass	0.007968	Pass
29	0.63	0.070238	Pass	0.056257	Pass
30	0.2	0.090781	Pass	0.051726	Pass
31	0.6	0.064177	Pass	0.09009	Pass
32	0.2	0.007569	Pass	0.008733	Pass
33	0.2	0.019753	Pass	0.022115	Pass
34	0.2	0.003536	Pass	0.003853	Pass
35	0.56	0.005359	Pass	0.005699	Pass
36	0.2	0.001086	Pass	0.001147	Pass
37	0.54	0.003627	Pass	0.003789	Pass
38	0.2	0.000785	Pass	0.000809	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 196_1512896 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 196_1512896 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
39	0.2	0.002847	Pass	0.002908	Pass
40	0.2	0.000669	Pass	0.000676	Pass
41	0.5	0.002613	Pass	0.002623	Pass
42	0.2	0.000654	Pass	0.000652	Pass
43	0.49	0.002683	Pass	0.002663	Pass
44	0.2	0.000703	Pass	0.000697	Pass
45	0.2	0.002943	Pass	0.00291	Pass
46	0.2	0.00078	Pass	0.00077	Pass
47	0.47	0.00334	Pass	0.003305	Pass
48	0.2	0.000887	Pass	0.000875	Pass
49	0.46	0.003798	Pass	0.003747	Pass
THDv %	4	0.223491581	Pass	0.214754251	Pass

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.30 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันปานกลาง (24 kV) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกรูปแบบที่ 3

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 196_1512896 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 196_1512896 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
2	1.5	0.040979	Pass	0.04078	Pass
3	3	0.079233	Pass	0.078704	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 196_1512896 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 196_1512896 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
4	1	0.028649	Pass	0.028431	Pass
5	3	0.071531	Pass	0.071018	Pass
6	0.5	0.011276	Pass	0.011188	Pass
7	3	0.035945	Pass	0.035648	Pass
8	0.4	0.004364	Pass	0.004328	Pass
9	1.2	0.012404	Pass	0.012291	Pass
10	0.4	0.002793	Pass	0.002767	Pass
11	2	0.010351	Pass	0.01026	Pass
12	0.2	0.000918	Pass	0.000909	Pass
13	2	0.014179	Pass	0.014032	Pass
14	0.2	0.002787	Pass	0.002758	Pass
15	0.3	0.005502	Pass	0.005436	Pass
16	0.2	0.001341	Pass	0.001324	Pass
17	1.6	0.016184	Pass	0.015971	Pass
18	0.2	0.004841	Pass	0.004766	Pass
19	1.2	0.011541	Pass	0.011343	Pass
20	0.2	0.001966	Pass	0.001931	Pass
21	0.2	0.00436	Pass	0.004265	Pass
22	0.2	0.002445	Pass	0.002383	Pass
23	1.2	0.00972	Pass	0.009453	Pass
24	0.2	0.001597	Pass	0.001541	Pass
25	0.7	0.005651	Pass	0.005407	Pass
26	0.2	0.002323	Pass	0.002202	Pass
27	0.2	0.008992	Pass	0.008318	Pass
28	0.2	0.004359	Pass	0.003872	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 196_1512896 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 196_1512896 /C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
29	0.63	0.017065	Pass	0.013669	Pass
30	0.2	0.088227	Pass	0.050271	Pass
31	0.6	0.007796	Pass	0.010944	Pass
32	0.2	0.003678	Pass	0.004244	Pass
33	0.2	0.0024	Pass	0.002687	Pass
34	0.2	0.001718	Pass	0.001872	Pass
35	0.56	0.002604	Pass	0.00277	Pass
36	0.2	0.00211	Pass	0.00223	Pass
37	0.54	0.000881	Pass	0.000921	Pass
38	0.2	0.000763	Pass	0.000786	Pass
39	0.2	0.000692	Pass	0.000706	Pass
40	0.2	0.00065	Pass	0.000657	Pass
41	0.5	0	Pass	0	Pass
42	0.2	0	Pass	0	Pass
43	0.49	0	Pass	0	Pass
44	0.2	0	Pass	0	Pass
45	0.2	0	Pass	0	Pass
46	0.2	0	Pass	0	Pass
47	0.47	0	Pass	0	Pass
48	0.2	0	Pass	0	Pass
49	0.46	0	Pass	0	Pass
THDv %	4	0.15715186	Pass	0.138369531	Pass

