ผลกระทบด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าบนระบบจำหน่ายของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

นางสาวศุภิสรา ศรีแสน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2549

ผลกระทบด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าบนระบบจำหน่ายของระบบผลิตไฟฟ้า
ด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

นางสาวศุภิสรา ศรีแสน วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2549

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์
(ดร.อนวัช แสงสว่าง)

..... กรรมการ
(ดร.ธีรยุทธ์ เจนวิทยา)

..... กรรมการ
(ดร.ศุภกิตติ์ โชติโก)

..... กรรมการ
(ดร.สมพร สิริสำราญนุกูล)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
สำนักหอสมุด
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าบนระบบจำหน่ายของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นางสาวศุภิสรา ศรีแสน
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.อนวัช แสงสว่าง
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2549

บทคัดย่อ

ในหลายปีที่ผ่านมา ปริมาณการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายเพิ่มมากขึ้นจนมีปริมาณอยู่ในระดับจิกะวัตต์ (Gigawatts, GW) และคาดว่าปริมาณการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายจะเติบโตเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จากแนวโน้มการเติบโตของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายอาจเป็นสาเหตุสำคัญที่จะส่งผลต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอผลกระทบด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าบนระบบจำหน่ายของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทำการจำลองการทำงานเพื่อพิจารณาผลกระทบจากตำแหน่งในการติดตั้งและขนาดระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์บนระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(กฟภ.) และใช้ข้อมูลในการจำลองการทำงานจากข้อมูลจริงจากการเก็บข้อมูลของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ซึ่งจะพิจารณาผลการจำลองการทำงานในด้านแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด เพาเวอร์แฟคเตอร์ และฮาร์มอนิกส์ ทำให้พบว่าผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์บนระบบจำหน่ายมีทิศทางเป็นไปในด้านบวก อีกทั้งยังสามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพด้านกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่าย

คำสำคัญ : ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ / คุณภาพด้านกำลังไฟฟ้า / แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง / กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด / เพาเวอร์แฟคเตอร์ / ฮาร์มอนิกส์

Thesis Title	Effects of PV Grid-Connected Systems on a Distribution System: Power Quality Issue
Thesis Credits	12
Candidate	Ms. Supissara Srisaen
Thesis Advisor	Dr. Anawach Sangswang
Program	Master of Engineering
Field of Study	Electrical Engineering
Department	Electrical Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2549

Abstract

In the past few years, the installation of PV grid-connected systems has reached the level of gigawatts(GW) and the amount is expected to grow continuously. With this penetration level, they could have serious consequences on important technical aspects such as quality of power supplied to customers by utilities. This study presents the effects of PV system on the power quality of the utility grid. The electrical characteristics of PV grid-connected systems which are being connected to the utility grid has been measured. The measured results are then used in computer simulation to study effects on power quality. The data of the power distribution system under study is obtained from the Provincial Electricity Authority (PEA). The concentration of this study is on the effects of the PV generator installation locations which are not of the utility to decide. The effects on distribution system's power quality, in terms of voltage, active power, total losses, power factor and harmonics are investigated. The simulation results have shown that the implementation of the PV grid-connected system improves the power quality of a distribution feeder.

Keywords : Photovoltaic / Power Quality / Voltage / Active Power / Total losses Power Factor / Harmonics

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยนี้สำเร็จด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ดร.อนวัช แสงสว่าง อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมการทำวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้แนวคิดคำปรึกษาแนะนำและช่วยแก้ไขข้อบกพร่องรวมทั้งปัญหาต่างๆ ขอขอบพระคุณ ดร.ธีรยุทธ์ เจนวิทยา ดร.ศุภกิตติ์ โชติโก และดร.สมพร สิริสำราญนุกูล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณกลุ่มระบบพลังงานสะอาด(CES) ที่ช่วยเหลือและสนับสนุนด้านข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ขอขอบคุณ คุณวิโรจน์ บัวคลี จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ให้ความช่วยเหลือเรื่องข้อมูลของระบบจำหน่ายไฟฟ้าและขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกทุกประการแก่ผู้วิจัยเสมอ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณมารดา บิดา ครู อาจารย์ ขอบคุณ น้องสาวทั้งสองคน และหลานๆ ทั้งสองที่เป็นกำลังใจอย่างยิ่ง ขอขอบพระคุณอาจารย์บรรเจิด กาญจนเจตนี รองอธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่คอยผลักดันและสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมา ขอขอบคุณอาจารย์สนั่น คำบุดดา ที่เป็นกำลังใจที่ดีมาตลอด ขอบคุณน้องๆ ทุกคนที่ห้องวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความเป็นกันเองและให้ความช่วยเหลือตลอดมา และอีกหลายๆ ท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงไว้ในที่นี้ได้ทั้งหมด รวมถึงสถานที่ที่ให้ความสะดวกปลอดภัยในการทำวิจัย คือ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ขออ้างถึงอำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยโปรดอำนวยพรให้ทุกท่านมีความสุข คุณประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ซึ่งเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่านแล้ว ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งใจเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ค
กิตติกรรมประกาศ ง
สารบัญ จ
รายการตาราง ช
รายการรูปประกอบ ซ
รายการสัญลักษณ์ ฎ

บทที่

1. บทนำ **1**
1.1 สภาพภาพของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย 1
1.2 คุณภาพกำลังไฟฟ้าของประเทศไทย 5
1.3 ที่มาของปัญหาและความสำคัญของงานวิจัย 6
1.4 วัตถุประสงค์ 7
1.5 ผลงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง 8
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 10

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง **11**
2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย 11
2.2 มาตรฐานคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์กับระบบจำหน่าย 13
2.3 แรงดันกระเพื่อม 15
2.4 เพาเวอร์แฟคเตอร์ 16
2.5 ฮาร์มอนิกส์ 18

3. การดำเนินงานวิจัย **22**

3.1 การเก็บข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย 22

3.2 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย 28

3.3 ผลการเก็บข้อมูลของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย 31

3.4 การจำลองการทำงานของระบบ 39

4. ผลการดำเนินการ **50**

4.1 ผลการจำลองการทำงาน 50

4.2 ผลการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับข้อกำหนดและเกณฑ์มาตรฐาน 68

5. สรุปและข้อเสนอแนะ **71**

5.1 สรุป 71

5.2 ข้อเสนอแนะ 72

เอกสารอ้างอิง **73**

ภาคผนวก

ก. ผลการเก็บข้อมูลเฉลี่ยในช่วงที่เก็บข้อมูล 77

ข. ข้อมูลรายละเอียดของโมเดลสายส่ง 95

ประวัติผู้วิจัย **108**

รายการตาราง

ตาราง **หน้า**

2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย 12

2.2 การตอบสนองแรงดันผิดปกติ (Response to Abnormal Voltages) 14

2.3 แสดงขีดจำกัดความเพี้ยนของกระแสสำหรับคอนเวอร์เตอร์ที่นำมาเชื่อมต่อ 14

2.4 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกส์สำหรับระบบจำหน่าย (แรงดัน 120V-69 kV) 19

2.5 ขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกส์ 20

3.1 รายละเอียดข้อมูลทางเทคนิคของชุดเก็บบันทึกข้อมูล(Data Acquisition) รุ่น NI 6034E 25

3.2 แสดงคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 28

3.3 แสดงคุณลักษณะของอินเวอร์เตอร์ 29

3.4 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาด 10% และ 25% ของโหลดรวมทั้งหมด 45

4.1 แสดงค่าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เปรียบเทียบกับค่าข้อกำหนด/มาตรฐาน 69

4.2 แสดงค่าของผลการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับค่าข้อกำหนด/มาตรฐาน 70

ข.1 รายละเอียดค่าความต้านทานและค่าตัวเหนี่ยวนำของโมเดลสายส่ง 96

ข.2 รายละเอียดค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ต้องการในแต่ละบัส 105

รายการรูปประกอบ

รูป **หน้า**

2.1 ระบบไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย 11
2.2 รูปคลื่นแรงดันที่มีการกระเพื่อมขึ้นลงของเตาหลอมโลหะชนิดเตาอาร์กไฟฟ้า 16
2.3 เฟสเซอร์ไดอะแกรมความสัมพันธ์ระหว่าง S, P, Q และ D 17
3.1 แผนผังการเก็บข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อระบบจำหน่าย 22
3.2 วงจรแบ่งแรงดันและวงจรตรวจจับกระแส 23
3.3 วงจรปรับระดับสัญญาณ 1 ช่องสัญญาณ 24
3.4 ชุดปรับระดับสัญญาณ (Signal Conditioning) 25
3.5 ชุดเก็บบันทึกข้อมูล (Data Acquisition) รุ่น NI 6034E 26
3.6 หน้าจอแสดงผลของโปรแกรม Labview ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล 26
3.7 ระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของระบบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 29
3.8 อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับสายส่งจำหน่ายที่ใช้ทดสอบ 30
3.9 ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549 32
3.10 ค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549 32
3.11 ค่ากำลังไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549 33
3.12 ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อระบบ ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549 34
3.13 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อระบบ ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549 34
3.14 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่จุดเชื่อมต่อระบบ ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549 35
3.15 ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่จุดเชื่อมต่อระบบ ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549 35
3.16 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่จุดเชื่อมต่อระบบ ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549 36
3.17 ค่าความถี่ที่จุดเชื่อมต่อระบบ ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549 37
3.18 ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ที่จุดเชื่อมต่อระบบ ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549 37
3.19 ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549 38
3.20 ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549 38
3.21 ระบบที่ใช้ในการทดสอบ 40
3.22 ลักษณะการสุ่มตำแหน่งในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ 41
3.23 ลักษณะการป้อนกระแสฮาร์มอนิกส์เข้าไปในระบบจำหน่าย 44
3.24 โมเดลของระบบที่ใช้ในการทดสอบ 47

3.25 โมเดลของระบบที่ใช้ในการทดสอบ สายป้อนที่ 1 47
3.26 โมเดลของระบบที่ใช้ในการทดสอบ สายป้อนที่ 2 48
3.27 โมเดลของระบบที่ใช้ในการทดสอบ สายป้อนที่ 3 48
3.28 โมเดลของระบบที่ใช้ในการทดสอบ สายป้อนที่ 4 49
4.1 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% ของโหลดทั้งหมด 51
4.2 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 25% ของโหลดทั้งหมด 51
4.3 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10%และ 25% ของโหลดทั้งหมด 52
4.4 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10%และ 25% ของโหลดทั้งหมด 53
4.5 ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์เมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10%และ 25% ของโหลดทั้งหมด 54
4.6 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% ของโหลดทั้งหมด 55
4.7 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 25% ของโหลดทั้งหมด 55
4.8 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10%และ 25% ของโหลดทั้งหมด 56
4.9 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10%และ 25% ของโหลดทั้งหมด 57
4.10 ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์เมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10%และ 25% ของโหลดทั้งหมด 57
4.11 ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส เมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 10% และ 25% ของโหลดทั้งหมด 59
4.12 ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน เมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 10% และ 25% ของโหลดทั้งหมด 59
4.13 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% ของโหลดทั้งหมด 60
4.14 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 25% ของโหลดทั้งหมด 60
4.15 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10%และ 25% ของโหลดทั้งหมด 61
4.16 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10%และ 25% ของโหลดทั้งหมด 62
4.17 ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์เมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10%และ 25% ของโหลดทั้งหมด 62
4.18 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% ของโหลดทั้งหมด 63
4.19 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 25% ของโหลดทั้งหมด 64
4.20 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10%และ 25% ของโหลดทั้งหมด 65
4.21 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10%และ 25% ของโหลดทั้งหมด 65
4.22 ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์เมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10%และ 25% ของโหลดทั้งหมด 66
4.23 ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส เมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 10% และ 25% ของโหลดทั้งหมด 67
4.24 ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน เมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 10% และ 25% ของโหลดทั้งหมด 67

ก.1 ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 78
ก.2 ค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 78
ก.3 ค่ากำลังไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 79
ก.4 ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 79
ก.5 ค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 80
ก.6 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 80
ก.7 ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 81
ก.8 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 81
ก.9 ค่าความถี่ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 82
ก.10 ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 82
ก.11 ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 83
ก.12 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 1 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 83
ก.13 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 84
ก.14 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 84
ก.15 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 7 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 85
ก.16 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 9 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 85
ก.17 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 11 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 86
ก.18 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 13 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 86
ก.19 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 15 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 87
ก.20 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 17 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 87
ก.21 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 19 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 88
ก.22 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 21 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 88
ก.23 ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 89
ก.24 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 1 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 89
ก.25 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 90
ก.26 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 90
ก.27 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 7 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 91
ก.28 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 9 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 91
ก.29 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 11 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 92
ก.30 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 13 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 92
ก.31 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 15 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 93
ก.32 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 17 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 93

ก.33 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 19 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 94
ก.34 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 21 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 94

รายการสัญลักษณ์

AC	=	ไฟฟ้ากระแสสลับ
a_0	=	ขนาดของสัญญาณที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์
a_n	=	แอมปลิจูดหรือขนาดของสัญญาณที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ n
b_n	=	แอมปลิจูดหรือขนาดของสัญญาณที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ n
D	=	กำลังไฟฟ้าความเพี้ยน, VA
DPF	=	ตัวประกอบกำลังการกระจัด
F	=	ความถี่, Hz
I	=	กระแสไฟฟ้า, A
I_1	=	ขนาดกระแสที่ความถี่หลักมูล
I_{Load}	=	ความต้องการกระแสโหลดสูงสุด (ส่วนประกอบที่ความถี่หลักมูล) ที่ PCC
I_n	=	ขนาดกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ n
I_{sc}	=	กระแสลัดวงจรที่ PCC
L	=	ตัวเหนี่ยวนำ, H
P	=	กำลังไฟฟ้าจริง,W
PCC	=	จุดเชื่อมต่อระบบ
Pf	=	ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์
PV	=	เซลล์แสงอาทิตย์
Q	=	กำลังไฟฟ้าเสมือน, VAR
R	=	ความต้านทาน, Ω
S	=	กำลังไฟฟ้าปรากฏ, VA
THDc	=	ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส, %
THDv	=	ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน, %
V	=	แรงดันไฟฟ้า, V
V_1	=	ขนาดแรงดันที่ความถี่หลักมูล
V_n	=	ขนาดแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ n
W	=	กำลังไฟฟ้า, W
X	=	รีแอกแตนซ์, Ω
θ	=	มุมเฟสระหว่างรูปคลื่นกระแสและแรงดันไฟฟ้า
ω	=	ความถี่หลักมูล

บทที่ 1 บทนำ

จากการศึกษาสถานภาพของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid-connected System) และทิศทางการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่มุ่งเน้นการพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานสะอาดและพลังงานหมุนเวียน เพื่อเป็นทางเลือกในการลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล การเติบโตของการใช้เทคโนโลยีพลังงานสะอาดทั่วโลกแสดงให้เห็นว่าการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์มีอัตราการเพิ่มมากขึ้น และมีแนวโน้มในการนำระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายมาใช้เพื่อช่วยทดแทนการผลิตไฟฟ้าในช่วงกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มขึ้น[1] หากปริมาณระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายมีมากขึ้นเรื่อยๆ อาจจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า เพาเวอร์แฟคเตอร์ หรืออาจทำให้เกิดฮาร์มอนิกส์ที่จุดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย อาจจะส่งผลให้คุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไม่สอดคล้องกับเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพและความปลอดภัยของการไฟฟ้า

1.1 สถานภาพของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

ปัจจุบันนี้ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid-connected) ในประเทศต่างๆ ทั่วโลกได้มีแนวโน้มการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอ้างอิงจากข้อมูลของ International Energy Agency ─ Photovoltaic Power System (IEA-PVPS) [2] พบว่าปริมาณการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์โดยเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายซึ่งติดตั้งแบบกระจายได้เพิ่มมากขึ้น โดยที่แนวโน้มการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อปี ค.ศ. 2004 ระบุว่าการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ในของกลุ่มประเทศสมาชิกของ IEA สะสมจนถึงสิ้นปี ค.ศ. 2003 เท่ากับ 1,809 MWp ซึ่งมีเพียง 22.52% ที่เป็นแบบอิสระหรือไม่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย(Off-grid Systems) และอีก 77.48% เป็นแบบเชื่อมต่อระบบจำหน่าย (Grid-connected Systems) ในจำนวนนี้เป็นลักษณะของโรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์หรือแบบรวมศูนย์ (Centralized) เพียง 3.0% และที่เหลืออีก 74.48% เป็นการใช้งานระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อระบบจำหน่ายแบบกระจายการติดตั้ง (Distributed) [3] และประเทศที่มีความเด่นชัดเชิงนโยบายและมีมาตรการส่งเสริมทั้งยังมีโปรแกรมสนับสนุน ได้แก่ ประเทศญี่ปุ่น เยอรมนี และสหรัฐอเมริกา เป็นต้น

1.1.1 สถานสภาพของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายในประเทศไทย

ในประเทศไทยได้มีการศึกษาและจัดทำโครงการทดลองหรือระบบต้นแบบ เพื่อการเก็บข้อมูลเป็นแนวทางในการพิจารณาความเหมาะสมในการติดตั้งใช้งานในอนาคต โดยการสนับสนุนของกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานผ่านสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) [4] ดังนี้

1. ระบบแบบรวมศูนย์ (Central Generation System) เป็นระบบที่ต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกันเป็นระบบขนาดใหญ่เป็นโรงจักรไฟฟ้าและเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย เป็นโครงการนำร่องในการผลิตไฟฟ้าในอนาคตและการยกระดับแรงดันสายส่งไฟฟ้า ปัจจุบันการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (กฟผ.) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) เป็นหน่วยงานที่ทำโครงการสองหน่วยงาน

มีสถานีสาธิตของ กฟผ. 4 สถานี คือ

1. สถานีย่อยพลังงานแสงอาทิตย์คลองช่องกล่ำ จังหวัดสระแก้ว [5] เป็นโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่จ่ายไฟฟ้าเข้าระบบจำหน่ายแห่งแรกในประเทศไทย มีขนาดกำลังผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์ 20 kWp ต่อร่วมกับพลังน้ำขนาด 20 kW เริ่มใช้งานระบบในปลายปี พ.ศ. 2529
2. สถานีพลังงานทดแทนแหลมพรหมเทพ จังหวัดภูเก็ต [6] มีขนาดกำลังผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์ 8.5 kWp ต่อร่วมกับกังหันลมขนาด 18.5 kW เริ่มจ่ายไฟฟ้าเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าปี พ.ศ. 2533
3. สถานีพลังงานแสงอาทิตย์สันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ [7] มีขนาดกำลังผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 14 kWp เริ่มจ่ายไฟฟ้าเข้าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าปี พ.ศ. 2536
4. โครงการสาธิตระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ จังหวัดแม่ฮ่องสอน [8] เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดกำลังผลิตไฟฟ้า 500 kWp

สถานีสาธิตของ กฟภ. 4 สถานี ซึ่งเดิมเป็นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ระดับหมู่บ้านแบบอิสระ (PV Stand Alone Village Power System) แต่ต่อมาความต้องการไฟฟ้าสูงขึ้น จึงต่อเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า คือ

1. สถานีบ้านเด่นไม้ซุง จังหวัดตาก [9] มีขนาดกำลังผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 60 kWp เริ่มจ่ายไฟฟ้าเข้าระบบจำหน่ายในปี พ.ศ. 2539
2. สถานีบ้านแม่กะสี จังหวัดนครสวรรค์ [9] มีขนาดกำลังผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 60 kWp เริ่มจ่ายไฟฟ้าเข้าระบบจำหน่ายในปี พ.ศ. 2539
3. สถานีบ้านวังหมี จังหวัดนครราชสีมา [9] มีขนาดกำลังผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 20 kWp

4. สถานีสาธิตเกาะลิบง จังหวัดตรัง[10] มีขนาดกำลังผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 85 kWp เซลล์แสงอาทิตย์ส่วนหนึ่งย้ายมาจากระบบที่เกาะยาว จังหวัดพังงา โครงการได้รับความร่วมมือจากองค์การ NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization) ประเทศญี่ปุ่น เริ่มจ่ายไฟฟ้าเข้าระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าปี พ.ศ. 2545

2. ระบบขนาดเล็กกระจายการติดตั้ง (Distribution Generation System) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคาบ้าน (Roof Top Grid-connected PV System) มีโครงการนำร่องติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ดังนี้

1. โครงการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาบ้านครั้งแรกของประเทศไทย จำนวน 10 หลังคา[11] ดำเนินการโดย กฟผ. มีขนาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์รวม 24 kWp เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวขนาด 2.25 kWp จำนวน 8 หลัง และเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอฟัสขนาด 2.88 kWp จำนวน 2 หลัง เริ่มจ่ายไฟฟ้าเข้าระบบไฟฟ้าในปี พ.ศ. 2541

2. โครงการสาธิตระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาศาลากลางจังหวัดและอาคารของรัฐ [8] เป็นโครงการที่ผู้ร่วมโครงการเป็นหน่วยงานของรัฐในจังหวัดต่างๆ ซึ่งคัดเลือกจากโครงการประกวดการประหยัดพลังงานในปีรณรงค์เพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานของ สนพ. ดำเนินการโดย กฟผ. หน่วยงานที่ได้รับคัดเลือกมี 6 แห่ง ได้แก่ ศาลากลางจังหวัดเชียงใหม่ ศาลากลางจังหวัดยโสธร ศาลากลางจังหวัดนครสวรรค์ อาคารสำนักงานใหม่ สพช. อาคารประหยัดพลังงานเฉลิมพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว โรงเรียนสตรีสมุทรปราการ และวิทยาลัยการอาชีพนวมินทรราชินี จังหวัดแม่ฮ่องสอน เริ่มใช้ระบบในปี พ.ศ. 2543 ในแต่ละระบบมีขนาดกำลังผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 4.2 kWp

3. ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์บนอาคารในโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ได้แก่ ศูนย์ศึกษาการพัฒนาเขาหินซ้อน ศูนย์ศึกษาการพัฒนาอ่าวคุ้งกระเบน ศูนย์ศึกษาการพัฒนาพิกุลทอง ศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยทราย ศูนย์ศึกษาการพัฒนาห้วยฮ่องไคร้ ศูนย์ศึกษาการพัฒนาภูพาน และโครงการพัฒนาดอยตุง [12] แต่ละระบบมีขนาดกำลังผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 2.1 kWp ดำเนินการโดย กฟผ. เริ่มจ่ายไฟฟ้าเข้าระบบจำหน่ายในปลายปี 2543

4. โครงการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาบ้าน ระยะที่ 2 [13] เป็นโครงการร่วมของ สนพ. และ กฟผ. โดยเปิดรับผู้เข้าร่วมโครงการจำนวน 50 ราย ที่อยู่ในจังหวัดเป้าหมายได้แก่ กรุงเทพมหานคร ภาคกลางทุกจังหวัด และจังหวัดหัวเมืองใหญ่ เช่น เชียงราย เชียงใหม่ นครราชสีมา ระยอง ภูเก็ต สงขลา เป็นต้น

3. การติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด AC Module ติดตั้งบนเสาใกล้เสาไฟฟ้าและเชื่อมต่อสายจำหน่ายไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในหมู่บ้านของเกาะลิบง จังหวัดตรัง [10] เพื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าปลายสายในชุมชนหมู่บ้านที่ใช้ไฟฟ้าปริมาณมาก แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาด 100 Wp มีอินเวอร์เตอร์ติดตั้งหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 130 W บนเสาต้นละ 1 แผง รวมจำนวน 10 ต้น กระจายในหมู่บ้าน เริ่มจ่ายไฟฟ้าเข้าระบบจำหน่ายปี พ.ศ. 2545

1.1.2 สถานสภาพของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายในต่างประเทศ

แนวโน้มของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายมีเพิ่มมากขึ้นจากโครงการในประเทศต่างๆ ดังนี้ [14], [4]

- **ประเทศญี่ปุ่น** ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2537 จนถึงปลายปี พ.ศ. 2544 มีการติดตั้งใช้งานระบบรวมทั้งสิ้นประมาณ 303 MWp และมีเป้าหมายที่จะติดตั้งระบบให้ได้ 4,600 MWp ภายในปี พ.ศ. 2553

- **ประเทศสหรัฐอเมริกา** ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2535 จนถึงปลายปี พ.ศ. 2544 มีการติดตั้งใช้งานระบบรวมทั้งสิ้นประมาณ 31.9 MWp และมีโครงการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาบ้านให้ได้ 1 ล้านหลัง ภายในปี พ.ศ. 2553 ในแต่ละระบบจะมีขนาดกำลังผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประมาณ 4 kWp กำลังผลิตไฟฟ้ารวมประมาณ 4,000 MWp

- **ประเทศเยอรมนี** ในปี 2532 มีโครงการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาบ้าน 1,000 หลัง ประชาชนให้ความสนใจเข้าร่วมโครงการมากจึงขยายโครงการติดตั้งระบบเพิ่มเป็น 2,250 หลัง แล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2537 โดยระบบมีขนาดกำลังผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประมาณ 2.6 kWp รวมกำลังผลิตไฟฟ้าทั้งหมดประมาณ 6 MWp ในปี พ.ศ. 2542 มีโครงการใหม่ที่จะติดตั้งระบบให้ได้ 100,000 ระบบ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2542 ถึงปี พ.ศ. 2544 ได้ดำเนินการติดตั้งไปแล้ว 40,000 ระบบ ขนาดกำลังผลิตไฟฟ้ารวมทั้งสิ้นประมาณ 121.7 MWp ในปี พ.ศ. 2546 ติดตั้งเพิ่มขึ้นได้อีก 95 MWp

- **ประเทศเนเธอร์แลนด์** ในปี พ.ศ. 2537 มีเป้าหมายที่จะติดตั้งระบบให้ได้ 7.7 MWp ภายในปี พ.ศ. 2543 และ 500 MWp ภายในปี พ.ศ. 2553 แต่เมื่อเริ่มโครงการไปแล้วสามารถทำได้เกินเป้าหมายที่ตั้งไว้คือ ในปี พ.ศ. 2542 สามารถติดตั้งระบบได้ 9.2 MWp และภายในปี พ.ศ. 2543 ติดตั้งระบบได้ 12.5 MWp รัฐบาลจึงประกาศเป้าหมายว่า ภายในปี พ.ศ. 2553 จะติดตั้งระบบให้ได้ 300 MWp และภายในปี พ.ศ. 2563 จะติดตั้งระบบให้ได้ 1,400 MWp

- **ประเทศสวิตเซอร์แลนด์** มีการจัดตั้งโครงการ Energie 2000 ซึ่งเมื่อสิ้นสุดปี พ.ศ. 2542 มีระบบที่ติดตั้งไปแล้วประมาณ 14 MWp ในปี พ.ศ. 2543 ได้มีโครงการ EnergieSchweiz โดยมีแผนติดตั้งระบบให้ได้ 50 MWp การติดตั้งระบบที่ผ่านมามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในปี พ.ศ. 2542 มีการติดตั้งระบบประมาณ 3.4 MWp และประมาณ 5 MWp ในปี พ.ศ. 2543

- **ประเทศอิตาลี** ในปี 2544 มีการจัดตั้งโปรแกรม "Tetti Fotovoltaici" ซึ่งมีแผนติดตั้งระบบให้ได้ 7 MWp

- **ประเทศสเปน** ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2534 ถึงปี พ.ศ. 2543 มีระบบติดตั้งแล้วรวมประมาณ 5 MWp และมีโครงการใหม่ที่จะติดตั้งระบบในปี พ.ศ. 2543 ถึงปี พ.ศ. 2553 ให้ได้ 135 MWp

- **ประเทศฟินแลนด์** มีเป้าหมายจะติดตั้งระบบให้ได้ 40 MWp ภายในปี พ.ศ. 2553

- **ประเทศออสเตรีย** ในปี พ.ศ. 2534 มีโครงการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาบ้าน 200 kWp ซึ่งดำเนินการในช่วงปี พ.ศ. 2535 ถึงปี พ.ศ. 2537 โดยติดตั้งระบบทั้งสิ้น 100 ระบบ ขนาดระบบเฉลี่ยประมาณ 2.28 kWp

- **ประเทศศรีลังกา** [15] ในเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2544 มีการเปิดใช้อาคาร The Media Centre (อาคารอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม) เป็นอาคารแรกและครั้งแรกของประเทศที่มีระบบสายส่งกระแสไฟฟ้าที่มาจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนอาคาร ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาด 75 kWp

1.2 คุณภาพกำลังไฟฟ้าของประเทศไทย

อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ทั้งที่ใช้ในอุตสาหกรรมและชีวิตประจำวันมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นตามความต้องการใช้งานและสภาพเศรษฐกิจ สิ่งนี้ไม่เพียงแต่เป็นสาเหตุให้ความต้องการใช้ไฟฟ้าในประเทศเพิ่มขึ้นเท่านั้น ยังทำให้มีความซับซ้อนในการจัดการ การวางแผน และการควบคุมระบบไฟฟ้าส่งผลให้การไฟฟ้าต้องเตรียมความพร้อมเพื่อรับต่อปัญหาต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นภายหลัง โดยเฉพาะปัญหาเรื่องคุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power Quality)

แนวทางที่หลายๆ ประเทศใช้ป้องกันหรือแก้ปัญหาที่จะเกิดขึ้นคือ การกำหนดและบังคับใช้มาตรฐานทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า มาตรฐานหรือข้อกำหนดทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าในแต่ละประเทศมีรายละเอียดแตกต่างกันไปตามโครงสร้างระบบไฟฟ้าในแต่ละประเทศ แต่หลักการจะเป็นไปในแนวทางเดียวกัน คือ ครอบคลุมปรากฏการณ์การรบกวนต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าเช่น แรงดันตก แรงดันสเวลล์ ไฟฟ้าดับ เสิร์จ และฮาร์มอนิกส์ เป็นต้น มาตรฐานหรือข้อกำหนดที่เป็นที่ยอมรับและรู้จักทั่วไปในระดับนานาชาติได้แก่ มาตรฐาน IEEE ของประเทศสหรัฐอเมริกา และมาตรฐาน IEC ของประเทศกลุ่มยุโรป เป็นต้น

ประเทศไทยได้จัดตั้งคณะทำงานศึกษาและกำหนดค่าที่เหมาะสมของคุณภาพกำลังไฟฟ้าประกอบด้วยผู้แทนจากการไฟฟ้าทั้งสามแห่ง คือ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย(กฟผ.) การไฟฟ้านครหลวง(กฟน.) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(กฟภ.) ร่วมกันศึกษาและร่างข้อกำหนดทางด้านแรงดันกระเพื่อมและฮาร์มอนิกส์ขึ้นมาใช้ในประเทศไทย โดยอ้างอิงจากมาตรฐานสากล [16], [17] เช่น มาตรฐาน IEC มาตรฐานของสหราชอาณาจักร และมาตรฐานของออสเตรเลีย (AS) ทั้งนี้ คำนึงถึงความเหมาะสมในการนำมาใช้ในประเทศไทย

จากผลการดำเนินการที่ผ่านมาคณะทำงานและคณะผู้เกี่ยวข้องได้จัดทำข้อกำหนดขึ้นมา 4 ฉบับ คือ

1. ข้อกำหนดกฎเกณฑ์แรงดันกระเพื่อมเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม
2. ข้อกำหนดกฎเกณฑ์แรงดันกระเพื่อมที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้าน
3. ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกส์เกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม
4. ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้าน

1.3 ที่มาของปัญหาและความสำคัญของงานวิจัย

จากแนวโน้มปริมาณและขนาดของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายของประเทศไทยที่เพิ่มมากขึ้น ด้วยเหตุผลที่ไม่ต้องเสียค่าต้นทุนของเชื้อเพลิงในการผลิตเป็นพลังงานที่มีจำนวนไม่จำกัดและไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ แต่สามารถช่วยในการทดแทนการผลิตไฟฟ้าในช่วงกำลังไฟฟ้าสูงสุด(Peak load)ได้ ทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย จึงเป็นตัวเลือกหนึ่งที่มีความสำคัญ แต่อย่างไรก็ตาม หากว่าปริมาณการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์บนระบบจำหน่ายเพิ่มปริมาณมากขึ้น อาจจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power Quality) ทำให้ไม่สอดคล้องกับเกณฑ์มาตรฐานและความปลอดภัยของการไฟฟ้า

ในประเทศที่เป็นผู้นำทางด้านเทคโนโลยีนี้ได้มีการศึกษาและตั้งมาตรฐานแนะนำเรื่องการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์กับระบบจำหน่าย เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกาได้จัดทำมาตรฐาน IEEE Std. 929-2000 [18] กล่าวถึงพารามิเตอร์ของคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ได้แก่ ระดับแรงดันไฟฟ้า ไฟกระพริบ ความถี่ เพาเวอร์แฟคเตอร์ ฮาร์มอนิกส์ และปรากฏการณ์ Islanding Effect หรือระบบอยู่ในสภาวะทำงานเองโดยอิสระ หรือประเทศญี่ปุ่นมีมาตรฐาน JEAG 9701-1993 [20] กล่าวถึงพารามิเตอร์ของคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อระบบ ได้แก่ แรงดันกระเพื่อม เพาเวอร์แฟคเตอร์ กระแสฮาร์มอนิกส์ สัญญาณรบกวนความถี่สูงและปรากฏการณ์ Islanding Effect

ดังนั้น เพื่อให้เกิดความมั่นใจในประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย งานวิจัยนี้ทำการจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) เพื่อทำการศึกษาผลกระทบต่อระบบจำหน่ายด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าโดยพิจารณาในด้านแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า เพาเวอร์แฟคเตอร์ กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และการรบกวนด้านฮาร์มอนิกส์ ในกรณีที่มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมาก (High PV Penetration) เพื่อ

1. เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงอุปกรณ์ประกอบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ นำไปสู่การหาทางป้องกันและแก้ไขปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายให้อยู่ในข้อกำหนดกฎเกณฑ์มาตรฐานที่เป็นที่รู้จักและยอมรับได้แก่ IEEE Std. 929-2000, IEEE Std. 519-1992, IEEE Std. 1159-1995 และข้อกำหนดของการไฟฟ้าทั้งสามแห่งในประเทศไทย

2. เป็นแนวทางในการออกแบบและเลือกตำแหน่งในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายให้เหมาะสม สามารถรองรับปริมาณและขนาดของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคตต่อไป

3. เป็นแนวทางในการเตรียมความพร้อมของระบบจำหน่ายสำหรับผู้ดูแลระบบ

1.4 วัตถุประสงค์

ศึกษาผลกระทบด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าบนระบบจำหน่ายของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ โดยพิจารณาจาก

1. แรงดันไฟฟ้า
2. กำลังไฟฟ้า
3. เพาเวอร์แฟคเตอร์
4. กำลังไฟฟ้าสูญเสีย
5. การรบกวนด้านฮาร์มอนิกส์

1.5 ผลงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง

P.F. DeBuck และ R.W. Neal [21] ได้ประเมินผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่กระจายการติดตั้งในระบบไฟฟ้า โดยจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow) ของระบบ สรุปผลได้ดังนี้

1. กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่กระจายในระบบไฟฟ้า อาจจะทำให้การไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งและหม้อแปลงมากเกินไป จนทำให้สายส่งหรือหม้อแปลงในวงจรเกิดภาวะรับโหลดเกิน(Overload) ได้ ถ้าขณะนั้นมีการใช้โหลดในระบบไฟฟ้าน้อย
2. พลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์อาจจะมีผลต่อเครื่องคุมค่าแรงดันไฟฟ้า(Voltage Regulator) และตัวแปลงจุดแยกขณะมีโหลด (Load Tap Chager; LTC) ได้ ถ้าขณะนั้นมีการใช้โหลดในระบบไฟฟ้าน้อย
3. ความต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนของอินเวอร์เตอร์ทำให้กำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ระดับแรงดันไฟฟ้าในสายไฟฟ้าลดลง
4. ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาบ้านอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดความไม่สมดุลในระบบไฟฟ้า 3 เฟส
5. การจ่ายไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์อาจจะรบกวนการเคลียร์ฟอลต์ในระบบไฟฟ้า

R.C. Dugan, W.T. Jewell และ D.J. Roesler [22] วิเคราะห์ฮาร์มอนิกส์และกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อระบบจำหน่าย โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 3 เฟส หม้อแปลงขนาด 10 MVA ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดกำลังผลิตไฟฟ้า 6.6 kWp จำนวน 100 ระบบ พบว่า ในการศึกษาเรื่อง ฮาร์มอนิกส์ที่สภาวะปกติ ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน (Total Harmonic Distortion of Voltage; THDv) มีค่าประมาณ 2-3% แต่ภายใต้สภาวะที่เลวร้ายที่สุดคือ ในกรณีที่ต่อคาปาซิเตอร์ขนานเพิ่มเข้ากับสายป้อน THDv ในสายป้อนนั้นจะมากถึง 6.2% ส่วนสายป้อนอื่นๆ THDv จะเท่ากับ 4.8% สำหรับการศึกษาเรื่องกำลังไฟฟ้าเสมือนอินเวอร์เตอร์ของระบบฯ นี้ จะจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือนเข้าระบบจำหน่าย 4 kVAR ทำให้เพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบจำหน่ายต่ำลง สามารถปรับปรุงได้ด้วยการต่อคาปาซิเตอร์ขนานเพิ่มในสายป้อนของระบบจำหน่าย แต่การทำเช่นนี้จะทำให้ระบบจำหน่ายมีฮาร์มอนิกส์เพิ่มมากขึ้น

Jack Fitzer และ W.E. Dillon [23] ศึกษาระดับแรงดันไฟฟ้าในสายป้อนที่มีระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์กระจายการติดตั้งอยู่ โดยใช้คอมพิวเตอร์จำลองสายป้อนระยะสั้นของเขตชานเมืองและสายป้อนระยะยาวในชนบทของระบบไฟฟ้า Texas Electric Services Company (TESCO) และใช้ข้อมูลโหลดจากการวัดจริงในสายป้อนและข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ติดตั้งที่ University of Texas at Arlington (UTA) พบว่า

- ถ้าสายป้อนมีจำนวนบ้านที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาดกำลังผลิตไฟฟ้า 5.5 kWp อยู่ไม่เกิน 30% ของจำนวนบ้านทั้งหมด ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของอินเวอร์เตอร์มีค่าในช่วง 0.707-1.00 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์นี้จะไม่ส่งผลต่อการคุมค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage Regulation) ในสายป้อน
- ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของอินเวอร์เตอร์เท่ากับ 1 จะทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายป้อนและกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบไฟฟ้าย่อยต่ำกว่าที่ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์อื่นๆ แต่จะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าในสายป้อนสูงขึ้นเกินระดับมาตรฐานการไฟฟ้าได้
- ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของอินเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมคือ 0.85 ซึ่งค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์นี้จะทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายป้อนต่ำและแรงดันไฟฟ้ามีค่าอยู่ในระดับมาตรฐานของการไฟฟ้า

P.N. Korovesis, G.A. Vokas และ I.F. Gonos [24] ศึกษาการเกิดฮาร์มอนิกส์ของระบบจากโหลดที่เป็นอุปกรณ์ประหยัดพลังงานในระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่ออยู่กับระบบจำหน่าย โดยในการจำลองการทำงานได้ใช้โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น คือ หลอดไฟฟ้าแบบ CFL (Compact Fluorescent Lamps) โดยที่ได้จำลองการทำงานออกเป็น 3 แบบ ดังนี้

1. โหลดในระบบมีขนาดเท่ากับ 30% ของพิกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์
2. โหลดในระบบมีขนาดเท่ากับ 60% ของพิกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์
3. โหลดในระบบมีขนาดเท่ากับ 90% ของพิกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์

ซึ่งพบว่าในการจำลองการทำงานแบบที่ 1 ค่า %THDv มีค่าไม่เกินขีดจำกัดคือ 8% โดยได้ค่า 6.9% แต่ในการจำลองการทำงานแบบที่ 2 และ 3 ได้ค่า %THDv เกินค่าขีดจำกัด อาจกล่าวได้ว่าโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะส่งผลกระทบต่อค่าคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ถึงแม้ว่าโหลดเหล่านี้จะช่วยลดการใช้กำลังไฟฟ้า แต่ก็อาจจะส่งผลทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า และยังช่วยในการออกแบบระบบให้มีขนาดของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น เช่น หลอดไฟฟ้าแบบ CFL เกิน 30% ของพิกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ข้อมูลและความเข้าใจเรื่องคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย
2. ข้อมูลในการพิจารณาการขยายปริมาณการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายที่เหมาะสมต่อไป
3. แนวทางในการวิเคราะห์ผลกระทบเนื่องจากการเพิ่มปริมาณและความหนาแน่นของการติดตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายในอนาคต
4. แนวทางการเตรียมความพร้อมของระบบจำหน่ายสำหรับผู้ดูแลระบบ

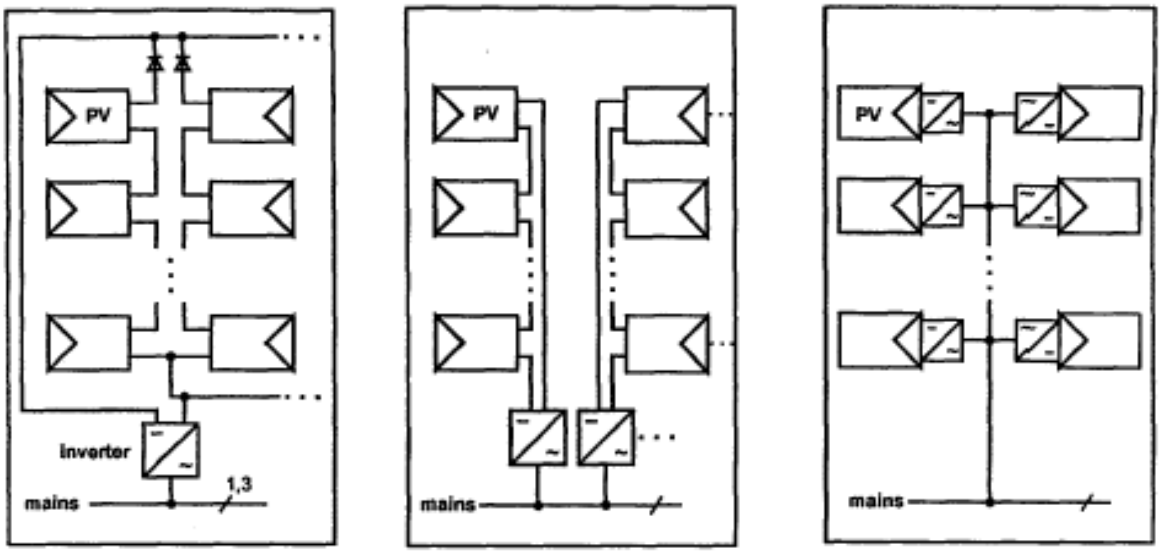
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายที่ใช้งานกันอยู่ ทั่วไปมี 3 แบบ คือ

1. ระบบแบบรวมศูนย์ (Central Generation System)
2. ระบบขนาดเล็กกระจายการติดตั้ง (Distribution Generation System)
3. เซลล์แสงอาทิตย์ AC Module (PV Module Integrate)

แสดงดังรูปที่ 2.1 และมีคุณสมบัติของระบบในแต่ละแบบดังตารางที่ 2.1 [4], [25], [26]



ระบบแบบรวมศูนย์ **ระบบขนาดเล็กกระจายการติดตั้ง** **เซลล์แสงอาทิตย์ AC Module**

รูปที่ 2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

ตารางที่ 2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

	ระบบแบบรวมศูนย์	ระบบขนาดเล็ก กระจายการติดตั้ง	เซลล์แสงอาทิตย์ AC Module
ขนาดเซลล์แสงอาทิตย์ต่อหนึ่งอินเวอร์เตอร์	แผงเซลล์อาทิตย์ต่อร่วมกันเป็นอาร์เรย์ขนาดใหญ่ตั้งแต่ประมาณ 10 kWp ขึ้นไป	แผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อร่วมกันมีขนาดประมาณ 2-4 kWp	หนึ่งแผลเซลล์อาทิตย์ต่ออินเวอร์เตอร์โดยทั่วไปมีกำลังผลิตประมาณ 50-400 Wp
ระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง(Vdc)	65-550 V	170-550 V	34-70 V
กำลังสูญเสียทางด้าน DC	ประมาณ 1-5% ขึ้นกับ Vdc และระยะทางการเดินสายไฟ	ประมาณ 1 % เกิดจากการเชื่อมต่อสายและค่า Vdc ที่สูง	มีค่าน้อยมาก ไม่สามารถพิจารณาได้
อินเวอร์เตอร์	อินเวอร์เตอร์แบบรวมศูนย์ (Central Inverter) มีการออกแบบให้สามารถแปลงกำลังไฟฟ้าได้สูงหลาย MW	String Inverter ขนาดโดยทั่วไปในการแปลงกำลังไฟฟ้าประมาณ 2-4 kW	Module Integrate Inverter เป็นอินเวอร์เตอร์ขนาดเล็กติดตั้งใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ การออกแบบขึ้นกับขนาดแผง
กำลังสูญเสียในอินเวอร์เตอร์	มากกว่า 6%	มากกว่า 4%	มากกว่า 8%
การวัดและเก็บข้อมูล	มีระบบเก็บข้อมูลทำให้สะดวกและง่ายในการนำข้อมูลมาวิเคราะห์	ถ้าจะทำกับระบบทั้งหมดที่ต่อในระบบไฟฟ้าจะทำได้ยากและไม่สะดวกเนื่องจากระบบกระจายการติดตั้ง	ถ้าจะทำกับระบบทั้งหมดที่ต่อในระบบไฟฟ้าจะทำได้ยากและไม่สะดวกเนื่องจากการกระจายการติดตั้ง
การดูแลรักษาและซ่อมบำรุง	มีแผนผังการวางระบบและชุดควบคุมการทำงานของระบบ	บางพื้นที่ยากที่จะเข้าถึงทำให้การดูแลไม่ทั่วถึงหรือยากที่จะซ่อมแซม	บางพื้นที่ยากที่จะเข้าถึงทำให้การดูแลไม่ทั่วถึงหรือยากที่จะซ่อมแซม

2.2 มาตรฐานคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์กับระบบจำหน่าย

ในปัจจุบันประเทศผู้นำทางด้านการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์กับระบบจำหน่าย ได้มีการศึกษาเพื่อจัดทำข้อกำหนดและมาตรฐานในการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์กับระบบจำหน่าย เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน (Personnel Safety) และเป็นการกำหนดเกี่ยวกับคุณภาพทางไฟฟ้า (Power Quality) ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำการเชื่อมต่อ นอกจากนี้แล้ว มาตรฐานยังรวมถึงการออกแบบระบบป้องกัน (System Protection) จากการต่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมกับระบบจำหน่ายโดยไม่รบกวนการทำงานของระบบจำหน่ายเดิม ซึ่งมาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับในต่างประเทศที่สำคัญ ๆ ประกอบด้วย [3], [4]

- International Electrotechnical Commission (IEC)
- The American Society for Testing and Materials (ASTM)
- Japan Institute of Standards (JIS)
- Australian Standards (AS)
- The Institute of Electrical and Electronics Engineering Inc. (IEEE)
- Canadian Standards Association (CSA)
- American National Standards Institute (ANSI)
- Underwriters Laboratories Inc. (UL)
- National Electrical Code (NEC)

ยกตัวอย่างเช่น

IEEE Std. 929-2000; IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic Systems[18] เป็นมาตรฐานที่กำหนดขึ้นโดยสถาบัน IEEE ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ให้ข้อกำหนดเกี่ยวกับคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อระบบ (Point of Common Coupling: PCC) ดังนี้

- ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ PCC ควรอยู่ในช่วง 88-110% ของแรงดันระบบจำหน่าย
- แรงดันไฟกระพริบ (Voltage Flicker) เป็นผลของการรบกวนทางไฟฟ้าที่มีสาเหตุจากการกระเพื่อมของระดับแรงดันของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยรายละเอียดของเวลาที่ควรตัดแรงดันไฟฟ้าออกจากระบบขึ้นกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ PCC แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การตอบสนองแรงดันผิดปกติ (Response to Abnormal Voltages)

แรงดัน (ที่ PCC)	เวลามากที่สุดในการตัดออกจากระบบ
V <50%	6 cycles
50%≤V<88%	120 cycles
88%≤V≤110%	การทำงานปกติ
110%<V<137%	120 cycles
V≥137%	2 cycles

- ความถี่ไฟฟ้า ต้องรักษาระดับความถี่ไฟฟ้าให้อยู่ในระดับ 50±0.42 Hz หากไม่สามารถรักษาระดับความถี่นี้ได้ จะต้องมีอุปกรณ์ตัดตอนอัตโนมัติ ตัดการจ่ายไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าภายใน 6 cycles
- ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ควรทำงานที่ pf มากกว่า 0.85 (Lagging or Leading) เมื่อเอาท์พุทมากกว่า 10% ของอัตราการผลิตไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์
- รูปคลื่นผิดเพี้ยน ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาเชื่อมต่อต้องไม่ทำให้รูปคลื่นแรงดันและกระแสมีความเพี้ยนมากเกินกว่ามาตรฐานที่กำหนดใน IEEE Std. 519-1992: IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems[19] เพื่อป้องกันผลกระทบที่จะมีต่ออุปกรณ์อื่นๆ ที่ต่ออยู่กับระบบจำหน่าย โดยความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส (Total Harmonic Distortion of Current) ต้องมีขนาดน้อยกว่า 5% ของกระแสความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency Current) ที่พิกัดของอินเวอร์เตอร์เอาท์พุท ส่วนกระแสฮาร์มอนิกส์อื่นๆ ต้องมีขนาดไม่เกินจากตาราง โดยในตารางจะแสดงเฉพาะค่าฮาร์มอนิกส์คี่เท่านั้น ส่วนฮาร์มอนิกส์คู่จะต้องมีขนาดน้อยกว่า 25% ของฮาร์มอนิกส์คี่ที่แสดงใน ตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงขีดจำกัดความเพี้ยนของกระแสสำหรับคอนเวอร์เตอร์ที่นำมาเชื่อมต่อ

ฮาร์มอนิกส์ลำดับคี่	ขีดจำกัดความเพี้ยน
3^{rd}-9^{th}	<4.0%
11^{th}-15^{th}	<2.0%
17^{th}-21^{st}	<1.5%
23^{rd}-33^{rd}	<0.6%
มากกว่า 33^{rd}	<0.3%

JEAG 9701-1993; The Guideline for Grid Connected Dispersed Power Generators [20] ซึ่งเป็นมาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น ได้ให้ข้อกำหนดคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อระบบ ดังนี้

- ระดับแรงดันไฟฟ้าต้องอยู่ภายในช่วงมาตรฐานของแหล่งจ่ายแรงดัน ดังนี้ ระบบ 100 V แรงดันต้องอยู่ในช่วง 95 V ถึง 107 V ส่วนระบบ 200 V แรงดันต้องอยู่ในช่วง 182 V ถึง 222 V
- ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ มากกว่า 0.85(Lagging or Leading) ที่จุด PCC
- ฮาร์มอนิกส์กระแส น้อยกว่า 5% ของค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส(THDc) และไม่เกิน 3% ของฮาร์มอนิกส์แต่ละอันดับ
- สัญญาณรบกวนความถี่สูง ที่เกิดจากการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ต้องน้อยกว่า 36.5 dB ที่จุดห่างจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 10 เมตร

ในส่วนของประเทศไทยก็ได้มีจัดตั้งคณะทำงานศึกษาและกำหนดค่าที่เหมาะสมของคุณภาพกำลังไฟฟ้าประกอบด้วยผู้แทนจากการไฟฟ้าทั้งสามแห่ง คือ การไฟฟ้าฝ่ายผลิต การไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค รวมกันศึกษาและร่างข้อกำหนดทางด้านแรงดันกระเพื่อมและฮาร์มอนิกส์โดยอ้างอิงจากมาตรฐานสากลขึ้นมาใช้ภายในประเทศ [16], [17]

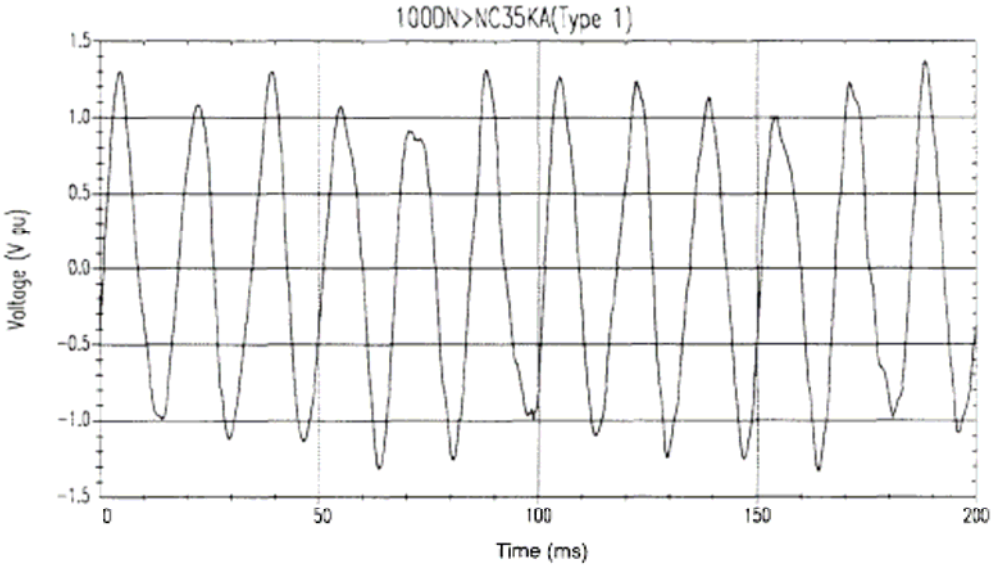
2.3 แรงดันกระเพื่อม (Voltage Fluctuations)

การกระเพื่อมของแรงดันเป็นปรากฏการณ์ที่ระดับแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอย่างรวดเร็วโดยเกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการใช้กระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เช่น เตาหลอมโลหะ เครื่องเชื่อมโลหะ ลิฟท์ มอเตอร์ปั๊มต่างๆ และอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในขบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ กระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงนี้เมื่อผ่านความต้านทานของระบบไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงดันกระเพื่อมที่จุด PCC [27] ซึ่งจะส่งผลกระทบกับอุปกรณ์ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นๆ ที่อยู่ใกล้เคียงได้ เช่น คอมพิวเตอร์ เครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ โทรทัศน์ หลอดฟลูออเรสเซนต์ หลอดไส้ทังสเตน เป็นต้น ผลกระทบที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันและความถี่ในการเปลี่ยนแปลง ดังนี้ [28]

- เกิดไฟกระพริบ คือ แสงสว่างจากหลอดไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงจนสังเกตเห็นได้
- อาจเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ที่มีความไวต่อการรบกวนทางไฟฟ้าเช่น คอมพิวเตอร์ เป็นต้น
- อายุการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าต่ำลง

ปัญหาของแรงดันกระเพื่อมสามารถสังเกตได้จากการเกิดไฟกระพริบ ซึ่งไฟกระพริบจะมีผลต่ออุปกรณ์ที่มีความไวต่อการรบกวนทางไฟฟ้า ดังนั้น การไฟฟ้าจึงกำหนดมาตรฐานสำหรับไฟกระพริบขึ้นเรียกว่า ขีดจำกัดไฟกระพริบ (Flicker Limit) ค่าที่นิยมใช้กันคือ 3%

ตัวอย่างรูปคลื่นของแรงดันที่มีการกระเพื่อมขึ้นลงแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 รูปคลื่นแรงดันที่มีการกระเพื่อมขึ้นลงของเตาหลอมโลหะชนิดเตาอาร์กไฟฟ้า[27]

2.4 เพาเวอร์แฟคเตอร์

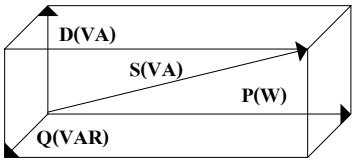
โดยทั่วไปเพาเวอร์แฟคเตอร์หรือตัวประกอบกำลัง หาได้จากความต่างเฟสระหว่างรูปคลื่นกระแสและแรงดัน (Displacement Angle: θ) ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์นี้จะเท่ากับ cosθ ซึ่งเรียกว่า Displacement Power Factor (DPF) แต่ในกรณีที่รูปคลื่นไม่เป็นรูปคลื่นไซน์และมีองค์ประกอบคลื่นฮาร์มอนิกส์อยู่มาก จะไม่สามารถใช้ความต่างเฟสในการหาเพาเวอร์แฟคเตอร์ได้ ถ้าใช้เพาเวอร์แฟคเตอร์มิเตอร์วัดก็จะอ่านค่าได้ประมาณ 1 เสมอ ดังนั้น ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ในกรณีทั่วไปจะหาได้จากอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าจริง (Real or Active Power: P) ต่อกำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power: S) ดังสมการ [29]

$$PF = \frac{P}{S} \tag{2.1}$$

ในกรณีที่มีฮาร์มอนิกส์ปรากฏในวงจรหรือระบบ จะมีกำลังไฟฟ้าอีกประเภทหนึ่งเพิ่มขึ้นมาจากเดิม เรียกว่า กำลังไฟฟ้าความเพี้ยน (Distortion Power: D) ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากฮาร์มอนิกส์ มีหน่วยเป็น VA (Volt-Ampere) เป็นกำลังไฟฟ้าที่ไม่เป็นประโยชน์ต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า แต่ไม่ใช่ส่วนของค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power: Q)

ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าทั้ง 4 ชนิด สามารถแสดงเป็นเฟสเซอร์ไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.3 และสมการ [30]

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \tag{2.2}$$



รูปที่ 2.3 เฟสเซอร์ไดอะแกรมความสัมพันธ์ระหว่าง S, P, Q และ D [30]

ระบบไฟฟ้า (เครื่องกำเนิดไฟฟ้า สายส่ง สายป้อน และหม้อแปลง) จะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน ถ้าอุปกรณ์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูง คือ เพาเวอร์แฟคเตอร์สูง การไฟฟ้าก็จะสามารถส่งกำลังไฟฟ้าจริงได้มาก แต่ถ้าอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้งานเพาเวอร์แฟคเตอร์ต่ำ ซึ่งหมายถึง มีความต้องการกำลังไฟฟ้าเสมือนมากๆ จะเป็นภาระแก่ระบบไฟฟ้าที่ต้องส่งกำลังไฟฟ้าเสมือนมากขึ้น โดยไม่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าจริงได้อย่างเต็มที่ เกิดการสูญเสียประสิทธิภาพในการผลิตและจ่ายไฟ ซึ่งส่งผลกระทบ ดังนี้ [31]

- เกิดภาระเกินในหม้อแปลงและระบบไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสายไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายโหลดได้ตามพิกัด เนื่องจากต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน ทำให้การจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงลดลง
- เกิดแรงดันตกในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เมื่อเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบต่ำลง กระแสไฟฟ้าของระบบสูงขึ้น ส่งผลแรงดันตกคร่อมในสายไฟของระบบไฟฟ้ามากขึ้น จากสมการ

$$V = I*(R\cos\theta + X\sin\theta) \tag{2.3}$$

โดยที่ I คือ กระแสที่ไหลในสายไฟ (A)

R คือ ความต้านทาน (Ω)

X คือ รีแอกแตนซ์ (Ω)

θ คือ มุมของเพาเวอร์แฟคเตอร์

- กำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น กำลังสูญเสียในตัวนำไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าแปรตามกำลังสองของกระแสไฟฟ้า
- กำลังไฟฟ้าสูญเสียในหม้อแปลงขณะจ่ายโหลดเพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลผ่านขดลวดของหม้อแปลงแปรตามกระแสกำลังสอง เมื่อเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบต่ำลง กระแสที่ไหลผ่านหม้อแปลงเพิ่มขึ้น ทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากโหลดเพิ่มขึ้น

2.5 ฮาร์มอนิกส์

ฮาร์มอนิกส์ คือ ส่วนประกอบของสัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเต็มทวีคูณของความถี่หลักมูล เมื่อแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล มีแรงดันหรือกระแสฮาร์มอนิกส์ผสมเข้าไป ทำให้แรงดันหรือกระแสไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูลเกิดความเพี้ยนขึ้น สามารถใช้ Fourier Theorem ในการวิเคราะห์แยกรูปคลื่นที่มีคาบไม่ว่าเป็นคลื่นใดๆ ออกได้ตั้งแต่ 2 คลื่นไซนูซอยดาลขึ้นไป ดังสมการ[19]

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \tag{2.4}$$

โดยที่ a_0 คือ ขนาดของสัญญาณที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ลำดับศูนย์

a_n และ b_n คือ อัมปลิจูดหรือขนาดของสัญญาณที่ความถี่ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ n ซึ่งจะเป็นสัมประสิทธิ์ของเทอมโคไซน์และไซน์ตามลำดับ

ω คือ ความถี่หลักมูล

n = จำนวนเต็มบวก

โดยอัมปลิจูดของสัญญาณหรือสัมประสิทธิ์ของความถี่ฮาร์มอนิกส์ที่ลำดับต่างๆ สามารถหาได้จากสมการ

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) d(\omega t) \tag{2.5}$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos n\omega t \; d(\omega t) \tag{2.6}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin n\omega t \; d(\omega t) \tag{2.7}$$

นอกจากนี้ยังมีฮาร์มอนิกส์อีกประเภทหนึ่งเรียกว่า อินเตอร์ฮาร์มอนิกส์(Interharmonic) มีความถี่ที่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูลไม่เป็นเลขจำนวนเต็ม เช่น ฮาร์มอนิกส์ที่มีความถี่ 75 Hz เมื่อคำนวณเป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูลที่ 50 Hz มีค่าเป็น 1.5 เท่า

ตามมาตรฐาน IEEE 519-1992 [19] จะมีการประเมินค่าความเพี้ยนของฮาร์มอนิกส์จากขีดจำกัดกระแสเพี้ยน (Current Distortion Limits) ซึ่งเป็นการใช้ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ผู้ใช้สามารถส่งกลับเข้าไปในระบบไฟฟ้าได้ โดยดัชนีที่ใช้กำหนดขีดจำกัดกระแสเพี้ยน คือ Total Harmonic Distortion of Current (THDc) หมายถึง ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแสมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของความต้องการกระแสโหลดสูงสุด แสดงในตารางที่ 2.4

สามารถหาได้จากสมการ

$$THD_C = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} x100\% \qquad (2.8)$$

โดยที่ I_1 คือ ขนาดกระแสที่ความถี่หลักมูล

I_n คือ ขนาดกระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ n

n = จำนวนเต็มบวก

ตารางที่ 2.4 ขีดจำกัดกระแสฮาร์มอนิกส์สำหรับระบบจำหน่าย (แรงดัน 120 V- 69kV)

I_{sc}/I_{Load}	กระแสฮาร์มอนิกส์สูงสุดเป็นเปอร์เซ็นต์ของ I_{Load} ในแต่ละลำดับคี่					
	<11	11-15	17-21	23-33	>34	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

โดยที่ I_{sc} คือ กระแสลัดวงจรที่ PCC

I_{Load} คือ ความต้องการกระแสโหลดสูงสุด (ส่วนประกอบที่ความถี่หลักมูล) ที่ PCC

และสามารถประเมินค่าความเพี้ยนได้จาก ขีดจำกัดแรงดันเพี้ยน (Voltage Distortion Limits) เป็นการตรวจกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ผู้ใช้ไฟฟ้าแต่ละรายส่งกลับเข้าระบบไฟฟ้าเพื่อให้แน่ใจว่ากระแสไฟฟ้าเหล่านี้ไม่เป็นต้นเหตุที่ทำให้แรงดันมีความเพี้ยนสูงเกินขีดจำกัดตามที่ระบุไว้ในตารางที่ 2.5 ดัชนีที่ใช้กำหนดขีดจำกัดแรงดันเพี้ยน คือ ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน (Total Harmonic Distortion of Voltage: THDv) มีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของแรงดันที่ระบุความถี่หลักมูล

สามารถหาได้จากสมการ

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} x100\% \qquad (2.9)$$

โดยที่ V_1 คือ ขนาดแรงดันที่ความถี่หลักมูล

V_n คือ ขนาดแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ n

n = จำนวนเต็มบวก

ตารางที่ 2.5 ขีดจำกัดของแรงดันฮาร์มอนิกส์

ระดับแรงดัน(V_n)	ขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกส์แต่ละลำดับ (%)	ขีดจำกัดแรงดันฮาร์มอนิกส์รวม (%THDv)
$V_n \leq 69$ kV	3.0	5.0
69 kV$< V_n \leq$161 kV	1.5	2.5
$V_n >$161 kV	1.0	1.5

โดยที่ V_n คือ ระดับแรงดันไฟฟ้า Nominal (V_{rms})

ฮาร์มอนิกส์ในระบบไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปมาจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Current-Voltage Relationship) เรียกว่า โหลดหรืออุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Load) แบ่งได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้ [28]

- อุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นอุปกรณ์ที่วงจรประกอบด้วยชิ้นส่วนประเภทเซมิคอนดัคเตอร์ เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ ไทริสเตอร์ เป็นต้น อุปกรณ์ประเภทนี้ได้แก่ ตัวเรียงกระแส ระบบขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ (Adjustable Speed Drive: ASD) แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำรองและอินเวอร์เตอร์ เป็นต้น

- อุปกรณ์ประเภทแม่เหล็ก ได้แก่ หม้อแปลง เมื่อหม้อแปลงได้รับแรงดันมากเกินพิกัดจะทำให้กระแสกระตุ้น(Exciting Current) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็ก ถ้าช่วงเวลาดังกล่าวกระแสไฟฟ้าของโหลดมีค่าต่ำ จะทำให้ฮาร์มอนิกส์มีปริมาณสูงขึ้นเมื่อเทียบกับค่ากระแสไฟฟ้าความถี่หลักมูล
- อุปกรณ์ประเภทอาร์ก ได้แก่ เตาหลอมแบบอาร์ก เครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบอาร์ก และหลอดฟลูออเรสเซนต์ ซึ่งมีคุณลักษณะการทำงานพื้นฐานโดยการอาร์กและมีการใช้งานมาก

ปัญหาในระบบไฟฟ้าที่เกิดจากฮาร์มอนิกส์อาจแยกพิจารณาได้เป็น ผลกระทบที่ไม่รุนแรงแต่ทำให้เกิดความสูญเสียในระยะยาว เช่น เพิ่มกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ ลดประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ ลดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ หรือทำให้อุปกรณ์ทำงานผิดพลาด และผลกระทบที่รุนแรงอาจทำให้อุปกรณ์ชำรุดเสียหายหรือเกิดระเบิดได้ ลักษณะผลกระทบที่เกิดขึ้น มีดังนี้ [32]

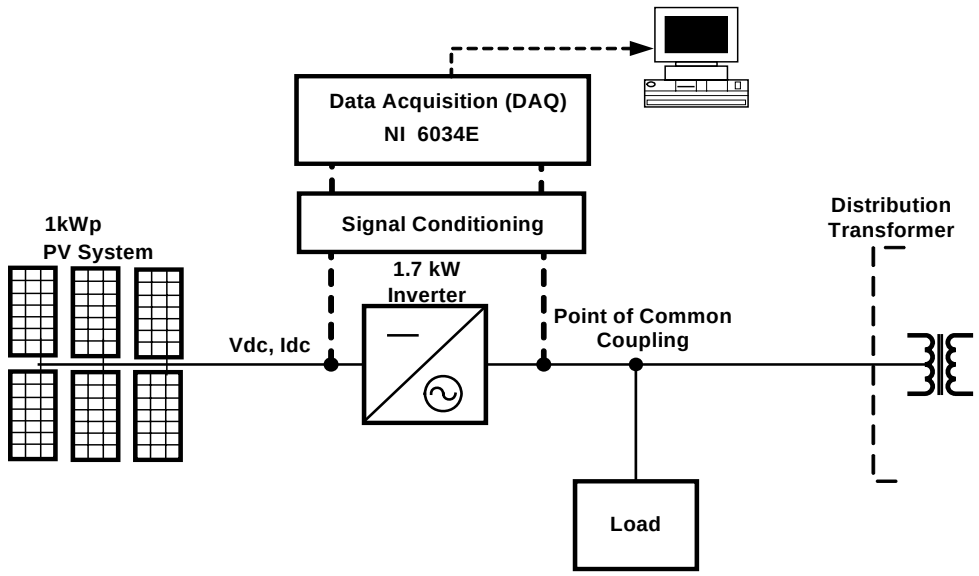
- Skin Effect และ Proximity Effect เป็นปรากฏการณ์ที่กระแสไฟฟ้าสลับส่วนมากไหลที่ผิวตัวนำแทนที่จะไหลอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ ปัจจัยที่กำหนดทั้งสองนี้ คือ ขนาดของตัวนำ ระยะห่างระหว่างตัวนำ และความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ ถ้าความถี่เพิ่มขึ้นปรากฏการณ์เหล่านี้จะทำให้ความต้านทานกระแสสลับของตัวนำเพิ่มขึ้น และถ้าหากว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวนำมีฮาร์มอนิกส์อยู่ด้วย ซึ่งฮาร์มอนิกส์เหล่านี้จะเป็นสัญญาณที่มีความถี่สูง ทำให้ค่าความต้านทานกระแสสลับของตัวนำเพิ่ม และส่งผลต่อระบบไฟฟ้าในด้านต่างๆ เช่น เพิ่มความสูญเสียและลดการนำกระแสในสายส่งและสายป้อน เพิ่มแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของระบบทำให้ปลายทางมีความเพี้ยนของแรงดันเพิ่มขึ้น
- Eddy Current Loss และ Hysteresis Loss เป็นการสูญเสียในแกนเหล็กของหม้อแปลงซึ่ง Eddy Current Loss เป็นการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในขดลวด กำลังสูญเสียนี้จะเพิ่มขึ้นตามกำลังสองของกระแสโหลด และกำลังสองของความถี่ และส่วน Hysteresis Loss เป็นการสูญเสียเนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กที่คล้องผ่านส่วนประกอบต่างๆ ที่เป็นโลหะของหม้อแปลง กำลังสูญเสียจะเพิ่มขึ้นตามความถี่

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเก็บข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายที่สภาวะการทำงานจริง และหลังจากนั้นก็นำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค(กฟภ.) เพื่อใช้ในการประกอบการวิเคราะห์ผลกระทบและการเปลี่ยนแปลงด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายเมื่อมีการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละขนาดที่จุดต่างๆ ตลอดทั้งสายป้อน

3.1 การเก็บข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อระบบจำหน่าย โดยวิเคราะห์ผลกระทบทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า ซึ่งได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วิทยาเขตบางขุนเทียน ซึ่งมีระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดพิกัดกำลัง 1 kWp และอินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับสายส่งจำหน่ายที่ใช้ทดสอบ ยี่ห้อ Sunny Boy รุ่น SWR 1700E มีขนาดพิกัดกำลัง 1.7 kW และระบบจะเชื่อมต่อกับสายส่งไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค แผนผังการเก็บข้อมูลแสดงดังรูปที่ 3.1



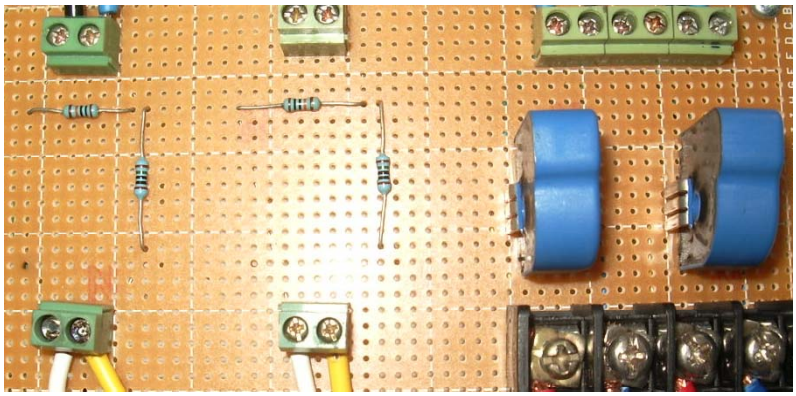
รูปที่ 3.1 แผนผังการเก็บข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

3.1.1 ระบบที่ใช้ในการเก็บข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อระบบจำหน่าย

ในการเก็บข้อมูลเพื่อพิจารณาพฤติกรรมของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการใช้เครื่องมือวัดและระบบจัดเก็บข้อมูลที่มีสมรรถภาพและประสิทธิภาพ เพราะในการจำลองการทำงานนั้น ต้องการนำข้อมูลจริงของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้เพื่อให้สามารถที่จะวิเคราะห์ผลกระทบที่จะเกิดขึ้นได้อย่างถูกต้อง การเก็บข้อมูลในสภาวะการทำงานจริงเพื่อให้สามารถทราบพฤติกรรมจริงของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะเกิดขึ้น เครื่องมือที่ใช้เก็บข้อมูลต้องสามารถตั้งเวลาที่เร็วพอสำหรับการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงอาทิตย์ ซึ่งได้จัดทำระบบที่ใช้ในการเก็บข้อมูล ประกอบด้วย