### ก.5.3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V)

ตารางที่ ก.31 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทางการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 1

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 196_658288 / C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 196_658288 / C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
2	1.6	0.198894	Pass	0.200277	Pass
3	4	1.512058	Pass	1.527948	Pass
4	1	0.251776	Pass	0.253867	Pass
5	4	2.327052	Pass	2.35643	Pass
6	0.5	0.181323	Pass	0.182872	Pass
7	4	0.928431	Pass	0.937251	Pass
8	0.4	0.23701	Pass	0.239051	Pass
9	1.2	1.366695	Fail	1.381303	Fail
10	0.4	0.291061	Pass	0.293558	Pass
11	3	0.415354	Pass	0.419233	Pass
12	0.2	0.105621	Pass	0.106525	Pass
13	2.5	0.461188	Pass	0.465206	Pass
14	0.2	0.123383	Pass	0.124461	Pass
15	0.3	0.584625	Fail	0.59047	Fail
16	0.2	0.140624	Pass	0.141847	Pass
17	1.6	0.448896	Pass	0.452862	Pass
18	0.2	0.118611	Pass	0.11965	Pass
19	1.2	0.517826	Pass	0.522624	Pass
20	0.2	0.131739	Pass	0.132914	Pass
21	0.2	0.559351	Fail	0.564398	Fail

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
22	0.2	0.144993	Pass	0.146285	Pass
23	1.2	0.246996	Pass	0.249268	Pass
24	0.2	0.063275	Pass	0.063845	Pass
25	0.7	0.274868	Pass	0.277516	Pass
26	0.2	0.068711	Pass	0.06934	Pass
27	0.2	0.290386	Fail	0.293124	Fail
28	0.2	0.07378	Pass	0.074458	Pass
29	0.63	0.318036	Pass	0.321079	Pass
30	0.2	0.079027	Pass	0.079761	Pass
31	0.6	0.335856	Pass	0.339131	Pass
32	0.2	0.08427	Pass	0.085057	Pass
33	0.2	0.349669	Fail	0.35301	Fail
34	0.2	0.089561	Pass	0.090415	Pass
35	0.56	0.184701	Pass	0.186452	Pass
36	0.2	0.047414	Pass	0.047873	Pass
37	0.54	0.197649	Pass	0.199615	Pass
38	0.2	0.050035	Pass	0.050515	Pass
39	0.2	0.208651	Fail	0.210762	Fail
40	0.2	0.052683	Pass	0.053208	Pass
41	0.5	0.218827	Pass	0.220972	Pass
42	0.2	0.055344	Pass	0.055905	Pass
43	0.49	0.228578	Pass	0.230943	Pass
44	0.2	0.057937	Pass	0.058509	Pass
45	0.2	0.238191	Fail	0.240682	Fail

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
46	0.2	0.060611	Pass	0.061247	Pass
47	0.47	0.248352	Pass	0.250843	Pass
48	0.2	0.063223	Pass	0.063897	Pass
49	0.46	0.258828	Pass	0.261624	Pass
THDv %	5	3.651394131	Pass	3.691831315	Pass

ตารางที่ ก.32 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทางการจ่ายกระแสฮาร์โมนิกรูปแบบที่ 2

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
2	1.6	0.142886	Pass	0.143972	Pass
3	4	1.184577	Pass	1.198194	Pass
4	1	0.143813	Pass	0.145084	Pass
5	4	2.182797	Pass	2.211313	Pass
6	0.5	0.100285	Pass	0.101195	Pass
7	4	0.571129	Pass	0.577238	Pass
8	0.4	0.128306	Pass	0.129447	Pass
9	1.2	0.940919	Pass	0.952434	Pass
10	0.4	0.153977	Pass	0.15532	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
11	3	0.251912	Pass	0.254591	Pass
12	0.2	0.055186	Pass	0.055661	Pass
13	2.5	0.24593	Pass	0.248149	Pass
14	0.2	0.064828	Pass	0.0654	Pass
15	0.3	0.373239	Fail	0.377698	Fail
16	0.2	0.073363	Pass	0.074002	Pass
17	1.6	0.23533	Pass	0.237424	Pass
18	0.2	0.061853	Pass	0.062395	Pass
19	1.2	0.292533	Pass	0.295537	Pass
20	0.2	0.068711	Pass	0.069324	Pass
21	0.2	0.299846	Fail	0.302667	Fail
22	0.2	0.075699	Pass	0.076376	Pass
23	1.2	0.135081	Pass	0.136382	Pass
24	0.2	0.03305	Pass	0.033348	Pass
25	0.7	0.158146	Pass	0.159861	Pass
26	0.2	0.036149	Pass	0.036483	Pass
27	0.2	0.159304	Pass	0.160915	Pass
28	0.2	0.038492	Pass	0.038846	Pass
29	0.63	0.182178	Pass	0.184047	Pass
30	0.2	0.041199	Pass	0.041582	Pass
31	0.6	0.187358	Pass	0.189352	Pass
32	0.2	0.043933	Pass	0.044343	Pass
33	0.2	0.185004	Pass	0.186811	Pass
34	0.2	0.046691	Pass	0.047136	Pass