1. ชุดวงจรตรวจจับกระแส จำนวน 1 ชุด ซึ่งจะประกอบด้วยตัวตรวจจับกระแส (Current Transducer) โดยเลือกใช้ตัวตรวจจับกระแสรุ่น LTS 25 – NP 07 และได้ออกแบบให้ใช้ในย่านพิกัดสูงสุดอยู่ที่ 12 Arms เนื่องจากค่ากระแสเอาท์พุทที่ออกจากอินเวอร์เตอร์มีค่าสูงสุดอยู่ที่ $8.2I_p$ ค่าเอาท์พุทที่ได้จากชุดตรวจจับกระแสจะแสดงออกมาในรูปของแรงดันไฟฟ้าโดยจะมีค่า $2.5 \pm (0.600 \times I_p/I_n)$ ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทที่ได้มานั้นจะต้องนำมาคำนวณหาค่าย้อนกลับเพื่อที่จะได้ทราบค่ากระแสไฟฟ้าจริงที่วัดได้

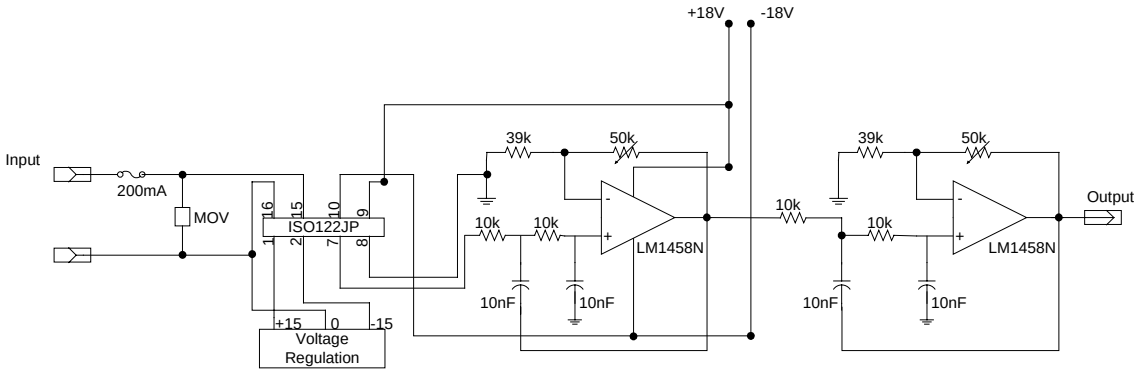
2. ชุดวงจรแบ่งแรงดัน จำนวน 1 ชุด จะประกอบด้วยตัวต้านทาน10 MΩ และ 100 kΩ ต่ออนุกรมกัน เพราะต้องการให้ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่จะเข้าชุดปรับระดับสัญญาณมีค่าสูงสุดไม่เกิน 5 Vp เมื่อระดับแรงดันอินพุทมีค่า 345 Vp



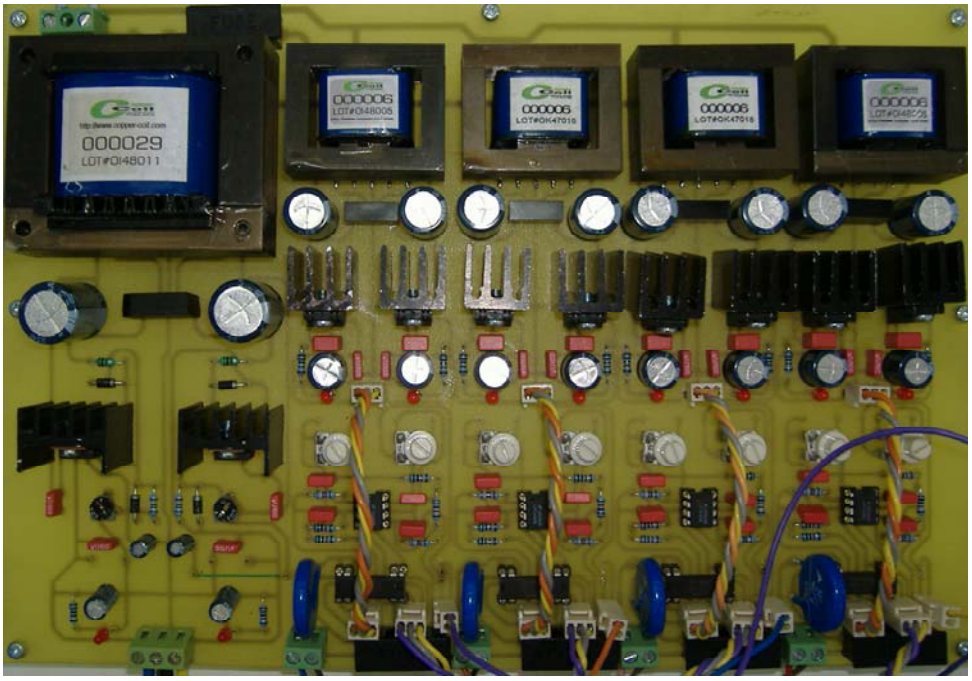
รูปที่ 3.2 วงจรแบ่งแรงดันและวงจรตรวจจับกระแส

3. ชุดปรับระดับสัญญาณ (Signal Conditioning) จำนวน 1 ชุด จะทำหน้าที่รับสัญญาณจากชุดวงจรตรวจจับกระแสและชุดวงจรแบ่งแรงดัน ก่อนที่จะส่งสัญญาณที่มีค่าไม่เกิน ± 10V ให้กับชุดเก็บบันทึกข้อมูล โดยมีรายละเอียดของวงจรและการทำงาน ดังนี้

ชุด Signal Conditioning จะรับสัญญาณอินพุทผ่านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คือ Isolation Amplifier รุ่น ISO122JP ซึ่งจะเป็นอุปกรณ์แยกกราวด์ของสัญญาณอินพุทกับสัญญาณเอาท์พุทออกจากกัน และจะส่งสัญญาณออกไปยังวงจรขยายสัญญาณอีกชุดหนึ่งซึ่งใช้ตัวขยายสัญญาณคือ Operation Amplifier รุ่น LM1458N ก่อนที่จะส่งต่อสัญญาณเอาท์พุทเข้าไปยังชุดเก็บบันทึกข้อมูล (Data Acquisition) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งแสดงวงจรปรับระดับสัญญาณเพียง 1 ช่องสัญญาณ แต่ในชุด Signal Conditioning ที่จัดทำขึ้น เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลจะมี 4 ช่องสัญญาณ โดยเก็บข้อมูลทั้งทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับและด้านไฟฟ้ากระแสตรง ด้านละ 2 ช่องสัญญาณ ซึ่งทั้ง 4 ช่องสัญญาณ จะมีลักษณะของวงจรไฟฟ้าเช่นเดียวกัน และก่อนที่จะนำชุด Signal Conditioning ไปใช้ในการวัดข้อมูลจะต้องทำการปรับตั้งค่า(Calibrate) ของแต่ละช่องสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณเอาท์พุทที่ไม่ทำให้เกินระดับที่จะก่อให้เกิดความเสียหายแก่ชุด Data Acquisition โดยทำการป้อนสัญญาณมาตรฐานคือ สัญญาณไซน์ ที่ความถี่ 50 Hz และสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง จากเครื่องสร้างสัญญาณ (Function Generator) สำหรับช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 จะใช้ในการวัดข้อมูลกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนช่องสัญญาณที่ 3 และ 4 จะใช้วัดข้อมูลกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ โดยที่ทราบค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรแบ่งแรงดันและวงจรตรวจจับกระแสมีค่าไม่เกิน ± 5 V และ ± 3.1V ตามลำดับ ดังนั้นในช่องสัญญาณที่ 1 และ 2 จะป้อนสัญญาณอินพุทเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาด 5 V แล้ววัดค่าสัญญาณเอาท์พุทด้วยออสซิสโลสโคป(Oscilloscope) และทำการปรับค่าตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ให้ได้สัญญาณเอาท์พุทที่มีขนาดไม่เกิน 10 V ส่วนการปรับตั้งช่องสัญญาณที่ 3 และ 4 จะป้อนสัญญาณอินพุทเป็นสัญญาณไซน์ ที่ความถี่ 50 Hz ขนาด 5 Vp และปรับค่าความต้านทานให้ได้ขนาดสัญญาณเอาท์พุท 10 Vp ทำให้ช่องสัญญาณทั้ง 4 ช่องสัญญาณ มีอัตราการขยายสัญญาณเท่ากับ 2



รูปที่ 3.3 วงจรปรับระดับสัญญาณ 1 ช่องสัญญาณ



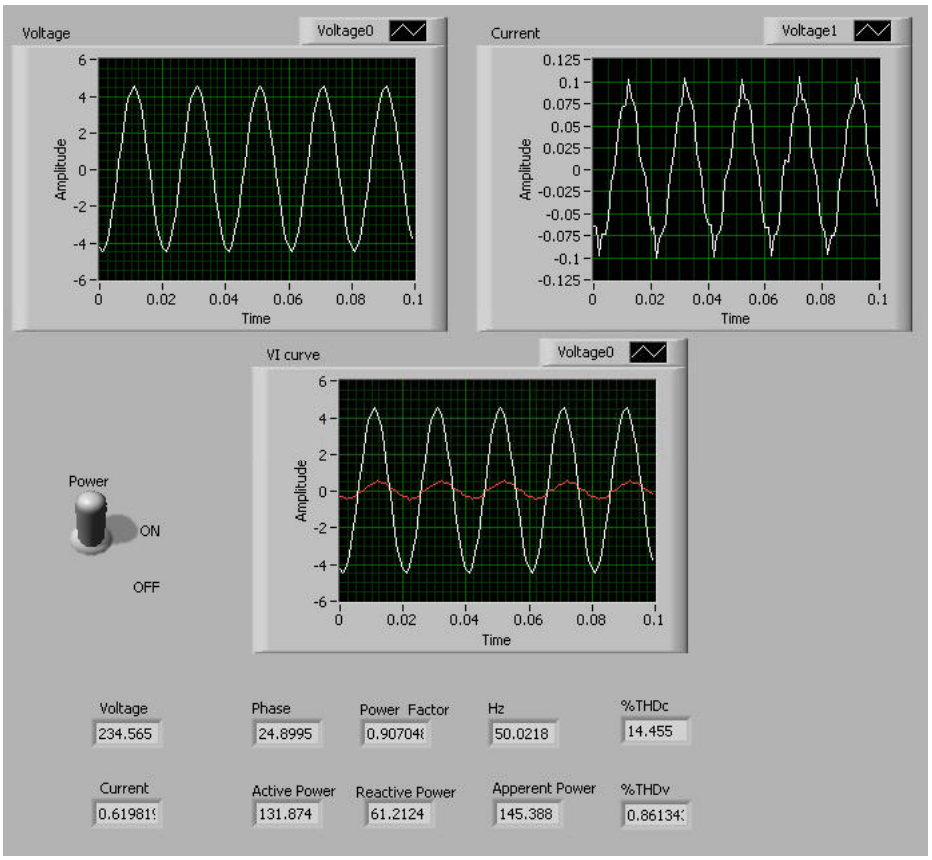
รูปที่ 3.4 ชุดปรับระดับสัญญาณ (Signal Conditioning)

4. ชุดเก็บบันทึกข้อมูล(Data Acquisition :DAQ) รุ่น NI 6034E จำนวน 1 ชุด แสดงดังรูปที่ 3.5 จะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณที่วัดจากสัญญาณอนาลอก(Analog) ให้เป็นสัญญาณดิจิตอล (Digital) สัญญาณอินพุทที่เข้า Data Acquisition จะมีค่าไม่เกิน ± 10V และสามารถที่จะแสดงผลออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ได้โดยอาศัยการเชื่อมต่อผ่านโปรแกรม Labview ที่โปรแกรมไว้ให้บันทึกค่าข้อมูลทุกๆ 1 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดข้อมูลทางเทคนิคของชุดเก็บบันทึกข้อมูล(Data Acquisition) รุ่น NI 6034E

Data Acquisition	
Model	NI 6034E
Bus	PCI
Analog Inputs	16 SE/8 DI
Input Resolution	16 bits
Max Sampling Rate	200 kS/s
Input Range	±0.05 V to ±10 V
Analog outputs/Resolution/Rate	-
Digital I/O	8
Counter / Timer	2,24-bits
Triggers	Digitals

รูปที่ 3.5 ชุดเก็บบันทึกข้อมูล(Data Acquisition) รุ่น NI 6034E



รูปที่ 3.6 หน้าจอแสดงผลของโปรแกรม Labview ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

5. เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อเชื่อมต่อกับเครื่องมือวัด จำนวน 1 เครื่อง ใช้เพื่อบันทึกข้อมูลที่ทำการวัด

6. วัสดุและอุปกรณ์ประกอบการเก็บข้อมูล จำนวน 1 ชุด

3.1.2 ขั้นตอนการเก็บข้อมูล

ในการเก็บข้อมูลนี้จะแสดงพฤติกรรมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ภายใต้สภาวะจริงในธรรมชาติ ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายซึ่งไม่สามารถควบคุมสภาวะต่างๆ ให้คงที่ ดังนั้นจะต้องวัดและบันทึกค่าอย่างระมัดระวัง และตั้งเวลาของเครื่องมือวัดให้เหมาะสมมากที่สุด เพื่อให้ได้ค่าที่เป็นการวัดที่สภาวะเดียวกัน ดำเนินการตามขั้นตอน ดังนี้

1. ติดตั้งชุดวงจรแบ่งแรงดันและชุดวงจรตรวจจับกระแส โดยทำการวัดทั้งทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ

2. ติดตั้งชุด Signal Conditioning เพื่อรับสัญญาณจากชุดวงจรแบ่งแรงดันและชุดวงจรตรวจจับกระแส และสัญญาณที่ออกจากชุด Signal Conditioning เพื่อที่ป้อนเข้า Data Acquisition จะมีค่าอยู่ระหว่าง ±10 V

3. ติดตั้ง Data Acquisition ซึ่งตั้งเวลาในการเก็บบันทึกข้อมูลทุกๆ 1 วินาที ผ่านคอมพิวเตอร์โดยเชื่อมต่อผ่านโปรแกรม Labview และข้อมูลที่จัดเก็บด้านไฟฟ้ากระแสสลับหลังอินเวอร์เตอร์ มีดังนี้

- แรงดันไฟฟ้า (V)
- กระแสไฟฟ้า (A)
- ความถี่ (Hz)
- กำลังไฟฟ้าจริง (W)
- กำลังไฟฟ้าเสมือน (VAR)
- เพาเวอร์แฟคเตอร์ (PF)
- ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่ 1, 3, 5, และทุกลำดับคี่จนถึง 21
- ค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์ในลำดับที่ 1, 3, 5, และทุกลำดับคี่จนถึง 21
- เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส (%THDc)
- เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน (%THDv)

ข้อมูลที่จัดเก็บด้านไฟฟ้ากระแสตรง มีดังนี้

- แรงดันไฟฟ้า (V)
- กระแสไฟฟ้า (A)
- กำลังไฟฟ้า (W)

3.2 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

ในการดำเนินการเก็บข้อมูลได้เลือกทำการเก็บข้อมูลของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายของกลุ่มระบบพลังงานสะอาด มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วิทยาเขตบางขุนเทียน ตั้งอยู่ที่ 83 หมู่ 8 แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร ซึ่งมีระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ประกอบด้วย ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดพิกัดกำลัง 1 kWp และใช้อินเวอร์เตอร์ขนาดพิกัดกำลัง 1.7 kW รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.2 และ 3.3

3.2.1 ระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลยี่ห้อ Kaneka รุ่น LSU 202 มีคุณลักษณะตามตารางที่ 3.2 โดยมีจำนวนแผงทั้งหมด 12 แผง จัดเป็นการต่ออนุกรมจำนวน 3 แผง 4 ชุด แล้วจึงนำมาต่อขนานกัน

ตารางที่ 3.2 แสดงคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อ 1 แผง

ยี่ห้อ	Kaneka
รุ่น	LSU202
ชนิด	Amorphous Silicon thin film
กำลังสูงสุด (W)	58
แรงดันสูงสุด, V_{max} (V)	85
กระแสลัดวงจร, I_{sc} (A)	1.12
แรงดันเปิดวงจร, V_{oc} (V)	63
กระแสสูงสุด, I_{max} (A)	0.92
กว้าง X ยาว X หนา (มิลลิเมตร)	920 X 920 X 40
น้ำหนัก (kg)	12.5

รูปที่ 3.7 ระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

3.2.2 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับสายส่งจำหน่ายที่ใช้ทดสอบ ยี่ห้อ Sunny Boy รุ่น SWR 1700E มีขนาดพิกัดกำลัง 1.7 kW

ตารางที่ 3.3 แสดงคุณลักษณะของอินเวอร์เตอร์

Technical Data- SMA SWR 1700E		
Input values	Recommended max. generator power (PPV)	2050 Wp
	Max. DC power (PDC, max)	1850 W
	Max. DC voltage (VDC, max)	400 V
	PV voltage range (MPPT VPV)	139 V ... 400V
	Max. input current (IPV, max)	12.6 A
	Voltage ripple of input voltage (VSS)	< 10%
	Max. number of strings (in parallel)	2

Technical Data- SMA SWR 1700E		
Output values	Max. AC power	1700 W
	Nominal AC power	1500 W
	Harmonic distortion of output (KIAC)	< 4%
	Operating range grid voltage (VAC)	198 V - 251 V
	Mains Frequency (FAC)	49.8 Hz – 50.2 Hz
Efficiency	Max. Efficiency	93.5%
	Europ. Efficiency	91.8%
	Ambient Temperature (C)	- 25 to +60
Power consumption and Dimensions	Power consumption during operation	< 5 W
	Power consumption during stand-by	0.1 W
	Dimensions (w x h x d)	434 x 265 x 214 mm

รูปที่ 3.8 อินเวอร์เตอร์ชนิดเชื่อมต่อกับสายส่งจำหน่ายที่ใช้ทดสอบ

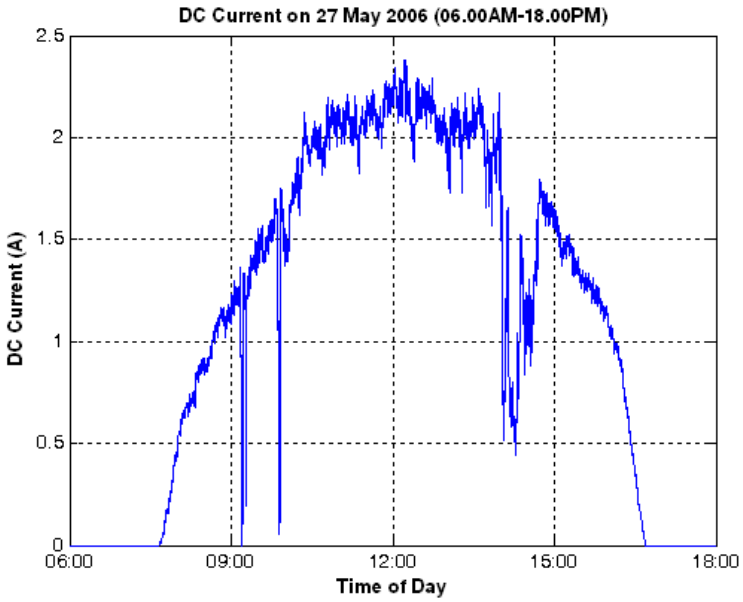
3.3 ผลการเก็บข้อมูลของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

การเก็บข้อมูลของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายในสภาวะการทำงานจริง ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วิทยาเขตบางขุนเทียน ทำในช่วงระหว่างปลายเดือนพฤษภาคม จนถึงเดือนมิถุนายน 2549 ซึ่งผลของข้อมูลในแต่ละวันให้ลักษณะคล้ายกัน ผู้วิจัยได้เลือกแสดงการวิเคราะห์ข้อมูลในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549 โดยแสดงตั้งแต่ช่วงเวลาที่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน คือ 06:00-18:00 น. โดยจะแสดงข้อมูลทั้งทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ

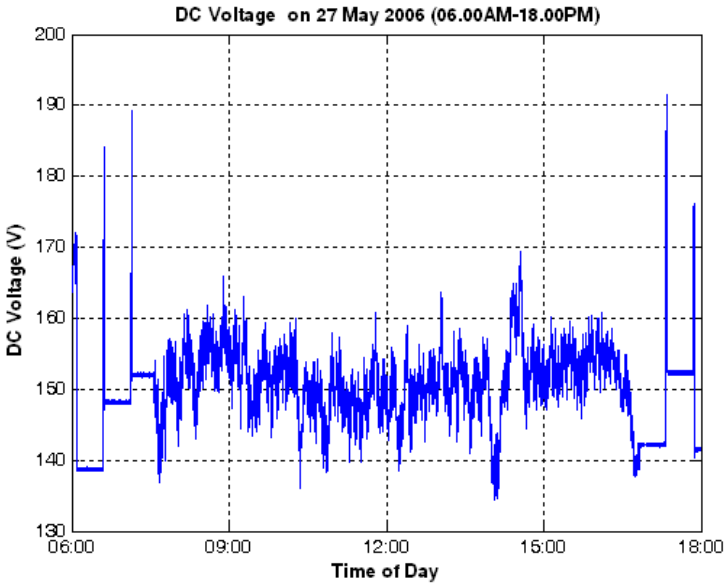
3.3.1 ข้อมูลทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง

ในการเก็บข้อมูลของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายได้บันทึกข้อมูลทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงหรือทางด้านหน้าของอินเวอร์เตอร์เพื่อที่จะสามารถเข้าใจข้อมูลที่บันทึกได้จากทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับหรือทางด้านหลังอินเวอร์เตอร์ ข้อมูลที่แสดงคือข้อมูลแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และค่ากำลังไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ถึง 3.11

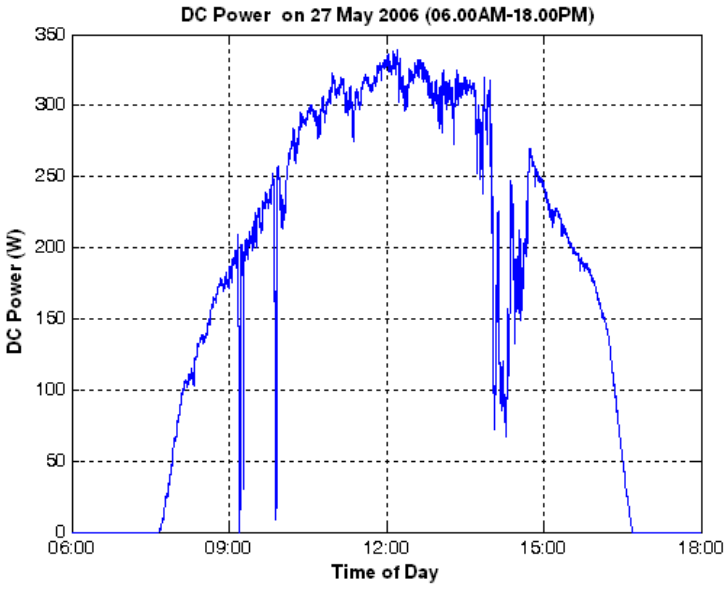
จากกราฟแสดงข้อมูลซึ่งได้ทำการเก็บบันทึกทุกๆ 1 วินาที พบว่าระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะเริ่มทำงานในช่วงเวลาประมาณ 08:00 น. จนกระทั่งถึงเวลาประมาณ 16:00 น. ดังจะเห็นได้จากรูปกราฟกระแสไฟฟ้าที่จะค่อยๆ มีค่าเพิ่มมากขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่เวลา 12:00 น. ประมาณ 2.3 A และจะเริ่มมีค่าลดลงเรื่อยๆ ซึ่งในช่วงเวลาประมาณ 14:00 น. ค่ากระแสไฟฟ้าจะลดต่ำลงมากมีค่าประมาณ 0.5 A ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่ของเมฆ ทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงอาทิตย์และทำให้เกิดแรงดันกระเพื่อม ซึ่งจากกราฟของแรงดันไฟฟ้า ที่แสดงในรูปที่ 3.10 ที่ช่วงเวลาดังกล่าว ค่าของแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอย่างรวดเร็ว ส่วนค่าของแรงดันไฟฟ้าในสภาวะปกติที่วัดได้จะมีการค่าระหว่าง ประมาณ 140-160 โวลต์ และลักษณะกราฟข้อมูลกำลังไฟฟ้าจะมีลักษณะสอดคล้องกับกราฟข้อมูลกระแสไฟฟ้า เมื่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานค่ากำลังไฟฟ้าจะสูงขึ้นเรื่อยๆ จนมีค่ามากที่สุดประมาณ 330 วัตต์ ที่เวลาประมาณ 12:00 น. จากข้อมูลทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้ในตลอดช่วงระยะเวลาที่เก็บข้อมูลมีค่ามากที่สุดประมาณ 450 วัตต์ และจากข้อมูลทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงจะทำให้สามารถรู้แนวโน้มของข้อมูลที่จะวัดได้จากการเก็บข้อมูลทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.9 ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549



รูปที่ 3.10 ค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549

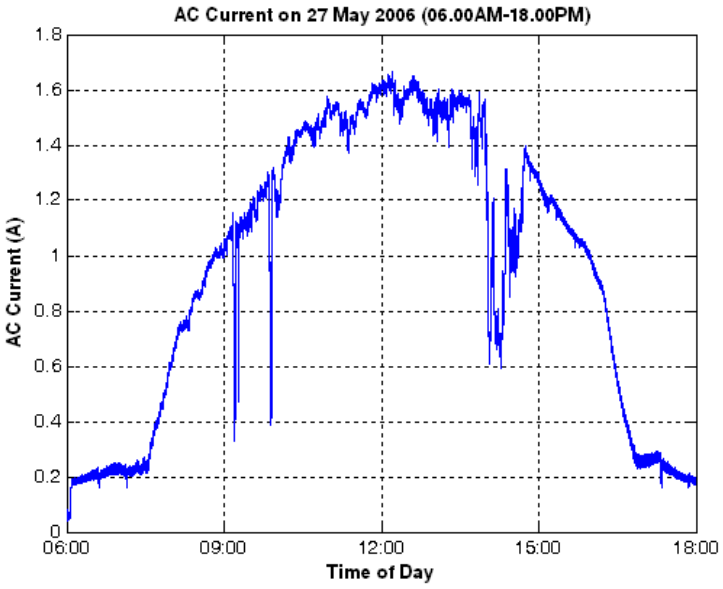


รูปที่ 3.11 ค่ากำลังไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549

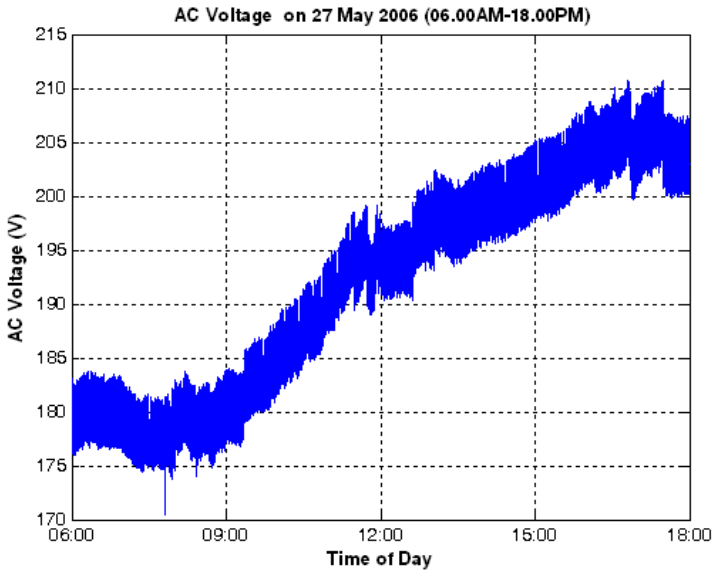
3.3.2 ข้อมูลทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ

ข้อมูลทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับเป็นข้อมูลที่นำไปใช้ในการจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย โดยข้อมูลที่ทำการเก็บบันทึก คือ ข้อมูลแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง(Active Power) กำลังไฟฟ้าเสมือน(Reactive Power) กำลังไฟฟ้าปรากฏ(Apparent Power) ความถี่ เพาเวอร์แฟคเตอร์ เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส(%THDc) และเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน(%THDv) ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ถึง 3.20

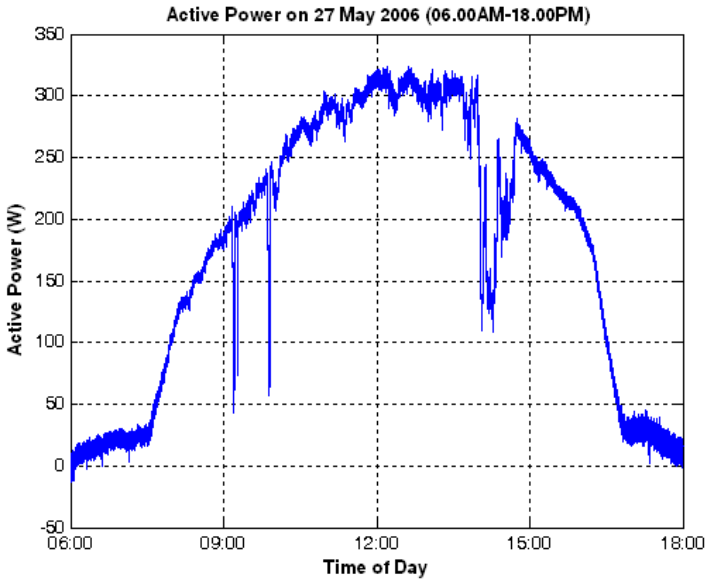
พบว่ากราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับมีลักษณะคล้ายกับกราฟทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงโดยค่าของกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงสุดที่ประมาณ 1.6 A ที่เวลาประมาณ 12:00 น. แต่ลักษณะของกราฟกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ยังไม่ทำงานคือ ตั้งแต่เวลาประมาณ 06:00 น. จนถึง 07:00 น. และ 17:00 ถึง 18:00 น. จะมีค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ประมาณ 0.2 A ซึ่งเป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์ ส่วนค่าของแรงดันไฟฟ้านั้นมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ประมาณ 175-210 โวลต์ เป็นการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่ประมาณ 79.5- 95.4 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าบนระบบจำหน่ายไฟฟ้า จะเห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วงเวลาก่อน 12:00 น. มีค่าที่ต่ำกว่าข้อกำหนดที่กำหนดไว้ คือ มีค่าประมาณ 88-110% ซึ่งอาจเกิดจากสาเหตุของการปรับตั้งแท็ป(Tap) ของหม้อแปลงที่ต่ำเกินไปหรืออาจจะเกิดจากการตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ออกมามีค่าไม่สูงเท่าที่ควร ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่วัดเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากทางด้านกริด(Grid)



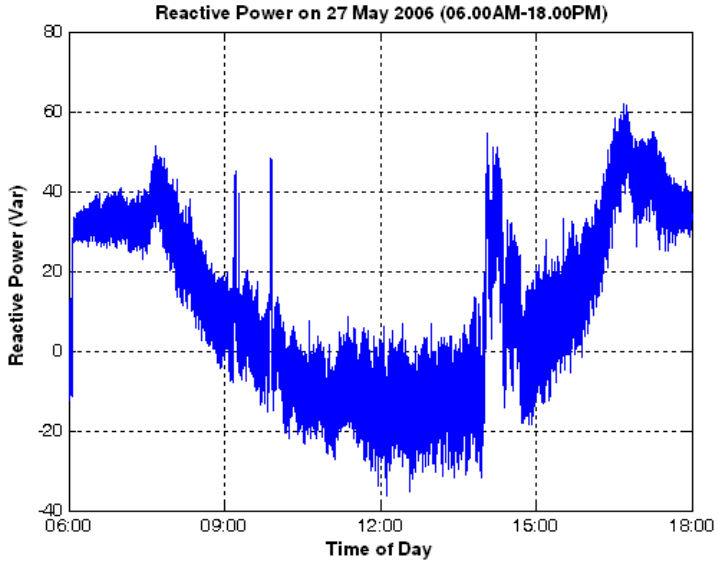
รูปที่ 3.12 ค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อระบบ ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549



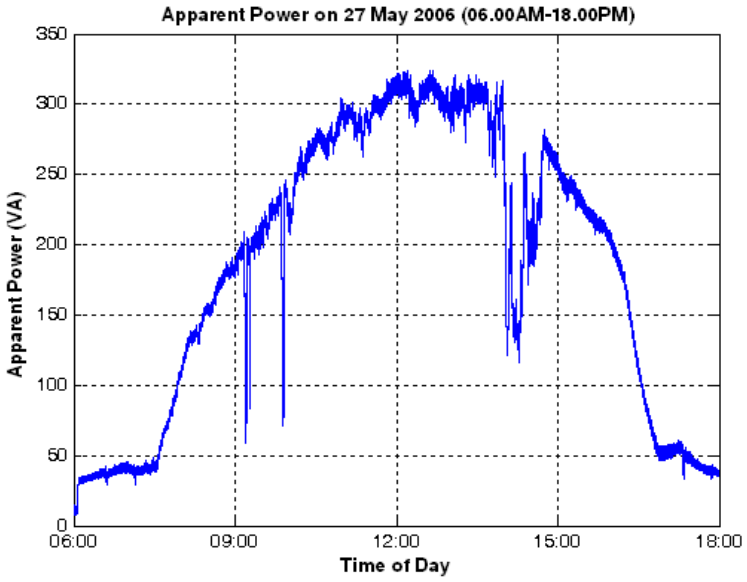
รูปที่ 3.13 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อระบบ ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549



รูปที่ 3.14 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่จุดเชื่อมต่อระบบ ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549



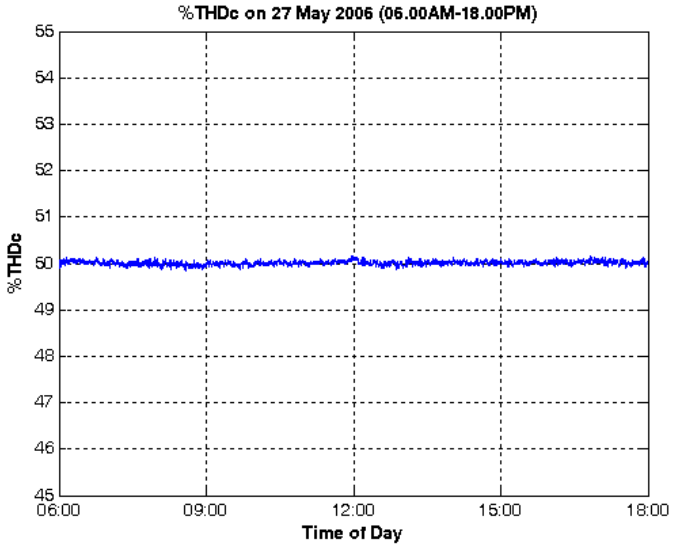
รูปที่ 3.15 ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่จุดเชื่อมต่อระบบ ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549



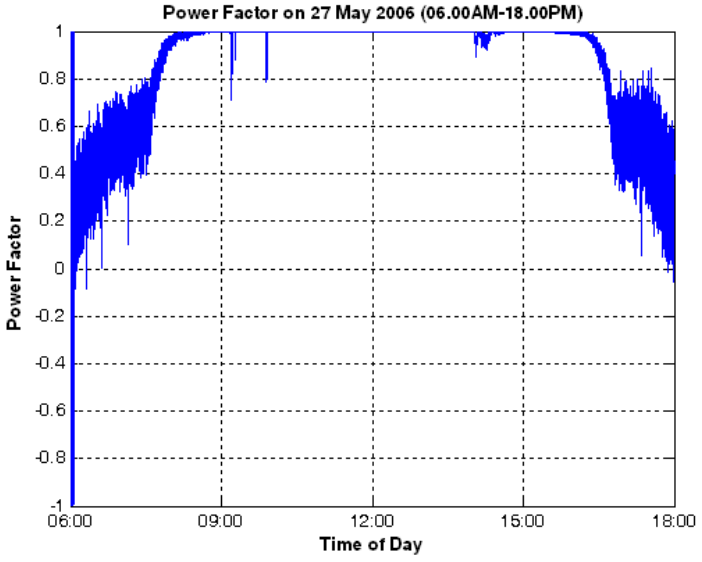
รูปที่ 3.16 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏที่จุดเชื่อมต่อระบบ ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549

ในส่วนของค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่วัดได้ มีค่าสูงสุดที่ 324 วัตต์ เวลาประมาณ 12.00 น. ซึ่งจะใกล้เคียงกับค่ากำลังไฟฟ้าทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง ในช่วงแรกขณะที่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ยังไม่เริ่มทำงาน เมื่อพิจารณากราฟของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน จะสังเกตว่ามีค่ากำลังไฟฟ้าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์เริ่มทำงาน ค่ากำลังไฟฟ้าจริงจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนจะมีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลให้ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีค่าประมาณ 1 แสดงว่าในช่วงเวลาที่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน จะให้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงเท่านั้น และทำให้กราฟของกำลังไฟฟ้าปรากฏมีลักษณะและมีค่าใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าจริง ซึ่งในการจำลองการทำงานที่จะกล่าวในบทต่อไป ได้ทำการจำลองการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายโดยการป้อนค่ากำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบจำหน่าย นั่นเอง

ค่าของความถี่ที่วัดได้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 50.15 - 49.85 Hz ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดให้ค่าของความถี่อยู่ในระดับ 50±0.42 Hz และยังอยู่ในเกณฑ์ของอินเวอร์เตอร์ที่กำหนดไว้ คือมีค่าระหว่าง 49.8 Hz – 50.2 Hz

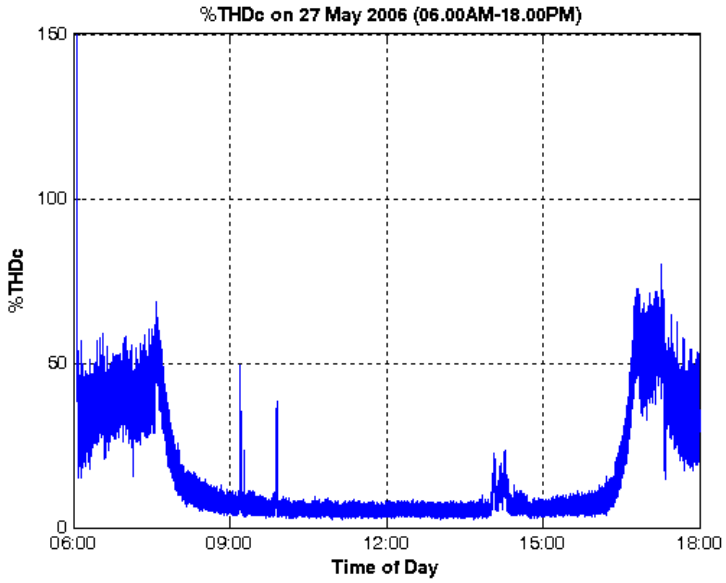


รูปที่ 3.17 ค่าความถี่ที่จุดเชื่อมต่อระบบ ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549

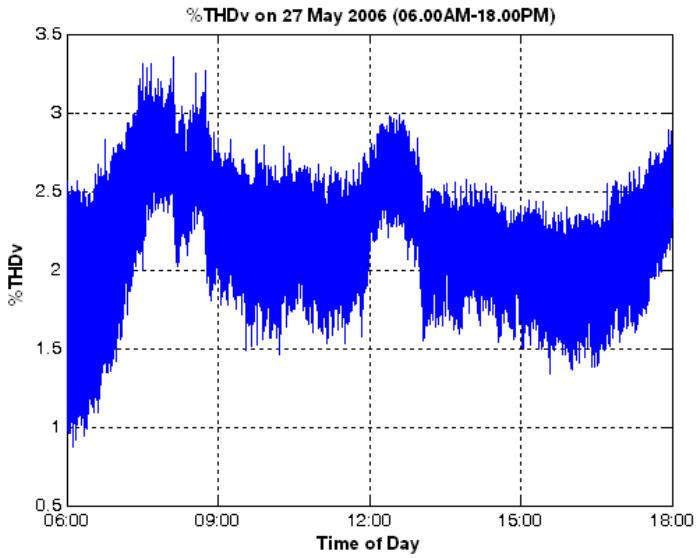


รูปที่ 3.18 ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ที่จุดเชื่อมต่อระบบ ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549

และเมื่อทำการพิจารณาค่าเปอร์เซ็นความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส (%THDc) และค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน(%THDv) พบว่าค่าทั้งสองมีค่าอยู่ในขีดจำกัดของมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้



รูปที่ 3.19 ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549



รูปที่ 3.20 ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน ในวันที่ 27 พฤษภาคม 2549

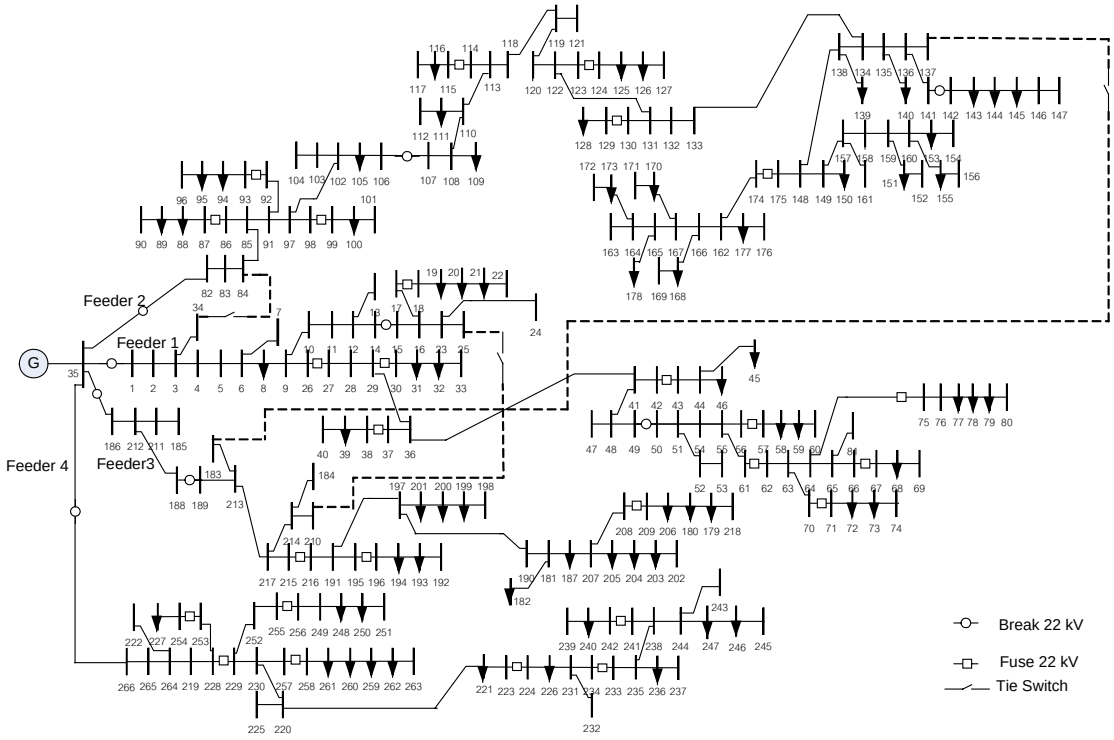
3.4 การจำลองการทำงานของระบบ

การจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ได้เห็นความสำคัญกับขนาดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายเนื่องมาจากแนวโน้มการขยายตัวของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน อีกทั้งตำแหน่งในการติดตั้งก็เป็นเรื่องที่มีความสำคัญเช่นเดียวกัน เพราะในทางปฏิบัติแล้วนั้น การไฟฟ้าไม่สามารถที่จะกำหนดตำแหน่งการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบจำหน่ายได้ เนื่องจากผู้บริโภคเองเป็นผู้ตัดสินใจในการเลือกที่จะติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นในการจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายเพื่อศึกษาผลกระทบทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าจึงได้ทำการสุ่มตำแหน่งในการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนระบบจำหน่าย โดยได้เพิ่มขนาดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งด้วยการเพิ่มจำนวนระบบเซลล์แสงอาทิตย์ให้มากขึ้นเป็น 10% และ 25% ของโหลดทั้งหมดในระบบที่ใช้ในการทดสอบ

3.4.1 ระบบที่ใช้ในการทดสอบ

ระบบที่ใช้ในการจำลองการทำงานเป็นระบบของนิคมอุตสาหกรรมนวนคร จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) มีรายละเอียดดังนี้

- ระบบแรงดันปานกลางแบบเรเดียล 3 เฟส ขนาดพิกัด 100 MVA 22 kV
- มีทั้งหมด 4 สายป้อน
- จำนวนบัสทั้งหมด 265 บัส
- มี 69 บัสที่มีโหลดต่ออยู่
- โหลดขนาดใหญ่ที่สุดอยู่ที่บัส 46 มีขนาด 3.4 MW 2.106 MVar
- สวิทซ์ถ่ายโอน(Tie switch) มี 3 แห่งคือ บัส 25 กับบัส 210, บัส 137 กับบัส 183 และบัส 34 กับบัส 84
- โหลดรวมทั้งหมดในระบบมีขนาด 53.6037 MW 33.26897 MVAr



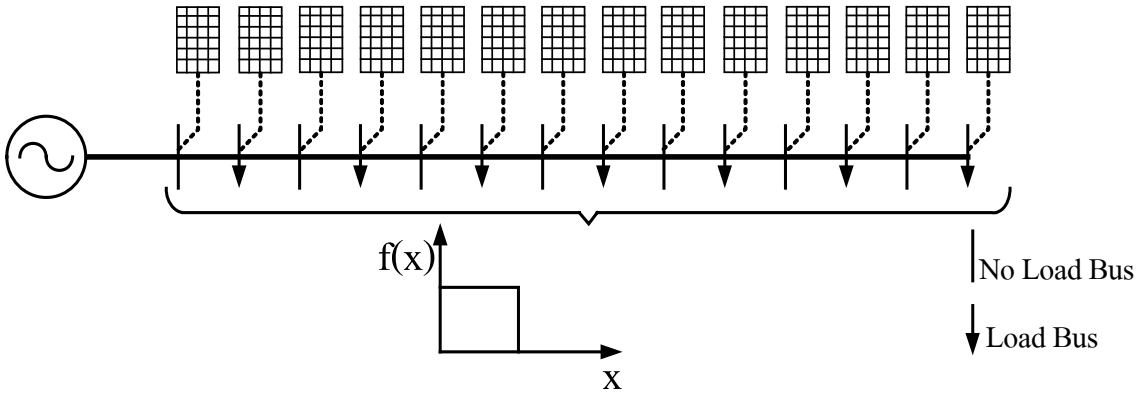
รูปที่ 3.21 ระบบที่ใช้ในการทดสอบ

3.4.2 ขั้นตอนการจำลองการทำงาน

การจำลองการทำงานของระบบจำหน่ายเพื่อทำการศึกษาผลกระทบด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าของการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนระบบจำหน่าย ทำการจำลองการทำงานแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matpower (Matlab) เพื่อที่จะพิจารณาค่าของแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และเพาเวอร์แฟคเตอร์และจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Simulink(Matlab) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแสและแรงดันของระบบจำหน่าย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matpower (Matlab)

เนื่องจากแนวโน้มการขยายตัวของการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย อีกทั้งในทางปฏิบัติ ตำแหน่งในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะถูกกำหนดโดยผู้บริโภค การไฟฟ้าไม่สามารถที่จะกำหนดตำแหน่งในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังนั้น การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matpower(Matlab) จึงทำการสุ่มตำแหน่งในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์บนระบบจำหน่าย



รูปที่ 3.22 ลักษณะการสุ่มตำแหน่งในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อ f(x) = ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability density function)
x = ตำแหน่งในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

โดยทำการสุ่มตำแหน่งการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบการกระจายสม่ำเสมอ (Uniformly distributed) นั่นคือ f(x) เป็นฟังก์ชันการกระจายแบบสม่ำเสมอ ซึ่งความน่าจะเป็นจะมีค่าเท่ากันในทุกตำแหน่ง หมายความว่า ความน่าจะเป็นในการกำหนดตำแหน่งในทุก ๆ บัสตลอดสายป้อนมีโอกาสเกิดขึ้นเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 3.22

ค่าที่ใช้ในการโปรแกรมการจำลองการทำงานแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ข้อมูลบัส (Bus Data) ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Data) และข้อมูลสายส่งในแต่ละเส้น (Branch Data) โดยที่
ข้อมูลบัส จะประกอบด้วย

- หมายเลขบัส (Bus number)
- ชนิดของบัส (Bus type)
- ค่ากำลังไฟฟ้าจริง ที่ต้องการในแต่ละบัส (Real power damand, MW)
- ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน ที่ต้องการในแต่ละบัส (Reactive power damand, MVAr)
- ค่า Shunt conductance
- ค่า Shunt susceptance
- หมายเลขพื้นที่ (Area number)
- ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้า (Voltage magnitude, p.u.)
- ค่ามุมของแรงดันไฟฟ้า (Voltage angle, degrees)
- ค่าพิกัดแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง (Base voltage, kV)

- เขตกำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Loss zone, 1-999)
- ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Maximum voltage magnitude, p.u.)
- ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด (Minimum voltage magnitude, p.u.)

ข้อมูลเครื่องกำเนิด จะประกอบด้วย

- หมายเลขบัส (Bus number)
- ค่าเอาท์พุทของกำลังไฟฟ้าจริง (Real power output, MW)
- ค่าเอาท์พุทของกำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive power output, MVAr)
- ค่าเอาท์พุทสูงสุดของกำลังไฟฟ้าเสมือน(Maximum reactive power output, MVAr)
- ค่าเอาท์พุทต่ำสุดของกำลังไฟฟ้าเสมือน (Minimum reactive power output, MVAr)
- ค่าขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด (Voltage magnitude setpoint, p.u.)
- ค่าพิกัดของหม้อแปลง (Total MVA base of this machine)
- สถานภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Status, in service/out of service)
- ค่าเอาท์พุทสูงสุดของกำลังไฟฟ้าจริง (Maximum real power output, MW)
- ค่าเอาท์พุทต่ำสุดของกำลังไฟฟ้าจริง (Minimum real power output, MW)

ข้อมูลของข้อมูลสายส่งในแต่ละเส้น (Branch Data) จะประกอบด้วย

- หมายเลขจากบัส (From bus number)
- ถึงหมายเลขบัส (To bus number)
- ค่าความต้านทาน (Resistance, p.u.)
- ค่ารีแอกแตนซ์ (Reactance, p.u.)
- ค่าพิกัดของหม้อแปลงในกรณี Long term
- ค่าพิกัดของหม้อแปลงในกรณี Short term
- ค่าพิกัดของหม้อแปลงในกรณี Emergency
- ค่าอัตราส่วนของหม้อแปลง (Transformer off nominal turns ratio)
- ค่ามุมเฟสของหม้อแปลง (Transformer phase shift angle, degree)
- ค่าสถานะเริ่มต้นของสายส่ง (Initial branch status, 1-in service/0-out of service)

เมื่อได้ป้อนข้อมูลของระบบจำหน่ายทั้งหมดแล้ว ก่อนที่จะทำการสุ่มตำแหน่งการติดตั้งของระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะรันโปรแกรมในสภาวะปกติของระบบจำหน่ายเพื่อพิจารณารายละเอียดของข้อมูลแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับข้อมูลหลังจากทำการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ในการจำลองการทำงานของระบบจำหน่ายเมื่อมีการสุ่มตำแหน่งในการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัสใดๆ บนระบบจำหน่ายนั้น จะดำเนินการเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่สวิทซ์ถ่ายโอน(Tie switch) อยู่ในสภาวะเปิดวงจรและปิดวงจร โดยจะทำการสุ่มตำแหน่งการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 1 ตำแหน่งและ 2 ตำแหน่ง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การสุ่มตำแหน่งการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 1 ตำแหน่ง

- สุ่มหมายเลขแบบการกระจายสม่ำเสมอ ซึ่งจะมีค่าตั้งแต่ 0-1 จำนวน 1 หมายเลข
- นำหมายเลขที่ได้จากการสุ่มตำแหน่งคูณด้วยจำนวนบัสทั้งหมดของระบบ คือ 265
- ผลลัพธ์จากการคูณกัน หากเป็นเลขทศนิยมที่มากกว่า 5 ให้ปัดทศนิยมขึ้น 1 ตำแหน่ง และหากมีค่าน้อยกว่า 5 ให้ปัดทศนิยมลง 1 ตำแหน่ง
- การติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีขนาด 10% และ 25% ของโหลดรวมทั้งหมดหลังจากได้ค่าหมายเลขบัสแล้วนั้น กระทำโดยการนำขนาดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งก็คือ ค่ากำลังไฟฟ้าจริง(Real power, MW) ลบค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ต้องการในบัสนั้นๆ ซึ่งเป็นข้อมูลบัสของระบบจำหน่ายที่ได้ป้อนไว้แล้วหรือที่เรียกว่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้โหลด นั่นเอง
- ดำเนินการรันโปรแกรมต่อเนื่องจำนวน 1000 ครั้งต่อหนึ่งขนาดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อทำให้สามารถแน่ใจได้ว่าการสุ่มตำแหน่งการติดตั้งของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ นั้นจะครอบคลุมตลอดทั้งสายป้อนในระบบจำหน่ายที่ใช้ในการทดสอบ

การสุ่มตำแหน่งการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ตำแหน่ง

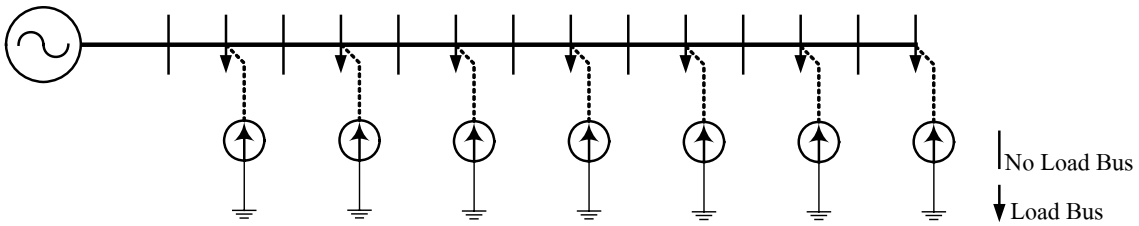
- สุ่มหมายเลขแบบการกระจายสม่ำเสมอ ซึ่งจะมีค่าตั้งแต่ 0-1 จำนวน 2 หมายเลข
- นำหมายเลขที่ได้จากการสุ่มตำแหน่งคูณด้วยจำนวนบัสทั้งหมดของระบบ คือ 265
- ผลลัพธ์จากการคูณกัน หากเป็นเลขทศนิยมที่มากกว่า 5 ให้ปัดทศนิยมขึ้น 1 ตำแหน่ง และหากมีค่าน้อยกว่า 5 ให้ปัดทศนิยมลง 1 ตำแหน่ง
- ติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 2 ระบบซึ่งมีขนาดเท่ากันและมีขนาดรวมทั้ง 2 ระบบเท่ากับ 10% และ 25% ของโหลดรวมทั้งหมด
- ดำเนินการรันโปรแกรมต่อเนื่องจำนวน 1000 ครั้งต่อหนึ่งขนาดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

จากขั้นตอนการสุ่มตำแหน่งในการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนระบบจำหน่าย จะนำค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบในแต่ละบัส ค่ากำลังไฟฟ้าจริงรวมของระบบ ค่ากำลังสูญเสียไฟฟ้ารวมของระบบ และค่าเพาเวร์แฟคเตอร์ที่ได้จากการคำนวณจากค่าความสัมพันธ์ของค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ มาใช้ในการพิจารณาผลกระทบด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นบนระบบจำหน่าย

เพื่อให้การศึกษาผลกระทบด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายเป็นไปตามมาตรฐานความปลอดภัย จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการพิจารณาค่าฮาร์มอนิกส์ที่จะเกิดขึ้นในระบบจำหน่าย เมื่อมีการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการจำลองการทำงานของระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Simulink (Matlab) ในการพิจารณาค่าฮาร์มอนิกส์ที่จะเกิดขึ้น

2. การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Simulink (Matlab)

เพื่อพิจารณาค่าฮาร์มอนิกส์ของระบบจำหน่ายเมื่อมีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ดังที่ทราบแล้วว่า ในการกำหนดตำแหน่งการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ขึ้นอยู่กับผู้บริโภคเป็นผู้ตัดสินใจ โดยอาจต้องการจะลดภาระการใช้ไฟฟ้าในช่วงกำลังไฟฟ้าสูงสุด(Peak load) หรือต้องการเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบ เป็นต้น ซึ่งหากกล่าวไปแล้ว โหลดบัสจึงเปรียบเสมือนผู้บริโภค นั่นเอง ด้วยเหตุผลนี้ การจำลองการทำงานจึงป้อนค่ากระแสฮาร์มอนิกส์เข้าไปในระบบจำหน่ายในโหลดบัสเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ลักษณะการป้อนกระแสฮาร์มอนิกส์เข้าไปในระบบจำหน่าย

ผู้วิจัยได้สร้างโมเดลของระบบจำหน่ายที่ใช้ในการจำลองการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.24-3.28 จะเห็นว่าโมเดลของสายส่งไม่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน (Shunt capacitor) เอาไว้ เนื่องจากระบบจำหน่ายมีระยะของสายส่งในแต่บัสน้อยกว่า 80 กิโลเมตรซึ่งถือได้ว่าเป็นสายส่งระยะสั้น จึงไม่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน เมื่อไม่มีการต่อตัวเก็บประจุแบบขนาน ก็จะพบว่าโมเดลของระบบจำหน่ายเป็นวงจรไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่มีเพียงตัวความต้านทาน(R) และตัวเหนี่ยวนำ(L) ต่ออนุกรมกัน

ดังนั้น ในการจำลองการทำงานของระบบจึงนำหลักการของทฤษฎีการวางซ้อน (Superposition Theorem) มาใช้เพื่อวิเคราะห์หาผลของฮาร์มอนิกส์ในระบบจำหน่ายได้

ทฤษฎีการวางซ้อน(Superposition Theorem)[33] จะนิยมใช้ในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าที่มีแหล่งจ่ายพลังงาน(แหล่งกำเนิดแรงดันหรือกระแส) มากกว่า 1 ตัวขึ้นไปเพราะสามารถที่จะแยกพิจารณาค่าของกระแสและแรงดันที่เกิดจากแหล่งจ่ายพลังงานแต่ละตัวที่เป็นอิสระต่อกันแล้วนำค่าของกระแสหรือแรงดันที่ได้จากแหล่งจ่ายพลังงานแต่ละตัวมารวมกัน ก็จะทำให้ได้ค่าของกระแสและแรงดันที่แท้จริงของวงจร ทำให้ช่วยในการวิเคราะห์วงจรได้ง่ายมากขึ้น จึงได้นำหลักการของทฤษฎีการวางซ้อนมาใช้ในการจำลองการทำงานเพื่อพิจารณาค่าฮาร์มอนิกส์ในแต่ละลำดับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- เลือกค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ที่มีค่าสูงสุดจากการเก็บข้อมูล โดยใช้ฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 เท่านั้นเพราะฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 15, 17, 19, 21 มีค่าน้อยกว่าลำดับที่ 13 ถึงสองเท่า ซึ่งถือว่ามีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาพิจารณา
- ระบบจำหน่ายมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 1 ตัวขนาด 12.7 kV 50Hz
- เลือกระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 1 หน่วยมีค่ากำลังไฟฟ้า 320 W
- คำนวณค่ากระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดเป็น 10% และ 25% ของโหลดรวมทั้งหมด โดยนำค่ากระแสฮาร์มอนิกส์คูณด้วยจำนวนของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขนาดเป็น 10% และ 25% ของโหลดรวมทั้งหมด นั่นคือ ต้องเพิ่มจำนวนระบบเซลล์แสงอาทิตย์ประมาณ 16,682 ระบบ และ 41,704 ระบบ ตามลำดับ ทำให้ได้ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ที่ป้อนเข้าไปในระบบจำหน่ายในการจำลองการทำงานของระบบจำหน่ายดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์เมื่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาด 10% และ 25% ของโหลดรวมทั้งหมด

ลำดับฮาร์มอนิกส์	กระแสฮาร์มอนิกส์ เมื่อระบบมีขนาด 10% ของโหลดรวมทั้งหมด(Arms)	กระแสฮาร์มอนิกส์ เมื่อระบบมีขนาด 25% ของโหลดรวมทั้งหมด (Arms)
1	3886.9	9717.03
3	32.79	81.99
5	14.49	36.24
7	98.69	246.72
9	70.73	176.82
11	70.73	176.82
13	98.69	246.72

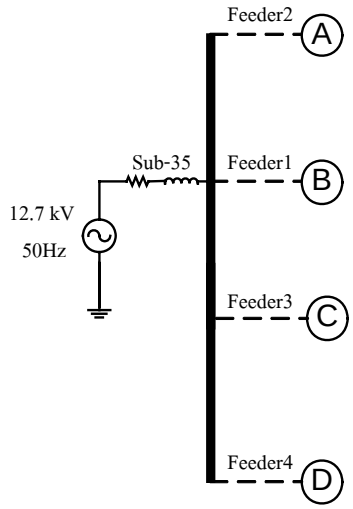
ส่วนรายละเอียดของค่าความต้านทาน ค่าตัวเหนี่ยวนำของสายส่ง รวมทั้งค่าโหลดในแต่บัสแสดงในภาคผนวก ข

การจำลองการทำงานโดยใช้หลักการของทฤษฎีการวางซ้อน คือ แยกพิจารณาค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ในแต่ละลำดับ โดยดำเนินการจำลองการทำงานเป็น 2 กรณี เช่นเดียวกันกับการสุ่มตำแหน่งในการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ คือ จำลองการทำงานในขณะที่ระบบมีสวิทซ์ถ่ายโอนอยู่ในสภาวะเปิดและปิดวงจร ซึ่งมีรายละเอียดขั้นตอนดังนี้

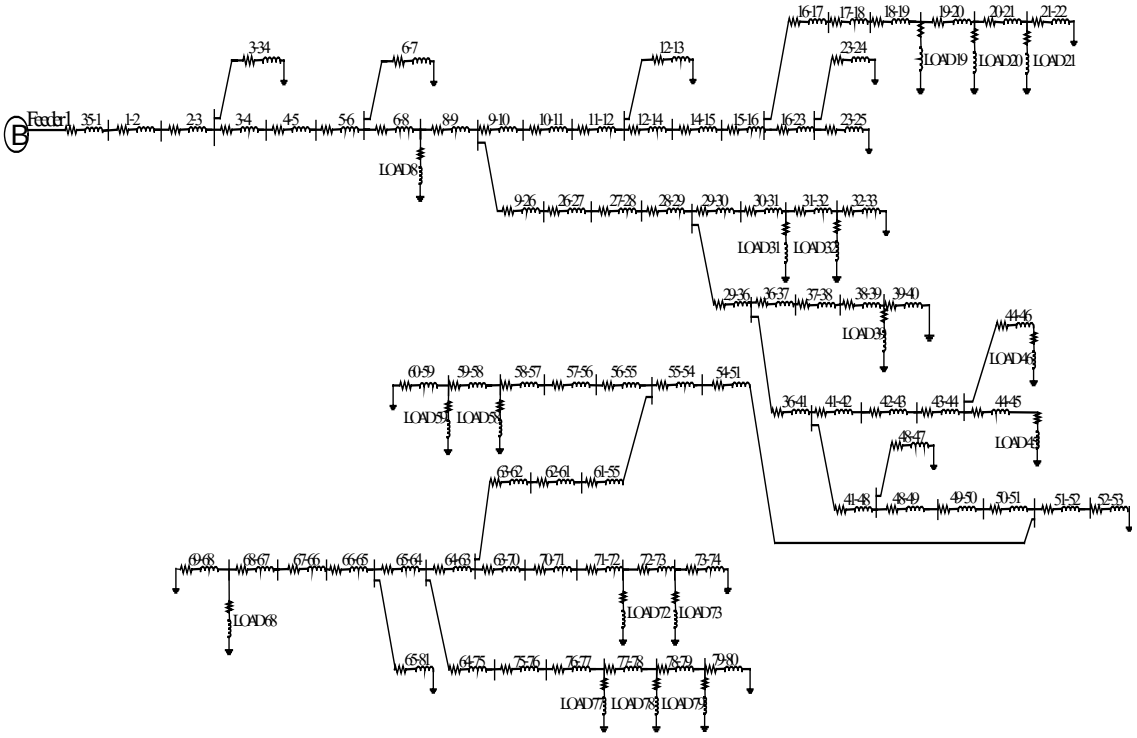
1. พิจารณาผลจากฮาร์มอนิกส์มูลฐาน(Fundamental harmonics) จะป้อนค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ที่โหลดบัส โดยระบบยังต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้า

2. พิจารณาผลของฮาร์มอนิกส์ในแต่ละลำดับคือ 3, 5, 7, 9, 11, 13 ที่ละลำดับ โดยทำการปลดแหล่งจ่ายไฟฟ้าออกจากระบบ และป้อนค่ากระแสฮาร์มอนิกส์เฉพาะที่โหลดบัสเพื่อพิจารณาค่าของแรงดันและกระแสที่เกิดจากผลของฮาร์มอนิกส์ในแต่ละลำดับ

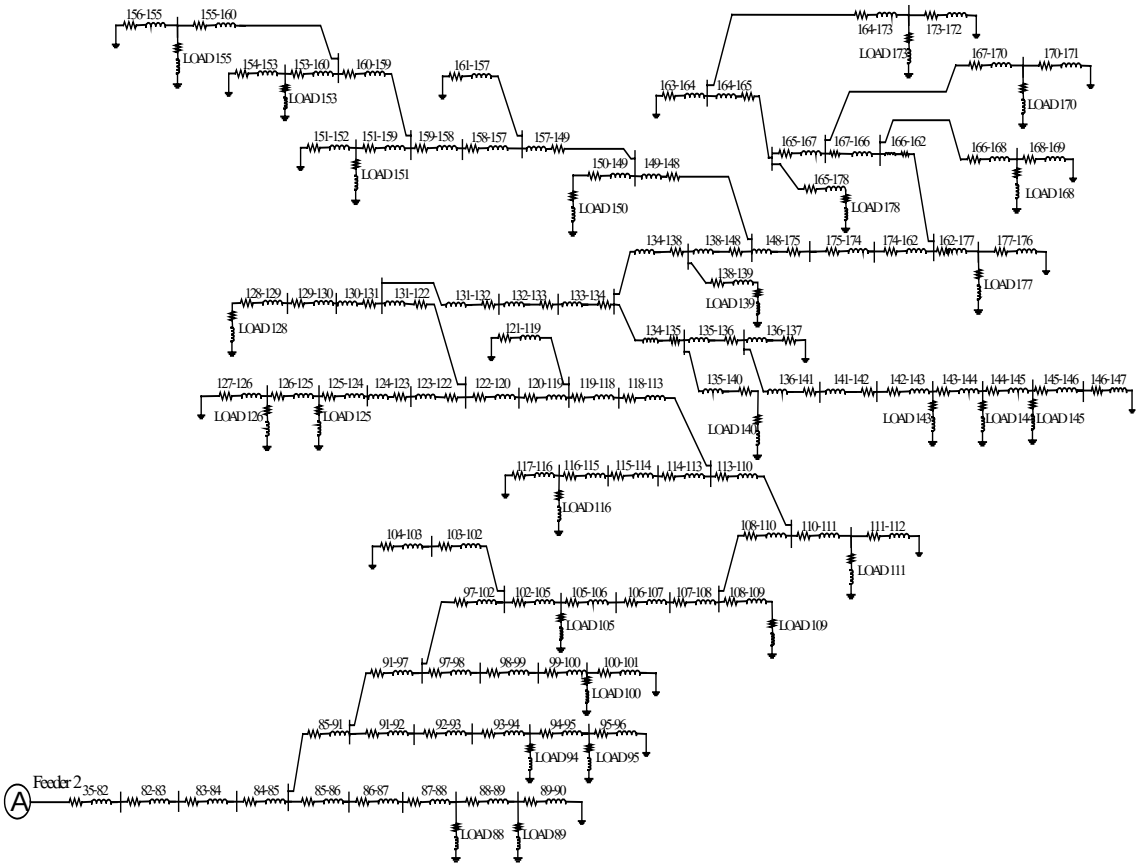
3. นำค่าของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นในแต่ละบัส มาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส (%THDc) และค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน (%THDv) ที่เกิดขึ้น ตามสมการ 2.8 และ 2.9



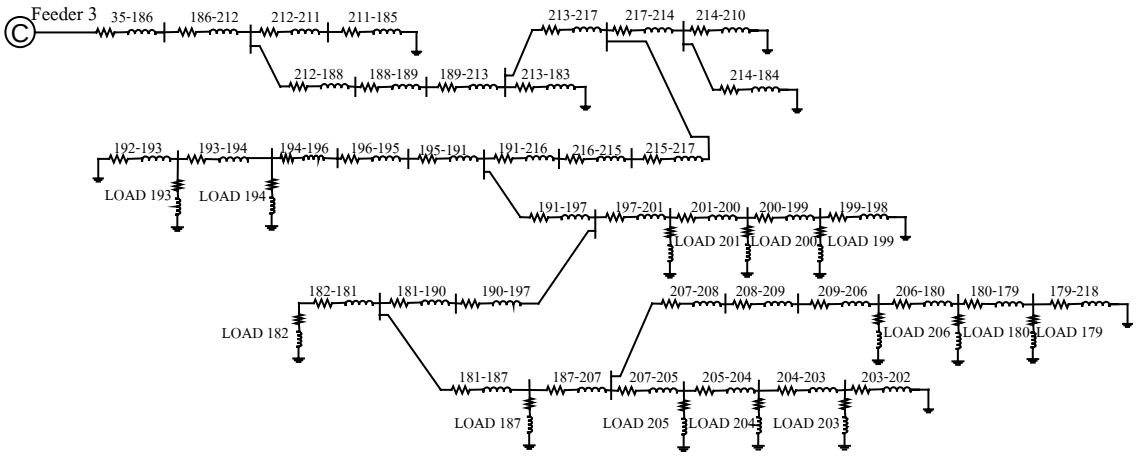
รูปที่ 3.24 โมเดลของระบบที่ใช้ในการทดสอบ



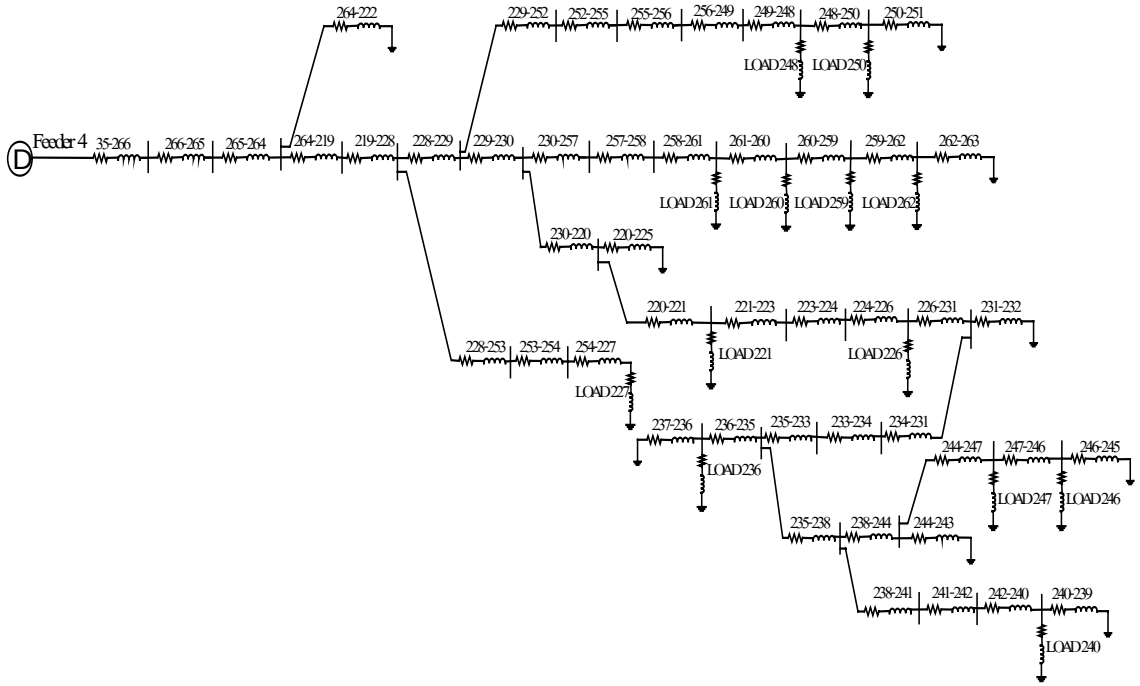
รูปที่ 3.25 โมเดลของระบบที่ใช้ในการทดสอบ สายป้อนที่ 1