H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 196_658288 / C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 196_658288 / C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
35	0.56	0.096797	Pass	0.097718	Pass
36	0.2	0.024719	Pass	0.024958	Pass
37	0.54	0.106751	Pass	0.107867	Pass
38	0.2	0.026085	Pass	0.026335	Pass
39	0.2	0.113109	Pass	0.114316	Pass
40	0.2	0.027465	Pass	0.027739	Pass
41	0.5	0.118018	Pass	0.119196	Pass
42	0.2	0.028889	Pass	0.029182	Pass
43	0.49	0.121966	Pass	0.12327	Pass
44	0.2	0.030204	Pass	0.030503	Pass
45	0.2	0.125716	Pass	0.127054	Pass
46	0.2	0.031632	Pass	0.031964	Pass
47	0.47	0.13058	Pass	0.131894	Pass
48	0.2	0.03296	Pass	0.033312	Pass
49	0.46	0.135862	Pass	0.137344	Pass
THDv %	5	2.879598408	Pass	2.914989147	Pass

ตารางที่ ก.33 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทางการจ่ายกระแสฮาร์โมนิกรูปแบบที่ 3

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
2	1.6	0.198402	Pass	0.199783	Pass
3	4	1.346146	Pass	1.360884	Pass
4	1	0.093609	Pass	0.094498	Pass
5	4	2.141138	Pass	2.169411	Pass
6	0.5	0.052551	Pass	0.053099	Pass
7	4	0.499338	Pass	0.504929	Pass
8	0.4	0.057328	Pass	0.057897	Pass
9	1.2	0.618838	Pass	0.62829	Pass
10	0.4	0.054966	Pass	0.055489	Pass
11	3	0.326004	Pass	0.329202	Pass
12	0.2	0.036273	Pass	0.036587	Pass
13	2.5	0.407745	Pass	0.411311	Pass
14	0.2	0.046452	Pass	0.046867	Pass
15	0.3	0.256429	Pass	0.260433	Pass
16	0.2	0.048087	Pass	0.048506	Pass
17	1.6	0.379188	Pass	0.382541	Pass
18	0.2	0.045037	Pass	0.045432	Pass
19	1.2	0.375387	Pass	0.379025	Pass
20	0.2	0.05004	Pass	0.050487	Pass
21	0.2	0.09719	Pass	0.098552	Pass
22	0.2	0.049694	Pass	0.05014	Pass
23	1.2	0.330931	Pass	0.333948	Pass
24	0.2	0.04803	Pass	0.048462	Pass
25	0.7	0.285786	Pass	0.288527	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
26	0.2	0.045822	Pass	0.046244	Pass
27	0.2	0.079305	Pass	0.080343	Pass
28	0.2	0.049007	Pass	0.049457	Pass
29	0.63	0.234618	Pass	0.236929	Pass
30	0.2	0.044993	Pass	0.045411	Pass
31	0.6	0.194511	Pass	0.196562	Pass
32	0.2	0.039944	Pass	0.040317	Pass
33	0.2	0.061774	Pass	0.062524	Pass
34	0.2	0.042452	Pass	0.042857	Pass
35	0.56	0.157788	Pass	0.159285	Pass
36	0.2	0.044949	Pass	0.045384	Pass
37	0.54	0.124509	Pass	0.125786	Pass
38	0.2	0.03796	Pass	0.038324	Pass
39	0.2	0.060756	Pass	0.061521	Pass
40	0.2	0.039969	Pass	0.040367	Pass
41	0.5	0.035419	Pass	0.035862	Pass
42	0.2	0.001697	Pass	0.001727	Pass
43	0.49	0.030454	Pass	0.030997	Pass
44	0.2	0	Pass	0	Pass
45	0.2	0.022981	Pass	0.023396	Pass
46	0.2	0.001696	Pass	0.001727	Pass
47	0.47	0.019869	Pass	0.020105	Pass
48	0.2	0	Pass	0	Pass
49	0.46	0.018559	Pass	0.018902	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
THDv %	5	2.844346622	Pass	2.879289291	Pass