รูปที่ 3.26 โมเดลของระบบที่ใช้ในการทดสอบ สายป้อนที่ 2



รูปที่ 3.27 โมเดลของระบบที่ใช้ในการทดสอบ สายป้อนที่ 3



รูปที่ 3.28 โมเดลของระบบที่ใช้ในการทดสอบ สายป้อนที่ 4

บทที่ 4 ผลการดำเนินการ

ในบทนี้กล่าวถึง ผลการจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย ที่ได้ทำการสุ่มตำแหน่งติดตั้ง จำนวน 1,000 ครั้ง โดยได้เพิ่มขนาดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เป็น 10% และ 25% ของโหลดรวมทั้งหมดของระบบที่ใช้ในการทดสอบและการจำลองการทำงานโดยการป้อนค่ากระแสฮาร์มอนิกส์เข้าไปในระบบจำหน่าย เพื่อที่จะสามารถวิเคราะห์ผลกระทบจากการสุ่มตำแหน่งในการติดตั้งและขนาดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ส่งผลต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไฟฟ้า

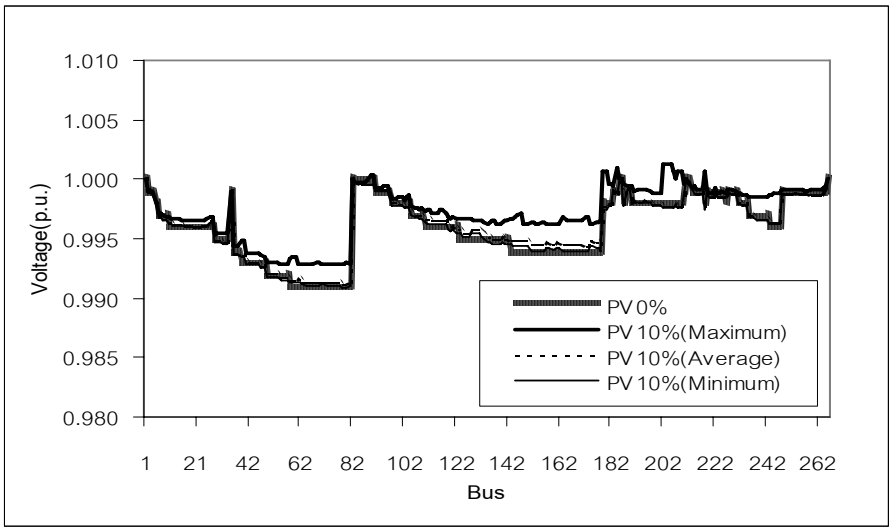
4.1 ผลการจำลองการทำงาน

ผลการจำลองการทำงานจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ ขณะที่สวิตซ์ถ่ายโอน(Tie switch) ทั้ง 3 ตัวอยู่ในสภาวะเปิดวงจรซึ่งระบบจำหน่ายจะมีลักษณะเป็นเรเดียล(Radial) และขณะที่สวิตซ์ถ่ายโอนอยู่ในสภาวะปิดวงจร ระบบจำหน่ายจะมีลักษณะเป็นลูป(Loop)

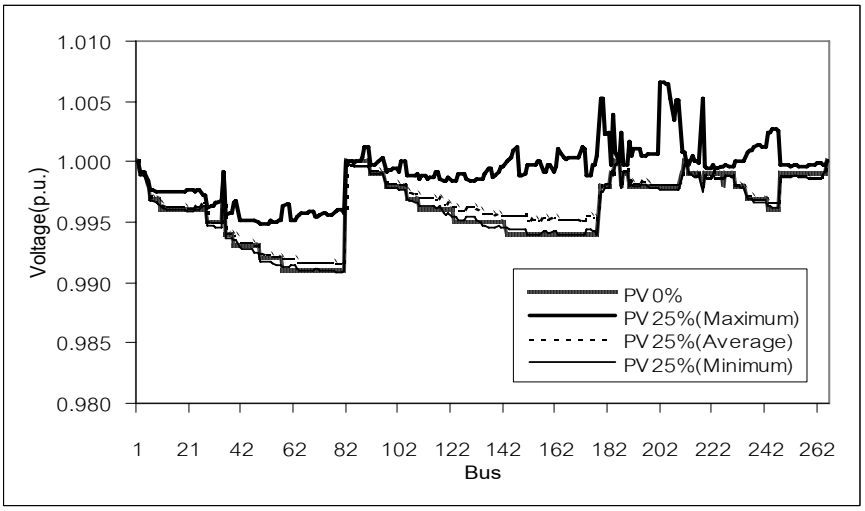
4.1.1 ระบบจำหน่ายมีลักษณะแบบเรเดียล

การจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Matpower(Matlab) ขณะที่สวิตซ์ถ่ายโอน(Tie switch) ทั้ง 3 ตัวอยู่ในสภาวะเปิดวงจร ได้สุ่มตำแหน่งในการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 1 และ 2 ตำแหน่ง โดยที่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดรวมเท่ากับ 10% และ 25% ของโหลดรวมทั้งหมด และทำการเปรียบเทียบผลกับการจำลองการทำงานของระบบจำหน่ายในสภาวะปกติขณะที่ยังไม่ได้ติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะพิจารณาผลการจำลองการทำงานในเทอมของแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบ ในส่วนของฮาร์มอนิกส์ได้จำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Simulink(Matlab) เพื่อพิจารณาผลของเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแสและแรงดัน ดังแสดงต่อไปนี้

การสุ่มตำแหน่งการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 1 ตำแหน่ง



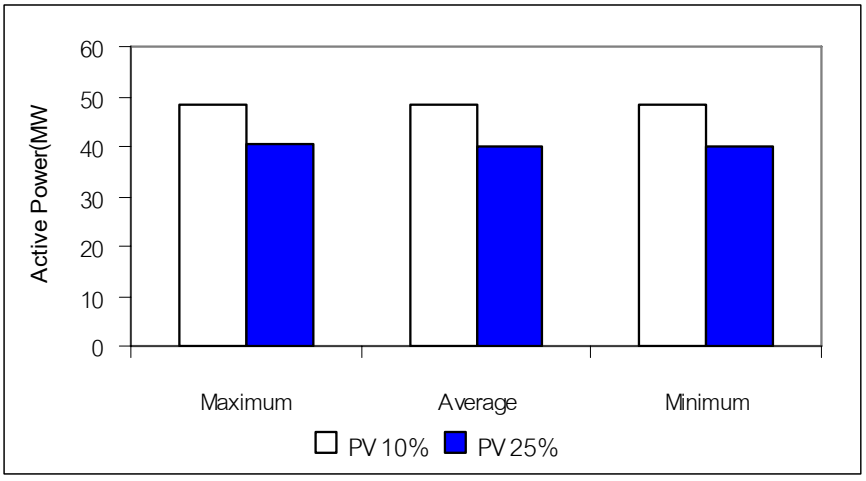
รูปที่ 4.1 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% ของโหลดทั้งหมด



รูปที่ 4.2 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 25% ของโหลดทั้งหมด

จากกราฟของแรงดันไฟฟ้า พบว่า

- แรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายเมื่ออยู่ในสภาวะปกติ ก่อนการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ จะได้ค่าต่ำที่สุดขนาด 0.991 p.u. ที่บัส 58 ถึงบัส 81 ซึ่งเป็นปลายสายของสายป้อนที่ 1 ดังจะเห็นได้จากลักษณะของกราฟในช่วงแรก ซึ่งโดยปกติในระบบจำหน่ายแบบเรเดียล แรงดันไฟฟ้าที่แต่ละบัสจะลดลงเมื่อระยะทางจากหม้อแปลงจำหน่ายเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังเป็นสายป้อนที่มีค่าโหลดมากที่สุด ส่งผลให้ค่าแรงดันปลายสายมีค่าต่ำที่สุด
- เมื่อได้ติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% และ 25% ของโหลดทั้งหมด แรงดันไฟฟ้าที่บัส 58 ถึงบัส 81 เพิ่มขึ้นเป็น 0.9934 p.u. และ 0.996 p.u. ตามลำดับ การที่แรงดันไฟฟ้าของระบบสูงขึ้นเมื่อมีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ที่ทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อถูกออกแบบมาให้ทำงานที่ค่าตัวประกอบกำลังใกล้เคียงกับหนึ่ง ซึ่งหมายความว่าระบบประพฤติตัวเหมือนกับภาระไฟฟ้าที่ดึงกำลังไฟฟ้าจริงเป็นลบ ทำให้ความต้องการกำลังไฟฟ้าจริงรอบๆ บริเวณที่มีการติดตั้งลดลง ส่งผลให้แรงดันของระบบจำหน่าย มีค่าสูงขึ้น
- ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของระบบเมื่อได้ติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% และ 25% ของโหลดทั้งหมด มีค่าสูงขึ้นเป็น 1.0012 p.u และ 1.0066 p.u. ตามลำดับ แต่ยังมีค่าอยู่ขอบเขตของข้อกำหนดของการไฟฟ้าที่กำหนดให้ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.88 –1.1 p.u.

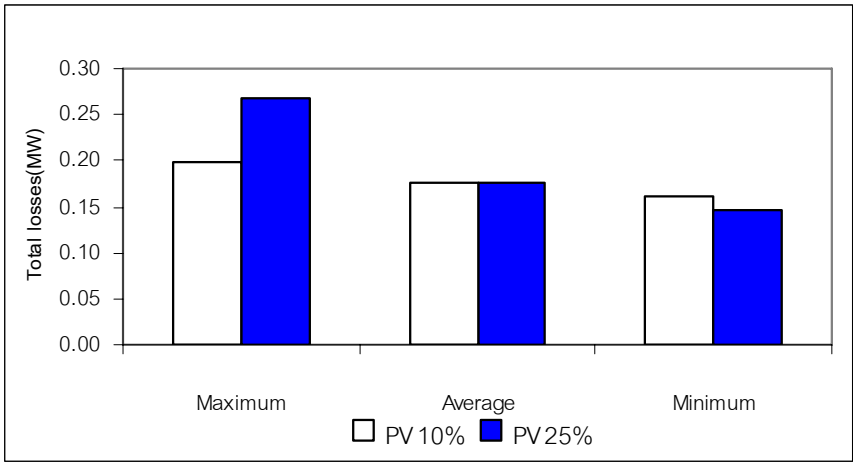


รูปที่ 4.3 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10%และ 25% ของโหลดทั้งหมด

และเมื่อพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟหรือกำลังไฟฟ้าจริง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่า

- ระบบมีค่ากำลังไฟฟ้าจริงลดลง เมื่อขนาดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งเพิ่มขึ้น เนื่องจากว่าในการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์เข้าไปในระบบจำหน่ายจะเสมือนว่าป้อนค่ากำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบจำหน่าย จึงเป็นการช่วยลดโหลดของระบบจำหน่ายลง นั่นเอง

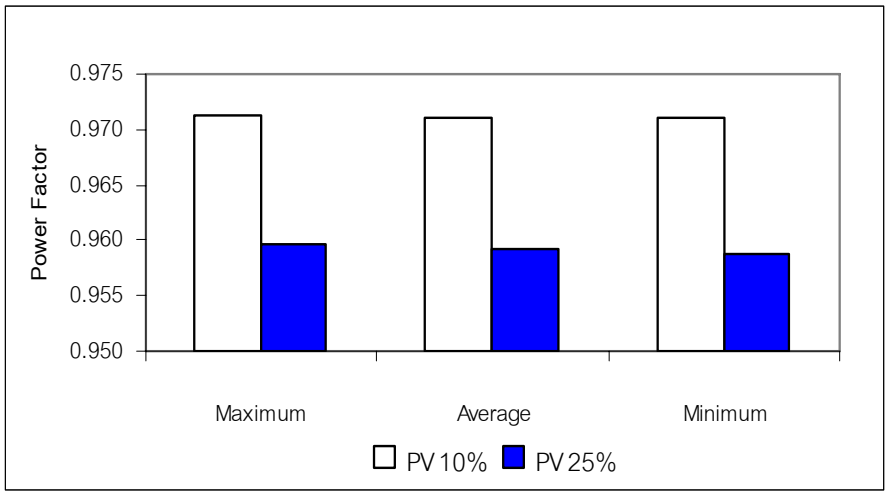
- ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของระบบจำหน่ายเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% ของโหลดทั้งหมดจะมีค่ามากกว่า เมื่อขนาดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เป็น 25% ของโหลดทั้งหมด
- ค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูงสุด เฉลี่ยและต่ำสุด มีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งสามารถบอกได้ว่าไม่ว่าจะติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบจำหน่ายที่บัสใดๆ ก็จะช่วยลดโหลดของระบบได้และพบว่าระบบเซลล์แสงอาทิตย์เหมาะสมกับการใช้งานในช่วงที่มีการต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดหรือที่เรียกว่า ช่วง Peak load เพื่อเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับภาระไฟฟ้าของระบบจำหน่าย



รูปที่ 4.4 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10%และ 25% ของโหลดทั้งหมด

ส่วนค่าของกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่าย พบว่า

- ค่าที่ได้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าพิกัดของระบบจำหน่ายซึ่งอาจถือได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียรวมที่เกิดขึ้นในระบบเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีนัยสำคัญและจะเห็นว่าหากพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้หลังจากติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ขนาด 10% และ 25% ของโหลดทั้งหมดค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกันมากจะต่างกันในทศนิยมตำแหน่งที่ 3 ซึ่งถือว่ามีค่าน้อยมาก
- เมื่อเปรียบเทียบในสภาวะปกติของระบบจำหน่าย ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจะมีค่ามากกว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเฉลี่ยเมื่อมีการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ถึงแม้ว่าเมื่อพิจารณาในกรณีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงสุดจะมีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียมากกว่าในขณะที่ระบบอยู่ในสภาวะปกติแต่ก็ถือว่ามีค่าความแตกต่างกันน้อย แสดงให้เห็นว่าระบบเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อติดตั้งเข้าไปในระบบจำหน่ายอาจจะช่วยการลดการสูญเสียในระบบจำหน่าย

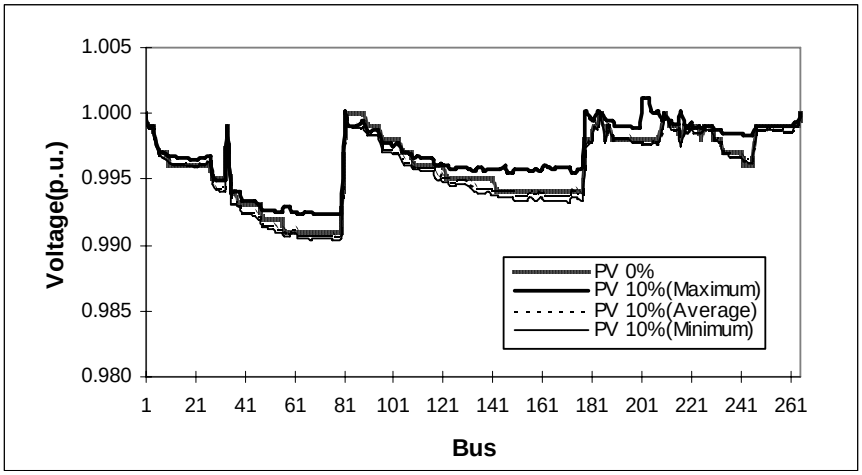


รูปที่ 4.5 ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์เมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% และ 25% ของโหลดทั้งหมด

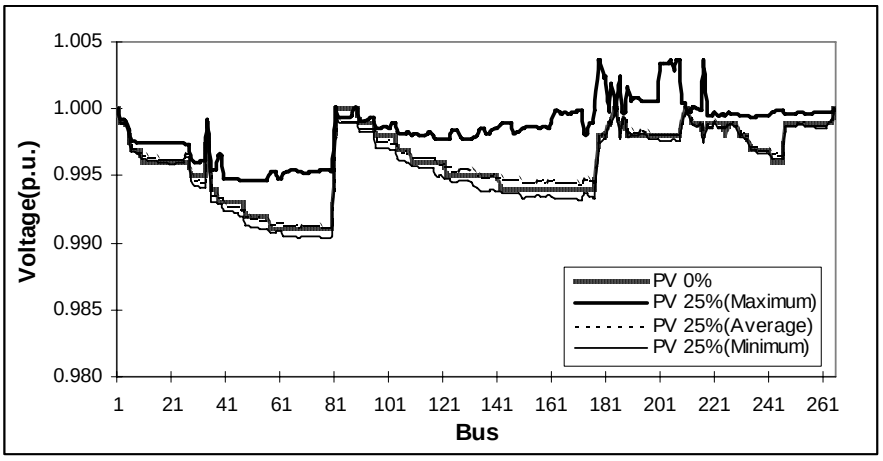
- ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบจะมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังไฟฟ้าจริงของระบบ ซึ่งการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของระบบมีค่าน้อยลง และส่งผลต่อค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบด้วย เพราะเมื่อค่ากำลังไฟฟ้าจริงมีค่าน้อยลง ในขณะที่ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เพาเวอร์แฟคเตอร์ก็จะมีค่าลดน้อยลง
- ค่าของเพาเวอร์แฟคเตอร์ที่ได้ เมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าน้อยลง แต่ก็มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและข้อกำหนดที่ได้กำหนดไว้ ถึงแม้ว่าระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะมีขนาดถึง 25% ของโหลดทั้งหมด แสดงให้เห็นถึงความมีเสถียรภาพของระบบจำหน่ายระบบนี้ด้วย

และเพื่อให้สามารถทราบแนวโน้มของผลกระทบที่จะเกิดขึ้นในระบบจำหน่าย เมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ จึงได้จำลองการทำงานโดยเพิ่มการสุ่มตำแหน่งในการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์เป็น 2 ตำแหน่ง และทำการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเท่ากันจำนวน 2 ระบบ มีขนาดรวมเป็น 10% และ 25% ของโหลดทั้งหมด ในการจำลองการทำงานนี้ จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ผลกระทบจากการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถที่จะกำหนดตำแหน่งในการติดตั้งได้

การสุ่มตำแหน่งการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ตำแหน่ง



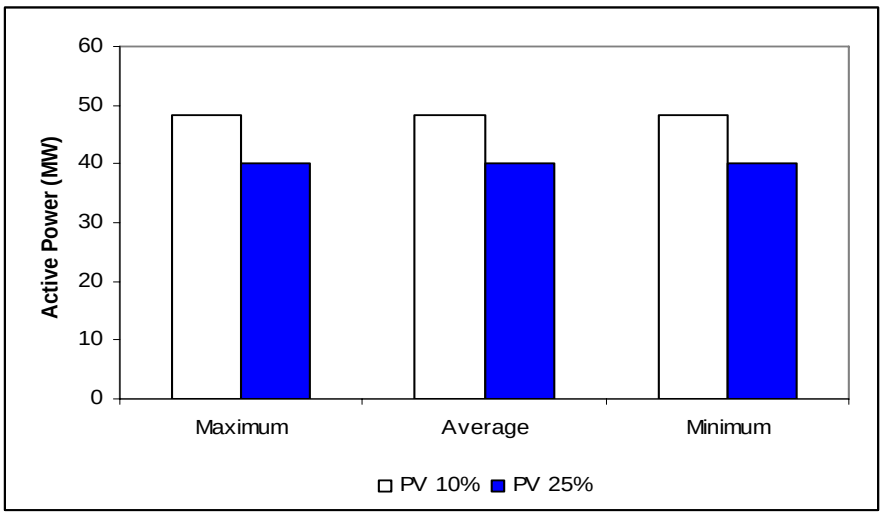
รูปที่ 4.6 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% ของโหลดทั้งหมด



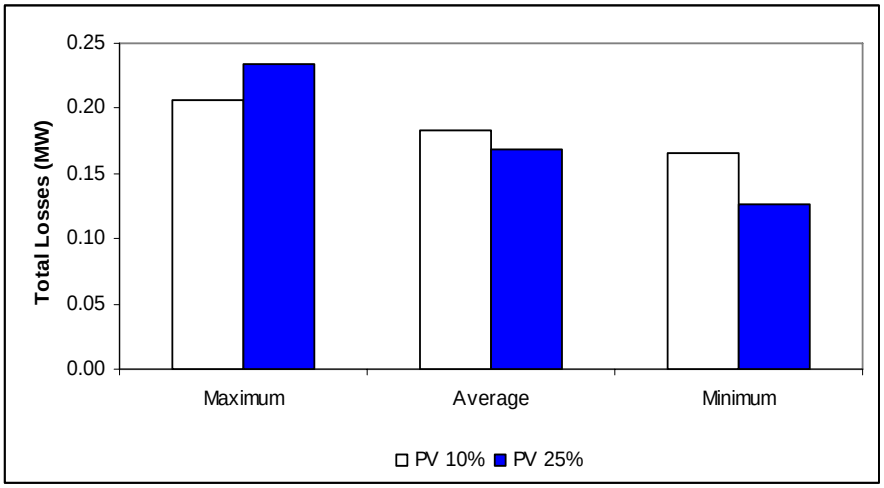
รูปที่ 4.7 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 25% ของโหลดทั้งหมด

เมื่อพิจารณากราฟแรงดันไฟฟ้า เมื่อมีการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ตำแหน่ง พบว่า

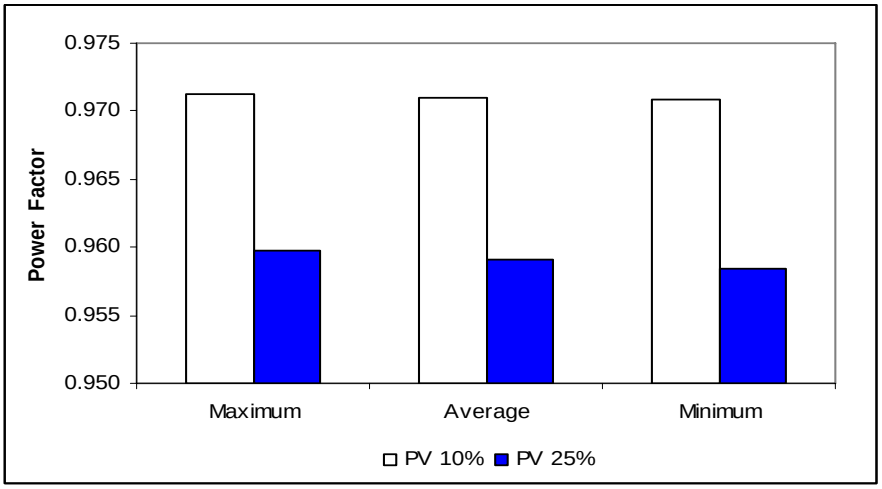
- ลักษณะของกราฟแรงดันไฟฟ้าในรูปที่ 4.6 และ 4.7 คล้ายกับกราฟแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการสุ่มตำแหน่งในการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 1 ตำแหน่ง ถึงแม้ว่าขนาดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งในระบบจำหน่าย ในทั้ง 2 ตำแหน่งนั้น แต่ละตัวจะมีขนาดเท่ากับครึ่งหนึ่งของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการติดตั้งโดยการสุ่มตำแหน่งเพียง 1 ตำแหน่ง แต่ขนาดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์รวมมีค่าเท่ากัน
- ลักษณะกราฟของแรงดันไฟฟ้า ขณะก่อนและหลังติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าเริ่มต้นที่บัสที่ 1 จะมีค่าประมาณ 1 p.u. และจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกที่บัสที่ 82 เนื่องจากบัสที่ 1 และ 82 เป็นบัสต้นทางของสายป้อนที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จึงทำให้กราฟแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองการทำงานมีลักษณะเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นช่วง ๆ นอกจากนี้ พบว่าในการสุ่มตำแหน่งการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ตำแหน่ง เมื่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดเป็น 10% และ 25% ของโหลดรวมทั้งหมด ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่บัส 58 ถึง 81 ประมาณ 0.9929 p.u. และ 0.9955 p.u. ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับในกรณีที่สุ่มตำแหน่งการติดตั้งเพียง 1 ตำแหน่ง
- ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ได้ ในการจำลองการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ตำแหน่งใดๆ จำนวนกี่ตำแหน่งก็ตาม แสดงให้เห็นว่า ค่าของแรงดันไฟฟ้าของระบบจำหน่ายที่ได้ หลังการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นั่นคือสามารถช่วยปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายให้ดีขึ้น นั่นเอง



รูปที่ 4.8 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10%และ 25% ของโหลดทั้งหมด



รูปที่ 4.9 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10%และ 25% ของโหลดทั้งหมด



รูปที่ 4.10 ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์เมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% และ 25% ของโหลดทั้งหมด

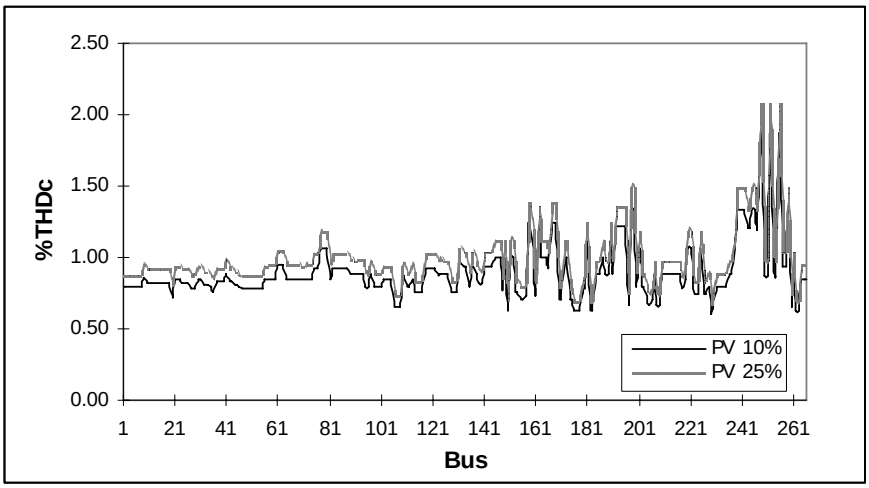
หลังจากนั้นได้พิจารณาผลการจำลองการทำงานในด้านกำลังไฟฟ้าจริงของระบบ กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ พบว่า

- ค่ากำลังไฟฟ้าจริงมีค่าใกล้เคียงกันกับกรณีที่สุ่มตำแหน่งการติดตั้ง 1 ตำแหน่ง เนื่องจากว่าขนาดรวมของระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากัน จึงทำให้มีค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ป้อนเข้าสู่ระบบจำหน่าย ซึ่งเป็นการลดโหลดของระบบลงบางส่วนมีขนาดที่เท่ากัน

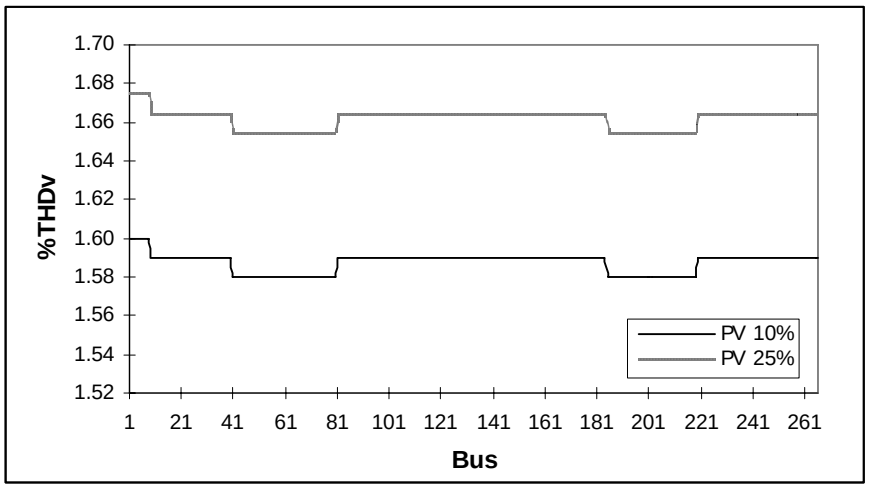
- ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในการสุ่มตำแหน่งในการติดตั้ง 1 และ 2 ตำแหน่ง มีลักษณะที่ไม่เห็นชัดเจนว่าระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถช่วยลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย เนื่องจากการลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายให้ได้มากที่สุด นั้น ต้องอาศัยการหาค่าความเหมาะสมที่สุด (Optimal) ระหว่างขนาดของระบบที่นำมาเชื่อมต่อ ลักษณะของโหลดในระบบจำหน่าย และตำแหน่งของการเชื่อมต่อ ซึ่งการหาค่าความเหมาะสมนั้นมีความคล้ายคลึงกันกับปัญหาในการหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งตัวเก็บประจุ (Capacitor placement) เพื่อปรับปรุงแรงดันและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่าย
- เมื่อพิจารณาค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบ ค่าที่ได้ก็จะมีค่าใกล้เคียงกันกับกรณีการสุ่มตำแหน่งในการติดตั้ง 1 ตำแหน่ง เนื่องจากค่ากำลังไฟฟ้าจริงของระบบในทั้ง 2 กรณีมีค่าเท่ากัน

ในส่วนของค่าฮาร์มอนิกส์ ที่ได้จากการจำลองการทำงานโดยป้อนค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ในแต่ละลำดับคี่เข้าไปในระบบจำหน่ายในเฉพาะโหลดบัส และพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัส เพื่อนำมาคำนวณดูค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส (%THDc) และค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน (%THDv) พบว่า

- ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแสและแรงดัน ที่ได้จะให้ค่าที่อยู่ในขีดจำกัดของมาตรฐานที่กำหนดไว้ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าฮาร์มอนิกส์ที่ถูกจ่ายเข้าไปในระบบจำหน่ายไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไฟฟ้า
- เมื่อพิจารณาลักษณะของกราฟที่ได้แล้วนั้นจะเห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส เมื่อมีขนาดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งเพิ่มมากขึ้นจะมีค่าสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาในแต่สายป้อนจะพบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส จะมีค่าสูงในช่วงของสายป้อนที่ 4 3 2 และ 1 ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากว่าสายป้อนที่ 4 มีจำนวนบัสทั้งหมด 48 บัส แต่มีโหลดบัสอยู่ถึง 13 บัส และในสายป้อนที่ 3 ที่มีจำนวนบัสทั้งหมด 40 บัส โหลดบัสมีอยู่ 13 บัส เมื่อทำการป้อนกระแสฮาร์มอนิกส์เข้าไปในระบบจำหน่ายในโหลดบัสก็อาจจะทำให้กระแสฮาร์มอนิกส์ในสายป้อนที่ 4 และ 3 มีค่าสูงกว่าในสายป้อนที่ 2 และ 1
- เมื่อพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน จะพบว่าช่วงสายป้อนที่ 1 และ 2 จะมีค่าสูง อาจจะเป็นเพราะทั้งสองสายป้อนจะมีค่าโหลดสูงมากและมีจำนวนบัสมากกว่าสายป้อนที่ 3 และ 4 หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ มีระยะของสายส่งในสายป้อนยาว นั่นเอง ส่งผลให้มีค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดันสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากกราฟแล้วค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน ในแต่ละสายป้อนมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ถึงแม้ว่าจะเพิ่มขนาดของกระแสฮาร์มอนิกส์ที่ป้อนเข้าไปในระบบจำหน่าย เมื่อขนาดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน ที่ได้ก็ยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและข้อกำหนดคุณภาพและความปลอดภัยของการไฟฟ้า



รูปที่ 4.11 ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส เมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% และ 25% ของโหลดทั้งหมด

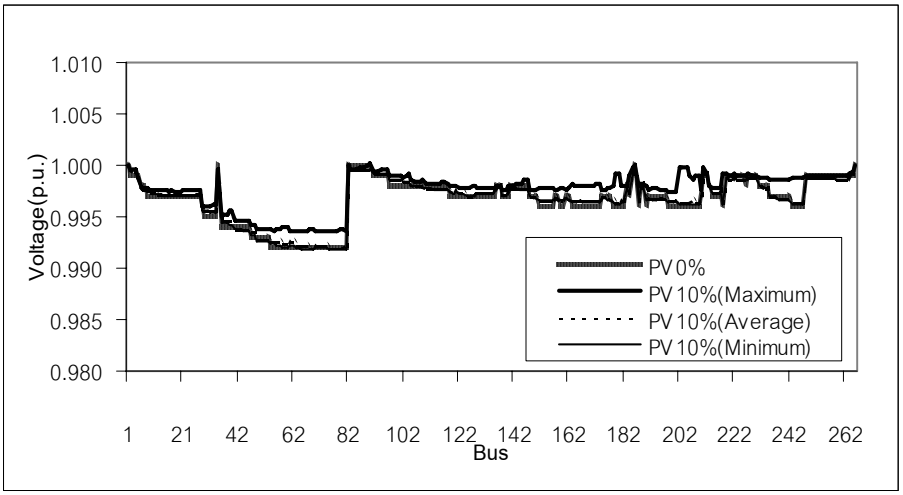


รูปที่ 4.12 ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน เมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% และ 25% ของโหลดทั้งหมด

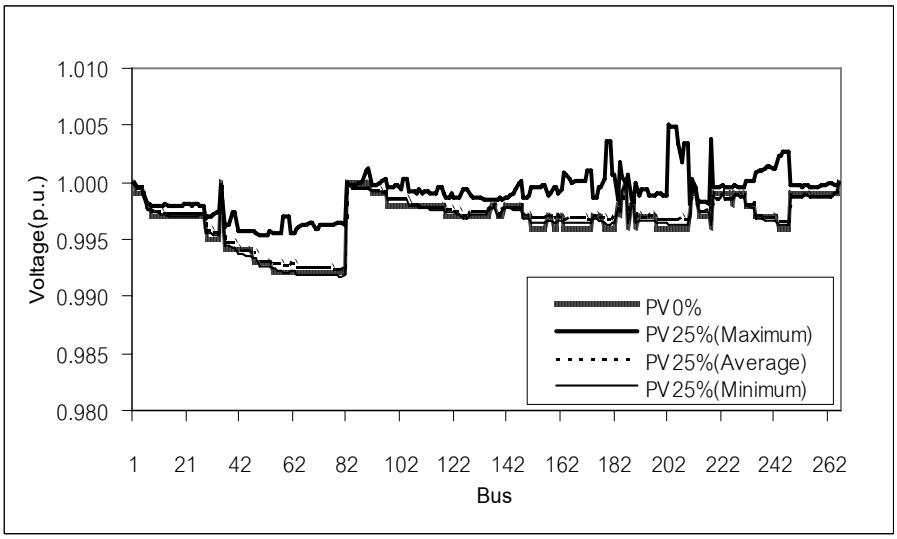
4.1.2 ระบบจำหน่ายมีลักษณะแบบลูป

ในขณะที่สวิตซ์ถ่ายโอน ทั้ง 3 ตัวอยู่ในสภาวะปิดวงจร จะเชื่อมต่อระหว่างบัส 34 กับ 84 บัส 137 กับ 183 และบัส 25 กับ 210 ซึ่งระบบจำหน่ายจะมีลักษณะเป็นลูป (Loop) โดยสุ่มตำแหน่งการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 1 และ 2 ตำแหน่ง เช่นเดียวกับ ในกรณีการจำลองการทำงานเมื่อระบบจำหน่ายมีลักษณะแบบเรเดียล ซึ่งได้ผลการจำลองการทำงานแสดงดังต่อไปนี้

การสุ่มตำแหน่งการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 1 ตำแหน่ง



รูปที่ 4.13 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% ของโหลดทั้งหมด



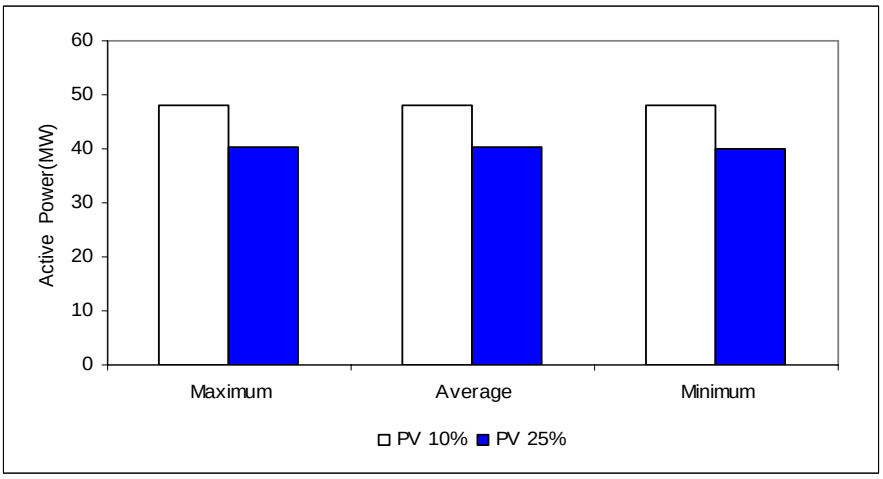
รูปที่ 4.14 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 25% ของโหลดทั้งหมด

จากกราฟของแรงดันไฟฟ้า พบว่า

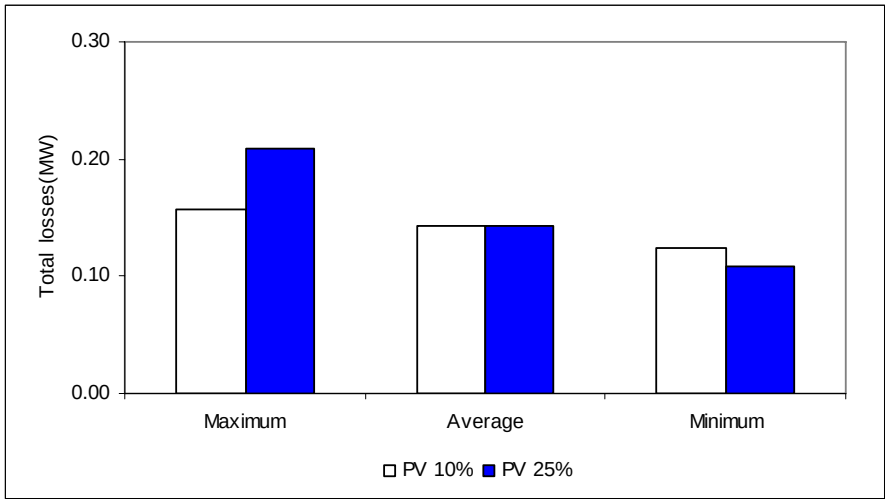
- กราฟของแรงดันไฟฟ้าที่ได้ เมื่อมีการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% ของโหลดรวมทั้งหมด มีลักษณะกราฟในช่วงสายป้อนที่ 1 (ตั้งแต่บัสที่ 1 ถึง 81) คล้ายกับในกรณีที่ระบบเป็นแบบเรเดียล ส่วนในช่วงสายป้อนที่ 2 จนถึงสายป้อนที่ 4 ค่าแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการเชื่อมต่อกันของสวิตซ์ถ่ายโอน ทั้ง 3 ตัว โดยที่สวิตซ์ถ่ายโอน ตัวที่ 1 จะเชื่อมต่อสายป้อนที่ 1 เข้ากับสายป้อนที่ 2 (บัส 34 ต่อกับบัส 84) ซึ่งเป็นการเชื่อมต่อกันในช่วงต้นทางของสายป้อนทั้งสอง ซึ่งมีระยะไม่ห่างจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ามากนัก ส่วนสวิตซ์ถ่ายโอน ตัวที่ 2 จะเชื่อมต่อสายป้อนที่ 2 เข้ากับสายป้อนที่ 3 (บัส 137 ต่อกับบัส 183) และสวิตซ์ถ่ายโอน ตัวที่ 3 จะเชื่อมต่อสายป้อนที่ 1 เข้ากับสายป้อนที่ 3 (บัส 25 ต่อกับบัส 210) ทำให้มีการเชื่อมต่อของระบบใน 3 สายป้อน ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าตั้งแต่บัสที่ 82 จนถึง บัส 266 มีค่าใกล้เคียงกัน ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังเช่นในกรณีของระบบแบบเรเดียล

- ส่วนกราฟของแรงดันไฟฟ้า หลังการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 25% ของโหลดรวมทั้งหมด จะมีลักษณะคล้ายกับการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 10% ของโหลดรวมทั้งหมด เพียงแต่จะเห็นว่าค่าสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าที่ได้หลังการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าสูงขึ้น

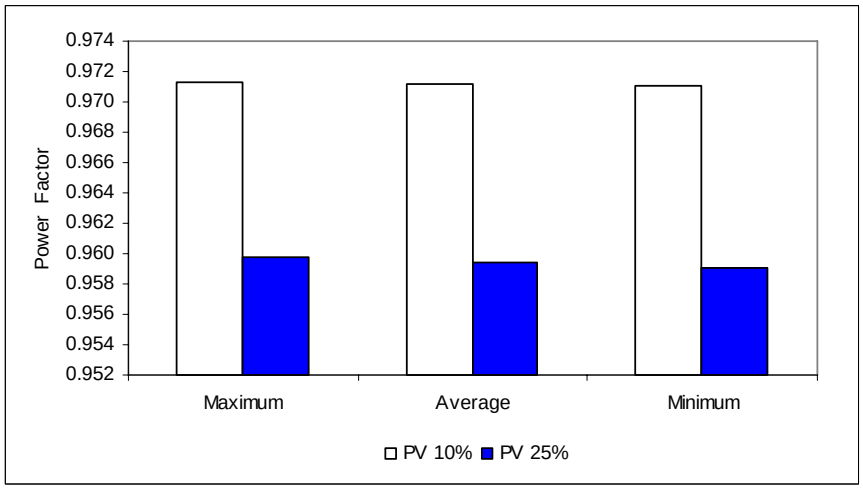
- ค่าแรงดันไฟฟ้าขณะก่อนติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าต่ำสุดที่บัส 54 ถึง 81 มีค่า 0.992 p.u. และเมื่อทำการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% และ 25% ของโหลดรวมทั้งหมด จะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัสดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.9936 p.u. และ 0.997 p.u. ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% และ 25% ของโหลดทั้งหมด



รูปที่ 4.16 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% และ 25% ของโหลดทั้งหมด



รูปที่ 4.17 ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์เมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% และ 25% ของโหลดทั้งหมด

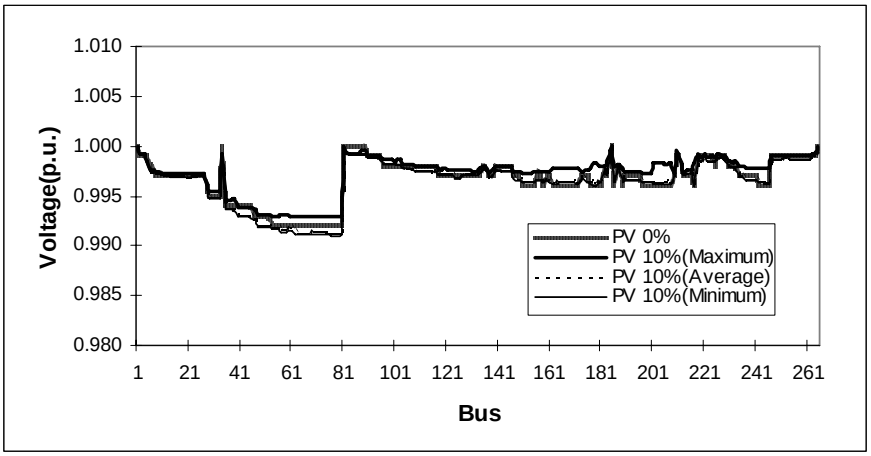
เมื่อพิจารณาผลการจำลองการทำงานในด้านกำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และเพาเวอร์แฟคเตอร์ พบว่า

- ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าขนาดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่าย ไม่ว่าจะเป็นค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูงสุด เฉลี่ย และต่ำสุดก็จะได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีความแตกต่างกันในระดับเพียง สิบกิโลวัตต์ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดพิกัดของระบบจำหน่ายที่มีค่ามากถึง 100 เมกกะวัตต์

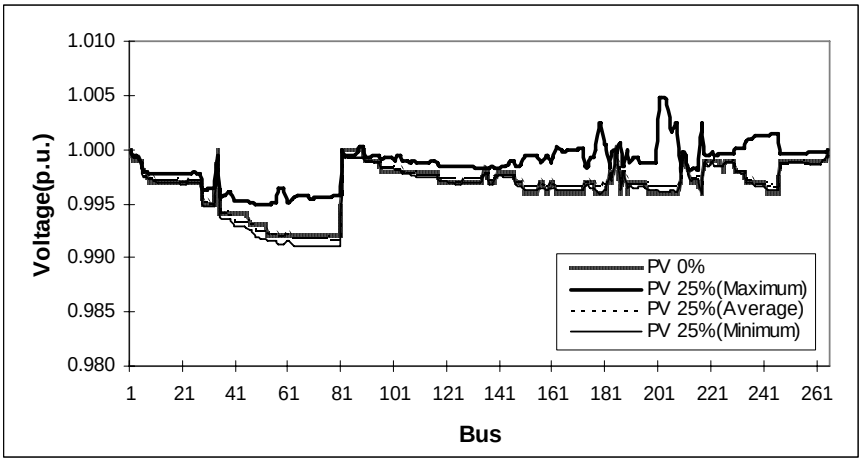
- ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงสุด เมื่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาด 10% ของโหลดรวมทั้งหมด มีค่าต่ำกว่าเมื่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาด 25% ของโหลดรวมทั้งหมด ในขณะที่ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเฉลี่ยที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกันมากจนถือได้ว่ามีค่าเท่ากัน และเมื่อพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำสุด เมื่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาด 25% ของโหลดรวมทั้งหมดจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาด 10% ของโหลดรวมทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าเมื่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดเพิ่มมากขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียก็จะมีโอกาสที่จะมีค่ามากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็มีโอกาสที่จะช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียให้มีค่าน้อยลงได้เช่นกัน ดังนั้น หากในการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายมีจุดประสงค์เพื่อที่จะช่วยลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียภายในระบบจำหน่ายแล้วนั้น ต้องพิจารณาหาค่าความเหมาะสมที่สุด (Optimal) ระหว่างขนาดของระบบที่นำมาเชื่อมต่อ ลักษณะของโหลดในระบบจำหน่าย และตำแหน่งของการเชื่อมต่อ ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว

- ในส่วนของค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์จะพบว่า มีค่าใกล้เคียงกับผลการจำลองการทำงานเมื่อระบบมีลักษณะแบบเรเดียล เนื่องจากค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ที่ได้นั้นเกิดจากการนำค่าของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบจำหน่ายมาคำนวณ ดังนั้น เมื่อค่ากำลังไฟฟ้าจริงและค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนมีค่าใกล้เคียงกัน ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ที่ได้จึงมีค่าไม่ต่างกัน

การสุ่มตำแหน่งการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ตำแหน่ง



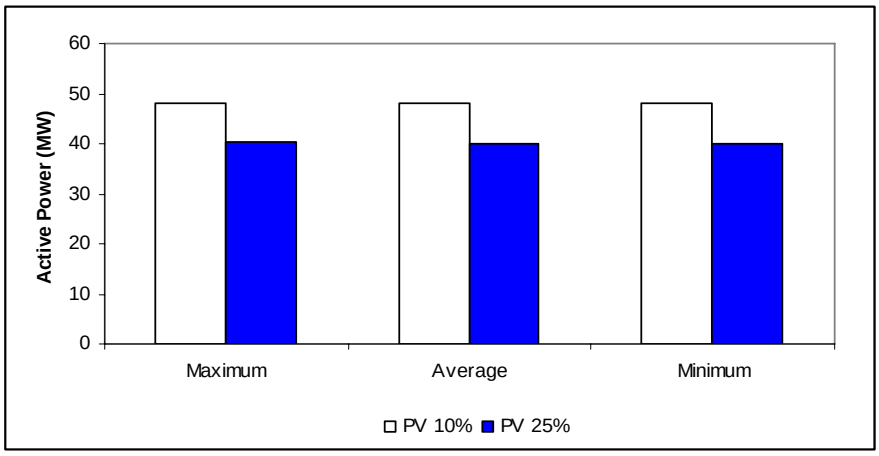
รูปที่ 4.18 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% ของโหลดทั้งหมด



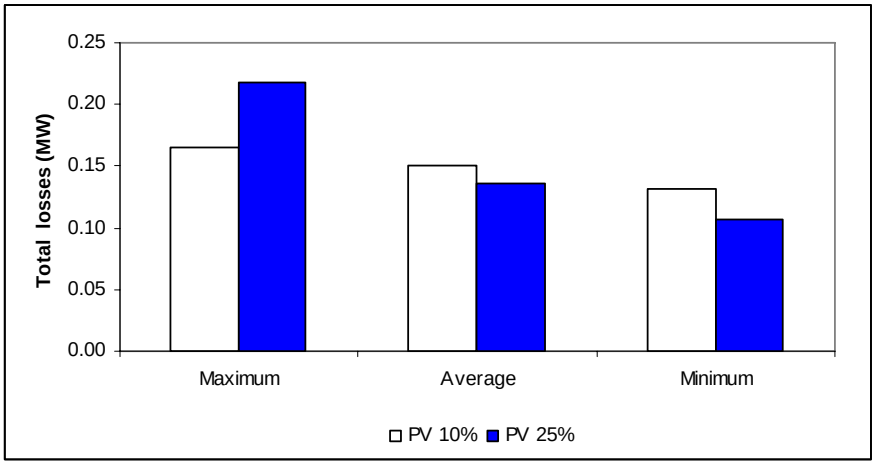
รูปที่ 4.19 ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 25% ของโหลดทั้งหมด

เมื่อมีการสุ่มตำแหน่งในการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ตำแหน่งและระบบจำหน่ายมีลักษณะเป็นลูป พิจารณาค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองการทำงาน พบว่า

- ค่าแรงดันไฟฟ้าที่บัส 54 ถึง 81 มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.9929 p.u. และ 0.9957 p.u เมื่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาด 10% และ 25% ของโหลดทั้งหมด
- ลักษณะของกราฟแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีลักษณะคล้ายกับการสุ่มตำแหน่งการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 1 ตำแหน่ง
- แรงดันไฟฟ้าในแต่ละสายป้อนจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังจะเห็นได้จากค่าของแรงดันไฟฟ้าในสายป้อนที่ 2 3 และ 4 แต่ในสายป้อนที่ 1 ค่าแรงดันไฟฟ้าจะตกที่ปลายสาย ในช่วงระหว่างบัสที่ 54 ถึง 81 ซึ่งหลังจากมีการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% ของโหลดรวมทั้งหมดเข้ากับระบบจำหน่าย แรงดันไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นไม่ชัดเจนมากนักในสายป้อนที่ 2 3 และ 4 แต่เมื่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขนาดเป็น 25% ของโหลดรวมทั้งหมดค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัสก็จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ได้มีค่า 1.0048 p.u. และถึงแม้ว่าค่าแรงดันไฟฟ้าจะสูงขึ้นแต่ก็ยังอยู่ในขอบเขตของข้อกำหนดและเกณฑ์มาตรฐานที่ได้กำหนดไว้
- หากจะเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแบบเรเดียลและลูป ก่อนการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ จะพบว่าเมื่อระบบจำหน่ายเป็นแบบลูปจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัสสูงกว่าเมื่อระบบจำหน่ายเป็นแบบเรเดียล ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบจำหน่ายแบบลูปจะมีเสถียรภาพด้านแรงดันไฟฟ้ามากกว่าระบบจำหน่ายแบบเรเดียล และหากมีการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มเข้าไปในระบบก็จะทำให้ระบบมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

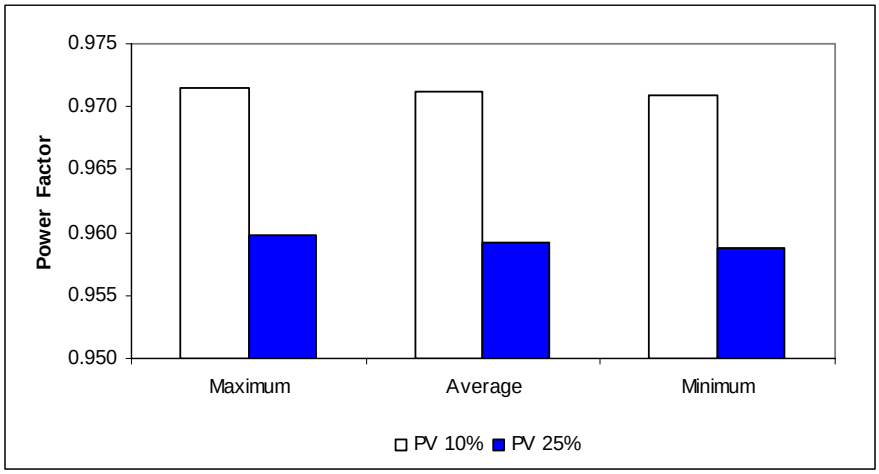


รูปที่ 4.20 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% และ 25% ของโหลดทั้งหมด



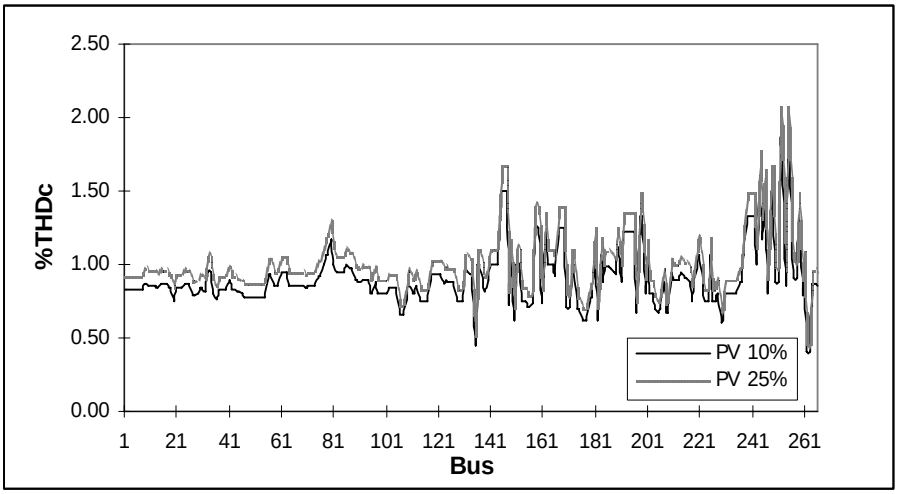
รูปที่ 4.21 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% และ 25% ของโหลดทั้งหมด

- ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของระบบจำหน่ายจะมีค่าลดลงเมื่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกันกับการจำลองการทำงานที่ผ่านมา ดังนั้น สามารถกล่าวได้ว่า การติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์เป็นการเพิ่มความสามารถในการรับภาระไฟฟ้าของระบบจำหน่าย นั่นเอง
- ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงสุดของระบบจำหน่ายจะมีลักษณะคล้ายกับทุกกรณีที่ผ่านมา คือ เมื่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดเพิ่มมากขึ้นค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงสุดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อมาพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเฉลี่ย และต่ำสุดกลับได้ผลในทางตรงข้ามกัน ดังนั้น ในการสุ่มตำแหน่งในการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะเห็นผลในการช่วยลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบจำหน่ายได้ไม่มากนัก
- ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ที่ได้ก็จะมีค่าใกล้เคียงกับกรณีอื่นๆ ที่ผ่านมา ดังเหตุผลที่กล่าวไปแล้ว

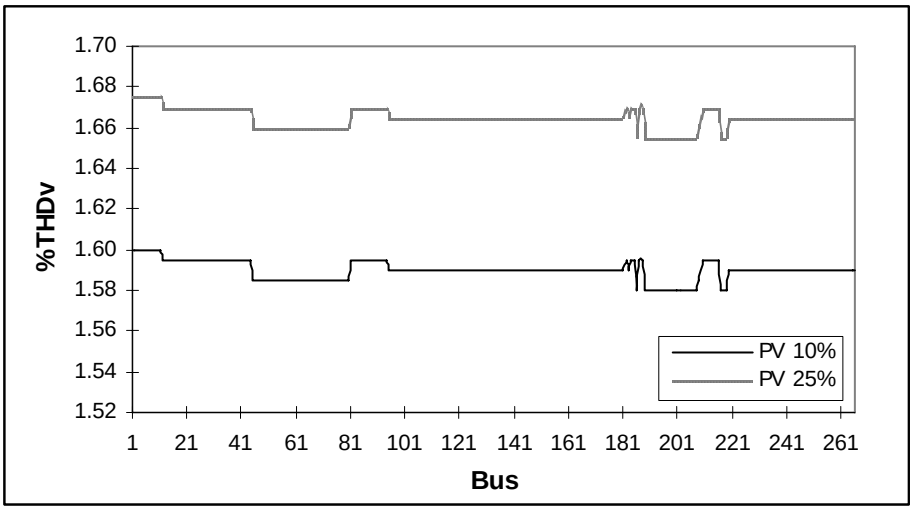


รูปที่ 4.22 ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์เมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% และ 25% ของโหลดทั้งหมด

- จากผลการจำลองการทำงานที่ผ่านมา จะเห็นว่า ระบบจำหน่ายไม่ว่าจะมีลักษณะเป็นแบบลูปหรือแบบเรเดียล ดังลักษณะของระบบจำหน่ายที่ใช้ในการจำลองการทำงาน เมื่อมีการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดใหญ่เข้ากับระบบจำหน่ายจะส่งผลในด้านบวกกับระบบจำหน่าย โดยจะช่วยในการปรับปรุงแรงดันไฟฟ้า และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการรับภาระทางไฟฟ้า โดยไม่ส่งผลต่อค่าคุณภาพกำลังไฟฟ้า ถึงแม้ว่าในการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบจำหน่ายจะส่งผลทำให้เกิดค่าฮาร์มอนิกส์ในระบบจำหน่าย แต่ค่าของฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นไม่ว่าระบบจำหน่ายจะเป็นแบบเรเดียลหรือแบบลูปก็จะอยู่ในเกณฑ์ของมาตรฐานและข้อกำหนดที่กำหนดไว้
- ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนของฮาร์มอนิกส์รวมของกระแสและแรงดันมีลักษณะคล้ายกับระบบจำหน่ายแบบเรเดียล โดยเมื่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดเพิ่มมากขึ้นค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนของแรงดันและกระแสก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่าย เพราะยังมีค่าอยู่ในขอบเขตข้อกำหนดและเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้
- โดยจากการจำลองการทำงานค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแสจะมีค่าสูงที่สุดในช่วงสายป้อนที่ 4 คือ 1.887 % และ 2.095 % เมื่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดเป็น 10% และ 25% ของโหลดรวมทั้งหมด ตามลำดับ และมีแนวโน้มของกราฟคล้ายกับในกรณีของระบบจำหน่ายแบบเรเดียล ซึ่งมีค่าไม่เกิน 5% ตามที่ข้อกำหนดและเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้
- ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน มีค่ามากที่สุดประมาณ 1.6023% และ 1.686% เมื่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดเป็น 10% และ 25% ของโหลดรวมทั้งหมด ซึ่งไม่เกิน 4% ตามที่ข้อกำหนดและเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้



รูปที่ 4.23 ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส เมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% และ 25% ของโหลดทั้งหมด



รูปที่ 4.24 ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน เมื่อติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 10% และ 25% ของโหลดทั้งหมด

4.2 ผลการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับข้อกำหนดและเกณฑ์มาตรฐาน

จากที่ทราบแล้วว่าได้มีการจัดทำข้อกำหนดและมาตรฐานเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์มากมายเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน (Personnel Safety) และเป็นการกำหนดเกี่ยวกับคุณภาพกำลังไฟฟ้า (Power Quality) ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำการเชื่อมต่อ ซึ่งข้อกำหนดและมาตรฐานต่าง ๆ ได้มีการนำมาใช้งานอย่างมากมายในต่างประเทศ เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้มีการใช้มาตรฐาน NFPA, NEC , UL และ IEEE ซึ่งมาตรฐาน UL จะเป็นการทดสอบในด้านความปลอดภัยของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และอินเวอร์เตอร์ ส่วนมาตรฐาน IEEE จะเป็นการข้อกำหนดเกี่ยวกับความเชื่อถือได้ (Reliability) และ ความปลอดภัยของอุปกรณ์ รวมทั้งความปลอดภัยในการเชื่อมต่อกับระบบการไฟฟ้า นอกจากนี้แล้วในประเทศอื่น ๆ ได้มีการใช้มาตรฐานและข้อกำหนดต่าง ๆ เช่น IEC , AS , JIS , DIN , CA เป็นต้น

อย่างไรก็ตามการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์เข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าสำหรับประเทศไทยจะต้องมีการพิจารณาระเบียบข้อกำหนดจากการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย (การไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค) เป็นมาตรฐานหลักโดยที่สามารถอ้างอิงมาตรฐานจากต่างประเทศได้ เช่น IEEE 929 , UL 1741 และ IEC 1727 ซึ่งสามารถสรุปเป็นสังเขปได้ดังนี้

- แรงดันกระเพื่อม(ระเบียบการเดินเครื่องขนานกับการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายไม่เกิน 1 MW)
  - พิจารณาตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย (PRC-PQG-02/1998)

- ความถี่ไฟฟ้า(ระเบียบการเดินเครื่องขนานกับการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายไม่เกิน 1 MW)
  - พิจารณาการตอบสนองสภาวะที่เกิดความผิดปกติในระบบของการไฟฟ้าตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย เนื่องจากมาตรฐานจากต่างประเทศใช้ระบบความถี่ 60 Hz

- Power Factor (ระเบียบการเดินเครื่องขนานกับการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายไม่เกิน 1 MW)
  - พิจารณาตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย

- ฮาร์มอนิกส์(ระเบียบการเดินเครื่องขนานกับการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายไม่เกิน 1 MW)
  - พิจารณาตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย (PRC-PQG-01/1998), IEEE 929-2000, IEC 61727, UL 1741-1999

ทำการเปรียบเทียบข้อกำหนดและมาตรฐานต่างๆ ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อและผลการจำลองการทำงานเพื่อให้ได้ความเชื่อถือได้และความปลอดภัยของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อ และทำการเปรียบเทียบค่าของผลการจำลองการทำงานกับข้อกำหนดและมาตรฐาน ดังที่ได้กล่าวข้างต้นแล้ว โดยแบ่งการพิจารณาออกเป็น 4 ส่วน ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 คือ

1. แรงดันกระเพื่อม(Voltage Fluctuation)
2. ความถี่ไฟฟ้า(Frequency)
3. ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์(Power Factor)
4. ค่าฮาร์มอนิกส์(Harmonics)

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์เปรียบเทียบกับค่าข้อกำหนด/มาตรฐาน

	ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อ	**ข้อกำหนดของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย**	**มาตรฐาน IEEE Std. 929-2000**
แรงดันกระเพื่อม ที่จุด PCC	79.5- 95.4%	88-110%	88-110%
ความถี่ ที่จุด PCC	50 ± 0.2 Hz	50 ± 0.5 Hz	50±0.42 Hz
เพาเวอร์แฟคเตอร์ ที่จุด PCC	>0.85	>0.85	>0.85
	ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อ	**ข้อกำหนดของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย**	**มาตรฐาน IEEE Std. 519-1992**
เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส (%THDc)	<5%	<5%	<5%
เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน (%THDv)	<4%	<4%	<5%

จากการเปรียบเทียบข้อมูลของระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับข้อกำหนดและเกณฑ์มาตรฐาน พบว่า

- ระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าแรงดันกระเพื่อมที่ต่ำกว่าข้อกำหนดและเกณฑ์มาตรฐานซึ่งน่าจะเกิดจากสาเหตุของการตั้งแท็ปของหม้อแปลง หรือการตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าที่อินเวอร์เตอร์ต่ำเกินไป
- ส่วนค่าความถี่ เพาเวอร์แฟคเตอร์ ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแสและแรงดัน มีค่าอยู่ในข้อกำหนดและเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าของผลการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับค่าข้อกำหนด/มาตรฐาน

	ผลการจำลองการทำงาน				ข้อกำหนดของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย	มาตรฐาน IEEE Std. 929-2000
	เรเดียล		ลูป			
	10%	25%	10%	25%		
	สุ่มการติดตั้งระบบ PV 1 ตำแหน่ง					
แรงดันไฟฟ้า	0.9909-1.0012 p.u.	0.9909-1.0066 p.u.	0.9917-1.0002 p.u.	0.9917-1.0050 p.u.	0.88-1.1 p.u.	0.88-1.1 p.u.
เพาเวอร์แฟคเตอร์	0.9712	0.9596	0.9713	0.9597	>0.85	>0.85
	สุ่มการติดตั้งระบบ PV 2 ตำแหน่ง					
แรงดันไฟฟ้า	0.9904-1.0012 p.u.	0.9904-1.0037 p.u.	0.9910-1.0000 p.u.	0.9910-1.0048 p.u.	0.88-1.1 p.u.	0.88-1.1 p.u.
เพาเวอร์แฟคเตอร์	0.9708	0.9584	0.9709	0.9588	>0.85	>0.85
	ผลการจำลองการทำงาน				ข้อกำหนดของการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย	มาตรฐาน IEEE Std. 519-1992
	เรเดียล		ลูป			
	10%	25%	10%	25%		
เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส (%THDc)	1.875	2.083	1.887	2.095	<5%	<5%
เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน (%THDv)	1.60	1.675	1.6023	1.686	<4%	<5%

จากการเปรียบเทียบข้อมูลของระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับข้อกำหนดและเกณฑ์มาตรฐาน พบว่า

- ระบบจำหน่ายจะมีลักษณะแบบเรเดียลหรือแบบลูป ผลของการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่า การติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบจำหน่าย ส่งผลกระทบต่อค่าของคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายในทิศทางเป็นบวก ทั้งด้านแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริงของระบบ กำลังไฟฟ้าสูญเสีย ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแสและแรงดัน ก็มีค่าอยู่ในขอบเขตของข้อกำหนดและเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

เป้าหมายของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาผลกระทบด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าบนระบบจำหน่ายของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้ข้อสมมติฐานที่ว่า ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายมีแนวโน้มการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายนั้น การไฟฟ้าไม่สามารถกำหนดตำแหน่งในการติดตั้งได้ จึงได้จำลองการทำงานโดยการสุ่มตำแหน่งในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ 1 และ 2 ตำแหน่ง พบว่า

- การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบจำหน่ายส่งผลกระทบต่อการไหลของกำลังไฟฟ้า และลักษณะของแรงดันไฟฟ้าในแง่บวก เพราะสามารถช่วยปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าตลอดสายป้อน และเพิ่มความสามารถในการรับโหลดของระบบจำหน่าย

- การช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ทำการเชื่อมต่อ ซึ่งอาจจะไม่เห็นผลชัดเจนเท่าที่ควร เพราะในการจำลองการทำงานเป็นการสุ่มตำแหน่งการติดตั้ง ดังนั้นหากต้องการลดการสูญเสียในระบบจำหน่ายให้ได้มากที่สุด ต้องหาค่าความเหมาะสมที่สุด (optimal) ระหว่างขนาดของระบบที่นำมาเชื่อมต่อ ลักษณะของโหลดในระบบจำหน่าย และตำแหน่งของการเชื่อมต่อ

- เปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนของกระแสและแรงดันมีค่าอยู่ในขีดจำกัดของข้อกำหนดและมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้

ดังนั้น สามารถกล่าวได้ว่าการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายส่งผลกระทบต่อคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายในทิศทางบวก ในด้านแรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า สูญเสีย กำลังไฟฟ้าจริงของระบบ ทั้งนี้ ยังสามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบจำหน่าย และประวิงเวลาสำหรับการลงทุนเพื่อขยายหรือปรับปรุงระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินการวิจัยผลกระทบด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์บนระบบจำหน่าย สามารถวิเคราะห์เบื้องต้นได้แต่เพื่อให้ได้คำตอบที่ชัดเจนยิ่งขึ้น และสามารถพิจารณาองค์ประกอบหรือปัจจัยอื่นๆ ได้ ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะ ดังนี้

1. ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการศึกษามีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ดังนั้นควรมีการเก็บข้อมูลระบบที่มีขนาดใหญ่(หลายเมกกะวัตต์)
2. ระบบจำหน่ายที่ใช้ในการจำลองการทำงานมีสายส่งไฟฟ้าที่มีระยะทางสั้น ทำให้ไม่เห็นความเปลี่ยนแปลงมาก จึงควรลองทดสอบกับระบบที่มีความยาวสายส่งมากขึ้นกว่านี้

เอกสารอ้างอิง

1. จัตตุฤทธิ์ ทองปรอน, 2547, **การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพไฟฟ้าของการเชื่อมต่อระบบแผงโซล่าเซลล์กับระบบจำหน่าย**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 3-5.

2. International Energy Agency, “Total photovoltaic power installed in IEA PVPS countries”, **Report IEA-PVPS**, October 2005.

3. สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548, โครงการศึกษาผลกระทบกับระบบจำหน่ายจากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ในเขตเมือง, **รายงานโครงการของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน**, หน้า 5-38.

4. อุมารินทร์ แสงพานิช, 2545, **การศึกษาคุณภาพกำลังไฟฟ้าของระบบโซล่าเซลล์ที่เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี , หน้า 1-32.

5. แผนกสารนิเทศ กองพัฒนาพลังงานทดแทน สำนักงานวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2539, โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ แห่งแรกในประเทศไทย 7 ปี แห่งการใช้งาน, **วารสาร กฟผ.**, ปีที่ 5, เล่มที่ 1, หน้า 3-68.

6. สุรพล มงคลวรวรรณ, 2536, สถานีทดลองพลังงานทดแทนจากเซลล์แสงอาทิตย์, **วารสาร กฟผ.**, ปีที่ 2, เล่มที่ 4 , หน้า 57-58.

7. กมลพร นาครทรรพ, 2539, ทางเลือกใหม่การผลิตและจำหน่ายไฟฟ้าแสงอาทิตย์, **วารสาร กฟผ.**, ปีที่ 5, เล่มที่ 3, หน้า 43-52.

8. ยุทธชาติ, 2543, เซลล์แสงอาทิตย์จากสนามทดลองสู่สาธารณชน, **วารสาร กฟผ.**, ปีที่ 30, ฉบับที่ 7, หน้า 12-14.

9. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ฝ่ายพัฒนาระบบไฟฟ้า, 2541, **การจ่ายไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทนแบบผสม**, หน้า 1-2.

10. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, http://www.dedp.go.th [20 กันยายน 2549].

11. กองพัฒนาพลังงานทดแทน สำนักวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2541, ระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคาบ้าน 10 หลัง, **วารสาร กฟผ.**, ปีที่ 7, เล่มที่ 1, หน้า 52-59.

12. คณะกรรมาธิการการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร คณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ส่วนราชการ รัฐวิสาหกิจและภาคเอกชน, 2542, **พลังของแผ่นดิน**.

13. ฝ่ายสารนิเทศและบริการ กองแผนงาน กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2545, โครงการสาธิตระบบและผลิตจำหน่ายไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ระยะที่ 2, **สรุปข่าวพลังงาน**, ปีที่ 28, ฉบับที่ 9, หน้า 7.

14. Reinbard Hass, 2002, "Building PV Markets the Impact of Financial Incentives", **Renewable Energy World**, Vol. 5, No. 4, pp. 184-201.

15. Harad N. Rostvik, 2001, "Solar Energy in Srilanga", **Refocus**, Nov.-Dec.2001, p.7.

16. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, คณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า, 2541, **ข้อกำหนดกฎเกณฑ์แรงดันกระเพื่อมเกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม**, หน้า 1-16.

17. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, คณะกรรมการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า, 2541, **ข้อกำหนดกฎเกณฑ์ฮาร์มอนิกส์เกี่ยวกับไฟฟ้าประเภทธุรกิจและอุตสาหกรรม**, หน้า 1-17.

18. IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) System : Std. 929-2000.

19. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems: Std. 519-1992.

20. The Guideline for Grid Connected Dispersed Power Generators: JEAG 9701-1993.

21. DeBuck, P.F., Neal, R.W., 1981, "Assessment of the Effects of Distributed Photovoltaic Systems on Utility Sub-transmission and Distribution Networks", **Proceedings of the 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, Kissimmee, Florida, pp. 299-304.

22. Dugan, R.C., Jewell., W.T., Roesler, D.J., 1983, "Harmonics and reactive Power from Line Commutated Inverters in Proposed Photovoltaic Subdivision", **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-102, No. 9, September 1983, pp. 3218-3225.

23. Fitzer, J., Dillon, W.E., 1986, "Impact of Residential Photovoltaic Power System on the Distribution Feeder", **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. EC-1, No.4, December 1986, pp. 39-42.

24. Korovesis, P.N., Vokas, G.A., Gonos, I.F., "Influence of Large-Scale Installation of Energy Saving Lamps on the Line Voltage Distortion of a Weak Network Supplied by Photovoltaic Station", **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 19, No. 4, October 2004, pp. 1787-1793.

25. Meinhardt, M., Cramer, G., 2000, "Past, Present and Future of Grid Connected Photovoltaic and Hybrid-Power Systems", **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-109, No. 6, pp. 1283-1288.

26. Woyte, A., Van den Keybus, J., Belmans, R., Nijs, J., 2000, "Grid-Connected Photovoltaic in the Urban Environment-An Experimental Approach to System optimization", **IEE Power Electronics and Variable Speed Drives**, No. 475, 18-19 September 2000, pp. 548-553.

27. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality: Std. 1159-1995.

28. โตศักดิ์ ทัศนานุตริยะ, 2540, **การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง**, ซีเอ็ดยูเคชั่น, หน้า 561-636.

29. กฤษดา วิศาธีรานนท์, 2536, **Inverter หลักการทำงาน และเทคนิคการใช้งาน**, เอฟ เอ เทค, หน้าที่ 22-102.

30. Robert W Erickson, 2000, **Fundamentals of Power Electronics**, Kluwer Academic Publishers, p. 773.

31. บริษัท เอบีบี จำกัด(ธุรกิจคาร์ปาซิเตอร์และคอนโทรล), 2544, **เทคนิคการเพิ่มคุณภาพกำลังไฟฟ้าด้วยคาปาซิเตอร์**, หน้า 129-133.

32. มนัส อรุณวัฒนาพร, 2544, **ฮาร์มอนิกส์และผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้ากำลัง**, เทคโนโลยีไฟฟ้า, เม.ย.-พ.ค. 2544, หน้า 23-31.

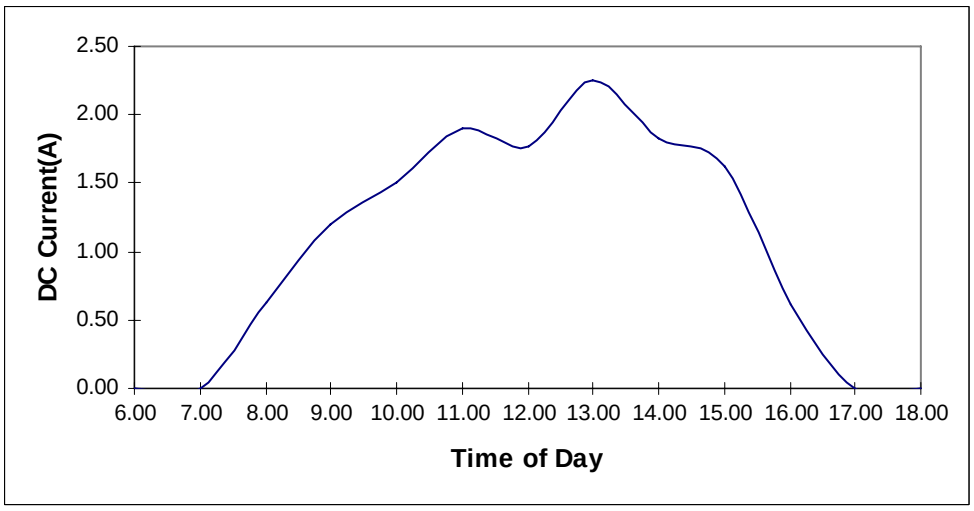
33. Theraja, B.L., Theraja, A.K. 1991, **A Text Book of Electrical Technology**, Publication Division of Nirja Construction & Development , p. 66.

ภาคผนวก ก

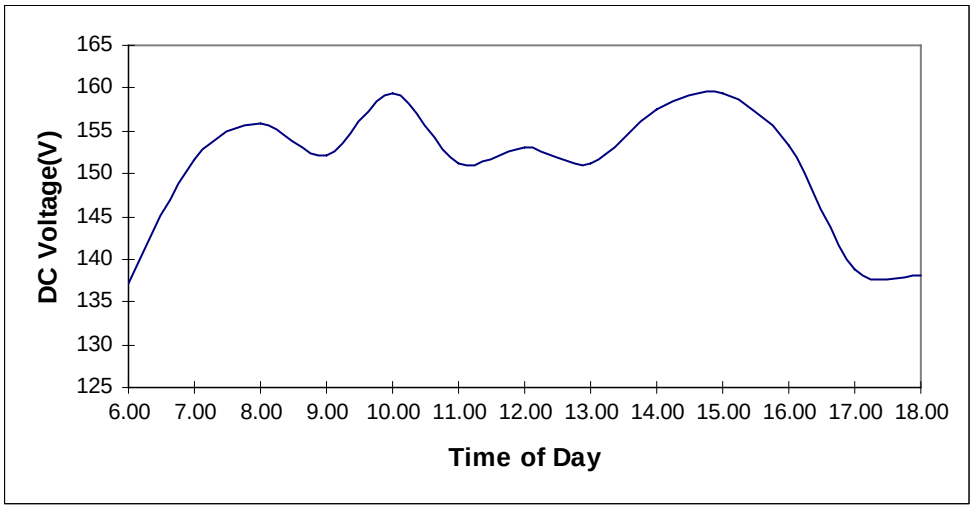
ผลการเก็บข้อมูลเฉลี่ยในช่วงที่เก็บข้อมูล

ผลการเก็บข้อมูลเฉลี่ยในช่วงที่เก็บข้อมูล

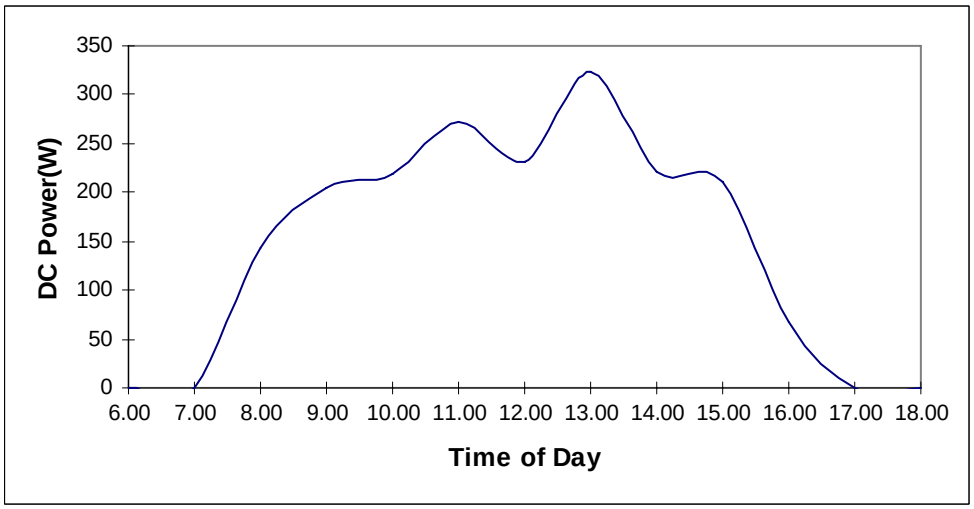
ข้อมูลทางด้านไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ ก.1 ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

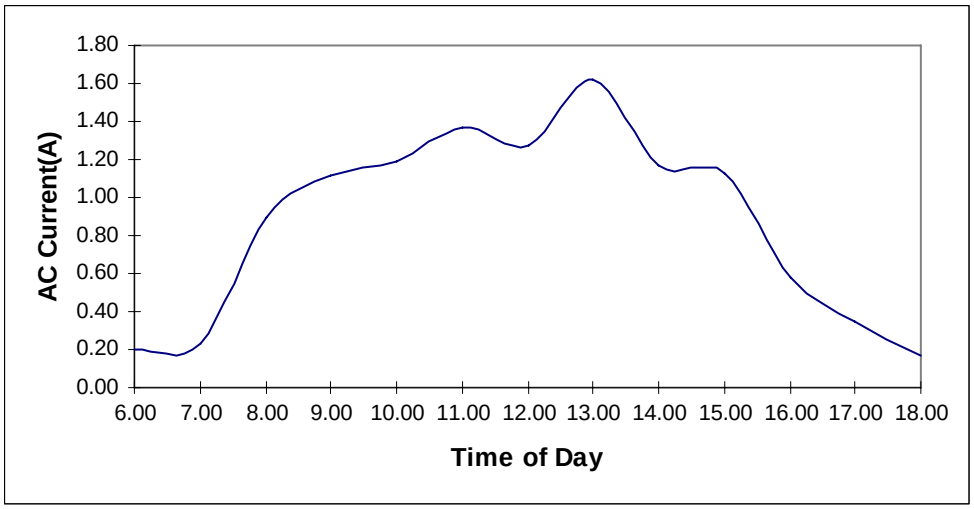


รูปที่ ก.2 ค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

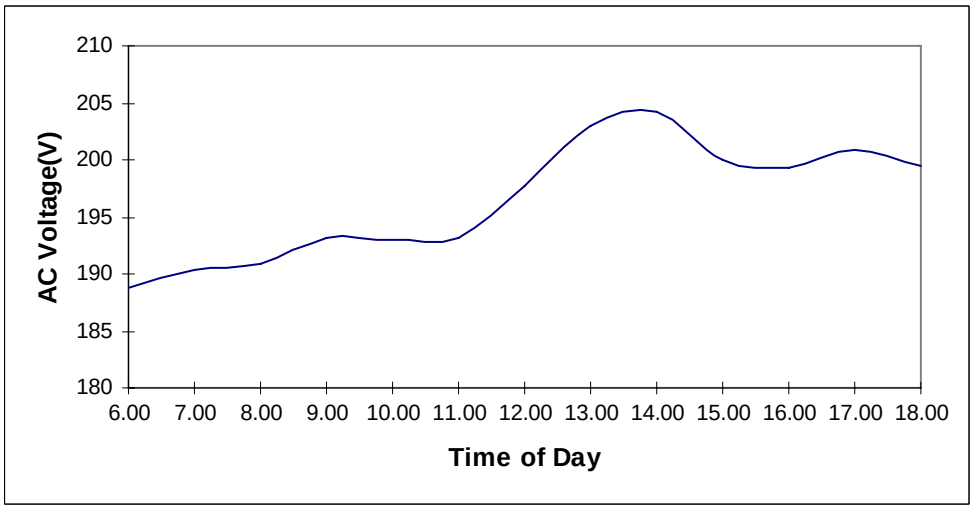


รูปที่ ก.3 ค่ากำลังไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

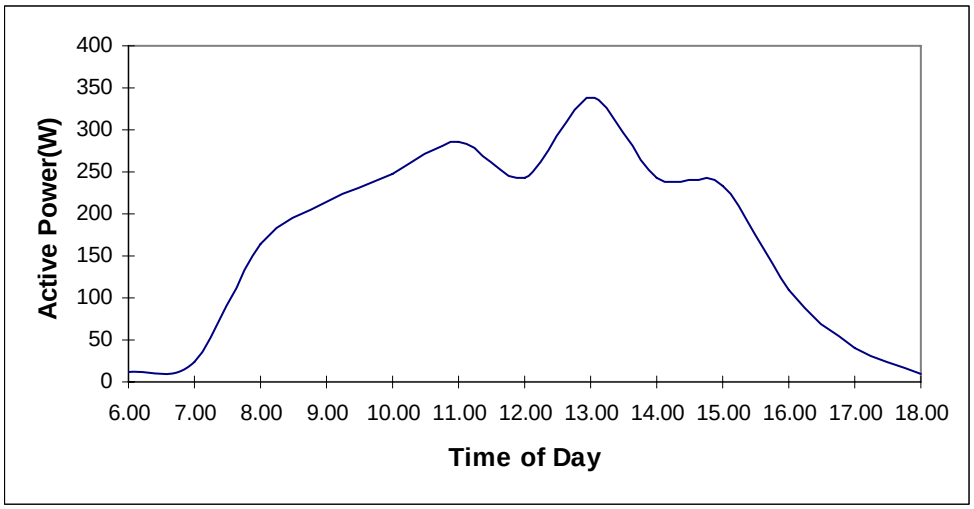
ข้อมูลทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ



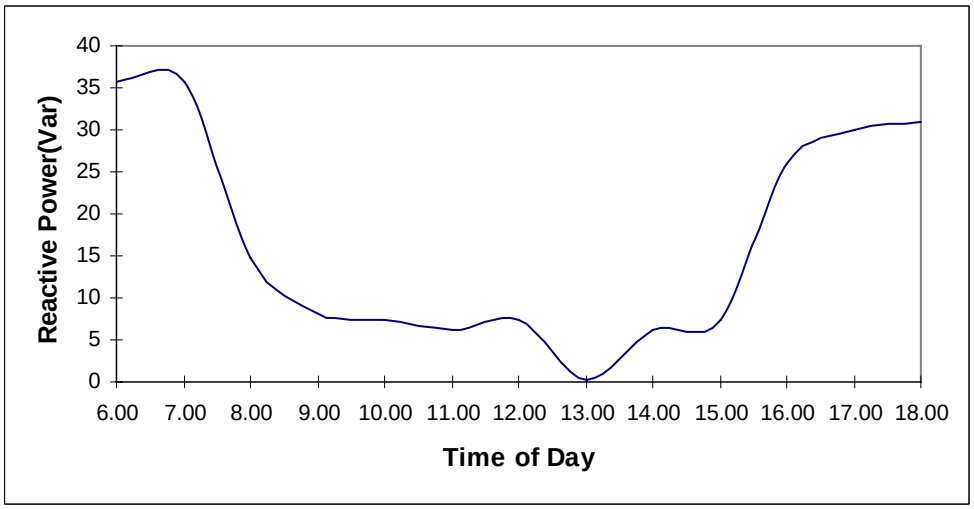
รูปที่ ก.4 ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



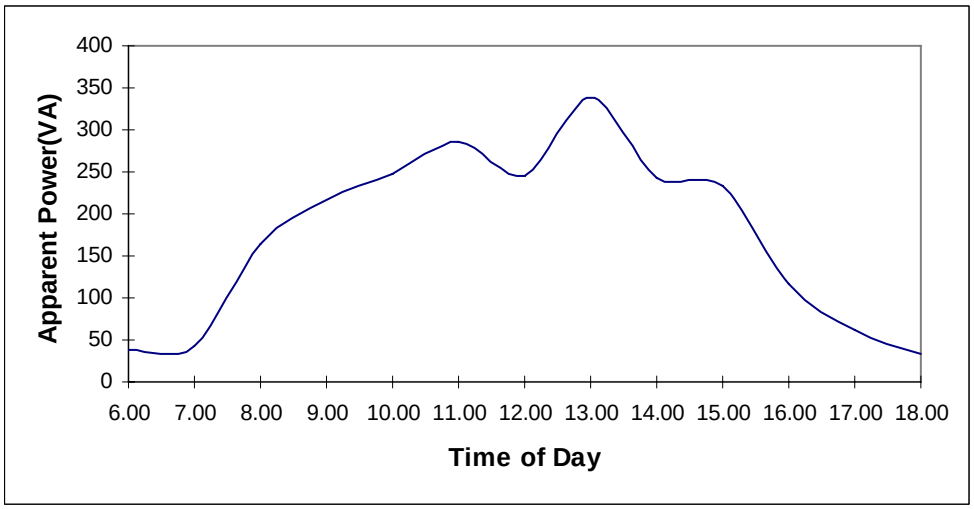
รูปที่ ก.5 ค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



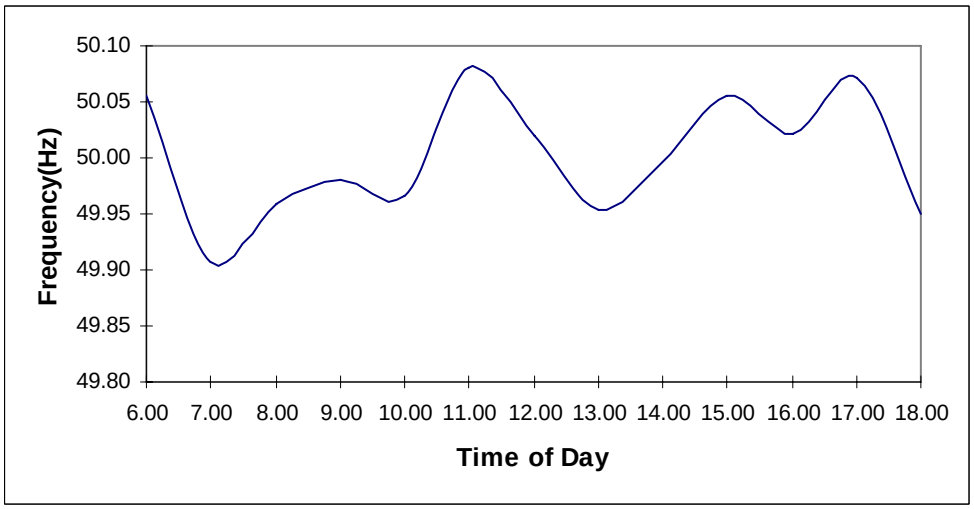
รูปที่ ก.6 ค่ากำลังไฟฟ้าจริงของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



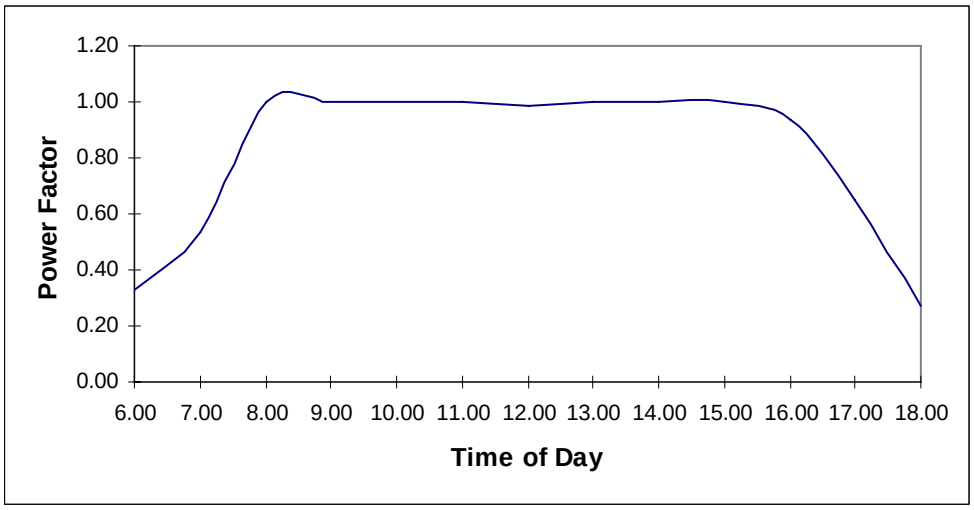
รูปที่ ก.7 ค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



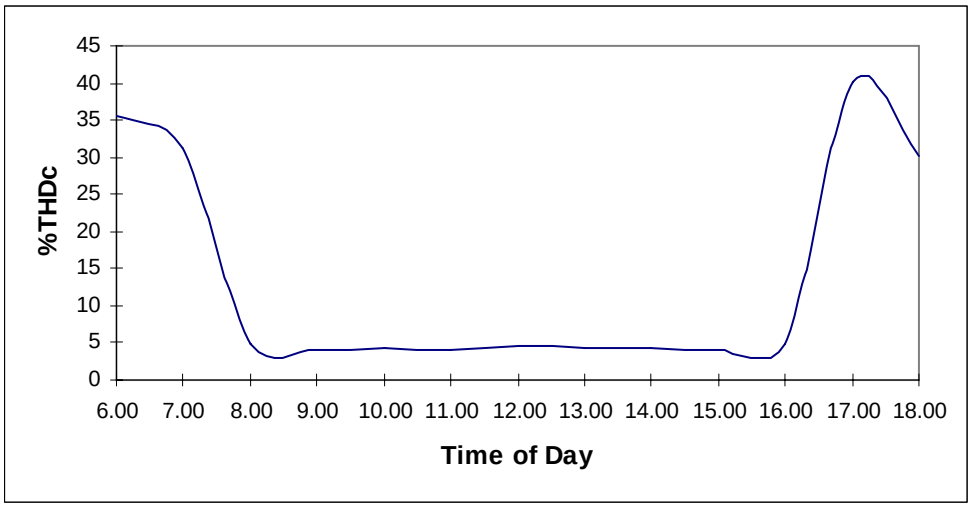
รูปที่ ก.8 ค่ากำลังไฟฟ้าปรากฏของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



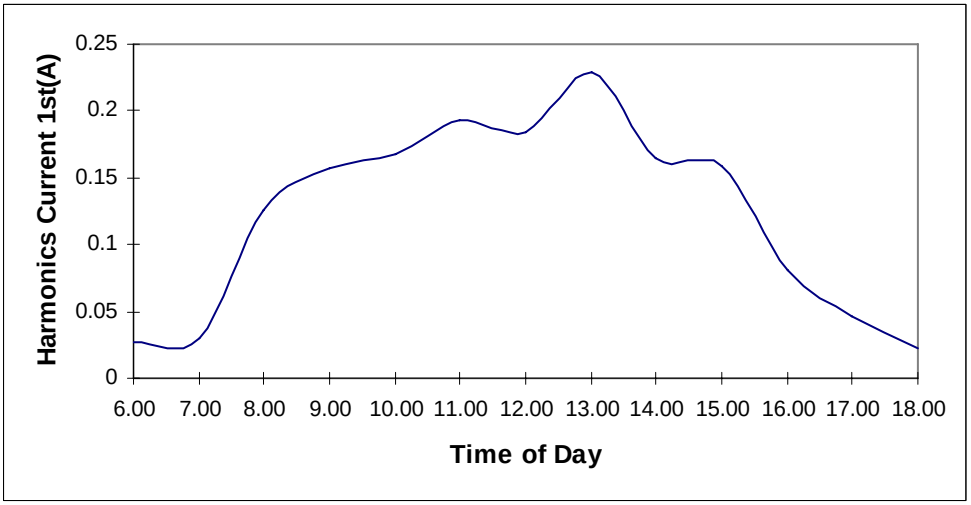
รูปที่ ก.9 ค่าความถี่ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



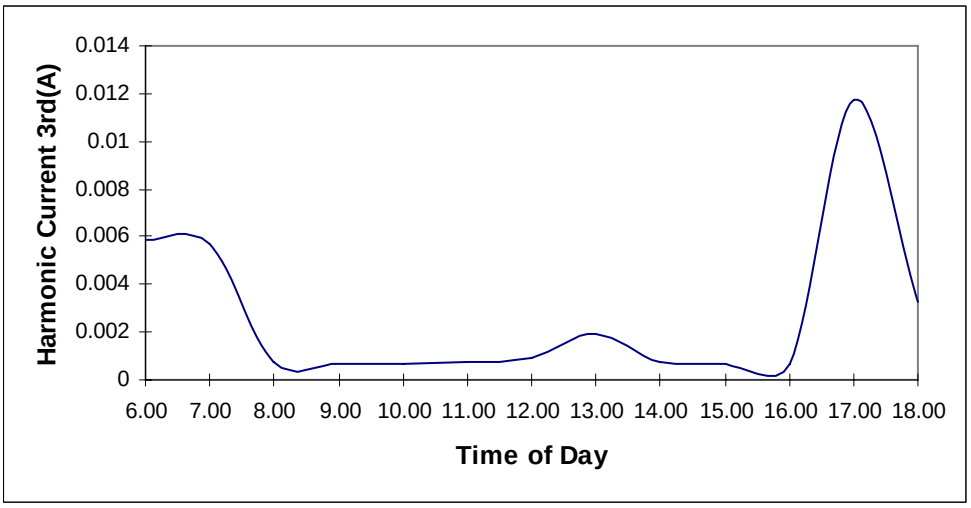
รูปที่ ก.10 ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



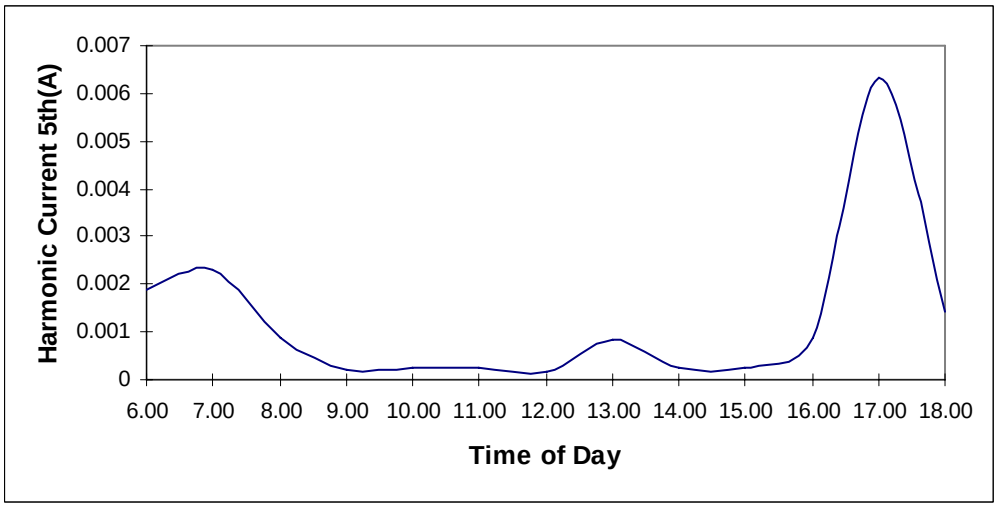
รูปที่ ก.11 ค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของกระแส ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



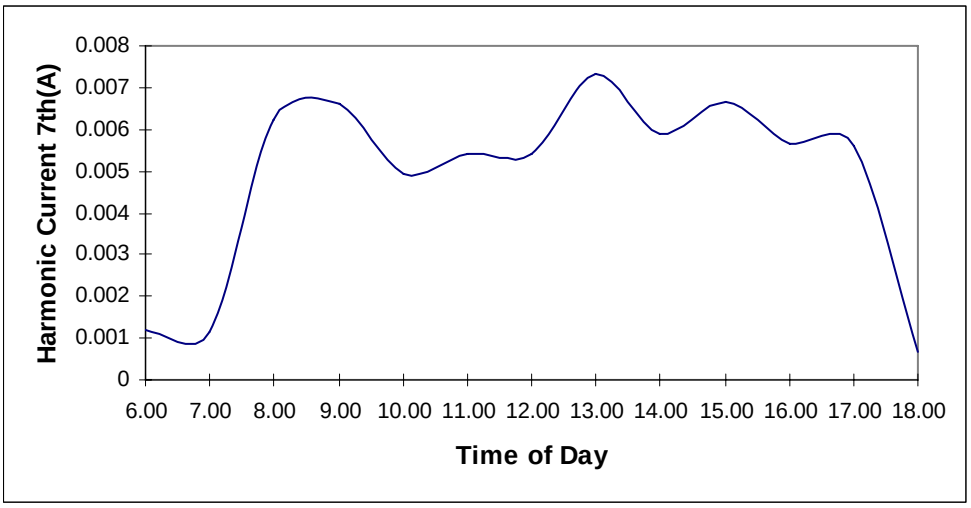
รูปที่ ก.12 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 1 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



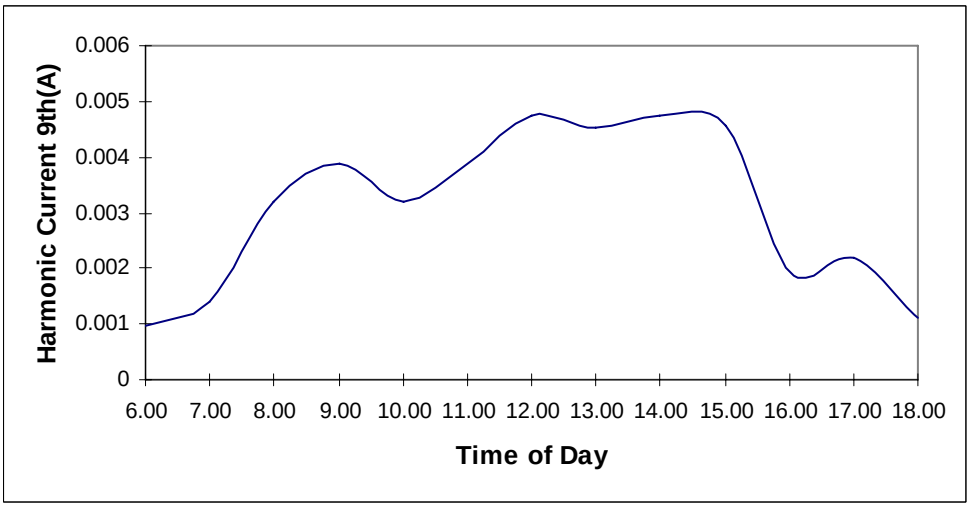
รูปที่ ก.13 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



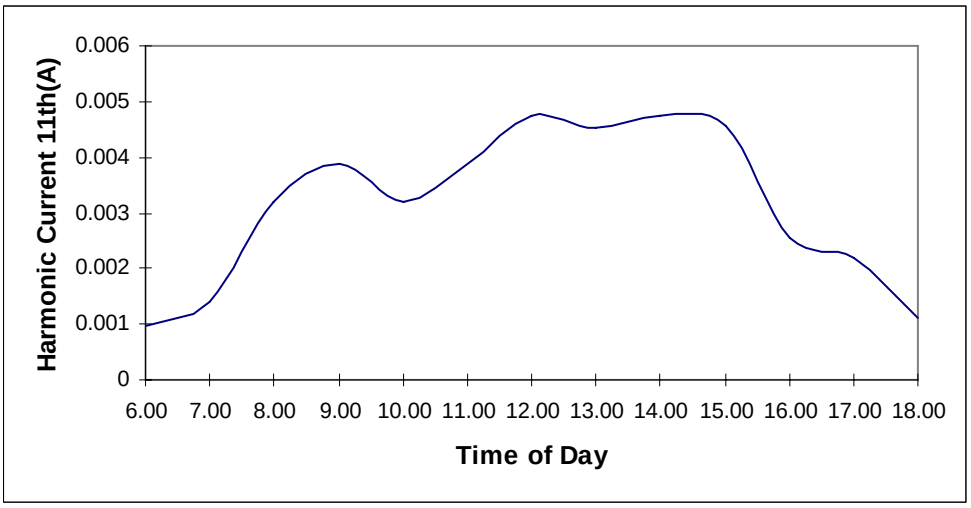
รูปที่ ก.14 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



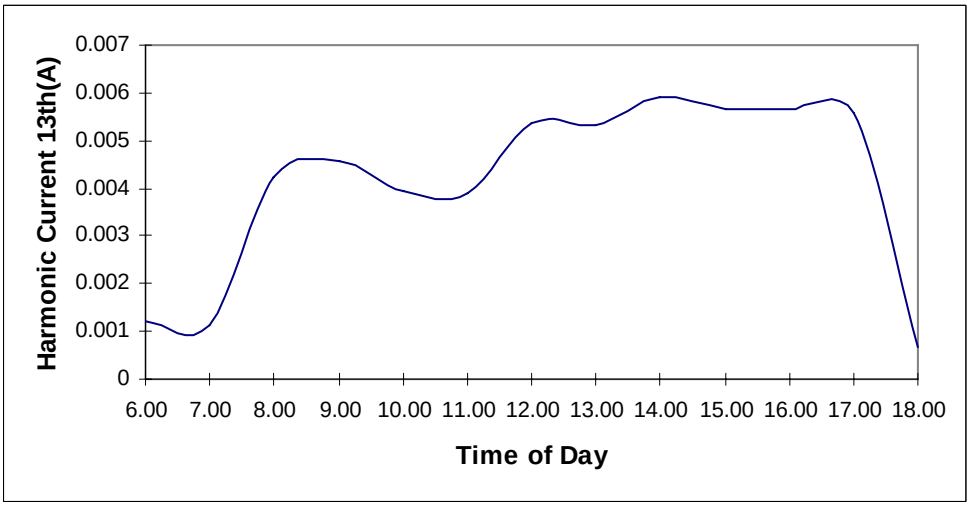
รูปที่ ก.15 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 7 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



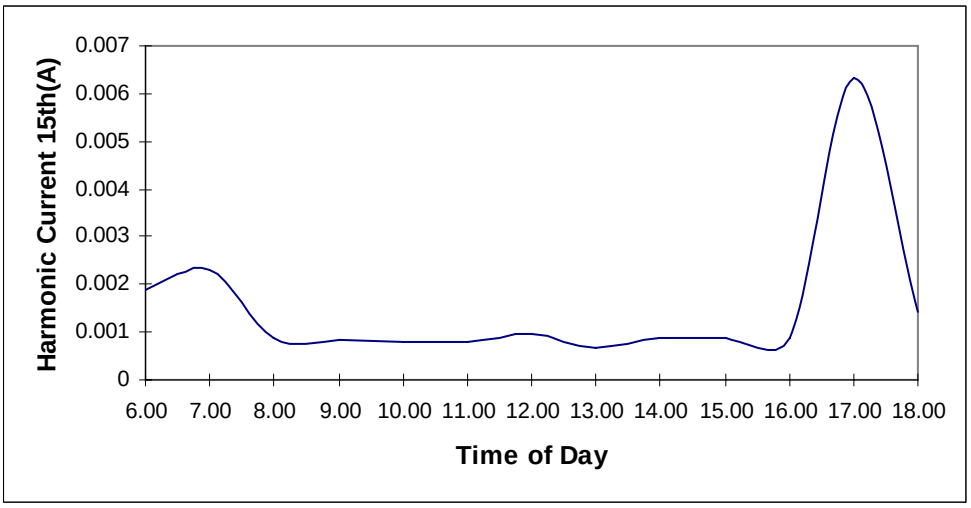
รูปที่ ก.16 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 9 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



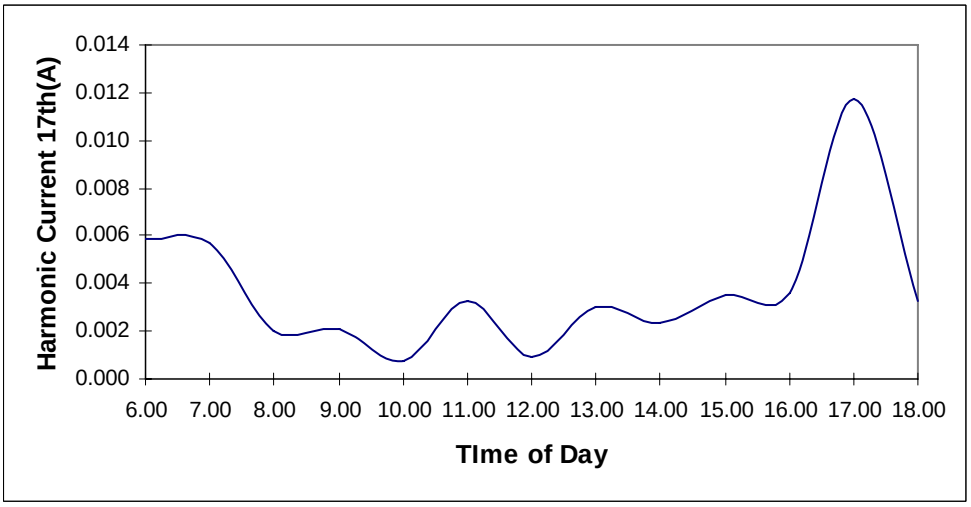
รูปที่ ก.17 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 11 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



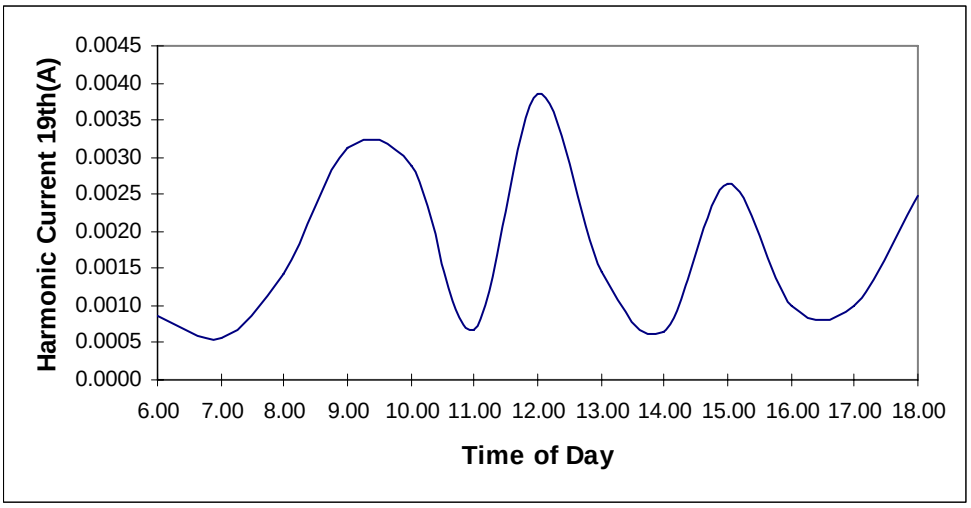
รูปที่ ก.18 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 13 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



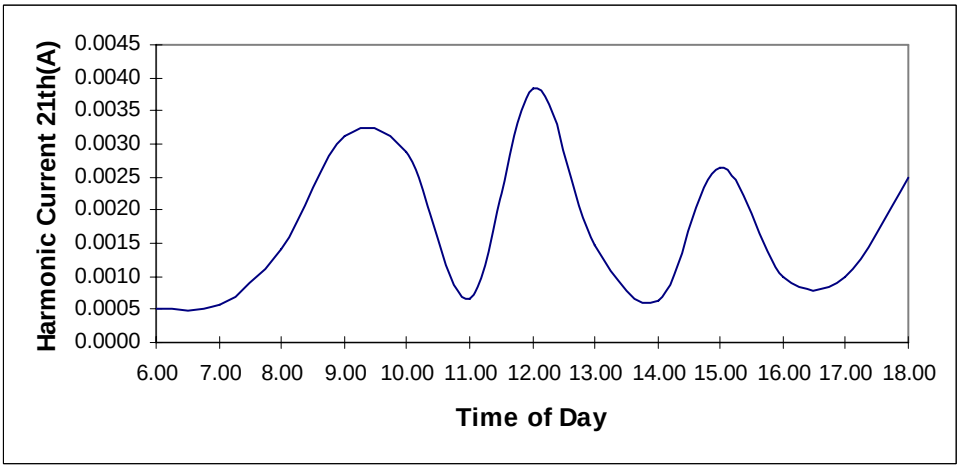
รูปที่ ก.19 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 15 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