ตารางที่ ก.34 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกประเภทที่ 1

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
2	1.6	0.117	Pass	0.11762	Pass
3	4	0.684177	Pass	0.688926	Pass
4	1	0.225533	Pass	0.227247	Pass
5	4	0.580794	Pass	0.585398	Pass
6	0.5	0.173748	Pass	0.175163	Pass
7	4	0.809192	Pass	0.815885	Pass
8	0.4	0.23081	Pass	0.232749	Pass
9	1.2	1.038041	Pass	1.046791	Pass
10	0.4	0.288152	Pass	0.290596	Pass
11	3	0.386998	Pass	0.390319	Pass
12	0.2	0.105538	Pass	0.10644	Pass
13	2.5	0.457196	Pass	0.461122	Pass
14	0.2	0.123026	Pass	0.124097	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
15	0.3	0.52731	Fail	0.531874	Fail
16	0.2	0.140594	Pass	0.141816	Pass
17	1.6	0.447958	Pass	0.451905	Pass
18	0.2	0.118599	Pass	0.119638	Pass
19	1.2	0.500708	Pass	0.50511	Pass
20	0.2	0.131717	Pass	0.132891	Pass
21	0.2	0.553338	Fail	0.558245	Fail
22	0.2	0.144914	Pass	0.146205	Pass
23	1.2	0.242321	Pass	0.244505	Pass
24	0.2	0.06323	Pass	0.063799	Pass
25	0.7	0.26345	Pass	0.265831	Pass
26	0.2	0.068475	Pass	0.0691	Pass
27	0.2	0.284511	Fail	0.28711	Fail
28	0.2	0.073761	Pass	0.074438	Pass
29	0.63	0.305487	Pass	0.308306	Pass
30	0.2	0.079027	Pass	0.079761	Pass
31	0.6	0.326641	Pass	0.329695	Pass
32	0.2	0.08427	Pass	0.085057	Pass
33	0.2	0.347709	Fail	0.351003	Fail
34	0.2	0.089561	Pass	0.090415	Pass
35	0.56	0.184337	Pass	0.186082	Pass
36	0.2	0.047414	Pass	0.047873	Pass
37	0.54	0.194926	Pass	0.196825	Pass
38	0.2	0.050035	Pass	0.050515	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
39	0.2	0.205463	Fail	0.207495	Fail
40	0.2	0.052683	Pass	0.053208	Pass
41	0.5	0.215942	Pass	0.218043	Pass
42	0.2	0.055318	Pass	0.055878	Pass
43	0.49	0.22654	Pass	0.228853	Pass
44	0.2	0.057937	Pass	0.058509	Pass
45	0.2	0.23708	Fail	0.239542	Fail
46	0.2	0.060588	Pass	0.061222	Pass
47	0.47	0.247556	Pass	0.250036	Pass
48	0.2	0.063223	Pass	0.063897	Pass
49	0.46	0.258162	Pass	0.26094	Pass
THDv %	5	2.290203338	Pass	2.309750977	Pass

ตารางที่ ก.35 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 2

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
2	1.6	0.060992	Pass	0.061315	Pass
3	4	0.356696	Pass	0.359171	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 196_658288 / C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 196_658288 / C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
4	1	0.11757	Pass	0.118464	Pass
5	4	0.302797	Pass	0.305197	Pass
6	0.5	0.090575	Pass	0.091312	Pass
7	4	0.421872	Pass	0.425362	Pass
8	0.4	0.120321	Pass	0.121332	Pass
9	1.2	0.541183	Pass	0.545744	Pass
10	0.4	0.150214	Pass	0.151488	Pass
11	3	0.201761	Pass	0.203493	Pass
12	0.2	0.055027	Pass	0.055498	Pass
13	2.5	0.238359	Pass	0.240406	Pass
14	0.2	0.064146	Pass	0.064704	Pass
15	0.3	0.274913	Pass	0.277293	Pass
16	0.2	0.073306	Pass	0.073943	Pass
17	1.6	0.233535	Pass	0.235593	Pass
18	0.2	0.06183	Pass	0.062371	Pass
19	1.2	0.261036	Pass	0.263331	Pass
20	0.2	0.068669	Pass	0.069281	Pass
21	0.2	0.288474	Fail	0.291032	Fail
22	0.2	0.075549	Pass	0.076222	Pass
23	1.2	0.12633	Pass	0.127469	Pass
24	0.2	0.032964	Pass	0.03326	Pass
25	0.7	0.137345	Pass	0.138586	Pass
26	0.2	0.035698	Pass	0.036024	Pass
27	0.2	0.148325	Pass	0.14968	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 196_658288 / C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 196_658288 / C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
28	0.2	0.038454	Pass	0.038807	Pass
29	0.63	0.159261	Pass	0.16073	Pass
30	0.2	0.041199	Pass	0.041582	Pass
31	0.6	0.170289	Pass	0.171881	Pass
32	0.2	0.043933	Pass	0.044343	Pass
33	0.2	0.181272	Pass	0.18299	Pass
34	0.2	0.046691	Pass	0.047136	Pass
35	0.56	0.096101	Pass	0.097011	Pass
36	0.2	0.024719	Pass	0.024958	Pass
37	0.54	0.101621	Pass	0.102611	Pass
38	0.2	0.026085	Pass	0.026335	Pass
39	0.2	0.107115	Pass	0.108174	Pass
40	0.2	0.027465	Pass	0.027739	Pass
41	0.5	0.112578	Pass	0.113673	Pass
42	0.2	0.028839	Pass	0.029131	Pass
43	0.49	0.118103	Pass	0.119309	Pass
44	0.2	0.030204	Pass	0.030503	Pass
45	0.2	0.123598	Pass	0.124881	Pass
46	0.2	0.031586	Pass	0.031917	Pass
47	0.47	0.129059	Pass	0.130352	Pass
48	0.2	0.03296	Pass	0.033312	Pass
49	0.46	0.134589	Pass	0.136037	Pass
THDv %	5	1.193980674	Pass	1.204171392	Pass



ตารางที่ ก.36 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 3

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
2	1.6	0.116509	Pass	0.117126	Pass
3	4	0.518264	Pass	0.521861	Pass
4	1	0.067367	Pass	0.067879	Pass
5	4	0.204483	Pass	0.206104	Pass
6	0.5	0.039545	Pass	0.039867	Pass
7	4	0.339577	Pass	0.342386	Pass
8	0.4	0.045977	Pass	0.046364	Pass
9	1.2	0.051694	Pass	0.05213	Pass
10	0.4	0.049188	Pass	0.049605	Pass
11	3	0.28901	Pass	0.29149	Pass
12	0.2	0.036031	Pass	0.036339	Pass
13	2.5	0.403224	Pass	0.406687	Pass
14	0.2	0.045495	Pass	0.045891	Pass
15	0.3	0.045006	Pass	0.045395	Pass
16	0.2	0.047999	Pass	0.048416	Pass
17	1.6	0.378076	Pass	0.381408	Pass
18	0.2	0.045004	Pass	0.045398	Pass
19	1.2	0.351397	Pass	0.354486	Pass
20	0.2	0.049982	Pass	0.050428	Pass
21	0.2	0.052493	Pass	0.052959	Pass
22	0.2	0.049464	Pass	0.049905	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend  196_658288 / C  Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
23	1.2	0.327456	Pass	0.330408	Pass
24	0.2	0.04797	Pass	0.048402	Pass
25	0.7	0.274822	Pass	0.277306	Pass
26	0.2	0.045468	Pass	0.045882	Pass
27	0.2	0.053962	Pass	0.054455	Pass
28	0.2	0.048977	Pass	0.049427	Pass
29	0.63	0.217303	Pass	0.219309	Pass
30	0.2	0.044993	Pass	0.045411	Pass
31	0.6	0.178128	Pass	0.179794	Pass
32	0.2	0.039944	Pass	0.040317	Pass
33	0.2	0.049491	Pass	0.049959	Pass
34	0.2	0.042452	Pass	0.042857	Pass
35	0.56	0.157363	Pass	0.158852	Pass
36	0.2	0.044949	Pass	0.045384	Pass
37	0.54	0.120139	Pass	0.12131	Pass
38	0.2	0.03796	Pass	0.038324	Pass
39	0.2	0.048695	Pass	0.049176	Pass
40	0.2	0.039969	Pass	0.040367	Pass
41	0.5	0	Pass	0	Pass
42	0.2	0	Pass	0	Pass
43	0.49	0	Pass	0	Pass
44	0.2	0	Pass	0	Pass
45	0.2	0	Pass	0	Pass
46	0.2	0	Pass	0	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	Weekday 196_658288 / C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation	Weekend 196_658288 / C Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
47	0.47	0	Pass	0	Pass
48	0.2	0	Pass	0	Pass
49	0.46	0	Pass	0	Pass
THDv %	5	1.143874239	Pass	1.15343225	Pass