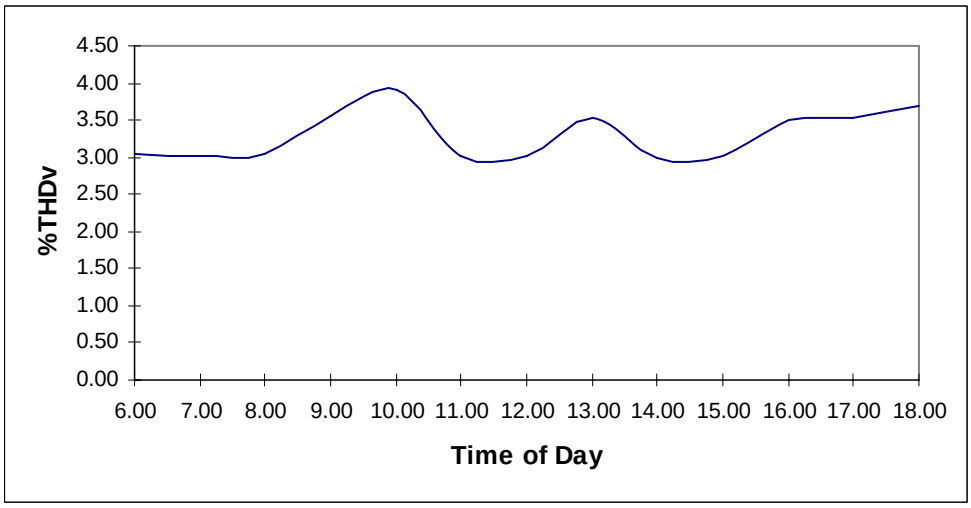
รูปที่ ก.20 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 17 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



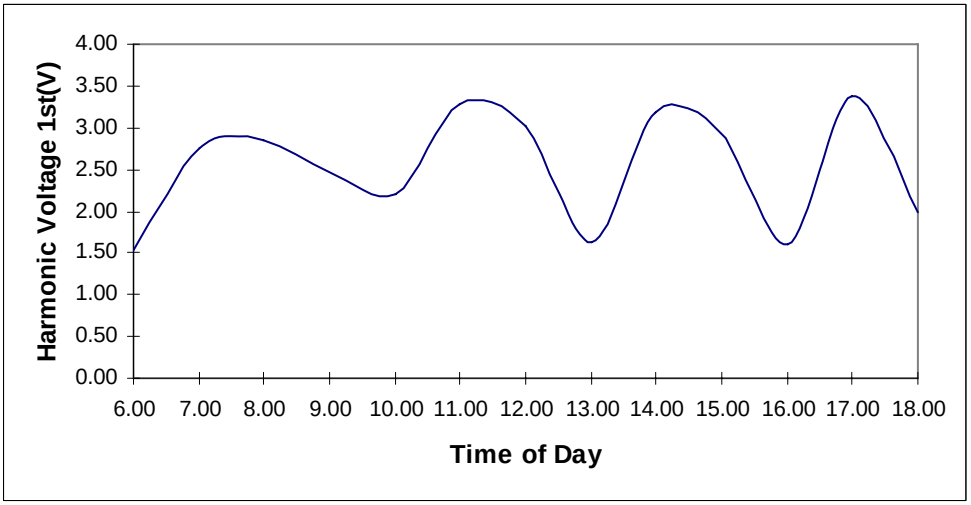
รูปที่ ก.21 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 19 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



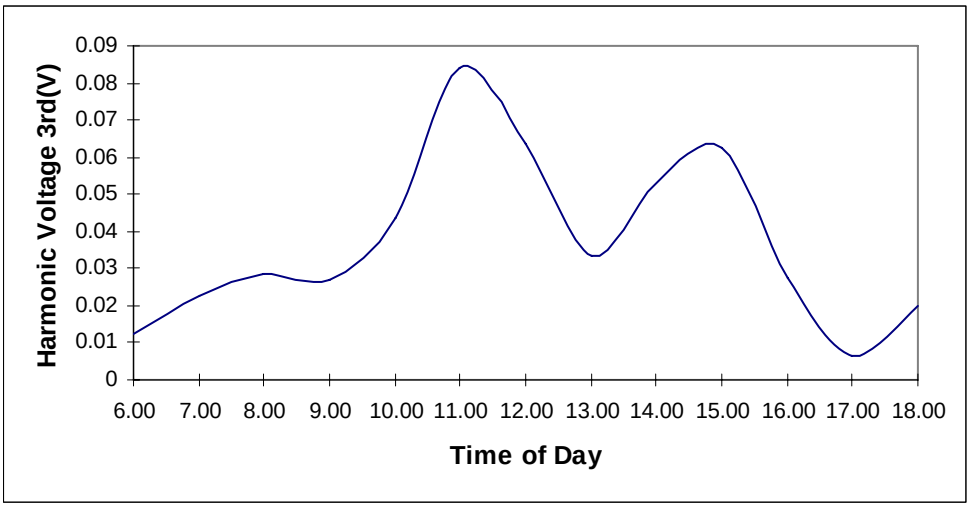
รูปที่ ก.22 ค่ากระแสฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 21 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



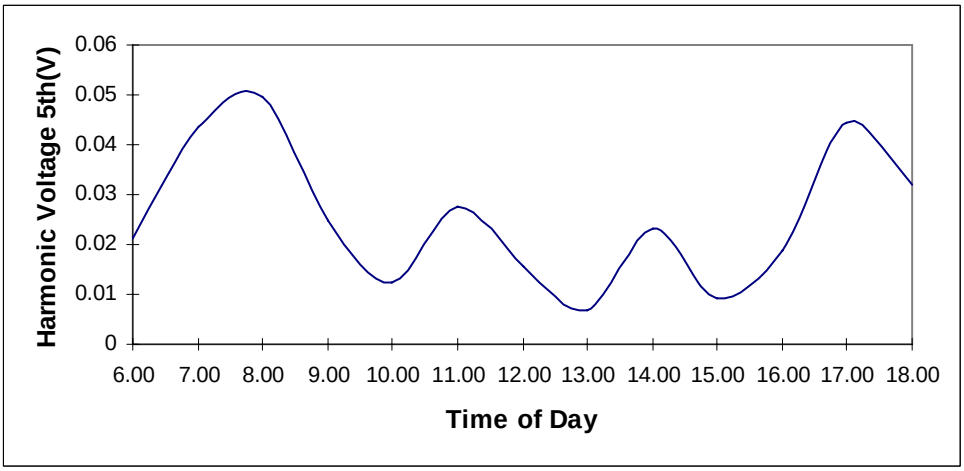
รูปที่ ก.23 ค่าค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมของแรงดัน ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



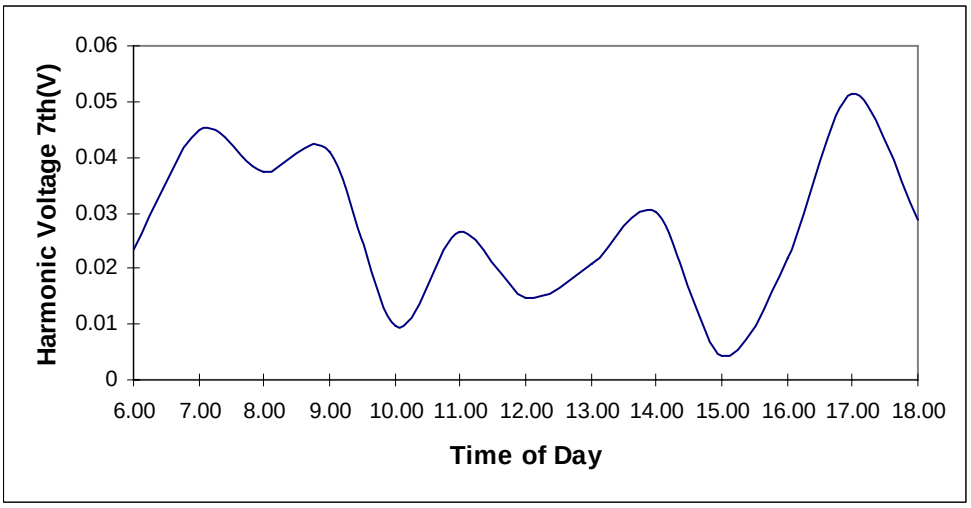
รูปที่ ก.24 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 1 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



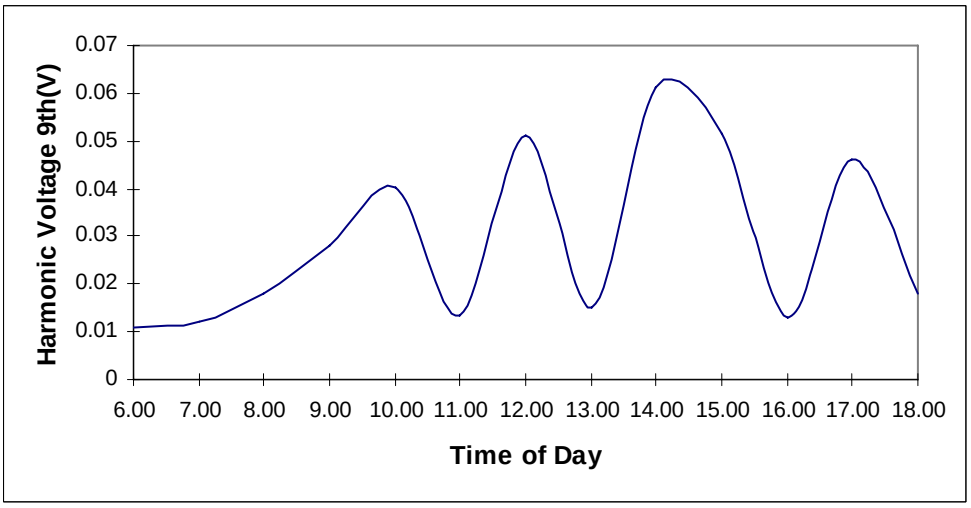
รูปที่ ก.25 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 3 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



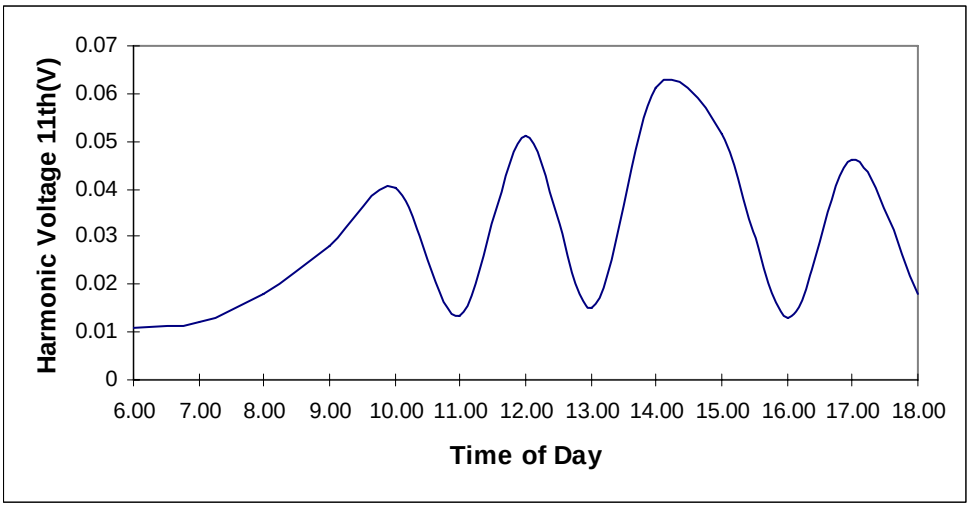
รูปที่ ก.26 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 5 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



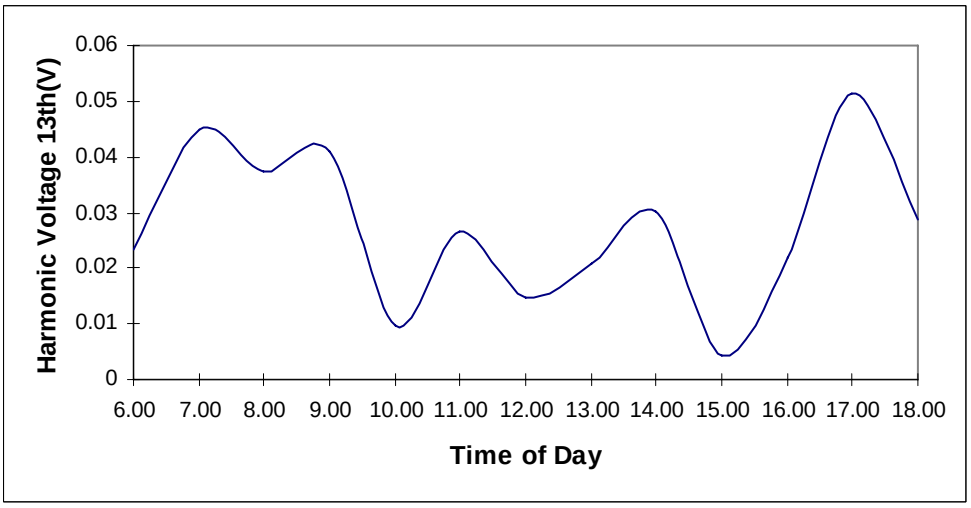
รูปที่ ก.27 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 7 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



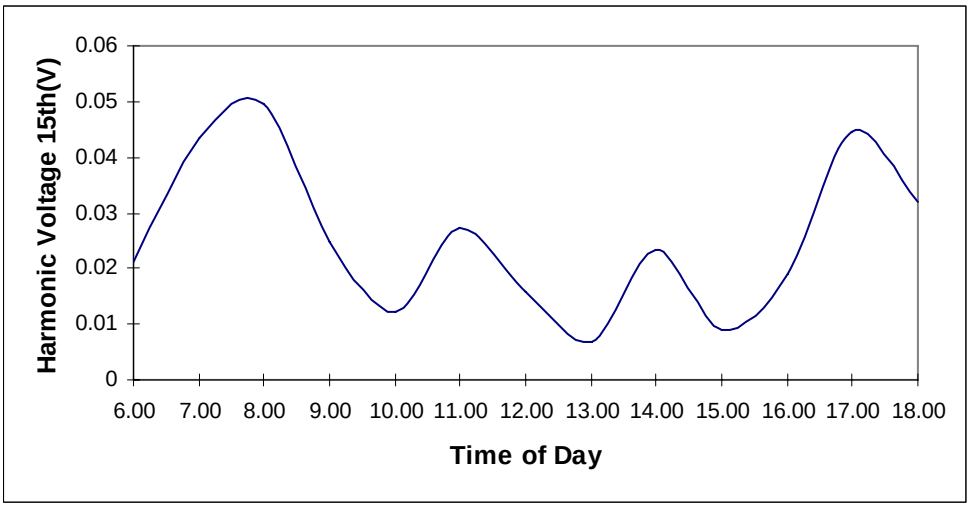
รูปที่ ก.28 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 9 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



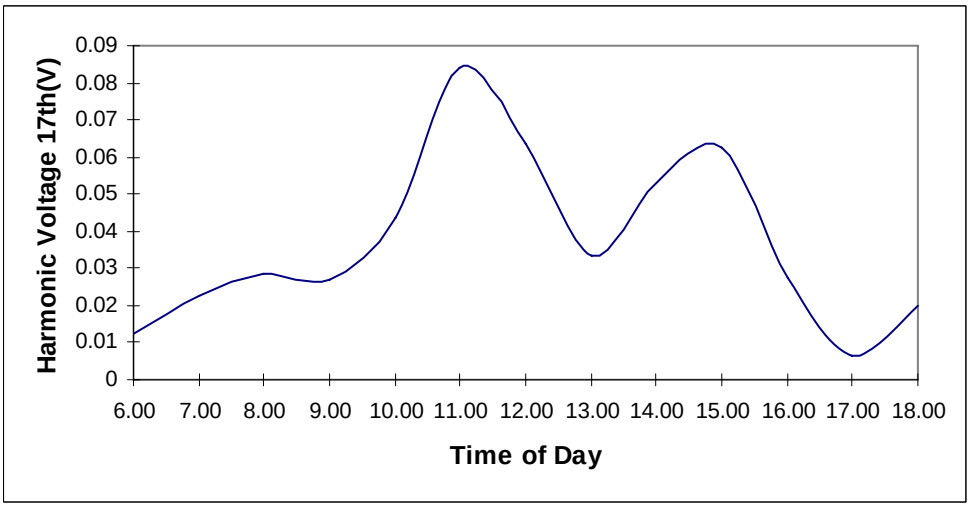
รูปที่ ก.29 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 11 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



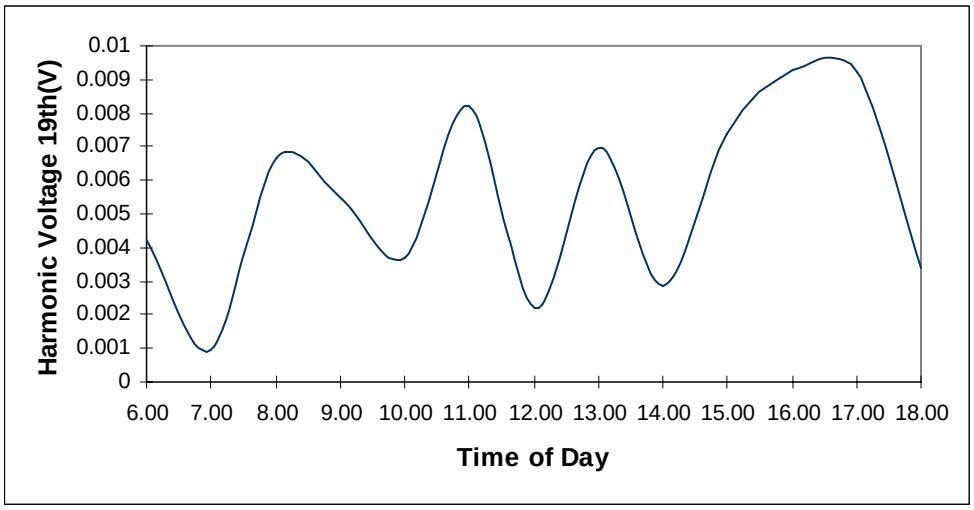
รูปที่ ก.30 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 13 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



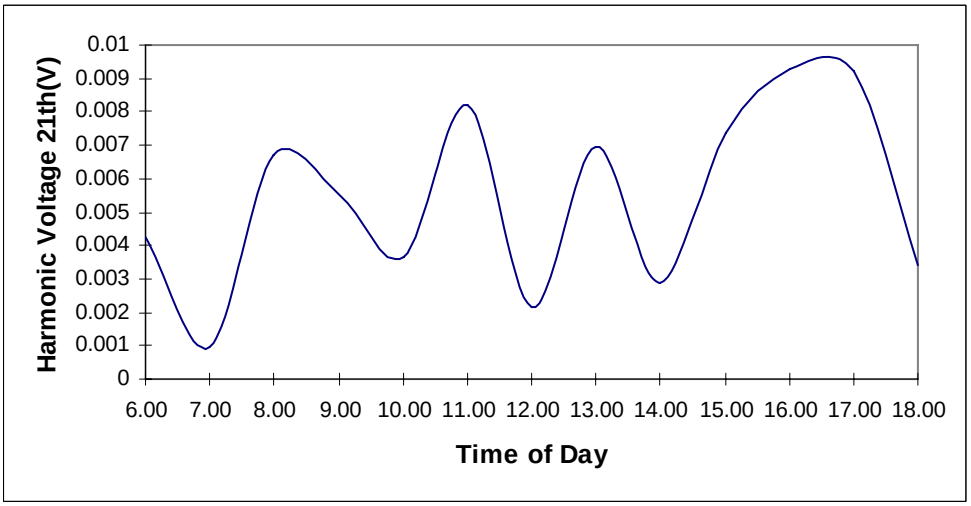
รูปที่ ก.31 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 15 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ ก.32 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 17 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ ก.33 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 19 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ ก.34 ค่าแรงดันฮาร์มอนิกส์ลำดับที่ 21 ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

ภาคผนวก ข

ข้อมูลรายละเอียดของโมเดลสายส่ง

ตาราง ข.1 รายละเอียดค่าความต้านทานและค่าตัวเหนี่ยวนำของโมเดลสายส่ง

จากบัส	ถึงบัส	ความต้านทาน (โอห์ม)	ตัวเหนี่ยวนำ (เฮนรี)
1	2	0.024054800	0.000076538
2	3	0.000823768	0.000002621
3	4	0.001429252	0.000004548
3	35	0.001966976	0.000006259
4	5	0.021232112	0.000067557
5	6	0.026134064	0.000083154
6	7	0.002617956	0.000008330
6	8	0.004493940	0.000014299
8	9	0.000430760	0.000001371
9	10	0.024685936	0.000078546
9	26	0.005195256	0.000016530
10	11	0.014567916	0.000046352
11	12	0.009162604	0.000029154
12	14	0.006391704	0.000020337
12	13	0.001366816	0.000004349
14	15	0.000222640	0.000000708
15	16	0.008938028	0.000028439
16	17	0.000705188	0.000002244
16	23	0.005317708	0.000016920
17	18	0.000222640	0.000000708
18	19	0.001772408	0.000005639
19	20	0.000761332	0.000002422
20	21	0.000761332	0.000002422
21	22	0.000324764	0.000001033
23	24	0.001566708	0.000004985
23	25	0.008470000	0.000026950
26	27	0.000222640	0.000000708
27	28	0.046595648	0.000148259

จากบัส	ถึงบัส	ความต้านทาน (โอห์ม)	ตัวเหนี่ยวนำ (เฮนรี)
29	36	0.035100164	0.000111682
28	29	0.011832348	0.000037648
29	30	0.000222640	0.000000708
30	31	0.015186468	0.000048321
31	32	0.005217520	0.000016601
32	33	0.004006068	0.000012747
36	37	0.004055920	0.000012905
37	38	0.000222640	0.000000708
38	39	0.027596712	0.000087808
39	40	0.000881848	0.000002806
36	41	0.024627372	0.000078360
41	42	0.000692604	0.000002204
41	48	0.022418396	0.000071331
42	43	0.000222640	0.000000708
43	44	0.000480612	0.000001529
44	46	0.000674212	0.000002145
44	45	0.000480612	0.000001529
47	48	0.011331892	0.000036056
48	49	0.044959244	0.000143052
49	50	0.000222640	0.000000708
50	51	0.001566708	0.000004985
51	52	0.001758856	0.000005596
52	53	0.002908840	0.000009255
51	54	0.003545300	0.000011281
54	55	0.000749232	0.000002384
55	56	0.000767624	0.000002442
56	57	0.000222640	0.000000708
57	58	0.017458364	0.000055549
59	60	0.000224576	0.000000715
58	59	0.000424468	0.000001351

จากบัส	ถึงบัส	ความต้านทาน (โอห์ม)	ตัวเหนี่ยวนำ (เฮนรี)
55	61	0.001716264	0.000005461
61	62	0.000222640	0.000000708
62	63	0.007602672	0.000024190
63	64	0.002184776	0.000006952
64	65	0.001048828	0.000003337
65	66	0.000705188	0.000002244
66	67	0.000222640	0.000000708
67	68	0.001616560	0.000005144
68	69	0.000143748	0.000000457
63	70	0.000536756	0.000001708
64	75	0.000611776	0.000001947
65	81	0.000711480	0.000002264
70	71	0.000222640	0.000000708
71	72	0.002153316	0.000006851
72	73	0.000368324	0.000001172
73	74	0.000256036	0.000000815
75	76	0.000222640	0.000000708
76	77	0.001504272	0.000004786
77	78	0.002665388	0.000008481
78	79	0.000568216	0.000001808
79	80	0.000256036	0.000000815
82	83	0.024954614	0.000079401
83	84	0.001850226	0.000005887
83	85	0.001116680	0.000003553
85	86	0.003122628	0.000009936
85	91	0.008983442	0.000028584
86	87	0.000222640	0.000000708
87	88	0.005455188	0.000017357
88	89	0.020278259	0.000064522
89	90	0.001279149	0.000004070

จากบัส	ถึงบัส	ความต้านทาน (โอห์ม)	ตัวเหนี่ยวนำ (เฮนรี)
91	92	0.002859274	0.000009098
92	93	0.000222640	0.000000708
93	94	0.003536467	0.000011252
94	95	0.005342324	0.000016998
95	96	0.001166280	0.000003711
91	97	0.020533584	0.000065334
97	98	0.003423603	0.000010893
97	102	0.003933381	0.000012515
98	99	0.000222640	0.000000708
99	100	0.002934516	0.000009337
100	101	0.001241528	0.000003950
102	103	0.017908073	0.000056980
103	104	0.001467256	0.000004669
102	105	0.010683463	0.000033993
105	106	0.002983371	0.000009493
106	107	0.000222640	0.000000708
107	108	0.002183358	0.000006947
108	109	0.023850063	0.000075887
108	110	0.005833405	0.000018561
110	111	0.020209144	0.000064302
110	113	0.001766687	0.000005621
111	112	0.001800006	0.000005727
113	114	0.000767740	0.000002443
114	115	0.000222640	0.000000708
115	116	0.005243114	0.000016683
116	117	0.000977680	0.000003111
113	118	0.000383328	0.000001220
118	119	0.011350139	0.000036114
119	121	0.021436423	0.000068207
119	120	0.001916688	0.000006099

จากบัส	ถึงบัส	ความต้านทาน (โอห์ม)	ตัวเหนี่ยวนำ (เฮนรี)
120	122	0.001550020	0.000004932
122	123	0.000680354	0.000002165
123	124	0.000222640	0.000000708
124	125	0.009893255	0.000031479
125	126	0.000312180	0.000000993
126	127	0.000206184	0.000000656
122	131	0.004266717	0.000013576
129	128	0.018286411	0.000058184
130	129	0.000222640	0.000000708
131	132	0.006966754	0.000022167
131	130	0.004377286	0.000013928
132	133	0.007083417	0.000022538
133	134	0.008650106	0.000027523
134	138	0.008951091	0.000028481
134	135	0.015000181	0.000047728
135	140	0.006136379	0.000019525
135	136	0.016150199	0.000051387
136	141	0.006516745	0.000020735
136	137	0.003313643	0.000010543
138	139	0.009613663	0.000030589
138	148	0.006200756	0.000019730
141	142	0.000222640	0.000000708
142	143	0.011050136	0.000035160
143	144	0.008450103	0.000026887
144	145	0.006516745	0.000020735
145	146	0.014816847	0.000047145
146	147	0.007933428	0.000025243
148	149	0.004900611	0.000015593
149	150	0.008427297	0.000026814
149	157	0.007350895	0.000023389

จากบัส	ถึงบัส	ความต้านทาน (โอห์ม)	ตัวเหนี่ยวนำ (เฮนรี)
151	152	0.001145459	0.000003645
153	154	0.000982520	0.000003126
157	158	0.005800706	0.000018457
157	161	0.009572750	0.000030459
158	159	0.018902363	0.000060144
159	160	0.001000123	0.000003182
159	151	0.011986396	0.000038139
160	153	0.003354556	0.000010674
160	155	0.039110685	0.000124443
155	156	0.000450120	0.000001432
148	175	0.001700215	0.000005410
162	177	0.009859119	0.000031370
162	166	0.011106246	0.000035338
164	163	0.004094466	0.000013028
164	173	0.005152204	0.000016393
165	178	0.004622737	0.000014709
165	164	0.006568209	0.000020899
166	167	0.002183716	0.000006948
166	168	0.011740940	0.000037358
167	165	0.002371377	0.000007545
167	170	0.003518191	0.000011194
168	169	0.002209097	0.000007029
170	171	0.001472730	0.000004686
173	172	0.000426404	0.000001357
174	162	0.015183651	0.000048312
175	174	0.000222640	0.000000708
177	176	0.000571120	0.000001817
179	218	0.004540922	0.000014448
180	179	0.002822736	0.000008981
181	182	0.009981847	0.000031760

จากบัส	ถึงบัส	ความต้านทาน (โอห์ม)	ตัวเหนี่ยวนำ (เฮนรี)
181	187	0.000424468	0.000001351
186	212	0.021068239	0.000067035
187	207	0.003675298	0.000011694
188	189	0.000222640	0.000000708
189	213	0.005055777	0.000016087
190	181	0.002291571	0.000007291
191	195	0.003763647	0.000011975
191	197	0.000475772	0.000001514
193	192	0.000982520	0.000003126
194	193	0.004254558	0.000013537
195	196	0.000222640	0.000000708
196	194	0.047781947	0.000152033
197	190	0.003902260	0.000012416
197	201	0.013990944	0.000044517
199	198	0.000817960	0.000002603
200	199	0.002781824	0.000008851
201	200	0.003763647	0.000011975
203	202	0.000363484	0.000001157
204	203	0.000432212	0.000001375
205	204	0.000346060	0.000001101
206	180	0.005563653	0.000017703
207	205	0.024234016	0.000077108
207	208	0.150095854	0.000477578
208	209	0.000222640	0.000000708
209	206	0.011004572	0.000035015
211	185	0.003722739	0.000011845
212	188	0.037394024	0.000118981
212	211	0.009262831	0.000029473
213	183	0.002822736	0.000008981
213	217	0.005082000	0.000016170

จากบัส	ถึงบัส	ความต้านทาน (โอห์ม)	ตัวเหนี่ยวนำ (เฮนรี)
214	184	0.036914007	0.000117454
214	210	0.031308368	0.000099618
215	216	0.000222640	0.000000708
216	191	0.003558160	0.000011321
217	214	0.006491403	0.000020654
217	215	0.000724809	0.000002306
266	265	0.038700103	0.000123137
219	228	0.001691503	0.000005382
220	225	0.003600011	0.000011455
220	221	0.000730840	0.000002325
221	223	0.001703680	0.000005421
223	224	0.000222640	0.000000708
224	226	0.000792710	0.000002522
226	231	0.011896870	0.000037854
228	229	0.003813678	0.000012134
228	253	0.003722739	0.000011845
229	230	0.006235459	0.000019840
229	252	0.003722739	0.000011845
230	220	0.009050466	0.000028797
230	257	0.004868193	0.000015490
231	234	0.001747705	0.000005561
231	232	0.000773984	0.000002463
233	235	0.016859099	0.000053643
234	233	0.000222640	0.000000708
235	236	0.005433994	0.000017290
235	238	0.007783523	0.000024766
236	237	0.000766762	0.000002440
238	241	0.000437052	0.000001391
238	244	0.015197600	0.000048356
240	239	0.000193600	0.000000616

จากบัส	ถึงบัส	ความต้านทาน (โอห์ม)	ตัวเหนี่ยวนำ (เฮนรี)
241	242	0.000222640	0.000000708
242	240	0.000543038	0.000001728
244	243	0.000218284	0.000000695
244	247	0.004070440	0.000012951
246	245	0.000249744	0.000000795
247	246	0.000211992	0.000000675
248	250	0.003315400	0.000010549
249	248	0.002454553	0.000007810
250	251	0.001513642	0.000004816
252	255	0.000450120	0.000001432
253	254	0.000222640	0.000000708
254	227	0.011454576	0.000036446
255	256	0.000222640	0.000000708
256	249	0.004050010	0.000012886
257	258	0.000222640	0.000000708
258	261	0.015381859	0.000048942
259	262	0.007568202	0.000024081
260	259	0.001636370	0.000005207
261	260	0.001881821	0.000005988
262	263	0.000938960	0.000002988
264	222	0.000461736	0.000001469
264	219	0.006921200	0.000022022
265	264	0.002840020	0.000009036
35	2	0.000222640	0.000000708
35	82	0.000222640	0.000000708
35	186	0.000222640	0.000000708
35	266	0.000222640	0.000000708

ตาราง ข.2 รายละเอียดค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ต้องการในแต่ละบัส

หมายเลขบัส	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVAr)
9	0.03825	0.0237
20	1.0625	0.65838
21	1.0625	0.65838
22	2.125	1.31675
32	0.85	0.5267
33	0.85	0.5267
39	0.85	0.5267
45	2.975	1.84345
46	3.4	2.106
58	0.85	0.5267
59	0.85	0.5267
68	0.85	0.5267
72	0.85	0.5267
73	0.85	0.5267
77	0.85	0.5267
78	0.85	0.5267
79	1.275	0.79005
88	0.425	0.26335
89	0.085	0.05267
94	0.425	0.26335
95	0.425	0.26335
100	0.5355	0.33182
105	0.26775	0.16591
109	0.425	0.26335
111	0.425	0.26335
116	0.68	0.42136
125	2.125	1.31675
126	2.125	1.31675

หมายเลขบัส	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVAr)
128	0.68	0.42136
139	0.136	0.08427
140	0.136	0.08427
143	0.2125	0.13168
144	0.425	0.26335
145	0.85	0.5267
150	0.425	0.26335
151	0.85	0.5267
153	1.275	0.7905
155	0.2125	0.13168
168	0.5355	0.33182
170	0.2125	0.13168
173	0.85	0.5267
177	0.425	0.26335
178	0.425	0.26335
179	0.14195	0.08796
180	0.14195	0.08796
182	0.425	0.26335
187	0.0425	0.02634
193	0.2125	0.13168
194	0.34	0.21068
199	1.7	1.0534
200	1.7	1.0534
201	1.7	1.0534
203	0.14195	0.08796
204	0.14195	0.08796
205	0.14195	0.08796
206	0.14195	0.08796
221	0.0255	0.0158
226	0.0255	0.0158

หมายเลขบัส	กำลังไฟฟ้าจริง (MW)	กำลังไฟฟ้าเสมือน (MVAr)
227	0.85	0.5267
236	2.125	1.31675
240	1.36	0.84272
246	1.36	0.84272
247	1.36	0.84272
248	0.85	0.5267
250	0.85	0.5267
259	0.085	0.05267
260	0.085	0.05267
261	0.085	0.05267
262	0.425	0.26335

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล	นางสาวศุภิสรา ศรีแสน
วัน เดือน ปีเกิด	30 ธันวาคม 2519
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนคำเขื่อนแก้วชนูปถัมภ์ พ.ศ. 2538
ระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ.2542
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ.2549
ประวัติการทำงาน	อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	Sangswang A., Srisaen N., 2006 “Effects of PV Grid-connected System on a Distribuiton System: Power Quality Issue”, **The Proceedings of the 2006 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) International Conference**, UbonRatchathani, Thailand, May 10-13, 2006, pp. 729-732.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ข้อตกลงว่าด้วยการโอนลิขสิทธิ์ในวิทยานิพนธ์

วันที่ 3 พฤศจิกายน พ.ศ. 2549

ข้าพเจ้า (~~นาย/นาง~~/นางสาว) **ศุภิสรา ศรีแสน** รหัสประจำตัว **47400207**
เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับปริญญา ☑ โท ☐ เอก
หลักสูตร **ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต** สาขาวิชา **วิศวกรรมไฟฟ้า** คณะ **วิศวกรรมศาสตร์**
อยู่บ้านเลขที่ **465/1** หมู่ที่ **2** ตำบล **ลุมพุก** อำเภอ **คำเขื่อนแก้ว** จังหวัด **ยโสธร** รหัสไปรษณีย์ **35110**
ขอโอนลิขสิทธิ์วิทยานิพนธ์ให้ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยมี **รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์**
ตำแหน่ง **คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์** เป็นผู้รับโอนลิขสิทธิ์และมีข้อตกลงดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง **ผลกระทบด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าบนระบบจำหน่ายของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์** ซึ่งอยู่ในความควบคุมของ **ดร.อนวัช แสงสว่าง** ตามมาตรา 14 แห่ง พ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในวิทยานิพนธ์ให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ ตามมาตรา 23 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย

3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใดๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้องระบุว่าวิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ทุกๆ ครั้งที่มีการเผยแพร่

4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่ หรืออนุญาตให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือดัดแปลงหรือเผยแพร่ต่อสาธารณชนหรือกระทำการอื่นใด ตามมาตรา 27, มาตรา 28, มาตรา 29 และมาตรา 30 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยมีค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ลงชื่อ.....ผู้โอนลิขสิทธิ์
(นางสาวศุภิสรา ศรีแสน)

ลงชื่อ.....ผู้รับโอนลิขสิทธิ์
(รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์)

ลงชื่อ.....พยาน
(ผศ.อุดมศักดิ์ ยั่งยืน)

ลงชื่อ.....พยาน
(ดร.อนวัช แสงสว่าง)