#### ก.5.4 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network)

ตารางที่ ก.37 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกรูปแบบที่ 1

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	N_1_2, N_1_3, N_2_3 Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
2	1.6	0.090645	Pass
3	4	0.533264	Pass
4	1	0.176341	Pass
5	4	0.384561	Pass
6	0.5	0.115094	Pass
7	4	0.53632	Pass
8	0.4	0.153087	Pass
9	1.2	0.688432	Pass
10	0.4	0.19114	Pass
11	3	0.237024	Pass
12	0.2	0.064624	Pass
13	2.5	0.279976	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	N_1_2, N_1_3, N_2_3 Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
14	0.2	0.075365	Pass
15	0.3	0.322946	Fail
16	0.2	0.086109	Pass
17	1.6	0.274445	Pass
18	0.2	0.072641	Pass
19	1.2	0.306686	Pass
20	0.2	0.080702	Pass
21	0.2	0.338931	Fail
22	0.2	0.088764	Pass
23	1.2	0.148472	Pass
24	0.2	0.03873	Pass
25	0.7	0.161372	Pass
26	0.2	0.041956	Pass
27	0.2	0.174273	Pass
28	0.2	0.045181	Pass
29	0.63	0.187175	Pass
30	0.2	0.048406	Pass
31	0.6	0.200077	Pass
32	0.2	0.051632	Pass
33	0.2	0.212979	Fail
34	0.2	0.054858	Pass
35	0.56	0.112941	Pass
36	0.2	0.029042	Pass
37	0.54	0.119392	Pass
38	0.2	0.030655	Pass
39	0.2	0.125844	Pass
40	0.2	0.032267	Pass
41	0.5	0.132296	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	N_1_2, N_1_3, N_2_3 Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
42	0.2	0.03388	Pass
43	0.49	0.138748	Pass
44	0.2	0.035493	Pass
45	0.2	0.145199	Pass
46	0.2	0.037106	Pass
47	0.47	0.151651	Pass
48	0.2	0.038719	Pass
49	0.46	0.158103	Pass
THDv %	5	1.495126294	Pass

ตารางที่ ก.38 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์โมนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์โมนิกรูปแบบที่ 2

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	N_1_2, N_1_3, N_2_3 Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
2	1.6	0.047253	Pass
3	4	0.278017	Pass
4	1	0.091927	Pass
5	4	0.200491	Pass
6	0.5	0.059999	Pass
7	4	0.27961	Pass
8	0.4	0.079804	Pass
9	1.2	0.358914	Pass
10	0.4	0.099641	Pass
11	3	0.123573	Pass
12	0.2	0.033695	Pass
13	2.5	0.145966	Pass
14	0.2	0.039295	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	N_1_2, N_1_3, N_2_3 Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
15	0.3	0.168368	Pass
16	0.2	0.044897	Pass
17	1.6	0.143077	Pass
18	0.2	0.03787	Pass
19	1.2	0.159886	Pass
20	0.2	0.042073	Pass
21	0.2	0.176696	Pass
22	0.2	0.046276	Pass
23	1.2	0.077403	Pass
24	0.2	0.020191	Pass
25	0.7	0.084129	Pass
26	0.2	0.021873	Pass
27	0.2	0.090854	Pass
28	0.2	0.023554	Pass
29	0.63	0.09758	Pass
30	0.2	0.025236	Pass
31	0.6	0.104307	Pass
32	0.2	0.026917	Pass
33	0.2	0.111033	Pass
34	0.2	0.028599	Pass
35	0.56	0.05888	Pass
36	0.2	0.01514	Pass
37	0.54	0.062243	Pass
38	0.2	0.015981	Pass
39	0.2	0.065607	Pass
40	0.2	0.016822	Pass
41	0.5	0.06897	Pass
42	0.2	0.017663	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	N_1_2, N_1_3, N_2_3 Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
43	0.49	0.072334	Pass
44	0.2	0.018504	Pass
45	0.2	0.075697	Pass
46	0.2	0.019345	Pass
47	0.47	0.079061	Pass
48	0.2	0.020186	Pass
49	0.46	0.082425	Pass
THDv %	5	0.779473428	Pass

ตารางที่ ก.39 ตารางแสดงผลการทดสอบ ค่าแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ (230/400 V) รูปแบบการจ่ายไฟฟ้าแบบโครงข่าย (Network) กรณีระบบจำหน่ายไฟฟ้าไม่มีค่าแรงดันฮาร์มอนิกเบื้องหลังที่แหล่งจ่ายต้นทาง การจ่ายกระแสฮาร์มอนิกรูปแบบที่ 3

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	N_1_2, N_1_3, N_2_3 Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
2	1.6	0.090264	Pass
3	4	0.403948	Pass
4	1	0.052673	Pass
5	4	0.135394	Pass
6	0.5	0.026195	Pass
7	4	0.225067	Pass
8	0.4	0.030495	Pass
9	1.2	0.034284	Pass
10	0.4	0.032628	Pass
11	3	0.17701	Pass
12	0.2	0.022063	Pass
13	2.5	0.246925	Pass
14	0.2	0.02787	Pass
15	0.3	0.027563	Pass

H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	N_1_2, N_1_3, N_2_3 Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
16	0.2	0.029398	Pass
17	1.6	0.231631	Pass
18	0.2	0.027565	Pass
19	1.2	0.215232	Pass
20	0.2	0.030624	Pass
21	0.2	0.032153	Pass
22	0.2	0.030298	Pass
23	1.2	0.200635	Pass
24	0.2	0.029384	Pass
25	0.7	0.168338	Pass
26	0.2	0.027859	Pass
27	0.2	0.033054	Pass
28	0.2	0.03	Pass
29	0.63	0.133144	Pass
30	0.2	0.027559	Pass
31	0.6	0.109108	Pass
32	0.2	0.024474	Pass
33	0.2	0.030314	Pass
34	0.2	0.026003	Pass
35	0.56	0.096414	Pass
36	0.2	0.027532	Pass
37	0.54	0.073586	Pass
38	0.2	0.023257	Pass
39	0.2	0.029825	Pass
40	0.2	0.02448	Pass
41	0.5	0	Pass
42	0.2	0	Pass
43	0.49	0	Pass



H Order	Limitation G5/4 Harmonic Distortion in %	N_1_2, N_1_3, N_2_3 Harmonic Distortion in %	Verify with limitation
44	0.2	0	Pass
45	0.2	0	Pass
46	0.2	0	Pass
47	0.47	0	Pass
48	0.2	0	Pass
49	0.46	0	Pass
THDv %	5	0.753701443	Pass



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอรรวรรณ กังวาท เกิดเมื่อวันที่ 28 มีนาคม พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เป็นบุตรคนที่สองของนายวันชัย กังวาท และนางสาวพัชราภรณ์ โชติกะคาม สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เมื่อปีการศึกษา 2555 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557

ขณะทำการศึกษา ผู้เขียนวิทยานิพนธ์มีผลงานตีพิมพ์และการนำเสนอบทความ "การหาปริมาณกำลังผลิตติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ยอมให้ติดตั้งได้ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อของการไฟฟ้านครหลวงในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ" ในการประชุมทางวิชาการ PEACON & INNOVATION 2017 “Moving Toward The Electric Utility of The Future: The Challenges of 4.0 Era” ระหว่างวันที่ 13-14 ธันวาคม พ.ศ. 2560 ณ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY