

การควบคุมกำลังการผลิตไฟฟ้าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยคำนึงถึงระดับ
แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่าย



นายชนันท์ ธีระนันท์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

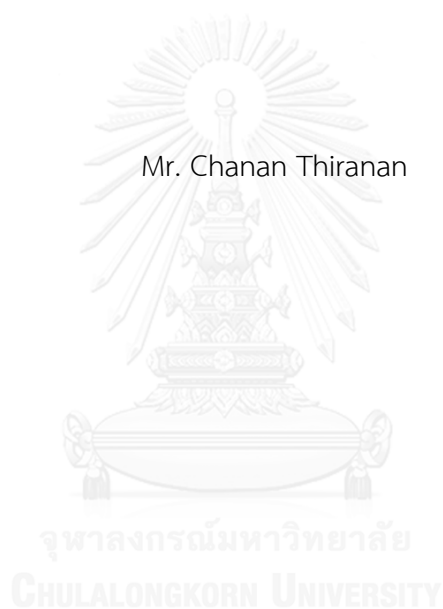
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

POWER CONTROL FOR PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEM WITH
CONSIDERATION OF NETWORK VOLTAGES

Mr. Chanan Thiranan



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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมกำลังการผลิตไฟฟ้าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยคำนึงถึงระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่าย
โดย	นายชนันท์ ธีระนันท์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร. สุรัชย์ ชัยทัศน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย เตชสุนันต์)
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร. สุรัชย์ ชัยทัศน์)
.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงษ์ สุวรรณกวิน)
.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. จักรเพชร มัทราช)

ชนนท์ ธีระนันท์ : การควบคุมกำลังการผลิตไฟฟ้าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยคำนึงถึงระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่าย (POWER CONTROL FOR PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEM WITH CONSIDERATION OF NETWORK VOLTAGES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: อ. ดร. สุรัชชัย ชัยทัศนีย์, หน้า. 278

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการสนับสนุนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทางเลือกเพิ่มมากขึ้น โดยระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นพลังงานทางเลือกที่ได้รับความนิยมอย่างมาก ทำให้การเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน โดยการควบคุมและจัดการโดยข้อกำหนดระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ยังใช้ประโยชน์จากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีอินเวอร์เตอร์เป็นส่วนควบคุมการจ่ายไฟฟ้าได้ไม่เต็มที่นัก ซึ่งอาจทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าไม่อยู่ในช่วงแรงดันไฟฟ้าตามข้อกำหนดระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เริ่มต้นจากการพัฒนาแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อศึกษาผลกระทบต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าด้านแรงดันไฟฟ้าและนำเสนอแนวทางการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า เพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีประโยชน์ต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้ามากขึ้น รวมทั้งนำเสนอแนวคิดการแบ่งกรณีการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้การคำนวณรายรับและรายจ่ายที่เกิดขึ้นจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีความยุติธรรมต่อทั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการไฟฟ้า

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5570155021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEM / REAL AND REACTIVE POWER CONTROL / GRID CODE / SYSTEM VOLTAGES / ELECTRICITY BILLING

CHANAN THIRANAN: POWER CONTROL FOR PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEM WITH CONSIDERATION OF NETWORK VOLTAGES. ADVISOR: PROF. BUNDHIT EUA-ARPORN, Ph.D., CO-ADVISOR: SURACHAI CHAITUSANEY, Ph.D., pp. 278

One of the most popular technologies of renewable energy generation in Thailand is photovoltaic generation system which is encouraged by Thailand government and keeps increasing continuously. However, the control and management of photovoltaic generation system by the existing utility grid codes cannot maximize the capability of inverter, in photovoltaic generation system, for controlling the reactive power and voltage. Therefore, system voltages may be out of the acceptable range of utility grid codes occasionally.

This thesis starts at the modeling of photovoltaic generation system for studying the impacts on system voltages. Also, this thesis proposes an idea for controlling the output power of photovoltaic generation system with the consideration of system voltages. The proposed idea allows the photovoltaic generation system to help regulate system voltages, and consequently increases the worth of photovoltaic generation system significantly. Finally, this thesis proposes an electricity billing process that categorizes the billing into various cases where the fairness for both photovoltaic generation system and utility is taken into account.

Department:	Electrical Engineering	Student's Signature
Field of Study:	Electrical Engineering	Advisor's Signature
Academic Year:	2014	Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำจากบุคคลมากมาย ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ได้แก่ ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ และ อาจารย์ ดร. สุรัชย์ ชัยทัศนีย์ ที่ได้ให้การดูแล คำปรึกษา และคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งตลอดการศึกษาและการจัดทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย เตชสีสอนันต์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงษ์ สุวรรณกวิน และ ดร. จักรเพชร มัทราช ที่ได้ตรวจสอบ แก้ไข และให้คำแนะนำสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความสะดวกในการติดต่อประสานงานและการดำเนินการต่างๆ

และสุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ได้ให้การสนับสนุนตลอดมา ตลอดจน พี่น้อง และเพื่อนทุกคนที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จนี้



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ต
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	5
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	5
1.4 ขั้นตอนการศึกษาวิธีการดำเนินงาน.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	7
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	12
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของแรงดันไฟฟ้า.....	15
2.1 ปรากฏการณ์ด้านคุณภาพไฟฟ้า.....	15
2.2 การแปรเปลี่ยนค่าของแรงดันไฟฟ้า.....	16
2.3 การแปรเปลี่ยนช่วงเวลาสั้น (Short-duration variations)	18
2.4 การเปลี่ยนแปลงช่วงเวลานาน (Long-duration variations).....	20
2.5 การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า	21
2.5.1 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับแท็ปได้ (Tap-changing transformer).....	22
2.5.2 ตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้า (Automatic voltage regulator: AVR).....	23
2.5.3 ตัวเก็บประจุ (Capacitor bank).....	23

บทที่ 3 ข้อกำหนดระบบโครงข่ายไฟฟ้า ค่าไฟฟ้า และการรับซื้อไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	25
3.1 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าและข้อกำหนดการปฏิบัติการระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	25
3.1.1 ปริมาณกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จ่ายหรือรับจากระบบโครงข่ายไฟฟ้า	26
3.1.2 การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า.....	26
3.1.3 การควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	27
3.1.4 การควบคุมความถี่ไฟฟ้า.....	27
3.1.5 ระบบควบคุมระยะไกล.....	28
3.1.6 ระบบการติดต่อสื่อสาร	28
3.1.7 การทดสอบการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้า.....	28
3.1.8 ข้อกำหนดสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าประเภทเชื่อมต่อกับโครงข่าย พ.ศ. 2556 และข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2557	30
3.1.8.1 ระยะเวลาปลดตัวและการข้ามผ่านความผิดพลาด	30
3.1.8.2 ข้อกำหนดเพิ่มเติมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	31
3.1.8.3 วิธีการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีอินเวอร์เตอร์	33
3.2 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าและข้อกำหนดการปฏิบัติการระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง.....	36
3.2.1 ปริมาณกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จ่ายหรือรับจากระบบโครงข่ายไฟฟ้า	36
3.2.2 การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า.....	36
3.2.3 การควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	37
3.2.4 การควบคุมความถี่ไฟฟ้า.....	37

3.2.5 ระบบควบคุมระยะไกล.....	37
3.2.5 ระบบการติดต่อสื่อสาร.....	38
3.2.6 ข้อกำหนดสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าประเภทเชื่อมต่อกับโครงข่าย พ.ศ. 2556	39
3.2.7 การทดสอบการเชื่อมต่อบนระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบ โครงข่ายไฟฟ้า.....	40
3.3 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อบนระบบโครงข่ายไฟฟ้าและข้อกำหนดการปฏิบัติการระบบโครงข่าย ไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย	41
3.3.1 การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า.....	41
3.3.2 การควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	42
3.3.4 การควบคุมความถี่ไฟฟ้า.....	42
3.3.5 ระบบควบคุมระยะไกล.....	42
3.3.6 ระบบการติดต่อสื่อสาร.....	42
3.4 ข้อกำหนดระบบโครงข่ายไฟฟ้าของต่างประเทศ	43
3.4.1 ข้อกำหนดระบบโครงข่ายไฟฟ้าของประเทศเยอรมัน	43
3.4.1.1 การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า.....	43
3.4.1.2 การควบคุมความถี่.....	45
3.4.1.3 ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า.....	45
3.4.2 ข้อกำหนดจากมาตรฐาน IEEE Std 929-2000 กรณีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์ แสงอาทิตย์จ่ายไฟเข้าสู่ระบบ	46
3.4.1.1 ข้อกำหนดระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุด.....	46
3.4.1.2 ข้อกำหนดระดับความถี่สูงสุดและต่ำสุด.....	47
3.5 ค่าไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	49
3.5.1 โครงสร้างค่าไฟฟ้าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	50

3.5.2 อัตราค่าไฟฟ้าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	51
3.5.3 ตัวอย่างการคำนวณค่าไฟฟ้า.....	55
3.6 การรับซื้อไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	58
3.6.1 หลักการกำหนดอัตราค่าไฟฟ้าในการซื้อขายไฟฟ้าให้กับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์ แสงอาทิตย์.....	58
3.6.2 อัตรารับซื้อไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	59
3.7 ตัวอย่างการคำนวณรายรับและรายจ่ายของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	61
บทที่ 4 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	64
4.1 เซลล์แสงอาทิตย์.....	67
4.1.1 หลักการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์	68
4.1.1.1 แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์	68
4.1.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์.....	71
4.1.2 ตัวอย่างข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์.....	73
4.2 อินเวอร์เตอร์.....	75
4.2.1 หลักการควบคุมอินเวอร์เตอร์พื้นฐาน	77
4.2.2 ข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์	79
4.2.2.1 ตัวอย่างข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์ในปัจจุบัน	81
4.2.3 โหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์	83
4.2.3.1 โหมดกำลังไฟฟ้าจริง.....	84
4.2.3.2 โหมดกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive power control mode).....	87
4.2.3.3 โหมดการทำงานในเวลากลางคืน (Night mode).....	88
4.2.3.4 โหมดการข้ามผ่านความผิดปกติ (Fault ride through: FRT)	88
4.2.3.5 โหมดการตรวจจับการแยกตัวอิสระ (Anti-islanding detection mode)...	89

บทที่ 5 ข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน	91
5.1 สถานะระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย	93
5.2 การทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย	94
5.2.1 การออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	95
5.2.2 การทดสอบการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าและการ ปรับตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	96
5.2.3 การติดต่อสื่อสารระหว่างระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับสถานีไฟฟ้า.....	97
5.2.4 ปัญหาด้านแรงดันไฟฟ้าและการปลดตัวของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	98
5.2.5 การจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและค่าปรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบ ผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	99
5.2.6 ปัญหาอื่นๆ ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	100
5.3 ตัวอย่างระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย.....	100
5.4 การบริการเสริมความมั่นคงระบบโครงข่ายไฟฟ้าในต่างประเทศ	103
5.4.1 ประเภทของการบริการเสริมความมั่นคงของระบบโครงข่ายไฟฟ้า	104
5.4.2 การชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive power compensation).....	104
5.4.3 ตลาดการซื้อขายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในต่างประเทศ (International reactive power markets).....	106
บทที่ 6 การคิดค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้า.....	108
6.1 ต้นทุนการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า	108
6.1.1 ค่าปรับสำหรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (VAr charge).....	109
6.1.2 ค่าสูญเสียโอกาสจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริง (Opportunity costs).....	109
6.1.3 ค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า (Utility operation costs).....	110
6.2 การแบ่งกรณีของการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า	111

6.2.1 แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในระบบโครงข่ายไฟฟ้าก่อนการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันปกติ	112
6.2.2 แรงดันไฟฟ้าบางบัสในระบบโครงข่ายไฟฟ้าก่อนการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันปกติ	114
บทที่ 7 แบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในระบบโครงข่ายไฟฟ้า	118
7.1 แบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน	118
7.2 แบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า	122
7.3 แบบจำลองการทำงานในโหมดกำลังไฟฟารีแอกทีฟและโหมดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง	126
7.4 หลักการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า	130
7.5 แบบจำลองการคำนวณรายรับและรายจ่ายจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	131
7.6 หลักการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มากกว่าหนึ่งระบบบนสายป้อนเดียวกัน	136
บทที่ 8 ระบบทดสอบ	138
8.1 ระบบโครงข่ายไฟฟ้า	138
8.2 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ทดสอบ	139
8.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์	139
8.1.2 อินเวอร์เตอร์	140
8.3 ข้อมูลลักษณะการใช้ไฟฟ้า	140
8.4 ข้อมูลความเข้มแสงและอุณหภูมิ	142
บทที่ 9 ผลการทดสอบ	148

9.1.2.3 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณี ที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้ แรงดันไฟฟ้าไม่ดีและดีตามลำดับ	169
9.1.2.4 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณี ที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้ แรงดันไฟฟ้าไม่ดีและไม่ดีตามลำดับ	172
9.2 ผลการทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในระยะเวลา 1 เดือน .	173
9.2.1 การทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ใน ระยะเวลา 1 เดือน	174
9.2.2 การทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุน แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในระยะเวลา 1 เดือน.....	188
9.3 การทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในกรณีที่ไม่มีการทำงาน ของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า ในระยะเวลา 1 เดือน	203
9.3.1 การทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ในกรณี ที่ไม่มีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า ในระยะเวลา 1 เดือน	203
9.3.2 การทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่สนับสนุน แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณีที่ไม่มีการทำงานของอุปกรณ์รักษา ระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า ในระยะเวลา 1 เดือน.....	217
9.4 การทดสอบระบบโครงข่ายไฟฟ้าเมื่อมีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ระบบ เชื่อมต่อบนสายป้อนเดียวกัน.....	232
บทที่ 10 สรุปวิทยานิพนธ์.....	241
10.1 สรุป	241
10.2 ข้อเสนอแนะ	242

ผ

หน้า

รายการอ้างอิง..... 243

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 249



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 เป้าหมายการใช้พลังงานทดแทนเพื่อการผลิตไฟฟ้าในช่วงปี พ.ศ. 2555-2564	2
ตารางที่ 1.2 ราคามาตรฐานของอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์..	3
ตารางที่ 2.1 นิยามแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกิน	19
ตารางที่ 2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า.....	22
ตารางที่ 3.1 มาตรฐานแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	27
ตารางที่ 3.2 ระยะเวลาปลดวงจรสูงสุดเมื่อแรงดันไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วงแรงดันไฟฟ้าปกติของกฟภ.....	30
ตารางที่ 3.3 ตารางกำหนดความสามารถในการปรับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ	32
ตารางที่ 3.4 มาตรฐานแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้านครหลวง กรณีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ จ่ายไฟเข้าระบบ	37
ตารางที่ 3.5 ระยะเวลาปลดวงจรสูงสุดเมื่อแรงดันไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วงแรงดันไฟฟ้าปกติของการไฟฟ้านครหลวง	39
ตารางที่ 3.6 มาตรฐานแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.....	41
ตารางที่ 3.7 สรุปข้อกำหนดระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า	48
ตารางที่ 3.8 ข้อกำหนดช่วงเวลาอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของวัน (TOD rate).....	52
ตารางที่ 3.9 ข้อกำหนดช่วงเวลาอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้ (TOU rate).....	52
ตารางที่ 3.10 อัตราค่าไฟฟ้าสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 3 กิจการขนาดกลาง	53
ตารางที่ 3.11 อัตราค่าไฟฟ้าสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 4 กิจการขนาดใหญ่	54
ตารางที่ 3.12 ค่าไฟฟ้าขายส่ง ณ ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆ.....	60
ตารางที่ 3.13 ส่วนเพิ่มอัตรารับซื้อสำหรับพลังงานทดแทน	60
ตารางที่ 3.14 อัตรารับซื้อไฟฟ้ารูปแบบ FiT ในโครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาในปี 2556.....	61
ตารางที่ 3.15 ข้อมูลการซื้อขายไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	62

ตารางที่ 3.16 ค่าไฟฟ้าจากการซื้อไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	62
ตารางที่ 3.17 ค่าไฟฟ้าจากการขายไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	63
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท เคียวเซรา จำกัด (มหาชน)	74
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน).....	74
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท General Solar Power จำกัด	75
ตารางที่ 4.4 ส่วนประกอบของอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	76
ตารางที่ 4.5 ข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์รุ่นต่างๆ.....	82
ตารางที่ 4.6 ข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์รุ่นต่างๆ (ต่อ).....	83
ตารางที่ 4.7 ข้อดีและข้อเสียของการตัวจัดการแยกตัวอิสระ.....	90
ตารางที่ 5.1 การสำรวจข้อมูลจากหน่วยงานต่างๆ	91
ตารางที่ 5.2 ข้อมูลสถานะของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยในปัจจุบัน	94
ตารางที่ 6.2 สถานะของระบบโครงข่ายไฟฟ้าก่อนและหลังการเมื่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์ แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าจริงได้.....	117
ตารางที่ 8.1 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า อำเภอแม่สะเรียง จังหวัด แม่ฮ่องสอน	139
ตารางที่ 8.2 ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท General Solar Power จำกัด	139
ตารางที่ 8.3 ข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	140
ตารางที่ 9.1 ข้อมูลโหลด ความเข้มแสง และอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ.....	152
ตารางที่ 9.2 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการทำงานของอุปกรณ์ รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในช่วงเวลาต่างๆ	152
ตารางที่ 9.3 ข้อมูลโหลด ความเข้มแสง และอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ.....	155
ตารางที่ 9.4 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการทำงานของอุปกรณ์ รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในช่วงเวลาต่างๆ	155
ตารางที่ 9.5 ข้อมูลโหลด ความเข้มแสง และอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ.....	158

ตารางที่ 9.6 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการทำงานของอุปกรณ์ รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในช่วงเวลาต่างๆ	158
ตารางที่ 9.7 ข้อมูลโหลด ความเข้มแสง และอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ	161
ตารางที่ 9.8 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการทำงานของอุปกรณ์ รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในช่วงเวลาต่างๆ	161
ตารางที่ 9.9 ข้อมูลโหลด ความเข้มแสง และอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ	166
ตารางที่ 9.10 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการทำงานของอุปกรณ์ รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในช่วงเวลาต่างๆ	166
ตารางที่ 9.11 ข้อมูลโหลด ความเข้มแสง และอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ	170
ตารางที่ 9.12 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการทำงานของอุปกรณ์ รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในช่วงเวลาต่างๆ	170
ตารางที่ 9.13 จำนวนครั้งของแต่ละกรณีในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน (ค่าฐานนิยม ใน 15 นาที)	187
ตารางที่ 9.14 สรุปผลการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1 เดือน	188
ตารางที่ 9.15 จำนวนครั้งของแต่ละกรณีในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน (ค่าฐานนิยม ใน 15 นาที)	202
ตารางที่ 9.16 สรุปผลการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1 เดือน	202
ตารางที่ 9.17 เปรียบเทียบผลการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1 เดือน	203
ตารางที่ 9.18 จำนวนครั้งของแต่ละกรณีในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน (ค่าฐานนิยม ใน 15 นาที)	217
ตารางที่ 9.19 สรุปผลการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1 เดือน	217
ตารางที่ 9.20 จำนวนครั้งของแต่ละกรณีในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน (ค่าฐานนิยม ใน 15 นาที)	231
ตารางที่ 9.21 สรุปผลการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1 เดือน	232
ตารางที่ 9.22 เปรียบเทียบผลการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1 เดือน	232

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1.1 โครงสร้างของเนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	12
ภาพที่ 2.1 ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอย่างง่าย.....	16
ภาพที่ 2.2 โหลดโปรไฟล์ของภาคกลาง (กฟภ.) แบ่งตามประเภทของโหลด.....	21
ภาพที่ 2.3 แรงดันไฟฟ้าในสายป้อนเมื่อมีและไม่มีการควบคุมแรงดันจากหม้อแปลงสถานี.....	22
ภาพที่ 2.4 แรงดันไฟฟ้าในสายป้อนเมื่อมีและไม่มีตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าติดตั้งในสายป้อน	23
ภาพที่ 2.5 แรงดันไฟฟ้าในสายป้อนเมื่อไม่มีตัวเก็บประจุติดตั้งในสายป้อนและเมื่อมีตัวเก็บประจุติดตั้งในสายป้อน.....	24
ภาพที่ 3.1 มาตรฐานการข้ามผ่านความผิดพร่องของกฟภ.....	31
ภาพที่ 3.2 มาตรฐานการข้ามผ่านความผิดพร่องของประเทศเยอรมัน.....	44
ภาพที่ 3.3 มาตรฐานการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของประเทศเยอรมัน.....	44
ภาพที่ 3.4 การจำกัดกำลังไฟฟ้าจริงและการหน่วงเวลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ.....	45
ภาพที่ 3.5 มาตรฐานตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของประเทศเยอรมัน	46
ภาพที่ 4.1 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ	64
ภาพที่ 4.2 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า	65
ภาพที่ 4.3 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน.....	66
ภาพที่ 4.4 แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งไดโอด	68
ภาพที่ 4.5 ส่วนประกอบของอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	76
ภาพที่ 4.6 สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมของสัญญาณ Pulse-width modulation.....	78
ภาพที่ 4.7 จุดทำงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	86
ภาพที่ 4.8 การหาจุดทำงานสูงสุดโดยวิธี P&O.....	87
ภาพที่ 4.11 การข้ามผ่านความผิดพร่อง.....	89
ภาพที่ 5.1 การเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าระหว่างระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จากการเลือกใช้อัตราส่วนของเซลล์แสงอาทิตย์ต่ออินเวอร์เตอร์ที่ต่างกัน	96

ภาพที่ 5.2 การเชื่อมต่ออาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แห่งที่ 1	101
ภาพที่ 5.3 การเชื่อมต่ออาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แห่งที่ 2	102
ภาพที่ 5.4 การเชื่อมต่ออาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แห่งที่ 3	103
ภาพที่ 6.1 การลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงเมื่อมีและไม่มีกระจายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	110
ภาพที่ 6.2 แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าเมื่อมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะปกติ	113
ภาพที่ 6.3 ค่าใช้จ่ายในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าอยู่ในสภาวะปกติ.....	114
ภาพที่ 6.4 แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าเมื่อมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะที่แรงดันไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้าอยู่ในสภาวะไม่ปกติ (แรงดันไฟฟ้าตก)	115
ภาพที่ 6.5 ค่าใช้จ่ายในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าอยู่ในสภาวะไม่ปกติ ...	116
ภาพที่ 7.1 แบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน.....	120
ภาพที่ 7.2 แบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า.....	123
ภาพที่ 7.3 แบบจำลองการทำงานในโหมดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและโหมดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง....	127
ภาพที่ 7.4 แบบจำลองการทำงานในโหมดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและโหมดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง....	128
ภาพที่ 7.5 ระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าหลายตัว.....	131
ภาพที่ 7.6 แบบจำลองการคำนวณรายรับและรายจ่ายจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	132
ภาพที่ 7.7 แบบจำลองการคำนวณรายรับและรายจ่ายจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย	135
ภาพที่ 8.1 ระบบโครงข่ายไฟฟ้า อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน	138
ภาพที่ 8.2 ข้อมูลลักษณะการใช้ไฟฟ้าของกพน.1 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2557 ในวันทำงาน	141
ภาพที่ 8.3 ข้อมูลลักษณะการใช้ไฟฟ้าของกพน.1 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2557 ในวันเสาร์.....	141
ภาพที่ 8.4 ข้อมูลลักษณะการใช้ไฟฟ้าของกพน.1 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2557 ในวันอาทิตย์	142

ภาพที่ 8.5 ความเข้มแสงตลอด 24 ชั่วโมง ในวันที่ 1-7 เมษายน พ.ศ. 2557	143
ภาพที่ 8.6 ความเข้มแสงตลอด 24 ชั่วโมง ในวันที่ 8-14 เมษายน พ.ศ. 2557	143
ภาพที่ 8.7 ความเข้มแสงตลอด 24 ชั่วโมง ในวันที่ 15-21 เมษายน พ.ศ. 2557	144
ภาพที่ 8.8 ความเข้มแสงตลอด 24 ชั่วโมง ในวันที่ 22-28 เมษายน พ.ศ. 2557	144
ภาพที่ 8.9 ความเข้มแสงตลอด 24 ชั่วโมง ในวันที่ 29-31 เมษายน พ.ศ. 2557	145
ภาพที่ 8.10 อุณหภูมิตลอด 24 ชั่วโมง ในวันที่ 1-7 เมษายน พ.ศ. 2557	145
ภาพที่ 8.11 อุณหภูมิตลอด 24 ชั่วโมง ในวันที่ 8-14 เมษายน พ.ศ. 2557	146
ภาพที่ 8.12 อุณหภูมิตลอด 24 ชั่วโมง ในวันที่ 15-21 เมษายน พ.ศ. 2557	146
ภาพที่ 8.13 อุณหภูมิตลอด 24 ชั่วโมง ในวันที่ 22-28 เมษายน พ.ศ. 2557	147
ภาพที่ 8.14 อุณหภูมิตลอด 24 ชั่วโมง ในวันที่ 29-31 เมษายน พ.ศ. 2557	147
ภาพที่ 9.1 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในกรณีต่างๆ	149
ภาพที่ 9.2 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ในกรณีต่างๆ.....	150
ภาพที่ 9.3 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าดีและดีตามลำดับ.....	152
ภาพที่ 9.4 แรงดันไฟฟ้าในบัสที่ 1, 3 และ 5.....	153
ภาพที่ 9.5 แรงดันไฟฟ้าในบัสที่ 8, 10, 12 และ 14.....	153
ภาพที่ 9.6 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าดีและไม่ดีตามลำดับ.....	155
ภาพที่ 9.7 แรงดันไฟฟ้าในบัสที่ 1, 3 และ 5.....	156
ภาพที่ 9.8 แรงดันไฟฟ้าในบัสที่ 8, 10, 12 และ 14.....	156

ภาพที่ 9.9 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าไม่ดีและดีตามลำดับ.....	158
ภาพที่ 9.10 แรงดันไฟฟ้าในบัสที่ 1, 3 และ 5.....	159
ภาพที่ 9.11 แรงดันไฟฟ้าในบัสที่ 8, 10, 12 และ 14.....	159
ภาพที่ 9.12 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าไม่ดีและไม่ดีตามลำดับ	161
ภาพที่ 9.13 แรงดันไฟฟ้าในบัสที่ 1, 3 และ 5.....	162
ภาพที่ 9.14 แรงดันไฟฟ้าในบัสที่ 8, 10, 12 และ 14.....	162
ภาพที่ 9.15 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณีที่ต่างๆ.....	164
ภาพที่ 9.16 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าดีและดีตามลำดับ	166
ภาพที่ 9.17 แรงดันไฟฟ้าในบัสที่ 1, 3 และ 5.....	167
ภาพที่ 9.18 แรงดันไฟฟ้าในบัสที่ 8, 10, 12 และ 14.....	167
ภาพที่ 9.19 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าดีและไม่ดีตามลำดับ	169
ภาพที่ 9.20 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าไม่ดีและดีตามลำดับ	170
ภาพที่ 9.21 แรงดันไฟฟ้าในบัสที่ 1, 3 และ 5.....	171
ภาพที่ 9.22 แรงดันไฟฟ้าในบัสที่ 8, 10, 12 และ 14.....	171

ภาพที่ 9.23 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการ สนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้า จากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าไม่ดีและไม่ดีตามลำดับ.....	173
ภาพที่ 9.24 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57.....	174
ภาพที่ 9.25 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57.....	175
ภาพที่ 9.26 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57.....	175
ภาพที่ 9.27 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57.....	176
ภาพที่ 9.28 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57.....	176
ภาพที่ 9.29 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57.....	177
ภาพที่ 9.30 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57.....	177
ภาพที่ 9.31 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57.....	178
ภาพที่ 9.32 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57.....	178
ภาพที่ 9.33 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57.....	179
ภาพที่ 9.34 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์ แสงอาทิตย์ ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57.....	179
ภาพที่ 9.35 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์ แสงอาทิตย์ ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57.....	180
ภาพที่ 9.36 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์ แสงอาทิตย์ ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57.....	180
ภาพที่ 9.37 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์ แสงอาทิตย์ ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57.....	181

ภาพที่ 9.38 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57.....	181
ภาพที่ 9.39 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57.....	182
ภาพที่ 9.40 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57	182
ภาพที่ 9.41 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57	183
ภาพที่ 9.42 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57	183
ภาพที่ 9.43 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 28-31 มี.ค. 57	184
ภาพที่ 9.44 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57.....	184
ภาพที่ 9.45 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57	185
ภาพที่ 9.46 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57	185
ภาพที่ 9.47 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57	186
ภาพที่ 9.48 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 28-31 มี.ค. 57	186
ภาพที่ 9.49 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57.....	189
ภาพที่ 9.50 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57.....	189
ภาพที่ 9.51 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57	190
ภาพที่ 9.52 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57	190
ภาพที่ 9.53 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57	191
ภาพที่ 9.54 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57	191
ภาพที่ 9.55 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57	192
ภาพที่ 9.56 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57	192
ภาพที่ 9.57 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57	193

ภาพที่ 9.58 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57	193
ภาพที่ 9.59 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57	194
ภาพที่ 9.60 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57	194
ภาพที่ 9.61 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57	195
ภาพที่ 9.62 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57	195
ภาพที่ 9.63 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57	196
ภาพที่ 9.64 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57	196
ภาพที่ 9.65 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57	197
ภาพที่ 9.66 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57	197
ภาพที่ 9.67 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57	198
ภาพที่ 9.68 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57	198
ภาพที่ 9.69 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57	199
ภาพที่ 9.70 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57	199
ภาพที่ 9.71 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57	200
ภาพที่ 9.72 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57	200
ภาพที่ 9.73 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57	201
ภาพที่ 9.74 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57	204
ภาพที่ 9.75 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57	205
ภาพที่ 9.76 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57	205

ภาพที่ 9.77 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57	205
ภาพที่ 9.78 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57	206
ภาพที่ 9.79 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57	206
ภาพที่ 9.80 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57	207
ภาพที่ 9.81 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57	207
ภาพที่ 9.82 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57	208
ภาพที่ 9.83 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57	208
ภาพที่ 9.84 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57	209
ภาพที่ 9.85 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57	209
ภาพที่ 9.86 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57	210
ภาพที่ 9.87 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57	210
ภาพที่ 9.88 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57	211
ภาพที่ 9.89 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57	211
ภาพที่ 9.90 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57	212
ภาพที่ 9.91 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57	212
ภาพที่ 9.92 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 21-28 มี.ค. 57	213

ภาพที่ 9.93 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57	213
ภาพที่ 9.94 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57.....	214
ภาพที่ 9.95 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57	214
ภาพที่ 9.96 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57	215
ภาพที่ 9.97 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57	215
ภาพที่ 9.98 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 28-31 มี.ค. 57	216
ภาพที่ 9.99 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57.....	218
ภาพที่ 9.100 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57	219
ภาพที่ 9.101 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57	219
ภาพที่ 9.102 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 21-28 มี.ค. 57	220
ภาพที่ 9.103 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57	220
ภาพที่ 9.104 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57	221
ภาพที่ 9.105 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57	221
ภาพที่ 9.106 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57	222
ภาพที่ 9.107 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57	222
ภาพที่ 9.108 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57	223
ภาพที่ 9.109 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์ แสงอาทิตย์ ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57	223
ภาพที่ 9.110 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์ แสงอาทิตย์ ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57	224

ภาพที่ 9.111 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57.....	224
ภาพที่ 9.112 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57.....	225
ภาพที่ 9.113 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57.....	225
ภาพที่ 9.114 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57	226
ภาพที่ 9.115 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57.....	226
ภาพที่ 9.116 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57.....	227
ภาพที่ 9.117 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57.....	227
ภาพที่ 9.118 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57.....	228
ภาพที่ 9.119 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57	228
ภาพที่ 9.120 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57.....	229
ภาพที่ 9.121 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57.....	229
ภาพที่ 9.122 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57.....	230
ภาพที่ 9.123 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57.....	230
ภาพที่ 9.124 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 1....	234
ภาพที่ 9.125 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 2....	234
ภาพที่ 9.126 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 1	235
ภาพที่ 9.127 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 2	235
ภาพที่ 9.128 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5.....	236
ภาพที่ 9.129 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14.....	236
ภาพที่ 9.130 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 1....	237

ภาพที่ 9.131 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 2.... 237

ภาพที่ 9.132 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์
แสงอาทิตย์ระบบที่ 1 238

ภาพที่ 9.133 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์
แสงอาทิตย์ระบบที่ 2 238

ภาพที่ 9.134 แรงแดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5..... 239

ภาพที่ 9.135 แรงแดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14..... 239



บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาของบทนี้จะได้นำเสนอที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษาวิธีดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ โดยเนื้อหาในแต่ละส่วนในบทนำมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยต้องพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศเป็นหลัก ซึ่งรวมทั้งพลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ทำให้ภาครัฐได้ให้ความสนใจในการจัดหาพลังงานไฟฟ้าในอนาคต โดยมุ่งเน้นความมั่นคงของกำลังการผลิตไฟฟ้าควบคู่ไปกับการดูแลรักษาสิ่งแวดล้อม การส่งเสริมประสิทธิภาพการใช้พลังงาน การส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ และการส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน โดยได้มีการสนับสนุนเชิงนโยบายจากแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2553-2573 ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 3 (Power Development Plan: PDP 2010 ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 3) [1] และแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2555-2564 (Alternative Energy Development Plan: AEDP 2012-2021) [2] เพื่อกำหนดกรอบและทิศทางการพัฒนาพลังงานทดแทนของประเทศ ซึ่งจากแผนดังกล่าวได้มีนโยบายจะใช้พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก เพื่อไปทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลให้ได้อย่างน้อยร้อยละ 25 ภายใน 10 ปี โดยจะทำให้จำนวนโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลบางส่วน เช่น ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ ถูกทดแทนด้วยโรงไฟฟ้าประเภทพลังงานหมุนเวียน เป้าหมายของแหล่งพลังงานหมุนเวียนหลักที่ถูกกำหนดจากแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2553-2573 ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 3 และแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2555-2564 ได้แก่ พลังงานชีวมวล พลังงานจากก๊าซชีวภาพ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานจากขยะ และพลังงานรูปแบบใหม่ โดยเป้าหมายกำลังการผลิตติดตั้งสะสมเดิมในช่วงปี พ.ศ. 2555-2564 อยู่ที่ 9,201 เมกะวัตต์ ซึ่งได้มีการปรับปรุงเป้าหมายกำลังการผลิตติดตั้งสะสมใหม่ในช่วงปี พ.ศ. 2555-2564 เป็น 13,927 เมกะวัตต์ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 1.1 [1]

ตารางที่ 1.1 เป้าหมายการใช้พลังงานทดแทนเพื่อการผลิตไฟฟ้าในช่วงปี พ.ศ. 2555-2564

ประเภทพลังงานหมุนเวียน	เป้าหมายกำลังการผลิตติดตั้ง สะสมเดิม (เมกะวัตต์)	เป้าหมายกำลังการผลิตติดตั้ง สะสมใหม่ (เมกะวัตต์)
พลังงานชีวมวล	3,630	4,800
ก๊าซชีวภาพ	600	3,600
พลังงานแสงอาทิตย์	2,000	3,000
พลังงานลม	1,200	1,800
พลังงานน้ำ	1,608	1,608
พลังงานจากขยะ	160	400
พลังงานรูปแบบใหม่	3	3
รวม	9,201	13,927

ความนิยมในพลังงานหมุนเวียนจากทั่วโลกมีเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปัญหาภาวะโลกร้อนและความขาดแคลนพลังงานจากเพลิงฟอสซิลในอนาคต ทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียนที่สะอาดได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก และในปัจจุบันมีแนวโน้มของต้นทุนในการติดตั้งรวมถึงราคาของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีราคาลดต่ำลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 1.2 [3] ทำให้เป็นการส่งเสริมการลงทุนในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ควบคู่กับการสนับสนุนเชิงนโยบายจากรัฐบาล จากข้อมูลของสำนักงานกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.) [4] ทำให้ทราบว่ามีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น โดยมีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้จ่ายไฟฟ้าเข้าระบบเชิงพาณิชย์แล้ว (Commercial Operation Date: COD) จำนวน 262 โรง คิดเป็นกำลังการผลิตรวม 993.56 เมกะวัตต์ และมีโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้า (Power Purchase Agreement: PPA) เรียบร้อยแล้วแต่ยังไม่ได้จ่ายไฟฟ้าเข้าระบบเชิงพาณิชย์จำนวน 38 โรง คิดเป็นกำลังการผลิตรวม 320.23 เมกะวัตต์ ซึ่งตัวเลขต่างๆ เหล่านี้สะท้อนให้เห็นว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความสนใจในการลงทุนเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 1.2 ราคามาตรฐานของอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

		ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	ม.ค.
		2554	2554	2554	2554	2555	2555	2555
Module	US \$/Wp	2.65	2.6	2.49	2.43	2.42	2.3	2.29
	Euro €/Wp	2.43	2.37	2.33	2.33	2.31	2.28	2.17
Inverter	US \$/W	0.714	0.714	0.714	0.713	0.712	0.711	0.711
	Euro €/W	0.500	0.528	0.528	0.534	0.548	0.540	0.526
Battery	US \$/Wh	0.213	0.213	0.213	0.213	0.213	0.213	0.213
	Euro €/Wh	0.149	0.158	0.158	0.160	0.164	0.162	0.158
Solar Systems	Residential c/kWh	29.53	29.38	29.25	29.20	29.14	29.00	28.91
	Commercial c/kWh	19.97	19.85	19.72	19.68	19.63	19.51	19.42
	Industrial c/kWh	15.56	15.47	15.37	15.34	15.31	15.21	15.15

เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีมากขึ้น แต่การจัดการและการควบคุมการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยข้อกำหนดระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า [5-13] ในปัจจุบันยังใช้ประโยชน์จากโรงไฟฟ้าที่มีอินเวอร์เตอร์เป็นส่วนควบคุมการจ่ายไฟฟ้าทำได้ไม่เต็มที่นัก โดยการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันจะมีเพียงข้อกำหนดการเชื่อมต่อบนระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งมีการกำหนดค่าต่างๆ เช่น แรงดันไฟฟ้า ความถี่ไฟฟ้า และตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ไว้เป็นช่วงให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานได้อย่างอิสระภายใต้ข้อกำหนดนั้น นอกจากนี้ปัญหาที่พบเมื่อมีการเชื่อมต่อบนระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า คือ ปัญหาแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าอยู่นอกช่วงตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อบนระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่มีสาเหตุหลักจาก 2 ประการ ได้แก่ (1) สาเหตุที่เกิดจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์อาจจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าจนทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าเกินร้อยละ 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ ซึ่งจากข้อกำหนดการเชื่อมต่อบนระบบโครงข่ายไฟฟ้าทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่จำเป็นต้องช่วยเหลือแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าและทำให้ศูนย์ควบคุมการจ่ายไฟฟ้าต้องรับภาระในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า (2) สาเหตุที่เกิดจากระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรง เช่น การเกิดอุบัติเหตุทำให้

สายส่งชำรุด การซ่อมบำรุงระบบโครงข่ายไฟฟ้า การเพิ่มขึ้นของโหลดขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมซึ่งมีทั้งกรณีเพิ่มขึ้นและลดลง ทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จำเป็นต้องเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าขณะที่แรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติไม่สามารถเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ทำให้ต้องมีการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเพื่อเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อให้มีระดับแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่ข้อกำหนดการเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้กำหนดไว้ โดยการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟนี้อาจส่งผลกระทบต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว อีกทั้งยังส่งผลต่อเนื่องถึงการคิดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นทั้งผู้ขายไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้าต้องจ่ายให้กับการไฟฟ้าในกรณีที่มีค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเกินที่กำหนด [14, 15]

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์และอินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า และนำเสนอแนวคิดให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีการชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเพื่อการช่วยรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่นำเสนอจะมีการทำงานภายใต้ข้อกำหนดการเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้าซึ่งจะทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีส่วนร่วมในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าซึ่งจะเป็นแนวทางการพัฒนาการทำงานร่วมกันของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับศูนย์ควบคุมการจ่ายไฟฟ้าให้สามารถช่วยกันสนับสนุนระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ นอกจากนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการคิดค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าซึ่งจะแบ่งกรณีการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ออกเป็น 2 กรณี คือ (1) กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำประโยชน์ให้กับระบบโครงข่ายไฟฟ้าโดยรวม และ (2) กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ส่งผลเสียต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อให้การคิดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเป็นไปอย่างยุติธรรมต่อทั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นผู้ขายไฟฟ้าและศูนย์ควบคุมการจ่ายไฟฟ้าซึ่งเป็นผู้ดูแลระบบโครงข่ายไฟฟ้า และยังเป็นแนวทางหนึ่งที่จะสนับสนุนให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะมีเพิ่มมากขึ้นในอนาคตได้มีส่วนร่วมต่อการทำงานของระบบโครงข่ายไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) พัฒนาแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า
- 2) นำเสนอแนวทางการควบคุมการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนระบบโครงข่ายไฟฟ้าในด้านแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีการทำงานภายใต้ข้อกำหนดการเชื่อมต่อบนระบบโครงข่ายไฟฟ้า
- 3) นำเสนอแนวทางการคิดค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) พิจารณาระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า
- 2) พิจารณาระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นประเภทโซลาร์ฟาร์มขนาดใหญ่กว่า 1 เมกะวัตต์
- 3) พิจารณาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ประกอบด้วย ความเข้มแสงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์
- 4) พิจารณาระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่มีโครงสร้างแบบเรเดียล
- 5) พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังเป็นแบบ 3 เฟสสมดุล และทำงานในสถานะอยู่ตัว
- 6) การเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นโครงสร้างอินเวอร์เตอร์แบบรวมศูนย์
- 7) พิจารณาอินเวอร์เตอร์ให้สามารถจ่ายและรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้ตลอดเวลา
- 8) การตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้ามีความครอบคลุมทุกบัสในระบบโครงข่ายไฟฟ้า
- 9) พิจารณาเฉพาะปรากฏการณ์ด้านคุณภาพไฟฟ้าของแรงดันไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับขนาดของแรงดันไฟฟ้าเท่านั้น
- 10) ไม่พิจารณาผลของฮาร์มอนิก

1.4 ขั้นตอนการศึกษาวิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาบทความทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ดังนี้
 - 1.1) ศึกษาถึงความหมายและประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว
 - 1.2) ศึกษาหลักการพื้นฐานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
 - 1.3) ศึกษาหลักการพื้นฐานและข้อมูลเทคนิคของอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
 - 1.4) ศึกษาหลักการพื้นฐานและการคำนวณของแรงดันตกและแรงดันเกิน
 - 1.5) ศึกษาข้อกำหนดการเชื่อมต่อบนระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวง

- 1.6) ศึกษาแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- 2) วิเคราะห์และระบุปัญหาที่จะศึกษา ดังนี้
 - 2.1) วิเคราะห์ผลกระทบของโหมดการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า
 - 2.2) วิเคราะห์หาแนวทางการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้า
 - 2.3) วิเคราะห์ต้นทุนในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าของทั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และศูนย์ควบคุมการจ่ายไฟฟ้า และหาแนวทางการคิดค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม
- 3) กำหนดขอบเขตของงานวิจัย
- 4) ขอข้อมูลการเชื่อมต่ออาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์และข้อมูลพื้นฐานจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย
- 5) เก็บข้อมูลพื้นฐานจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้การตอบรับการขอข้อมูล
- 6) ขอข้อมูลระบบโครงข่ายไฟฟ้าและข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- 7) เก็บข้อมูลระบบโครงข่ายไฟฟ้าและข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- 8) พัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบและวิเคราะห์การทำงานของอินเวอร์เตอร์ดังนี้
 - 8.1) พัฒนาโปรแกรมการทดสอบแรงดันไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากผลของโหลดและแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าย่อยที่มีการเปลี่ยนแปลง
 - 8.2) พัฒนาโปรแกรมการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในโหมดการทำงานต่างๆ ได้แก่ โปรแกรมการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำงานในปัจจุบันและโปรแกรมการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้า
 - 8.3) พัฒนาโปรแกรมการทำงานของโหมดกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟและโหมดการจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง
 - 8.4) พัฒนาโปรแกรมการคิดค่ารักษาแรงดันไฟฟ้าในกรณีต่างๆ

- 9) เก็บข้อมูลความเข้มแสง อุณหภูมิ ค่าของกระแส แรงดันและกำลังไฟฟ้า ที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บนอาคารเจริญวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยตลอดปี
- 10) ออกแบบระบบที่ใช้ในการทดสอบโดยอ้างอิงจากข้อมูลที่เก็บได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทยและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- 11) ทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีต่างๆ และการคิดค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าตามแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้น เพื่อทดสอบการทำงานของแบบจำลอง และวิเคราะห์ถึงผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้ารวมทั้งค่าใช้จ่ายในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าจากแบบจำลองที่ได้นำเสนอ
- 12) สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

- 1) แบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้การทำงานในแต่ละโหมดการทำงาน ที่มีการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า
- 2) แนวทางในการควบคุมการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งมีการทำงานภายใต้ข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริการโครงข่ายไฟฟ้า
- 3) แนวทางการคิดค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่มีความยุติธรรมต่อทั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และผู้ดูแลระบบโครงข่ายไฟฟ้า
- 4) ข้อมูลความเข้มแสงและอุณหภูมีย้อนหลังที่ได้จากการเก็บข้อมูลของอาคารเจริญวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 5) ข้อมูลโครงสร้างอาคารเซลล์แสงอาทิตย์และข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ในประเทศไทย
- 6) ข้อมูลโครงสร้างและข้อมูลพื้นฐานของระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แบ่งออกเป็น 4 หัวข้อได้แก่ (1) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (2) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (3) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (4) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคิดต้นทุนในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า

1) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์มีการศึกษาเพื่อนำเสนอแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในลักษณะต่างๆ เช่น บทความ [16, 17] มีการเสนอแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบไดโอดเดี่ยว ซึ่งเป็นแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถเข้าใจได้ง่าย โดยในบทความนี้ได้นำเสนอการหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการคำนวณเพื่อหาค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ บทความ [18, 19] ได้นำเสนอแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด มีการคำนวณเพื่อหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นเช่นกัน แต่พารามิเตอร์ที่จำเป็นเพียง 4 พารามิเตอร์เท่านั้น โดยที่แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอดนั้นจะมีความแม่นยำกรณีที่มีความเข้มแสงที่ต่ำ แต่แบบจำลองในลักษณะนี้จะมีความซับซ้อนกว่าแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบไดโอดเดี่ยว แบบจำลองแบบต่างๆ นั้นมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน โดยแบบจำลองแบบเซลล์แสงอาทิตย์ไดโอดเดี่ยวจะสามารถเข้าใจได้ง่ายและไม่ซับซ้อนนักเมื่อเทียบกับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองไดโอด

เนื่องจากความง่ายต่อความเข้าใจและความแม่นยำที่ดีของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบไดโอดเดี่ยว วิทยานิพนธ์นี้จึงได้พิจารณาแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบไดโอดเดี่ยวที่มีการพิจารณาความต้านทานที่เชื่อมต่อบนอนุกรมและขนานร่วมกัน

2) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีการศึกษาที่หลากหลาย ซึ่งมีจุดประสงค์ในการศึกษาที่แตกต่างกันไปเช่นกัน บทความ [20] ได้มีการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในการคำนวณด้วยสมการต่างๆ เพื่อการหาจุดทำงานสูงสุด (Maximum power point) ที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ โดยมีการคำนึงถึงการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าโดยผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าอีกด้วย ซึ่งได้มีการเปรียบเทียบผลการจำลองกับการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ทำงานอยู่จริง ซึ่งเป็นพื้นฐานการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่น่าสนใจเพราะผลการจำลองมีความใกล้เคียงกับการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ทำงานอยู่จริง บทความ [21] มีอธิบายการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในรูปแบบของสมการแรงดันและกระแสไฟฟ้า รวมถึงมีการจำลองการทำงานในรูปแบบของบล็อกไดอะแกรม ซึ่งเป็นการจำลองแบบไดนามิกส์ ซึ่งการนำไปใช้ประโยชน์นั้นแตกต่างจากแบบจำลองจากบทความ [20] และการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในบทความ [22] เป็นการนำเสนอการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่จะไม่ทำให้อินเวอร์เตอร์เสียหายเนื่องจากการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เกินความสามารถของอินเวอร์เตอร์ อันได้แก่ พิกัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าทั้งขาเข้าและขาออกของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นการนำความสามารถของอินเวอร์เตอร์ในด้านการควบคุมการ

จ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกที่พมาศึกษา ซึ่งในบทความนี้ไม่ได้เน้นการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่จะเน้นศึกษาการทำงานของอินเวอร์เตอร์เพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามในบทความ [22] ยังไม่ได้คำนึงถึงการนำมาใช้งานกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าจริงที่มีข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าเป็นอีกข้อจำกัดหนึ่งในการทำงานของอินเวอร์เตอร์ นอกจากบทความ [22] แล้ว ยังมีงานวิจัยที่คล้ายกัน [23] ที่เสนอแบบจำลองเพื่อคำนวณหา กำลังไฟฟารีแอกที่พที่ต้องจ่ายเข้าสู่ระบบเพื่อชดเชยกำลังไฟฟารีแอกที่พของระบบโครงข่ายไฟฟ้า แต่มีหลักการและกระบวนการควบคุมที่แตกต่างกัน คือ มีการวนซ้ำโดยการเพิ่มกำลังไฟฟารีแอกที่พทุกรอบการคำนวณและมีการลดกำลังไฟฟ้าจริงเพื่อให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟารีแอกที่พได้เพิ่มขึ้นในกรณีที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าที่ต่ำกว่ามาตรฐาน บทความ [24] มีการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ที่มีการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า และมีการทดสอบให้เกิดความผิดพลาดขึ้นเพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้น

จากการศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ บทความ [21] มีหลักการพื้นฐานที่ดีและสามารถใช้ประยุกต์เพื่อศึกษาเพิ่มเติมได้ บทความ [21, 22] มีการคำนึงถึงขีดจำกัดของอินเวอร์เตอร์ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เลือกศึกษาถึงการจำลองอินเวอร์เตอร์ที่พิจารณาถึงความเข้มแสงและอุณหภูมิที่กระทบเซลล์แสงอาทิตย์ ขีดจำกัดการทำงานของอินเวอร์เตอร์รุ่นต่างๆ ที่มีการใช้งานในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทโซลาร์ฟาร์ม รวมทั้งมีการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่มีข้อจำกัดจากข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวง

3) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกที่พ

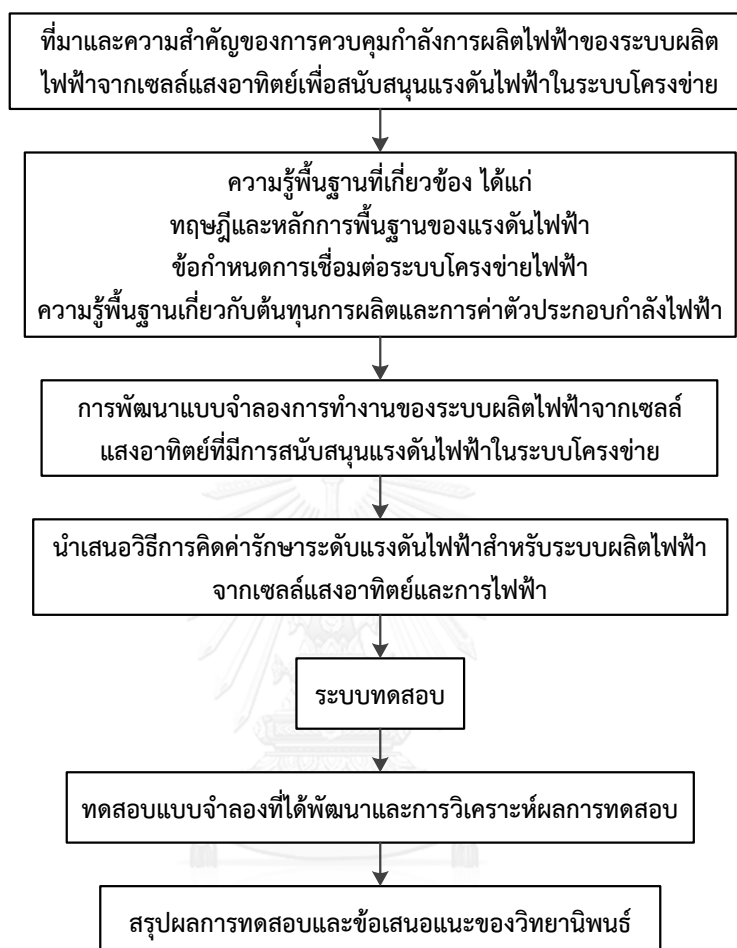
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกที่พ เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายหรือรับกำลังไฟฟารีแอกที่พได้ จึงมีการศึกษาการจ่ายกำลังไฟฟารีแอกที่พ บทความ [25] ได้นำเสนอการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟารีแอกที่พใน 3 ลักษณะ คือ การควบคุมแรงดันไฟฟ้า การควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้า และการควบคุมแบบผสม ได้มีการทดสอบผลซึ่งแสดงให้เห็นว่าการควบคุมทั้ง 3 รูปแบบจะทำให้แรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อมีค่าที่แตกต่างกัน โดยบทความ [25] แสดงให้เห็นถึงการคุมควบพื้นฐานที่อินเวอร์เตอร์ทั่วไปสามารถทำงานได้ซึ่งง่ายต่อการเข้าใจและสามารถนำมาพัฒนาต่อยอดในวิทยานิพนธ์ได้ ในบทความ [26] ได้มีการควบคุมการจ่ายทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกที่พ และการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ควบคุม ในขณะที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าเกิดแรงดันตกชั่วขณะขึ้นเพื่อช่วยสนับสนุนระบบโครงข่ายไฟฟ้า หลักการการควบคุมในบทความนี้มีความซับซ้อนกว่าบทความ [25] ซึ่งในการใช้งานจริงอาจจะต้องมีส่วนควบคุมอินเวอร์เตอร์เพิ่มเติม บทความ [27] ได้กล่าวถึงความสามารถและ

กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากโรงไฟฟ้าให้เกิดต้นทุนที่ต่ำที่สุด (Optimization) (3) แบบจำลองส่วนที่เป็น การคำนวณค่าชดเชยที่ผู้ดูแลระบบส่งจะต้องจ่ายคืนให้กับโรงไฟฟ้าจากค่าสูญเสียโอกาสในการจ่าย กำลังไฟฟ้าจริง (Loss opportunity costs of generation) ในบทความ [32, 33] ได้มีการนำเสนอ แนวทางการปรับปรุงโครงสร้างของการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและการรักษาระดับ แรงดันไฟฟ้าเพื่อให้ทั้งโรงไฟฟ้าและผู้ดูแลระบบมีส่วนร่วมมากขึ้น โดยมีการแบ่งต้นทุนในการจ่ายหรือ รับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าออกเป็น 2 ประเภท คือ (1) ต้นทุนของ โรงไฟฟ้า และ (2) ต้นทุนของผู้ดูแลระบบ ซึ่งจะมีทั้งต้นทุนที่เป็นค่าคงที่ (Fixed costs) และต้นทุนมี การเปลี่ยนแปลงได้ (Variable costs) โดยในบทความ [33] ได้มีการนำเสนอแบบจำลองการคิด ค่าใช้จ่ายในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเพิ่มเติมจากบทความที่ [32] ในเรื่องของต้นทุนการส่ง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ในบทความ [34] ได้มีการนำเสนอการคำนวณค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้าและ การจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ซับซ้อนขึ้น โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณจะมีตัวแปรของ ระยะห่างระหว่างโรงไฟฟ้าที่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟกับโหลดซึ่งเป็นผู้ที่รับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ามีค่าที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างดังกล่าว ทำให้ สามารถตัดสินใจเลือกโรงไฟฟ้าที่มีต้นทุนต่ำที่สุดได้

การคิดต้นทุนในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์นี้ได้ให้ความสำคัญของการจ่าย หรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีต่างๆ ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ เปลี่ยนแปลงไปของระบบโครงข่ายไฟฟ้าอาจมีสาเหตุจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์ แสงอาทิตย์หรือมีสาเหตุจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่มีสถานะที่เปลี่ยนแปลงไป โดยการคิดค่าใช้จ่ายนี้ได้ ยึดการคิดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเดิมตามระเบียบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและวิทยานิพนธ์นี้ได้ นำเสนอแนวคิดที่มีการแบ่งต้นทุนที่เกิดในส่วนของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และส่วนของ การไฟฟ้าออกจากกันเช่นเดียวกับบทความที่ [32, 33] นอกจากนี้จะมีการชดเชยเงินคืนให้กับระบบ ผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ตามแนวคิดในบทความที่ [31] แต่วิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอให้มีการ ชดเชยในกรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำประโยชน์ในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ให้กับระบบโครงข่ายเท่านั้น เพื่อให้ยุติธรรมต่อทั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการไฟฟ้า

1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาส่วนต่างๆ ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสัมพันธ์ตามโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 โครงสร้างของเนื้อหาวิทยานิพนธ์

จากโครงสร้างของเนื้อหาวิทยานิพนธ์ข้างต้น รายละเอียดเนื้อหาของวิทยานิพนธ์นี้สามารถแบ่งได้เป็น 9 ส่วน ดังนี้

- บทที่ 1 บทนำ การนำเสนอจะแบ่งเป็น 7 หัวข้อ ได้แก่ ที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์
- บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของแรงดันไฟฟ้า การนำเสนอจะแบ่งเป็น 5 หัวข้อ ได้แก่ ปรากฏการณ์ด้านคุณภาพไฟฟ้า การแปรเปลี่ยนค่าของแรงดันไฟฟ้า การแปรเปลี่ยนช่วงเวลาสั้น การแปรเปลี่ยนช่วงเวลานาน และการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า

- บทที่ 3 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า ค่าไฟฟ้า และการรับซื้อไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ การนำเสนอจะแบ่งเป็น 5 หัวข้อ ได้แก่ ข้อกำหนดระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ข้อกำหนดระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ข้อกำหนดระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของต่างประเทศ การรับซื้อไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า
- บทที่ 4 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ การนำเสนอจะแบ่งเป็น 2 หัวข้อ ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ และอินเวอร์เตอร์
- บทที่ 5 ข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน การนำเสนอจะแบ่งเป็น 4 หัวข้อ ได้แก่ สถานะระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย การทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย ตัวอย่างระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในบริการเสริมความมั่นคงระบบไฟฟ้าในต่างประเทศ
- บทที่ 6 แนวคิดการคิดค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้า การนำเสนอจะแบ่งเป็น 2 หัวข้อ ได้แก่ ต้นทุนการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า และการคิดค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้า
- บทที่ 7 แบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ การนำเสนอจะแบ่งเป็น 6 หัวข้อ ได้แก่ แบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน แบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า แบบจำลองการทำงานในโหมดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและโหมดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง หลักการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า แบบจำลองการคำนวณรายรับและรายจ่ายที่เกิดจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และหลักการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มากกว่าหนึ่งระบบบนสายป้อนเดียวกัน
- บทที่ 8 ระบบทดสอบ การนำเสนอจะแบ่งเป็น 4 หัวข้อ ได้แก่ ระบบโครงข่ายไฟฟ้า ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ข้อมูลลักษณะการใช้ไฟฟ้า และข้อมูลความเข้มแสงและอุณหภูมิ
- บทที่ 9 ผลการทดสอบ การนำเสนอจะแบ่งเป็น 4 หัวข้อ ได้แก่ ผลการทดสอบแบบจำลองการทำงาน of ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในกรณีต่างๆ ผลการทดสอบการทำงาน of ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในระยะเวลา 1 เดือน ผลการทดสอบการทำงาน of ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในกรณีที่ไม่มีการทำงาน of อุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า ในระยะเวลา 1 เดือน และผลการ

ทดสอบระบบโครงข่ายไฟฟ้าเมื่อมีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ระบบ
เชื่อมต่อบนสายป้อนเดียวกัน
บทที่ 10 สรุปริทยานิพนธ์ การนำเสนอจะแบ่งเป็น 2 หัวข้อ ได้แก่ สรุปร และข้อเสนอแนะ



บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของแรงดันไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้าเป็นปริมาณทางไฟฟ้าพื้นฐานที่สำคัญต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันไฟฟ้าซึ่งสามารถเกิดได้จากหลายสาเหตุ และผลของการเปลี่ยนแปลงที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจคือการเปลี่ยนแปลงของขนาดแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อโหลดหรือผู้ใช้ไฟฟ้าและระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นผู้ขายไฟฟ้า โดยเนื้อหาของบทนี้ได้แบ่งการนำเสนอเป็น 5 หัวข้อ ได้แก่

- 2.1 ปรากฏการณ์ด้านคุณภาพไฟฟ้า
- 2.2 การแปรเปลี่ยนค่าของแรงดันไฟฟ้า
- 2.3 การแปรเปลี่ยนช่วงเวลาสั้น
- 2.4 การแปรเปลี่ยนช่วงเวลานาน
- 2.5 การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า

2.1 ปรากฏการณ์ด้านคุณภาพไฟฟ้า

ปรากฏการณ์ด้านคุณภาพไฟฟ้า (Power quality) นั้นสามารถเกิดขึ้นได้ทั่วไปในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งมีที่มาจากหลายสาเหตุ ทั้งสาเหตุที่เกิดจากธรรมชาติ สาเหตุที่เกิดจากความผิดปกติในระบบโครงข่ายไฟฟ้า สาเหตุที่เกิดจากสภาพการทำงานของผู้ใช้ไฟฟ้าหรือโหลด หรือจากสาเหตุอื่น โดยตามมาตรฐาน IEC 61000 ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพไฟฟ้าไว้ 2 กลุ่ม ดังนี้ [35]

- 1) ปรากฏการณ์ความถี่ต่ำแพร่ไปตามสาย (Conducted low frequency phenomena)
- 2) ปรากฏการณ์ความถี่สูงแพร่ไปตามสาย (Conducted high frequency phenomena)

จากปรากฏการณ์ทางด้านคุณภาพไฟฟ้าที่มาตรฐาน IEC 61000 ได้กำหนดไว้สามารถแบ่งได้เป็น 7 ประเภทดังนี้

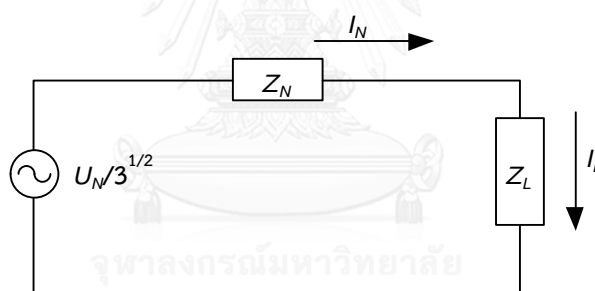
- 1) แรงดันไฟฟ้าไม่ได้ดุล (Voltage unbalance)
- 2) ความเพี้ยนของรูปคลื่น (Waveform distortions)
- 3) แรงดันไฟฟ้ากระเพื่อม (Voltage fluctuations)
- 4) การแปรเปลี่ยนของความถี่ไฟฟ้ากำลัง (Power frequency variations)
- 5) แรงดันไฟฟ้าเกินชั่วคราว หรือกระแสไฟฟ้าชั่วคราว
- 6) การแปรเปลี่ยนช่วงเวลาสั้น (Short-duration variations)

7) การแปรเปลี่ยนช่วงเวลานาน (Long-duration variations)

เนื่องจากปรากฏการณ์ทางด้านคุณภาพไฟฟ้าประเภทการแปรเปลี่ยนช่วงเวลาสั้นและการแปรเปลี่ยนช่วงเวลานาน ซึ่งการแปรเปลี่ยนของขนาดแรงดันไฟฟ้าทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกหรือแรงดันไฟฟ้าเกิน โดยแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนค่ากะทันหันในระบบโครงข่ายไฟฟ้าเนื่องจากการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกินในระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบทำงานผิดพลาดและอาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหายได้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้พิจารณาปรากฏการณ์ทางด้านคุณภาพไฟฟ้าประเภทการแปรเปลี่ยนช่วงเวลาสั้นและการแปรเปลี่ยนช่วงเวลานาน

2.2 การแปรเปลี่ยนค่าของแรงดันไฟฟ้า

การแปรเปลี่ยนค่าของแรงดันไฟฟ้า ในสถานะทำงานตามปกติจะมีค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าที่ระบุหรือค่าพึงประสงค์เล็กน้อย แต่ในบางเหตุการณ์อาจทำให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าหรือน้อยกว่าค่าพึงประสงค์ได้ โดยในระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะมีโครงสร้างอย่างง่ายประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าของระบบ อิมพีแดนซ์ของระบบ และอิมพีแดนซ์ของโหลด ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 2.1 [35]



ภาพที่ 2.1 ระบบโครงไฟฟ้าอย่างง่าย

จากภาพที่ 2.1 สามารถแสดงเป็นสมการแรงดันไฟฟ้าของระบบได้ดังสมการที่ (2.1)

$$\bar{U}_N / \sqrt{3} = \bar{I}_N (\bar{Z}_N + \bar{Z}_L) \quad (2.1)$$

โดยที่

\bar{U}_N	คือ แรงดันไฟฟ้าของระบบ (V)
\bar{I}_N	คือ กระแสไฟฟ้าของระบบ (A)
\bar{Z}_N	คือ อิมพีแดนซ์ของระบบ (Ω)
\bar{Z}_L	คือ อิมพีแดนซ์ของโหลด (Ω)

การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดจะเกิดจากแรงดันไฟฟ้าตกในอิมพีแดนซ์ของระบบ ซึ่งแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงในระบบ จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.2)

$$\Delta \bar{U}_L = -\Delta \bar{I}_L \cdot \bar{Z}_N \quad (2.2)$$

โดยที่

$\Delta \bar{U}_L$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดที่เปลี่ยนแปลงไป (V)

$\Delta \bar{I}_L$ คือ กระแสไฟฟ้าโหลดที่เปลี่ยนแปลง (A)

กำลังไฟฟ้าลัดวงจร (S_{SC}) ณ จุดโหลดหาได้จาก

$$S_{SC} = U_N^2 / Z_N \quad (2.3)$$

กระแสโหลดที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถหาได้จากขนาดของโหลดที่เปลี่ยนแปลงไป

$$\Delta I_L \cong \frac{\Delta S_L}{\sqrt{3} \cdot U_N} \quad (2.4)$$

โดยที่

S_{SC} คือ กำลังไฟฟ้าลัดวงจร (VA)

ΔS_L คือ กำลังไฟฟ้าหรือโหลดที่เปลี่ยนแปลงไป (VA)

โดยจากสมการที่ (2.2) จะสามารถคำนวณขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปได้ คือ

$$\Delta U_L = -\frac{\Delta S_L}{\sqrt{3} \cdot U_N} \cdot \frac{U_N^2}{S_{SC}} \quad (2.5)$$

หรือ

$$\Delta U_L = -\frac{\Delta S_L}{S_{SC}} \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}} \quad (2.6)$$

ดังนั้นจะสามารถคำนวณร้อยละของแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปได้จาก

$$\% \Delta U_L = -\frac{\Delta S_L}{S_{SC}} \times 100 \quad (2.7)$$

โดยที่

$\% \Delta U_L$ คือ ร้อยละของแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป (V)

ΔS_L คือ กำลังไฟฟ้าหรือโหลดที่เปลี่ยนแปลงไป (VA)

ตัวอย่างการคำนวณแรงดันไฟฟ้าตก

ระบบสามเฟส 400 โวลต์ โดยระบบมีกำลังงานลัดวงจร 20 เมกะโวลต์แอมป์ หากโหลดมีการเพิ่มขึ้นอย่างกะทันหันขนาด 100 กิโลโวลต์แอมป์ จากสมการที่ (2.6) จะได้ว่า

$$\% \Delta U_L = -\frac{\Delta S_L}{S_{SC}} \times 100 = -\frac{100}{20 \times 10^3} \times 100 = -0.5\% \quad (2.8)$$

จะเห็นว่าเมื่อโหลดของระบบมีค่าที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่โหลดมีค่าที่ลดลงด้วย เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในระบบจะมีค่าที่เพิ่มขึ้น ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของระบบเพิ่มขึ้นด้วย

การเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันไฟฟ้าอาจเกิดจากสาเหตุต่างๆ ดังต่อไปนี้ [35]

- การลัดวงจรหรือความผิดปกติในระบบโครงข่ายไฟฟ้า
- การใช้งานโหลดขนาดใหญ่ที่มีกระแสไฟฟ้าเริ่มเดินเครื่องสูง (การสตาร์ทมอเตอร์เหนี่ยวนำ)
- การปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบไฟฟ้าอย่างกะทันหัน
- การแปรเปลี่ยนของโหลดในระบบ
- การสับเข้าหรือปลดออกของชุดตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำในระบบ

2.3 การแปรเปลี่ยนช่วงเวลาสั้น (Short-duration variations)

แรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Sag) และแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะ (Swell) คือ เหตุการณ์ที่แรงดันไฟฟ้าลดลงและเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดตั้งแต่ร้อยละ 10 ขึ้นไปในเวลาสั้นๆ ระยะเวลาที่เกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ คือ ตั้งแต่ 10 มิลลิวินาที (0.5 ไซเคิล) ไปจนถึงไม่กี่วินาที ซึ่งแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะและแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะแตกต่างจากแรงดันไฟฟ้ากระเพื่อม (Voltage Fluctuation)

โดยแรงดันไฟฟ้ากระพริบ คือ ภาวะที่ระดับแรงดันไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยนิยามแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกินสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1 [35-37]

ตารางที่ 2.1 นิยามแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกิน

Categories	Type	Typical Duration	Typical Magnitude
Instantaneous	Sag	0.5-30 cycles	0.1-0.9 pu
	Swell	0.5-30 cycles	1.1-1.8 pu
Momentary	Interruption	0.5-3 seconds	<0.1 pu
	Sag	0.5-3 seconds	0.1-0.9 pu
	Swell	0.5-3 seconds	1.1-1.8 pu
Temporary	Interruption	3-60 seconds	<0.1 pu
	Sag	3-60 seconds	0.1-0.9 pu
	Swell	3-60 seconds	1.1-1.8 pu
Permanent	Sustained interruption	>60 seconds	<0.1 pu
	Undervoltage	>60 seconds	0.1-0.9 pu
	Overvoltage	>60 seconds	1.1-1.8 pu

ระยะเวลาของการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะแบบทันทีทันใด (Instantaneous) แรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะแบบชั่วคราว (Momentary) และแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะแบบชั่วคราว (Temporary) โดยหากเกิดแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกินในระยะเวลาตั้งแต่ 10 มิลลิวินาที (0.5 ไซเคิล) ถึง 1 วินาที (30 ไซเคิล) จะเป็นแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะแบบทันทีทันใด หากระยะเวลาในการเกิด คือ 1 วินาที (30 ไซเคิล) ถึง 3 วินาทีจะเรียกว่าแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะแบบชั่วคราว และแรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะแบบชั่วคราวจะเกิดตั้งแต่ 3 วินาทีจนถึง 1 นาที แต่ถ้าระยะเวลาที่นานกว่า 1 นาทีจะเรียกว่าแรงดันไฟฟ้าตก (Undervoltage) และแรงดันไฟฟ้าเกิน (Overvoltage) หากระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าร้อยละ 10 เป็นระยะเวลาตั้งแต่ 0.02 วินาทีเป็นต้นไป จะเรียกว่าไฟฟ้าดับ (Interruption)

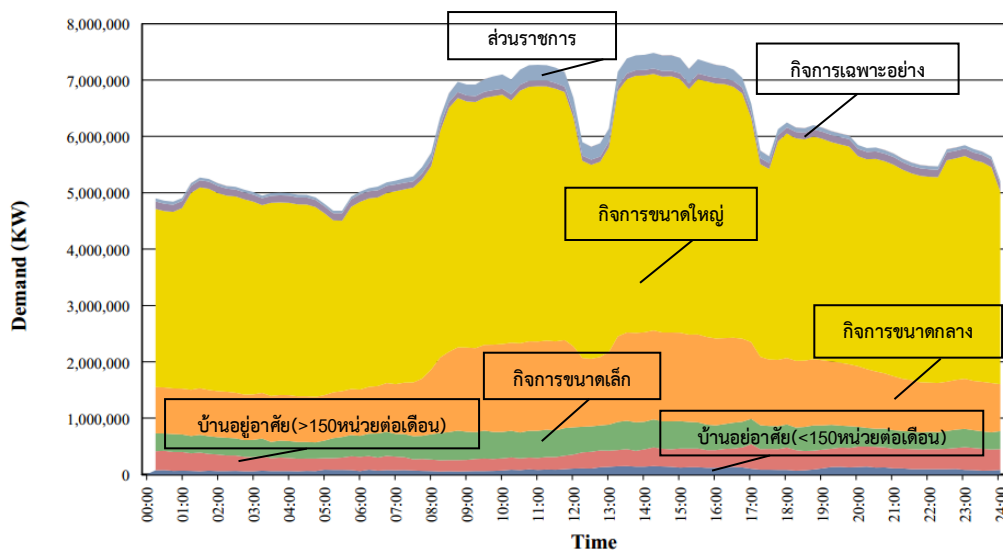
2.4 การเปลี่ยนแปลงช่วงเวลานาน (Long-duration variations)

แรงดันไฟฟ้าตกและแรงดันไฟฟ้าเกินเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ทั่วไปในระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยเหตุการณ์ที่แรงดันไฟฟ้าที่บัสหนึ่งๆ ลดลงหรือเพิ่มขึ้นเกินขอบเขตที่ยอมรับได้ของข้อกำหนดการเชื่อมต่อบนระบบโครงข่ายไฟฟ้า จะเรียกเหตุการณ์นั้นว่า แรงดันไฟฟ้าตกหรือแรงดันไฟฟ้าเกิน ตามลำดับ ซึ่งแต่ละเหตุการณ์อาจจะเกิดขึ้นในระยะเวลาที่แตกต่างกันตามสาเหตุที่ทำให้การเกิดแรงดันไฟฟ้าตกหรือแรงดันไฟฟ้าเกิน [35] โดยจากตารางที่ 2.1 จะเห็นว่าระยะเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในลักษณะนี้จะมีระยะเวลามากกว่า 60 วินาที

แรงดันไฟฟ้าตกเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ ทั้งสาเหตุที่เกิดจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าเอง ซึ่งได้แก่ แรงดันไฟฟ้าที่ต้นสถานีไฟฟ้ามามีค่าที่ลดลง จึงทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้รับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงจนอาจประสบกับเหตุการณ์แรงดันไฟฟ้าตกได้ รวมทั้งในสายส่งที่มีความยาวมากก็อาจทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ปลายสายเกิดแรงดันไฟฟ้าตกได้เช่นกัน ส่วนอีกสาเหตุหนึ่งเกิดจากตัวผู้ใช้ไฟฟ้าเอง ซึ่งได้แก่ การเพิ่มขึ้นของโหลดในระบบโครงข่ายไฟฟ้า การปลดออกของคาปาซิทีฟโหลด และการนำเข้าของอินดักทีฟโหลด

ในทางตรงกันข้าม สาเหตุของแรงดันไฟฟ้าเกินที่เกิดจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าเอง ซึ่งได้แก่ แรงดันไฟฟ้าที่ต้นสถานีไฟฟ้ามามีค่าที่สูงขึ้น จึงทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้รับระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นจนอาจประสบกับเหตุการณ์แรงดันไฟฟ้าเกินได้ อีกสาเหตุหนึ่งเกิดจากตัวผู้ใช้ไฟฟ้าเอง ซึ่งได้แก่ การลดลงของโหลดในระบบโครงข่ายไฟฟ้า การนำเข้าของคาปาซิทีฟโหลด และการปลดออกของอินดักทีฟโหลด

โหลดหรือผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบหนึ่งของระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่จะมีการบริโภคกำลังไฟฟ้าจากระบบ โดยทั่วไปมักจะประกอบด้วยตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะทำให้มีการดึงกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ซึ่งในระยะเวลาตลอดวัน จะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดกำลังไฟฟ้าที่บริโภคตลอดเวลา ทั้งนี้พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของโหลดจะขึ้นกับประเภทของโหลดและภูมิอากาศเป็นสำคัญ ดังภาพที่ 2.2 (ข้อมูลอ้างอิงจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคของภาคกลางเดือนเมษายน ปี 2555)



ภาพที่ 2.2 โหลดโปรไฟล์ของภาคกลาง (กพภ.) แบ่งตามประเภทของโหลด

ที่มา http://pastpea.pea.co.th/th/loadprofile_t/files/16/sg16120400.pdf

การเปลี่ยนแปลงของโหลดอาจทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน โดยในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าที่สูง ระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะมีค่าที่ลดลง และในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้ไฟฟ้าที่ต่ำ ระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าจากมีค่าที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ในช่วงเวลาตลอดทั้งวันแรงดันไฟฟ้าในระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

2.5 การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า

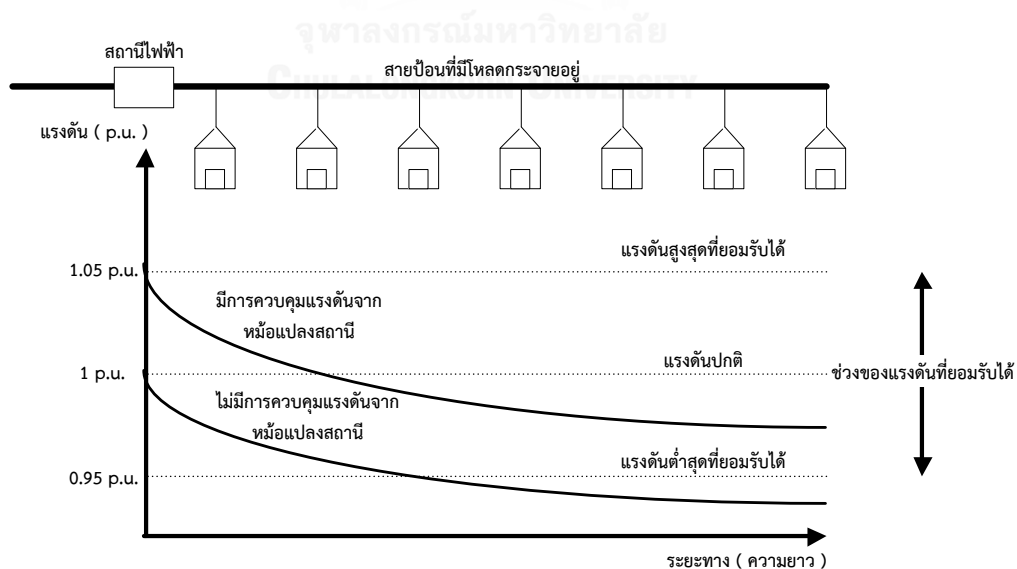
การไฟฟ้านครหลวงและการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะมีหน้าที่ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้า ความถี่ของไฟฟ้าให้มีค่าที่เหมาะสมต่อการใช้งานของโหลด ซึ่งในบางสายส่งที่มีความยาวของสายที่มาก จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ปลายสายอาจมีค่าที่ต่ำกว่าปกติ ดังนั้นการไฟฟ้าจึงต้องเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าของสายในส่วนนั้น การเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าโดยทั่วไปมีด้วยกัน 3 ประเภท ดังตารางที่ 2.2 [35]

ตารางที่ 2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า

อุปกรณ์	ตำแหน่งการติดตั้ง	ผลของการทำงาน
Load tap changer	หม้อแปลงของสถานีไฟฟ้า	ปรับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้นสายส่ง
Voltage regulator	สถานีไฟฟ้าหรือสายส่ง	ปรับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้นสายส่งหรือในสายส่ง
Capacitor bank	สถานีไฟฟ้าหรือสายส่ง	ชดเชยกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟและเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า

2.5.1 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับแท็ปได้ (Tap-changing transformer)

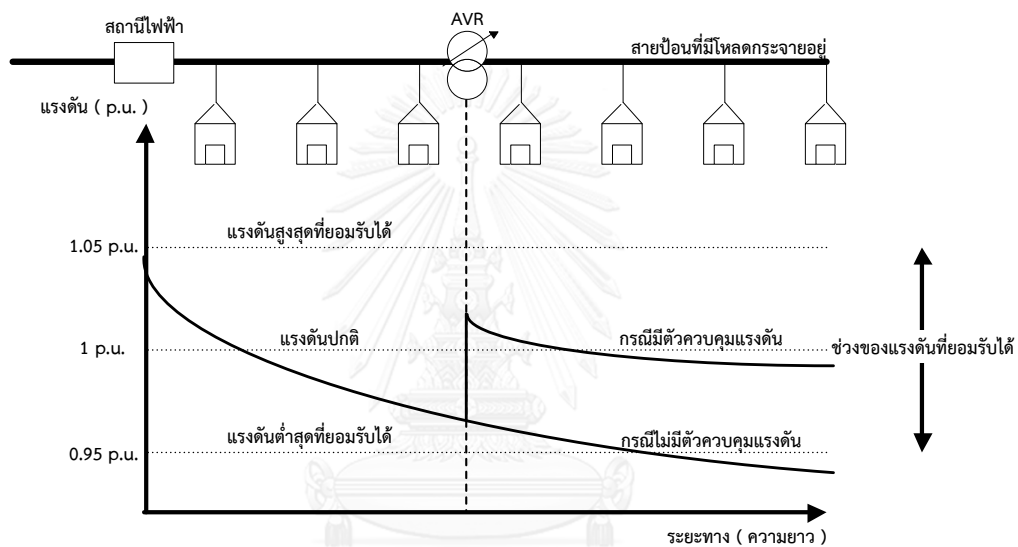
หม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับแท็ปได้เป็นอุปกรณ์ที่สามารถปรับระดับแรงดันไฟฟ้าได้ตามต้องการเพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าตลอดทั้งความยาวสายป้อนให้ได้รับคุณภาพไฟฟ้าเป็นไปตามมาตรฐาน โดยหม้อแปลงไฟฟ้าแบบปรับแท็ปได้ ส่วนใหญ่จะเป็นชนิดการเปลี่ยนแท็ปขณะมีโหลด (On-load tap changer) ซึ่งจะสามารถปรับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่โดยอัตโนมัติขณะจ่ายกระแสไฟฟ้าโดยไม่ต้องดับไฟ ซึ่งอาจเกิดเหตุการณ์ที่ผู้ใช้ไฟฟ้าต้นทางได้รับแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐานแล้ว แต่ผู้ใช้ไฟฟ้าปลายทางอาจจะได้รับแรงดันไฟฟ้าต่ำเกินไป ทำให้ต้องมีการยกระดับแรงดันไฟฟ้าจากต้นทางเพื่อลดปัญหาแรงดันไฟฟ้าที่ปลายทาง ดังแสดงในภาพที่ 2.3 [38]



ภาพที่ 2.3 แรงดันไฟฟ้าในสายป้อนเมื่อมีและไม่มีการควบคุมแรงดันจากหม้อแปลงสถานี

2.5.2 ตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้า (Automatic voltage regulator: AVR)

ตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าใช้สำหรับปรับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับมาตรฐานที่การไฟฟ้ากำหนด เพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งทำการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าให้ดีขึ้น ซึ่งจะช่วยป้องกันปัญหาที่มาจากระบบส่งไฟฟ้าที่ไม่เสถียร เช่น แรงดันไฟฟ้าไม่คงที่ แรงดันไฟฟ้าตก แรงดันไฟฟ้าเกิน เป็นต้น โดยเมื่อติดตั้งตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าในสายป้อนจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าในตำแหน่งที่ติดอุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น ซึ่งทำให้สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในสายป้อนให้เป็นไปตามมาตรฐานและลดผลกระทบของระดับแรงดันไฟฟ้าปลายสายที่ต่ำกว่ามาตรฐานได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.4 [38]



ภาพที่ 2.4 แรงดันไฟฟ้าในสายป้อนเมื่อมีและไม่มีตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าติดตั้งในสายป้อน

2.5.3 ตัวเก็บประจุ (Capacitor bank)

ตัวเก็บประจุสามารถทำให้แรงดันไฟฟ้าในสายป้อนเพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากตัวเก็บประจุสามารถสร้างกระแสแบบนำ (Leading current) ซึ่งเมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านตัวต้านทานเหนี่ยวนำในสายป้อนจะทำให้แรงดันไฟฟ้าในสายป้อนเพิ่มขึ้นดังแสดงในสมการที่ (2.9) [38]

$$\% \text{ Voltage Rise} = \frac{(kVAr)(d)(X)}{(10)(kV)^2} \quad (2.9)$$

โดยที่

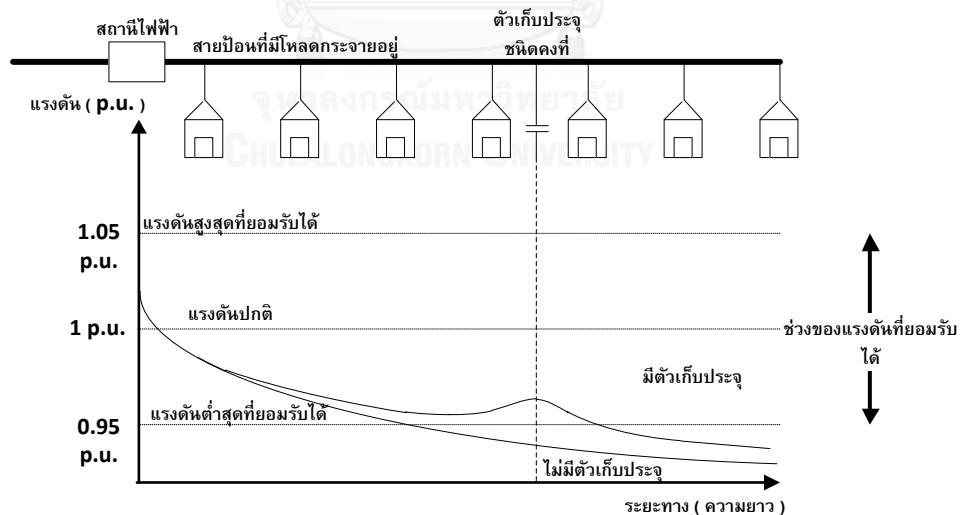
- $kVAr$ คือ ค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟพิกัดของตัวเก็บประจุ (kVAr)
 d คือ ระยะห่างจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าถึงตำแหน่งติดตั้งตัวเก็บประจุ (km)
 X คือ ตัวต้านทานเหนี่ยวนำในสายป้อน (โอห์มต่อหน่วยความยาว)
 kV คือ ค่าแรงดันระหว่างสาย (line to line voltage) (kV)

ตัวอย่างการคำนวณ

สายป้อนสามเฟสยาว 2 กิโลเมตรมีการติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 135 กิโลวาร์ โดยสายป้อนมีความต้านทานเหนี่ยวนำ 0.66 โอห์มต่อกิโลเมตรและมีแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย 4,160 โวลต์ จะทำให้แรงดันในสายเพิ่มขึ้น

$$\% \text{ Voltage Rise} = \frac{(135)(2)(0.66)}{(10)(4.16)^2} = 1.03\%$$

ส่วนใหญ่ตัวเก็บประจุชนิดสวิตช์จะถูกใช้ในขณะที่มีขนาดโหลดสูงในสายป้อนเท่านั้น ซึ่งขนาดของของตัวเก็บประจุที่ใส่เข้าไปจะขึ้นอยู่กับขนาดโหลดในสายป้อน ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของโหลด และเงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าในสายป้อน โดยการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในสายป้อนเมื่อติดตั้งตัวเก็บประจุสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.5 [38]



ภาพที่ 2.5 แรงดันไฟฟ้าในสายป้อนเมื่อไม่มีตัวเก็บประจุติดตั้งในสายป้อนและเมื่อมีตัวเก็บประจุติดตั้งในสายป้อน

บทที่ 3

ข้อกำหนดระบบโครงข่ายไฟฟ้า ค่าไฟฟ้า และการรับซื้อไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จัดเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวประเภทหนึ่ง ซึ่งมีการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานทดแทนที่ภาครัฐในการสนับสนุน ทำให้ต้องมีการจัดการและการควบคุมการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กและขนาดเล็กมากที่มีการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าในประเทศไทย จะมีการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และการไฟฟ้านครหลวงเป็นผู้ดูแลระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งการไฟฟ้าทั้ง 3 การไฟฟ้าได้มีการจัดทำระเบียบข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริการระบบโครงข่ายไฟฟ้า ข้อกำหนดการปฏิบัติการระบบโครงข่ายไฟฟ้า และข้อกำหนดการใช้บริการระบบโครงข่ายไฟฟ้าเพื่อใช้ควบคุมการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเนื้อหาของบทนี้จะนำเสนอข้อกำหนดระบบโครงข่ายไฟฟ้าในประเทศไทยและต่างประเทศ รวมทั้งค่าไฟฟ้าและการรับซื้อไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 3.1 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริการระบบโครงข่ายไฟฟ้าและข้อกำหนดการปฏิบัติการระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- 3.2 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริการระบบโครงข่ายไฟฟ้าและข้อกำหนดการปฏิบัติการระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง
- 3.3 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริการระบบโครงข่ายไฟฟ้าและข้อกำหนดการปฏิบัติการระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- 3.4 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริการระบบโครงข่ายไฟฟ้าของต่างประเทศ
- 3.5 ค่าไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย
- 3.6 การรับซื้อไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย

3.1 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริการระบบโครงข่ายไฟฟ้าและข้อกำหนดการปฏิบัติการระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการทำสัญญาการซื้อขายและเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะมีระเบียบข้อกำหนดที่จะต้องปฏิบัติตาม โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริการระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค พ.ศ. 2551 [5] ข้อกำหนดการปฏิบัติการระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วน

ภูมิภาค พ.ศ. 2551 [6] ข้อกำหนดสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าประเภทเชื่อมต่อกับโครงข่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค พ.ศ. 2556 [7] และข้อกำหนดการเชื่อมต่อบนระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2557 [8] ซึ่งเป็นข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยมีรายละเอียดของข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่เกี่ยวข้องดังนี้

3.1.1 ปริมาณกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จ่ายหรือรับจากระบบโครงข่ายไฟฟ้า

หลักเกณฑ์ปริมาณกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าในแต่ละระบบดังนี้ [5]

- 1) หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้า ปริมาณกำลังไฟฟ้ารวมที่รับซื้อในระบบจำหน่าย 22 หรือ 33 กิโลโวลต์รวมทุกวงจร จะต้องไม่เกิน 75 เปอร์เซ็นต์ ของพิกัดหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า
- 2) ระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ ไม่เกิน 8.0 เมกะวัตต์ต่อวงจร
- 3) ระบบจำหน่าย 33 กิโลโวลต์ ไม่เกิน 10.0 เมกะวัตต์ต่อวงจร
- 4) ระบบจำหน่าย 380 หรือ 220 โวลต์
 - 4.1) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายแรงต่ำ 1 เฟส สามารถจ่ายหรือรับไฟฟ้าจากระบบ ได้ไม่เกิน 10 กิโลวัตต์ต่อเฟส และไม่เกินร้อยละ 25 ของพิกัดหม้อแปลงจำหน่าย
 - 4.2) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายแรงต่ำ 3 เฟส สามารถจ่ายหรือรับไฟฟ้าจากระบบ ได้ไม่เกิน 56 กิโลวัตต์ต่อวงจร และไม่เกินร้อยละ 80 ของพิกัดหม้อแปลงจำหน่าย
 - 4.3) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าจากระบบโครงข่ายไฟฟ้า มากกว่า 56 กิโลวัตต์ ให้เชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย 22 หรือ 33 กิโลโวลต์ ตามความเหมาะสม
- 5) หากปริมาณกำลังไฟฟ้าเกินกว่าที่กำหนดในข้อ 1) หรือ 2) หรือ 3) ให้เชื่อมต่อกับระบบส่ง 115 กิโลโวลต์ ทั้งนี้ไม่เกิน 180 เมกะวัตต์ต่อวงจร

3.1.2 การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ต้องออกแบบระบบควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐานระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังตารางที่ 3.1 [5]

ตารางที่ 3.1 มาตรฐานแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ระดับ แรงดันไฟฟ้า	ภาวะปกติ		ภาวะฉุกเฉิน	
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
115 กิโลโวลต์	120.7	109.2	126.5	103.5
69 กิโลโวลต์	72.4	65.5	75.9	62.1
33 กิโลโวลต์	34.7	31.3	36.3	29.7
22 กิโลโวลต์	23.1	20.9	24.2	19.8
380 โวลต์	418.0	342.0	418.0	342.0
220 โวลต์	240.0	200.0	240.0	200.0

3.1.3 การควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ต้องควบคุมตัวประกอบไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ดังนี้ [5]

- 1) สำหรับระบบที่มีอินเวอร์เตอร์ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.9 นำหน้าถึง 0.9 ตามหลัง เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตออกมาเกินกว่าร้อยละ 10 ของขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของอินเวอร์เตอร์
- 2) สำหรับระบบที่ไม่มีอินเวอร์เตอร์ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.9 นำหน้าถึง 0.9 ตามหลัง

ทั้งนี้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้ระบบโครงข่ายไฟฟ้าตามความต้องการของโหลด โดยมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำกว่า 0.9 ตามหลังได้

3.1.4 การควบคุมความถี่ไฟฟ้า

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจะเป็นผู้ควบคุมความถี่ของระบบโครงข่ายไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์ 50 ± 0.5 รอบต่อวินาที ในกรณีที่ความถี่ของระบบไม่อยู่ในช่วง 48.00 – 51.00 รอบต่อวินาที ต่อเนื่องเกิน 0.1 วินาที ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องออกแบบให้ปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่จุดเชื่อมต่อด้วยระบบอัตโนมัติที่เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าทันที สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยกำหนด [5]

3.1.5 ระบบควบคุมระยะไกล

ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้กำหนดให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีการติดตั้งระบบควบคุมระยะไกลที่มีการเชื่อมต่อระหว่างระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับศูนย์ควบคุมการจ่ายไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ [5]

- 1) กรณีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดกำลังการผลิตรวมกันมากกว่า 1 เมกะวัตต์ขึ้นไป ที่เป็นผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กจะต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมระยะไกล (Remote terminal unit: RTU) กับระบบควบคุมระยะไกล (Supervisory control and data acquisition: SCADA) ของศูนย์ควบคุมการจ่ายไฟฟ้า และอุปกรณ์ตัดการเชื่อมต่อหรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่จุดเชื่อมต่อ
- 2) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากที่เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าในระดับแรงดัน 22 หรือ 33 กิโลโวลต์ ที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนดให้ติดตั้งสวิตช์ตัดโหลด ต้องจัดหาและติดตั้งสวิตช์ตัดโหลดชนิดที่สามารถสั่งการควบคุมจากระยะไกลได้ (Remote Control Switch: RCS) และเป็นชนิดที่ใช้มอเตอร์สำหรับการปลด-สับ พร้อมทั้งจัดเตรียมเทอร์มินอล (Terminal) สำหรับการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมระยะไกล รวมทั้งต้องติดตั้งอุปกรณ์ตัดการเชื่อมต่อหรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่จุดเชื่อมต่อที่ต้องสามารถควบคุมได้โดยระบบควบคุมระยะไกลของศูนย์ควบคุมการจ่ายไฟฟ้า

3.1.6 ระบบการติดต่อสื่อสาร

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ต้องติดตั้งช่องทางการสื่อสารโดยตรงกับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคอย่างน้อย 2 ช่องทาง ประกอบด้วยวิทยุสื่อสารที่มีคลื่นความถี่ตามที่มีการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนดและโทรศัพท์ ยกเว้นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้าปริมาณ ไม่เกิน 1 เมกะวัตต์ ให้ใช้ช่องทางการสื่อสารเป็นวิทยุสื่อสารที่มีคลื่นความถี่ตามที่มีการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนดหรือโทรศัพท์อย่างน้อย 1 ช่องทาง เพื่อใช้ในการติดต่อประสานงานระหว่างศูนย์ควบคุมการจ่ายไฟฟ้ากับเจ้าหน้าที่ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ [5]

3.1.7 การทดสอบการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้า

การทดสอบการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีจุดประสงค์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ตรวจสอบคุณภาพระบบไฟฟ้า ทดสอบเสถียรภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และตรวจวัดผลกระทบที่จะ

มีต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าในขณะที่เชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับระบบโครงข่ายไฟฟ้า และปลดการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ออกจากระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้ [6]

- 1) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคชี้แจงหลักปฏิบัติในการติดต่อประสานงานการจ่ายไฟฟ้าระหว่างการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- 2) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ดำเนินการทดสอบการเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยกรณีของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำสัญญาขายไฟฟ้าให้เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ส่วนกรณีของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ทำสัญญาขายไฟฟ้าให้เชื่อมต่อเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ปริมาณโหลดของผู้ใช้ไฟฟ้าตามระยะเวลาที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนด
- 3) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทดสอบการปลดการเชื่อมต่อ โดยกรณีของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำสัญญาขายไฟฟ้าให้ทดสอบที่ปริมาณโหลดระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 ของปริมาณกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่จะขายตามสัญญาขายไฟฟ้า ส่วนกรณีของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ทำสัญญาขายไฟฟ้าให้ทดสอบที่ปริมาณโหลดขณะเชื่อมต่อเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้า
- 4) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนดให้มีการติดตั้งสวิตช์ชนิดตัดโหลด (Load Break Switch) ทดสอบการปลดการเชื่อมต่อและทดสอบการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าขณะที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าส่วนที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีแรงดันไฟฟ้า
- 5) ภายหลังจากการทดสอบการปลดการเชื่อมต่อแล้วเสร็จ ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำสัญญาขายไฟฟ้าให้ทดสอบเชื่อมต่อเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ปริมาณโหลดร้อยละ 100 ของปริมาณกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่จะขายตามสัญญาซื้อขายไฟฟ้า เพื่อตรวจสอบผลกระทบต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าเป็นเวลาต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง หากในระหว่างการทดสอบเกิดข้อขัดข้องใดๆ ที่ส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจากการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ถ้าตรวจสอบแล้วพบว่าสาเหตุเกิดจากระบบหรืออุปกรณ์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ตรวจสอบแก้ไขแล้วเสร็จ ให้ผู้ขอใช้บริการดำเนินการเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าใหม่ โดยให้เริ่มนับเวลาการทดสอบเชื่อมต่อใหม่จนครบตามแผนการทดสอบเชื่อมต่อที่กำหนด ถ้าสาเหตุเกิดจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เมื่อการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคตรวจสอบแก้ไขแล้วเสร็จให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ดำเนินการ

เชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าใหม่ โดยให้นับเวลาการทดสอบเชื่อมต่อต่อไปจนครบตามแผนการทดสอบเชื่อมต่อที่กำหนด

3.1.8 ข้อกำหนดสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าประเภทเชื่อมต่อกับโครงข่าย พ.ศ. 2556 และข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2557

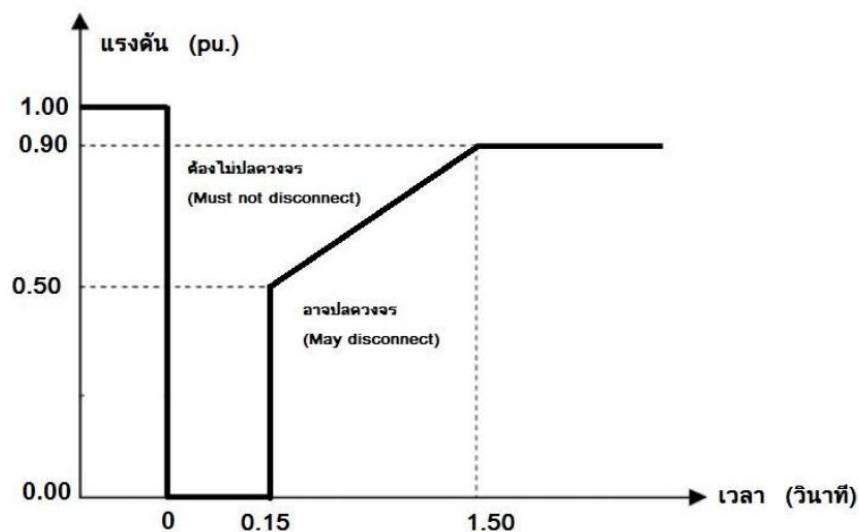
การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้มีการจัดทำข้อกำหนดเพิ่มเติมสำหรับการจัดการและการควบคุมการทำงานของผู้ผลิตไฟฟ้าซึ่งรวมทั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้จัดทำขึ้น ได้แก่ ข้อกำหนดสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าประเภทเชื่อมต่อกับโครงข่าย พ.ศ. 2556 [7] และข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2557 [8] โดยในหัวข้อนี้จะได้นำเสนอเนื้อหาของข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

3.1.8.1 ระยะเวลาปลดตัวและการข้ามผ่านความผิดปกติ

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้จัดทำข้อกำหนดเงื่อนไขทางเทคนิคเพิ่มเติมสำหรับอินเวอร์เตอร์ (Grid-connected inverter) ที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าของผู้เชื่อมต่อทั้ง ผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากหรือผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อขนานกับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ซึ่งมีการบังคับใช้ในโครงการ Solar Rooftop ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวงใน พ.ศ. 2556 ซึ่งมีการกำหนดระยะเวลาปลดวงจรสูงสุดเมื่อแรงดันไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วงแรงดันไฟฟ้าปกติของกฟภ. ดังตารางที่ 3.2 และกำหนดให้อินเวอร์เตอร์ยังคงเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าเมื่อเกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะขึ้นในระบบหรือที่เรียกว่าการข้ามผ่านความผิดปกติ (Fault ride through; FRT) ดังภาพที่ 3.1 [7]

ตารางที่ 3.2 ระยะเวลาปลดวงจรสูงสุดเมื่อแรงดันไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วงแรงดันไฟฟ้าปกติของกฟภ.

ระดับแรงดันไฟฟ้า ณ จุด PCC	เวลาในการปลดวงจรสูงสุด (วินาที)
$V < 50\%$	0.3
$50\% \leq V < 90\%$	2.0
$90\% \leq V \leq 110\%$	ทำงานต่อเนื่อง (ไม่ปลดวงจร)
$110\% \leq V \leq 120\%$	1.0
$V \geq 120\%$	0.16



ภาพที่ 3.1 มาตรฐานการข้ามผ่านความผิดพลาดของกฟภ.

ที่มา : ระเบียบคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงานว่าด้วยการรับซื้อไฟฟ้าจากการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา พ.ศ. 2556 เอกสารแนบที่ 6.2

3.1.8.2 ข้อกำหนดเพิ่มเติมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้เพิ่มเติมข้อกำหนดสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จ่ายผ่านอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีรายละเอียดของข้อกำหนดที่เพิ่มเติมดังนี้ [8]

1) การควบคุมกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ (Reactive Power Control)

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องได้รับการออกแบบและสามารถควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ เพื่อรักษาระดับแรงดัน ณ จุดเชื่อมต่อ ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ดังตารางที่ 3.3 [8]

ตารางที่ 3.3 ตารางกำหนดความสามารถในการปรับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

ระดับแรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อ	ความสามารถในการปรับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	วิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ
ระดับแรงดันต่ำ	0.95 ตามหลัง ถึง 0.95 นำหน้า หรือดีกว่า	จะต้องควบคุมได้อย่างน้อย 1 วิธี คือ การปรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้า
ระดับแรงดันปานกลางหรือระดับแรงดันสูง (กำลังการผลิตติดตั้งไม่เกิน 500 กิโลวัตต์)	0.95 ตามหลัง ถึง 0.95 นำหน้า หรือดีกว่า	จะต้องควบคุมได้อย่างน้อย 1 วิธี คือ วิธีการปรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้า
ระดับแรงดันปานกลางหรือระดับแรงดันสูง (กำลังการผลิตติดตั้งมากกว่า 500 กิโลวัตต์)	0.90 ตามหลัง to 0.90 นำหน้า หรือดีกว่า	จะต้องควบคุมได้อย่างน้อย 2 วิธี คือ 1) วิธีการปรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้า 2) วิธีกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไฟฟ้า

2) การควบคุมกำลังไฟฟ้า (Active Power Control)

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องสามารถปรับลดกำลังไฟฟ้าจากร้อยละ 100 เหลือร้อยละ 0 ได้ โดยสามารถปรับลดกำลังไฟฟ้าอย่างน้อยครั้งละ ร้อยละ 10 ต่อนาที ทั้งนี้กรณีที่เกิดเหตุการณ์ผิดปกติในระบบโครงข่ายไฟฟ้าหรือเหตุการณ์ใดๆ ที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคพิจารณาแล้ว เห็นว่ามีผลกระทบต่อความปลอดภัยและเสถียรภาพของระบบโครงข่ายไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จะแจ้งและ/หรือสั่งการให้ปรับลดกำลังไฟฟ้าได้ตามความเหมาะสม

3) การเชื่อมต้อกลับคืนเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Response to utility recovery)

ภายหลังจากที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ปลดตัวเองออกจากระบบโครงข่ายไฟฟ้า เนื่องจากเกิดไฟฟ้าดับหรือแรงดัน/ความถี่ไม่อยู่ในช่วงที่กำหนด เมื่อระบบโครงข่ายไฟฟ้ากลับเข้าสู่สภาวะปกติแล้วระบบผลิตไฟฟ้าของผู้ขอใช้บริการจะต้องหน่วงเวลาการเชื่อมต้อกลับเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าเป็นเวลาอย่างน้อย 20 วินาที

4) การเรียกดูข้อมูลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดมากกว่า 56 กิโลวัตต์ จะต้องมียระบบ Monitoring Systems ที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสามารถเรียกดูข้อมูลการผลิตไฟฟ้าในรูปแบบเวลาจริง (Real time) ผ่านระบบอินเทอร์เน็ตหรือแอปพลิเคชันต่างๆ ซึ่งได้แก่ข้อมูลกำลังไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้า ความเข้มแสง อุณหภูมิ เป็นต้น

3.1.8.3 วิธีการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีอินเวอร์เตอร์

ข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้มีการระบุวิธีการทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีอินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมการทำงานไว้ 8 การทดสอบ ซึ่งมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้ [8]

1) การทดสอบฮาร์โมนิก

ให้อ้างอิงขั้นตอนวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE หรือ IEC ที่เหมาะสมได้

2) การทดสอบแรงดันกระเพื่อม

ให้อ้างอิงขั้นตอนวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE หรือ IEC ที่เหมาะสมได้

3) การทดสอบการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

ให้อ้างอิงขั้นตอนวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE หรือ IEC ที่เหมาะสมได้

4) การทดสอบการควบคุมกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive power control)

การทดสอบนี้มีจุดประสงค์เพื่อยืนยันว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถควบคุมการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟได้สูงสุดที่ปริมาณเท่าไร โดยมีขั้นตอนในการทดสอบอย่างน้อย ดังนี้

4.1) ติดตั้งและเชื่อมต่ออุปกรณ์ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ตามคำแนะนำ และข้อกำหนดทางเทคนิคจากผู้ผลิตอุปกรณ์นั้นๆ

4.2) ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดของแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้อยู่ในสภาวะการทำงานปกติของอุปกรณ์ระบบผลิตไฟฟ้า

4.3) เริ่มทดสอบโดยกำหนดให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายไฟที่ร้อยละ 0 ของพิกัดกำลังไฟฟ้าจากนั้นทำการปรับให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าจนกระทั่งได้ค่าสูงสุด และทำการบันทึกค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ได้

4.4) ทำการทดสอบเหมือนข้อ 4.3) โดยกำหนดให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายไฟที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 ของพิกัดกำลังไฟฟ้าตามลำดับ และทำการบันทึกค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟ, ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ได้

4.5) กำหนดให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เริ่มจ่ายไฟที่ร้อยละ 0 ของพิกัดกำลังไฟฟ้าจากนั้นทำการปรับให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์รับกำลังไฟฟารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบจนกระทั่งได้ค่าสูงสุด และทำการบันทึกค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ได้

4.6) ทำการทดสอบเหมือนข้อ 4.5) แต่กำหนดให้ระบบผลิตไฟฟ้าจ่ายไฟที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 ของพิกัดกำลังไฟฟ้าและทำการบันทึกค่ากำลังไฟฟ้านี้อีกทีที่ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้

5) การทดสอบวิธีการปรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

การทดสอบนี้มีจุดประสงค์เพื่อยืนยันว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถควบคุมการจ่ายไฟในโหมดควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแบบคงที่ได้ โดยมีขั้นตอนวิธีการทดสอบอย่างน้อยดังนี้

5.1) ติดตั้งและเชื่อมต่ออุปกรณ์ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ตามคำแนะนำและข้อกำหนดทางเทคนิคจากผู้ผลิตอุปกรณ์นั้นๆ

5.2) ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดของแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้อยู่ในสภาวะการทำงานปกติของอุปกรณ์ระบบผลิตไฟฟ้า

5.3) ตั้งค่าให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายไฟที่ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.90 ตามหลัง (หรือ 0.95 ตามหลัง) โดยที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายไฟที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 ของพิกัดกำลังไฟฟ้าตามลำดับ

5.4) เริ่มทำการทดสอบและทำการบันทึกค่าที่แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้านี้อีกทีที่

5.5) ตั้งค่าให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายไฟที่ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.90 นำหน้า (หรือ 0.95 นำหน้า) โดยที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายไฟที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 ของพิกัดกำลังไฟฟ้าตามลำดับ

5.6) เริ่มทำการทดสอบและทำการบันทึกค่าที่แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้านี้อีกทีที่

5.7) ตั้งค่าให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายไฟที่ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1.0 โดยที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายไฟที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 ของพิกัดกำลังไฟฟ้าตามลำดับ

5.8) เริ่มทำการทดสอบและทำการบันทึกค่าที่แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้านี้อีกทีที่

6) การทดสอบวิธีการกำลังไฟฟ้านี้อีกทีเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไฟฟ้า

การทดสอบนี้มีจุดประสงค์เพื่อยืนยันว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถควบคุมการจ่ายไฟในโหมดควบคุมแรงดันแบบแรงดันคงที่ได้ โดยมีขั้นตอนวิธีการทดสอบอย่างน้อยดังนี้

- 6.1) ติดตั้งและเชื่อมต่ออุปกรณ์ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ตามคำแนะนำและข้อกำหนดทางเทคนิคจากผู้ผลิตอุปกรณ์นั้นๆ
- 6.2) ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดของแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้อยู่ในสภาวะการทำงานปกติของอุปกรณ์ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- 6.3) ตั้งค่าให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายไฟที่แรงดันไฟฟ้าที่ร้อยละ 93, 91 และ 90 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ พร้อมทั้งปรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายไฟที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 ของพิกัดกำลังไฟฟ้าตามลำดับ
- 6.4) เริ่มทำการทดสอบและทำการบันทึกค่าที่แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ
- 6.5) ตั้งค่าให้ระบบผลิตไฟฟ้าจ่ายจากเซลล์แสงอาทิตย์ไฟที่แรงดันไฟฟ้าที่ร้อยละ 107, 109 และ 110 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ พร้อมทั้งปรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายไฟที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 ของพิกัดกำลังไฟฟ้าตามลำดับ
- 6.6) เริ่มทำการทดสอบและทำการบันทึกค่าที่แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ

7) การทดสอบการควบคุมกำลังไฟฟ้า (Active power control)

การทดสอบการควบคุมกำลังไฟฟ้าเพื่อต้องการตรวจสอบว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้ (1) สามารถปรับลดกำลังไฟฟ้าได้อย่างน้อยครั้งละร้อยละ 10 ต่อนาที (2) สามารถปรับลดกำลังไฟฟ้าทุกๆ ร้อยละ 10 ของพิกัดกำลังไฟฟ้า โดยที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่หลุดการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยมีขั้นตอนวิธีการทดสอบดังนี้

- 7.1) ติดตั้งและเชื่อมต่ออุปกรณ์ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ตามคำแนะนำและข้อกำหนดทางเทคนิคจากผู้ผลิตอุปกรณ์นั้นๆ
- 7.2) ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดของแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้อยู่ในสภาวะการทำงานปกติของอุปกรณ์ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- 7.3) ตั้งค่าการควบคุมกำลังไฟฟ้าให้ปรับลดลงครั้งละ ร้อยละ 10 จาก ร้อยละ 100 ของพิกัดกำลังไฟฟ้าจนกระทั่งถึงเหลือร้อยละ 0 และตั้งค่าการทำงานอื่นๆ ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ค่าการทำงานในสภาวะปกติ

7.4) เริ่มทดสอบโดยให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายไฟที่ร้อยละ 100 ของพิกัดกำลังไฟฟ้าจากนั้นทำการปรับลดกำลังไฟฟ้างตามข้อ 7.3) แล้วทำการบันทึกค่ากำลังไฟฟ้าและเวลาที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำการลดกำลังไฟฟ้าได้ในแต่ละครั้ง

8) การทดสอบการเชื่อมต่อกลับคืนเข้าสู่ระบบโครงข่าย (Response to utility recovery) ให้อ้างอิงขั้นตอนวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน IEEE หรือ IEC ที่เหมาะสมได้

3.2 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าและข้อกำหนดการปฏิบัติการระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการทำสัญญาการซื้อขายและเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงจะมีระเบียบข้อกำหนดที่จะต้องปฏิบัติตาม โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง พ.ศ. 2551 [9] ข้อกำหนดการปฏิบัติการระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง พ.ศ. 2551 [10] และข้อกำหนดสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าประเภทเชื่อมต่อกับโครงข่ายของการไฟฟ้านครหลวง พ.ศ. 2556 [11] ซึ่งเป็นข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยมีรายละเอียดของข้อกำหนดของการไฟฟ้านครหลวงที่เกี่ยวข้องดังนี้

3.2.1 ปริมาณกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จ่ายหรือรับจากระบบโครงข่ายไฟฟ้า

หลักเกณฑ์ปริมาณกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าในแต่ละระบบดังนี้ [9]

- 1) ระบบจำหน่าย 12 กิโลโวลต์ ไม่เกิน 4.0 เมกะวัตต์ / วงจร
- 2) ระบบจำหน่าย 24 กิโลโวลต์ ไม่เกิน 8.0 เมกะวัตต์ / วงจร
- 3) ระบบจำหน่าย 400/230 โวลต์ แรงต่ำ 1 เฟส ไม่เกิน 10 กิโลวัตต์

3.2.2 การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ต้องออกแบบระบบควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐานระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้านครหลวง ดังตารางที่ 3.4 [9]

ตารางที่ 3.4 มาตรฐานแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้านครหลวง กรณีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ จ่ายไฟเข้าระบบ

ระดับแรงดันไฟฟ้า	ภาวะปกติ		ภาวะฉุกเฉิน	
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
115 กิโลโวลต์	118.0	113.0	123.0	113.0
69 กิโลโวลต์	71.0	67.0	72.5	67.0
24 กิโลโวลต์	23.6	21.8	24	21.6
12 กิโลโวลต์	11.8	10.9	12.0	10.8
400 โวลต์	410	371	416	362
230 โวลต์	237	214	240	209

3.2.3 การควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ต้องควบคุมตัวประกอบไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ดังนี้ [9]

- 1) สำหรับระบบที่มีอินเวอร์เตอร์ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.85 นำหน้าถึง 0.85 ตามหลัง เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตออกมาเกินกว่าร้อยละ 10 ของขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของอินเวอร์เตอร์
- 2) สำหรับระบบที่ไม่มีอินเวอร์เตอร์ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.85 นำหน้าถึง 0.85 ตามหลัง

3.2.4 การควบคุมความถี่ไฟฟ้า

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจะเป็นผู้ควบคุมความถี่ของระบบโครงข่ายไฟฟ้า ให้อยู่ในเกณฑ์ 50 ± 0.5 รอบต่อวินาที ในกรณีที่ความถี่ของระบบไม่อยู่ในช่วง 48.00 – 51.00 รอบต่อวินาที ต่อเนื่องเกิน 0.1 วินาที ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องออกแบบให้ปลดเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่จุดเชื่อมต่อด้วยระบบอัตโนมัติที่เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าทันที สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องปฏิบัติตามที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยกำหนด [9]

3.2.5 ระบบควบคุมระยะไกล

ข้อกำหนดระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงได้กำหนดให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีการติดตั้งระบบควบคุมระยะไกลที่มีการเชื่อมต่อระหว่างระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับศูนย์ควบคุมการจ่ายไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ [9]

- 1) กรณีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดกำลังการผลิตรวมกันมากกว่า 1 เมกะวัตต์ขึ้นไปที่เป็นผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก จะต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมระยะไกล (Remote terminal unit: RTU) กับระบบควบคุมระยะไกลกับระบบรับส่งข้อมูลระยะไกล (Supervisory control and data acquisition: SCADA / Energy management system: EMS) ของศูนย์ควบคุมการจ่ายไฟฟ้า และอุปกรณ์ตัดการเชื่อมต่อหรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่จุดเชื่อมต่อ
- 2) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมากที่เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าในระดับแรงดันที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนดให้ติดตั้งสวิตช์ตัดโหลดต้องจัดหาและติดตั้งสวิตช์ตัดโหลดชนิดที่สามารถสั่งการควบคุมจากระยะไกลได้ (Remote Control Switch: RCS) และเป็นชนิดที่ใช้มอเตอร์สำหรับการปลด-สับ พร้อมทั้งจัดเตรียมเทอร์มินอล (Terminal) สำหรับการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมระยะไกล รวมทั้งต้องติดตั้งอุปกรณ์ตัดการเชื่อมต่อหรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ที่จุดเชื่อมต่อที่ต้องสามารถควบคุมได้โดยระบบควบคุมระยะไกลของศูนย์ควบคุมการจ่ายไฟฟ้า

3.2.5 ระบบการติดต่อสื่อสาร

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องมีการติดตั้งระบบสื่อสารที่ใช้เพื่อการสื่อสารกับการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ [9]

- 1) กรณีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมโยงในระบบ 12 กิโลโวลต์ 24 กิโลโวลต์ 69 กิโลโวลต์ หรือ 115 กิโลโวลต์ ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องมีช่องทางการสื่อสารที่สามารถติดต่อกับการไฟฟ้านครหลวงได้ตลอดเวลา อย่างน้อย 3 ระบบ ได้แก่
 - ระบบสื่อสารผ่านสายใยแก้วนำแสง พร้อมอุปกรณ์ระบบสื่อสาร
 - วิทยุสื่อสารชนิด base radio จำนวน 1 ชุด ที่สามารถติดต่อสื่อสารกับศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงได้ตลอดเวลา
 - โทรศัพท์สายตรง ติดตั้งที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 1 เลขหมาย เพื่อใช้ติดต่อกับศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง
- 2) กรณีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมโยงในระบบที่ต่ำกว่า 12 หรือ 24 กิโลโวลต์ หรือไม่เกิน 1 เมกะวัตต์ ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องจัดหาเครื่องมือติดต่อสื่อสารที่สามารถติดต่อกับการไฟฟ้านครหลวงได้ตลอดเวลา อย่างน้อย 1 ระบบ ได้แก่ โทรศัพท์สายตรง ติดตั้งที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวน 1 เลขหมาย เพื่อใช้ติดต่อกับศูนย์ควบคุมระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง

3.2.6 ข้อกำหนดสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าประเภทเชื่อมต่อกับโครงข่าย พ.ศ. 2556

การไฟฟ้านครหลวงได้จัดทำข้อกำหนดเงื่อนไขทางเทคนิคเพิ่มเติมสำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าของผู้เชื่อมต่อทั้ง ผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก ผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก หรือผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่อขนานกับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งมีการบังคับใช้ในโครงการ Solar Rooftop ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวงใน พ.ศ. 2556 [11]

ช่วงแรงดันไฟฟ้าทำงาน - อินเวอร์เตอร์จะต้องปลดวงจรออกจากระบบโครงข่ายไฟฟ้า หากขนาดแรงดันไฟฟ้า Line to Line หรือ Line to Neutral ในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่านอกช่วงที่กำหนด ดังตารางที่ 3.5 [10]

ตารางที่ 3.5 ระยะเวลาปลดวงจรสูงสุดเมื่อแรงดันไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วงแรงดันไฟฟ้าปกติของการไฟฟ้านครหลวง

ช่วงแรงดันไฟฟ้า (โวลต์)		เวลาในการปลดวงจรสูงสุด (วินาที)
Line to Line	Line to Neutral	
$V < 199$	$V < 115$	0.1
$199 \leq V < 346$	$115 \leq V < 200$	2
$346 \leq V \leq 416$	$200 \leq V \leq 240$	ทำงานต่อเนื่อง (ไม่ปลดวงจร)
$416 \leq V \leq 539$	$240 \leq V \leq 311$	2
$V \geq 539$	$V \geq 311$	0.05

จากตารางที่ 3.5 การไฟฟ้านครหลวงได้อ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 61727 และนำมาปรับค่าแรงดันไฟฟ้าบางส่วนให้สอดคล้องกับระดับแรงดันไฟฟ้าเมื่อเกิดสภาวะแรงดันไฟฟ้าผิดปกติของระบบไฟฟ้าแรงต่ำของการไฟฟ้านครหลวง ทั้งนี้ช่วงแรงดันไฟฟ้าทำงานจากตารางที่ 3.5 สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระดับแรงดันไฟฟ้าอื่นได้เช่นกัน

การเชื่อมต่อหลังไฟฟ้ากลับคืนภายหลังจากที่อินเวอร์เตอร์ปลดวงจร เนื่องจากเกิดไฟฟ้าดับหรือแรงดันไฟฟ้าหรือความถี่ไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วงที่กำหนด และเมื่อระบบโครงข่ายไฟฟ้ากลับเข้าสู่สภาวะปกติแล้วอินเวอร์เตอร์จะต้องหน่วงเวลาการเชื่อมต่อกลับเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าเป็นเวลาอย่างน้อย 2 นาที

3.2.7 การทดสอบการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้า

การทดสอบการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีจุดประสงค์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ตรวจสอบคุณภาพระบบไฟฟ้า ทดสอบเสถียรภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และตรวจวัดผลกระทบที่จะมีต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าในขณะที่เชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับระบบโครงข่ายไฟฟ้า และปลดการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ออกจากระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้ [10]

- 1) การไฟฟ้านครหลวงชี้แจงหลักปฏิบัติในการติดต่อประสานงานการจ่ายไฟฟ้าระหว่างการไฟฟ้านครหลวงและระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- 2) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ดำเนินการทดสอบการเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยกรณีของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำสัญญาขายไฟฟ้าให้เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ส่วนกรณีของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ทำสัญญาขายไฟฟ้าให้เชื่อมต่อเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ปริมาณโหลดของผู้ใช้ไฟฟ้าตามระยะเวลาที่การไฟฟ้านครหลวงกำหนด
- 3) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทดสอบการปลดการเชื่อมต่อ โดยกรณีของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำสัญญาขายไฟฟ้าให้ทดสอบที่ปริมาณโหลดระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นร้อยละ 25, 50, 75, และ 100 ของปริมาณกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่จะขายตามสัญญาขายไฟฟ้า ส่วนกรณีของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ได้ทำสัญญาขายไฟฟ้าให้ทดสอบที่ปริมาณโหลดขณะเชื่อมต่อเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้า
- 4) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทที่การไฟฟ้านครหลวงกำหนดให้มีการติดตั้งสวิตช์ชนิดตัดโหลด (Load Break Switch) ทดสอบการปลดการเชื่อมต่อและทดสอบการกระจายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าขณะที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าส่วนที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีแรงดันไฟฟ้า
- 5) ภายหลังจากการทดสอบการปลดการเชื่อมต่อแล้วเสร็จ ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำสัญญาขายไฟฟ้าให้ทดสอบเชื่อมต่อเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ปริมาณโหลดร้อยละ 100 ของปริมาณกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่จะขายตามสัญญาซื้อขายไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบผลกระทบต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าเป็นเวลาต่อเนื่องไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง หากในระหว่างการทดสอบเกิดข้อขัดข้องใดๆที่ส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลุดออกจากการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ถ้าตรวจสอบแล้วพบว่าสาเหตุเกิดจากระบบหรืออุปกรณ์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์

แสงอาทิตย์ตรวจสอบแก้ไขแล้วเสร็จ ให้ผู้ขอใช้บริการดำเนินการเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าใหม่ โดยให้เริ่มนับเวลาการทดสอบเชื่อมต่อใหม่จนครบตามแผนการทดสอบเชื่อมต่อที่กำหนด ถ้าสาเหตุเกิดจากการไฟฟ้านครหลวง เมื่อการไฟฟ้านครหลวงตรวจสอบแก้ไขแล้วเสร็จให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ดำเนินการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าใหม่ โดยให้นับเวลาการทดสอบเชื่อมต่อไปจนครบตามแผนการทดสอบเชื่อมต่อที่กำหนด

3.3 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าและข้อกำหนดการปฏิบัติการระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการทำสัญญาการซื้อขายและเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจะมีระเบียบข้อกำหนดที่จะต้องปฏิบัติตาม โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2551 [12] ข้อกำหนดการปฏิบัติการระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2551 [13] ซึ่งเป็นข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยมีรายละเอียดของข้อกำหนดของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่เกี่ยวข้องดังนี้

3.3.1 การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ต้องออกแบบระบบควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า เพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐานระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ดังตารางที่ 3.6 [12]

ตารางที่ 3.6 มาตรฐานแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ระดับแรงดันไฟฟ้า	ภาวะปกติ		ภาวะฉุกเฉิน	
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
500 กิโลโวลต์	525	475	550	450
230 กิโลโวลต์	241.5	218.5	253	207
115 กิโลโวลต์	120.7	109.2	126.5	103.5
69 กิโลโวลต์	72.4	65.5	75.9	62.1

3.3.2 การควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ต้องสามารถจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.85 นำหน้าถึง 0.85 ตามหลัง เพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อและ/หรือจ่ายให้เหมาะสมกับความต้องการในระบบโครงข่ายไฟฟ้าแต่ละช่วงเวลา [12]

3.3.4 การควบคุมความถี่ไฟฟ้า

ความถี่ไฟฟ้าของระบบ ในสภาวะปกติต้องไม่เกิน 50 ± 0.5 รอบต่อวินาที ยกเว้นกรณีเกิดเหตุผิดปกติหรือเหตุฉุกเฉิน [12]

3.3.5 ระบบควบคุมระยะไกล

โรงไฟฟ้าที่เป็นผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ประเภทสัญญา Non-Firm หรือระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีปริมาณกำลังไฟฟ้าตามสัญญามากกว่า 10 เมกะวัตต์ จะต้องมีการติดตั้งเทอร์มินอลยูนิต (Terminal unit: TU) ที่มีช่องสัญญาณเพื่อการส่งสัญญาณข้อมูลของโรงไฟฟ้ามายังศูนย์ควบคุมการจ่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย [12, 13]

3.3.6 ระบบการติดต่อสื่อสาร

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ต้องติดตั้งช่องทางการสื่อสารโดยตรงกับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย คือ ระบบโทรศัพท์จากผู้ให้บริการสาธารณะ 1 เลขหมายสำหรับแต่ละห้องควบคุม [12, 13]

3.4 ข้อกำหนดระบบโครงข่ายไฟฟ้าของต่างประเทศ

ในการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวในต่างประเทศจะมีข้อกำหนดระบบโครงข่ายไฟฟ้าของแต่ละประเทศที่ใช้ในการควบคุมการทำงานเช่นเดียวกับข้อกำหนดระบบโครงข่ายไฟฟ้าในประเทศไทย แต่จะมีความแตกต่างในเนื้อหาของข้อกำหนดระบบโครงข่ายไฟฟ้าบางส่วน ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะได้นำเสนอระบบโครงข่ายไฟฟ้าของประเทศเยอรมันและข้อกำหนดจากมาตรฐาน IEEE Std 929-2000 กรณีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายไฟเข้าสู่ระบบ ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

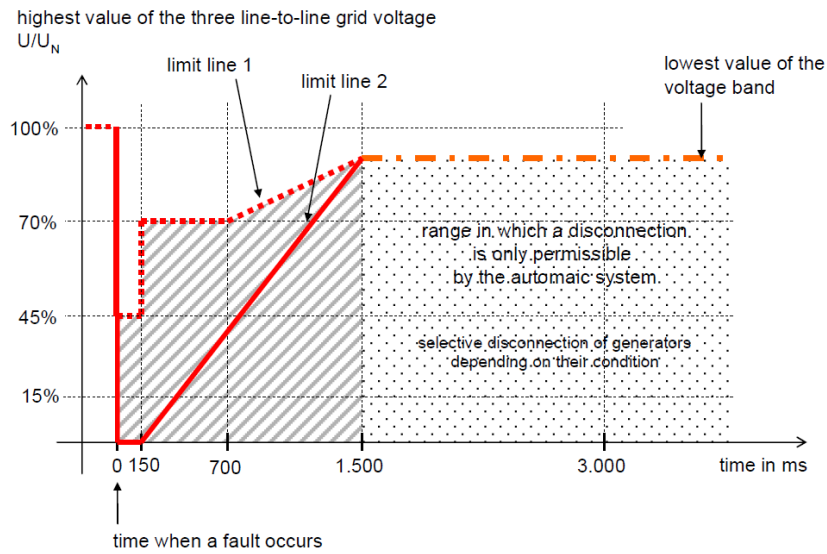
3.4.1 ข้อกำหนดระบบโครงข่ายไฟฟ้าของประเทศเยอรมัน

ประเทศเยอรมันมีหน่วยงาน Verband der Netzbetreiber (VDN) เป็นผู้รับผิดชอบในการดูแลระบบโครงข่าย และเป็นหน่วยงานที่ออกข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งข้อกำหนดได้ควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าชนิดต่างๆ รวมทั้งระบบไฟฟ้าผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเช่นกัน โดยมีรายละเอียดที่สำคัญดังต่อไปนี้ [39]

3.4.1.1 การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า

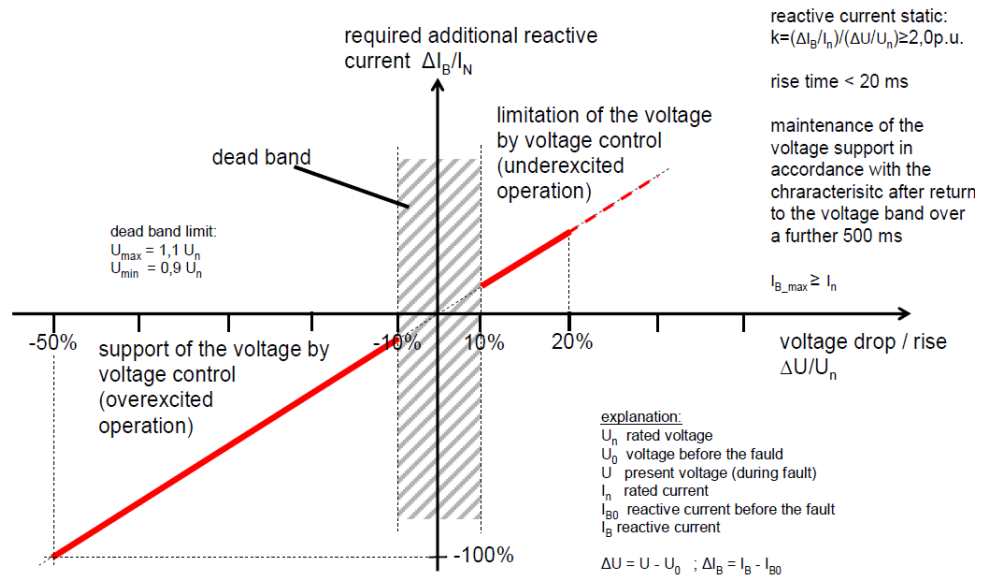
มาตรฐานแรงดันไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้าของประเทศเยอรมัน กำหนดให้แรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงได้ไม่เกินร้อยละ 10 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ ในกรณีที่เกิดความผิดปกติในระบบ แต่เกิดขึ้นนอกบริเวณของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบ และทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะขึ้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องไม่ปลดตัวเองออกจากระบบทันที โดยที่ระยะเวลาในการปลดตัวจะขึ้นกับความรุนแรงของแรงดันไฟฟ้าตก ดังภาพที่ 3.2 [39]

นอกจากนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังต้องช่วยรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบ โดยการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบในเหตุการณ์ที่เกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ โดยจะต้องจ่ายกระแสไฟฟ้ารีแอกทีฟอย่างน้อยร้อยละ 2 ของกระแสพิคกัทร้อยละของแรงดันไฟฟ้าที่ตก ซึ่งหากจำเป็น อาจต้องจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเป็นร้อยละ 100 ของกระแสพิคกัด้วย ดังภาพที่ 3.3 [39]



ภาพที่ 3.2 มาตรฐานการข้ามผ่านความผิดปกติของประเทศไทย

ที่มา E.ON Netz GmbH. E.ON. Grid Code High and Extra High Voltage, 2006.



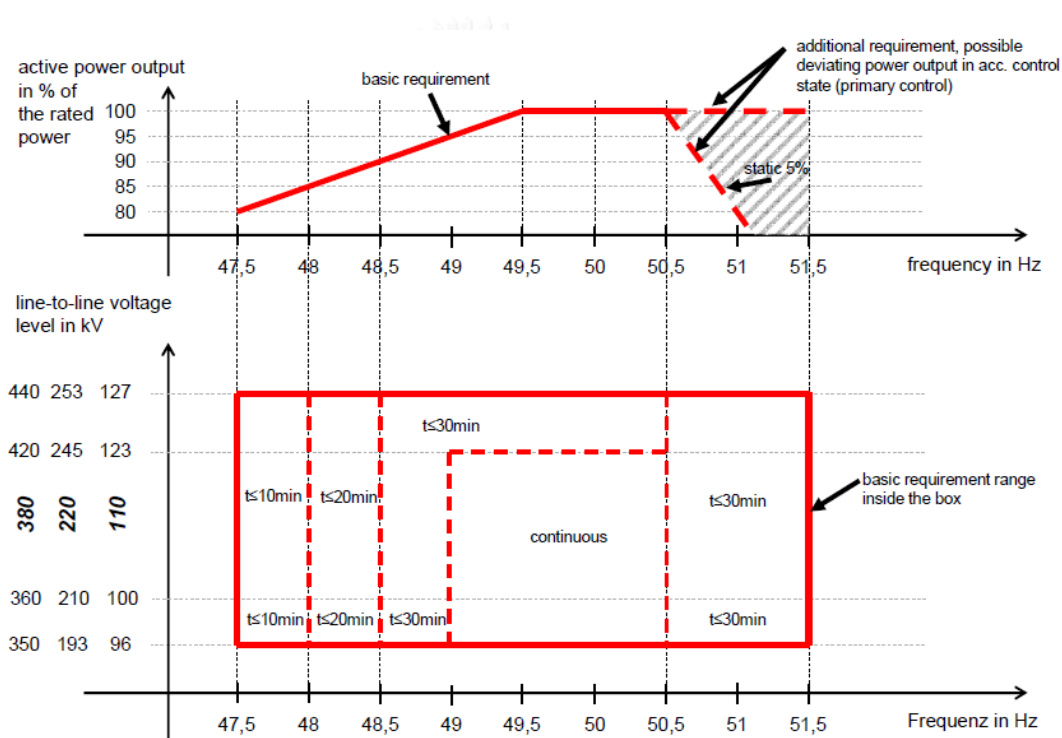
ภาพที่ 3.3 มาตรฐานการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของประเทศไทย

ที่มา E.ON Netz GmbH. E.ON. Grid Code High and Extra High Voltage, 2006.

3.4.1.2 การควบคุมความถี่

ข้อกำหนดของประเทศเยอรมันไม่อนุญาตให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าปลดตัวออกจากระบบ โคร่งข่ายทันทีหากความถี่อยู่ในระดับ 47.5 ถึง 51.5 รอบต่อวินาที ในช่วงความถี่ 49 ถึง 50.5 รอบต่อวินาที เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ในช่วงความถี่ 47.5 ถึง 49 และ 49 ถึง 51.5 รอบต่อวินาที เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีการหน่วงเวลาในการปลดตัวในเวลาที่แตกต่างกันตามความรุนแรงของความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไป แต่ถ้าหากความถี่ไม่อยู่ในระดับ 47.5 ถึง 51.5 รอบต่อวินาที เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องปลดตัวออกทันทีโดยไม่ต้องหน่วงเวลา ดังภาพที่ 3.4 [39]

ในกรณีที่ความถี่ของระบบมีค่าต่ำกว่า 49.5 รอบต่อวินาทีและเกินกว่า 50.5 รอบต่อวินาที เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องจำกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบ ดังภาพที่ 3.4

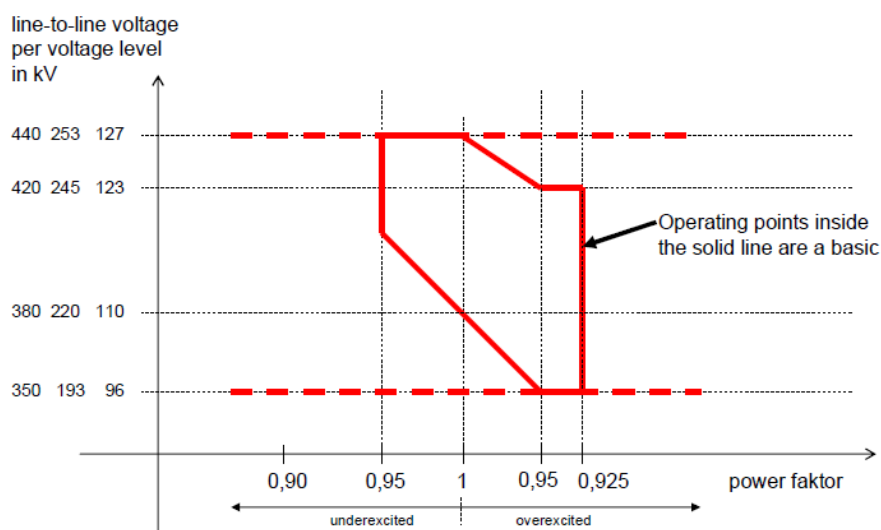


ภาพที่ 3.4 การจำกัดกำลังไฟฟ้าจริงและการหน่วงเวลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ

ที่มา E.ON Netz GmbH. E.ON. Grid Code High and Extra High Voltage, 2006.

3.4.1.3 ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

ขณะที่ระบบไฟฟ้ามีระดับแรงดันไฟฟ้าอยู่ในระดับไม่เกินร้อยละ 90 ถึง 110 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ และความถี่อยู่ในระดับไม่เกินช่วง 47.5 ถึง 51.5 รอบต่อวินาที ข้อกำหนดระบุให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้ใน 3 ลักษณะ ดังภาพที่ 3.5 [39]



ภาพที่ 3.5 มาตรฐานตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของประเทศเยอรมัน

ที่มา E.ON Netz GmbH. E.ON. Grid Code High and Extra High Voltage, 2006.

3.4.2 ข้อกำหนดจากมาตรฐาน IEEE Std 929-2000 กรณีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายไฟเข้าสู่ระบบ

จากมาตรฐาน IEEE Std 929-2000 ซึ่งเป็นมาตรฐานการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบไฟฟ้า ได้มีข้อกำหนดระดับแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับระบบ โดยภายในหัวข้อย่อยนี้จะสามารถแบ่งการนำเสนอได้ออกเป็น 2 หัวข้อย่อย คือ [40]

- 1) ข้อกำหนดระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุด
- 2) ข้อกำหนดระดับความถี่ไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุด

3.4.1.1 ข้อกำหนดระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุด

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ต้องออกแบบระบบควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า เพื่อให้สอดคล้องกับข้อกำหนดระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดตามมาตรฐาน IEEE Std 929-2000 โดยได้แบ่งตามกำลังผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนี้

- 1) ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีกำลังผลิตต่ำกว่า 10 กิโลวัตต์ สำหรับการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าจะเชื่อมต่อที่แรงดันไฟฟ้า 120 โวลต์ จะต้องออกแบบควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในช่วง 106 -132 โวลต์
- 2) ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีกำลังผลิตสูงกว่า 10 กิโลวัตต์ สำหรับการเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าจะเชื่อมต่อ จะต้องออกแบบควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในร้อยละ 88 -110 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติที่เชื่อมต่อ

3.4.1.2 ข้อกำหนดระดับความถี่สูงสุดและต่ำสุด

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ต้องออกแบบระบบควบคุมระดับความถี่ เพื่อให้สอดคล้องกับข้อกำหนดระดับความถี่สูงสุดและต่ำสุดตามมาตรฐาน IEEE Std 929-2000 นั่นก็คือที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 59.3 ถึง 60.5 รอบต่อวินาที

โดยข้อกำหนดระบบโครงข่ายไฟฟ้าในส่วนต่างๆ ของทั้งการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การไฟฟ้านครหลวง และประเทศเยอรมัน สามารถสรุปเนื้อหาส่วนสำคัญได้ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 สรุปข้อกำหนดระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า

	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	การไฟฟ้านครหลวง	ประเทศเยอรมัน
แรงดันไฟฟ้าภาวะปกติ	95 - 105 %	95 - 105 %	ขึ้นกับระดับแรงดันไฟฟ้า	90 - 110 %
แรงดันไฟฟ้าภาวะฉุกเฉิน	90 - 110 %	90 - 110 %	ขึ้นกับระดับแรงดันไฟฟ้า	-
ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า	0.85 นำหน้า - 0.85 ตามหลัง	0.9 นำหน้า - 0.9 ตามหลัง	0.85 นำหน้า - 0.85 ตามหลัง	ขึ้นกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง
ความถี่ไฟฟ้า	49.5 - 50.5 รอบต่อวินาที	49.5 - 50.5 รอบต่อวินาที	49.5 - 50.5 รอบต่อวินาที	49 - 50.5 รอบต่อวินาที
การติดต่อสื่อสาร				
- โทรศัพท์ / วิทยุสื่อสาร	✓	✓	✓	-
- RTU / SCADA	มากกว่า 10 เมกะวัตต์ขึ้นไป	มากกว่า 1 เมกะวัตต์ขึ้นไป	มากกว่า 1 เมกะวัตต์ขึ้นไป	-

3.5 ค่าไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ในการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องมีการซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้าเพื่อใช้งานภายในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ และแสงสว่าง เป็นต้น ซึ่งการคิดค่าไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะใช้เหมือนกับผู้ใช้ไฟฟ้าทั่วไป ซึ่งจะมีการคิดค่าไฟฟ้าโดยแบ่งตามประเภทของผู้ใช้ไฟฟ้าซึ่งสามารถแบ่งได้ 8 ประเภท ได้แก่ [41, 42]

1) บ้านที่อยู่อาศัย

สำหรับการใช้ไฟฟ้าภายในบ้านเรือนที่อยู่อาศัย รวมทั้งวัด สำนักสงฆ์ และสถานประกอบศาสนกิจของทุกศาสนา ตลอดจนบริเวณที่เกี่ยวข้องโดยผ่านเครื่องวัดไฟฟ้าเครื่องเดียว

2) กิจการขนาดเล็ก

สำหรับการไฟฟ้าเพื่อประกอบธุรกิจ ธุรกิจกับบ้านอยู่อาศัย หน่วยราชการ สำนักงาน หรือหน่วยงานอื่นใดของรัฐ องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น รัฐวิสาหกิจ สถานทูต สถานที่ทำการของหน่วยงานราชการต่างประเทศ และสถานที่ทำการขององค์การระหว่างประเทศ หรืออื่นๆ ตลอดจนบริเวณที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยใน 15 นาทีสูงสุด ต่ำกว่า 30 กิโลวัตต์ โดยต่อผ่านเครื่องวัดไฟฟ้าเครื่องเดียว

3) กิจการขนาดกลาง

สำหรับการใช้ไฟฟ้าเพื่อประกอบธุรกิจ อุตสาหกรรม หน่วยราชการ สำนักงาน หรือหน่วยงานอื่นใดของรัฐ องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น รัฐวิสาหกิจ สถานทูต สถานที่ทำการของหน่วยงานราชการต่างประเทศ และสถานที่ทำการขององค์การระหว่างประเทศ ตลอดจนบริเวณที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยใน 15 นาทีสูงสุด ตั้งแต่ 30 กิโลวัตต์ แต่ไม่ถึง 1,000 กิโลวัตต์ และมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 3 เดือนก่อนหน้าไม่เกิน 250,000 หน่วยต่อเดือน โดยต่อผ่านเครื่องวัดไฟฟ้าเครื่องเดียว

4) กิจการขนาดใหญ่

สำหรับการใช้ไฟฟ้าเพื่อประกอบธุรกิจ อุตสาหกรรม หน่วยราชการ สำนักงาน หรือหน่วยงานอื่นใดของรัฐ องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น รัฐวิสาหกิจ สถานทูต สถานที่ทำการของหน่วยงานราชการต่างประเทศ และสถานที่ทำการขององค์การระหว่างประเทศ ตลอดจนบริเวณที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยใน 15 นาทีสูงสุด ตั้งแต่ 1,000 กิโลวัตต์ขึ้นไป หรือมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 3 เดือนก่อนหน้าเกิน 250,000 หน่วยต่อเดือน โดยต่อผ่านเครื่องวัดไฟฟ้าเครื่องเดียว

5) กิจการเฉพาะอย่าง

สำหรับการใช้ไฟฟ้าเพื่อประกอบกิจการโรงแรม และกิจการให้เช่าพักอาศัย ตลอดจนบริเวณที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยใน 15 นาทีสูงสุด ตั้งแต่ 30 กิโลวัตต์ขึ้นไป โดยต่อผ่านเครื่องวัดไฟฟ้าเครื่องเดียว

6) องค์กรที่ไม่แสวงหากำไร

สำหรับการใช้ไฟฟ้าขององค์กรที่ไม่ใช่ส่วนราชการแต่มีวัตถุประสงค์ประสงค์ในการให้บริการโดยไม่คิดค่าตอบแทน โดยต่อผ่านเครื่องวัดไฟฟ้าเครื่องเดียว

7) สูบน้ำเพื่อการเกษตร

สำหรับการใช้ไฟฟ้ากับเครื่องสูบน้ำเพื่อการเกษตรของหน่วยราชการ สหกรณ์เพื่อการเกษตร กลุ่มเกษตรกรที่จดทะเบียนจัดตั้งกลุ่มเกษตรกร และกลุ่มเกษตรกรที่หน่วยราชการรับรอง โดยต่อผ่านเครื่องวัดไฟฟ้าเครื่องเดียว

8) ไฟฟ้าชั่วคราว

สำหรับการใช้ไฟฟ้าเพื่องานก่อสร้าง งานที่จัดขึ้นเป็นพิเศษชั่วคราว สถานที่ที่ไม่มีทะเบียนบ้านของสำนักงานทะเบียนส่วนท้องถิ่น และการใช้ไฟฟ้าที่ยังปฏิบัติไม่ถูกต้องตามระเบียบของการไฟฟ้านครหลวง โดยต่อผ่านเครื่องวัดไฟฟ้าเครื่องเดียว

3.5.1 โครงสร้างค่าไฟฟ้าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ในการคิดค่าไฟฟ้าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 3 กิจการขนาดกลางและผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 4 กิจการขนาดใหญ่ จะมีการคิดค่าไฟฟ้าเป็นส่วนแบ่งเป็น 7 ส่วน ได้แก่ [41, 42]

1) ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า (Demand charge)

ความต้องการกำลังไฟฟ้ามีหน่วยวัดเป็น กิโลวัตต์ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยใน 15 นาทีที่สูงสุดในช่วง On peak และ/หรือ Partial peak ในช่วงเดือนนั้นๆ ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้ามีหน่วยเป็น บาทต่อกิโลวัตต์ ซึ่งเป็นอัตราค่าไฟฟ้าที่สะท้อนการลงทุนการขยายกำลังของระบบผลิต ระบบส่ง และระบบจำหน่ายไฟฟ้า ตามระดับแรงดันไฟฟ้า (Capacity cost)

2) ค่าพลังงานไฟฟ้า (Energy demand)

ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผู้ใช้ไฟฟ้าได้ใช้ไปในรอบเดือนนั้นๆ อัตราค่าพลังงานไฟฟ้ามีหน่วยเป็น บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง หรือ บาทต่อหน่วย ซึ่งค่าพลังงานไฟฟ้าเป็นอัตราค่าไฟฟ้าที่สะท้อนถึงค่าใช้จ่ายบำรุงรักษา ดำเนินงาน ค่าเชื้อเพลิงตามระดับแรงดันไฟฟ้า (Energy cost)

3) ค่าบริการ (Service charge)

ค่าบริการเป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับเครื่องวัด ค่าดำเนินการจดหน่วย จัดทำใบเสร็จรับเงินค่าไฟฟ้า และดำเนินการจัดเก็บค่าไฟฟ้า ซึ่งมีหน่วยเป็น บาทต่อเดือน ค่าบริการเป็นอัตราค่าไฟฟ้าที่สะท้อนถึง ต้นทุนค่าบริการของผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีความชัดเจน (Customer cost)

4) ค่าปรับสำหรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power factor charge)

สำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีตัวประกอบกำลังไฟฟ้าแบบตามหลัง ถ้าในรอบเดือนใดมีความต้องการ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เฉลี่ยใน 15 นาทีสูงสุดเมื่อคิดเป็นกิโลวาร์เกินกว่าร้อยละ 61.97 ของความต้องการกำลังไฟฟ้าแอกทีฟเฉลี่ยใน 15 นาทีสูงสุดเมื่อคิดเป็นกิโลวัตต์แล้ว กิโลวาร์ส่วนที่เกินต้องเสีย ค่าปรับสำหรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในอัตรา 56.07 บาทต่อกิโลวาร์ ค่า ไฟฟ้าส่วนนี้สะท้อนถึง การลงทุน การบำรุงรักษาเครื่องวัดสำหรับติดตั้งตัวเก็บประจุไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า โดยกำหนดให้ผู้ใช้ ไฟฟ้าที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 30 กิโลวัตต์ขึ้นไปมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าไม่ต่ำกว่า 0.85

5) ค่าไฟฟ้าต่ำสุด (Minimum charge)

ค่าไฟฟ้าต่ำสุดในแต่ละเดือนต้องไม่ต่ำกว่าร้อยละ 70 ของความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดใน รอบ 12 เดือน มีหน่วยเป็น บาทต่อเดือน ซึ่งค่าไฟฟ้าต่ำสุดเป็นอัตราค่าไฟฟ้าสะท้อนถึงการลงทุนของ การไฟฟ้าที่ขยายระบบไฟฟ้าเพื่อให้เพียงพอกับการใช้ไฟฟ้า แต่ผู้ใช้ไฟฟ้ากลับไม่ได้ใช้ตามที่แสดง ความจำนองเอาไว้

6) ค่าตัวประกอบการปรับอัตราค่าไฟฟ้าอัตโนมัติ (Ft)

ค่าตัวประกอบการปรับอัตราค่าไฟฟ้าอัตโนมัติเป็นอัตราค่าไฟฟ้าที่สะท้อนถึงราคาเชื้อเพลิงที่ ใช้ในการผลิตไฟฟ้า อัตราค่าตัวประกอบการปรับอัตราค่าไฟฟ้าอัตโนมัติมีหน่วยเป็น บาทต่อกิโลวัตต์- ชั่วโมง หรือ บาทต่อหน่วย

7) ภาษีมูลค่าเพิ่ม (VAT)

ภาษีมูลค่าเพิ่มปัจจุบันมีการจัดเก็บในอัตราร้อยละ 7

3.5.2 อัตราค่าไฟฟ้าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดกำลังผลิตมากกว่า 1 เมกะวัตต์ มัก จัดเป็นผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 3 และ 4 ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้ไฟฟ้าของแต่ละระบบผลิตไฟฟ้าจาก เซลล์แสงอาทิตย์ โดยรูปแบบอัตราค่าไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภทจะมีทั้งหมด 3 รูปแบบได้แก่ [41, 42]

1) อัตราค่าไฟฟ้า 2 ส่วน (Two-Part Tariff)

สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ อัตราค่าไฟฟ้าปกติจะเป็นอัตราค่าไฟฟ้าที่แยก ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าและค่าพลังงานไฟฟ้าออกจากกัน เพื่อให้สะท้อนต้นทุนการผลิตไฟฟ้าได้ อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามอัตราความต้องการกำลังไฟฟ้าและอัตราค่าพลังงานไฟฟ้ายังเป็นแบบ อัตราคงที่

2) อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของวัน (Time of day rate: TOD rate)

อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของวันเป็นอัตราค่าไฟฟ้าที่แยกค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าและค่าพลังงานไฟฟ้าออกจากกัน โดยค่าพลังงานไฟฟ้าเป็นแบบอัตราคงที่หรือพลังงานไฟฟ้าทุกหน่วยมีราคาเท่ากัน แต่จะแยกค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าให้มีค่าความแตกต่างกันตามช่วงเวลาของวัน เพื่อสะท้อนถึงต้นทุนการผลิต การส่ง และการจำหน่าย โดยในช่วงเวลา 24 ชั่วโมงจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 3.8 [41, 42]

ตารางที่ 3.8 ข้อกำหนดช่วงเวลาอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของวัน (TOD rate)

	ข้อกำหนดช่วงเวลาอัตรา TOD
On Peak	18.30-21.30 น. ทุกวัน
Partial Peak	08.00-18.30 น. ทุกวัน
Off Peak	21.30-08.00 น. ทุกวัน

3) อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of use rate: TOU rate)

อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้เป็นอัตราค่าไฟฟ้าที่แยกค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าและค่าพลังงานไฟฟ้าออกจากกัน โดยค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าไม่มีการแบ่งช่วงเวลาในการคิด แต่จะแยกค่าพลังงานไฟฟ้าให้มีค่าความแตกต่างกันตามช่วงเวลาของวัน และวันของสัปดาห์ หรือตามช่วงเวลาของการใช้ เพื่อสะท้อนถึงต้นทุนการผลิต การส่ง และการจำหน่ายไฟฟ้า โดยแบ่งเวลาในแต่ละสัปดาห์เป็น 2 ช่วงเวลาซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 3.9 [41, 42]

ตารางที่ 3.9 ข้อกำหนดช่วงเวลาอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้ (TOU rate)

	ข้อกำหนดช่วงเวลาอัตรา TOU
On Peak	09.00-22.00 น. จันทร์-ศุกร์และวันพืชมงคล
Off Peak	22.00-09.00 น. จันทร์-ศุกร์และวันพืชมงคล
	00.00-24.00 น. วันเสาร์-อาทิตย์, วันแรงงานแห่งชาติ, วันพืชมงคลที่ตรงกับวันเสาร์-อาทิตย์และวันหยุดราชการตามปกติ (ไม่รวมวันหยุดชดเชย)

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 3 หรือ 4 ซึ่งมีรูปแบบอัตราค่าไฟฟ้าทั้ง 3 รูปแบบดังที่ได้กล่าวข้างต้น จะมีอัตราค่าพลังงานไฟฟ้า ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า และค่าบริการไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งอัตราค่าไฟฟ้าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 3 กิจการขนาดกลางสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.10 [41, 42] และอัตราค่าไฟฟ้าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 4 กิจการขนาดใหญ่สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.11 [41, 42]

ตารางที่ 3.10 อัตราค่าไฟฟ้าสำหรับผู้ใช้อิเล็กทริกซ์ประเภทที่ 3 กิจกรรมขนาดกลาง

ประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า	อัตราค่าไฟฟ้า	ระดับแรงดันไฟฟ้า	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)	ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า (บาท/กิโลวัตต์)	ค่าบริการ (บาท/เดือน)	
ประเภทที่ 3 กิจกรรมขนาด กลาง	อัตราปกติ	69 กิโลโวลต์ขึ้นไป	2.6506	175.70	312.24	
		22-33 กิโลโวลต์	2.6880	196.26	312.24	
		ต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์	2.7160	221.50	312.24	
	อัตราตาม ช่วงเวลาของ การใช้งาน (TOU rate)	69 กิโลโวลต์ขึ้นไป				
		- Peak		3.5982	74.14	312.24
		- Off Peak		2.1572	74.14	312.24
		22-33 กิโลโวลต์				
		- Peak		3.6796	132.93	312.24
		- Off Peak		2.1760	132.93	312.24
		ต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์				
		- Peak		3.8254	210.00	312.24
		- Off Peak		2.2092	210.00	312.24

ตารางที่ 3.11 อัตราค่าไฟฟ้าสำหรับผู้ใช้อิเล็กทริกซ์ประเภทที่ 4 กิจกรรมขนาดใหญ่

ประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า	อัตราค่าไฟฟ้า	ระดับแรงดันไฟฟ้า	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)	ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า (บาท/กิโลวัตต์)	ค่าบริการ (บาท/เดือน)
ประเภทที่ 4 กิจกรรมขนาดใหญ่	อัตราตาม ช่วงเวลาของ วัน (TOD rate)	69 กิโลโวลต์ขึ้นไป			
		- Peak	2.6506	224.30	312.24
		- Off Peak	2.6506	0	312.24
		- Partial	2.6506	29.91	312.24
		22-33 กิโลโวลต์			
		- Peak	2.6880	285.05	312.24
		- Off Peak	2.6880	0	312.24
		- Partial	2.6880	58.88	312.24
		ต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์			
		- Peak	2.7160	332.71	312.24
		- Off Peak	2.7160	0	312.24
		- Partial	2.7160	68.22	312.24
	อัตราตาม ช่วงเวลาของ การใช้งาน (TOU rate)	69 กิโลโวลต์ขึ้นไป			
		- Peak	3.5982	74.14	312.24
		- Off Peak	2.1572	74.14	312.24
		22-33 กิโลโวลต์			
		- Peak	3.6796	132.93	312.24
		- Off Peak	2.1760	132.93	312.24
		ต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์			
		- Peak	3.8254	210.00	312.24
- Off Peak	2.2092	210.00	312.24		

3.5.3 ตัวอย่างการคำนวณค่าไฟฟ้า

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการใช้ไฟฟ้าในอัตราที่แตกต่างกันตามขนาดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และลักษณะการใช้ไฟฟ้า โดยตัวอย่างการคำนวณจะแสดงการคำนวณค่าไฟฟ้าใน 3 ลักษณะ ได้แก่ (1) ตัวอย่างการคำนวณค่าไฟฟ้าอัตราปกติ (2) ตัวอย่างการคำนวณค่าไฟฟ้าอัตราตามช่วงเวลาของวัน (TOD rate) (3) ตัวอย่างการคำนวณอัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (TOU) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

1) ตัวอย่างการคำนวณค่าไฟฟ้าอัตราปกติ

1.1) ข้อมูลผู้ใช้ไฟฟ้าอัตราปกติ

ประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า	ประเภทที่ 3 กิจการขนาดกลาง – อัตราปกติ
แรงดันไฟฟ้าที่ใช้	22 kV
ความต้องการกำลังไฟฟ้า	205 kW
พลังงานไฟฟ้า	48,800 kWh
ความต้องการกำลังไฟฟารีแอกทีฟ	250 kVAr
การปรับอัตราค่าไฟฟ้าอัตโนมัติ (Ft)	0.69 baht/kW-hr
ค่าไฟฟ้าประจำเดือน	สิงหาคม 2557

1.2) การคำนวณค่าไฟฟ้า

ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า	= $205 \times 196.26 = 40,233.30$
ค่าพลังงานไฟฟ้า	= $48,800 \times 2.6880 = 131,174.40$
ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์	= $(250 - 0.6197 \times 205) \times 56.07 = 6,894.45$
ค่าไฟฟ้าตามอัตราการปรับอัตราค่าไฟฟ้าอัตโนมัติ	= $48,800 \times 0.69 = 33,672$
รวมเงินค่าไฟฟ้า	= $40,233.30 + 131,174.40 + 6,894.45 + 33,672 = 211,974.15$
ภาษีมูลค่าเพิ่ม	= $211,974.15 \times 0.07 = 14,838.19$
รวมเงินค่าไฟฟ้า (รวม VAT)	= $211,974.15 + 14,838.19 = 226,812.34$ บาท

2) ตัวอย่างการคำนวณค่าไฟฟ้าอัตราตามช่วงเวลาของวัน (TOD rate)

2.1) ข้อมูลผู้ใช้ไฟฟ้าอัตราตามช่วงเวลาของวัน

ประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า	ประเภทที่ 4 กิจการขนาดใหญ่ – TOD rate
แรงดันไฟฟ้าที่ใช้	22 kV
ความต้องการกำลังไฟฟ้า	
ช่วง On peak	1,460 kW
ช่วง Partial peak	1,575 kW
ช่วง Off peak	1,420 kW
พลังงานไฟฟ้า	978,000 kWh
ความต้องการกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ	556 kVAr
การปรับอัตราค่าไฟฟ้าอัตโนมัติ (Ft)	0.69 baht/kW-hr
ค่าไฟฟ้าประจำเดือน	สิงหาคม 2557

2.2) การคำนวณค่าไฟฟ้า

ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า	$= (1,460 \times 285.05) + ((1,575 - 1,460) \times 58.88) = 422,944.20$
ค่าพลังงานไฟฟ้า	$= 978,000 \times 2.6880 = 1,665,925.20$
ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์	$= (556 - (0.6197 \times 1,575)) \times 56.07 = 0.00$
ค่าไฟฟ้าตามอัตราการปรับอัตราค่าไฟฟ้าอัตโนมัติ	$= 978,000 \times 0.69 = 674,820$
ค่าไฟฟ้ารวม	$= 422,944.20 + 1,665,925.20 + 0.00 + 674,820 = 2,763,689.40$
ภาษีมูลค่าเพิ่ม	$= 2,763,689.40 \times 0.07 = 193,458.26$
รวมเงินค่าไฟฟ้า (รวม VAT)	$= 2,763,689.40 + 193,458.26 = 2,957,147.66$ บาท

3) ตัวอย่างการคำนวณอัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (TOU)

3.1) ข้อมูลผู้ใช้ไฟฟ้าอัตราตามช่วงเวลาการใช้

ประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า	ประเภทที่ 4 กิจการขนาดใหญ่ – TOU rate
แรงดันไฟฟ้าที่ใช้	22 kV

ช่วงเวลาที่ใช้ไฟฟ้า	ความต้องการ กำลังไฟฟ้า (kW)	พลังงานไฟฟ้า (kWh)
09.00-22.00 น. วันจันทร์-ศุกร์ (On peak)	7,500	1,638,000
22.00-09.00 น. วันจันทร์-ศุกร์	6,400	2,104,600
00.00-24.00 น. วันเสาร์-อาทิตย์และ วันหยุดราชการตามปกติ (Off peak)		
ความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ		2,700 kVAr
การปรับอัตราค่าไฟฟ้าอัตโนมัติ (Ft)		0.69 baht/kW-hr
ค่าไฟฟ้าประจำเดือน		สิงหาคม 2557

3.2) การคำนวณค่าไฟฟ้า

ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า	= $7,500 \times 132.93 = 996,975.00$
ค่าพลังงานไฟฟ้า	= $(1,638,000 \times 3.6796) + (2,104,600 \times 2.1760) = 10,606,794.40$
ค่าบริการ	= 312.24
ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์	= $(2,700 - (0.6197 \times 7,500)) \times 56.07 = 0.00$
ค่าไฟฟ้าตามอัตราการปรับอัตราค่าไฟฟ้าอัตโนมัติ	= $(1,638,000 + 2,104,600) \times 0.69 = 2,582,394$
ค่าไฟฟ้ารวม	= $996,975.00 + 10,606,794.40 + 312.24 + 0.00 + 2,582,394 = 14,186,475.64$
ภาษีมูลค่าเพิ่ม	= $14,186,475.64 \times 0.07 = 993,053.29$
รวมเงินค่าไฟฟ้า (รวม VAT)	= $14,186,475.64 + 993,053.29 = 15,179,528.93$
	บาท

3.6 การรับซื้อไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน จะมีหลักการกำหนดอัตราค่าไฟฟ้าในการซื้อขายไฟฟ้าและอัตรารับซื้อไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.6.1 หลักการกำหนดอัตราค่าไฟฟ้าในการซื้อขายไฟฟ้าให้กับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

การกำหนดอัตราค่าไฟฟ้าในการซื้อขายไฟฟ้าให้กับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละระบบจะมีหลักการต่างๆ แบ่งได้เป็น 4 หัวข้อ ได้แก่ [43]

- 1) อัตราค่าพลังงานไฟฟ้าที่การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายขายให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับอัตราค่าพลังงานไฟฟ้าขายปลีกตามโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าขายปลีกตามประเภทการใช้ไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์รวมกับค่าไฟฟ้าตามสูตรการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติขายปลีก (Ft ขายปลีก) ในเดือนนั้นๆ ในส่วนของค่าไฟฟ้าส่วนอื่นๆ ที่นอกเหนือจากค่าพลังงานไฟฟ้า ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ยังคงต้องจ่ายตามประเภทการใช้ไฟฟ้านั้นๆ
- 2) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีปริมาณกำลังไฟฟ้าขายเข้าระบบไม่เกิน 6 เมกะวัตต์ การรับซื้อแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่
 - 2.1) ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขายให้การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายน้อยกว่าหรือเท่ากับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายขายให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละเดือนการไฟฟ้าจะรับซื้อพลังงานไฟฟ้าส่วนนี้เท่ากับค่าพลังงานไฟฟ้าตามโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าขายปลีกหรือค่าพลังงานไฟฟ้าขายปลีกเฉลี่ยที่การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายขายให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์รายนั้นๆ ในเดือนนั้นๆ รวมกับค่าตามสูตรการปรับอัตราค่าไฟฟ้าอัตโนมัติขายปลีก (Ft ขายปลีก)
 - 2.2) ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขายให้การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายมากกว่าปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายขายให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละเดือน การไฟฟ้าจะรับซื้อพลังงานไฟฟ้าส่วนที่เท่ากับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายขายให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในอัตราค่าพลังงานไฟฟ้าตามโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้าขายปลีกหรือค่าพลังงานไฟฟ้าขายปลีกเฉลี่ยที่การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายขายให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์รายนั้นๆ ในเดือนนั้นๆ รวมกับค่าตาม

สูตรการปรับอัตราค่าไฟฟ้าอัตโนมัติขายปลีก (Ft ขายปลีก) พลังงานไฟฟ้าส่วนที่ขายเกินกว่าที่การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายขายให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ กำหนดการรับซื้อเป็น 2 กรณี ได้แก่

- กรณีเป็นผู้ใช้ไฟอัตราปกติ อัตราค่าพลังงานไฟฟ้าที่ขายจะเท่ากับอัตราค่าไฟฟ้าขายส่งเฉลี่ยทุกระดับแรงดันไฟฟ้าที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยขายให้กับการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายรวมกับค่าไฟฟ้าตามสูตรการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติขายส่งเฉลี่ย (Ft ขายส่งเฉลี่ย)
 - กรณีเป็นผู้ใช้ไฟอัตรา TOU อัตราค่าพลังงานไฟฟ้าที่ขายจะเท่ากับอัตราค่าพลังงานไฟฟ้าขายส่ง ณ ระดับแรงดัน 11-33 กิโลโวลต์ที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยขายให้กับการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายรวมกับค่าไฟฟ้าตามสูตรการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติขายส่งเฉลี่ย (Ft ขายส่งเฉลี่ย)
- 3) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีปริมาณกำลังไฟฟ้าขายเข้าระบบเกินกว่า 6 เมกะวัตต์
- 3.1) กรณีเป็นผู้ใช้ไฟอัตราปกติ อัตราค่าพลังงานไฟฟ้าที่ขายจะเท่ากับอัตราค่าไฟฟ้าขายส่งเฉลี่ยทุกระดับแรงดันไฟฟ้าที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยขายให้กับการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายรวมกับค่าไฟฟ้าตามสูตรการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติขายส่งเฉลี่ย (Ft ขายส่งเฉลี่ย)
 - 3.2) กรณีเป็นผู้ใช้ไฟอัตรา TOU อัตราค่าพลังงานไฟฟ้าที่ขายจะเท่ากับอัตราค่าพลังงานไฟฟ้าขายส่ง ณ ระดับแรงดัน 11-33 กิโลโวลต์ที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยขายให้กับการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายรวมกับค่าไฟฟ้าตามสูตรการปรับอัตราค่าไฟฟ้าโดยอัตโนมัติขายส่งเฉลี่ย (Ft ขายส่งเฉลี่ย)
- 4) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีปริมาณกำลังไฟฟ้าเสนอขายตามสัญญาเกิน 1 เมกะวัตต์ ณ จุดรับซื้อไฟฟ้า ปริมาณพลังงานไฟฟ้าในข้อ (2.2) และข้อ (3) จะถูกหักออกร้อยละ 2 ของปริมาณพลังงานไฟฟ้าส่วนที่ขายเกินกว่าที่การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายขายให้กับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อเป็นค่าดำเนินการโครงการรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตขนาดเล็กมาก

3.6.2 อัตรารับซื้อไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ในอดีตการผลิตกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นยังมีการลงทุนที่ค่อนข้างสูง แม้ว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่มีต้นทุนจากค่าเชื้อเพลิง แต่เพื่อเป็นการจูงใจให้มีการลงทุนสร้างระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเป็นพลังงานทดแทนที่สะอาด ทางภาครัฐจึงมีการจ่ายส่วนเพิ่มอัตรารับซื้อ (Adder) ให้กับผู้ผลิตระบบผลิตไฟฟ้า

จากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งราคาซื้อขายพลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนมีค่าเท่ากับค่าไฟฟ้าขายส่ง ณ ระดับแรงดันไฟฟ้าที่เชื่อมโยงรวมกับค่า Ft ขายส่งเฉลี่ย และรวมกับส่วนเพิ่มอัตราซื้อ โดยที่ค่าไฟฟ้าขายส่ง ณ ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.12 [44] ส่วนเพิ่มอัตราซื้อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีอัตราที่สูงเมื่อเทียบกับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนประเภทอื่น ดังตารางที่ 3.13 [43]

ตารางที่ 3.12 ค่าไฟฟ้าขายส่ง ณ ระดับแรงดันไฟฟ้าต่างๆ

ระดับแรงดันไฟฟ้า	ค่าผลิตไฟฟ้า		ค่าบริการระบบส่ง		อัตราขายส่งรวม	
	Peak	Off-Peak	Peak	Off-Peak	Peak	Off-Peak
230 kV	2.7497	2.0173	0.2730	-	3.0227	2.0173
69-115 kV	2.7591	2.0198	0.4913	-	3.2504	2.0198
11-33 kV	2.8322	2.0424	1.0226	-	3.8548	2.0424
ช่วง Peak	: เวลา 09.00-22.00 น.		วันจันทร์ – วันศุกร์			
ช่วง Off-Peak	: เวลา 22.00-09.00 น.		วันจันทร์ – วันศุกร์			
	: เวลา 00.00-24.00 น.		วันเสาร์ – วันอาทิตย์ วันแรงงานแห่งชาติ และวันหยุดราชการตามปกติ			

ตารางที่ 3.13 ส่วนเพิ่มอัตราซื้อสำหรับพลังงานทดแทน

ประเภทเชื้อเพลิง	ทุกจังหวัด ยกเว้น 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ (บาท/หน่วย)	3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ (บาท/หน่วย)	พื้นที่ที่ใช้ระบบผลิตไฟฟ้าจากดีเซล (บาท/หน่วย)	ระยะเวลา (ปี)
ชีวมวล				
น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 MW	0.5	1.5	1.5	7
มากกว่า 1 MW	0.3	1.3	1.3	7
ก๊าซชีวภาพ				
50 – 200 kW	0.5	1.5	1.5	7
น้อยกว่า 50 kW	0.3	1.3	1.3	7
ขยะ				
ระบบหมักหรือฝังกลบขยะ	2.5	3.5	3.5	7
พลังงานความร้อน	3.5	4.5	4.5	7
พลังงานลม				
น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 MW	4.5	6.0	6.0	10
มากกว่า 1 MW	3.5	5.0	5.0	10

ประเภทเชื้อเพลิง	ทุกจังหวัด ยกเว้น 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ (บาท/หน่วย)	3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ (บาท/หน่วย)	พื้นที่ที่ใช้ระบบผลิตไฟฟ้าจากดีเซล (บาท/หน่วย)	ระยะเวลา (ปี)
พลังงานแสงอาทิตย์				
ได้รับการตอบรับขายไฟฟ้า ก่อนมติ กพช. 28 มิ.ย. 53	8.0	9.5	9.5	10
ได้รับการตอบรับขายไฟฟ้า หลังมติ กพช. 28 มิ.ย. 53	6.5	8.0	8.0	10

ในปัจจุบันระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นทำให้อัตรารับซื้อไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบที่มีการจ่ายส่วนเพิ่มอาจกระทบต่อโครงสร้างค่าไฟฟ้าโดยรวมซึ่งจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าทั่วไป ดังนั้นในโครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา (Solar PV Rooftop) จึงมีการรับซื้อพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบ Feed-in Tariff (FiT) ซึ่งการรับซื้อไฟฟ้ารูปแบบนี้เป็นการรับซื้อไฟฟ้าที่ผลิตด้วยพลังงานทดแทนในอัตราพิเศษ ซึ่งเป็นเครื่องมือเชิงนโยบายที่ออกแบบมาเพื่อเร่งการลงทุนในการผลิตไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีพลังงานทดแทนด้วยการเสนอสัญญาระยะยาวแก่ผู้ผลิตพลังงานทดแทน โดยขึ้นอยู่กับต้นทุนการผลิตพลังงานทดแทนที่เลือกใช้แต่ละประเภท โครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งหลังคาในปี 2556 ได้มีมติจากคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติครั้งที่ 2/2556 ให้มีอัตรารับซื้อไฟฟ้าดังตารางที่ 3.14 [7]

ตารางที่ 3.14 อัตรารับซื้อไฟฟ้ารูปแบบ FiT ในโครงการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาในปี 2556

	บ้านที่อยู่อาศัย	อาคารธุรกิจขนาดเล็ก	อาคารธุรกิจขนาดกลาง-ใหญ่/โรงงาน
ขนาดกำลังผลิตติดตั้ง	0-10 kWp	>10-250 kWp	>250-1,000 kWp
อัตรา FiT (บาท/หน่วย)	6.96	6.55	6.16

3.7 ตัวอย่างการคำนวณรายรับและรายจ่ายของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

การคำนวณรายรับและรายจ่ายของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีขั้นตอนการคำนวณในแต่ละส่วนตามการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ดังต่อไปนี้

- 1) ข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
 - ปริมาณกำลังไฟฟ้าขายเข้าระบบโครงข่ายไฟฟ้าไม่เกิน 6 เมกะวัตต์
 - ผู้ใช้ประเภทที่ 3 กิจการขนาดกลาง – อัตรา TOU แรงดันปานกลาง

- ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขายไฟฟ้ามักกว่าซื้อไฟฟ้าจากการไฟฟ้า
- ประเภทเชื้อเพลิง คือ พลังงานแสงอาทิตย์
- ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดกำลังการติดตั้ง 3.69 เมกะวัตต์และกำลังการผลิตสูงสุด 2.52 เมกะวัตต์
- ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีการซื้อและขายไฟฟ้ากับการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายแสดงได้ดังตารางที่ 3.15

ตารางที่ 3.15 ข้อมูลการซื้อขายไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

	Peak	Off Peak	
จำนวนหน่วยที่ VSPP ซื้อจากการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย	21,112.14	19,425.98	หน่วย
ความต้องการกำลังไฟฟ้า	92.64304	83.52889	kW
ความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ		1,098.30	kVAr
kVAr คิดเงินค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (ส่วนที่ > 61.97% ของความต้องการพลังงานในช่วง Peak)		1,040.89	kVAr
จำนวนหน่วยที่ VSPP ขายเข้าการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย	248,349.74	156,534.02	หน่วย

- 2) การคำนวณค่าไฟฟ้าจากการซื้อไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.16

ตารางที่ 3.16 ค่าไฟฟ้าจากการซื้อไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

	ราคา	ปริมาณ	เงินรวม (บาท)
Peak	3.6796	21,112.14 หน่วย	77,684.23
Off Peak	2.1760	19,425.98	42,270.93
ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/เดือน)			119,955.16
ค่าความต้องการกำลังไฟฟ้า (บาท/kW)	132.93	92.64304 kW	12,315.04
ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (บาท/kVAr)	56.07	1,040.89 kVAr	58,362.80
ค่า Ft (บาท/หน่วย)	0.69	40,538.12 หน่วย	27,971.30
ค่าบริการ (บาท/เดือน)			312.24
รวม (บาท/เดือน)			218,916.55
VAT ร้อยละ 7			15,324.16
รวมค่าไฟฟ้าที่การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายเรียกเก็บ (บาท/เดือน)			234,240.71

- 3) การคำนวณค่าไฟฟ้าจากการขายไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.17

ตารางที่ 3.17 ค่าไฟฟ้าจากการขายไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

		ราคา	ปริมาณ	เงินรวม (บาท)
หักค่าดำเนินการร้อยละ 2 จากหน่วยที่ขายมากกว่าซื้อ	Peak		4,544.75 หน่วย	
	Off Peak		2,742.16 หน่วย	
หน่วยไฟฟ้าคิดเงินสุทธิหลังหักค่าดำเนินการร้อยละ 2	Peak		222,692.85 หน่วย	
	Off Peak		134,365.88 หน่วย	
จำนวนหน่วยที่น้อยกว่าหรือเท่ากับที่ซื้อจากการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย (On peak) : ราคาขายปลีก (บาท/หน่วย)		3.6796	21,112.14 หน่วย	77,684.23
จำนวนหน่วยที่มากกว่าที่ซื้อจากการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย (On peak) : ราคาขายส่ง (บาท/หน่วย)		3.8548	222,692.85 หน่วย	858,436.40
จำนวนหน่วยที่น้อยกว่าหรือเท่ากับที่ซื้อจากการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย (Off peak) : ราคาขายปลีก (บาท/หน่วย)		2.1760	19,425.98 หน่วย	42,270.93
จำนวนหน่วยที่มากกว่าที่ซื้อจากการไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย (Off peak) : ราคาขายส่ง (บาท/หน่วย)		2.0424	134,365.88 หน่วย	274,428.87
ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/เดือน)				1,252,820.43
ค่า Ft (บาท/หน่วย)	ขายปลีก	0.69	40,538.12 หน่วย	27,971.30
	ขายส่งเฉลี่ย	0.5020	357,058.73 หน่วย	179,243.48
รวมพลังงานค่าไฟฟ้าและค่า Ft				1,460,035.22
ค่าส่วนเพิ่มที่ได้รับ (Adder) (บาท) (หน่วยไฟฟ้าคิดเงินสุทธิบวกกลับหน่วยร้อยละ 2) พลังงานแสงอาทิตย์		6.50	364,345.64 หน่วย	2,368,246.67
ค่าไฟฟ้ารวม Adder (บาท/เดือน)				3,828,281.89
VAT ร้อยละ 7				267,979.73
รวมค่าไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ (บาท/เดือน)				4,096,261.62

- 4) การคำนวณค่าไฟฟ้าสุทธิ

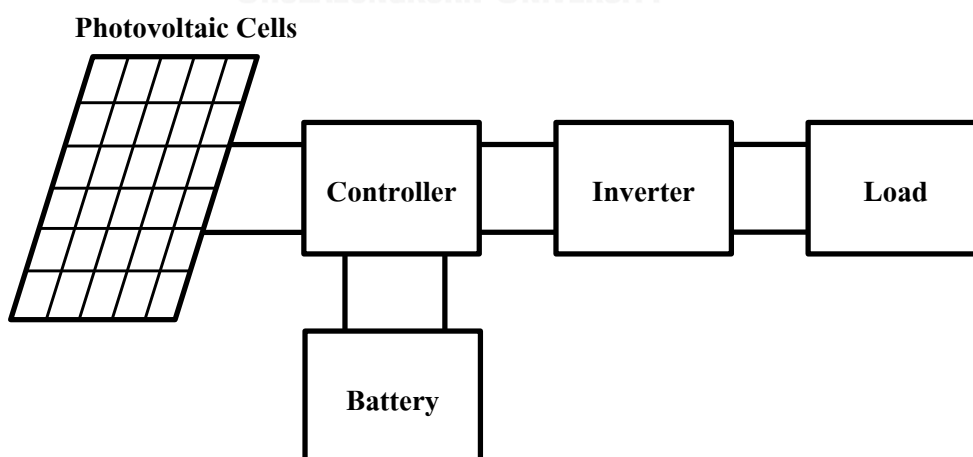
ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้กำไรจากการขายไฟฟ้าในเดือนนี้เท่ากับ 3,862,020.92 บาท

บทที่ 4

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

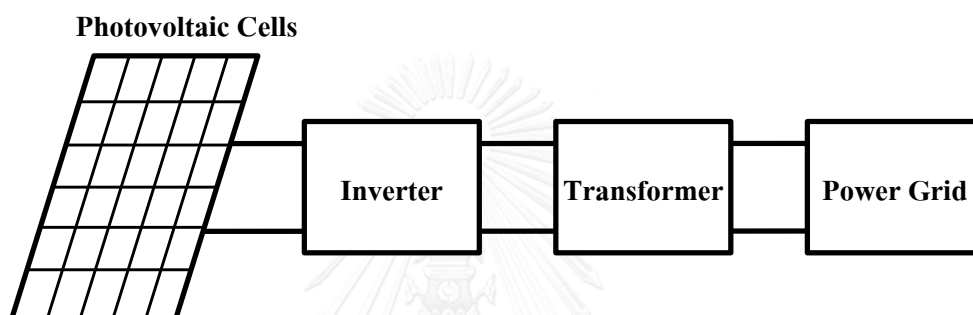
ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic generation system: PVGS) เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัว (Distributed generation: DG) ที่นำพลังงานจากแสงอาทิตย์มาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยสามารถแบ่งตามการนำมาใช้งานได้ 3 ประเภท [45-47] คือ

- 1) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV stand-alone system) เป็นระบบที่ไม่มีการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะเชื่อมต่อกับผู้ใช้ไฟฟ้าหรือโหลดโดยตรง ไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าก่อน ซึ่งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้จะเหมาะกับระบบในพื้นที่ชนบทที่อยู่ห่างไกลมากๆ หรือพื้นที่ที่ไม่มีระบบโครงข่ายไฟฟ้าจ่ายไฟฟ้าให้ได้ ส่วนประกอบระบบประเภทนี้มี 4 ส่วน คือ (1) เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic cells) (2) อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ (Controller) (3) แบตเตอรี่ (Battery) (4) อินเวอร์เตอร์ (Inverter) และ (5) โหลด (Load) ดังแสดงในภาพที่ 4.1 แบตเตอรี่เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในระบบประเภทนี้เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตไฟฟ้าได้เฉพาะช่วงที่มีแสงอาทิตย์เท่านั้น ดังนั้นจำเป็นต้องมีแบตเตอรี่เพื่อที่จะเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินในช่วงที่มีแสงอาทิตย์ และนำพลังงานไฟฟ้านั้นมาใช้ในช่วงที่ไม่มีแสงอาทิตย์ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ในบางครั้งอาจมีการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าแหล่งอื่นอีกเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรองด้วย



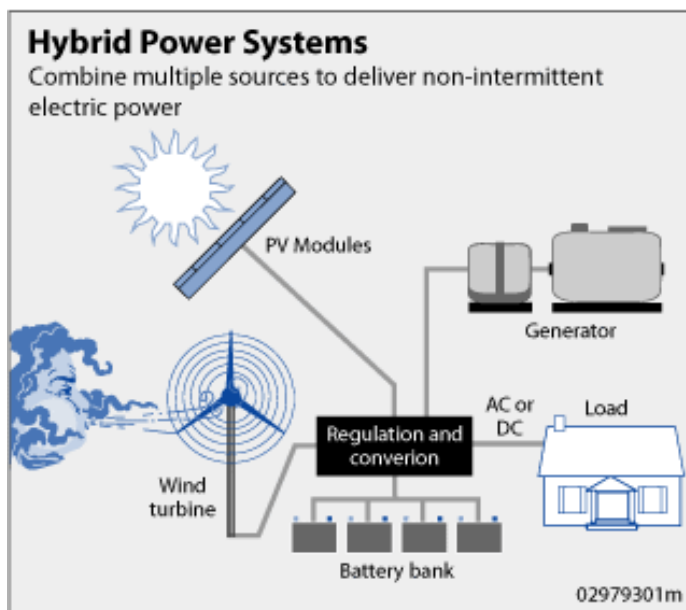
ภาพที่ 4.1 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

- 2) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า (PV grid connected system) เป็นระบบที่มีการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งระบบประเภทนี้มักไม่มีการติดตั้งแบตเตอรี่เพื่อสำรองพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากในช่วงที่เซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ยังคงมีพลังงานไฟฟ้าจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าจ่ายให้กับโหลดอยู่ ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้จะใช้งานในระบบที่มีอยู่ในเขตเมืองต่างๆ หรือพื้นที่ที่มีระบบโครงข่ายไฟฟ้าเข้าถึง ส่วนประกอบระบบประเภทนี้มี 4 ส่วน คือ (1) เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic cells) (2) อินเวอร์เตอร์ (Inverter) (3) หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า (Voltage transformer) และ (4) ระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Power grid) ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า

- 3) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (Hybrid PV system) เป็นระบบที่มีการออกแบบสำหรับการทำงานร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดอื่น เช่น ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม เครื่องยนต์ดีเซล เป็นต้น ทั้งนี้รูปแบบของระบบผลิตไฟฟ้าประเภทนี้จะขึ้นอยู่กับ การออกแบบตามวัตถุประสงค์ในการใช้งานของระบบนั้น ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน

ที่มา Office of Energy Efficiency and Renewable Energy

http://www.eere.energy.gov/consumer/your_home/electricity/index.cfm/mytopic=11130?print

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณา คือ ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าเพราะเป็นระบบที่มีการใช้งานอยู่เป็นจำนวนมากในปัจจุบัน ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญ 4 ส่วน ได้แก่ (1) เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic cells) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า (2) อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ พร้อมทั้งควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า ความถี่ และกระแสไฟฟ้าให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม (3) หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า (Voltage transformer) ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าให้ได้ค่าที่เหมาะสมก่อนจะจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้า (4) ระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Power grid) ซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะมีข้อกำหนดการเชื่อมต่อ (Grid code) เพื่อควบคุมให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถรักษาระดับคุณภาพไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบโครงข่ายไฟฟ้ามารวมทั้งเพื่อความปลอดภัยของระบบโครงข่ายไฟฟ้าด้วย โดยในบทนี้จะแบ่งการนำเสนอออกเป็น 2 หัวข้อ ได้แก่

4.1 เซลล์แสงอาทิตย์

4.2 อินเวอร์เตอร์

4.1 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic cell) เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่อาศัยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic effect) ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า เมื่อแสงจากดวงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและความต่างศักย์ที่ผิวทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ ฉะนั้นเมื่อเชื่อมต่อผิวทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอน ซึ่งการไหลของอิเล็กตรอนนี้ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น หรือก็คือสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงหรือโฟตอนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ไม่มีค่าเชื้อเพลิงและเป็นพลังงานไฟฟ้าที่สะอาด เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตขึ้นจากสารกึ่งตัวนำซึ่งในปัจจุบันมีกลุ่มสารประกอบจำนวน 2 กลุ่มที่นิยมใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ [45-49] ดังนี้

1) กลุ่มที่ทำจากสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอน

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารกึ่งตัวนำซิลิคอนในการผลิตสามารถแบ่งได้ตามลักษณะของผลึกซิลิคอน 3 ประเภท ซึ่งขึ้นกับกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน ดังนี้

- เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (Single crystalline silicon cell) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแรกๆ ที่ได้รับการผลิตและจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนหนาประมาณ 300 ไมครอน หรือที่เรียกว่าเวเฟอร์
- เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิคอน (Polycrystalline silicon solar cell) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อลดต้นทุนของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน โดยยังคงคุณสมบัติและประสิทธิภาพการใช้งานใกล้เคียงกับแบบผลึกเดี่ยวมากที่สุด
- เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous silicon solar cell) เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ได้รับการคิดค้นและพัฒนาขึ้น เพื่อประหยัดต้นทุนและเวลาในการผลิต เนื่องจากเป็นฟิล์มบางเพียง 0.5 ไมครอน ใช้น้ำหนักเบาและยืดหยุ่นกว่าทั้งสองชนิดที่ได้กล่าวมา

2) กลุ่มที่ทำจากสารประกอบที่ไม่ใช่ซิลิคอน

เซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่มีประสิทธิภาพสูงกว่ากลุ่มที่ทำจากสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอน ซึ่งมีประสิทธิภาพถึงร้อยละ 25 แต่ไม่นิยมใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าในงานทั่วไปเนื่องจากมีราคาที่สูงมาก โดยทั่วไปจะมีการใช้งานสำหรับดาวเทียมและระบบรวมแสง สารประกอบที่ใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มนี้ได้แก่ แกลเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide: GaAs) แคดเมียมเทลลูไรด์ (Cadmium Telluride: CdTe) และคอปเปอร์อินเดียมไดเซเลไนด์ (Copper Indium

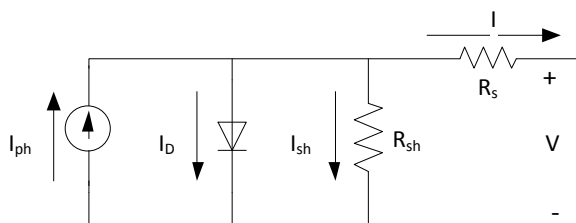
Diselenide: CIS) เป็นต้น ซึ่งมีทั้งชนิดผลึกเดี่ยว (Single crystalline) และผลึกรวม (Polycrystalline)

4.1.1 หลักการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์

ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่า เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำซึ่งมักนิยมใช้ ซิลิคอนซึ่งมีราคาถูกและมีมากที่สุดบนพื้นโลกในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเซลล์แสงอาทิตย์อาศัยกระบวนการโฟโตโวลตาอิกในสารกึ่งตัวนำสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้า ในข้อหัวหลักการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์จะแบ่งเป็น 2 หัวข้อย่อย คือ (1) แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ และ (2) ปัจจัยที่มีผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์

4.1.1.1 แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์

การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์นั้น เป็นกระบวนการการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าได้ โดยเมื่อแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระทบกับสารกึ่งตัวนำจะเกิดการถ่ายเทพลังงานระหว่างกัน ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าหรืออิเล็กตรอนขึ้นในสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถต่อกระแสไฟฟ้าง่ายๆไปใช้งานได้โดย n-type ซิลิคอน ซึ่งอยู่ด้านหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์ มีคุณสมบัติเป็นตัวให้อิเล็กตรอนเมื่อรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ซึ่งมีลักษณะเป็นขั้วลบ ส่วน p-type ซิลิคอนมีคุณสมบัติให้โครงสร้างของอะตอมสูญเสียอิเล็กตรอนหรือโฮล เมื่อรับพลังงานจากแสงอาทิตย์จะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนซึ่งมีลักษณะเป็นขั้วบวก เมื่อนำซิลิคอนทั้ง 2 ชนิด มาประกบต่อกันด้วย p-n junction เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบ แสงอาทิตย์จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้เกิดการเคลื่อนไหว เมื่อพลังงานสูงพอทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะวิ่งเข้าหาเพื่อจับคู่กัน อิเล็กตรอนจะวิ่งไปยังชั้น n-type และโฮลจะวิ่งไปยังชั้น p-type เมื่อมีการต่อวงจรไฟฟ้าให้ครบวงจร ก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น โดยลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปของกระแสและแรงดันไฟฟ้า ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงได้ตามแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ชนิดหนึ่งไดโอด (PV single-diode model) [45, 49] ดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งไดโอด

จากแบบจำลองในภาพที่ 4.4 สามารถเขียนสมการวงจรไฟฟ้าของกระแสตามกฎของเคอร์ชอฟ (Kirchhoff's circuit law: KCL) ได้ดังสมการที่ (4.1)

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (4.1)$$

โดยที่

I คือ กระแสที่ผลิตมาจากเซลล์แสงอาทิตย์ (A)

I_{ph} คือ กระแสโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric current) ที่จะเกิดมาจากความเข้มแสงที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์ (A)

I_D คือ กระแสไหลผ่านไดโอด (Diode current) ของเซลล์แสงอาทิตย์ (A)

I_{sh} คือ กระแสที่ไหลผ่านความต้านทานที่มีลักษณะของการเชื่อมต่อแบบขนาน (R_{sh}) ของเซลล์แสงอาทิตย์ (A)

จากสมการที่ (4.1) นั้นจะสามารถเปลี่ยนรูปแบบของสมการให้อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (V) โดยจะเริ่มพิจารณาจากแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวของไดโอด (V_D) และแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมความต้านทานที่เชื่อมต่อแบบขนาน (R_{sh}) ดังแสดงในภาพที่ 4.4 โดยทั่วไปข้อมูลที่ได้จากผู้ผลิตจะเป็นข้อมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ 1 โมดูล ซึ่งจะสามารถที่จะแสดงค่าของกระแสที่ไหลผ่านไดโอด และกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานที่เชื่อมต่อแบบขนานเมื่อพิจารณาเป็นโมดูล ได้ดังสมการที่ (4.2) และ (4.3)

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_D}{n_s V_t}\right) - 1 \right] \quad (4.2)$$

$$I_{sh} = \frac{V_D}{R_{sh}} \quad (4.3)$$

โดยที่

- I_0 คือ กระแสอิ่มตัวไดโอด (Saturation current) ของเซลล์แสงอาทิตย์ (A)
- V_D คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์ (V)
- V_t คือ ขีดความต่างศักย์เริ่มเปลี่ยน (Threshold voltage) (V) หรือค่าของแรงดันไฟฟ้าจุดเปลี่ยนของไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์ (V) โดยจะมีหลักการในการคำนวณค่าของ V_t ซึ่งจะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.4)
- R_{sh} คือ ความต้านทานที่มีภาพแบบการเชื่อมต่อแบบขนานของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยลักษณะการเชื่อมต่อจะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.4 (Ω)
- n_s คือ จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมกันเป็นโมดูล

$$V_t = \frac{kTA}{q} \quad (4.4)$$

โดยที่

- T คือ อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (K)
- q คือ ค่าคงที่ของประจุของอิเล็กตรอนหนึ่งอิเล็กตรอน (1.6×10^{-19} C)
- K คือ ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann constant) (1.38×10^{-23} J/K)
- A คือ แผงเตอร์ของไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ ซึ่งจะกับเทคโนโลยีของแต่ละผู้ผลิตที่จะนำมาใช้

จากสมการที่ (4.2), (4.3) นำค่าของกระแสที่ไหลผ่านไดโอด และกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานที่เชื่อมต่อแบบขนานมาแทนค่าในสมการที่ (4.1) จะสามารถแสดงได้ในสมการที่ (4.5)

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_D}{n_s V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V_D}{R_{sh}} \quad (4.5)$$

จากภาพที่ 4.4 จะพบว่าค่าของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไดโอดและค่าของแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ จะมีความสัมพันธ์ที่สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.6)

$$V_D = V + IR_s \quad (4.6)$$

โดยที่

V คือ แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์ (V)

R_s คือ ความต้านทานที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อแบบอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ (Ω)

นำสมการที่ (4.5) และ (4.6) มารวมกันจะได้สมการที่จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังสมการที่ (4.7)

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left(\frac{V + IR_s}{n_s V_t} \right) - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (4.7)$$

4.1.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์

การผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์นั้น นอกจากวัสดุที่ใช้ในการผลิตและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว สภาพแวดล้อมต่างๆ ก็มีผลสำคัญต่อกำลังการผลิตของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งปัจจัยที่มีผลโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มี 2 ปัจจัย คือ (1) ความเข้มแสง และ (2) อุณหภูมิ [45, 46]

1) ความเข้มแสง

กระแสไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง ซึ่งหมายความว่าเมื่อความเข้มแสงสูง กระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสูงขึ้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจะไม่แปรไปตามความเข้มแสงมากนัก ความเข้มแสงที่ใช้วัดเป็นมาตรฐานคือ ความเข้มแสงที่วัดบนพื้นโลกในสภาพอากาศปลอดโปร่งปราศจากเมฆหมอกและวัดที่ระดับน้ำทะเลในสภาพที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลก ซึ่งความเข้มแสงจะมีค่าเท่ากับ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตรและถ้าแสงอาทิตย์ทำมุม 60 องศากับพื้นโลกความเข้มแสงจะมีค่าเท่ากับประมาณ 750 วัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งสามารถแสดงในรูปของสมการดังสมการที่ (4.8) และ (4.9)

$$I_{ph}(G) = I_{ph}(G_{stc}) \left(\frac{G}{G_{stc}} \right) \quad (4.8)$$

$$I_{sc}(G) = I_{sc}(G_{stc}) \left(\frac{G}{G_{stc}} \right) \quad (4.9)$$

โดยที่

I_{sc} คือ กระแสลัดวงจร ณ สภาพแวดล้อมขณะนั้น (A)

G คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ ณ เวลาที่พิจารณา (W/m^2)

G_{stc} คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ ณ ความเข้มแสงที่ Standard Test Condition (STC) เท่ากับ $1,000 A (W/m^2)$

2) อุณหภูมิ

กระแสไฟฟ้าจะไม่แปรตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วทุกๆ 1 องศาที่เพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงร้อยละ 0.5 และในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐานที่ใช้กำหนดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์คือ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เช่น กำหนดไว้ว่าแผงแสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าที่วงจรเปิด ที่ 21 โวลต์ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ก็จะหมายความว่า แรงดันไฟฟ้าที่จะได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อยังไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะเท่ากับ 21 โวลต์ ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 25 องศาเซลเซียส เช่น อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะทำให้แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงร้อยละ 2.5 นั่นคือ แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะเปิดวงจร จะลดลง 0.525 โวลต์ เหลือเพียง 20.475 โวลต์ จึงสรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แรงดันไฟฟ้าก็จะลดลง ซึ่งมีผลทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงด้วย ดังแสดงในสมการที่ (4.10)-(4.11)

$$I_{sc}(T) = I_{sc}(T_{stc}) + K_i(T - T_{stc}) \quad (4.10)$$

$$V_{oc}(T) = V_{oc}(T_{stc}) + K_v(T - T_{stc}) \quad (4.11)$$

โดยที่

T_{stc}	คือ อุณหภูมิที่ Standard test condition (STC) เท่ากับ 298.15 K
K_i	คือ ค่าคงที่ที่บอกลถึงการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่เกิดจากความเข้มแสงต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิหนึ่งองศาเซลเซียสหรือหนึ่งองศาเคลวิน ($A/^{\circ}C$ หรือ A/K)
K_v	คือ ค่าคงที่ที่บอกลถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิหนึ่งองศาเซลเซียสหรือหนึ่งองศาเคลวิน ($V/^{\circ}C$ หรือ V/K)
V_{oc}	คือ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ (V)

4.1.2 ตัวอย่างข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์จากผู้ผลิตแต่ละรายจะมีรายละเอียดของพารามิเตอร์หรือข้อมูลทางเทคนิคที่แตกต่างกัน ซึ่งโดยทั่วไปพารามิเตอร์สำคัญที่สามารถหาได้จากเอกสารของผู้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ มีทั้งสิ้น 8 พารามิเตอร์ โดยพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จะกล่าวถึงนั้น ผู้ผลิตได้มาจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะทดสอบพารามิเตอร์ที่อุณหภูมิและความเข้มแสงมาตรฐาน (Standard test condition: STC) หรือก็คือทดสอบที่อุณหภูมิเท่ากับ $25^{\circ}C$ และความเข้มแสงเท่ากับ $1,000 W/m^2$ ที่ AM 1.5 โดยพารามิเตอร์ทั้ง 8 พารามิเตอร์มีดังนี้

- แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Open circuit voltage: V_{oc})
- กระแสลัดวงจร (Short circuit current: I_{sc})
- กำลังสูงสุดที่จะผลิตได้ (Maximum power: P_{mpp})
- แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังสูงสุดที่จะผลิตได้ (Maximum power voltage: V_{mpp})
- กระแสที่ทำให้เกิดกำลังสูงสุดที่จะผลิตได้ (Maximum power current: I_{mpp})
- ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของกระแสลัดวงจรต่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (Temperature coefficient short circuit: K_i)
- ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรต่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (Temperature coefficient open circuit: K_v)
- จำนวนของเซลล์ที่มีการต่ออนุกรมเป็นโมดูล (Number per module: n_s)

จากข้อมูลทางเทคนิคที่กล่าวมานั้น จะสามารถแสดงตัวอย่างของข้อมูลทางเทคนิคของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท เคียวเซระ จำกัด (มหาชน) (Kyocera) [46] บริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด

(มหาชน) (Solartron) [48] และบริษัท General Solar Power จำกัด [50] ซึ่งจะสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 ถึง 4.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท เคียวเซร่า จำกัด (มหาชน)

พารามิเตอร์ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล	
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{mpp})	200.143 (W)
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{mpp})	26.3 (V)
กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{mpp})	7.61 (A)
แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc})	32.9 (V)
กระแสลัดวงจร (I_{sc})	8.21 (A)
ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของกระแสต่ออุณหภูมิ (K_i)	0.00318 ($A/^{\circ}C$)
ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าต่ออุณหภูมิ (K_v)	-0.123 ($V/^{\circ}C$)
จำนวนของเซลล์ที่มีการต่ออนุกรมเป็นโมดูล (n_s)	54

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน)

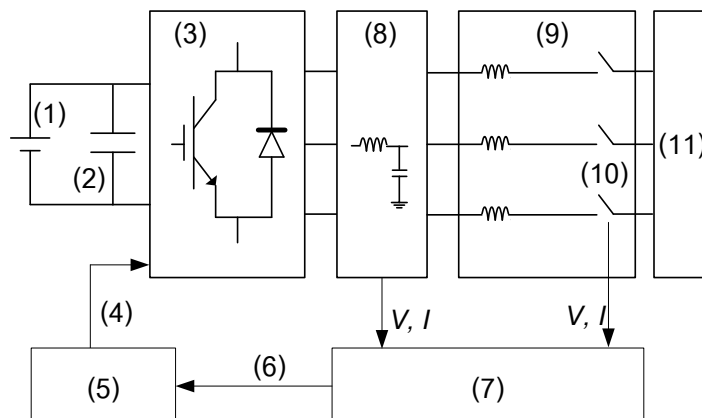
พารามิเตอร์ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล	
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{mpp})	120 (W)
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{mpp})	17.28 (V)
กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{mpp})	7 (A)
แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc})	21.7 (V)
กระแสลัดวงจร (I_{sc})	7.45 (A)
ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของกระแสต่ออุณหภูมิ (K_i)	0.0003 ($A/^{\circ}C$)
ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าต่ออุณหภูมิ (K_v)	-0.0074 ($V/^{\circ}C$)
จำนวนของเซลล์ที่มีการต่ออนุกรมเป็นโมดูล (n_s)	36

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท General Solar Power จำกัด

พารามิเตอร์ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล	
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{mpp})	100 (W)
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{mpp})	76 (V)
กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{mpp})	1.3 (A)
แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc})	100 (V)
กระแสลัดวงจร (I_{sc})	1.64 (A)
ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของกระแสต่ออุณหภูมิ (K_I)	0.0003 (A/°C)
ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าต่ออุณหภูมิ (K_V)	-0.42 (V/°C)
จำนวนของเซลล์ที่มีการต่ออนุกรมเป็นโมดูล (n_s)	119

4.2 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power electronic devices) ที่ประกอบด้วย ไดโอด (Diodes) ทรานซิสเตอร์ (Transistors) และไทรสเตอร์ (Thyristors) ซึ่งมีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือสูง รวมทั้งการตอบสนอง (Response time) ที่รวดเร็ว หน้าที่หลักของอินเวอร์เตอร์ คือ การแปลงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทที่ผลิตไฟฟ้าออกมาเป็นไฟฟ้ากระแสตรงหรือไฟฟ้ากระแสสลับที่ไม่ใช้ความถี่เชิงโครนัสให้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่เชิงโครนัส ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาและผลิตอินเวอร์เตอร์ออกมามากมาย โดยอินเวอร์เตอร์แต่ละรุ่นของผู้ผลิตอินเวอร์เตอร์จะมีข้อมูลทางเทคนิคและความสามารถอื่นๆ ที่ในการควบคุมที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการนำอินเวอร์เตอร์รุ่นนั้นๆ ไปใช้งาน [51] โดยที่ส่วนประกอบต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์สามารถแสดงได้ ดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ส่วนประกอบของอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

จากภาพที่ 4.5 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยส่วนต่างๆ 11 ส่วน ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ส่วนประกอบของอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

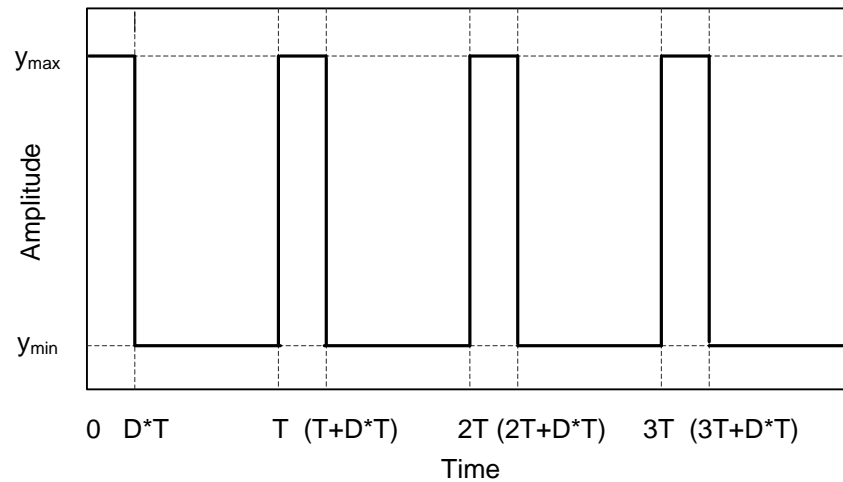
หมายเลข	อุปกรณ์ / สัญญาณ	หน้าที่ของอุปกรณ์ / สัญญาณ
1	PV cells	เซลล์แสงอาทิตย์มีหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า
2	Input capacitor	ตัวเก็บประจุมีหน้าที่คงค่าแรงดันไฟฟ้าทางฝั่งไฟฟ้ากระแสตรง
3	Inverter	อินเวอร์เตอร์มีหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ
4	Gate signals	สัญญาณเกทมีหน้าที่สั่งการให้อินเวอร์เตอร์ทำงาน
5	PWM/SVPWM generator	เครื่องกำเนิดสัญญาณ Pulse-width modulation (PWM) หรือ Space vector pulse-width modulation (SVPWM) ใช้ในการสร้างสัญญาณเกทเพื่อควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์
6	Reference signals	สัญญาณอ้างอิงที่ส่งให้กับเครื่องกำเนิดสัญญาณ PWM เพื่อแปลงสัญญาณเพื่อให้อินเวอร์เตอร์ทำงานตามที่ต้องการได้
7	Controller	ส่วนควบคุมมีหน้าที่ควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์

หมายเลข	อุปกรณ์ / สัญญาณ	หน้าที่ของอุปกรณ์ / สัญญาณ
8	Filter	ฟิลเตอร์มีหน้าที่กรององค์ประกอบความถี่ที่ไม่ต้องการออกไป
9	Interconnection system	ส่วนเชื่อมต่อจะประกอบด้วยสายส่งและอุปกรณ์ตัดวงจร
10	PCC	จุดเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับระบบโครงข่ายไฟฟ้า
11	Power grid	ระบบโครงข่ายไฟฟ้า

4.2.1 หลักการควบคุมอินเวอร์เตอร์พื้นฐาน

อินเวอร์เตอร์นั้นจะมีส่วนควบคุม (Controller) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ให้ทำงานตามที่กำหนด โดยส่วนควบคุมอินเวอร์เตอร์จะรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการประมวลผลจาก 2 แหล่ง คือ (1) สัญญาณขาออกจากรีเลย์อินเวอร์เตอร์ (2) จุดเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า รวมทั้งการปรับตั้งโหมดการทำงานต่างๆ ตามที่ผู้ผลิตไฟฟ้ากำหนด เมื่อส่วนควบคุมประมวลผลแล้วจะส่งสัญญาณ (Reference signal) ไปยังเครื่องกำเนิดสัญญาณ Pulse-width modulation (PWM) หรือในระบบควบคุมขั้นสูง Space vector pulse-width modulation (SVPWM) [52] เพื่อผลิตสัญญาณเกต ให้กับอินเวอร์เตอร์สั่งการอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในอินเวอร์เตอร์ให้ทำงานตามที่ต้องการ

Pulse-width modulation ใช้หลักการของการเฉลี่ยสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมดังภาพที่ 4.6 เพื่อให้ได้สัญญาณที่ใกล้เคียงกับสัญญาณรูปไซน์ โดยการเฉลี่ยจะเป็นการเฉลี่ยค่าของสัญญาณในหนึ่งคาบ ซึ่งจะสามารถอธิบายได้จากสมการที่ (4.12) - (4.13) [52]



ภาพที่ 4.6 สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมของสัญญาณ Pulse-width modulation

ที่มา National Instrument Corporation <http://www.ni.com/white-paper/2991/en/>

$$\bar{y} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (4.12)$$

จะได้

$$\bar{y} = D \cdot y_{\max} + (1-D)y_{\min} \quad (4.13)$$

โดยที่

\bar{y} คือ ค่าเฉลี่ยของขนาดของสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม Pulse-width modulation

T คือ ระยะเวลาของหนึ่งคาบสัญญาณ

$f(t)$ คือ สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมของ Pulse-width modulation

D คือ รอบทำงานที่สัญญาณสลับค่าระหว่าง y_{\max} กับ y_{\min} ซึ่งจะมีค่าไม่เกินหนึ่ง

y_{\max} คือ ค่าสูงสุดของขนาดของสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม Pulse-width modulation

y_{\min} คือ ค่าต่ำสุดของขนาดของสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม Pulse-width modulation

4.2.2 ข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์

ข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์ คือ รายละเอียดพารามิเตอร์ต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์แต่ละรุ่นที่ผู้ผลิตนำเสนอ เพื่อเป็นข้อมูลในการพิจารณาตัดสินใจเลือกใช้อินเวอร์เตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยในอินเวอร์เตอร์แต่ละรุ่นข้อมูลทางเทคนิคที่คล้ายกัน ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการสำรวจและสรุปข้อมูลทางเทคนิคที่สำคัญของผู้ผลิตอินเวอร์เตอร์ในปัจจุบัน [53-57] โดยรายละเอียดข้อมูลทางเทคนิคสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ข้อมูลขาเข้า (Input)

ข้อมูลขาเข้าเป็นพารามิเตอร์ต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์ทางด้านที่มีการเชื่อมต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นด้านที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีพารามิเตอร์ข้อมูลขาเข้าดังนี้

- กำลังไฟฟ้าขาเข้าสูงสุด (Maximum dc power: P_{dcmax})
- แร่งดันไฟฟ้าสูงสุด-ต่ำสุด (DC voltage range: $V_{dcmax}-V_{dcmin}$)
- กระแสไฟฟ้าขาเข้าพิกัด (Maximum dc current: I_{dcmax})

2) ข้อมูลขาออก (Output)

ข้อมูลขาออกจากอินเวอร์เตอร์จะเป็นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งจะเชื่อมต่อกับหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้าหรือโหลดโดยตรง โดยมีพารามิเตอร์ข้อมูลขาออกดังนี้

- กำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุด (Maximum ac power: S_{max})
- แร่งดันไฟฟ้าขาออกปกติ (Nominal ac voltage)
- แร่งดันไฟฟ้าสูงสุด-ต่ำสุด (AC voltage range: $V_{acmax} - V_{acmin}$)
- กระแสไฟฟ้าขาออกพิกัด (Maximum ac current: I_{acmax})
- ความถี่ไฟฟ้า (Frequency)
- ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Power factor: PF_{max})

3) ประสิทธิภาพ (Efficiency: η)

ประสิทธิภาพเป็นพารามิเตอร์ที่บอกถึงการสูญเสียที่เกิดขึ้นระหว่างการแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งการสูญเสียอาจเกิดจากสาเหตุหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิสวิตช์ในอินเวอร์เตอร์ การจัดการด้านการใช้กำลังงานของอินเวอร์เตอร์ เป็นต้น ซึ่งประสิทธิภาพจะสามารถคำนวณได้จากกำลังขาเข้า (P_{dc}) และกำลังขาออกของอินเวอร์เตอร์ (P_{ac}) ดังสมการที่ (4.14)

$$\eta = P_{ac} / P_{dc} \quad (4.14)$$

โดยข้อมูลเทคนิคในส่วนของประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

3.1) ประสิทธิภาพสูงสุด (Peak efficiency) ซึ่งเป็นประสิทธิภาพที่สูงที่สุดที่อินเวอร์เตอร์แต่ละรุ่นสามารถทำงานได้

3.2) ประสิทธิภาพจากการทดสอบอินเวอร์เตอร์ ค่าประสิทธิภาพชนิดนี้จะสามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของอินเวอร์เตอร์ได้ดีกว่าประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากประสิทธิภาพจากการทดสอบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพที่ได้มาจากการเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก โดยข้อมูลเทคนิคจากการทดสอบประสิทธิภาพที่นิยมใช้ในอินเวอร์เตอร์เกือบทุกรุ่นในปัจจุบัน ได้แก่ ประสิทธิภาพแบบ Euro eta หรือ Euro efficiency และประสิทธิภาพแบบ California Energy Commission (CEC)

ประสิทธิภาพแบบ Euro eta หรือ Euro Efficiency เป็นการคำนวณประสิทธิภาพจากการทำงานในแต่ละช่วงกำลังการผลิตของอินเวอร์เตอร์นั้นๆ โดยมีการถ่วงน้ำหนักดังสมการที่ (4.15) [58]

$$\eta_{euro} = 0.03 * \eta_{5\%} + 0.06 * \eta_{10\%} + \dots + 0.13 * \eta_{20\%} + 0.1 * \eta_{30\%} + 0.48 * \eta_{50\%} + 0.2 * \eta_{100\%} \quad (4.15)$$

ประสิทธิภาพแบบ California Energy Commission (CEC) เป็นการคำนวณประสิทธิภาพจากการทำงานเช่นเดียวกับ Euro Efficiency แต่มีการถ่วงน้ำหนักที่ต่างออกไป ดังแสดงในสมการที่ (4.16) [58]

$$\eta_{CEC} = 0.04 * \eta_{10\%} + 0.05 * \eta_{20\%} + \dots + 0.12 * \eta_{30\%} + 0.21 * \eta_{50\%} + 0.53 * \eta_{75\%} + 0.05 * \eta_{100\%} \quad (4.16)$$

โดยที่

η_{euro} คือ ประสิทธิภาพแบบ Euro eta หรือ Euro Efficiency (%)

η_{CEC} คือ ประสิทธิภาพแบบ California Energy Commission (CEC) (%)

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

4) แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น (Start voltage)

แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าอินเวอร์เตอร์ต่ำสุดที่สามารถทำให้อินเวอร์เตอร์เริ่มแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับได้ แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นเป็นข้อมูลที่สำคัญในการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ การออกแบบจำเป็นจะต้องคำนวณจำนวนแผงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่พอเหมาะกับค่าแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้น แต่ข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นมักไม่ได้แสดงอยู่ในข้อมูลเทคนิคของอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นผู้ออกแบบมักกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นมีค่าเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าต่ำสุดของอินเวอร์เตอร์แต่ละรุ่น

4.2.2.1 ตัวอย่างข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์ในปัจจุบัน

อินเวอร์เตอร์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันมีอยู่มากมายและหลากหลายขนาดพิกัดอินเวอร์เตอร์ โดยที่อินเวอร์เตอร์จะสามารถแบ่งได้ตามโครงสร้างการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น โครงสร้างอินเวอร์เตอร์แบบรวมศูนย์ (Centralized inverter configuration) ที่มีการเชื่อมต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมากต่ออินเวอร์เตอร์หนึ่งเครื่อง โครงสร้างสตริงอินเวอร์เตอร์ (String inverter configuration) ที่มีการเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนหนึ่งสตริงซึ่งมีจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มากเข้ากับอินเวอร์เตอร์ และมีลติสตริงอินเวอร์เตอร์ (Multi-string inverter configuration) ที่มีการเชื่อมต่อคล้ายกับโครงสร้างสตริงอินเวอร์เตอร์แต่มีการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์แต่ละสตริงมารวมที่อินเวอร์เตอร์ขนาดใหญ่ก่อนจะเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณาเฉพาะอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานในโครงสร้างอินเวอร์เตอร์แบบรวมศูนย์ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีการใช้งานมากที่สุดในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดระดับเมกะวัตต์เนื่องจากมีต้นทุนต่อกำลังไฟฟ้าที่ถูกเมื่อเทียบกับโครงสร้างแบบอื่น อินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานในโครงสร้างนี้จะมีขนาดพิกัดใหญ่ ซึ่งมีตัวอย่างอินเวอร์เตอร์รุ่นต่างๆ ดังตารางที่ 4.5 และ 4.6 [53-57]

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์รุ่นต่างๆ

		Product	LEONICS APOLLO GTP- 512	Satcon PVS- 500-UL	Schneider XC 540-NA	SMA Sunny Central 630CP- US
		Parameter				
Input	Maximum dc power (kW)		275	730	621	713
	DC voltage range (V)		400-700	333-600	440-800	500-820
	Maximum dc current (A)		688	1,565	1,280	1,350
Output	Maximum ac power (kVA)		250	500	540	630
	Nominal ac voltage (V)		400	480	300	315
	AC voltage range (V)		380-415	183-229	270-330	284-347
	Maximum ac current (A)		625	1388	1040	1283
	Frequency (Hz)		50, 60	60	50, 60	50, 60
	Power factor		0.9 – 1.0 lead/lag	0.8 – 1.0 lead/lag	0.8 – 1.0 lead/lag	0.8 – 1.0 lead/lag
η	Peak efficiency (%)		96.3	97.5	98.5	98.5
	Euro/CEC efficiency (%)		-/ -	-/ 97	98.3/ 98.5	98.3/ 98.0



ตารางที่ 4.6 ข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์รุ่นต่างๆ (ต่อ)

		Product	ABB PVS800-57-875kW-B	GE- 1000kW	Schneider XC 680-NA	SMA Sunny Central 800CP-US
		Parameter				
Input	Maximum dc power (kW)		1,050	1,000	782	898
	DC voltage range (V)		525-825	450-850	550-800	570-820
	Maximum dc current (A)		1,710	3,600	1,280	1,600
Output	Maximum ac power (kVA)		1,050	1,000	680	800
	Nominal ac voltage (V)		350	480	380	360
	AC voltage range (V)		315-385	456-528	342-418	324-396
	Maximum ac current (A)		1,445	1,204	1,040	1,411
	Frequency (Hz)		50, 60	50, 60	50, 60	50, 60
	Power factor		0.9 – 1.0 lead/lag	0.9 – 1.0 lead/lag	0.8 – 1.0 lead/lag	0.8 – 1.0 lead/lag
η	Peak efficiency (%)		98.7	98	98.9	98.7
	Euro/CEC efficiency (%)		98.5/ -	97.5/ 97	98.6/ 98.7	98.4/ 98.5

4.2.3 โหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์

ในขนาดทหาระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อระบบจำหน่ายมีจำนวนที่มากขึ้น จนกระทั่งมีสัดส่วนการผลิตต่อกำลังการผลิตจากการไฟฟ้าที่มากอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งหากขาดกำลังการผลิตจากระบบผลิตไฟฟ้าประเภทนี้ไป จะทำให้ระบบโครงข่ายไฟฟ้าโดยรวมได้รับผลกระทบ ดังนั้นนอกจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตกำลังไฟฟ้าจ่ายเข้าสู่ระบบเพียงอย่างเดียว ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องช่วยสนับสนุนระบบโครงข่ายไฟฟ้าในกรณีที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าเกิดเหตุการณ์ที่คุณภาพไฟฟ้าของระบบอยู่ในระดับที่ไม่เหมาะสม [มาตรฐานเยอรมัน] ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมุ่งเน้นพิจารณาโหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่มีโหมดที่ใช้ในการสนับสนุนระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ ซึ่งโหมดต่างๆ ที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอแบ่งได้เป็น 5 ส่วน คือ (1) โหมดกำลังไฟฟ้าจริง (2) โหมดกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (3) โหมดการทำงานในเวลากลางคืน (4) โหมดการข้ามผ่านความผิดปกติ (5) โหมดการตรวจจัดการแยกตัวอิสระ [53-57, 59] โดยทั้ง 5 ส่วน มีโหมดการทำงานย่อยที่อินเวอร์เตอร์สามารถเลือกทำงานได้ ซึ่งโหมดการทำงานต่างๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.3.1 โหมดกำลังไฟฟ้าจริง

อินเวอร์เตอร์สามารถเลือกโหมดการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงที่ออกจากอินเวอร์เตอร์เข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงออกเป็น 2 โหมด คือ โหมดกำลังไฟฟ้าสูงสุดและโหมดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) โหมดจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power point mode: MPP)

ในขณะที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอยู่ในสภาวะปกติ ผู้ผลิตที่มีอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะต้องการให้อินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดที่ควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าสูงสุด เพื่อให้ผู้ผลิตได้รับผลประโยชน์ที่สูงที่สุด อินเวอร์เตอร์จะเลือกคู่อันดับของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าซึ่งจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าที่จุดสูงสุดได้ดังแสดงในภาพที่ 4.7 โดยมีสมการในการคำนวณระดับแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดดังสมการที่ (4.17) และ (4.18) [59]

$$V_{mpp} = V_{oc} - I_{mpp} R_s + n_s V_t U \quad (4.17)$$

$$\text{โดยที่ } U = \ln \left\{ \frac{I_{sc} - I_{mpp} (R_s + R_{sh}) - V_{mpp}}{I_{sc} (R_s + R_{sh}) - V_{oc}} \right\}$$

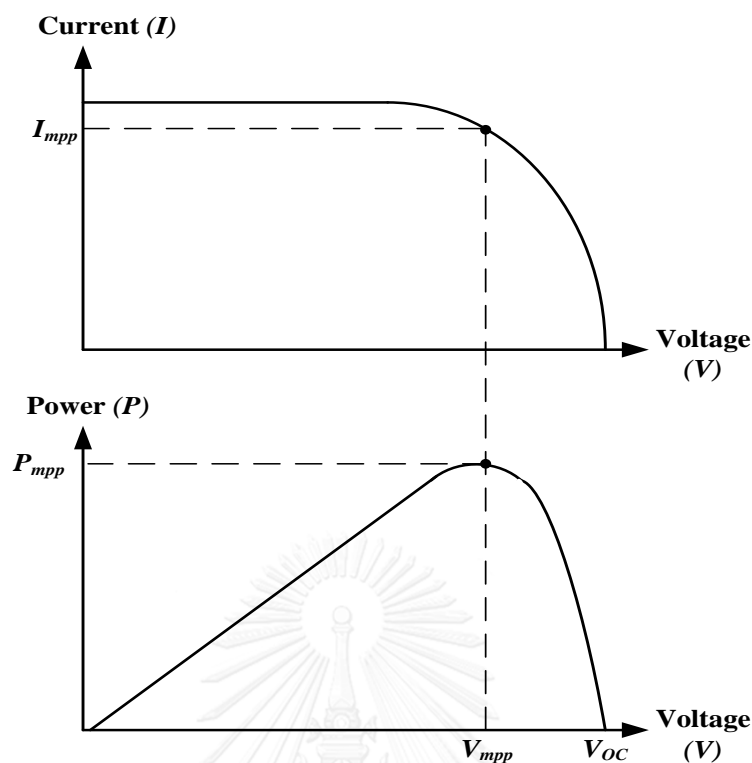
$$I_{mpp} = \frac{(V_{mpp} Q / n_s V_t R_{sh}) + (V_{mpp} / R_{sh})}{1 + (Q R_s / n_s V_t R_{sh}) + (R_s / R_{sh})} \quad (4.18)$$

$$\text{โดยที่ } Q = (I_{sc} (R_s + R_{sh}) - V_{oc}) \exp \left\{ \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s - V_{oc}}{n_s V_t} \right\}$$

โดยที่

I_{mpp}	คือ กระแสไฟฟ้าที่ออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (A)
V_{mpp}	คือ แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V)
V_{OC}	คือ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ (V)
I_{sc}	คือ กระแสลัดวงจร ณ สภาพแวดล้อมขณะนั้น (A)
V_t	คือ ขีดความต่างศักย์เริ่มเปลี่ยน (Threshold voltage) (V) หรือค่าของแรงดันไฟฟ้าจุดเปลี่ยนของไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์ (V)
R_{sh}	คือ ความต้านทานที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อแบบขนานของเซลล์แสงอาทิตย์ (Ω)
R_s	คือ ความต้านทานที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อแบบอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ (Ω)
n_s	คือ จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมกันเป็นโมดูล

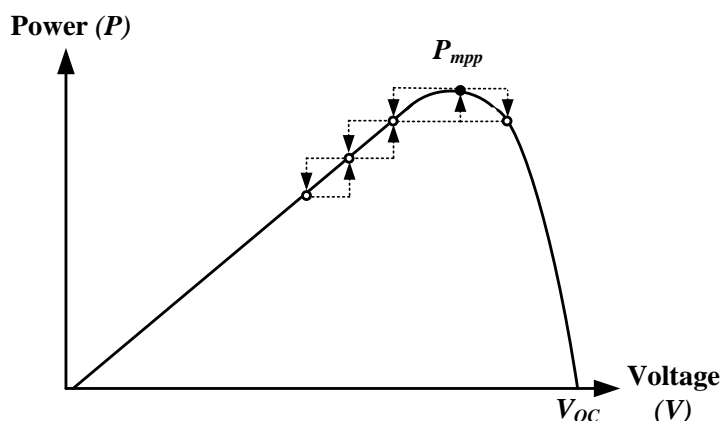
วิธีการหาจุดทำงานสูงสุดของอินเวอร์เตอร์ในปัจจุบันมีหลายรูปแบบ เช่น Perturb and observe (P&O) เป็นวิธีที่ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าไปเรื่อยๆ เพื่อให้ได้จุดที่ได้กำลังไฟฟ้ามากกว่า Constant voltage and current เป็นวิธีที่ทำได้โดยการตั้งค่าแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนต่อแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรหรือกระแสไฟฟาลัดวงจร และ Incremental conductance เป็นวิธีที่ใช้อนุพันธ์เพื่อหาจุดทำงานสูงสุด เป็นต้น



ภาพที่ 4.7 จุดทำงานสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

วิธีรบกวนและสังเกต (Perturb and Observe: P&O) วิธีรบกวนและสังเกตนั้นเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากข้อดีของวิธีนี้คือกระบวนการทำงานสามารถเข้าใจได้ง่ายและนำไปใช้งานได้ไม่ยาก หลักการพื้นฐานของวิธีรบกวนและสังเกต คือ เริ่มจากจุดทำงานเริ่มต้นของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ยังไม่ใช่จุดทำงานสูงสุด แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกรบกวนโดยการเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยหากกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหลังจากการรบกวนก็หมายความว่า จุดทำงานนั้นกำลังเข้าใกล้จุดทำงานสูงสุดมากขึ้น และการรบกวนครั้งต่อไปจะทำในทิศทางเดิมกลับครั้งก่อนหน้า แต่หากกำลังไฟฟ้ามีค่าลดลงก็หมายความว่า จุดทำงานนั้นกำลังออกห่างจากจุดทำงานสูงสุด การรบกวนครั้งต่อไปจึงจะต้องมีทิศทางที่กลับกันกับครั้งก่อนหน้า เพื่อให้จุดทำงานเข้าใกล้จุดทำงานสูงสุดมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.8

อย่างไรก็ตาม วิธีรบกวนและสังเกตมีข้อเสีย ได้แก่ วิธีการรบกวนและสังเกตจะไม่สามารถหาจุดทำงานสูงสุดได้เมื่อ P-V curve มีส่วนโค้งที่ลดลง เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าน้อยมากเมื่อถูกรบกวนแล้ว นอกจากนี้วิธีการนี้จะไม่สามารถหาจุดกำลังสูงสุดจริงๆ ได้ และจะมีการรบกวนในทิศทางกลับไปกลับมารอบจุดกำลังสูงสุดแทน และอีกข้อเสีย คือ การหาจุดทำงานสูงสุดอาจเกิดการผิดพลาดได้ในกรณีที่ระดับความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 4.8 การหาจุดทำงานสูงสุดโดยวิธี P&O

2) โหมดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง (Real power limitation mode)

ในกรณีที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอยู่ในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าหรือความถี่ไฟฟ้าเกิน การทำงานในโหมดจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของอินเวอร์เตอร์อาจทำให้แรงดันไฟฟ้าหรือความถี่ไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่อยู่ในสถานะผิดปกติมีขนาดแรงดันไฟฟ้าหรือความถี่ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้นได้ ดังนั้นอินเวอร์เตอร์จึงจำเป็นต้องถูกลดกำลังการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงลง โหมดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริงเป็นโหมดที่ใช้จำกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง เพื่อเป็นการช่วยลดระดับแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้าลง ซึ่งการทำงานในลักษณะนี้จะเป็นการช่วยสนับสนุนการทำงานของระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ [59]

4.2.3.2 โหมดกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Reactive power control mode)

การรับหรือจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์มีหลากหลายลักษณะขึ้นอยู่กับการปรับตั้งค่าของอินเวอร์เตอร์ [53-57, 59] โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สรุปโหมดการรับหรือจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟได้เป็น 5 ลักษณะ ดังนี้

- 1) ปรับการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟตามค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า การปรับในลักษณะนี้เป็นการตั้งค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าไว้ที่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง และอินเวอร์เตอร์จะปรับการจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟตามเพื่อให้ได้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่กำหนดไว้
- 2) ปรับการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟเพื่อให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าคงที่ การปรับในลักษณะนี้เป็นการตั้งค่าแรงดันไฟฟ้า และอินเวอร์เตอร์จะปรับการจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟตามเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าขาออกจากอินเวอร์เตอร์ได้ค่าตามที่กำหนดไว้

- 3) ปรับการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเป็นร้อยละของกำลังไฟฟ้าจริง การปรับในลักษณะนี้จะทำให้กำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้ในขณะนั้น
- 4) ปรับการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟโดยตรง การปรับในลักษณะนี้จะสามารถกำหนดการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเป็นค่าที่ต้องการได้โดยตรง ไม่จำเป็นต้องกำหนดให้การจ่ายหรือรับขึ้นอยู่กับค่าอื่น
- 5) ปรับการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟตามค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป การปรับในลักษณะนี้จะกำหนดให้อินเวอร์เตอร์ปรับการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไป

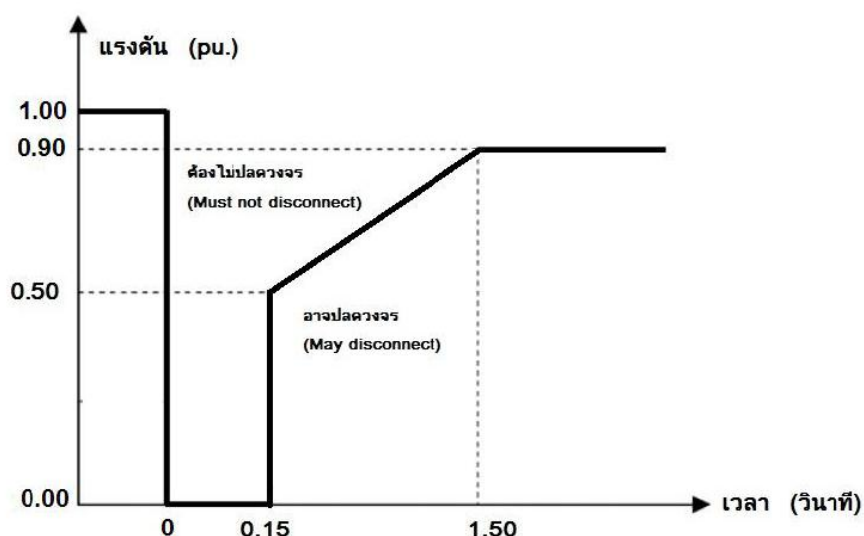
ทั้งนี้ความสามารถในการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับความสามารถของอินเวอร์เตอร์แต่ละรุ่น ซึ่งในบางรุ่น เช่น LEONICS APOLLO GTP-512 เป็นต้น สามารถปรับตั้งค่าให้มีการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเพียงอย่างเดียวหนึ่งเท่านั้น ส่วนในบางรุ่น เช่น SMA SUNNY CENTRAL 630 CP-US เป็นต้น สามารถปรับตั้งค่าได้ทั้งการจ่ายและรับกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ

4.2.3.3 โหมดการทำงานในเวลากลางคืน (Night mode)

ในช่วงกลางคืนหรือช่วงที่ความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์ไม่เพียงพอต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ อินเวอร์เตอร์สามารถเปลี่ยนมาทำงานในโหมดกลางคืนได้ ซึ่งในโหมดการทำงานนี้ อินเวอร์เตอร์จะสามารถผลิตได้เฉพาะกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเท่านั้น ซึ่งการจ่ายในโหมดการทำงานในเวลากลางคืนนี้ สามารถปรับตั้งได้เช่นเดียวกับโหมดกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ แต่การปรับจะสามารถทำได้เพียง 3 ลักษณะการทำงานคือ ปรับการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟเพื่อให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าคงที่ ปรับการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟโดยตรง และปรับการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟตามค่าแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป

4.2.3.4 โหมดการข้ามผ่านความผิดปกติ (Fault ride through: FRT)

เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นในวงจรอื่น ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องไม่ปลดตัวเองออกจากระบบในระยะเวลาหนึ่งหรือที่เรียกว่า การข้ามผ่านความผิดปกติ ทั้งนี้การทำงานของอินเวอร์เตอร์ในลักษณะนี้มีจุดประสงค์เพื่อลดปัญหาไฟดับเป็นบริเวณกว้างเนื่องจากการปลดตัวออกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวในระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวเชื่อมต่ออยู่เป็นจำนวนมาก ข้อกำหนดการเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้กำหนดให้ระบบผลิตไฟฟ้าที่เชื่อมต่อที่ระดับแรงดันไฟฟ้าปานกลางหรือระดับสูงคงการเชื่อมต่อไว้ช่วงเวลาหนึ่ง ดังภาพที่ 4.11 [7]



ภาพที่ 4.11 การข้ามผ่านความผิดพลาด

4.2.3.5 โหมดการตรวจจับการแยกตัวอิสระ (Anti-islanding detection mode)

เมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นในระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่ออยู่ ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องปลดตัวเองออกเพื่อความปลอดภัย และป้องกันความเสียหาย โดยการป้องกันการแยกตัวอิสระในอินเวอร์เตอร์ มี 2 แบบ คือ การตรวจจับแบบพาสซีฟ (Passive anti-islanding detection) และการตรวจจับแบบแอคทีฟ (Active anti-islanding detection) [53-57]

การตรวจจับแบบพาสซีฟเป็นการตรวจจับการเกิดการแยกตัวอิสระโดยอาศัยอุปกรณ์ป้องกันพื้นฐานคือ รีเลย์แรงดันไฟฟ้าและรีเลย์ความถี่ไฟฟ้า ซึ่งเมื่อเกิดการแยกตัวอิสระขึ้น อาจจะทำให้แรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้ามีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าปกติ ดังนั้นรีเลย์จะสามารถตรวจจับความผิดปกตินี้ได้ แต่ในบางกรณีเช่น กำลังไฟฟ้าที่จ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวมีขนาดเล็กเคียงกับโหลด การแยกตัวอิสระในลักษณะนี้อาจจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ทำให้รีเลย์ไม่สามารถตรวจจับการแยกตัวอิสระนี้ได้หรือที่เรียกว่าบริเวณที่ไม่สามารถตรวจจับการแยกตัวอิสระได้ (Non-detection zone)

การตรวจจับแบบแอคทีฟเป็นการตรวจจับการแยกตัวอิสระโดยใช้อุปกรณ์เพื่อการตรวจการแยกตัวอิสระโดยเฉพาะ ซึ่งการทำงานของอุปกรณ์นี้จะใช้การป้อนสัญญาณเข้าไปในระบบโครงข่ายไฟฟ้าเพื่อตรวจหาการแยกตัวอิสระซึ่งการตรวจจับแบบแอคทีฟนี้จะไม่มีปัญหาเรื่องบริเวณที่ไม่สามารถตรวจจับการแยกตัวอิสระได้ แต่จะมีปัญหาเนื่องจากสัญญาณที่ป้อนเข้าไปอาจจะรบกวนระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ ซึ่งข้อดีและข้อเสียของการตรวจจับทั้งสองแบบสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ข้อดีและข้อเสียของการตรวจจับการแยกตัวอิสระ

คุณลักษณะ	การตรวจจับแบบพาสซีฟ	การตรวจจับแบบแอคทีฟ
ความเร็วในการตรวจจับ	ดี	ดีมาก
บริเวณที่ตรวจจับไม่ได้	ดีมาก	แย่มาก
คุณภาพไฟฟ้า	แย่มาก	ดีมาก
ความแม่นยำในการตรวจจับ	ดีมาก	ดี



บทที่ 5

ข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน

เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนที่สะอาดและใช้ได้ไม่มีวันหมดจึงทำให้ในปัจจุบันทั่วโลกได้ให้ความสนใจในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มากขึ้น ซึ่งประเทศไทยก็ได้ให้ความสนใจและให้การสนับสนุนระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เช่นกัน ประเทศไทยมีความเหมาะสมของที่ตั้งซึ่งอยู่ในเขตศูนย์สูตร ทำให้หลายพื้นที่ในประเทศไทยได้รับความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์ในปริมาณที่สูงซึ่งประกอบกับการส่งเสริมจากนโยบายของภาครัฐและการลดลงอย่างต่อเนื่องของต้นทุนการผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของการลงทุนในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์อย่างต่อเนื่อง ซึ่งข้อมูลต่างๆ ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับจากการสำรวจข้อมูลจากหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีรายละเอียดการสำรวจข้อมูลดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การสำรวจข้อมูลจากหน่วยงานต่างๆ

ครั้งที่	หน่วยงาน	วันที่	รายละเอียด
1	บริษัท บางจาก โซลาร์เอ็นเนอร์ยี จำกัด	11 พ.ย. 2556	<ul style="list-style-type: none"> - รับข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท บางจาก โซลาร์เอ็นเนอร์ยี จำกัด - สอบถามการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท บางจาก โซลาร์เอ็นเนอร์ยี จำกัด
2	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	5 ก.พ. 2557	<ul style="list-style-type: none"> - สอบถามปัญหาทั่วไปที่เกิดกับระบบโครงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ - สอบถามการตรวจวัดข้อมูลต่างๆ ในระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
3	บริษัท ชันเอดิสัน โอเพอร์เรชั่นส์ แอนด์ เมนเทนแนนซ์ จำกัด	26 ก.พ. 2557	<ul style="list-style-type: none"> - รับข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท ชันเอดิสัน โอเพอร์เรชั่นส์ แอนด์ เมนเทนแนนซ์ จำกัด - สอบถามปัญหาทั่วไปที่เกิดขึ้นกับระบบ

ครั้งที่	หน่วยงาน	วันที่	รายละเอียด
			ผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท ชันเอดิสัน โอเพอร์เรชั่นส์ แอนด์ เมนเทนแนนซ์ จำกัด
4	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	16 พ.ค. 2557	- นำเสนอวิจัยและรับทราบข้อเสนอแนะ
5	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	4 ก.ค. 2557	- รับข้อมูลระบบโครงข่ายไฟฟ้า อ.แม่สะเรียง จ.แม่ฮ่องสอน - สอบถามการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบโครงข่ายไฟฟ้า อ.แม่สะเรียง จ.แม่ฮ่องสอน
6	บริษัท ชันเอดิสัน โอเพอร์เรชั่นส์ แอนด์ เมนเทนแนนซ์ จำกัด	12 ก.ย. 2557	- สอบถามการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ก่อนการขายไฟฟ้า - สอบถามการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ - สอบถามปัญหาแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และวิธีการแก้ไข - นำเสนอวิจัยและรับทราบข้อเสนอแนะ
7	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	15 ก.ย. 2557	- สอบถามปัญหาแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และวิธีแก้ไข - นำเสนอวิจัยและรับทราบข้อเสนอแนะ
8	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	30 ก.ย. 2557	- สอบถามการทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ก่อนการขายไฟฟ้า
9	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย	13 ต.ค. 2557	- สอบถามการติดต่อสื่อสารระหว่างโรงไฟฟ้าที่เป็นผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระกับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย - สอบถามการควบคุมการทำงานของโรงไฟฟ้าที่เป็นผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ

ครั้งที่	หน่วยงาน	วันที่	รายละเอียด
			- สอบถามอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย - นำเสนอวิจัยและรับทราบข้อเสนอแนะ
10	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	21 ต.ค. 2557	- รับข้อมูลระบบโครงข่ายไฟฟ้า อ.แม่สะเรียง จ.แม่ฮ่องสอน (เพิ่มเติม) - สอบถามการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบโครงข่ายไฟฟ้า อ.แม่สะเรียง จ.แม่ฮ่องสอน - นำเสนอวิจัยและรับทราบข้อเสนอแนะ
11	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	22 ต.ค. 2557	- สอบถามการติดต่อสื่อสารระหว่างระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

จากข้อมูลต่างๆ ที่ได้รับจากการสำรวจและการค้นหาข้อมูล ทำให้สามารถแบ่งการนำเสนอในบทข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันได้ 4 หัวข้อ ได้แก่

- 5.1 สถานะระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย
- 5.2 การทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย
- 5.3 ตัวอย่างระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย
- 5.4 การบริการเสริมความมั่นคงระบบโครงข่ายไฟฟ้าในต่างประเทศ

5.1 สถานะระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นจากการสนับสนุนเชิงนโยบายของรัฐบาล โดยแผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2553-2573 ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 3 (Power Development Plan: PDP 2010 ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 3) [1] และแผนการพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2555-2564 (Alternative Energy Development Plan: AEDP 2012-2021) [2] ที่กำหนดเป้าหมายในการใช้พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกเพื่อลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลลงอย่างน้อยร้อยละ 25 ภายใน 10 ปี ทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความสนใจจากนักลงทุนมากขึ้น และจากการศึกษาข้อมูลของสำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.) ทำให้ทราบว่ามีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งขนาดเล็กและใหญ่เพื่อขายพลังงานไฟฟ้าให้การไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง โดยในเดือน

มิถุนายน พ.ศ. 2557 มีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และการไฟฟ้านครหลวงที่ได้จ่ายไฟฟ้าเข้าระบบเชิงพาณิชย์แล้ว (Commercial Operation Date: COD) จำนวน 262 โรง คิดเป็นกำลังการผลิตรวม 993.56 เมกะวัตต์ และมีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้า (Power purchase agreement: PPA) เรียบร้อยแล้วแต่ยังไม่ได้จ่ายไฟฟ้าเข้าระบบเชิงพาณิชย์ จำนวน 38 โรง คิดเป็นกำลังการผลิตรวม 320.23 เมกะวัตต์ นอกจากนี้ยังมีโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ยื่นคำขอแล้วแต่ยังไม่ได้รับการตอบรับซื้ออีกทั้งสิ้นจำนวน 168 โรง คิดเป็นกำลังการผลิตจำนวนรวม 927.38 เมกะวัตต์ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 5.2 [4]

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลสถานะของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยในปัจจุบัน

สถานะของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	จำนวนโรงไฟฟ้า	กำลังการผลิตติดตั้ง (MW)	ปริมาณการขายไฟฟ้าตามสัญญา (MW)
จ่ายไฟฟ้าเข้าระบบเชิงพาณิชย์แล้ว (Commercial Operation Date: COD)	262	1,053.64	993.56
ได้ทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้า (Power purchase agreement: PPA) เรียบร้อยแล้วแต่ยังไม่ได้จ่ายไฟฟ้าเข้าระบบเชิงพาณิชย์	38	331.48	320.23
ได้รับการตอบรับแล้วแต่ยังไม่ได้ทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้า (Power purchase agreement: PPA)	2	4.40	4.25
ยื่นคำขอแล้วแต่ยังไม่ได้รับการตอบรับซื้อไฟฟ้า	168	951.61	927.38

5.2 การทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย

ในการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้านอกจากต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคหรือการไฟฟ้านครหลวงแล้ว การทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันยังมีประเด็นอื่นที่ต้องคำนึงถึง เช่น การออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ การทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ก่อนขายไฟฟ้าตามข้อกำหนดการปฏิบัติการระบบโครงข่ายไฟฟ้า

ปัญหาแรงดันไฟฟ้าขณะเชื่อมต่อบรรบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์กับระบบโครงข่ายไฟฟ้าซึ่งส่งผลถึงการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟของอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ การติดต่อสื่อสารระหว่างระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับสถานีไฟฟ้า และปัญหาอื่นที่เกิดขึ้นเมื่อมีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า

5.2.1 การออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ในการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ตัวแปรหลายอย่างที่ต้องคำนึงถึงและหนึ่งในตัวแปรนั้นคือ ค่าอัตราส่วนของเซลล์แสงอาทิตย์ต่ออินเวอร์เตอร์ (PV-to-Inverter ratio) ซึ่งเป็นค่าขนาดกำลังการผลิตสูงสุด (P_{mpp}) ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะมาตรฐาน (Standard Test Condition: STC) ต่อขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้น (S_{max}) ดังสมการที่ (5.1) [60]

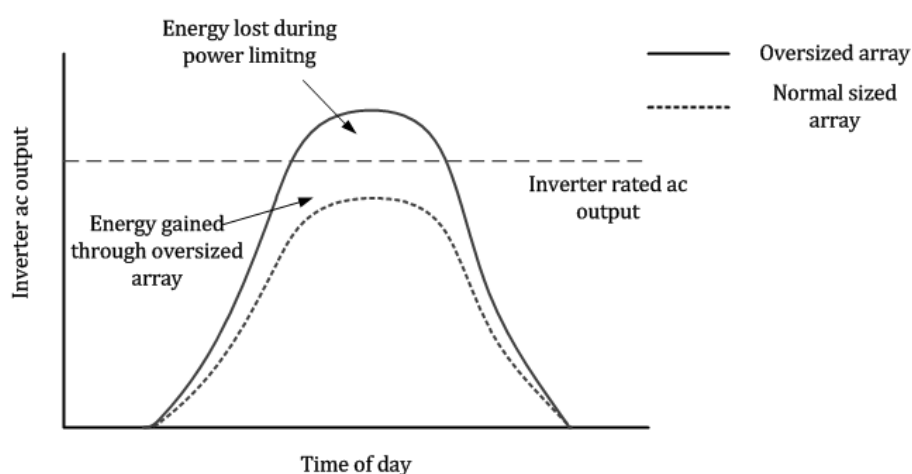
$$PV\text{-to-Inverter ratio} = P_{mpp} (STC) / S_{max} \quad (5.1)$$

จากสมการที่ (5.1) จะทราบว่าหากขนาดของกำลังการผลิตสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากกว่าขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ อัตราส่วนของเซลล์แสงอาทิตย์ต่ออินเวอร์เตอร์จะมีค่ามากกว่า 1 และในทางตรงข้ามหากขนาดของกำลังการผลิตสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อยกว่าขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ อัตราส่วนของเซลล์แสงอาทิตย์ต่ออินเวอร์เตอร์จะมีค่าน้อยกว่า 1 อัตราส่วนของเซลล์แสงอาทิตย์ต่ออินเวอร์เตอร์นี้มีความสำคัญในเรื่องต้นทุนและพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ซึ่งเกี่ยวข้องกับรายได้ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่จะมีการออกแบบให้ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์และขนาดกำลังการผลิตสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าที่ไม่เท่ากัน โดยที่ขนาดกำลังการผลิตสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าที่มากกว่า โดยมีสาเหตุสำคัญ 3 สาเหตุ ได้แก่ [60]

- 1) พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่ามากกว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดของอินเวอร์เตอร์เท่ากับหรือมากกว่าขนาดของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 5.1
- 2) ต้นทุนค่าอินเวอร์เตอร์ที่ลดลง เนื่องจากขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าขาออกที่น้อยลงของอินเวอร์เตอร์ที่เลือกใช้ ทำให้ต้นทุนในการจัดซื้ออินเวอร์เตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง
- 3) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ระบุไว้ โดยปัจจัยที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ไม่เท่ากับค่าที่ระบุไว้ คือ
 - ค่าที่ระบุไว้ของเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นค่าจากการทดสอบในสภาวะ STC ซึ่งค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิในการทำงานมักมีค่าไม่เท่ากับค่าในสภาวะ STC

- คราบและฝุ่นที่เกาะอยู่บนผิวของเซลล์แสงอาทิตย์
- การเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีส่วนประกอบหลักเป็นซิลิคอนจะมีค่ากำลังการผลิตที่ลดลงประมาณร้อยละ 0.5 ถึง 1 ต่อปี
- กำลังไฟฟ้าสูญเสียในสาย

ทั้งนี้วิศวกรผู้ออกแบบอาจออกแบบให้อัตราส่วนของเซลล์แสงอาทิตย์ต่ออินเวอร์เตอร์มีค่าน้อยกว่า 1 ได้ ในกรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีแผนที่จะติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นอีกในอนาคต อัตราส่วนของเซลล์แสงอาทิตย์ต่ออินเวอร์เตอร์สามารถมีค่าได้ตั้งแต่ 0.75 ถึง 1.25 ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น



ภาพที่ 5.1 การเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าระหว่างระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จากการเลือกใช้อัตราส่วนของเซลล์แสงอาทิตย์ต่ออินเวอร์เตอร์ที่ต่างกัน

5.2.2 การทดสอบการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าและการปรับตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ในการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าครั้งแรกจะต้องมีการทำทดสอบระบบตามข้อกำหนดการปฏิบัติการระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวง [6, 10] ซึ่งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1 ที่ร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 ของปริมาณกำลังการผลิตสูงสุดที่จะขายตามสัญญาขายไฟฟ้าตามลำดับ เพื่อทดสอบว่ามีปัญหาในการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ระดับต่างๆ หรือไม่ โดยในบางระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าที่ร้อยละ 75 และ 100 แรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่ออาจมีค่าเกินร้อยละ 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติและเกิดการปลดตัวของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ต้องปรับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเป็นแบบตามหลังและเชื่อมต่อกลับเข้า

ไปในระบบโครงข่ายไฟฟ้าเพื่อทำการทดสอบอีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ จะรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อให้แรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อมีค่าลดลง

หลังจากการทดสอบการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าครั้งแรกผ่านแล้ว ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ต้องทำการทดสอบคุณภาพไฟฟ้า (Power quality test) ซึ่งจะเป็นการเชื่อมต่อบนระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าและทำการทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นเวลา 7 วัน ซึ่งภายในระยะเวลาที่ทำการทดสอบนี้ ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์อาจต้องมีการปรับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อ และเมื่อผ่านการทดสอบคุณภาพไฟฟ้า 7 วันแล้ว ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ มักจะใช้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้านี้ในการทำงานต่อไป

เมื่อผ่านการทดสอบการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าข้างต้นแล้ว ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ การปรับตั้งค่าอินเวอร์เตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมี 2 โหมดการทำงาน คือ (1) โหมดการควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ซึ่งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ปรับตั้งโหมดการทำงานในลักษณะนี้มักเลือกใช้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบคุณภาพไฟฟ้า และจะคงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้านั้นไว้ตลอดการทำงาน (2) โหมดการควบคุมแรงดันไฟฟ้า ทั้งนี้ค่าที่ใช้ในการปรับตั้งการทำงานทั้ง 2 โหมด จะใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trail & Error method) ประกอบกับการดูสถิติย้อนหลัง ซึ่งจะเป็นการปรับตั้งเพื่อการทำงานทั่วไปและไม่มีการปรับการทำงานเพื่อเหตุการณ์ฉุกเฉินบางกรณี

5.2.3 การติดต่อสื่อสารระหว่างระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับสถานีไฟฟ้า

สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดกำลังการผลิตสูงสุดมากกว่า 1 เมกะวัตต์ในปัจจุบัน ระบบการติดต่อสื่อสารที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ต้องติดตั้งเพื่อใช้ติดต่อประสานงานกับสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ช่องทาง คือ (1) วิทยุสื่อสาร (2) โทรศัพท์ นอกจากนี้การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทุกรายที่มีขนาดกำลังการผลิตตั้งแต่ 8 เมกะวัตต์ขึ้นไปและระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บางรายที่มีขนาดกำลังการผลิตตั้งแต่ 1 เมกะวัตต์ขึ้นไปมีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมระยะไกล (Remote Terminal Unit: RTU) และระบบควบคุมระยะไกล (Supervisory Control and Data Acquisition: SCADA) ของสถานีไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคทำให้การไฟฟ้าสามารถตรวจสอบการทำงานและสั่งการระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ตลอดเวลา แต่ในปัจจุบันการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีการใช้งานอุปกรณ์ควบคุมระยะไกลและระบบควบคุมระยะไกลเพียงเพื่อตรวจสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และปลดระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ออกในกรณีที่ต้องมีการซ่อมบำรุงสายส่งเท่านั้น ซึ่งต่างกับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมระยะไกลและระบบ

ควบคุมระบบไกลในผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ (Independent Power Producer: IPP) ทุกรายเช่นกัน แต่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้มีการสั่งการและควบคุมผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระผ่านอุปกรณ์ควบคุมระยะไกลและระบบควบคุมระยะไกล ทำให้สามารถควบคุมการทำงานของผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ระบบติดต่อสื่อสารที่มีการเชื่อมต่อการไฟฟ้า ผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนบางรายได้มีการเชื่อมต่อข้อมูลการผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบออนไลน์เพื่อใช้ในการเฝ้าสังเกตและควบคุมผ่านระบบอินเทอร์เน็ต โดยที่การไฟฟ้าก็สามารถดูข้อมูลเหล่านี้เพื่อตรวจสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้เช่นกัน

5.2.4 ปัญหาด้านแรงดันไฟฟ้าและการปลดตัวของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ระดับแรงดันไฟฟ้าตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวง คือ ร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ ซึ่งทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีหน้าที่ต้องรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อในอยู่ในช่วงที่กำหนดจึงจะสามารถเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ โดยปัญหาที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าส่วนใหญ่มักเป็นเรื่องแรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อมีค่าเกินกว่าร้อยละ 105 ทำให้เกิดการปลดตัวของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้น โดยสาเหตุของปัญหาแรงดันไฟฟ้ามี่ดังนี้

- 1) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาดใหญ่และตั้งอยู่ในพื้นที่ที่มีโหลดน้อย ทำให้ในช่วงเที่ยงซึ่งเป็นเวลาที่มีความเข้มแสงสูง ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ในปริมาณมาก ซึ่งการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าที่สูงขึ้น
- 2) ระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าก่อนการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าที่สูง เช่น ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 22 กิโลโวลท์ ซึ่งตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าได้ตั้งแต่ 20.9 ถึง 23.1 กิโลโวลท์แรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่ออาจมีค่าสูงถึง 22.8 กิโลโวลท์ เมื่อมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จึงทำให้แรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อมีค่าเกินกว่า 23.1 กิโลโวลท์ ทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จึงจำเป็นต้องรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมิเช่นนั้นจะถูกปลดออกจากระบบโครงข่ายไฟฟ้า
- 3) บางเหตุการณ์ที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น การเพิ่มขึ้นของโหลดขนาดใหญ่ การซ่อมบำรุงของระบบโครงข่ายไฟฟ้า เป็นต้น อาจทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีเปลี่ยนแปลงอย่างมาก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้านี้จะ

ส่งผลต่อการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และอาจทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ปลดตัวออกจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้

จากสาเหตุในข้อ 1) และ 2) การปลดตัวออกจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยเฉลี่ยเกิดขึ้น 3 ถึง 8 ครั้งต่อเดือนซึ่งสาเหตุส่วนใหญ่จะเกิดจากแรงดันไฟฟ้าเกิน แต่ในกรณีข้อ 3) จากการสำรวจข้อมูลจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์การปลดตัวของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์อาจเกิดจากทั้งแรงดันไฟฟ้าตกและเกินซึ่งความถี่ของการปลดตัวอาจมากถึง 20 ถึง 60 ครั้งต่อเดือน

เมื่อมีการปลดตัวของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้น ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องติดต่อประสานงานกับสถานีไฟฟ้าผ่านช่องทางการสื่อสาร คือ โทรศัพท์หรือวิทยุเพื่อสอบถามถึงสาเหตุของการปลดตัวของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และขออนุญาตเชื่อมต่อกลับเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าเมื่อระบบโครงข่ายไฟฟ้ากลับเข้าสู่สภาวะปกติ

5.2.5 การจ่ายหรือรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟและค่าปรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นทั้งผู้ขายไฟฟ้าและผู้ซื้อไฟฟ้าในเวลาเดียวกัน เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการใช้ไฟฟ้าภายในเพื่อการทำงานต่างๆ ของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไฟฟ้ารวมทั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในสำนักงาน โดยระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มักเป็นผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 3 กิจกรรมขนาดเล็ก และประเภทที่ 4 กิจกรรมขนาดกลาง ซึ่งจำเป็นต้องเสียค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเช่นเดียวกับผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 3 และ 4 รายอื่น แต่ในปัจจุบันการคิดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีการคิดรวมการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟในส่วนของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับโหลดภายในซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ซึ่งการไฟฟ้าจะนำค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟนี้มาคิดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า โดยจะเปรียบเทียบกับความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของโหลดในโรงไฟฟ้าซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกำลังการผลิตไฟฟ้าสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขนาดมากกว่า 1 เมกะวัตต์ขึ้นไป ทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นต้องรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อต้องเสียค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่สูงมากกว่าผู้ใช้ไฟฟ้าทั่วไป

5.2.6 ปัญหาอื่นๆ ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ในการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นอกจากปัญหาด้านแรงดันไฟฟ้าและการคิดค่ารักษาแรงดันไฟฟ้าแล้ว ยังมีปัญหาอื่นที่เกิดขึ้นกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้แก่

- 1) ความไม่แน่นอนของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นจากความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและยากที่จะคาดเดาล่วงหน้า ทำให้ในบางครั้งหากมีเหตุการณ์ที่ความเข้มแสงลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว เช่น ฝนตก จะทำให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มีแนวโน้มที่จะลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน ซึ่งอาจทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันได้
- 2) ช่วงเวลาที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงที่สุดจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาเที่ยง ซึ่งเป็นช่วงที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีความต้องการพลังงานไฟฟ้าน้อย (Off peak) ทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าเพิ่มสูง และอาจเกิดการไหลย้อนของกำลังไฟฟ้ากลับเข้าสู่สถานีไฟฟ้าได้ ซึ่งปัจจุบันได้มีแนวคิดจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บางรายที่จะแก้ปัญหานี้ด้วยการติดตั้งแบตเตอรี่เพื่อเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าในช่วงเที่ยงที่มีกำลังการผลิตที่สูง และจ่ายพลังงานไฟฟ้ากลับสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าในเวลาอื่นที่มีความเข้มแสงที่ต่ำลงหรือความต้องการพลังงานไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น
- 3) มิเตอร์ที่ใช้วัดกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในบางแห่งมีความละเอียดไม่เพียงพอ ทำให้ค่าต่างๆ ที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อน

5.3 ตัวอย่างระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศไทย

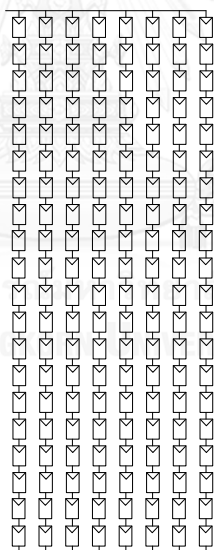
ในหัวข้อนี้มีตัวอย่างของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 3 แห่งในประเทศไทยดังต่อไปนี้

- 1) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แห่งที่ 1

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แห่งที่ 1 ตั้งอยู่ในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ซึ่งมีพื้นที่โครงการประมาณ 500 ไร่ ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แห่งนี้มีกำลังการผลิตติดตั้งรวม 44 เมกะวัตต์ และมีจำนวนโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์มากกว่า 150,000 โมดูล จากการประมาณการคาดว่าจะระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แห่งนี้จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ปีละ 70 ล้านหน่วยหรือกิโลวัตต์-ชั่วโมง

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แห่งนี้ ได้เลือกใช้โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวมซิลิคอน (Poly Crystalline Silicon Solar Cell) รุ่น STP295-24/Vd ของบริษัท ซันเทค (SUNTECH) จำกัด จากประเทศจีน เนื่องจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีอายุของการพัฒนาเทคโนโลยีมานานกว่า 30 ปี ทำให้มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าได้ยาวนานตามที่ผู้ผลิตโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์รับประกันไว้ที่ 25 ปี โดยประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะลดลงเฉลี่ยประมาณร้อยละ 0.8 ต่อปี และมีการติดตั้งอินเวอร์เตอร์จากบริษัท SMA Solar จำกัด (มหาชน) รุ่น Sunny Central 630HE ที่มีขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าขาออก 630 กิโลวัตต์ จำนวน 61 เครื่อง เพื่อใช้ในการควบคุมและแปลงพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อจ่ายเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า

รูปแบบการเชื่อมต่ออาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แห่งนี้ 1 นี้ใช้การเชื่อมต่อแบบอนุกรม-ขนาน (Series-Parallel configuration) โดยใน 1 อาร์เรย์จะมีสตริงเชื่อมต่อกันแบบขนานจำนวน 8 สตริง และใน 1 สตริงจะมีโมดูลเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมจำนวน 20 โมดูล ซึ่งแสดงการเชื่อมต่อได้ดังภาพที่ 5.2



ภาพที่ 5.2 การเชื่อมต่ออาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แห่งที่ 1

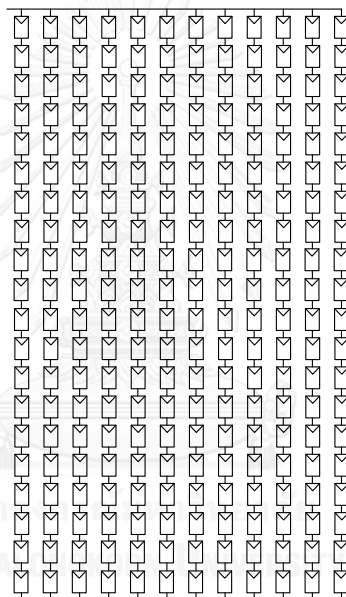
2) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แห่งที่ 2

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แห่งที่ 2 เป็นโครงการระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในเครือบริษัท เอกโค กิ๊ปป จำกัด โดยมีกำลังการผลิตติดตั้งรวม 9.6 เมกะวัตต์

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แห่งนี้ ได้เลือกใช้โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวมซิลิคอน (Poly Crystalline Silicon Solar Cell) รุ่น CHM6612P-285W ของบริษัท แอสโทรเนอร์ยี

(ASTRONERGY) จำกัด จากประเทศไต้หวัน และมีการติดตั้งอินเวอร์เตอร์จากบริษัท SMA Solar จำกัด (มหาชน) รุ่น Sunny Central 800CP-US ที่มีขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าขาออก 800 กิโลวัตต์ จำนวน 10 เครื่อง เพื่อใช้ในการควบคุมและแปลงพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อจ่ายเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งมีการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าจำนวน 5 ชุดในการเชื่อมต่อเพื่อขายพลังงานไฟฟ้าให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

รูปแบบการเชื่อมต่ออาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แห่งที่ 2 นี้ใช้การเชื่อมต่อแบบอนุกรม-ขนาน (Series-Parallel configuration) โดยใน 1 อาร์เรย์จะมีสตริงเชื่อมต่อกันแบบขนานจำนวน 12 สตริง และใน 1 สตริงจะมีโมดูลเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมจำนวน 20 โมดูล ซึ่งแสดงการเชื่อมต่อได้ดังภาพที่ 5.3



ภาพที่ 5.3 การเชื่อมต่ออาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แห่งที่ 2

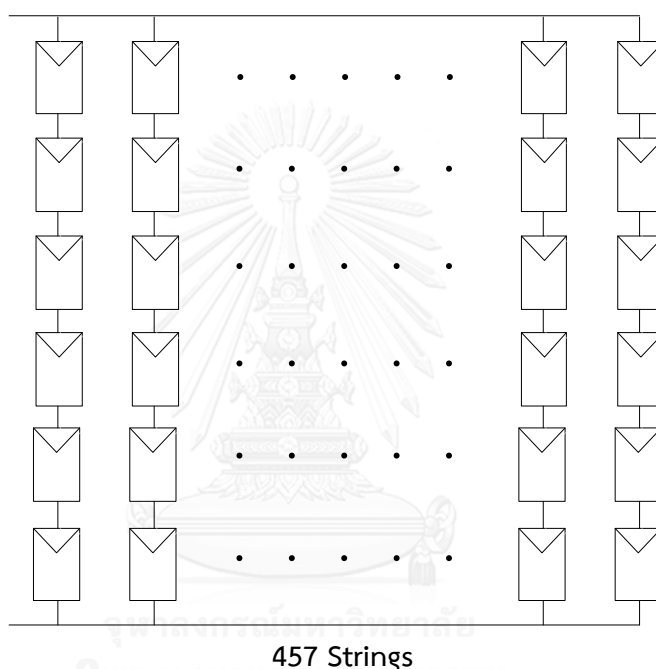
3) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แห่งที่ 3

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แห่งที่ 3 เป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ตั้งอยู่ในจังหวัดแม่ฮ่องสอน โดยระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แห่งนี้มีกำลังการผลิตติดตั้งรวม 4.112 เมกะวัตต์ และมีจำนวนโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์มากกว่า 41,120 โมดูล

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แห่งนี้ ได้เลือกใช้โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง (Thin-film Solar Cell) รุ่น GSB100S33 ของบริษัท GENERAL SOLAR POWER (Yantai) จำกัด จากประเทศจีน และมีการติดตั้งอินเวอร์เตอร์จากบริษัท LEONICS จำกัด (มหาชน) รุ่น APOLLO

GTP-512 ที่มีขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้าขาออก 250 กิโลวัตต์ จำนวน 16 เครื่อง เพื่อใช้ในการควบคุมและแปลงพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อจ่ายเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า

รูปแบบการเชื่อมต่ออาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แห่งที่ 3 นี้ใช้การเชื่อมต่อแบบอนุกรม-ขนาน (Series-Parallel configuration) โดยใน 1 อาร์เรย์จะมีสตริงเชื่อมต่อกันแบบขนานจำนวน 457 สตริง และใน 1 สตริงจะมีโมดูลเชื่อมต่อกันแบบอนุกรมจำนวน 6 โมดูล ซึ่งแสดงการเชื่อมต่อได้ดังภาพที่ 5.4



ภาพที่ 5.4 การเชื่อมต่ออาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แห่งที่ 3

5.4 การบริการเสริมความมั่นคงระบบโครงข่ายไฟฟ้าในต่างประเทศ

การบริการเสริมความมั่นคงของระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Ancillary services) คือ การบริการเพื่อช่วยเหลือและสนับสนุนการทำงานของระบบโครงข่ายไฟฟ้าให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การบริการที่สามารถรักษาสอดคล้องระหว่างกำลังการผลิตกับความต้องการของโหลด การบริการที่สามารถช่วยเรื่องการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าให้อยู่ในขีดความสามารถของระบบส่งไฟฟ้าเพื่อใช้รักษาเสถียรภาพของระบบโครงข่ายไฟฟ้า ความเชื่อถือได้ของระบบโครงข่ายไฟฟ้า และการบริการที่ช่วยยกระดับคุณภาพไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า เป็นต้น

5.4.1 ประเภทของการบริการเสริมความมั่นคงของระบบโครงข่ายไฟฟ้า

ประเภทของการบริการเสริมความมั่นคงของระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่แบ่งตามเงื่อนไขการทำงานในระบบโครงข่ายไฟฟ้า สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ (1) เงื่อนไขการทำงาน ณ สภาวะปกติ (2) เงื่อนไขการทำงานกรณีฉุกเฉิน (3) เงื่อนไขกรณีอื่นๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ [61-64]

1) เงื่อนไขการทำงาน ณ สภาวะปกติ (Normal conditions)

1.1) การควบคุมอย่างต่อเนื่อง (Continuous regulation)

การควบคุมกำลังการผลิตและความต้องการโหลดในระบบโครงข่ายไฟฟ้าให้มีความสมดุลอย่างต่อเนื่อง

1.2) การจัดการความไม่สมดุลของพลังงาน (Energy imbalance management)

การรักษาความสมดุลระหว่างกำลังการผลิตและความต้องการโหลด แต่การตอบสนองอาจจะช้ากว่าการควบคุมอย่างต่อเนื่อง

2) เงื่อนไขการทำงานกรณีฉุกเฉิน (Contingency conditions)

2.1) การควบคุมในกรณีฉุกเฉิน (Instantaneous contingency reserves)

ความสามารถในการควบคุมความถี่ไฟฟ้าหรือสิ่งอื่น ๆ ที่สามารถเพิ่มกำลังการผลิตหรือลดการใช้ของโหลดอย่างรวดเร็ว เพื่อตอบสนองต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ถูกรบกวน

2.2) กำลังการผลิตสำรอง (Replacement reserve)

ความสามารถในการเป็นแหล่งพลังงานสำรองที่สามารถใช้ได้ทันทีเมื่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าถูกรบกวนเพื่อให้ระบบโครงข่ายไฟฟ้ายังคงมีเสถียรภาพ

3) เงื่อนไขกรณีอื่นๆ (Other services)

3.1) การควบคุมแรงดัน (Voltage control)

ความสามารถในการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้านี้เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่กำหนด

3.2) การเดินเครื่องผลิตไฟฟ้าด้วยตัวเอง (Black start)

ความสามารถในการเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้เองโดยไม่มีการสนับสนุนจากระบบโครงข่ายไฟฟ้า และการควบคุมที่เป็นประโยชน์ต่อระบบ

5.4.2 การชดเชยกำลังไฟฟ้านี้ (Reactive power compensation)

ส่วนใหญ่โหลดทางไฟฟ้าจะเป็นโหลดความเหนี่ยวนำ (Inductive load) เช่น มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดเหนี่ยวนำ เครื่องปรับอากาศ และเครื่องมือทางด้านอุตสาหกรรม ฉะนั้นหากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบโครงข่ายไฟฟ้าไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้านี้ได้อย่างเพียงพอ การชดเชยกำลังไฟฟ้านี้จึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยตัวอย่างของอุปกรณ์ที่สามารถชดเชยกำลังไฟฟ้านี้ได้ ได้แก่ ตัวเก็บประจุ (Capacitor bank) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous generator)

เป็นต้น โดยในต่างประเทศมีการกำหนดค่าตอบแทนสำหรับผู้ประกอบการที่มีอุปกรณ์หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สามารถจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้กับระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยวิธีการในการคิดราคาค่าตอบแทนของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสามารถแบ่งออกได้ 3 วิธีดังนี้ [61-64]

1) Cost-based capacity payment

ผู้ผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟต้องสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าตามสัญญาที่ทำไว้ ค่าตอบแทนขึ้นอยู่กับปริมาณกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จ่ายเข้าระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยวิธีการตัดสินใจเลือกให้ผู้ผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟรายใดสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่ระบบนั้นแบ่งเป็น 2 วิธีคือ

1.1) กำหนดให้ผู้ผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟทุกรายจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบได้อย่างเท่าเทียมกัน ซึ่งมีข้อดีคือ มีความเป็นธรรมแก่ผู้ผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟทุกราย แต่มีข้อเสียคือ ในบางพื้นที่ที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟน้อยแต่มีผู้ผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเป็นจำนวนมาก จะทำให้เกิดการรับซื้อกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมากเกินไปจนความจำเป็นภายในพื้นที่นั้นๆ ในทางกลับกัน หากบางพื้นที่ที่มีความต้องการกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมากแต่มีผู้ผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเป็นจำนวนน้อย จะทำให้เกิดการรับซื้อกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไม่เพียงพอในพื้นที่นั้นๆ

1.2) ผู้ดูแลระบบโครงข่ายไฟฟ้าเลือกผู้ผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโดยเฉพาะเจาะจง โดยขึ้นอยู่กับความต้องการในแต่ละพื้นที่ ซึ่งมีข้อดีคือ มีความสมเหตุสมผลในการรับซื้อกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการในแต่ละพื้นที่ และมีข้อเสียคือ อาจเกิดข้อสงสัยในเรื่องของความเป็นธรรม

2) Explicit payment for reactive power capacity through system wide forward procurement

วิธีการกำหนดราคาโดยให้ผู้ผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแต่ละรายประมูลราคากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่จะจ่ายเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าแข่งขัน

3) Pay nothing to generators

วิธีการที่ผู้ดูแลระบบโครงข่ายไฟฟ้าดูแลระบบจัดการหากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้เพียงพอต่อความต้องการด้วยตนเอง ผู้ผลิตไฟฟ้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะไม่ได้รับการชดเชยค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ แต่ผู้ผลิตไฟฟ้าต้องควบคุมค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด

5.4.3 ตลาดการซื้อขายกำลังไฟฟารีแอกทีฟในต่างประเทศ (International reactive power markets)

1) ประเทศแคนาดา

1.1) เมือง Ontario

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดมากกว่า 10 เมกะวัตต์ต้องสามารถจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟในช่วงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า 0.9 ตามหลังถึง 0.95 นำหน้าขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าจริงและแรงดันไฟฟ้า โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ

1.2) เมือง Alberta

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต้องสามารถรับหรือจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟในช่วงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า 0.9 ตามหลังถึง 0.95 นำหน้า

2) ประเทศอังกฤษ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดมากกว่า 50 เมกะวัตต์ต้องสามารถจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟได้ในช่วงค่าตัวประกอบกำลัง 0.85 ล้าหลังถึง 0.95 นำหน้าขึ้นอยู่กับค่ากำลังไฟฟ้าจริงและแรงดัน

3) สหราชอาณาจักร

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องจ่ายค่าปรับสำหรับการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟในราคา 2.4 ดอลลาร์สหรัฐต่อเมกะวัตต์ชั่วโมง

4) ประเทศสวีเดน

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องจ่ายปริมาณกำลังไฟฟารีแอกทีฟเป็นขนาดหนึ่งในสามของปริมาณกำลังไฟฟ้าจริงหรือค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า 0.9

5) ประเทศเนเธอร์แลนด์

ผู้ดูแลระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะมารับซื้อกำลังไฟฟารีแอกทีฟในพื้นที่ที่รับผิดชอบและติดต่อซื้อขายกำลังไฟฟารีแอกทีฟกับบริษัทอื่นๆ นอกพื้นที่

6) ประเทศเบลเยียม

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องมีค่าตัวประกอบกำลังอยู่ในช่วง 0.95 ตามหลังถึง 0.95 นำหน้า ถ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานอยู่นอกช่วงดังกล่าวจะถูกปรับเป็นเงิน 7.83 ดอลลาร์สหรัฐต่อเมกะวัตต์ชั่วโมง

7) ประเทศออสเตรเลีย

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องมีค่าตัวประกอบกำลังอยู่ในช่วง 0.9 ตามหลังถึง 0.93 นำหน้า

8) ประเทศอินเดีย

ผู้ดูแลระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะเพิ่มอัตราการคิดค่าชดเชยของกำลังไฟฟารีแอกทีฟขึ้น 1 ดอลลาร์สหรัฐต่อเมกะวัตต์ชั่วโมงเมื่อแรงดันไฟฟ้าตกต่ำกว่าร้อยละ 97 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ (ทั้งซื้อ

และขาย) อย่างไรก็ตามในช่วงโหลดต่ำสุด (off peak) อัตราการคิดค่าชดเชยจะกลับกันคือ ผู้ดูแลระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะเพิ่มอัตราการคิดค่าชดเชยของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟขึ้น 1 ดอลลาร์สหรัฐต่อเมกะวัตต์ชั่วโมงเมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าร้อยละ 103 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ (ทั้งซื้อและขาย)

9) ประเทศญี่ปุ่น

บริษัท Tokyo Electric Power Company (TEPCO) มีการจ่ายค่าแรงจูงใจให้ผู้ใช้ไฟฟ้ามีการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง โดยให้ส่วนลดค่าไฟฟ้าในส่วนอัตราค่าไฟฐาน (Base rate) ส่วนลดนี้จะขึ้นอยู่กับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้า

10) ประเทศอาเจนตินา

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการประกาศล่วงหน้าว่าจะหยุดเดินเครื่องต้องจ่ายค่าอุปกรณ์ที่นำมาจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแทนด้วยอัตรา 0.15 ดอลลาร์สหรัฐต่อเมกะวัตต์ชั่วโมง ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการประกาศล่วงหน้าว่าจะหยุดเดินเครื่องก่อนตั้งแต่ 1 วันถึง 1 สัปดาห์ ต้องจ่ายค่าปรับด้วยอัตรา 1.50 ดอลลาร์สหรัฐต่อเมกะวัตต์ชั่วโมง

จากการบริการเสริมความมั่นคงระบบโครงข่ายไฟฟ้าในต่างประเทศจะเห็นว่าการจัดทำข้อกำหนดในส่วนนี้ไว้แตกต่างกัน โดยในแต่ละประเทศได้มีการให้ความสำคัญกับการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีทั้งการบังคับให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่างๆ ต้องมีการปฏิบัติตามซึ่งหากไม่ปฏิบัติตามจะมีบทลงโทษ และการส่งเสริมสนับสนุนให้มีการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโดยมีการรับซื้อกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่ในประเทศไทยนั้นยังไม่มีข้อกำหนดการบริการเสริมความมั่นคงระบบโครงข่ายไฟฟ้า จะมีเพียงการไฟฟ้าซึ่งเป็นผู้ดูแลระบบโครงข่ายไฟฟ้าเท่านั้นที่จะเป็นผู้ทำงานต่างๆ และมีการจัดทำข้อกำหนดระบบโครงข่ายไฟฟ้า และมีการกำหนดให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานในช่วงที่กำหนด ซึ่งทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหล่านั้นไม่มีส่วนร่วมในการรับผิดชอบระบบโครงข่ายไฟฟ้า ต่างจากระบบโครงข่ายไฟฟ้าในต่างประเทศที่มีการให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้มีส่วนร่วมในการรักษาระบบโครงข่ายไฟฟ้าในแง่มุมต่างๆ ร่วมกับผู้ดูแลระบบไฟฟ้า ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จะได้นำเสนอให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้มีการทำงานที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า รวมทั้งจะได้นำเสนอการคิดรายรับและรายจ่ายต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความยุติธรรมต่อการทำงานนั้นด้วย

บทที่ 6 การคิดค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้า

ในการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้านั้น ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นต้องจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อเพิ่มหรือลดระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งอาจทำให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้มีค่าที่ลดลงเนื่องจากค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นรายได้ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีค่าลดลงกำลังการผลิต นอกจากนี้ระเบียบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวงได้ระบุให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายเงินค่าปรับสำหรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (VAr charge) ในกรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเกินกว่าร้อยละ 61.97 ของความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละเดือน ทำให้ในปัจจุบันการคิดเงินในส่วนต่างๆ ดังกล่าวตามระเบียบของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวงอาจไม่ยุติธรรมและไม่ส่งเสริมการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างประโยชน์ให้กับระบบโครงข่ายไฟฟ้า และในบางกรณีอาจไม่ยุติธรรมต่อการทำงานของไฟฟ้าหากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สร้างภาระต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยในบทที่ 6 จะได้นำเสนอหลักการการคิดค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าในกรณีต่างๆ เมื่อมีการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับระบบโครงข่ายไฟฟ้าทำให้เกิดต้นทุนในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งการคิดต้นทุนทั้งด้านของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และด้านของการไฟฟ้า ซึ่งได้แบ่งการนำเสนอเป็น 2 หัวข้อ ได้แก่

- 6.1 ต้นทุนการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า
- 6.2 การแบ่งกรณีการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า

6.1 ต้นทุนการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า

ในการส่งเสริมให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีส่วนร่วมในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า การคิดรายรับและรายจ่ายในส่วนนี้จะต้องมีความยุติธรรมต่อทั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นผู้ขายไฟฟ้า และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวงที่เป็นผู้ดูแลระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งต้นทุนการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเป็น 3 ส่วน ได้แก่

- 1) ค่าปรับสำหรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (VAr charge)

- 2) ค่าสูญเสียโอกาสจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริง (Opportunity costs)
- 3) ค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า (Utility operation costs)

6.1.1 ค่าปรับสำหรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (VAr charge)

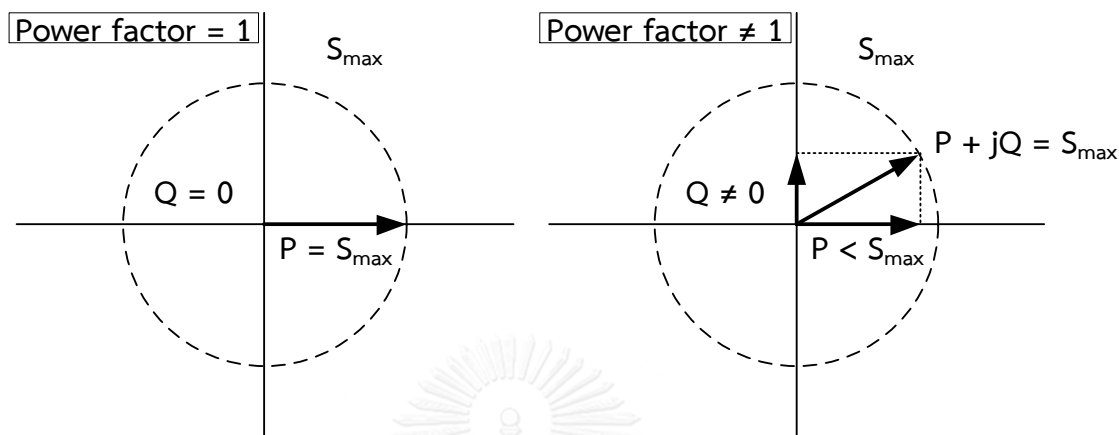
ค่าปรับสำหรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเป็นค่าใช้จ่ายที่การไฟฟ้าเรียกเก็บจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเกินกว่าร้อยละ 61.97 ของความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดทุก 15 นาทีในแต่ละเดือนดังกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.5 โดยในการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าจำเป็นต้องแบ่งการทำงานเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่

- 1) การจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อ ซึ่งการทำงานในลักษณะนี้มีจุดประสงค์เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าเฉพาะจุดเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าอยู่ในเกณฑ์ไม่เกินร้อยละ 5 ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริษัทโครงข่ายไฟฟ้าและทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ เพราะฉะนั้นบัสอื่นในระบบโครงข่ายไฟฟ้าอาจไม่ได้รับประโยชน์จากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในลักษณะนี้ ดังนั้นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จึงต้องเป็นผู้รับผิดชอบค่าใช้จ่ายในส่วนนี้
- 2) การจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสต่างๆ ในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งการทำงานในลักษณะนี้มีจุดประสงค์เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าของบัสต่างๆ ในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าอยู่ในเกณฑ์ไม่เกินร้อยละ 5 ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริษัทโครงข่ายไฟฟ้าและเพื่อลดผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้ารายอื่นจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า เพราะฉะนั้นระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะได้รับประโยชน์จากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในลักษณะนี้ ดังนั้นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีส่วนช่วยเหลือระบบโครงข่ายไฟฟ้าจึงควรจะได้รับการยกเว้นค่าปรับสำหรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

6.1.2 ค่าสูญเสียโอกาสจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริง (Opportunity costs)

จากหัวข้อที่ 6.1.1 การจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อหรือระดับแรงดันไฟฟ้าของบัสต่างๆ ในระบบโครงข่ายไฟฟ้าอาจทำให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ถูกทำให้ลดลงเนื่องจากค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์ ดังภาพที่ 6.1 การลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในส่วนนี้ทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ลดลงและส่งผลกระทบต่อรายได้ที่ควรจะได้รับลดลงเช่นกัน แต่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะได้รับค่าชดเชยค่าสูญเสียโอกาสจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงเฉพาะในกรณีที่มีการทำงานเพื่อสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าของบัสต่างๆ ในระบบโครงข่ายไฟฟ้าซึ่งเป็นการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอก

ที่ฟและจำกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเพื่อประโยชน์ของระบบโครงข่ายไฟฟ้าเท่านั้น ส่วนในกรณีที่มี การจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อจะไม่ได้รับการชดเชย ค่าสูญเสียโอกาส



ภาพที่ 6.1 การลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงเมื่อมีและไม่มี การจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

6.1.3 ค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า (Utility operation costs)

ในการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ตามหัวข้อที่ 6.1.1 และ 6.1.2 หากไม่สามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้าทุกบัสให้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ไม่เกินร้อยละ 5 การไฟฟ้าจำเป็นต้องเป็นสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าด้วยเช่นกัน โดยค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้าจะเป็น ต้นทุนจากการทำงานของอุปกรณ์ประเภทต่างๆ ที่การไฟฟ้าเป็นผู้ควบคุมและดูแล ซึ่งได้แก่ การ ทำงานของตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitor bank) การปรับแท็ปหม้อแปลงไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้า (On Load Tap Changer: OLTC) หรือการทำงานของตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้า (Automatic Voltage Regulator: AVR) โดยในการทำงานของอุปกรณ์แต่ละประเภทมีต้นทุนการทำงานที่แตกต่างกันขึ้นกับ ต้นทุนในการติดตั้งและอายุการใช้งานของอุปกรณ์นั้นๆ ซึ่งทำให้ราคาต่อการใช้งานอุปกรณ์ในแต่ละ ครั้งมีต้นทุนเกิดขึ้น ทั้งนี้การคิดค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้าจากอุปกรณ์ต่างๆ ข้างต้นที่ คิดจากการทำงานในแต่ละครั้งอาจมีความซับซ้อน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอการคิดค่า รักษา ระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้าเทียบกับค่าปรับสำหรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากการ จ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเมื่อแรงดันไฟฟ้าใน ระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเกินช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติและ อุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้าต้องทำงาน (Additional VAr charge) แรงดันไฟฟ้าที่ ลดลงจะเปรียบเสมือนระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ค่ารักษา ระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้าในส่วนนี้จะคิดคล้ายกับค่าปรับสำหรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใน หัวข้อที่ 3.5 โดยแสดงได้ดังสมการที่ 6.1

$$\text{Additional VAr charge} = 56.07 \times (Q_u - 0.6197 * P_{peak}) \quad (6.1)$$

โดยที่

Q_u คือ กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่เกิดจากการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า

P_{peak} คือ กำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ใช้

6.2 การแบ่งกรณีของการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า

การเชื่อมต่อบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าเพื่อขายพลังงานไฟฟ้าจะส่งผลถึงแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ โดยผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะมีปัจจัยมาจาก 2 ส่วน คือ (1) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (2) ระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยปัจจัยที่มาจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ ปริมาณการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง ปริมาณการรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ตำแหน่งที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า เป็นต้น และ ปัจจัยที่มาจากระบบโครงข่ายไฟฟ้า ได้แก่ ปริมาณของโหลด ความยาวของสายส่ง การปรับตั้งตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้า ระดับแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าต้นทาง เป็นต้น ดังนั้นการแบ่งกรณีการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะพิจารณาจากการเปรียบเทียบสถานะของทุกบัสในระบบโครงข่ายไฟฟ้าขณะก่อนและหลังการเชื่อมต่อการเชื่อมต่อบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทั่วไประบบโครงข่ายไฟฟ้าก่อนการเชื่อมต่อบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มักมีแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า ดังนั้นหลังจากการเชื่อมต่อบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ 2 กรณี คือ (1) ทุกบัสของระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลังการเชื่อมต่อยังคงมีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า (2) บางบัสของระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลังการเชื่อมต่อยังคงมีค่าแรงดันไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วงตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า นอกจากนี้ในบางเหตุการณ์ซึ่งไม่ได้เกิดจากการเชื่อมต่อบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ แต่ทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงจนอยู่นอกช่วงของข้อกำหนดการเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งในกรณีนี้จะทำให้การเปลี่ยนแปลงหลังการเชื่อมต่อบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เกิดขึ้นได้อีก 2 กรณี คือ (1) ทุกบัสของระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลังการเชื่อมต่อบกลับมาามีค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า (2) บางบัสของระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลังการเชื่อมต่อยังคงมีค่าแรงดันไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วงตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อบระบบโครงข่ายไฟฟ้า ดังนั้นกรณีที่แบ่งได้จากการเปรียบเทียบสถานะของระบบโครงข่ายไฟฟ้าระหว่างก่อนและหลังการเชื่อมต่อบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีทั้งหมด 4 กรณี ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 สถานะของระบบโครงข่ายไฟฟ้าก่อนและหลังการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

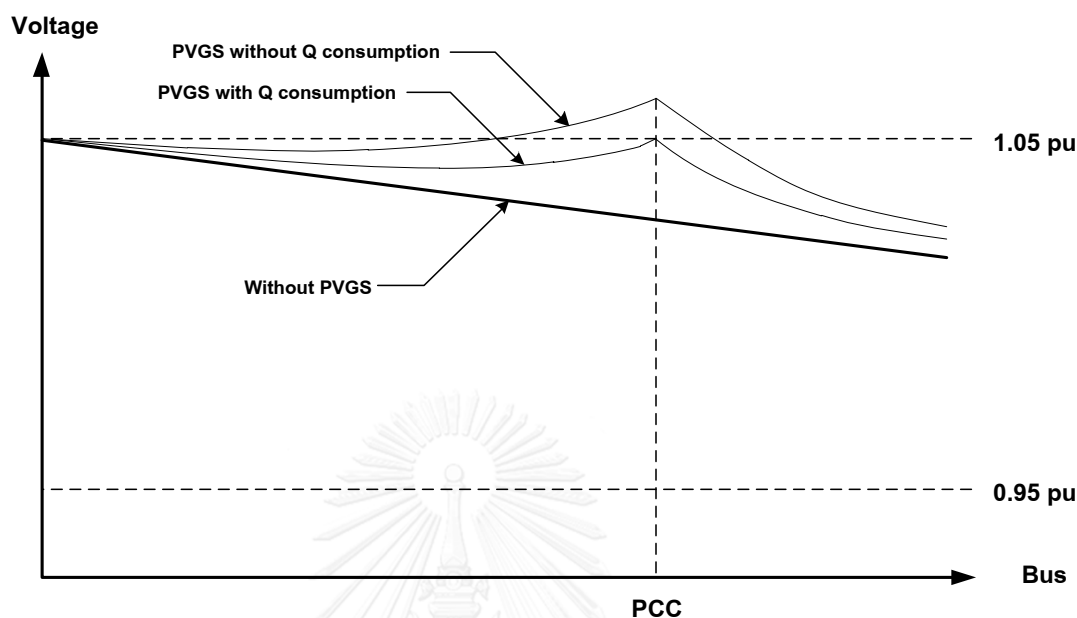
กรณี	สถานะของระบบโครงข่ายไฟฟ้าก่อนการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	สถานะของระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลังการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
1	ทุกบัสมีแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ	ทุกบัสมีแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ
2	ทุกบัสมีแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ	บางบัสมีแรงดันไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ
3	บางบัสมีแรงดันไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ	ทุกบัสมีแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ
4	บางบัสมีแรงดันไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ	บางบัสมีแรงดันไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ

6.2.1 แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในระบบโครงข่ายไฟฟ้าก่อนการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันปกติ

การเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้านิวแอคทีฟซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ (1) การจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้านิวแอคทีฟเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อ และ (2) การจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้านิวแอคทีฟเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าบัสอื่นๆ นอกจากนี้บัสที่เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้านิวแอคทีฟประเภทนี้จะเกิดขึ้นเมื่อค่าแรงดันไฟฟ้าของบางบัสมีค่าไม่อยู่ในช่วงตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า

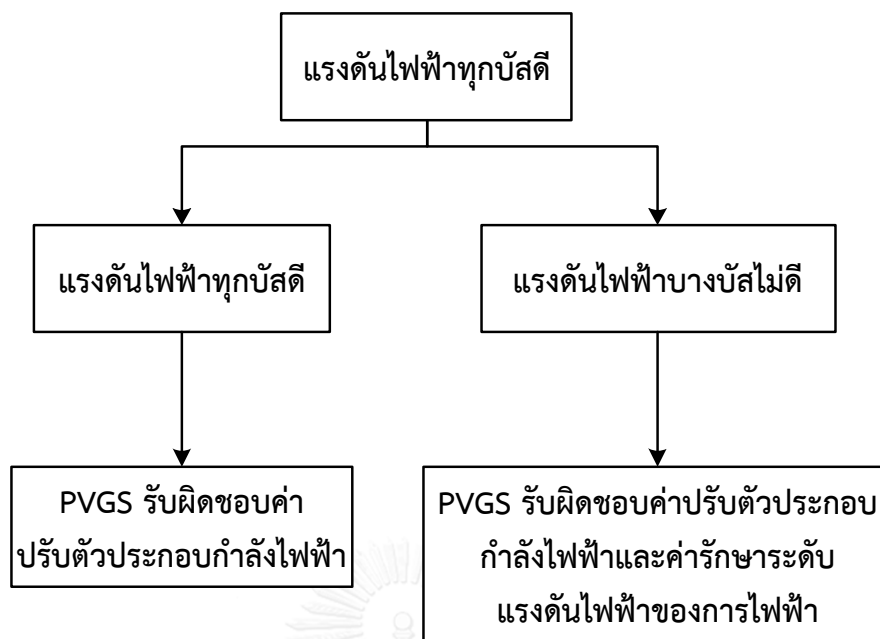
ในกรณีที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันไฟฟ้าที่ปกติ แรงดันไฟฟ้าเดิมทุกบัสก่อนการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าอยู่ในเกณฑ์ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของบัสต่างๆ และอาจทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลังการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าสูงหรือต่ำกว่าร้อยละ 5 ดังนั้นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้านิวแอคทีฟเพื่อทำให้ระบบโครงข่ายไฟฟ้ากลับมาสู่ภาวะปกติดังเดิมเนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นผู้ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องรับผิดชอบค่าใช้จ่ายในส่วนของคุณค่าปรับสำหรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ซึ่งการ

เปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าจากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงใน ภาพที่ 6.2



ภาพที่ 6.2 แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าเมื่อมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะปกติ

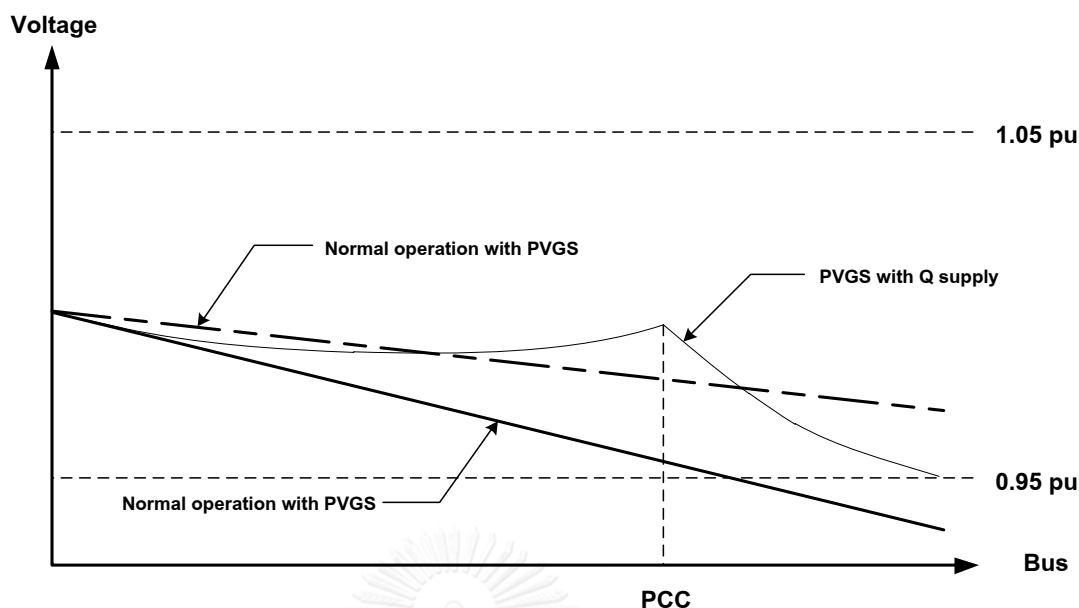
หากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าแล้วทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าสูงหรือต่ำกว่าร้อยละ 5 และการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นไม่สามารถทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าบัสอื่นๆ กลับมามีค่าที่เหมาะสมได้ ดังนั้นเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ากลับมามีค่าที่เหมาะสม การไฟฟ้าจึงต้องทำการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งเป็นการทำงานของอุปกรณ์ที่มีหน้าที่รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าอันได้แก่ การทำงานของตัวเก็บประจุไฟฟ้า การปรับแก้หม้อแปลงไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้า และการทำงานของตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้า ซึ่งการทำงานต่างๆ ของอุปกรณ์เหล่านี้ก็มีต้นทุนในการทำงานเช่นกัน และดังที่กล่าวในหัวข้อ 6.1.3 ภาระต้นทุนนี้ซึ่งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นต้นเหตุทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเกินกว่าช่วงแรงดันไฟฟ้าตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าจึงต้องเป็นผู้รับผิดชอบ ดังนั้นในกรณีนี้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องรับผิดชอบค่าต้นทุนการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้าเพิ่มเติมจากค่าปรับสำหรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้า โดยทั้ง 2 กรณีที่แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในระบบโครงข่ายไฟฟ้าก่อนการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันปกติสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 6.3



ภาพที่ 6.3 ค่าใช้จ่ายในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าอยู่ในสภาวะปกติ

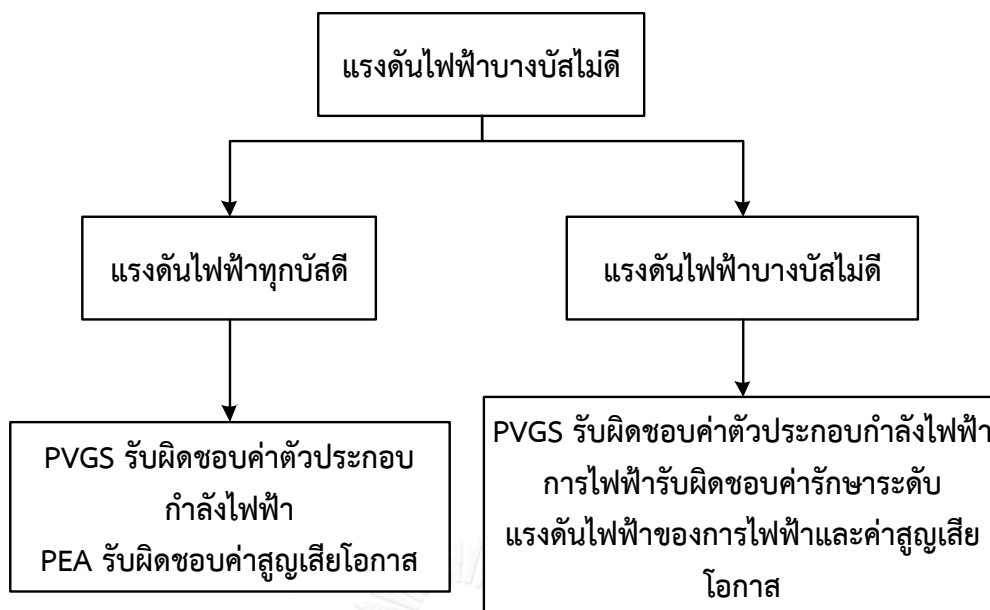
6.2.2 แรงดันไฟฟ้าบางบัสในระบบโครงข่ายไฟฟ้าก่อนการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันปกติ

เมื่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้และทำงานได้ตามปกติแล้ว ในเวลาต่อมาอาจมีบางเหตุการณ์ที่ทำให้แรงดันไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่น การเข้ามาของโหลดขนาดใหญ่ การซ่อมบำรุงระบบจำหน่ายบางส่วน การเริ่มขายไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ใหม่ เป็นต้น เหตุการณ์เหล่านี้ อาจส่งผลให้ระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเกินกว่าช่วงแรงดันไฟฟ้าตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้านี้ไม่ได้มีสาเหตุจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งตามแนวคิดการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีหน้าที่ในการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้านี้ออกเพื่อช่วยรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งในกรณีนี้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำงานเป็นประโยชน์ต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะได้รับการยกเว้นค่าปรับสำหรับตัวประกอบกำลังไฟฟารวมทั้งได้รับการชดเชยกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปจากการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้านี้ออกเพื่อช่วยเหลือระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าจากสาเหตุอื่นสามารถแสดงในภาพที่ 6.4



ภาพที่ 6.4 แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าเมื่อมีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในสถานะที่แรงดันไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้าอยู่ในสถานะไม่ปกติ (แรงดันไฟฟ้าตก)

หากการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าในขณะที่แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าสูงหรือต่ำกว่าร้อยละ 5 และการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นไม่สามารถทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ากลับมามีค่าที่เหมาะสมได้ ดังนั้นเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ากลับมามีค่าที่เหมาะสม การไฟฟ้าจึงต้องทำการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งเป็นการทำงานของอุปกรณ์ที่มีหน้าที่รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าอันได้แก่ การทำงานของตัวเก็บประจุไฟฟ้า การปรับแก้หม้อแปลงไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้า และการทำงานของตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้า ซึ่งการทำงานต่างๆ เหล่านี้ก็มีต้นทุนในการทำงานเช่นกัน และดังที่กล่าวในหัวข้อ 6.1.3 แต่แตกต่างกับหัวข้อ 6.2.1 ตรงที่ภาระต้นทุนของการทำงานเหล่านี้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่เป็นผู้รับผิดชอบ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าไม่ได้เกิดจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นในกรณีนี้การไฟฟ้าจะต้องรับผิดชอบต่อต้นทุนการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า รวมทั้งชดเชยต้นทุนในส่วนที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ช่วยรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย การยกเว้นค่าปรับสำหรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้าและการชดเชยค่าสูญเสียโอกาสจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงซึ่งเกิดจากการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อช่วยเหลือระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยทั้ง 2 กรณีที่แรงดันไฟฟ้าทุกบัสในระบบโครงข่ายไฟฟ้าก่อนการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 6.5



ภาพที่ 6.5 ค่าใช้จ่ายในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าอยู่ในสภาวะไม่ปกติ

นอกจากกรณีทั้ง 4 ตามตารางที่ 6.1 ระบบโครงข่ายไฟฟ้าและระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์อาจมีการทำงานในกรณีอื่นอีกในขณะที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าจริงเพื่อจ่ายเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ซึ่งมีกรณีเกิดขึ้นอีก 3 กรณี ได้แก่ (1) กรณีที่แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมโดยที่ไม่มีการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และอุปกรณ์รักษาแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า (2) กรณีที่แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าอยู่นอกช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ และมีการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟเพื่อช่วยรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า (3) กรณีที่แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าอยู่นอกช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ และมีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้าเพื่อช่วยให้ระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ากลับมาอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 สถานะของระบบโครงข่ายไฟฟ้าก่อนและหลังการเมื่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าจริงได้

กรณี ที่	สถานะของระบบโครงข่ายไฟฟ้าก่อนการ ทำงานเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า	อุปกรณ์ที่รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในช่วง ร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ
0	ทุกบัสมีแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ	-
-1	ทุกบัสมีแรงดันไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ	ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
-2	บางบัสมีแรงดันไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ	อุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า



บทที่ 7

แบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในระบบโครงข่ายไฟฟ้า

การทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะประกอบด้วยส่วนหลัก 3 ส่วน คือ (1) ส่วนของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีหน้าที่ผลิตพลังงานไฟฟ้า (2) ส่วนของอินเวอร์เตอร์ที่มีหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้ากระแสสลับและควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้า (3) ส่วนของการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่จะต้องมีการปฏิบัติตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอหลักการการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีอินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมการทำงาน โดยระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า เนื้อหาวิทยานิพนธ์ในบทที่ 7 แบ่งการนำเสนอเป็น 5 หัวข้อ ได้แก่

- 7.1 แบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน
- 7.2 แบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า
- 7.3 แบบจำลองการทำงานในโหมดกำลังไฟฟารีแอกทีฟและโหมดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง
- 7.4 หลักการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า
- 7.5 แบบจำลองการคำนวณรายรับและรายจ่ายที่เกิดจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- 7.6 หลักการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มากกว่าหนึ่งระบบบนสายป้อนเดียวกัน

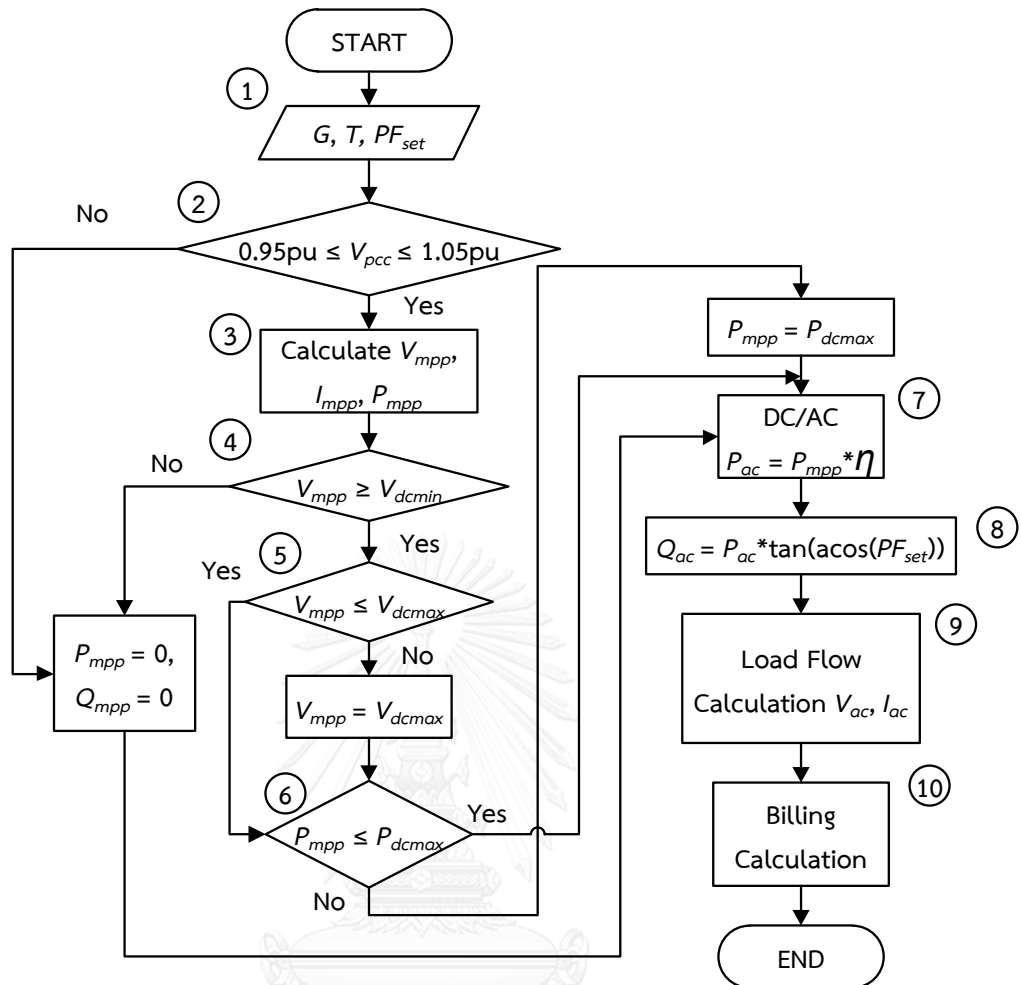
7.1 แบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะทำสัญญาซื้อขายไฟฟ้ากับการไฟฟ้าฝ่ายผลิต การไฟฟ้านครหลวง หรือการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และจะเชื่อมต่อเข้ากับระบบของการไฟฟ้าตามเขตที่ตั้งของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นๆ การทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกควบคุมโดยการไฟฟ้าที่ได้ทำสัญญาไว้และจำเป็นจะต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าของแต่ละการไฟฟ้าเช่นกัน ซึ่งพบว่าการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บางแห่งจะไม่มีกรจ่ายหรือรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟจากระบบของการไฟฟ้า เนื่องจากการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟอาจส่งผลต่อการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ โดยในส่วนของอุปกรณ์บางอย่างเช่น หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า สายไฟฟ้า ที่จะมีการดึงกำลังไฟฟารีแอกทีฟจากระบบของการไฟฟ้า จะมีคาปาซิเตอร์แบบคัตติงไว้เพื่อชดเชยกำลังไฟฟารีแอกทีฟเหล่านี้ แต่

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์บางแห่งจะมีการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าในสายป้อนที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นเชื่อมต้อมีแวนโวมที่สูงหรือต่ำอยู่ตลอดเวลาและระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะคงค่าการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟไว้ที่ค่าหนึ่งตลอดเวลา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จำลองหลักการการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำงานอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งจะมีหลักการทำงานที่สำคัญ คือ ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะพยายามผลิตกำลังไฟฟ้าจริงเพื่อจ่ายเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าให้ได้ปริมาณที่สูงที่สุด โดยจะหลีกเลี่ยงการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ หรือมีการจ่ายหรือรับที่ค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งจะไม่มี การเปลี่ยนค่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าเปลี่ยนไป รวมทั้งจะมีการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าในขณะที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีแรงดันไฟฟ้าอยู่ในระดับที่ปกติเท่านั้น ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งการทำงานออกเป็นส่วนๆ โดยที่ลักษณะการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำงานในปัจจุบันสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 7.1





ภาพที่ 7.1 แบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน

ขั้นตอนการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน

แบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันดังภาพที่ 7.1 มีขั้นตอนการทำงาน 10 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) รับค่าความเข้มแสง (G) อุณหภูมิ (T) จากเซลล์แสงอาทิตย์ และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ที่ตั้งค่าไว้ (PF_{set})
- 2) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าในขณะที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอยู่ในสถานะที่ปกติเท่านั้น ดังนั้นแรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อจะต้องมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติซึ่งเป็นค่ามาตรฐานตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ดังหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 แต่ถ้าแรงดันไฟฟ้ามีค่าไม่ปกติ ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่จ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า ($P_{ac}=0, Q_{ac}=0$)
- 3) คำนวณหาแรงดันไฟฟ้า (V_{mpp}) กระแสไฟฟ้า (I_{mpp}) และกำลังไฟฟ้าที่จุดทำงานสูงสุด (P_{mpp}) ที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จากแบบจำลองแบบไดโอดเดียวในหัวข้อที่ 4.1.1 และหาค่าจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในหัวข้อที่ 4.2.3.1
- 4) ตรวจสอบระดับแรงดันไฟฟ้า (V_{mpp}) ที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ว่ามีค่าเหมาะสมต่อการทำงานของอินเวอร์เตอร์หรือไม่ หากมีค่าไม่ถึงแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด (V_{dcmin}) ของอินเวอร์เตอร์ อินเวอร์เตอร์จะไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ ($P_{ac}=0, Q_{ac}=0$)
- 5) ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (V_{mpp}) มีค่าที่สูงกว่าพิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ (V_{dcmax}) อินเวอร์เตอร์จะจำกัดแรงดันไฟฟ้าไม่ให้เกินค่าพิกัด แต่ในกรณีนี้มักไม่เกิดขึ้นเนื่องจากการจัดเรียงเซลล์แสงอาทิตย์มักจะออกแบบให้แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่าไม่เกินค่าพิกัดเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอินเวอร์เตอร์
- 6) หากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{mpp}) มีค่าเกินกว่าค่าพิกัดของอินเวอร์เตอร์ (P_{dcmax}) อินเวอร์เตอร์จะจำกัดกำลังไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากับค่าพิกัดของอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นกำลังที่ผลิตได้จะมีค่าต่ำกว่ากำลังไฟฟ้าที่จุดทำงานสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับค่าพิกัดกำลัง (P_{dcmax})
- 7) แปลงกำลังไฟฟ้าจริงกระแสตรง (P_{mpp}) ให้เป็นกำลังไฟฟ้าจริงกระแสสลับ (P_{ac}) โดยกำลังที่ได้จะลดลงเล็กน้อยขึ้นกับประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ (η)
- 8) จ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q_{ac}) ตามค่ากำลังไฟฟ้าจริงกระแสสลับ (P_{ac}) ที่จ่ายเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าและค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ที่ตั้งค่าไว้ (PF_{set})

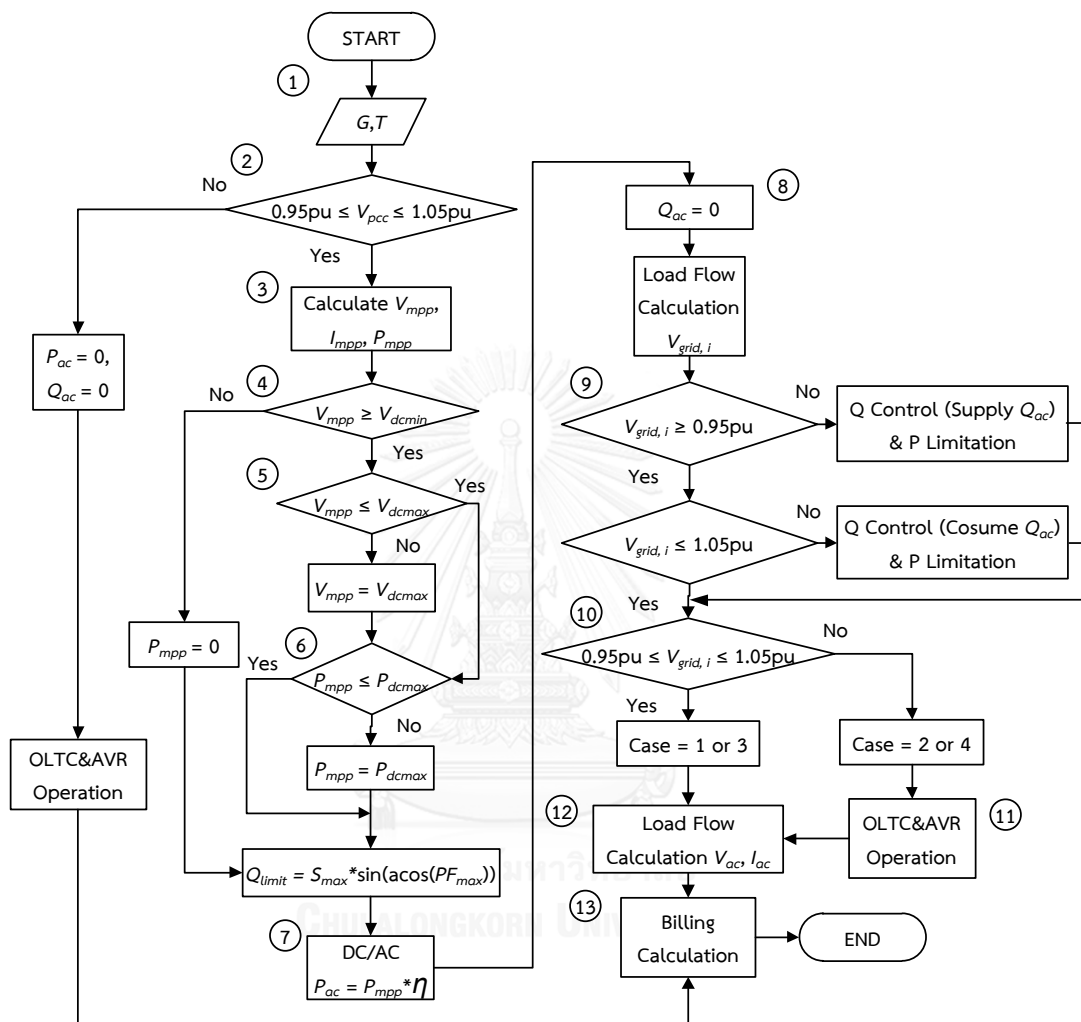
- 9) คำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (Load Flow Calculation) เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้า (V_{oc}) และกระแสไฟฟ้า (I_{oc}) ที่เหมาะสมเพื่อเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า
- 10) คำนวณรายรับและรายจ่าย (Billing Calculation) ที่เกิดจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

7.2 แบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า

เนื่องจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะถูกกำหนดให้สามารถปฏิบัติได้ค่อนข้างอิสระภายใต้ช่วงของแรงดันไฟฟ้าและตัวประกอบกำลังไฟฟ้าตามที่ข้อกำหนดการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ระบุซึ่งมีการทำงานแบบจำลองในหัวข้อที่ 7.1 ดังนั้นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จึงไม่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า อย่างไรก็ตามระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีอินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้ามีความสามารถมากกว่าการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ อินเวอร์เตอร์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้เอง และยังสามารถในการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้หลากหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับรุ่นของอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นความสามารถด้านกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟนี้สามารถช่วยสนับสนุนด้านแรงดันไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ ลักษณะการสนับสนุนจะคล้ายกับการชดเชยจากคาปาซิเตอร์แบบที่ช่วยเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าและชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของระบบโครงข่ายไฟฟ้า นอกจากนี้อินเวอร์เตอร์จะสามารถปรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มีตัวประกอบกำลังแบบตามหลังได้แล้ว ยังสามารถปรับตั้งให้จ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีตัวประกอบกำลังแบบนำหน้าได้อีกด้วย ซึ่งจะสามารถช่วยเหลือระบบในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าสูงเช่นกัน ดังนั้นหากมีการควบคุมการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการติดต่อสื่อสารระหว่างการไฟฟ้ากับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสม จะสามารถลดความถี่ของการทำงานของอุปกรณ์ที่มีหน้าที่รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าได้ ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทนี้จึงมีส่วนร่วมในการรับผิดชอบระบบโครงข่ายไฟฟ้ามากขึ้นด้วย ทำให้สามารถลดการลงทุนของการไฟฟ้าที่จะต้องลงทุนในการติดตั้งตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าและตัวเก็บประจุในสายป้อนนั้น

จากแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการทำงานใหม่ ซึ่งจะกำหนดให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีส่วนร่วมในการชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าร่วมกับการปรับแก้ของตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าในสายป้อนและการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต้นทางของสถานีไฟฟ้า โดยที่การสนับสนุนระบบโครงข่ายไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้เองจากอินเวอร์เตอร์และจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในขณะที่ระดับ

แรงดันไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้าไม่ปกติ ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งการทำงานออกเป็นส่วนๆ โดยที่ลักษณะการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 7.2



ภาพที่ 7.2 แบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า

ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า

แบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้างดภาพที่ 7.2 มีขั้นตอนการทำงาน 13 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

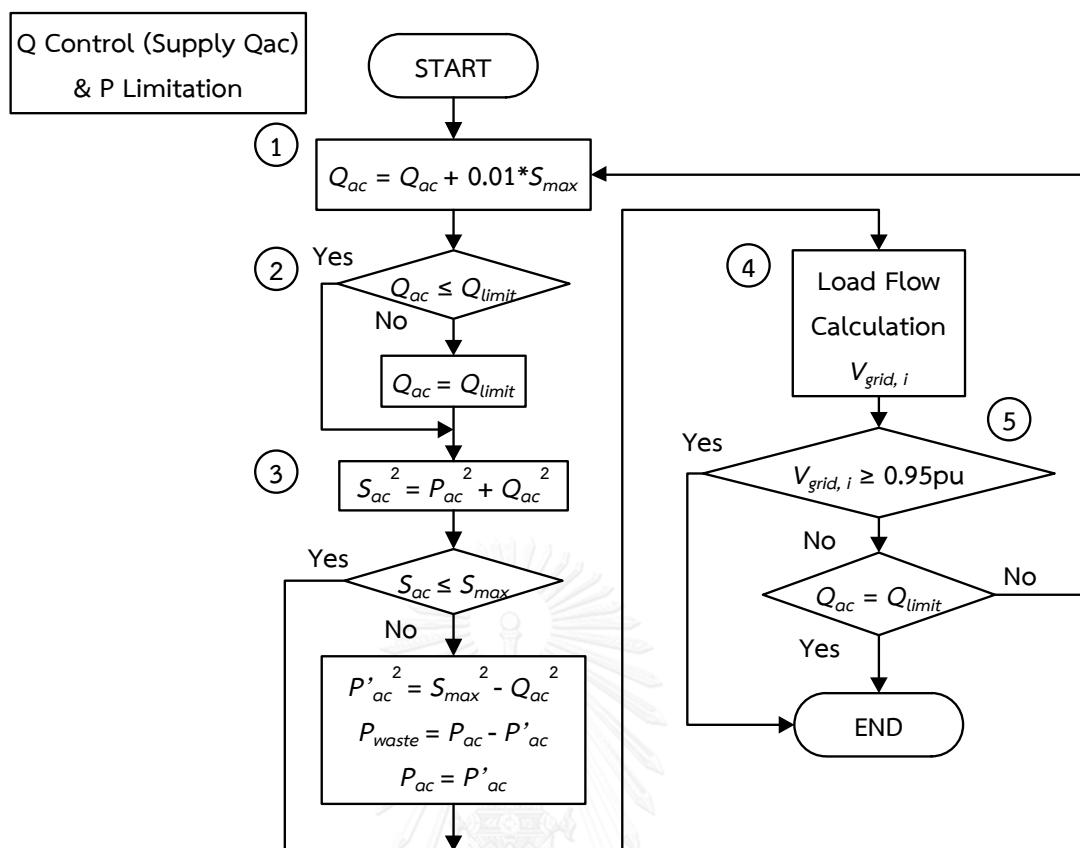
- 1) รับค่าความเข้มแสง (G) อุณหภูมิ (T) จากเซลล์แสงอาทิตย์
- 2) หากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ยังไม่ได้เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้านั้น จำเป็นที่จะต้องเชื่อมต่อครั้งแรกในขณะที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอยู่ในสถานะที่ปกติเท่านั้น และหากแรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 95 หรือสูงกว่าร้อยละ 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อบริษัทโครงข่ายไฟฟ้า ดังหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ ($P_{ac}=0, Q_{ac}=0$) ซึ่งในกรณีนี้การไฟฟ้าต้องมีการปรับแรงดันไฟฟ้าให้แรงดันไฟฟ้า ณ จุดเชื่อมต่อมีค่าที่เหมาะสม เพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเชื่อมต่อและสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ (OLTC & AVR Operation)
- 3) คำนวณหาแรงดันไฟฟ้า (V_{mpp}) กระแสไฟฟ้า (I_{mpp}) และกำลังไฟฟ้า (P_{mpp}) ที่จุดทำงานสูงสุดจากแบบจำลองแบบไดโอดเดียวในหัวข้อที่ 4.1.1 และโหมดจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในหัวข้อที่ 4.2.3.1
- 4) ตรวจสอบระดับแรงดันไฟฟ้า (V_{mpp}) จากเซลล์แสงอาทิตย์ว่ามีค่าเพียงพอต่อการทำงานของอินเวอร์เตอร์หรือไม่ หากไม่เพียงพอ อินเวอร์เตอร์ไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าจริง ($P_{mpp} = 0$) ได้ และจะปรับเข้าสู่โหมดการทำงานในเวลากลางคืน (Night mode) ตามหัวข้อที่ 4.2.3.3
- 5) ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (V_{mpp}) มีค่าที่สูงกว่าพิคัดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดขาเข้าของอินเวอร์เตอร์ (V_{dcmax}) อินเวอร์เตอร์จะจำกัดแรงดันไฟฟ้าไม่ให้เกินค่าพิคัด แต่ในกรณีนี้มักไม่เกิดขึ้นเนื่องจากการจัดเรียงเซลล์แสงอาทิตย์มักจะออกแบบให้แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่าไม่เกินค่าพิคัดเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับอินเวอร์เตอร์
- 6) หากกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{mpp}) มีค่าเกินกว่าค่าพิคัดของอินเวอร์เตอร์ (P_{dcmax}) อินเวอร์เตอร์จะจำกัดกำลังไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากับค่าพิคัดของอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นกำลังที่ผลิตได้จะมีค่าต่ำกว่ากำลังไฟฟ้าที่จุดทำงานสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับค่าพิคัดกำลัง (P_{dcmax}) และจำกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟสูงสุด (Q_{limit}) ซึ่งขึ้นกับค่าพิคัดกำลังไฟฟ้าขาออกของ

- อินเวอร์เตอร์ (S_{max}) และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสูงสุด (PF_{max}) ตามข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์แต่ละรุ่น
- 7) แปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ (P_{ac}) โดยกำลังที่แปลงได้จะลดลงเล็กน้อยจากประสิทธิภาพการแปลงของอินเวอร์เตอร์ (η)
 - 8) กำหนดค่าเริ่มต้นของกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q_{ac}) ให้มีค่าเป็นศูนย์ และคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (Load Flow Calculation) เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าทุกบัสของระบบโครงข่ายไฟฟ้า ($V_{grid, i}$)
 - 9) ตรวจสอบระดับแรงดันไฟฟ้าทุกบัส ($V_{grid, i}$) ว่ามีค่าที่อยู่ในช่วงของแรงดันไฟฟ้าตามข้อกำหนดของการไฟฟ้าหรือไม่ หากมีค่าต่ำหรือสูงเกินไป อินเวอร์เตอร์จะมีการทำงานในโหมดกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q control mode) และโหมดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง (P limitation mode) ในหัวข้อที่ 4.2.3.1 และ 4.2.3.2 ซึ่งเพื่อปรับระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยจะมีขั้นตอนการทำงานโดยจะได้อธิบายในหัวข้อที่ 7.3
 - 10) ตรวจสอบอีกครั้งว่าหลังจากการทำงานในโหมดกำลังไฟฟารีแอกทีฟและโหมดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมหรือไม่ ซึ่งจะทำให้สามารถแบ่งกรณีของการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ตามหัวข้อที่ 6.2 โดยหากแรงดันไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสม *Case* จะมีค่าเท่ากับ 1 (กรณีที่ 1 ตามตารางที่ 6.1) เมื่อก่อนการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าปกติ และ *Case* จะมีค่าเท่ากับ 3 (กรณีที่ 3 ตามตารางที่ 6.1) เมื่อก่อนการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าไม่ปกติ หากแรงดันไฟฟ้าหลังจากการทำงานในโหมดกำลังไฟฟารีแอกทีฟและโหมดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริงมีค่าไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสม *Case* จะมีค่าเท่ากับ 2 (กรณีที่ 2 ตามตารางที่ 6.1) เมื่อก่อนการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าปกติ และ *Case* จะมีค่าเท่ากับ 4 (กรณีที่ 4 ตามตารางที่ 6.1) เมื่อก่อนการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าไม่ปกติ
 - 11) หากแรงดันไฟฟ้าหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ยังไม่อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ดังนั้นจึงต้องมีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า (OLTC & AVR Operation) ซึ่งจะมีขั้นตอนการทำงานโดยจะได้อธิบายในหัวข้อที่ 7.4 และแรงดันไฟฟ้าของระบบโครงข่ายไฟฟ้าทุกบัสจะมีค่าตามมาตรฐานของข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า

- 12) คำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าอีกครั้ง เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้า (V_{oc}) และกระแสไฟฟ้า (I_{oc}) ที่เหมาะสมที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ใช้เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า
- 13) คำนวณรายรับและรายจ่าย (Billing Calculation) ที่เกิดจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานโดยจะได้อธิบายในหัวข้อที่ 7.5

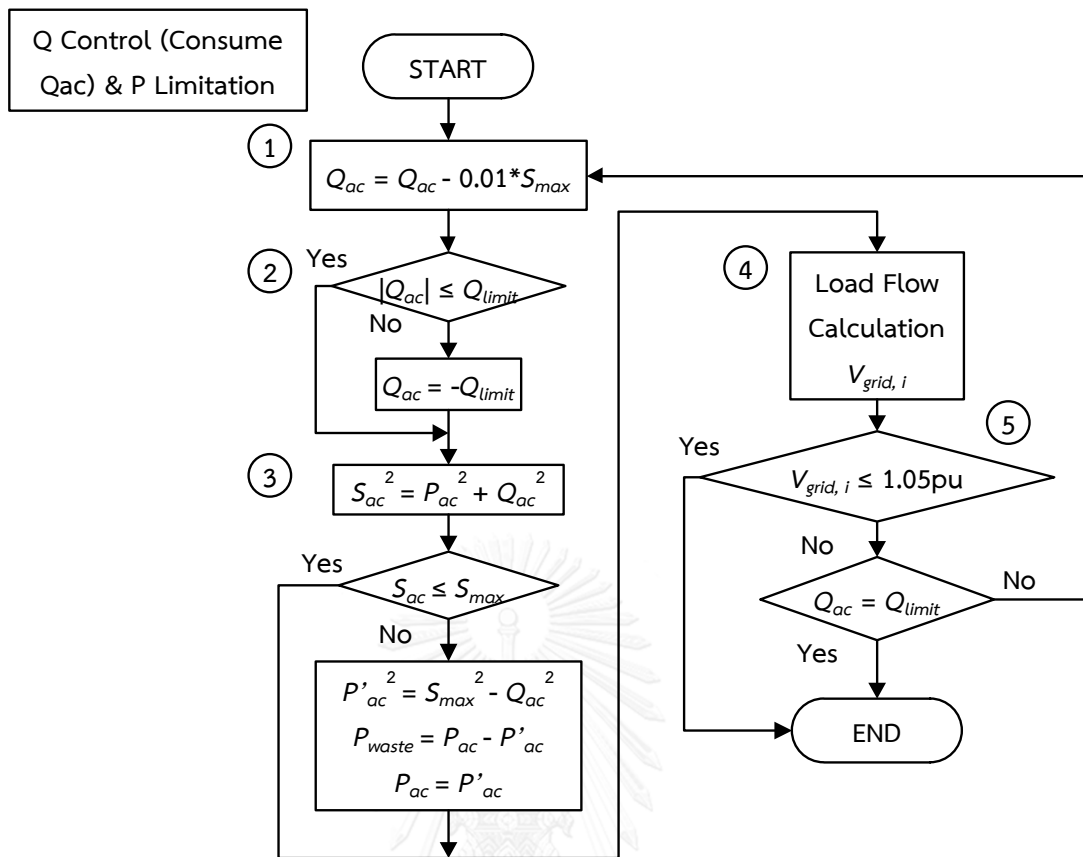
7.3 แบบจำลองการทำงานในโหมดกำลังไฟฟารีแอกทีฟและโหมดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง

อินเวอร์เตอร์มีโหมดการทำงานซึ่งสามารถปรับปริมาณการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟได้ ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2.3.1 และ 4.2.3.2 การทำงานในโหมดกำลังไฟฟารีแอกทีฟและโหมดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริงนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอให้มีการทำงานร่วมกัน โดยการทำงานจะมีการปรับการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ซึ่งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะพยายามรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าให้ได้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าดังหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 และจะต้องให้มีการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่น้อยที่สุด เพราะการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟเพิ่มขึ้นอาจส่งผลกระทบต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ซึ่งอาจมีการจำกัดกำลังไฟฟ้าจริงหลักการทำงานในโหมดกำลังไฟฟารีแอกทีฟและโหมดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริงที่มีการจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟจะแสดงได้ดังภาพที่ 7.3 และโหมดกำลังไฟฟารีแอกทีฟและโหมดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริงที่มีการรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟจะแสดงได้ดังภาพที่ 7.4



ภาพที่ 7.3 แบบจำลองการทำงานในโหมดกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟและโหมดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง

(Q Control (Supply Q_{ac}) & P Limitation)



ภาพที่ 7.4 แบบจำลองการทำงานในโหมดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและโหมดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง

(Q Control (Consume Q_{ac}) & P Limitation)

ขั้นตอนการทำงานในโหมดกำลังไฟฟารีแอกทีฟและโหมดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง

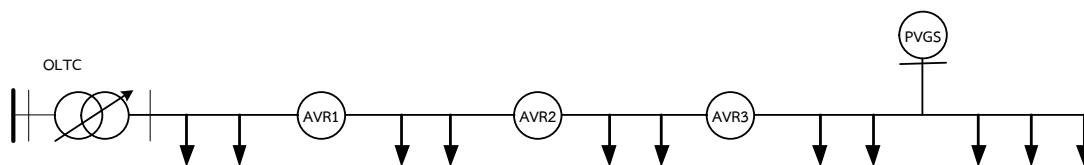
แบบจำลองการทำงานในโหมดกำลังไฟฟารีแอกทีฟและโหมดจำกัดกำลังไฟฟ้าจริงดังภาพที่ 7.3 และ 7.4 มีขั้นตอนการทำงาน 5 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) เริ่มปรับค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q_{ac}) เพิ่มขึ้นหรือลดลงทีละร้อยละ 1 ของพิกัดกำลังของอินเวอร์เตอร์ (S_{max}) เมื่อระดับแรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าร้อยละ 95 หรือสูงกว่าร้อยละ 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติตามลำดับ
- 2) ตรวจสอบกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q_{ac}) ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ว่ามีค่าเกินกว่าค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟสูงสุด (Q_{limit}) หรือไม่ ถ้าเกินจะปรับให้มีค่าเท่ากับค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟสูงสุด (Q_{limit})
- 3) คำนวณกำลังไฟฟ้าปรากฏ (S_{ac}) ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และตรวจสอบว่ากำลังไฟฟ้าปรากฏ (S_{ac}) มีค่าเกินกว่าพิกัดกำลังไฟฟ้าขาออก (S_{max}) ของอินเวอร์เตอร์หรือไม่ ถ้ามีค่าเกินจะมีการจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง (P_{ac}) ให้กำลังไฟฟ้าปรากฏ (S_{ac}) มีค่าเท่ากับพิกัดกำลังไฟฟ้าขาออก (S_{max}) ของอินเวอร์เตอร์ และคำนวณกำลังไฟฟ้าจริงที่ลดลงเนื่องจากการจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (P_{waste})
- 4) คำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (Load flow calculation) เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าทุกบัสในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ($V_{grid, i}$)
- 5) ตรวจสอบว่ายังมีแรงดันไฟฟ้าที่บัสใดมีค่าต่ำหรือสูงกว่าที่ข้อกำหนดการเชื่อมต่อบบบโครงข่ายไฟฟ้างดข้อที่ 3.1 และ 3.2 ระบุไว้หรือไม่ หากแรงดันไฟฟ้ายังมีค่าต่ำหรือสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าตามข้อกำหนดจะต้องปรับค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Q_{ac}) โดยจะมีการวนซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าแรงดันไฟฟ้าทุกบัสในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมหรือกำลังไฟฟารีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟารีแอกทีฟสูงสุด (Q_{limit}) ก็จะออกจากการวนซ้ำ และจะได้ปริมาณการจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งน้อยที่สุดที่ทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าของทุกๆ บัสในระบบโครงข่ายไฟฟ้า (V_{grid}) มีค่าที่เหมาะสมที่สุด

7.4 หลักการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า

ในระบบโครงข่ายไฟฟ้าบางระบบที่มีปัญหาด้านแรงดันไฟฟ้า ทำให้การไฟฟ้าจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ที่มีหน้าที่รักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ได้แก่ ตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้า (Automatic voltage regulators: AVR) ที่สายป้อนของระบบโครงข่ายไฟฟ้า และหม้อแปลงไฟฟ้าที่สามารถปรับแท็ปได้ (On-load tap changer: OLTC) เพื่อแก้ไขปัญหาในระดับแรงดันไฟฟ้า โดยที่หลักการของการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าทั้ง 2 ประเภทมีดังนี้

- 1) ตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าจะติดตั้งอยู่ในสายป้อนและหม้อแปลงที่สามารถปรับแท็ปได้จะติดตั้งอยู่ในสถานีไฟฟ้าย่อย
- 2) การทำงานของตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าและหม้อแปลงที่สามารถปรับแท็ปได้จะมีการทำงานในลักษณะของ Load tap changer (LTC)
- 3) ช่วงการทำงานของตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าและหม้อแปลงที่สามารถปรับแท็ปได้จะต้องไม่เกินร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า
- 4) การทำงานของตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าและหม้อแปลงที่สามารถปรับแท็ปได้มีจุดประสงค์เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าของบัสที่ดูแลมีค่าอยู่ในเกณฑ์ร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า
- 5) ในระบบที่มีอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าหลายตัวดังภาพที่ 7.5 เวลาการทำงาน (Delay time) ของตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าและหม้อแปลงสามารถปรับแท็ปได้จะมีค่าที่ไม่เท่ากัน ทั้งนี้เพื่อไม่ให้เกิดการทำงานซ้ำซ้อนของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าแต่ละตัวที่ติดตั้งอยู่ในระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่มีอินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าจะสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าได้รวดเร็วกว่าอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าประเภทอื่นจะต้องทำงานก่อน อุปกรณ์ถัดมาที่ต้องทำงานคือตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าซึ่งหากในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 1 ตัว ตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องทำงานก่อนคือตัวที่ติดตั้งอยู่ใกล้กับสถานีไฟฟ้าและตัวถัดไปคือตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่ถัดไป และอุปกรณ์ที่ทำงานช้าที่สุดคือหม้อแปลงไฟฟ้าที่สามารถปรับแท็ปได้ เนื่องจากการปรับแท็ปของหม้อแปลงไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าอาจส่งผลต่อสายป้อนเส้นอื่นได้ ซึ่งลำดับการทำงานสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 7.1



ภาพที่ 7.5 ระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าหลายตัว

$$T_{PVGS} \ll T_{AVR1} < T_{AVR2} < \dots < T_{AVRn} < T_{OLTC} \quad (7.1)$$

โดยที่

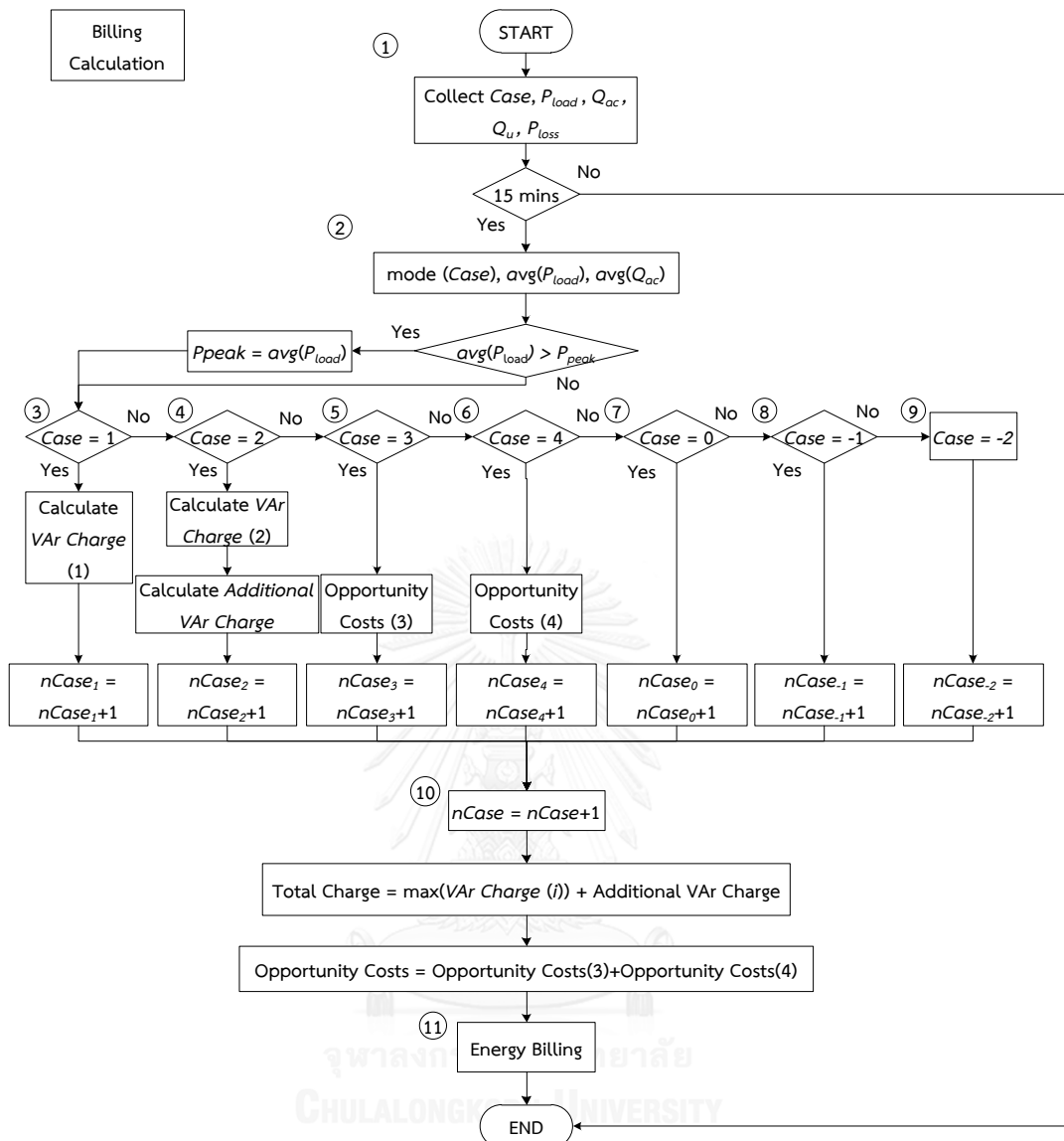
- T_{PVGS} คือ เวลาทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (วินาที)
 T_{AVRn} คือ เวลาทำงานของตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าตัวที่ n (วินาที)
 T_{OLTC} คือ เวลาทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าที่สามารถปรับแท็ปได้ (วินาที)

7.5 แบบจำลองการคำนวณรายรับและรายจ่ายจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

จากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในลักษณะต่างๆ ตามแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในหัวข้อที่ 7.1 และ 7.2 อาจส่งผลกระทบต่อรายรับและรายจ่ายของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยแบบจำลองในส่วนนี้จะมีการคำนวณเงินในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ การรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า และการใช้ไฟฟ้าภายในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ จากแนวคิดตามหัวข้อที่ 6.1 และ 6.2 การคำนวณในแบบจำลองนี้สามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่

- 1) ค่าพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- 2) ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายหรือรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟ
- 3) ค่าสูญเสียโอกาสจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริง
- 4) ค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า

โดยแบบจำลองการคำนวณรายรับและรายจ่ายสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 7.6



ภาพที่ 7.6 แบบจำลองการคำนวณรายรับและรายจ่ายจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองการคำนวณรายรับและรายจ่ายจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

แบบจำลองการคำนวณรายรับและรายจ่ายจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ดังภาพที่ 7.6 มีขั้นตอนการทำงาน 7 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

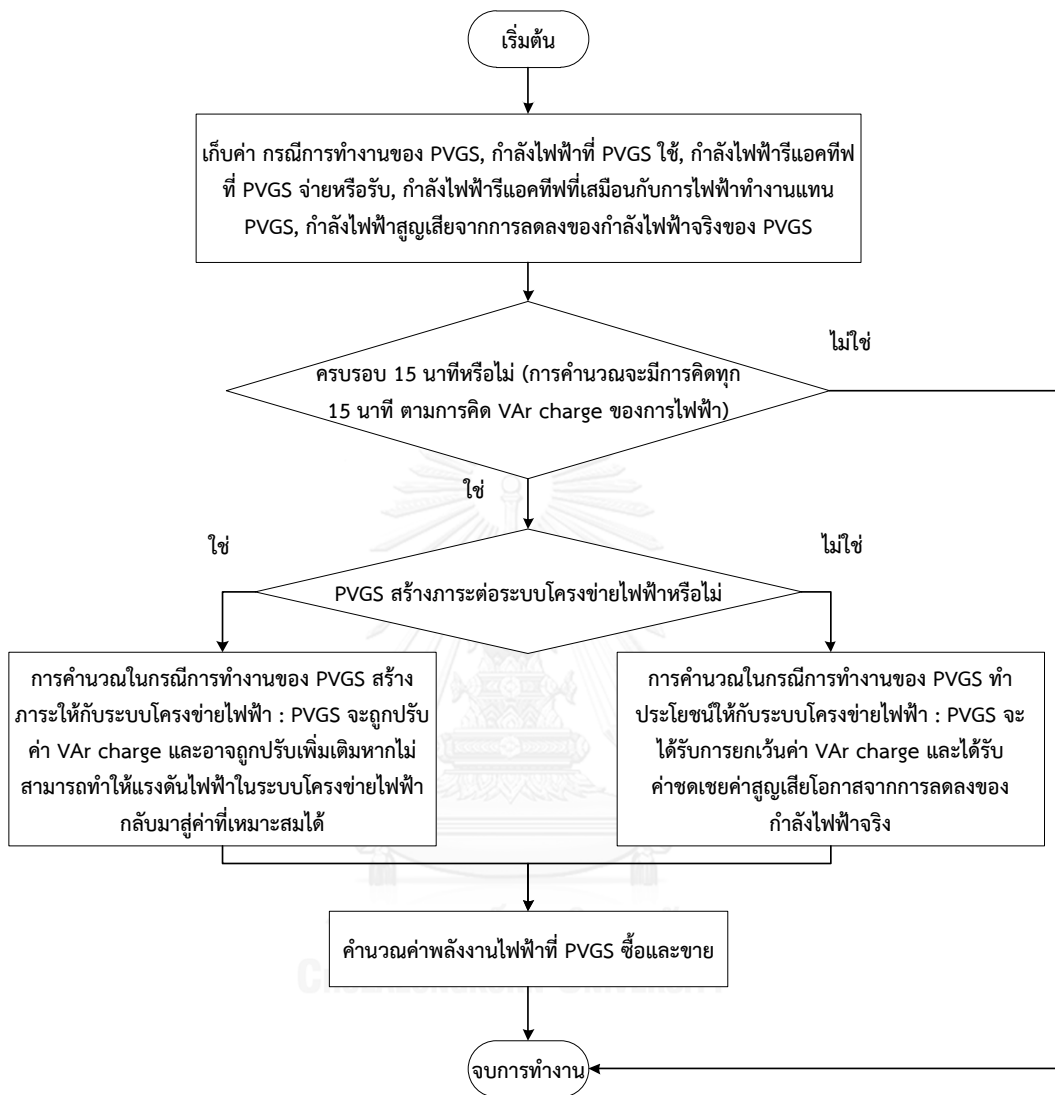
- 1) เก็บค่าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ต่างๆ ได้แก่ (1) กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน (Case) (2) กำลังไฟฟ้าจริงที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ใช้ (P_{load}) (3) กำลังไฟฟ้านี้อะคที่ที่จ่ายหรือรับ (Q_{ac}) (4) กำลังไฟฟ้านี้อะคที่ที่เกิดจากการ

ทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า (Q_v) (5) กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริง (P_{loss}) ในรอบ 5 นาทีนั้นจนกว่าจะครบ 15 นาทีเพื่อใช้ในการคำนวณต่อไป

- 2) หาค่าฐานนิยมของ $Case$ และค่าเฉลี่ยของ P_{load} และ Q_{ac} ใน 15 นาที หลังจากนั้นตรวจสอบว่าเป็นค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{peak}) หรือไม่
- 3) $Case = 1$ คือ กรณีที่สถานะของระบบโครงข่ายไฟฟ้าก่อนการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ทุกบัสมีแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ และสถานะของระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลังการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ทุกบัสมีแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติเช่นกัน ซึ่งในกรณีนี้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีรายจ่าย คือ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่อาจเกิดจากการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ($VAr Charge$) ตามหัวข้อที่ 6.1.1 และจะมีการเก็บจำนวน $Case$ ที่เกิดขึ้นเพื่อใช้ในการแสดงผลต่อไป
- 4) $Case = 2$ คือ กรณีที่สถานะของระบบโครงข่ายไฟฟ้าก่อนการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ทุกบัสมีแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ และสถานะของระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลังการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ บางบัสมีแรงดันไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ ซึ่งในกรณีนี้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีรายจ่าย 2 ส่วน คือ (1) ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่อาจเกิดจากการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ($VAr Charge$) ตามหัวข้อที่ 6.1.1 (2) ค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า ($Additional VAr Charge$) ตามหัวข้อที่ 6.1.3 และจะมีการเก็บจำนวน $Case$ ที่เกิดขึ้นเพื่อใช้ในการแสดงผลต่อไป
- 5) $Case = 3$ คือ กรณีที่สถานะของระบบโครงข่ายไฟฟ้าก่อนการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ บางบัสมีแรงดันไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ และสถานะของระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลังการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ทุกบัสมีแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ ซึ่งในกรณีนี้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีรายจ่าย คือ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่อาจเกิดจากการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ($VAr Charge$) ตามหัวข้อที่ 6.1.1 และมีรายรับ คือ ค่าสูญเสียโอกาสจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงซึ่งได้รับการชดเชยจากการไฟฟ้า ($Opportunity Costs$) ตามหัวข้อที่ 6.1.2 และจะมีการเก็บจำนวน $Case$ ที่เกิดขึ้นเพื่อใช้ในการแสดงผลต่อไป

- 6) $Case = 4$ คือ กรณีที่สถานะของระบบโครงข่ายไฟฟ้าก่อนการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ บางบัสมีแรงดันไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ และสถานะของระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลังการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ บางบัสมีแรงดันไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติเช่นกัน ซึ่งในกรณีนี้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีรายจ่าย คือ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่อาจเกิดจากการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ($VAr Charge$) ตามหัวข้อที่ 6.1.1 และมีรายรับ คือ ค่าสูญเสียโอกาสจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงซึ่งได้รับการชดเชยจากการไฟฟ้า ($Opportunity Costs$) ตามหัวข้อที่ 6.1.2 และจะมีการเก็บจำนวน $Case$ ที่เกิดขึ้นเพื่อใช้ในการแสดงผลต่อไป
- 7) $Case = 0$ คือ กรณีที่แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมโดยที่ไม่มีการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และอุปกรณ์รักษาแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า โดยจะเก็บจำนวน $Case$ ที่เกิดขึ้นเพื่อใช้ในการแสดงผลต่อไป
- 8) $Case = -1$ คือ กรณีที่แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าอยู่นอกช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ และมีการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟเพื่อช่วยรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งในกรณีนี้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีรายจ่าย คือ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่อาจเกิดจากการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ($VAr Charge$) ตามหัวข้อที่ 6.1.1 และจะมีการเก็บจำนวน $Case$ ที่เกิดขึ้นเพื่อใช้ในการแสดงผลต่อไป
- 9) $Case = -2$ คือ กรณีที่แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าอยู่นอกช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ และมีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้าเพื่อช่วยให้ระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ากลับมามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ โดยจะเก็บจำนวน $Case$ ที่เกิดขึ้นเพื่อใช้ในการแสดงผลต่อไป
- 10) เก็บจำนวน $Case$ ทั้งหมดไว้เพื่อใช้ในการแสดงผล คำนวณค่าปรับสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ($Total Charge$) ซึ่งเกิดจากค่าปรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ($VAr Charge$) สูงสุดจากการทำงานในทุกกรณี รวมกับค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า ($Additional VAr Charge$) และจะคำนวณค่าสูญเสียโอกาสจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริง ($Opportunity Costs$)
- 11) คำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งในส่วนที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขายพลังงานไฟฟ้าให้กับการไฟฟ้าและส่วนที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ซื้อพลังงานจากการไฟฟ้าเพื่อการทำงานภายในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ตามหัวข้อที่ 3.5 และ 3.6

โดยจากภาพที่ 7.6 จะสามารถสรุปแบบจำลองการคำนวณรายรับและรายจ่ายจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดัง ภาพที่ 7.7



ภาพที่ 7.7 แบบจำลองการคำนวณรายรับและรายจ่ายจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย

7.6 หลักการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มากกว่าหนึ่งระบบบนสายป้อนเดียวกัน

ในบางระบบโครงข่ายไฟฟ้าอาจมีการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มากกว่าหนึ่งระบบ ทำให้อาจเกิดการสับสนในการทำงานเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ารวมทั้งอาจเกิดความไม่ยุติธรรมในการคำนวณรายรับและรายจ่ายที่เกิดขึ้นจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีหลายระบบบนสายป้อนเดียวกัน ในอนาคตเมื่อมีเพิ่มขึ้นของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบโครงข่ายไฟฟ้าทั่วประเทศอาจทำให้เกิดกรณีดังกล่าวเพิ่มขึ้นเช่นกัน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอแนวคิดการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มากกว่าหนึ่งระบบบนสายป้อนเดียวกัน โดยแนวคิดที่ได้นำเสนอจะเกี่ยวข้องกับการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละระบบและการคำนวณรายรับและรายจ่ายที่เกิดขึ้นจากการทำงานดังกล่าว

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกำหนดให้การเชื่อมต่อเพื่อจ่ายไฟฟ้าเข้าระบบเชิงพาณิชย์ (COD) ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เกิดขึ้นในเวลาที่ไม่พร้อมกัน ดังนั้นจะมีหนึ่งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าก่อน (ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 1: PVGS1) โดยระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการทำงานตามหัวข้อที่ 7.2 ถึง 7.4 และในเวลาต่อมาเมื่อมีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์อีกระบบเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า (ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 2: PVGS2) ในมุมมองของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 1 การเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 2 จะเปรียบเสมือนการเปลี่ยนแปลงของระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ไม่ได้เกิดจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 1 ซึ่งหากเกิดการเปลี่ยนแปลงจนทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของระดับแรงดันไฟฟ้าปกติ ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ 1 จะทำงานในกรณีที่ 3 หรือ 4 ตามตารางที่ 6.1 ส่วนในมุมมองของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 2 ระบบโครงข่ายไฟฟ้าและระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 1 จะเปรียบเสมือนเป็นระบบโครงข่ายไฟฟ้าเดิมที่มีการทำงานตามปกติ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าจะเกิดจากการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 2 ดังนั้นจะมีการทำงานในกรณีที่ 1 หรือ 2 ตามตารางที่ 6.1 ซึ่งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 2 จะต้องจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าก่อนระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 1 ซึ่งลำดับการทำงานสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 7.2

$$T_{PVGS2} < T_{PVGS1} \ll T_{AVR1} < T_{AVR2} < \dots < T_{AVRn} < T_{OLTC} \quad (7.2)$$

โดยที่

T_{PVGS1} คือ เวลาทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 1 (วินาที)

T_{PVGS2} คือ เวลาทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 2 (วินาที)



บทที่ 8

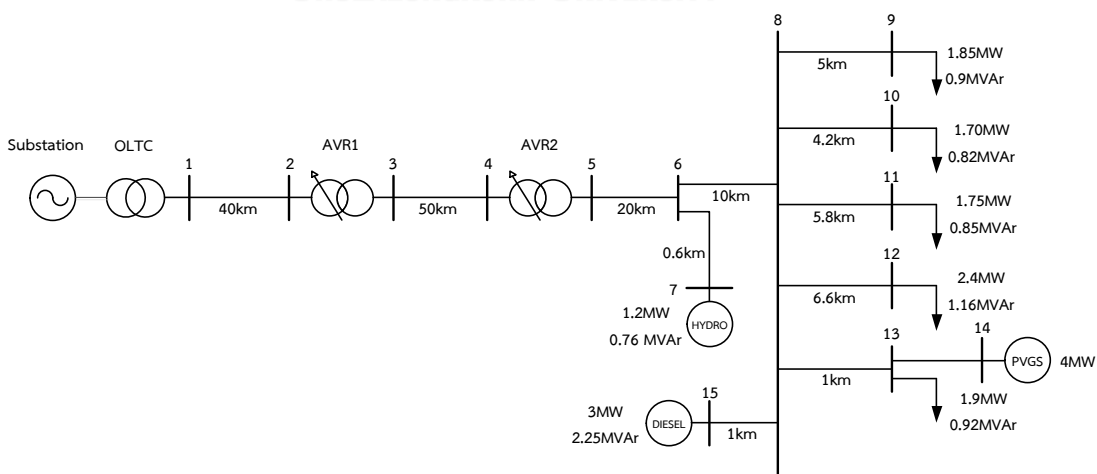
ระบบทดสอบ

ในบทนี้จะได้นำเสนอข้อมูลของระบบที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งจะประกอบด้วยข้อมูลต่างๆ ได้แก่

- 8.1 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- 8.2 ระบบโครงข่ายไฟฟ้า
- 8.3 ข้อมูลลักษณะการใช้ไฟฟ้า
- 8.4 ข้อมูลความเข้มแสงและอุณหภูมิ

8.1 ระบบโครงข่ายไฟฟ้า

ระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ คือ ระบบโครงข่ายไฟฟ้า อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน ซึ่งระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีจำนวน 15 บัส ดังแสดงในภาพที่ 8.1 มีโวลตรวมสูงสุด 9.6 เมกะวัตต์ 4.65 เมกะวาร์ อิมพีแดนซ์ของสายมีค่า $0.517+j0.251$ โอห์ม โดยในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้า 3 อุปกรณ์ ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้าที่สามารถปรับแท็ปได้ (OLTC) ตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าตัวที่ 1 (AVR1) และตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าตัวที่ 2 (AVR2) ในระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ 3 ระบบ ได้แก่ ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (PVGS) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำ (HYDRO) และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล (DIESEL) ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซลมีการทำงานดังภาพที่ 8.1



ภาพที่ 8.1 ระบบโครงข่ายไฟฟ้า อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน

ตารางที่ 8.1 การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน

ประเภทเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	ขนาดกำลังการผลิต	เวลาเดินเครื่อง
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังน้ำ	1.2 MW / 0.76 MVar	ตลอด 24 ชั่วโมง
เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล	2 MW / 1.5 MVar	18.00 – 22.30 น.

8.2 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ทดสอบ

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ทดสอบเป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ตั้งอยู่ในระบบโครงข่ายไฟฟ้า อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน ซึ่งกำลังการผลิตติดตั้งรวม 4.112 เมกะวัตต์ และกำลังการผลิตตามสัญญารวม 3.75 เมกะวัตต์ โดยมีจำนวนโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์มากกว่า 41,120 โมดูล ซึ่งมีรายละเอียดของเซลล์แสงอาทิตย์และอินเวอร์เตอร์ดังต่อไปนี้

8.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นข้อมูลทางเทคนิคของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น GSB100S33 ของบริษัท GENERAL SOLAR POWER (Yantai) จำกัด [48] ที่มีกำลังการผลิตสูงสุดต่อแผงที่ 100 W และมีพารามิเตอร์อื่น ๆ ดังตารางที่ 8.2

ตารางที่ 8.2 ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท General Solar Power จำกัด

พารามิเตอร์ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล	
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{mpp})	100 (W)
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{mpp})	76 (V)
กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{mpp})	1.3 (A)
แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc})	100 (V)
กระแสลัดวงจร (I_{sc})	1.64 (A)
ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของกระแสต่ออุณหภูมิ (K_i)	0.0003 (A/°C)
ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าต่ออุณหภูมิ (K_v)	-0.42 (V/°C)
จำนวนของเซลล์ที่มีการต่ออนุกรมเป็นโมดูล (n_s)	119

8.1.2 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์คือ อินเวอร์เตอร์รุ่น APOLLO GTP-512 ของบริษัท LEONICS จำกัด [55] ซึ่งมีการใช้งานจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน โดยมีข้อมูลเทคนิคดังที่ได้ซึ่งมีข้อมูลเทคนิคดังตารางที่ 8.3

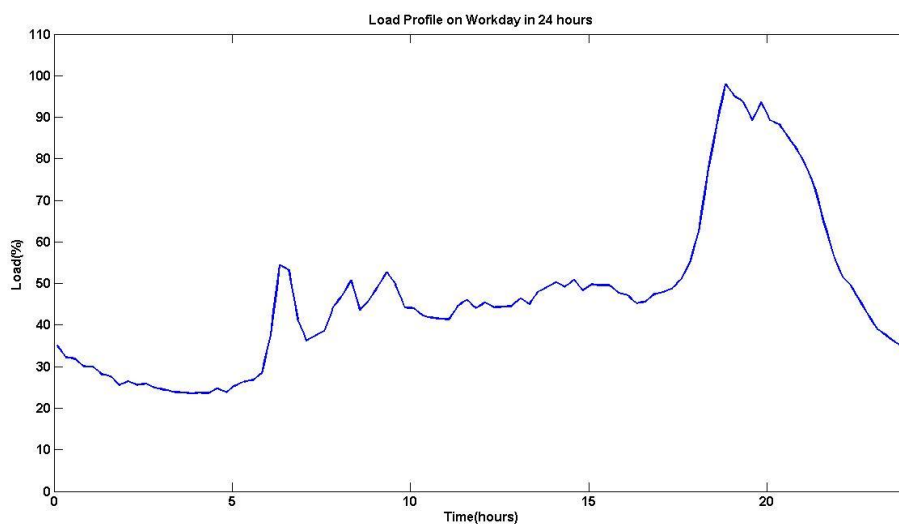
ตารางที่ 8.3 ข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

		Product	LEONICS APOLLO GTP-512
		Parameter	
Input	Maximum dc power (kW)		275
	DC voltage range (V)		400-700
	Maximum dc current (A)		688
Output	Maximum ac power (kVA)		250
	Nominal ac voltage (V)		400
	AC voltage range (V)		380-415
	Maximum ac current (A)		625
	Frequency (Hz)		50, 60
	Power factor		0.9 – 1.0 lead/lag
η	Peak efficiency (%)		96.3
	Euro/CEC efficiency (%)		-/ -

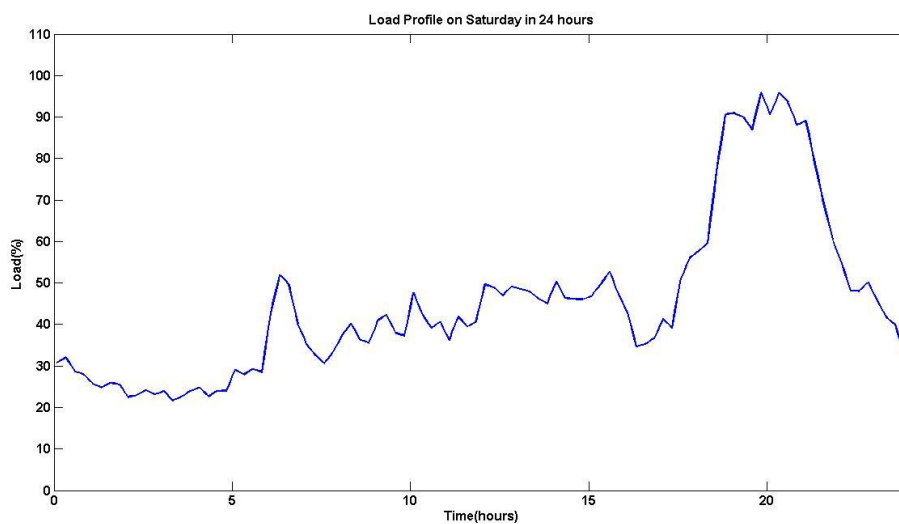
8.3 ข้อมูลลักษณะการใช้ไฟฟ้า

ลักษณะการใช้ไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองการเปลี่ยนแปลงของโหลดในหนึ่งวันเป็นลักษณะการใช้ไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กปน.1 เชียงใหม่ โหลดประเภทบ้านอยู่อาศัยมากกว่า 150 หน่วยต่อเดือน โหลดประเภทบ้านอยู่อาศัยมากกว่า 150 หน่วยต่อเดือน และโหลดประเภทกิจการขนาดเล็ก ซึ่งเป็นโหลดที่จะสามารถแสดงให้เห็นถึงการใช้ไฟฟ้าในชนบทที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มักเชื่อมต่อยู่ โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้ข้อมูลลักษณะการใช้ไฟฟ้าในเดือนมีนาคม

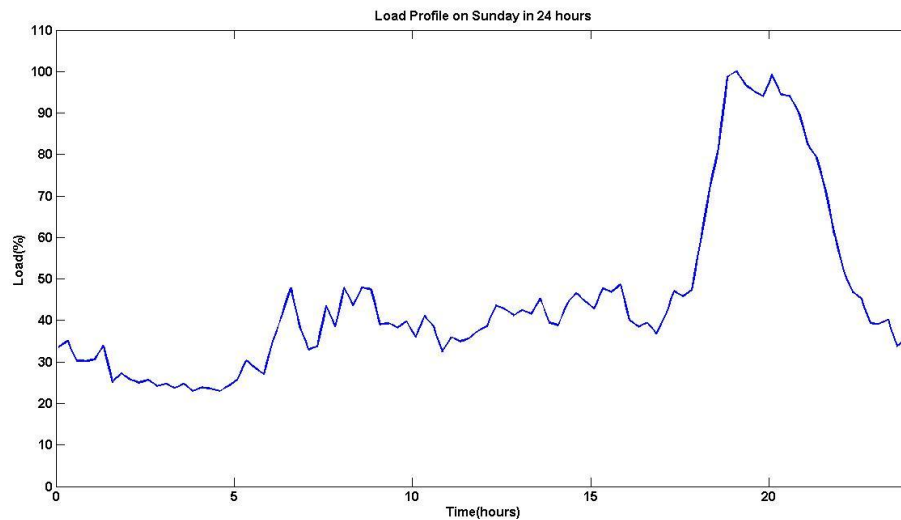
พ.ศ. 2557 ซึ่งข้อมูลลักษณะการใช้ไฟฟ้ารวมของโหลดทั้ง 3 ประเภทที่แบ่งเป็นโหลดวันทำงาน โหลดวันเสาร์ และโหลดวันอาทิตย์ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 8.2 ถึง 8.4 ตามลำดับ



ภาพที่ 8.2 ข้อมูลลักษณะการใช้ไฟฟ้าของกฟน.1 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2557 ในวันทำงาน



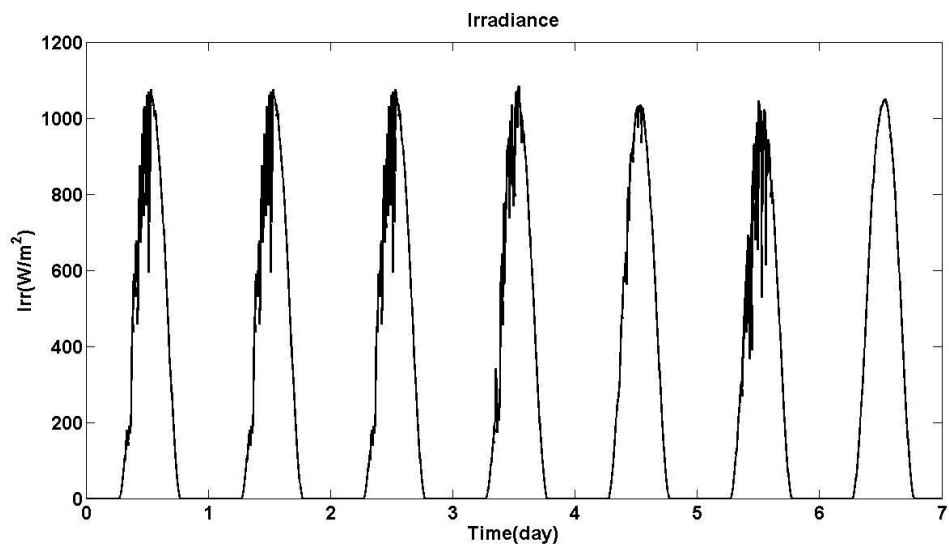
ภาพที่ 8.3 ข้อมูลลักษณะการใช้ไฟฟ้าของกฟน.1 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2557 ในวันเสาร์



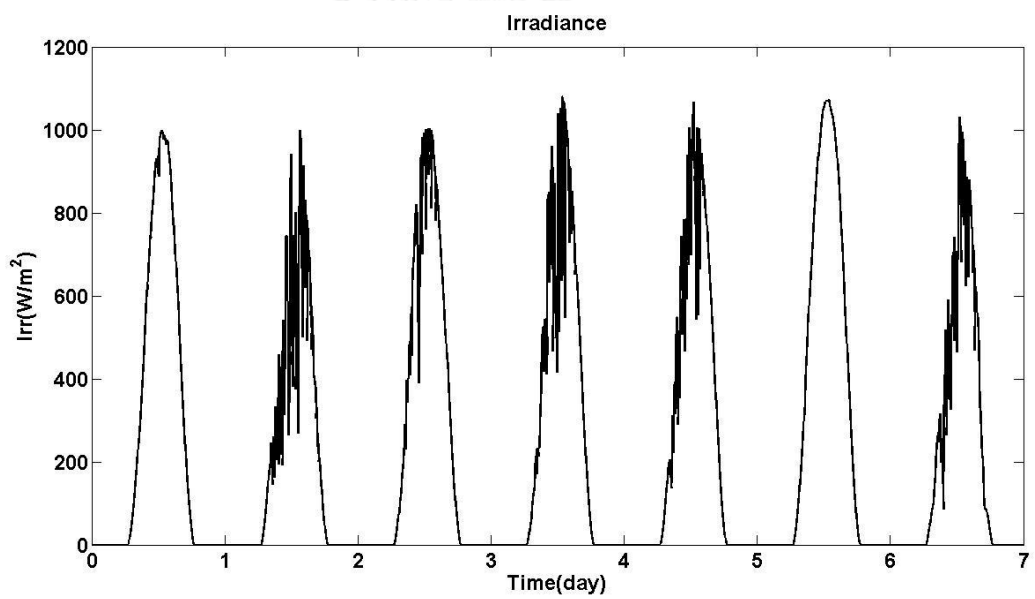
ภาพที่ 8.4 ข้อมูลลักษณะการใช้ไฟฟ้าของกฟน.1 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2557 ในวันอาทิตย์

8.4 ข้อมูลความเข้มแสงและอุณหภูมิ

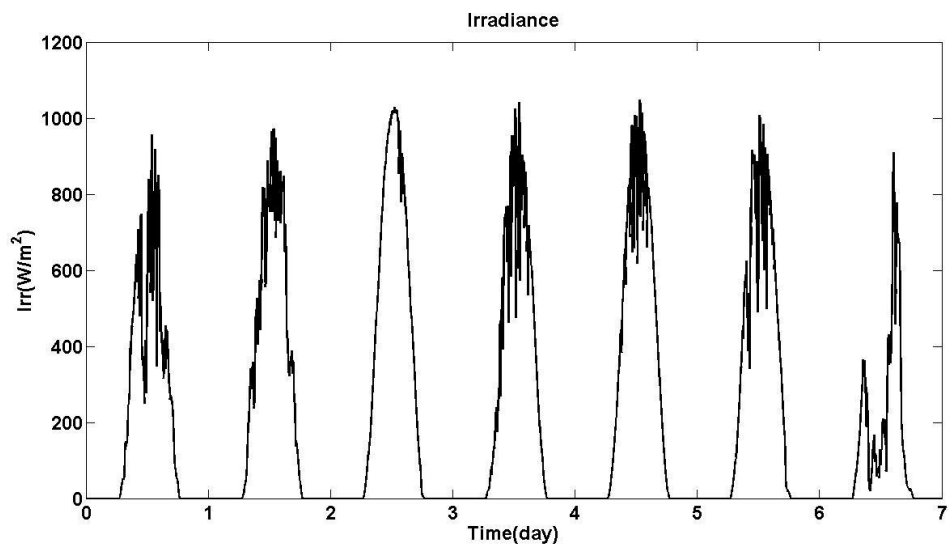
ข้อมูลความเข้มแสงและอุณหภูมิของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบไดโอดเดี่ยวในหัวข้อที่ 4.1.1 เป็นข้อมูลที่ได้รับจากอินเวอร์เตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอยู่บนดาดฟ้าอาคารเจริญวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นข้อมูลความเข้มแสงและอุณหภูมิในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2557 โดยสามารถเก็บข้อมูลได้ทุก 5 นาที โดยใน 1 วันจะได้ค่ารวมทั้งหมด 288 ค่า ซึ่งความเข้มแสงตลอด 24 ชั่วโมงในเดือนมีนาคมสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 8.5 ถึง 8.9 และอุณหภูมิตลอด 24 ชั่วโมงสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 8.10 ถึง 8.14



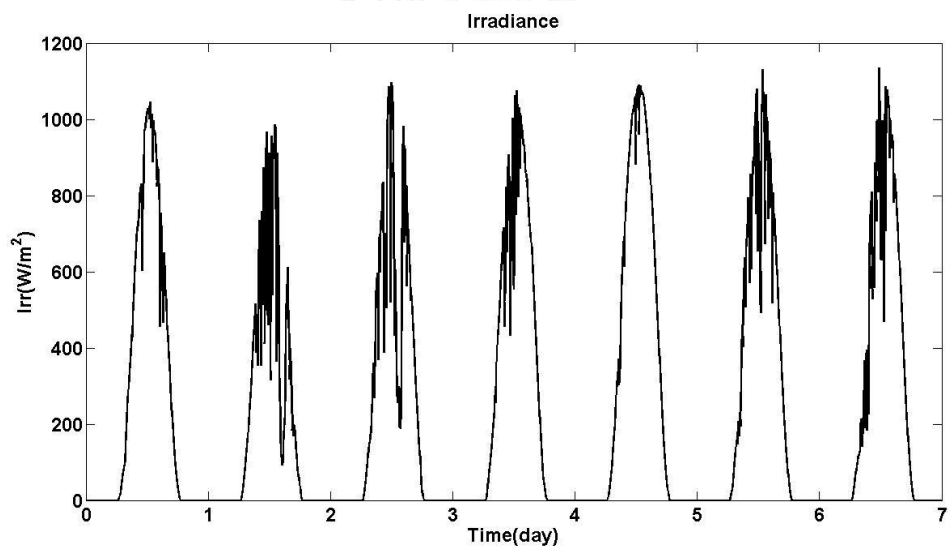
ภาพที่ 8.5 ความเข้มแสงตลอด 24 ชั่วโมง ในวันที่ 1-7 เมษายน พ.ศ. 2557



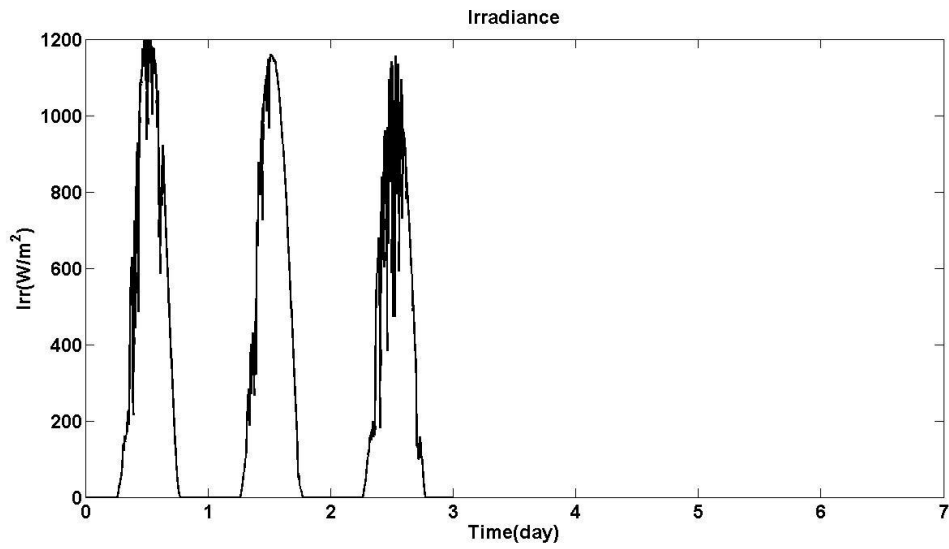
ภาพที่ 8.6 ความเข้มแสงตลอด 24 ชั่วโมง ในวันที่ 8-14 เมษายน พ.ศ. 2557



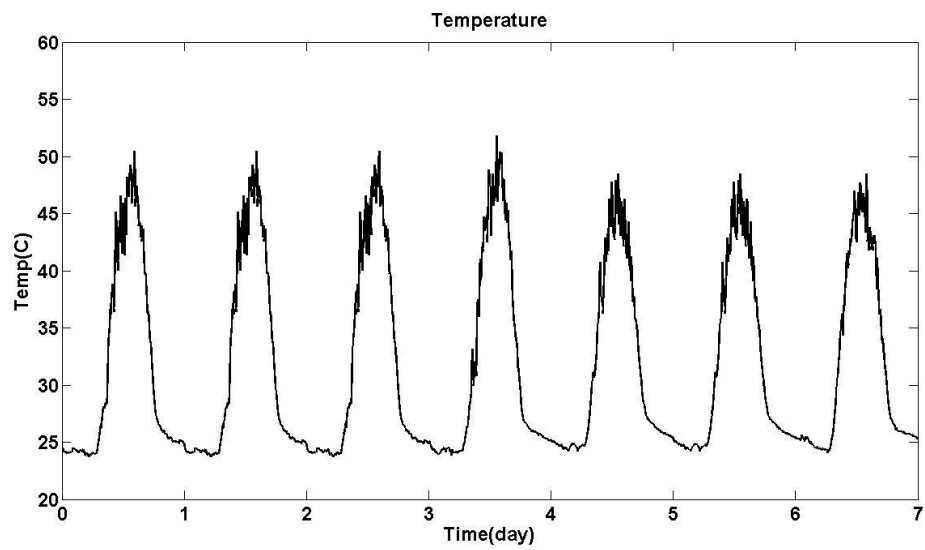
ภาพที่ 8.7 ความเข้มแสงตลอด 24 ชั่วโมง ในวันที่ 15-21 เมษายน พ.ศ. 2557



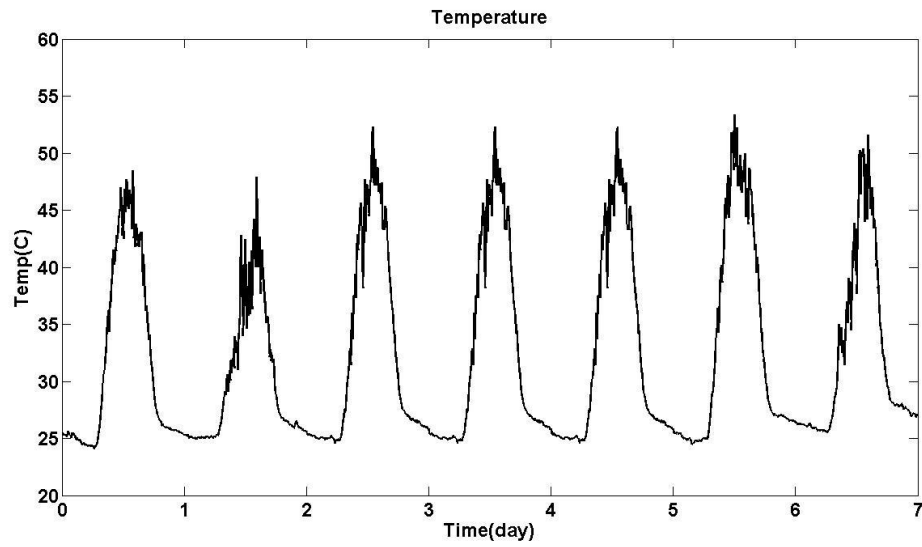
ภาพที่ 8.8 ความเข้มแสงตลอด 24 ชั่วโมง ในวันที่ 22-28 เมษายน พ.ศ. 2557



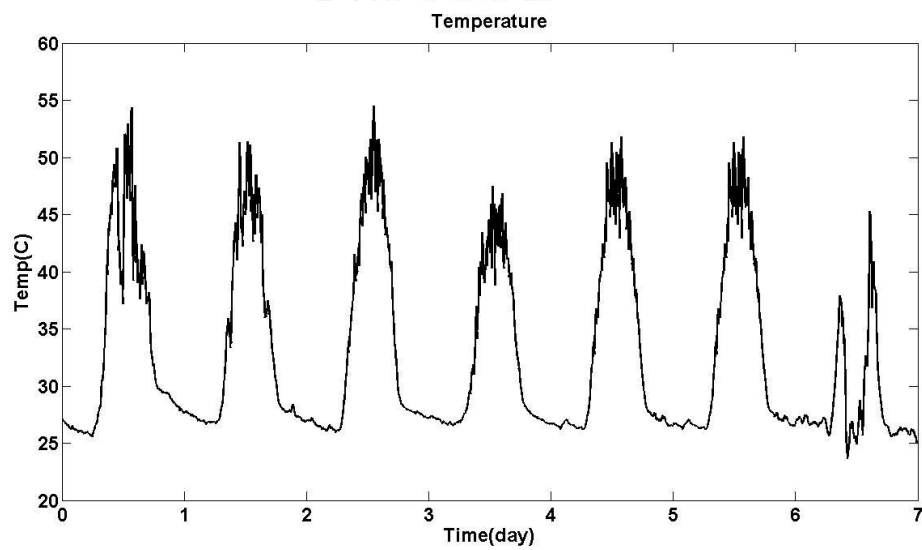
ภาพที่ 8.9 ความเข้มแสงตลอด 24 ชั่วโมง ในวันที่ 29-31 เมษายน พ.ศ. 2557



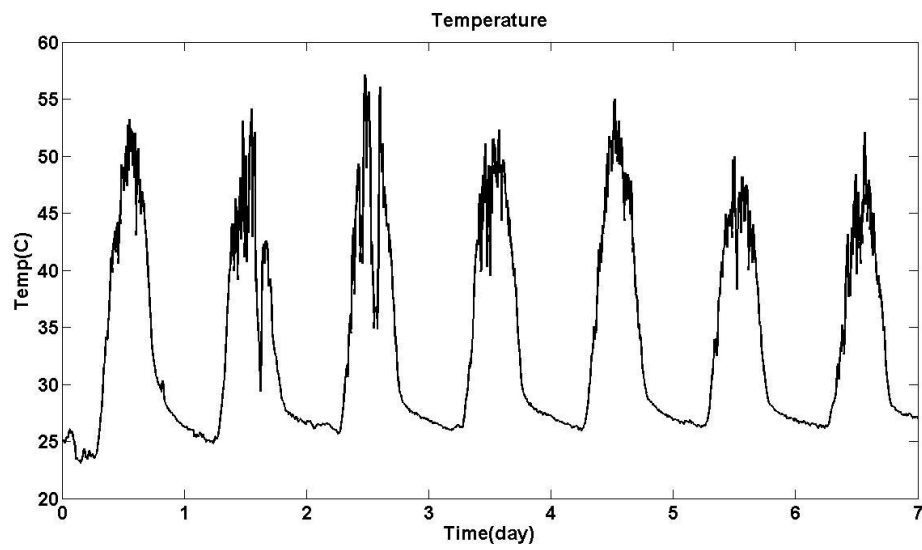
ภาพที่ 8.10 อุณหภูมิตลอด 24 ชั่วโมง ในวันที่ 1-7 เมษายน พ.ศ. 2557



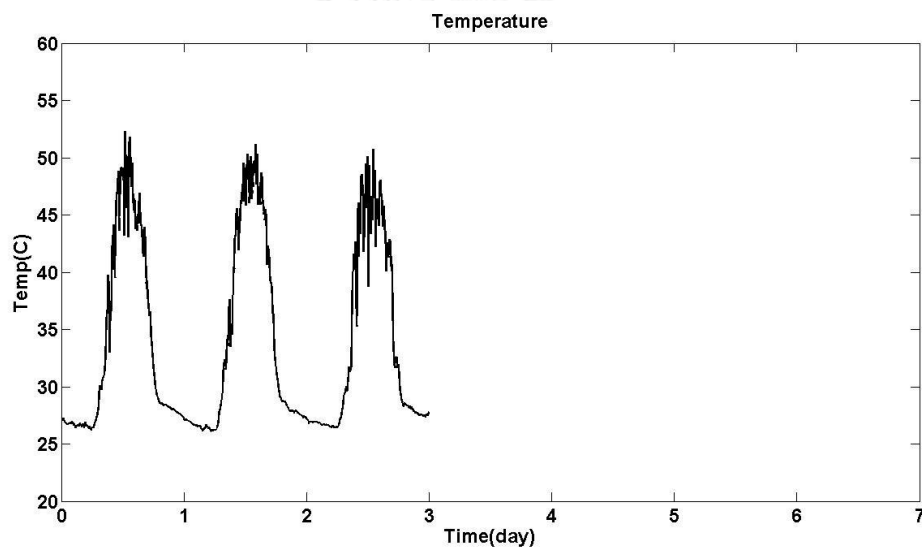
ภาพที่ 8.11 อุณหภูมิตลอด 24 ชั่วโมง ในวันที่ 8-14 เมษายน พ.ศ. 2557



ภาพที่ 8.12 อุณหภูมิตลอด 24 ชั่วโมง ในวันที่ 15-21 เมษายน พ.ศ. 2557



ภาพที่ 8.13 อุณหภูมิตลอด 24 ชั่วโมง ในวันที่ 22-28 เมษายน พ.ศ. 2557



ภาพที่ 8.14 อุณหภูมิตลอด 24 ชั่วโมง ในวันที่ 29-31 เมษายน พ.ศ. 2557

บทที่ 9

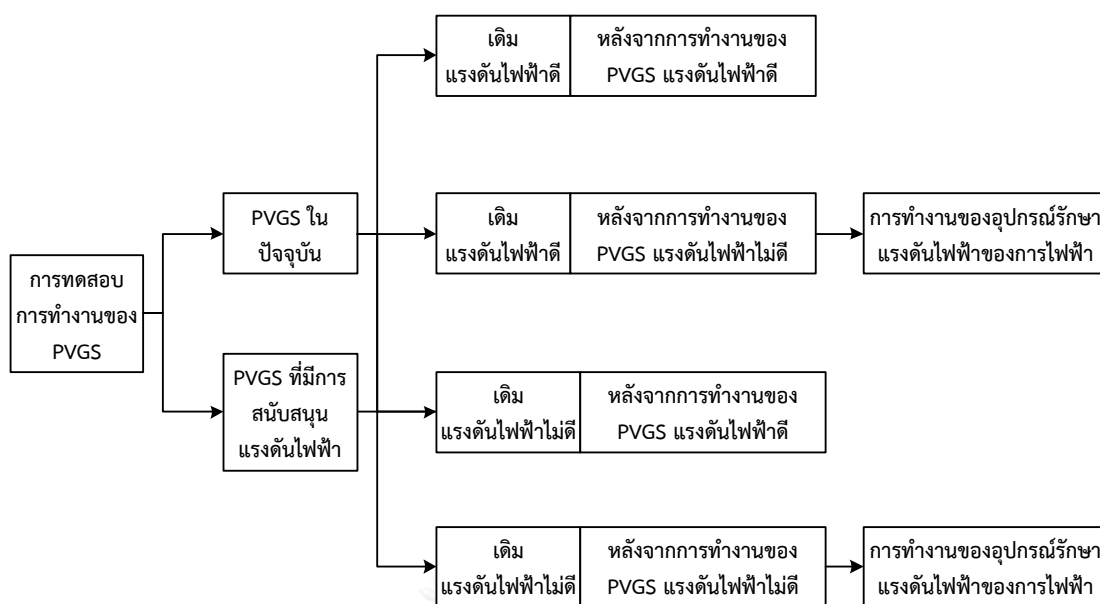
ผลการทดสอบ

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากทฤษฎี และหลักการที่ได้นำเสนอในบทที่ 2 ถึง 7 โดยการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ ได้แก่

- 9.1 ผลการทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในกรณีต่างๆ
- 9.2 ผลการทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในระยะเวลา 1 เดือน
- 9.3 ผลการทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในกรณีที่ไม่มีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า ในระยะเวลา 1 เดือน
- 9.4 ผลการทดสอบระบบโครงข่ายไฟฟ้าเมื่อมีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ระบบ เชื่อมต่อบนสายป้อนเดียวกัน

9.1 ผลการทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในกรณีต่างๆ

ในหัวข้อนี้จะได้ทำการทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในลักษณะแรงดันไฟฟ้าในกรณีต่างๆ จากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ตามหัวข้อที่ 6.2 ซึ่งจะมีการทดสอบในกรณีต่างๆ ดังแสดงได้ดังภาพที่ 9.1 โดยระบบทดสอบที่ใช้ในการทดสอบของหัวข้อนี้ คือ ระบบโครงข่ายไฟฟ้า อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน ดังหัวข้อที่ 8.1 และระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ทดสอบ เป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการทำงานอยู่จริงในระบบโครงข่ายไฟฟ้า อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน ดังหัวข้อที่ 8.2 ส่วนข้อมูลความเข้มแสงและอุณหภูมิที่ใช้จำลองกำลังการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นข้อมูลที่ได้รับจากอินเวอร์เตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอยู่บนตาดฟ้าอาคารเจริญวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ. 2557



ภาพที่ 9.1 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในกรณีต่างๆ

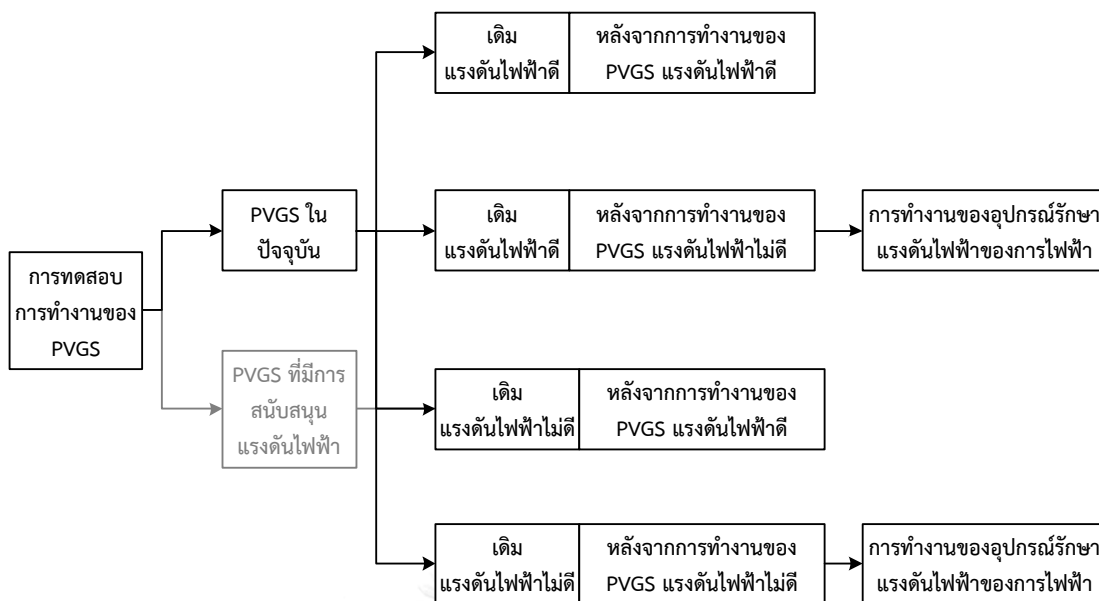
ในการทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในกรณีต่างๆ สามารถแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

9.1.1 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ในกรณีต่างๆ

9.1.2 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณีต่างๆ

9.1.1 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ในกรณีต่างๆ

ในการทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบเพื่อแสดงการทำงานของแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันในทั้ง 4 กรณี ดังแสดงได้ดังภาพที่ 9.2



ภาพที่ 9.2 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ในกรณีต่างๆ

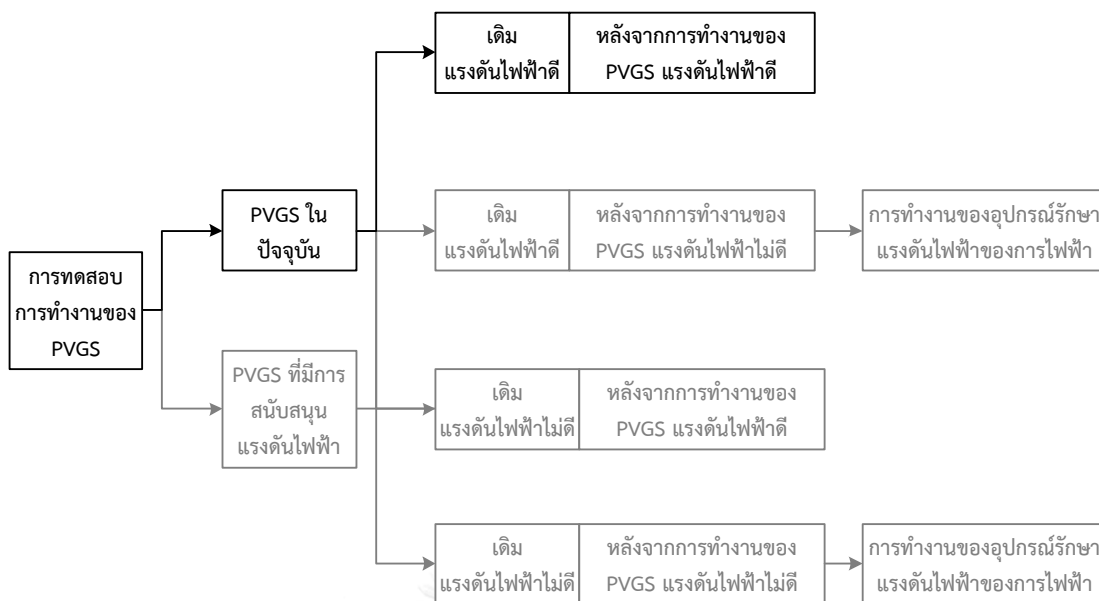
ในการทดสอบจะแบ่งช่วงเวลาการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ เป็นช่วงเวลา 5 ช่วง ได้แก่ (1) ช่วงเวลา Time 0-1 จะเป็นช่วงเวลาที่ยังไม่มีมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (2) ช่วงเวลา Time 1-2 จะเป็นช่วงเวลาที่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า (3) ช่วงเวลา Time 2-3 จะเป็นช่วงเวลาที่จะมีการปรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ แต่ในแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันจะไม่มีมีการปรับการทำงานในส่วนนี้ จะคงค่ากำลังไฟฟ้รีแอกทีฟไว้ โดยการทดสอบในส่วนนี้จะกำหนดให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 1 (4) ช่วงเวลา Time 3-4 จะเป็นช่วงเวลาที่มีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าเพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ (5) ช่วงเวลา Time 4-5 จะเป็นช่วงเวลาที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอยู่ในสภาวะอยู่ตัวหลังจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งผลการทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันจะแบ่งการทดสอบได้เป็น 4 ส่วน คือ

9.1.1.1 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้แรงดันไฟฟ้าดีและดีตามลำดับ

- 9.1.1.2 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้แรงดันไฟฟ้าดีและไม่ดีตามลำดับ
- 9.1.1.3 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้แรงดันไฟฟ้าไม่ดีและดีตามลำดับ
- 9.1.1.4 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้แรงดันไฟฟ้าไม่ดีและไม่ดีตามลำดับ

9.1.1.1 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าดีและดีตามลำดับ

ในส่วนนี้จะได้นำเสนอการทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันตามหัวข้อที่ 7.1 และมีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าตามหัวข้อที่ 7.4 ซึ่งจะเป็นกรณีการทำงานดังภาพที่ 9.3 โดยรายละเอียดโหลด ความเข้มแสง และอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 9.1 และข้อมูลกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ช่วงเวลาต่างๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 9.2 โดยระดับแรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ซึ่งเป็นบัสที่มีการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าที่สามารถปรับแท็ปได้ (OLTC) ตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าตัวที่ 1 (AVR1) และ ตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าตัวที่ 2 (AVR2) ตามลำดับ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9.4 และระดับแรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9.5



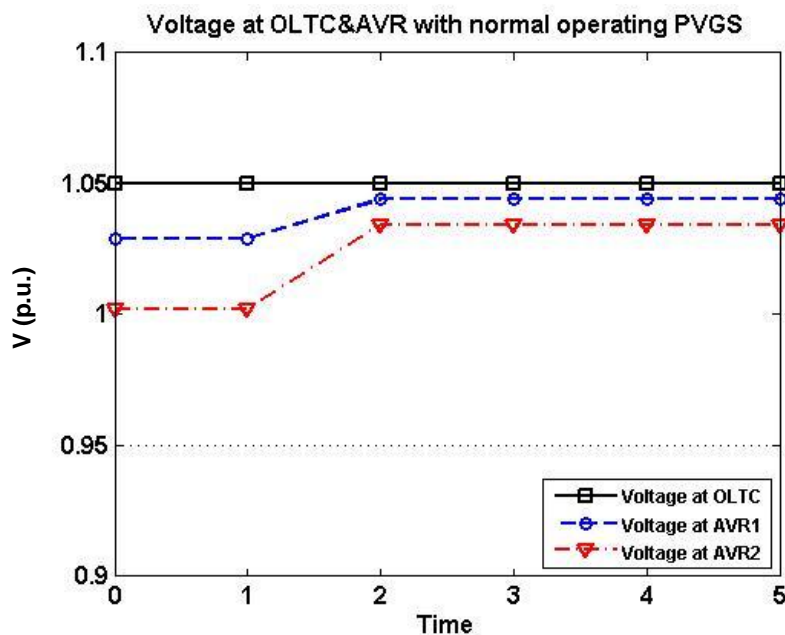
ภาพที่ 9.3 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าดีและดีตามลำดับ

ตารางที่ 9.1 ข้อมูลโหลด ความเข้มแสง และอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ

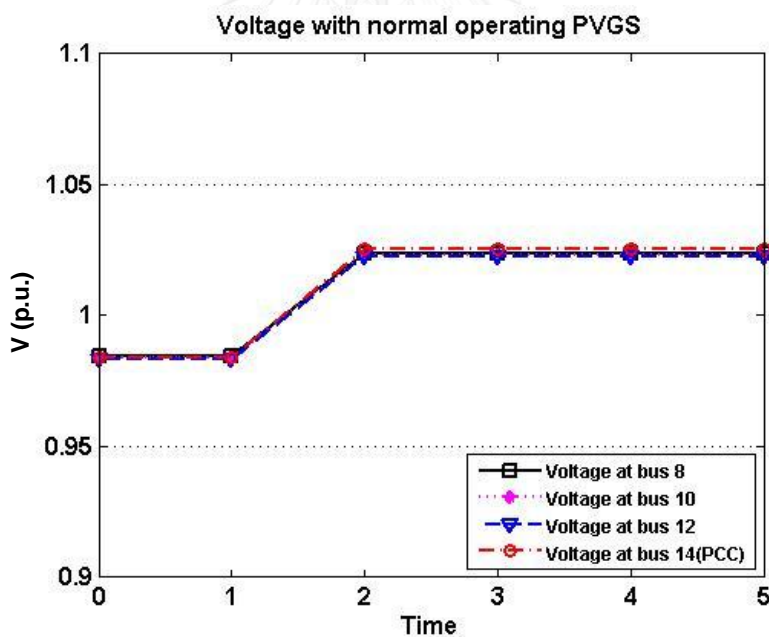
โหลดกำลังไฟฟ้าจริง (MW)	โหลดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVar)	ความเข้มแสง (W/m^2)	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
4.09	1.98	1,131.61	44.14

ตารางที่ 9.2 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ช่วงเวลาต่างๆ

	Time 0-1	Time 1-2	Time 2-3	Time 3-4	Time 4-5
P_{ac} (MW)	0	3.75	3.75	3.75	3.75
Q_{ac} (MW)	0	0	0	0	0
V_{oltc} (p.u.)	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
N1:N2 / V (p.u.) AVR1	0.988 / 1.029	0.988 / 1.044	0.988 / 1.044	0.988 / 1.044	0.988 / 1.044
N1:N2 / V (p.u.) AVR2	0.988 / 1.002	0.988 / 1.034	0.988 / 1.034	0.988 / 1.034	0.988 / 1.034



ภาพที่ 9.4 แรงดันไฟฟ้าในบัสที่ 1, 3 และ 5



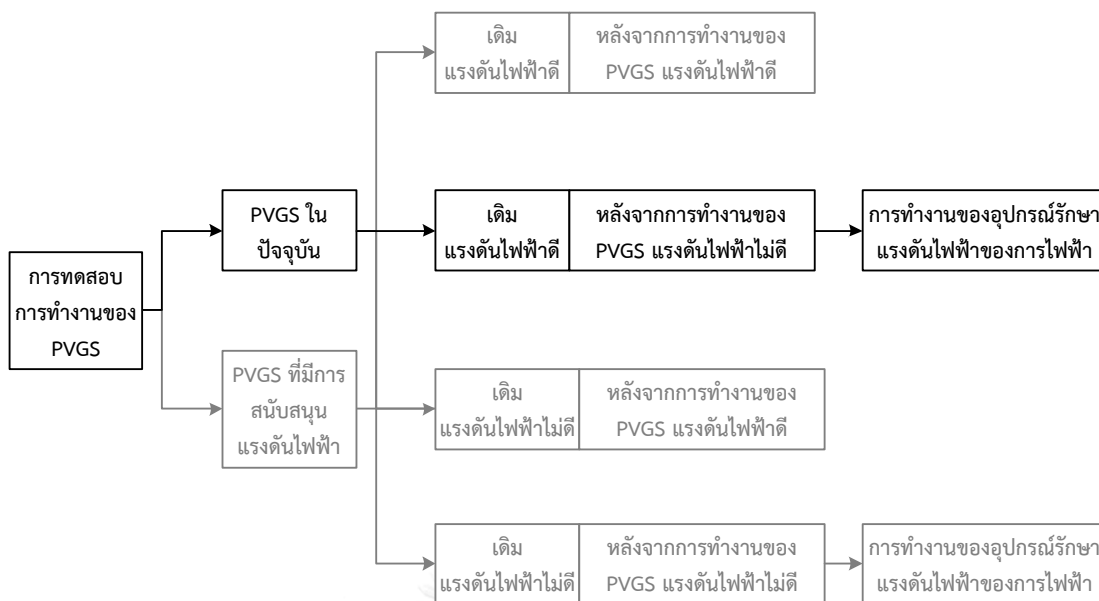
ภาพที่ 9.5 แรงดันไฟฟ้าในบัสที่ 8, 10, 12 และ 14

จากตารางที่ 9.1-9.2 และภาพที่ 9.4-9.5 ในช่วงเวลา Time 0-1 จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะมีค่าที่อยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ ในช่วงเวลา Time 1-2 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าที่เพิ่มขึ้น แต่ระดับแรงดันไฟฟ้ายังคงมีค่าที่อยู่ในช่วงร้อยละ

95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ ในช่วงเวลา Time 2-3 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะไม่มีการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟตามแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันซึ่งได้ตั้งค่าให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่เท่ากับ 1 ทำให้แรงดันไฟฟ้ายังคงค่าอยู่เท่ากับช่วงเวลา Time 1-2 ในช่วงเวลา Time 3-4 อุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องทำงานเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติอยู่แล้ว และช่วงเวลา Time 4-5 แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ ซึ่งจากช่วงเวลาต่างๆ จะเห็นว่าการทำงานตามแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันในกรณีนี้ยังคงทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ดังนั้นจึงไม่มีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้า

9.1.1.2 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าดีและไม่ดีตามลำดับ

ในส่วนนี้จะได้นำเสนอการทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันตามหัวข้อที่ 7.1 และมีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าตามหัวข้อที่ 7.4 ซึ่งจะเป็นกรณีการทำงานดังภาพที่ 9.6 โดยรายละเอียดโหลด ความเข้มแสง และอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 9.3 และข้อมูลกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ช่วงเวลาต่างๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 9.4 โดยระดับแรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ซึ่งเป็นบัสที่มีการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าที่สามารถปรับแท็ปได้ (OLTC) ตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าตัวที่ 1 (AVR1) และ ตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าตัวที่ 2 (AVR2) ตามลำดับ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9.7 และระดับแรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9.8



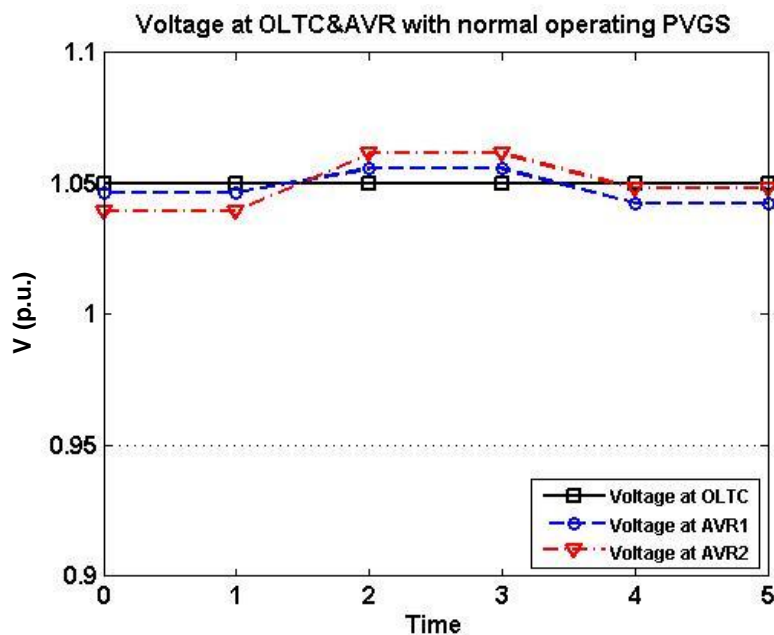
ภาพที่ 9.6 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าดีและไม่ดีตามลำดับ

ตารางที่ 9.3 ข้อมูลโหลด ความเข้มแสง และอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ

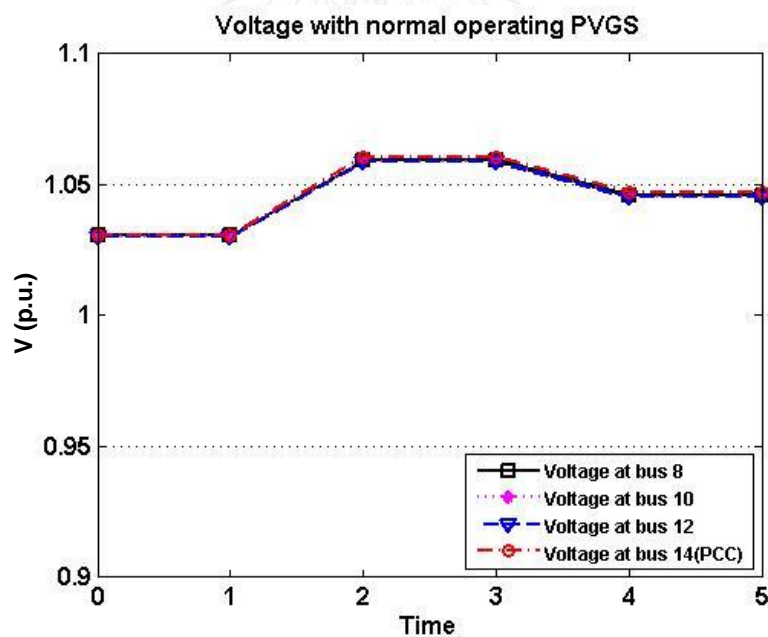
โหลดกำลังไฟฟ้าจริง (MW)	โหลดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVar)	ความเข้มแสง (W/m ²)	อุณหภูมิ (°C)
2.91	1.41	1,131.61	44.14

ตารางที่ 9.4 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ช่วงเวลาต่างๆ

	Time 0-1	Time 1-2	Time 2-3	Time 3-4	Time 4-5
P_{ac} (MW)	0	3.75	3.75	3.75	3.75
Q_{ac} (MW)	0	0	0	0	0
V_{oltc} (pu)	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
N1:N2 / V (p.u.) AVR1	0.988 / 1.046	0.988 / 1.056	0.988 / 1.056	1 / 1.043	1 / 1.043
N1:N2 / V (p.u.) AVR2	0.988 / 1.040	0.988 / 1.062	0.988 / 1.062	0.988 / 1.048	0.988 / 1.048



ภาพที่ 9.7 แรงดันไฟฟ้าในบัสที่ 1, 3 และ 5



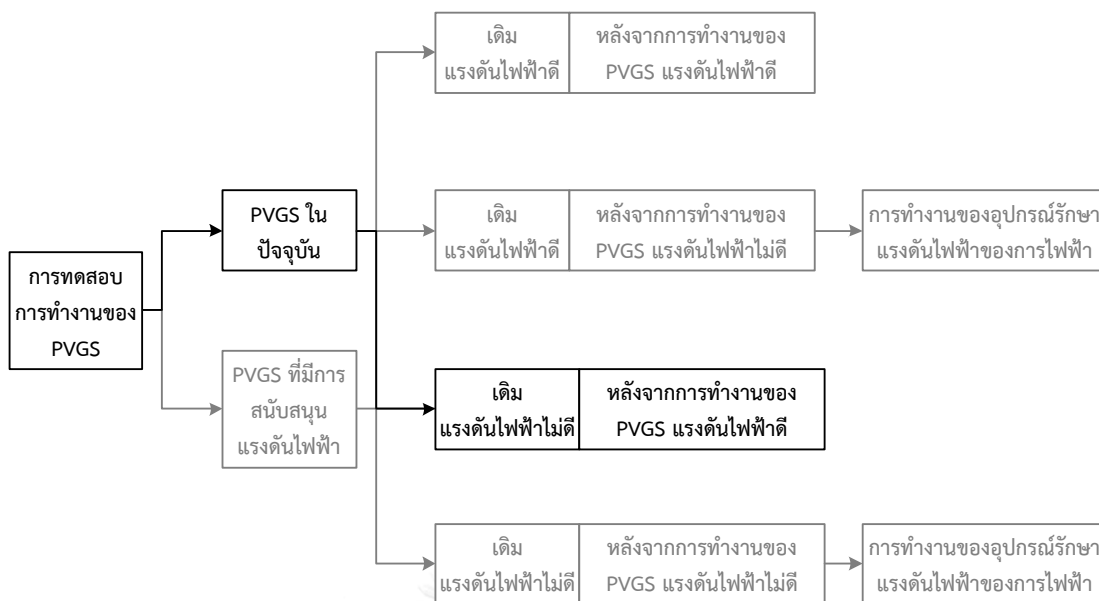
ภาพที่ 9.8 แรงดันไฟฟ้าในบัสที่ 8, 10, 12 และ 14

จากตารางที่ 9.3-9.4 และภาพที่ 9.7-9.8 ในช่วงเวลา Time 0-1 จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะมีค่าที่อยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ ในช่วงเวลา Time 1-2 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าที่เพิ่มขึ้นและมีค่าเกินช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของ

แรงดันไฟฟ้าปกติ ในช่วงเวลา Time 2-3 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ก็ จะไม่มีการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟตามแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันซึ่งได้ตั้งค่าให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่เท่ากับ 1 ทำให้แรงดันไฟฟ้ายังคงค่าอยู่เท่ากับช่วงเวลา Time 1-2 ในช่วงเวลา Time 3-4 อุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าจะมีการทำงานเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าไม่อยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ และช่วงเวลา Time 4-5 แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ากลับมามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ ซึ่งจากช่วงเวลาต่างๆ จะเห็นว่าการทำงานตามแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันในกรณีนี้ ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าเกินกว่าร้อยละ 105 ทำให้อุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าต้องมีการปรับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าให้กลับมามีค่าที่เหมาะสม

9.1.1.3 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าไม่ดีและตีตามลำดับ

ในส่วนนี้จะได้นำเสนอการทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันตามหัวข้อที่ 7.1 และมีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าตามหัวข้อที่ 7.4 ซึ่งจะเป็นกรณีการทำงานดังภาพที่ 9.9 โดยรายละเอียดโหลด ความเข้มแสง และอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 9.5 และข้อมูลกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ช่วงเวลาต่างๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 9.6 โดยระดับแรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ซึ่งเป็นบัสที่มีการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าที่สามารถปรับแท็ปได้ (OLTC) ตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าตัวที่ 1 (AVR1) และ ตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าตัวที่ 2 (AVR2) ตามลำดับ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9.10 และระดับแรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9.11



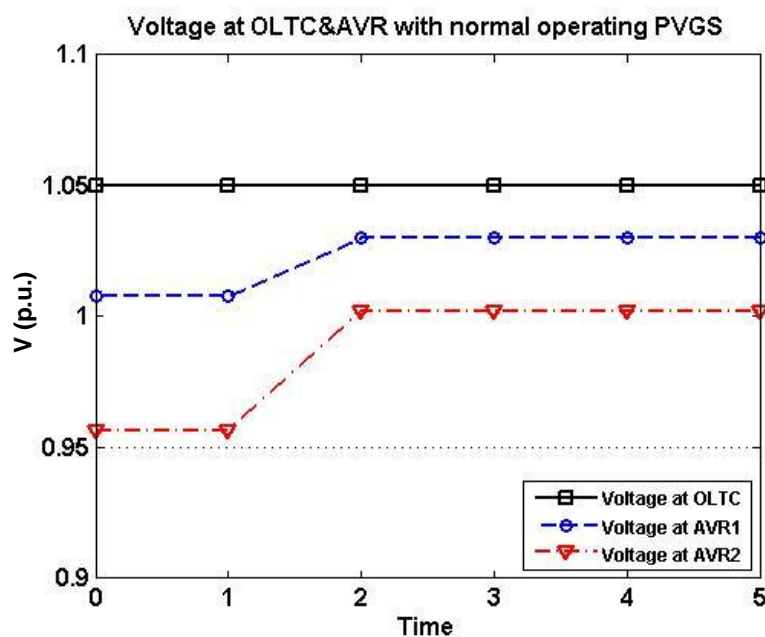
ภาพที่ 9.9 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าไม่ดีและดีตามลำดับ

ตารางที่ 9.5 ข้อมูลโหลด ความเข้มแสง และอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ

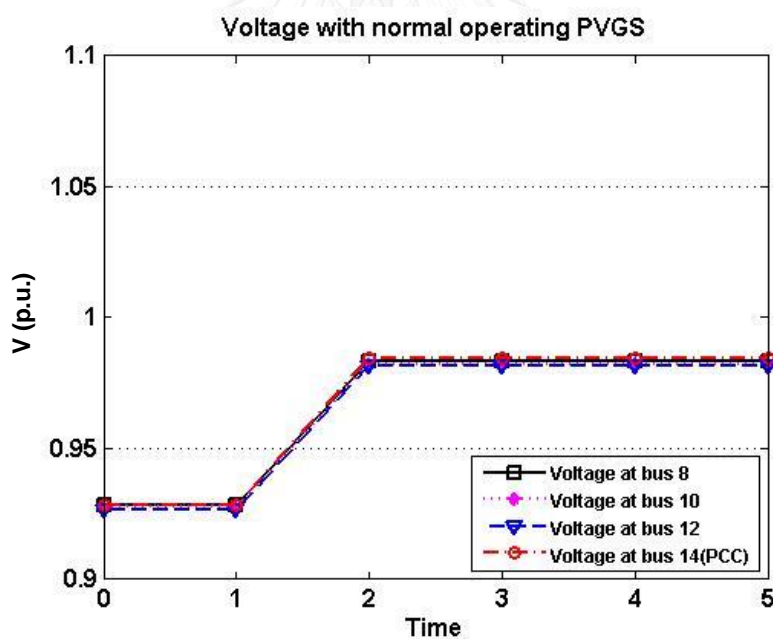
โหลดกำลังไฟฟ้าจริง (MW)	โหลดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVar)	ความเข้มแสง (W/m ²)	อุณหภูมิ (°C)
5.45	2.64	1,131.61	44.14

ตารางที่ 9.6 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ช่วงเวลาต่างๆ

	Time 0-1	Time 1-2	Time 2-3	Time 3-4	Time 4-5
P_{ac} (MW)	0	3.75	3.75	3.75	3.75
Q_{ac} (MW)	0	0	0	0	0
V_{oltc} (pu)	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
N1:N2 / V (p.u.) AVR1	0.988 / 1.008	0.988 / 1.030	0.988 / 1.030	0.988 / 1.030	0.988 / 1.030
N1:N2 / V (p.u.) AVR1	0.988 / 0.957	0.988 / 1.002	0.988 / 1.002	0.988 / 1.002	0.988 / 1.002



ภาพที่ 9.10 แรงดันไฟฟ้าในบัสที่ 1, 3 และ 5



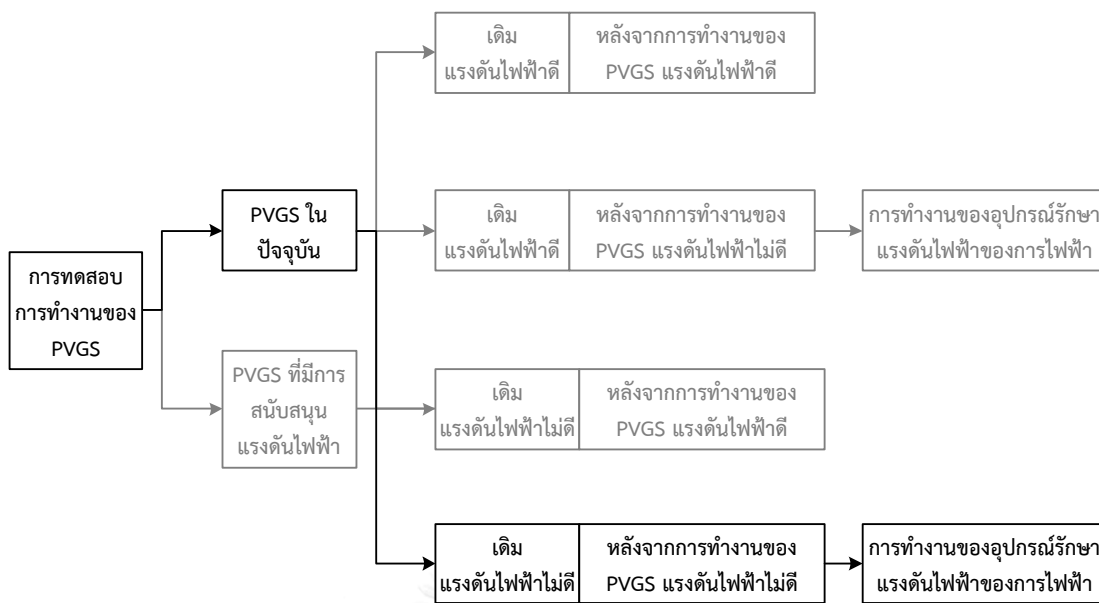
ภาพที่ 9.11 แรงดันไฟฟ้าในบัสที่ 8, 10, 12 และ 14

จากตารางที่ 9.5-9.6 และภาพที่ 9.10-9.11 ในช่วงเวลา Time 0-1 จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 95 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ เนื่องจากโหลดที่มีค่าที่มาก ในช่วงเวลา Time 1-2 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าที่เพิ่มขึ้นจนทำให้แรงดันไฟฟ้า

กลับมาที่มีค่าที่อยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ ในช่วงเวลา Time 2-3 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ก็ จะไม่มีการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟตามแบบจำลองการทำงาน ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันซึ่งได้ตั้งค่าให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบ ผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่เท่ากับ 1 ทำให้แรงดันไฟฟ้ายังคงค่าอยู่เท่ากับช่วงเวลา Time 1-2 ในช่วงเวลา Time 3-4 อุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องทำงานเนื่องจาก แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติอยู่แล้ว และช่วงเวลา Time 4-5 แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของ แรงดันไฟฟ้าปกติ ซึ่งจากช่วงเวลาต่างๆ จะเห็นว่าการทำงานตามแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจาก เซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันในกรณีนี้ ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถช่วยให้ แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ากลับมาที่มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมได้จากการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง ซึ่งทำให้ไม่มีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้า

9.1.1.4 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าไม่ดี และไม่ตีตามลำดับ

ในส่วนนี้จะได้นำเสนอการทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์ แสงอาทิตย์ในปัจจุบันตามหัวข้อที่ 7.1 และมีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบ โครงข่ายไฟฟ้าตามหัวข้อที่ 7.4 ซึ่งจะเป็นกรณีการทำงานดังภาพที่ 9.12 โดยรายละเอียดโหลด ความ เข้มแสง และอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 9.7 และข้อมูลกำลังไฟฟ้าของระบบ ผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ช่วงเวลาต่างๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 9.8 โดยระดับแรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ซึ่งเป็นบัสที่มีการติดตั้ง หม้อแปลงไฟฟ้าที่สามารถปรับแท็ปได้ (OLTC) ตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าตัวที่ 1 (AVR1) และ ตัวคุมค่า แรงดันไฟฟ้าตัวที่ 2 (AVR2) ตามลำดับ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9.13 และระดับแรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9.14



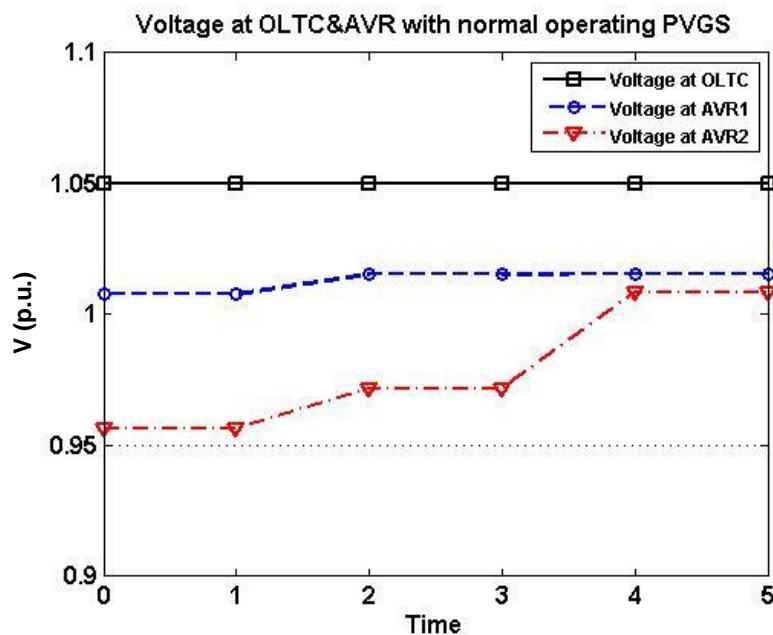
ภาพที่ 9.12 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าไม่ดีและไม่ดีตามลำดับ

ตารางที่ 9.7 ข้อมูลโหลด ความเข้มแสง และอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ

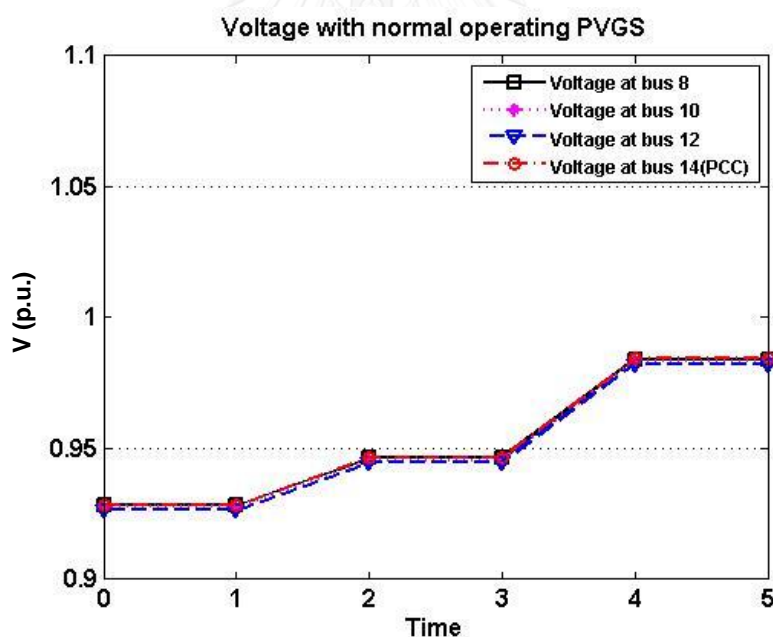
โหลดกำลังไฟฟ้าจริง (MW)	โหลดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVar)	ความเข้มแสง (W/m^2)	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
5.45	2.64	236.43	32.70

ตารางที่ 9.8 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ช่วงเวลาต่างๆ

	Time 0-1	Time 1-2	Time 2-3	Time 3-4	Time 4-5
P_{ac} (MW)	0	0.93	0.93	0.93	0.93
Q_{ac} (MW)	0	0	0	0	0
V_{oltc} (pu)	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
N1:N2 / V (p.u.) AVR1	0.988 / 1.008	0.988 / 1.015	0.988 / 1.015	0.953 / 1.016	0.953 / 1.016
N1:N2 / V (p.u.) AVR1	0.988 / 0.957	0.988 / 0.972	0.988 / 0.972	0.953 / 1.009	0.953 / 1.009



ภาพที่ 9.13 แรงดันไฟฟ้าในบัสที่ 1, 3 และ 5



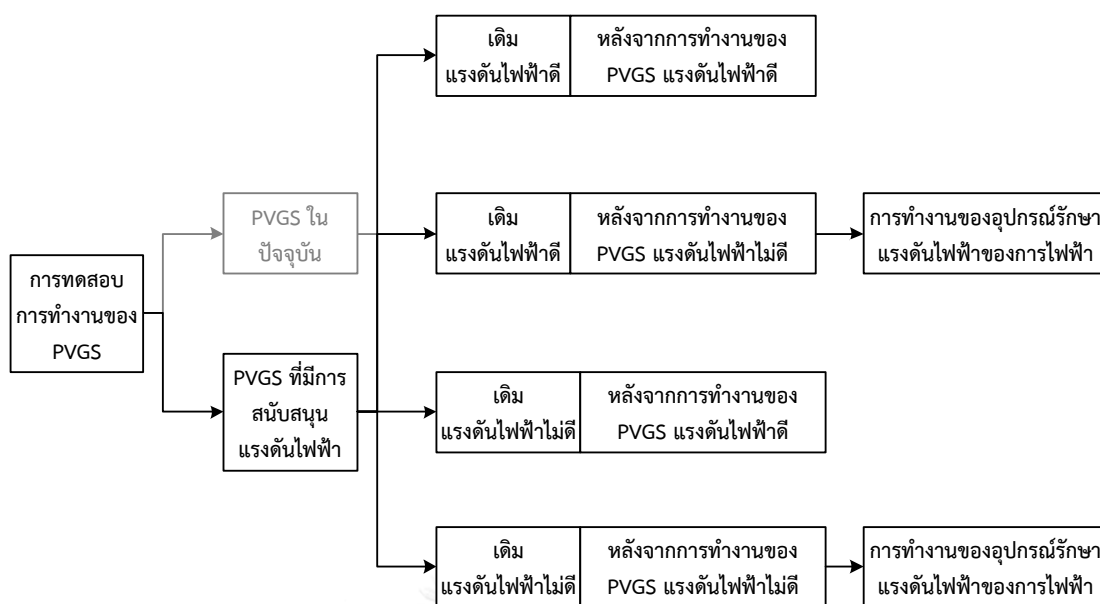
ภาพที่ 9.14 แรงดันไฟฟ้าในบัสที่ 8, 10, 12 และ 14

จากตารางที่ 9.7-9.8 และภาพที่ 9.13-9.14 ในช่วงเวลา Time 0-1 จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 95 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ เนื่องจากโหลดที่มีค่าที่มาก ในช่วงเวลา Time 1-2 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากค่าความ

เข้มแสงที่ต่ำ ทำให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อย ระดับแรงดันไฟฟ้าจึงยังคงมีค่าที่อยู่นอกช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ ในช่วงเวลา Time 2-3 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ก็ จะไม่มีการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟตามแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันซึ่งได้ตั้งค่าให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่เท่ากับ 1 ทำให้แรงดันไฟฟ้ายังคงค่าอยู่เท่ากับช่วงเวลา Time 1-2 ในช่วงเวลา Time 3-4 อุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าจะต้องทำงานเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ายังคงมีค่าอยู่นอกช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติหลังจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และช่วงเวลา Time 4-5 แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ ซึ่งจากช่วงเวลาต่างๆ จะเห็นว่าการทำงานตามแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันในกรณีนี้ จะมีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถช่วยให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมได้ อุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าต้องทำงานเพิ่มเติม

9.1.2 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าในกรณีต่างๆ

ในหัวข้อนี้จะได้ทำการทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าในลักษณะแรงดันไฟฟ้าในกรณีต่างๆ จากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ตามหัวข้อที่ 6.2 ซึ่งจะมีการทดสอบในกรณีต่างๆ ดังแสดงได้ดังภาพที่ 9.15 โดยระบบทดสอบที่ใช้ในการทดสอบของหัวข้อนี้ คือ ระบบโครงข่ายไฟฟ้า อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน ดังหัวข้อที่ 8.1 และระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ทดสอบ เป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการทำงานอยู่จริงในระบบโครงข่ายไฟฟ้า อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน ดังหัวข้อที่ 8.2 ส่วนข้อมูลความเข้มแสงและอุณหภูมิที่ใช้จำลองกำลังการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นข้อมูลที่ได้รับจากอินเวอร์เตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอยู่บนดาดฟ้าอาคารเจริญวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ. 2557



ภาพที่ 9.15 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณีต่างๆ

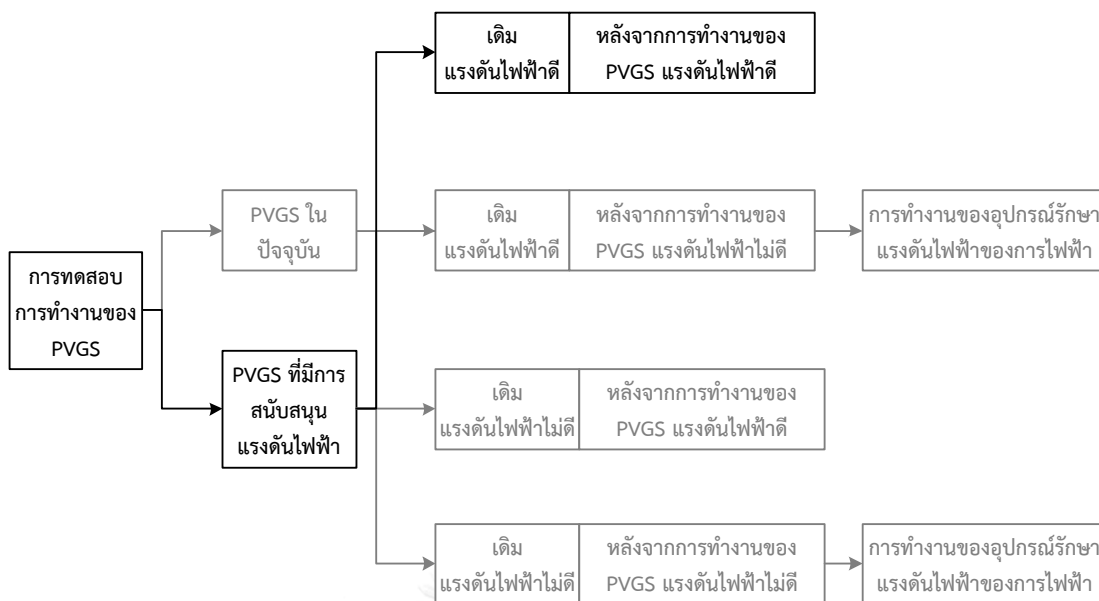
ในการทดสอบจะแบ่งช่วงเวลาการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ เป็นช่วงเวลา 5 ช่วง ได้แก่ (1) ช่วงเวลา Time 0-1 จะเป็นช่วงเวลาที่ยังไม่มีมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (2) ช่วงเวลา Time 1-2 จะเป็นช่วงเวลาที่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า (3) ช่วงเวลา Time 2-3 จะเป็นช่วงเวลาที่จะมีการปรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อช่วยรักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ (4) ช่วงเวลา Time 3-4 จะเป็นช่วงเวลาที่มีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าเพื่อรักษาแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ (5) ช่วงเวลา Time 4-5 จะเป็นช่วงเวลาที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าอยู่ในสภาวะอยู่ตัวหลังจากการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งผลการทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันจะแบ่งการทดสอบได้เป็น 4 ส่วน คือ

9.1.2.1 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าดีและดีตามลำดับ

- 9.1.2.2 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าดีและไม่ดีตามลำดับ
- 9.1.2.3 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าไม่ดีและดีตามลำดับ
- 9.1.2.4 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าไม่ดีและไม่ดีตามลำดับ

9.1.2.1 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าดีและดีตามลำดับ

ในส่วนนี้จะได้นำเสนอการทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าตามหัวข้อที่ 7.2 ซึ่งมีการปรับการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าตามหัวข้อที่ 7.3 และมีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าตามหัวข้อที่ 7.4 ซึ่งจะเป็นกรณีการทำงานดังภาพที่ 9.16 โดยรายละเอียดโหลด ความเข้มแสง และอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 9.9 และข้อมูลกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ช่วงเวลาต่างๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 9.10 โดยระดับแรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ซึ่งเป็นบัสที่มีการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าที่สามารถปรับแท้ปได้ (OLTC) ตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าตัวที่ 1 (AVR1) และ ตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าตัวที่ 2 (AVR2) ตามลำดับ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9.17 และระดับแรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9.18



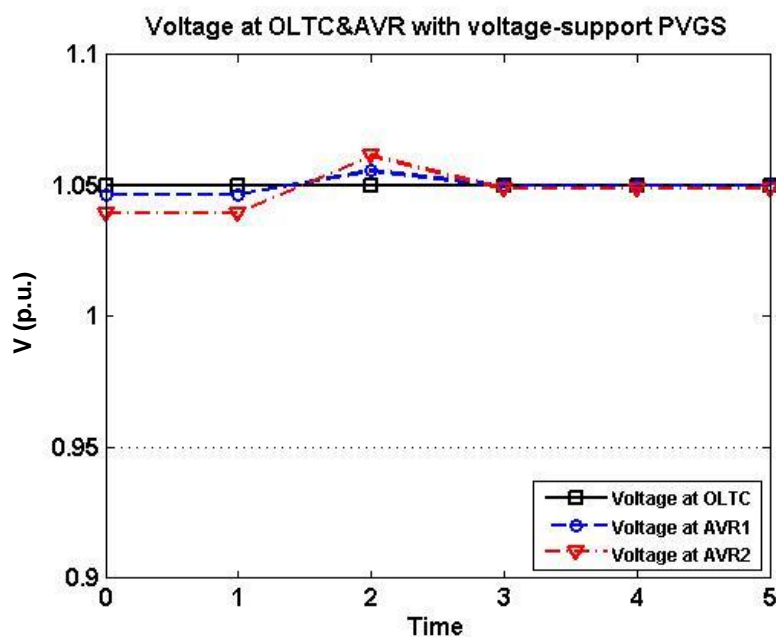
ภาพที่ 9.16 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณีก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าดีและดีตามลำดับ

ตารางที่ 9.9 ข้อมูลโหลด ความเข้มแสง และอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ

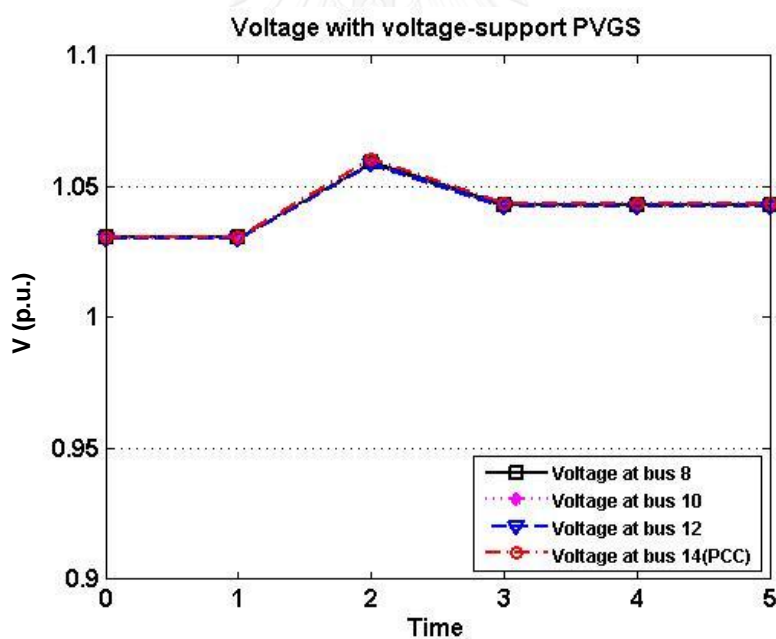
โหลดกำลังไฟฟ้าจริง (MW)	โหลดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVar)	ความเข้มแสง (W/m ²)	อุณหภูมิ (°C)
2.91	1.41	1,131.61	44.14

ตารางที่ 9.10 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ช่วงเวลาต่างๆ

	Time 0-1	Time 1-2	Time 2-3	Time 3-4	Time 4-5
P_{ac} (MW)	0	3.75	3.73	3.75	3.75
Q_{ac} (MW)	0	0	-0.4	-0.4	-0.4
V_{oltc} (pu)	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
N1:N2 / V (p.u.) AVR1	0.988 / 1.046	0.988 / 1.056	0.988 / 1.050	0.988 / 1.050	0.988 / 1.050
N1:N2 / V (p.u.) AVR1	0.988 / 1.040	0.988 / 1.062	0.988 / 1.049	0.988 / 1.049	0.988 / 1.049



ภาพที่ 9.17 แรงดันไฟฟ้าในบัสที่ 1, 3 และ 5



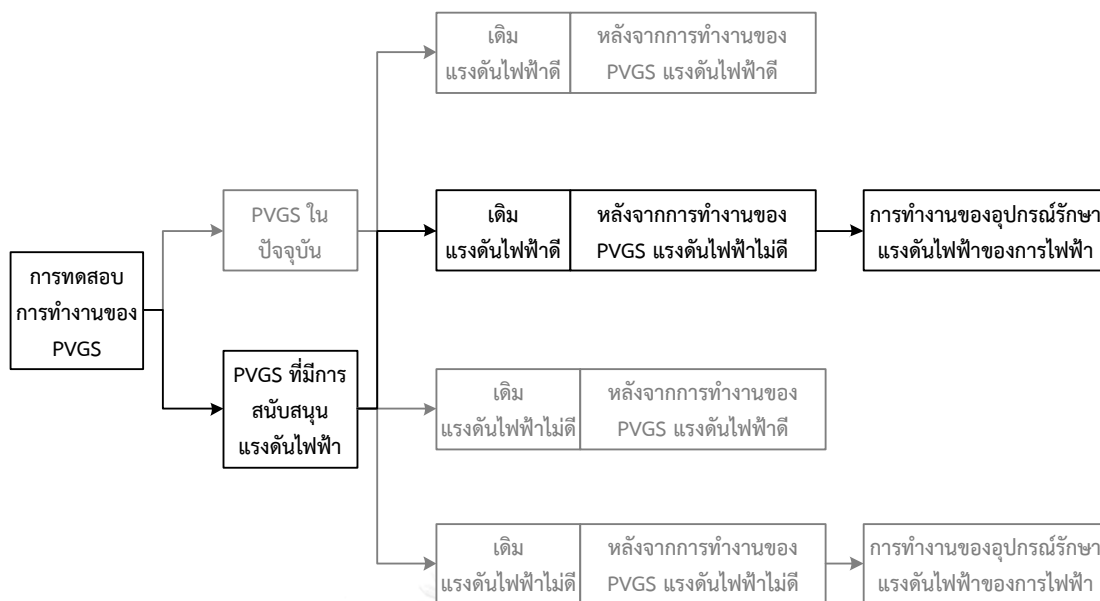
ภาพที่ 9.18 แรงดันไฟฟ้าในบัสที่ 8, 10, 12 และ 14

จากตารางที่ 9.9-9.10 และภาพที่ 9.17-9.18 ในช่วงเวลา Time 0-1 จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะมีค่าที่อยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ ในช่วงเวลา Time 1-2 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าที่เพิ่มขึ้นจนทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้ามีค่าที่เกินร้อยละ

105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ ในช่วงเวลา Time 2-3 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟซึ่งทำให้ต้องมีการลดกำลังไฟฟ้าจริงลงเนื่องจากค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าขาออกของอินเวอร์เตอร์ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าลดลงจนมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ Time 1-2 ในช่วงเวลา Time 3-4 อุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องทำงานเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติอยู่แล้ว และช่วงเวลา Time 4-5 แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ ซึ่งจากช่วงเวลาต่างๆ จะเห็นว่าการทำงานตามแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าในกรณีนี้ แม้ว่าการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะทำให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าเกินร้อยละ 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ แต่การปรับการทำงานเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าจึงทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม โดยที่ไม่มีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้า

9.1.2.2 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณีก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าดีและไม่ดีตามลำดับ

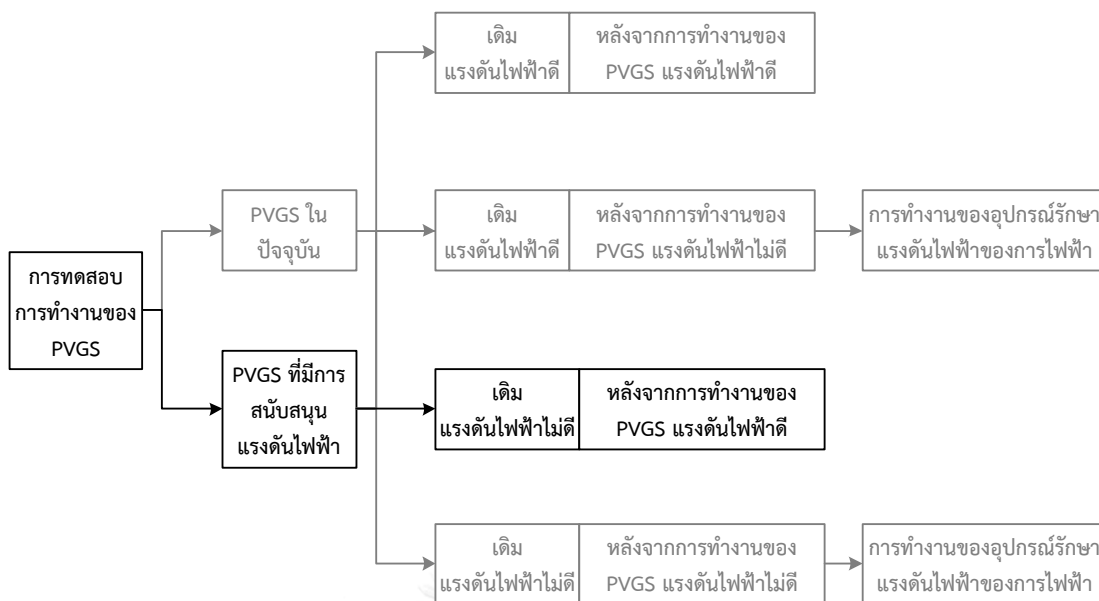
ในกรณีก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าดีและไม่ดีตามลำดับ ดังแสดงได้ดังภาพที่ 9.19 ซึ่งกรณีทดสอบนี้จะไม่สามารถเกิดขึ้นในระบบทดสอบ ระบบโครงข่ายไฟฟ้า อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบทดสอบดังกล่าว มีขนาดที่กำลังการผลิตติดตั้ง 4.112 เมกะวัตต์ ซึ่งมีขนาดกำลังการผลิตที่มากเมื่อเทียบกับโหลรวมสูงสุดในระบบที่มีค่า 9.6 เมกะวัตต์ 4.65 เมกะวาร์ ทำให้ความสามารถในการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายมีสูงเช่นกัน ดังนั้นเหตุการณ์ในการทดสอบนี้ไม่สามารถเกิดขึ้นได้เพราะระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบทดสอบนี้มีความสามารถที่จะรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้กลับมามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติได้จากการปรับจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและการจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง โดยอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องทำงาน



ภาพที่ 9.19 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณีก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าดีและไม่ดีตามลำดับ

9.1.2.3 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณีก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าไม่ดีและดีตามลำดับ

ในส่วนนี้จะได้นำเสนอการทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าตามหัวข้อที่ 7.2 ซึ่งมีการปรับการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าตามหัวข้อที่ 7.3 และมีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าตามหัวข้อที่ 7.4 ซึ่งจะเป็กรณีการทำงานดังภาพที่ 9.20 โดยรายละเอียดโพลด ความเข้มแสง และอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 9.11 และข้อมูลกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ช่วงเวลาต่างๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 9.12 โดยระดับแรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ซึ่งเป็นบัสที่มีการติดตั้งหม้อแปลงไฟฟ้าที่สามารถปรับแท็บได้ (OLTC) ตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าตัวที่ 1 (AVR1) และ ตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าตัวที่ 2 (AVR2) ตามลำดับ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9.21 และระดับแรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9.22



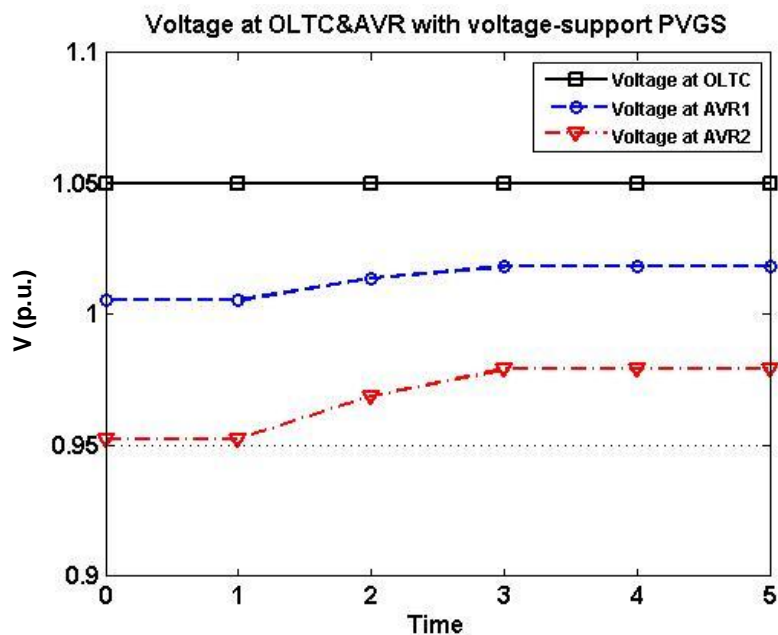
ภาพที่ 9.20 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณีก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าไม่ดีและดีตามลำดับ

ตารางที่ 9.11 ข้อมูลโหลด ความเข้มแสง และอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ

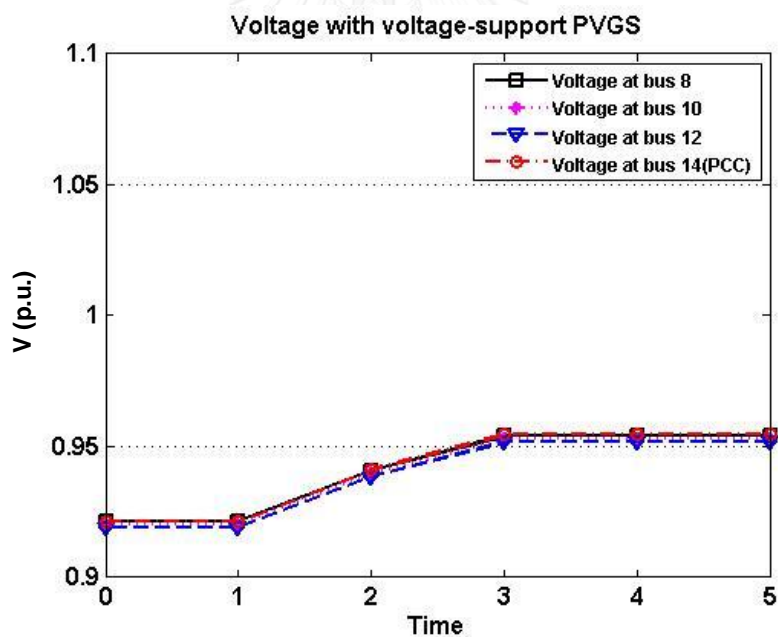
โหลดกำลังไฟฟ้าจริง (MW)	โหลดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (MVar)	ความเข้มแสง (W/m^2)	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
5.45	2.64	236.43	32.70

ตารางที่ 9.12 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ช่วงเวลาต่างๆ

	Time 0-1	Time 1-2	Time 2-3	Time 3-4	Time 4-5
P_{ac} (MW)	0	0.93	0.93	0.93	0.93
Q_{ac} (MW)	0	0	0.24	0.24	0.24
V_{oltc} (pu)	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
N1:N2 / V (p.u.) AVR1	0.988 / 1.005	0.988 / 1.014	0.988 / 1.018	0.988 / 1.019	0.988 / 1.019
N1:N2 / V (p.u.) AVR1	0.988 / 0.952	0.988 / 0.969	0.988 / 0.979	0.988 / 1.004	0.988 / 1.004



ภาพที่ 9.21 แรงดันไฟฟ้าในบัสที่ 1, 3 และ 5



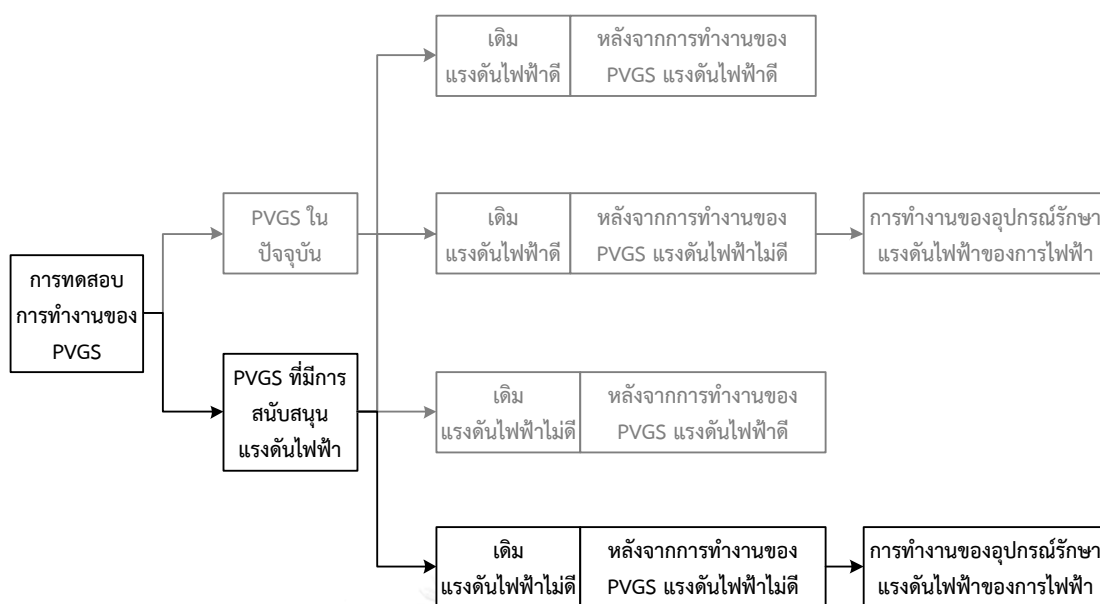
ภาพที่ 9.22 แรงดันไฟฟ้าในบัสที่ 8, 10, 12 และ 14

จากตารางที่ 9.11-9.12 และภาพที่ 9.21-9.22 ในช่วงเวลา Time 0-1 จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 95 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ เนื่องจากโหลดที่มีค่าที่มาก ในช่วงเวลา Time 1-2 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากค่า

ความเข้มแสงที่ต่ำ ทำให้กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อย ระดับแรงดันไฟฟ้าจึงยังคงมีค่าที่อยู่นอกช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ ในช่วงเวลา Time 2-3 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ Time 1-2 ในช่วงเวลา Time 3-4 อุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องทำงานเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติอยู่แล้ว และช่วงเวลา Time 4-5 แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ ซึ่งจากช่วงเวลาต่างๆ จะเห็นว่าการทำงานตามแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าในกรณีนี้ แม้ว่าการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะทำให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าเกินร้อยละ 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ แต่การปรับการทำงานเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าจึงทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม โดยที่ไม่มีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้า

9.1.2.4 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าไม่ติและไม่ติตามลำดับ

ในกรณีที่ก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าไม่ติและไม่ติตามลำดับ ดังแสดงได้ดังภาพที่ 9.23 ซึ่งกรณีทดสอบนี้จะไม่สามารถเกิดขึ้นในระบบทดสอบ ระบบโครงข่ายไฟฟ้า อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบทดสอบดังกล่าว มีขนาดที่กำลังการผลิตติดตั้ง 4.112 เมกะวัตต์ ซึ่งมีขนาดกำลังการผลิตที่มากเมื่อเทียบกับโหลดรวมสูงสุดในระบบที่มีค่า 9.6 เมกะวัตต์ 4.65 เมกะวาร์ ทำให้ความสามารถในการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายมีสูงเช่นกัน ดังนั้นเหตุการณ์ในการทดสอบนี้ไม่สามารถเกิดขึ้นได้เพราะระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบทดสอบนี้มีความสามารถที่จะรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้กลับมามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติได้จากการปรับจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟและการจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง โดยอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องทำงาน



ภาพที่ 9.23 การทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณีก่อนและหลังการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้าไม่ดีและไม่ดีตามลำดับ

9.2 ผลการทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในระยะเวลา 1 เดือน

ในหัวข้อนี้จะได้ทำการทดสอบระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่มีการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในระยะเวลา 1 เดือน โดยระบบทดสอบที่ใช้ในการทดสอบของหัวข้อนี้ คือ ระบบโครงข่ายไฟฟ้า อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน ดังหัวข้อที่ 8.1 และระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ทดสอบ เป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการทำงานอยู่จริงในระบบโครงข่ายไฟฟ้า อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน ดังหัวข้อที่ 8.2 ส่วนข้อมูลความเข้มแสงและอุณหภูมิที่ใช้จำลองกำลังการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นข้อมูลที่ได้รับจากอินเวอร์เตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอยู่บนตาดฟ้าอาคารเจริญวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในเดือน มีนาคม พ.ศ. 2557 และใช้ข้อมูลลักษณะการใช้ไฟฟ้าตามหัวข้อที่ 8.3 โดยจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

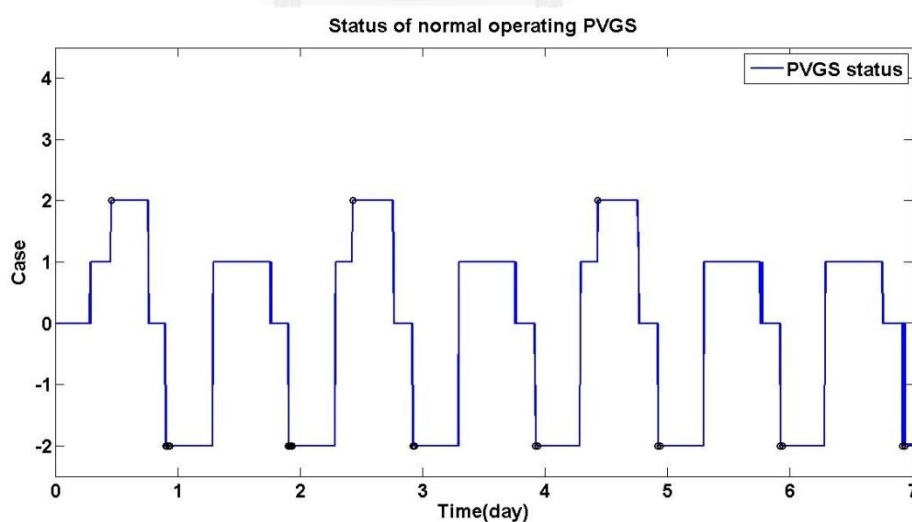
9.2.1 การทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ในระยะเวลา 1 เดือน

9.2.2 การทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในระยะเวลา 1 เดือน

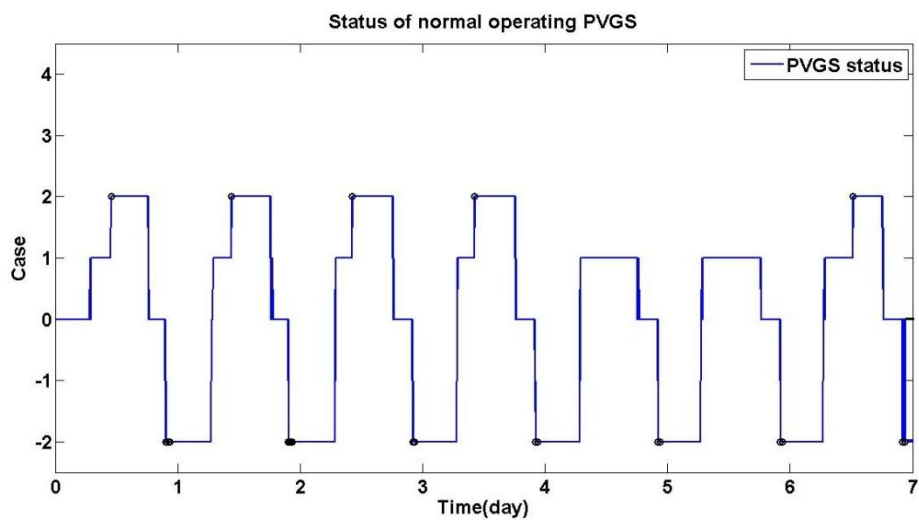
9.2.1 การทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ในระยะเวลา 1 เดือน

การทดสอบในส่วนนี้จะได้ทดสอบการทำงานของแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันซึ่งจะมีการคงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าไว้ที่ 1 ตลอดการทดสอบ เพื่อศึกษาผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า การผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ การทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 8.2 ถึง 8.4 ความเข้มแสงอาทิตย์ ดังแสดงในภาพที่ 8.5 ถึง 8.9 และอุณหภูมิ ดังแสดงในภาพที่ 8.10 ถึง 8.14 ซึ่งการทดสอบในวันที่ 1 ถึง 28 มีนาคม 2557 ลักษณะของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ตามปกติ ส่วนวันที่ 29 ถึง 31 มีนาคม 2557 จะกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบโครงข่ายไฟฟ้าในบัสที่ 12 ซึ่งมีการซ่อมบำรุงสายส่งทำให้โหลดในบริเวณนี้มีค่าเท่ากับศูนย์

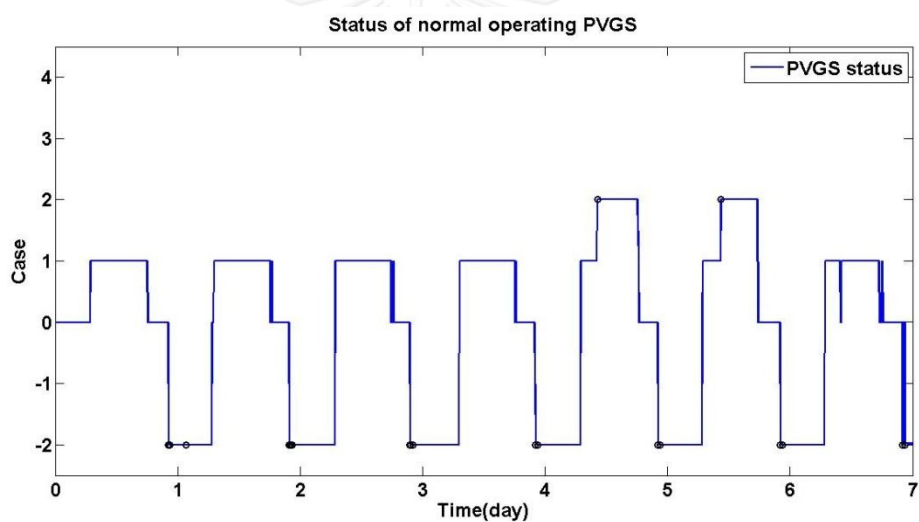
ผลการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น ส่วน ได้แก่ (1) กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ดังภาพที่ 9.24 ถึง 9.28 (2) กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ และกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากโหลดของกำลังไฟฟ้าจริง ดังภาพที่ 9.29 ถึง 9.33 และภาพที่ 9.34 ถึง 9.38 ตามลำดับ (3) แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ติดตั้งอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า ดังภาพที่ 9.39 ถึง 9.43 (4) แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ดังภาพที่ 9.44 ถึง 48



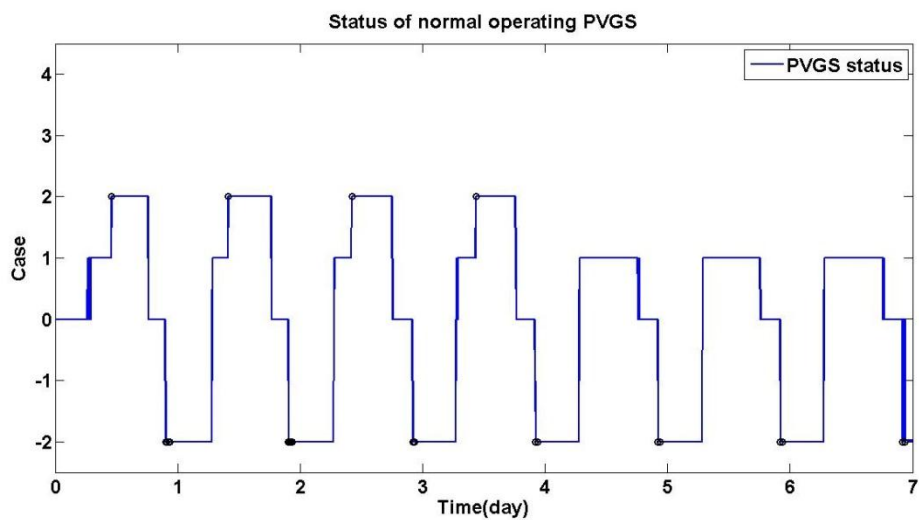
ภาพที่ 9.24 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57



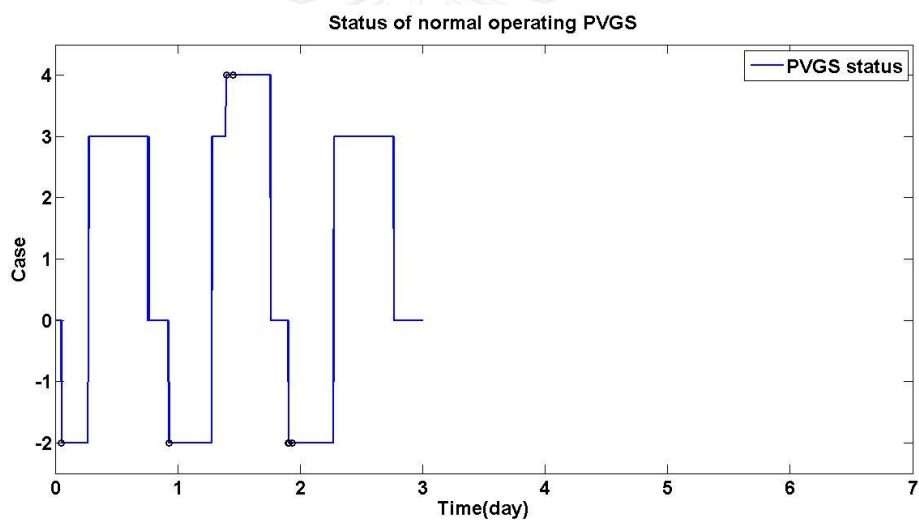
ภาพที่ 9.25 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57



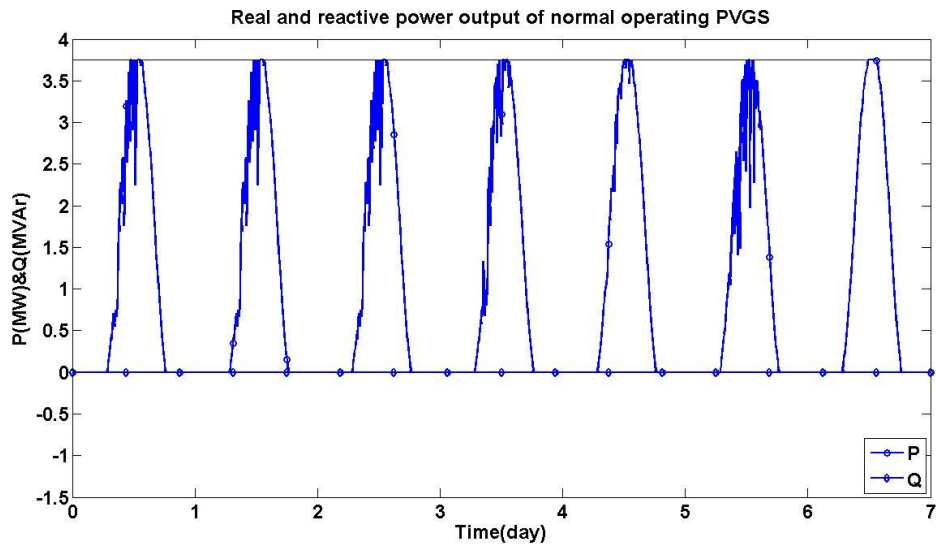
ภาพที่ 9.26 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57



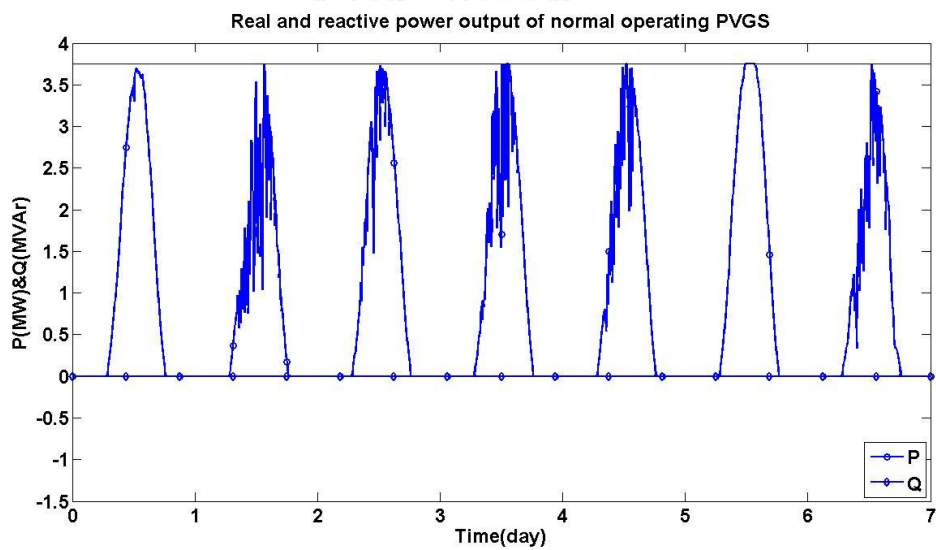
ภาพที่ 9.27 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57



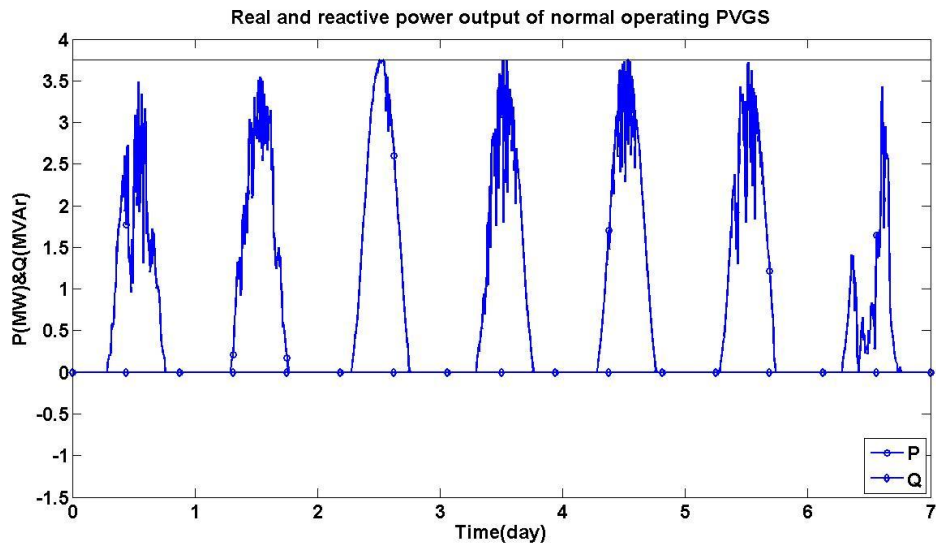
ภาพที่ 9.28 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57



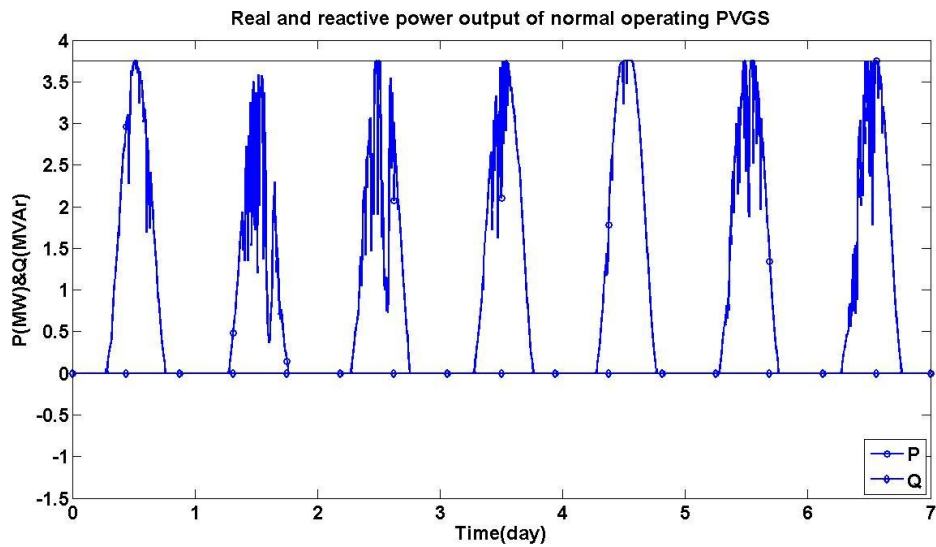
ภาพที่ 9.29 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57



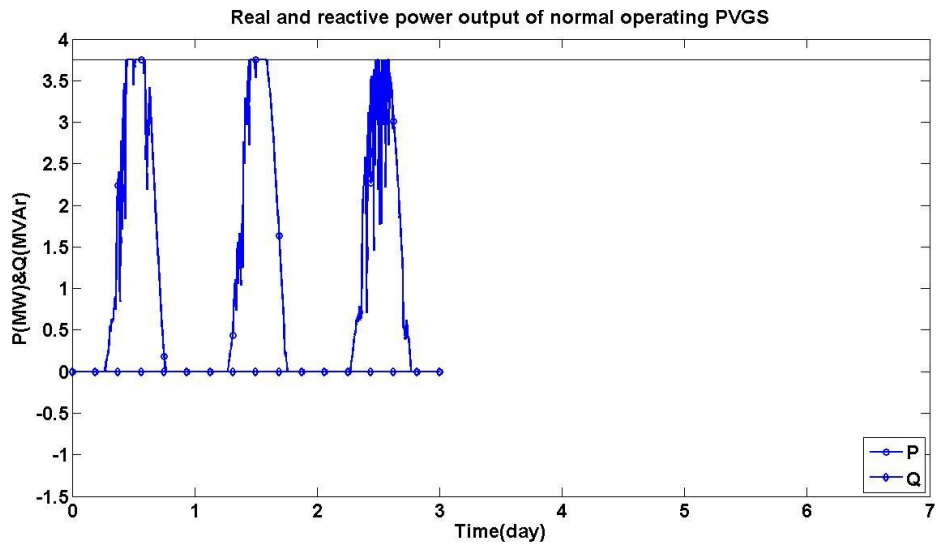
ภาพที่ 9.30 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57



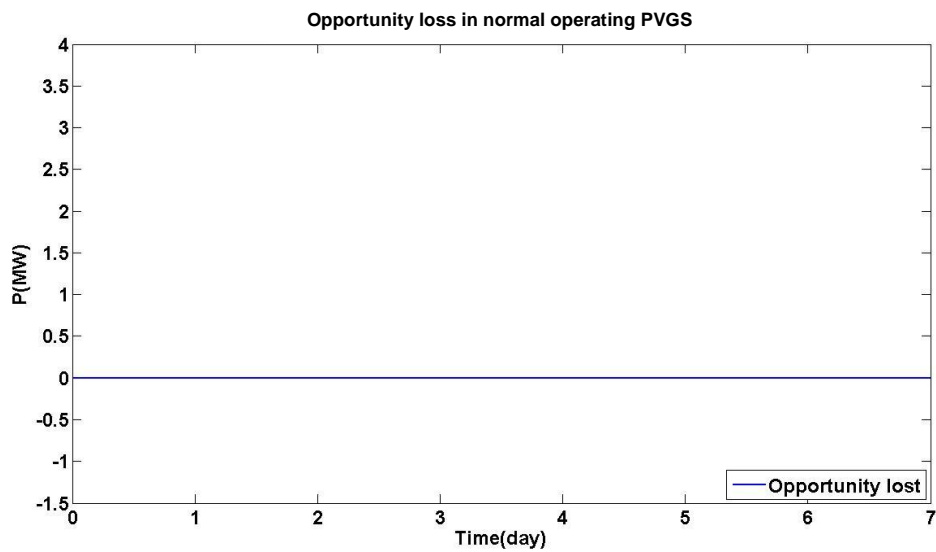
ภาพที่ 9.31 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57



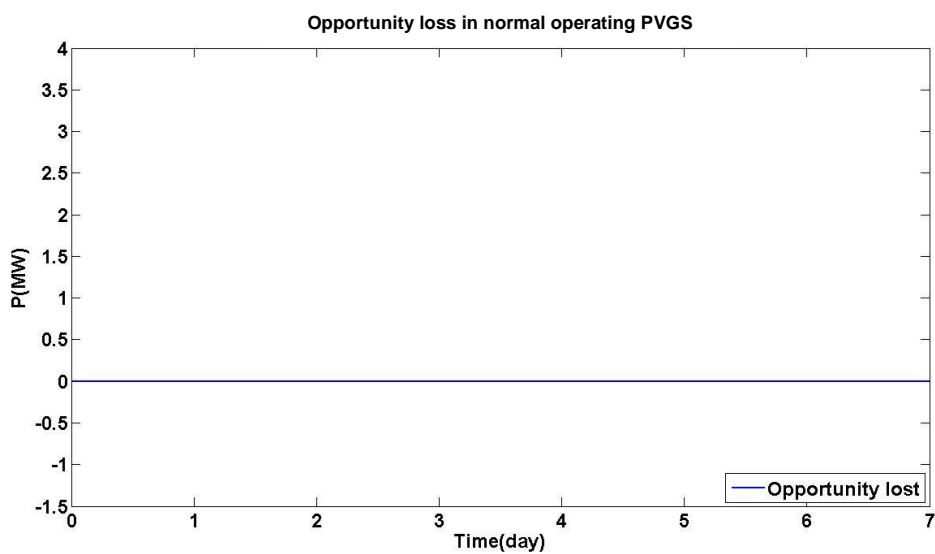
ภาพที่ 9.32 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57



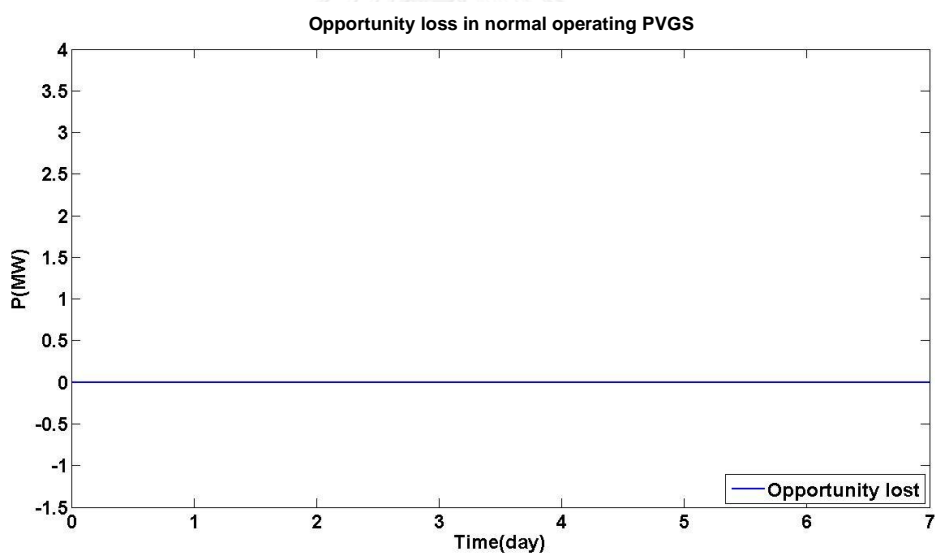
ภาพที่ 9.33 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57



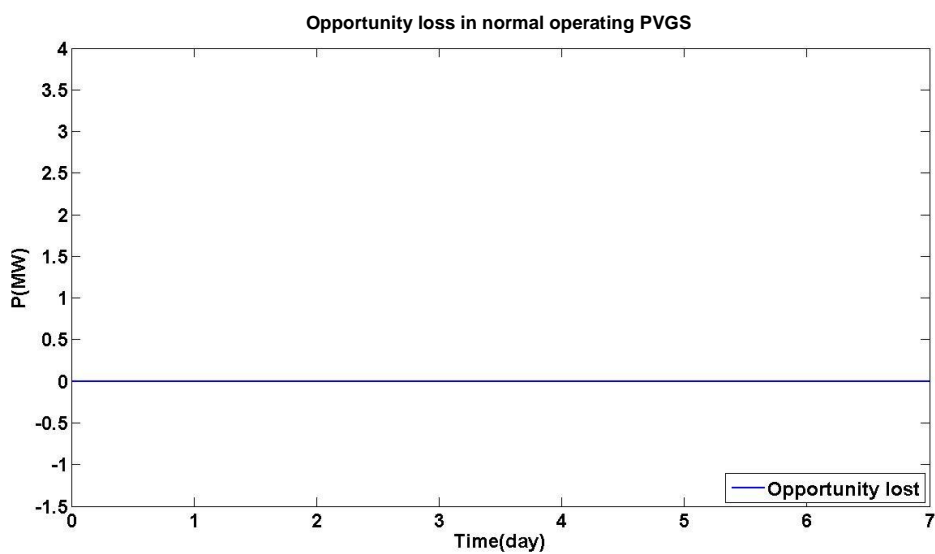
ภาพที่ 9.34 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์
แสงอาทิตย์ ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57



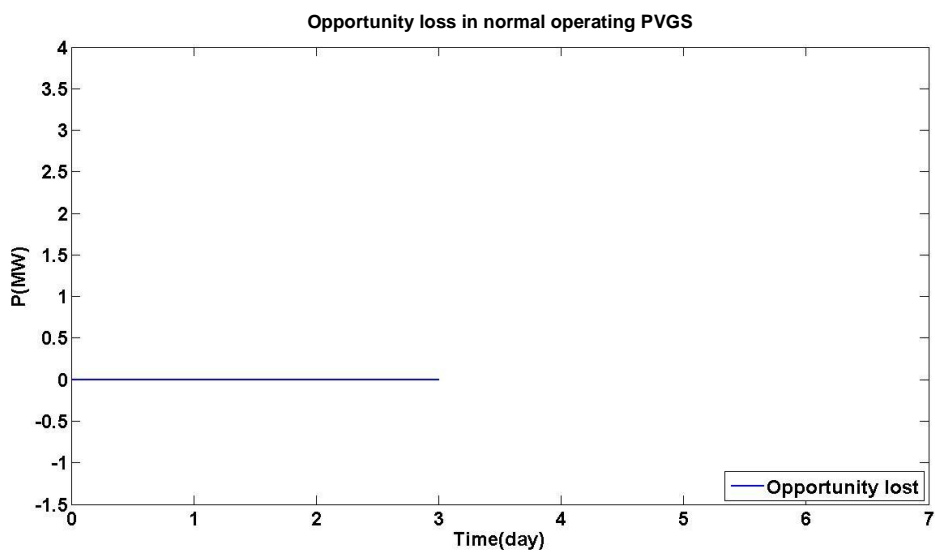
ภาพที่ 9.35 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57



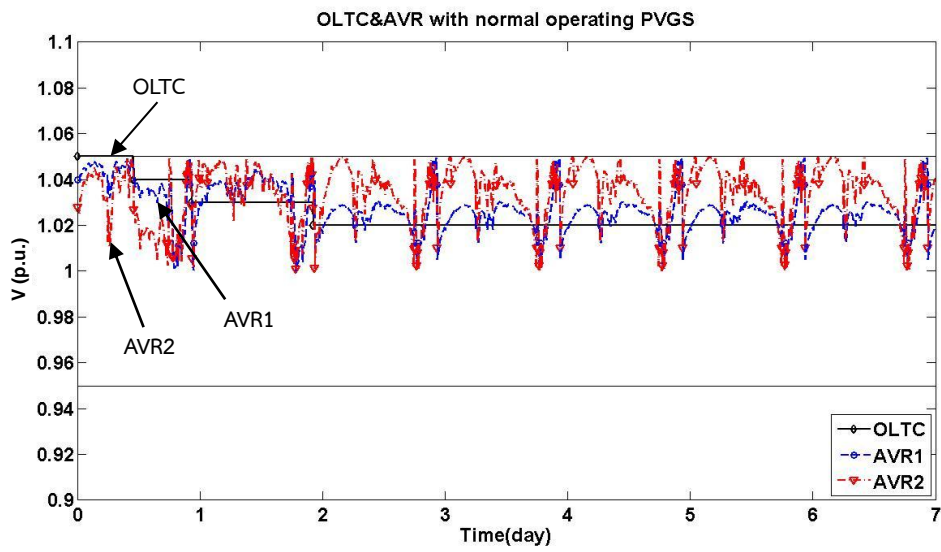
ภาพที่ 9.36 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57



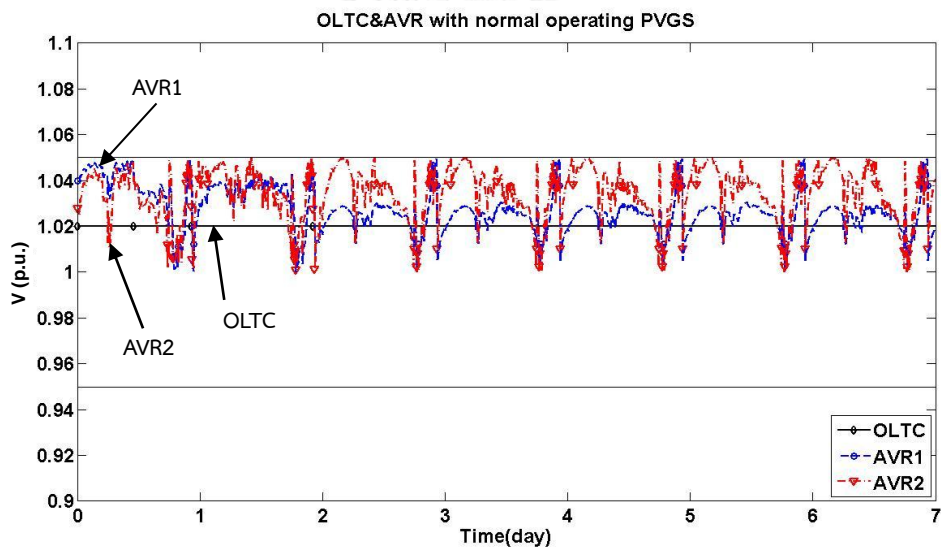
ภาพที่ 9.37 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57



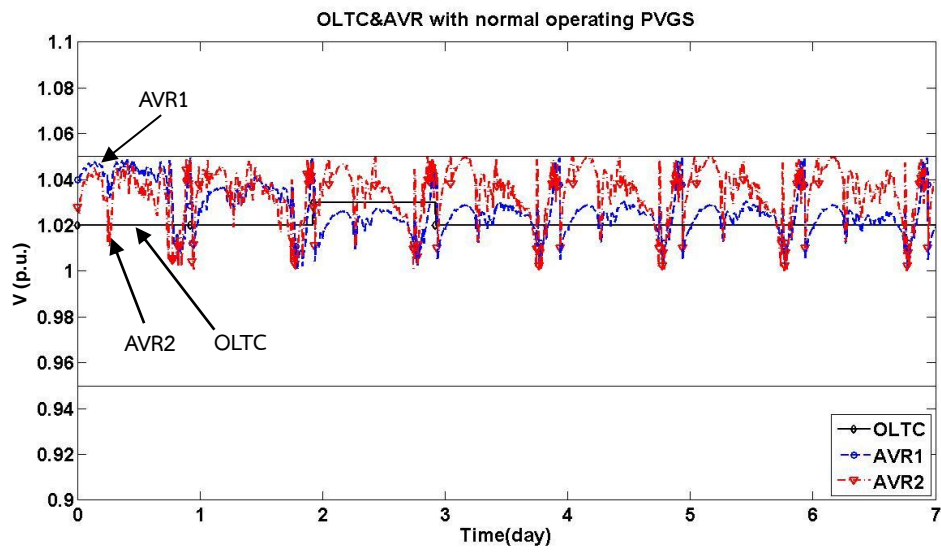
ภาพที่ 9.38 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57



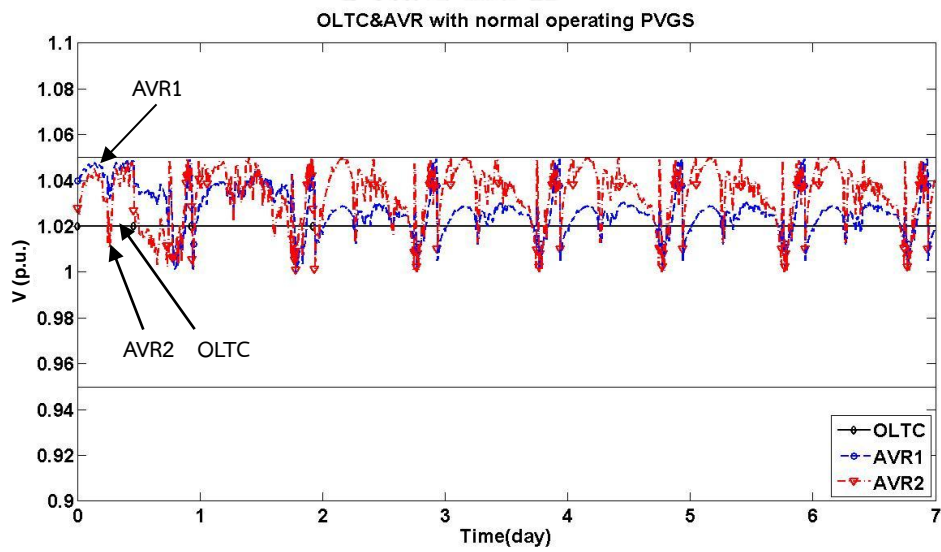
ภาพที่ 9.39 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57



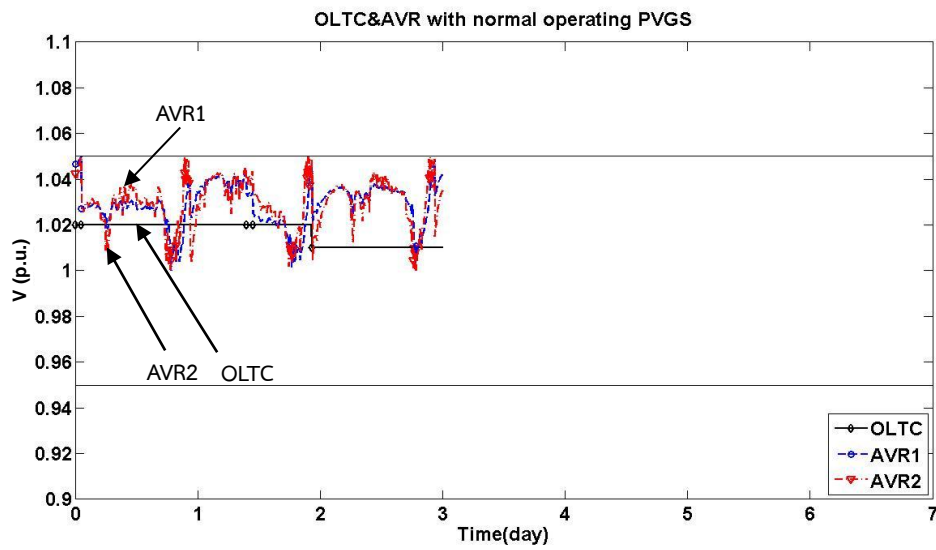
ภาพที่ 9.40 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57



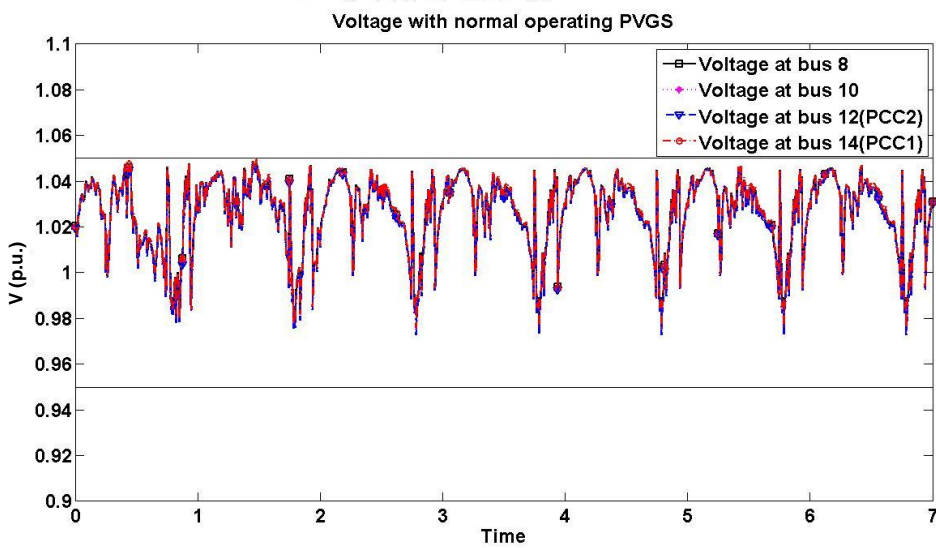
ภาพที่ 9.41 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57



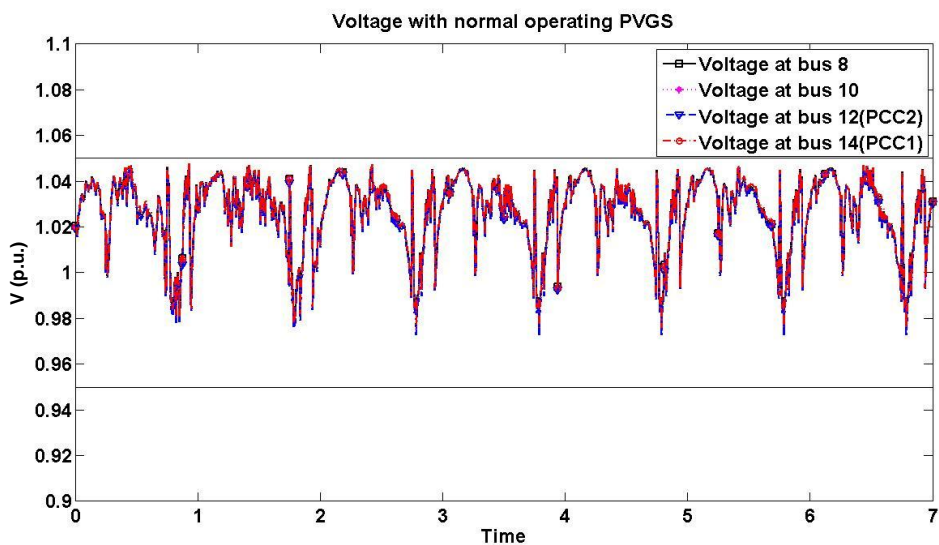
ภาพที่ 9.42 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57



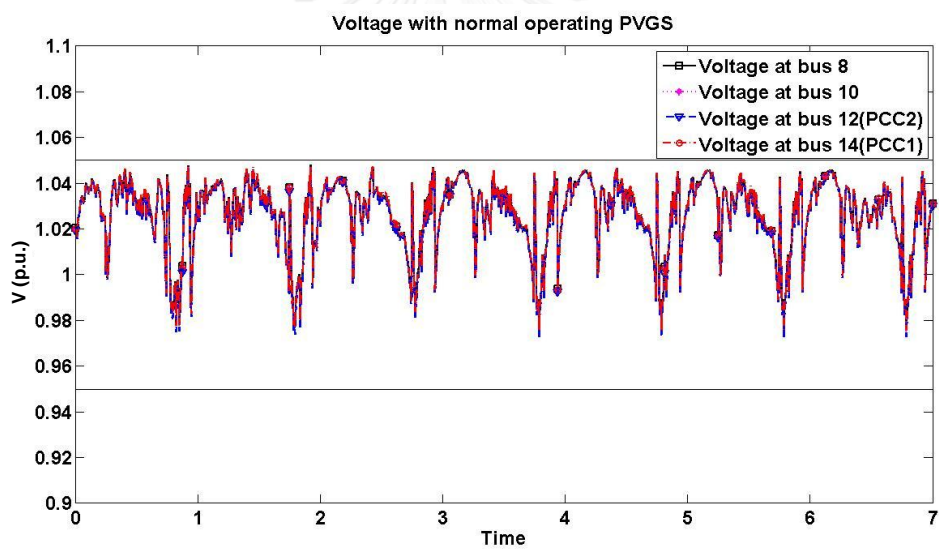
ภาพที่ 9.43 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 28-31 มี.ค. 57



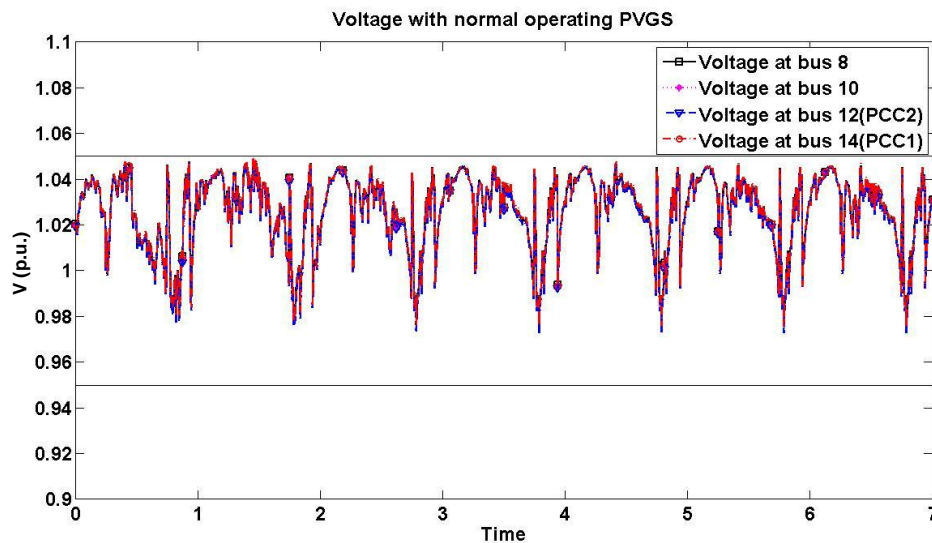
ภาพที่ 9.44 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57



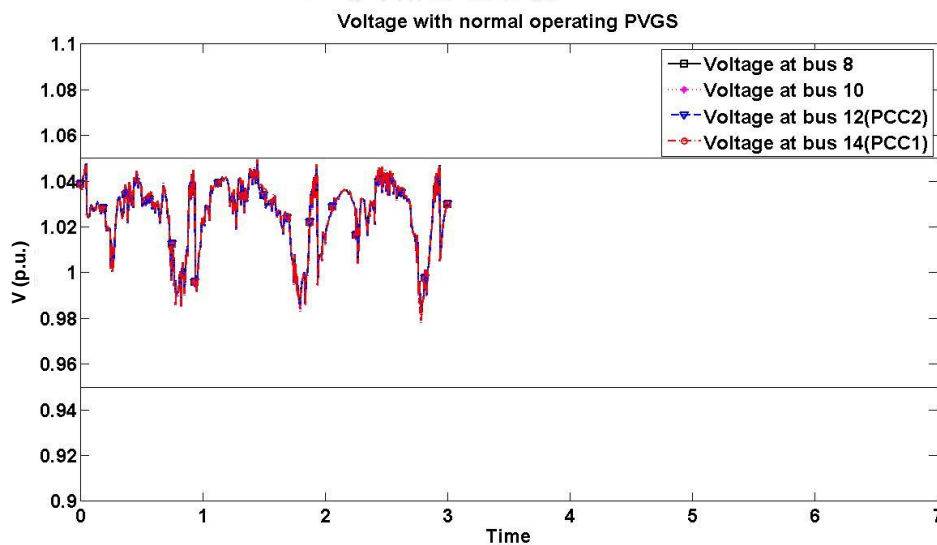
ภาพที่ 9.45 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57



ภาพที่ 9.46 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57



ภาพที่ 9.47 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57



ภาพที่ 9.48 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 28-31 มี.ค. 57

จากภาพที่ 9.24 ถึง 9.48 จะเห็นว่าในการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันซึ่งไม่มีการช่วยสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้านั้น แรงดันไฟฟ้าในช่วงที่มีความเข้มแสงอาทิตย์ที่มากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายที่มากเช่นกัน ทำให้ในช่วงกลางวันซึ่งมีโหลดที่ค่อนข้างน้อยมีแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น และในบางช่วงเวลาระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าเกินกว่าร้อยละ 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ ดังนั้นอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้าซึ่งได้แก่ หม้อแปลงที่สามารถปรับแก้ได้ ตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าตัวที่ 1 และ 2 ต้องทำงานเพื่อช่วยให้แรงดันไฟฟ้าในระบบ

โครงข่ายไฟฟ้ามีค่าเข้าสู่ช่วงแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม และในช่วงเวลากลางคืนที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีการทำงาน แรงดันไฟฟ้าก็จะมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลของโหลด ซึ่งอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าก็จะมีการทำงานในบางช่วงเวลาเพื่อปรับระดับแรงดันไฟฟ้าเช่นกัน ส่วนการทำงานในวันที่ 29 ถึง 31 มีนาคม 2557 ซึ่งเป็นช่วงที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงอย่างมากเนื่องจากการลดลงของโหลด อุปกรณ์รักษาแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้ายังคงรับภาระในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าเช่นเดิม เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันจะไม่มีสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยกรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานในช่วงเวลาทุก 15 นาทีสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 9.13 และสรุปผลการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วย พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ค่าสูญเสียโอกาสจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริง ค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า และค่าปรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้า สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 9.14

ตารางที่ 9.13 จำนวนครั้งของแต่ละกรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน (ค่าฐานนิยมใน 15 นาที)

	$nCase_1$	$nCase_2$	$nCase_3$	$nCase_4$	$nCase_0$	$nCase_{-1}$	$nCase_{-2}$
สัปดาห์ที่ 1	222	93	0	0	137	0	220
สัปดาห์ที่ 2	172	147	0	0	141	0	212
สัปดาห์ที่ 3	248	61	0	0	147	0	216
สัปดาห์ที่ 4	194	127	0	0	138	0	213
สัปดาห์ที่ 5	0	0	105	213	58	0	91
รวม	836	428	105	213	621	0	952

ตารางที่ 9.14 สรุปผลการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1 เดือน

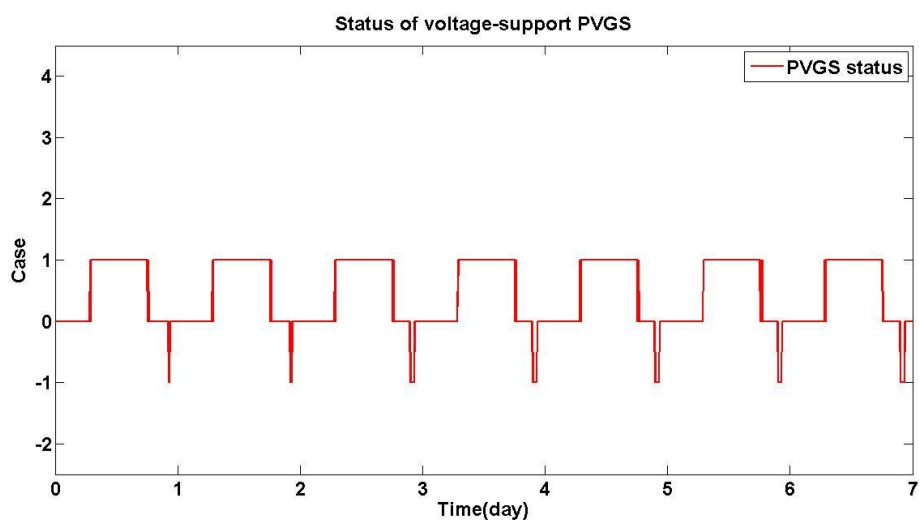
	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (หน่วย)	ค่าสูญเสียโอกาสจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริง (หน่วย)	ค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า (เมกะวาร์)	ค่าปรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้า / โหลดสูงสุด (เมกะวาร์ / เมกะวัตต์)
สัปดาห์ที่ 1	131,581.15	0	0.08/0.12/0.12	0 / 0.05
สัปดาห์ที่ 2	119,302.82	0	0.08/0.08/0.08/ 0.12/0.12	
สัปดาห์ที่ 3	107,395.28	0	0.08/0.12	
สัปดาห์ที่ 4	123,917.50	0	0.08/0.12/0.08/ 0.12	
สัปดาห์ที่ 5	60,119.09	0	0	
รวม	542,315.09	0	-	0 / 0.05
คิดเป็นเงิน	5,894,965.03 บาท	0 บาท	54,175.38 บาท	0 บาท

9.2.2 การทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในระยะเวลา 1 เดือน

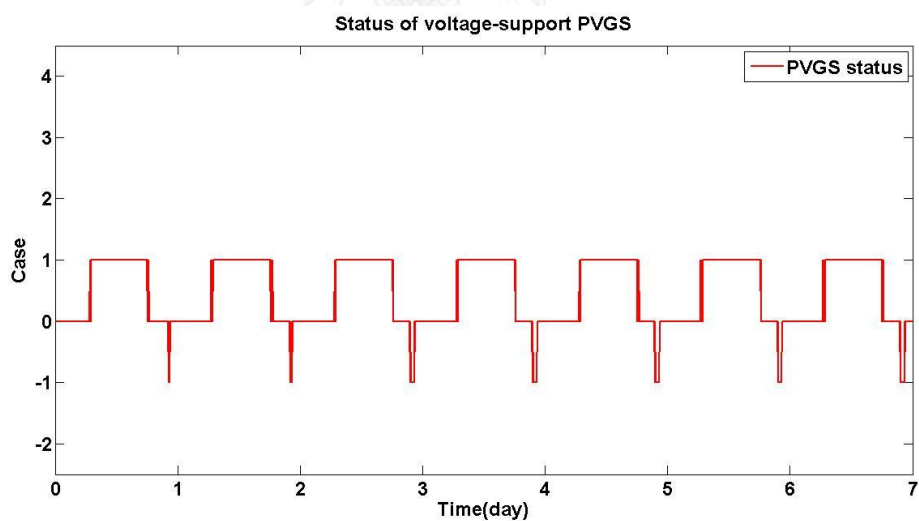
การทดสอบในส่วนนี้จะได้ทดสอบการทำงานของแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่จะมีการปรับการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้านี้เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า เพื่อศึกษาผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า การผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ การทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 8.2 ถึง 8.4 ความเข้มแสงอาทิตย์ ดังแสดงในภาพที่ 8.5 ถึง 8.9 และอุณหภูมิ ดังแสดงในภาพที่ 8.10 ถึง 8.14 ซึ่งการทดสอบในวันที่ 1 ถึง 28 มีนาคม 2557 ลักษณะของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ตามปกติ ส่วนวันที่ 29 ถึง 31 มีนาคม 2557 จะกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบโครงข่ายไฟฟ้าในบัสที่ 12 ซึ่งมีการซ่อมบำรุงสายส่งทำให้โหลดในบริเวณนี้มีค่าเท่ากับศูนย์

ผลการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น ส่วน ได้แก่ (1) กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ดังภาพที่ 9.49 ถึง 9.53 (2) กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้านี้ที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ และกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริง ดังภาพที่

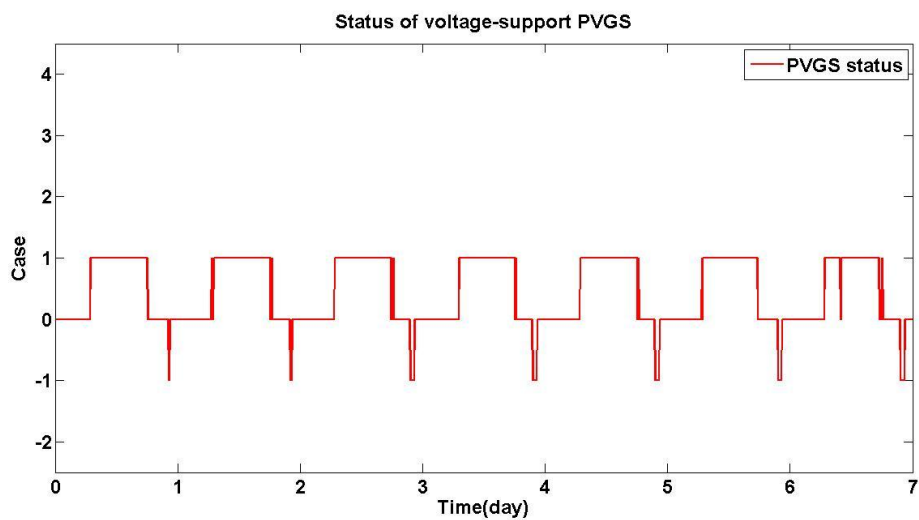
9.54 ถึง 9.58 และ ภาพที่ 9.59 ถึง 9.63 ตามลำดับ (3) แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ติดตั้งอุปกรณ์รักษา
ระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า ดังภาพที่ 9.64 ถึง 9.68 (4) แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ
14 ดังภาพที่ 9.69 ถึง 9.73



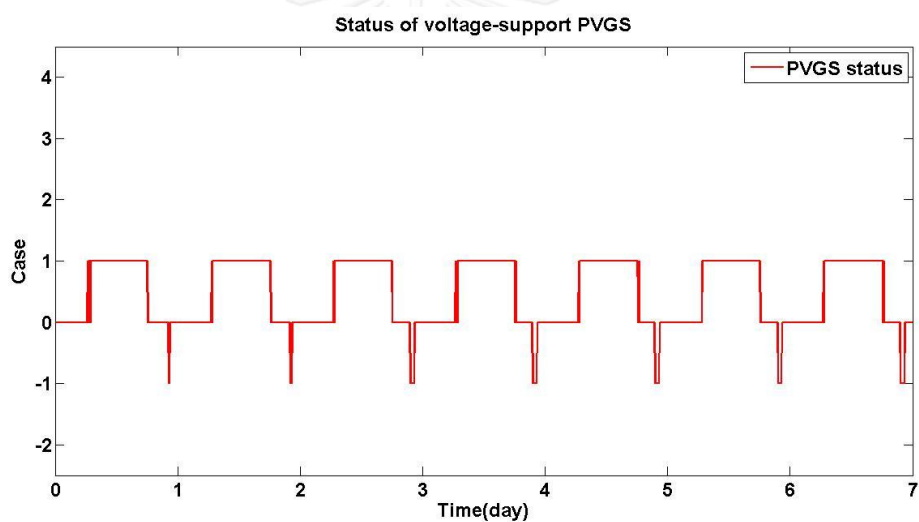
ภาพที่ 9.49 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57



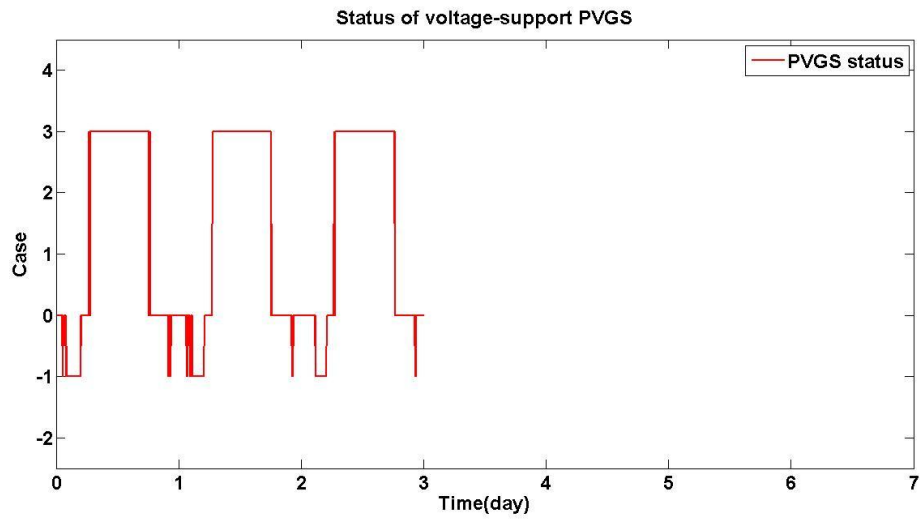
ภาพที่ 9.50 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57



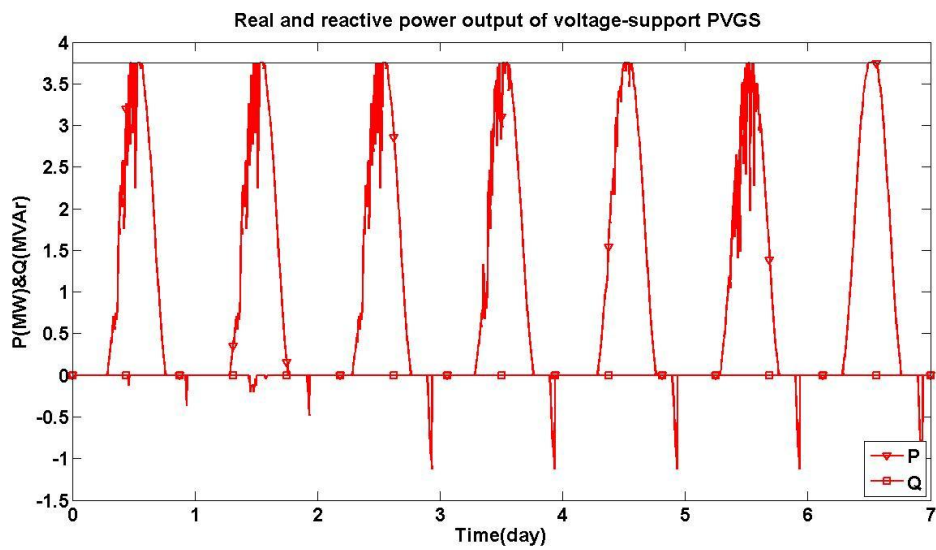
ภาพที่ 9.51 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57



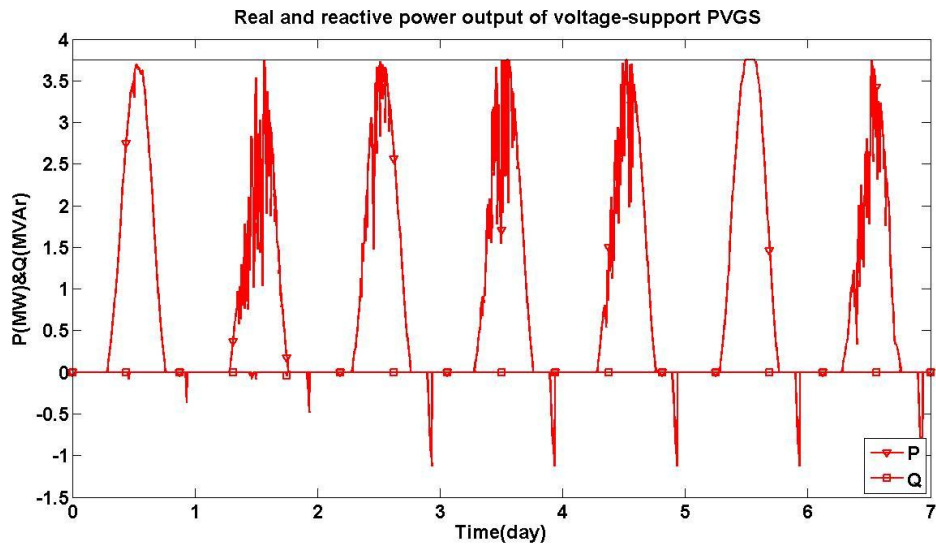
ภาพที่ 9.52 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57



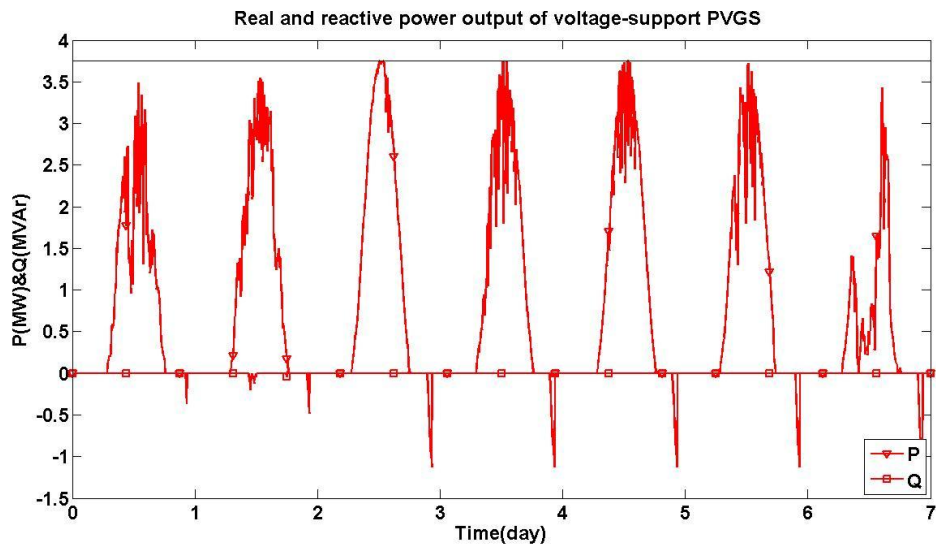
ภาพที่ 9.53 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57



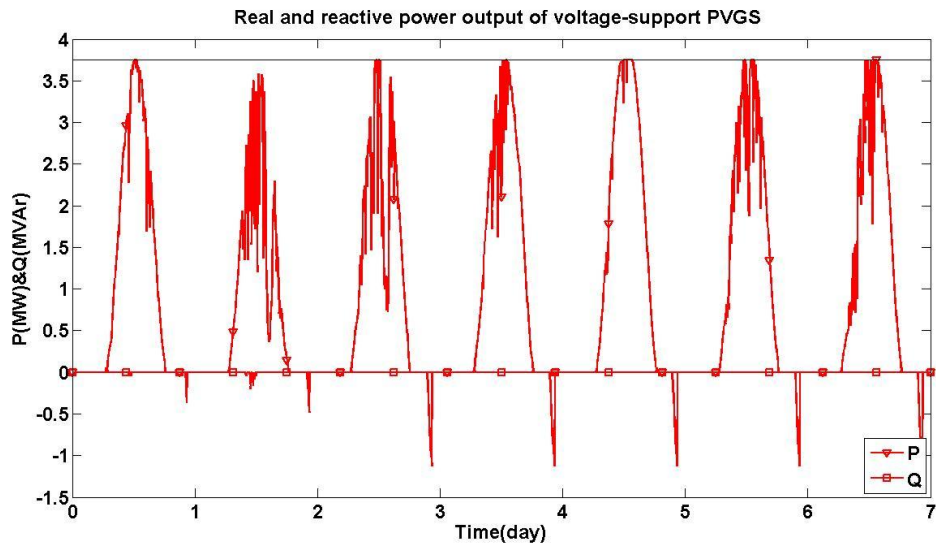
ภาพที่ 9.54 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57



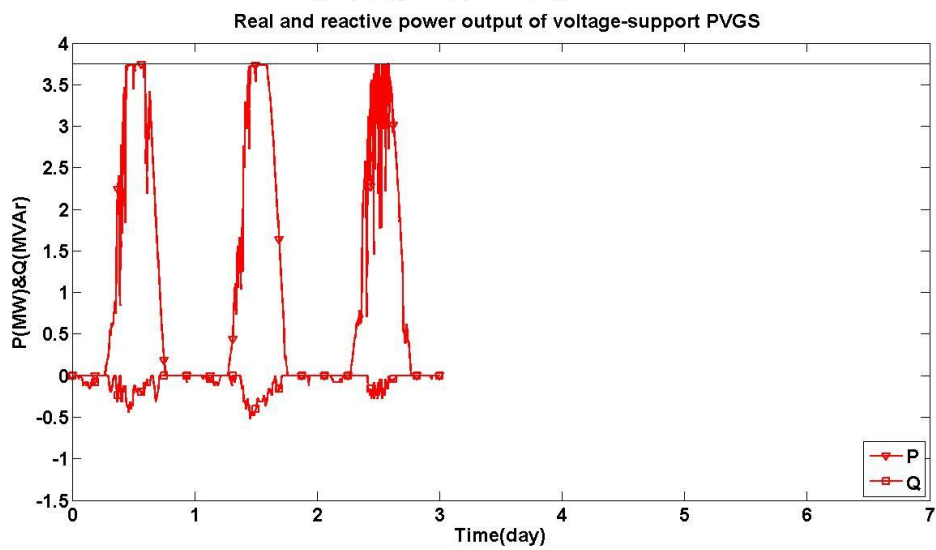
ภาพที่ 9.55 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57



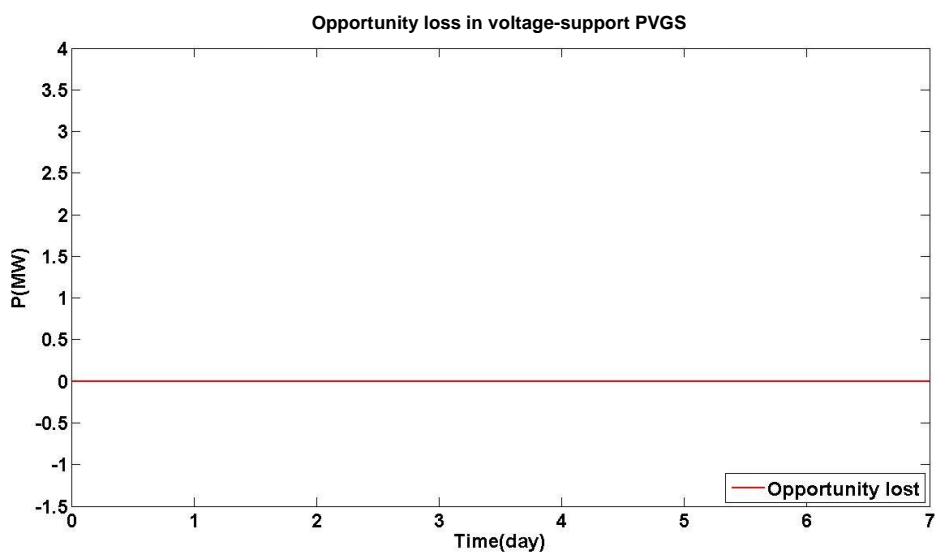
ภาพที่ 9.56 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 15-21
มี.ค. 57



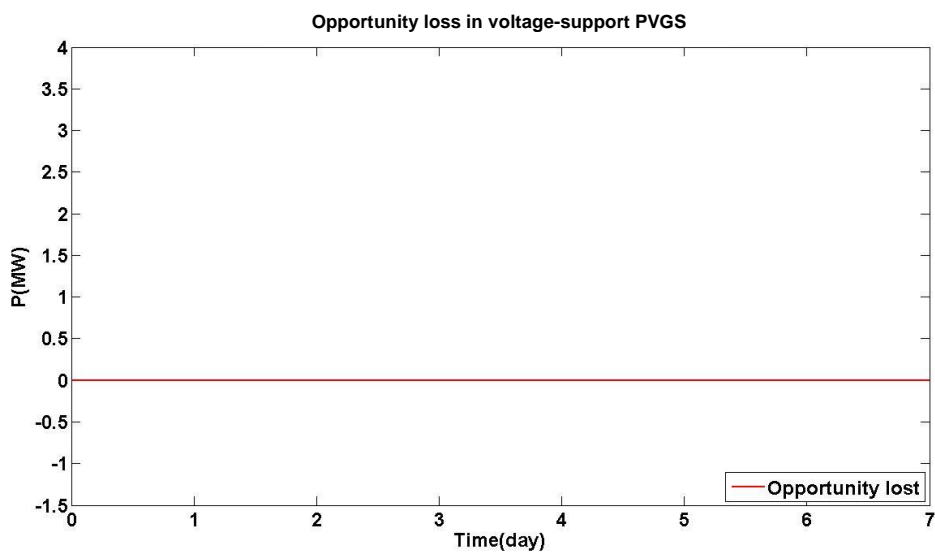
ภาพที่ 9.57 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57



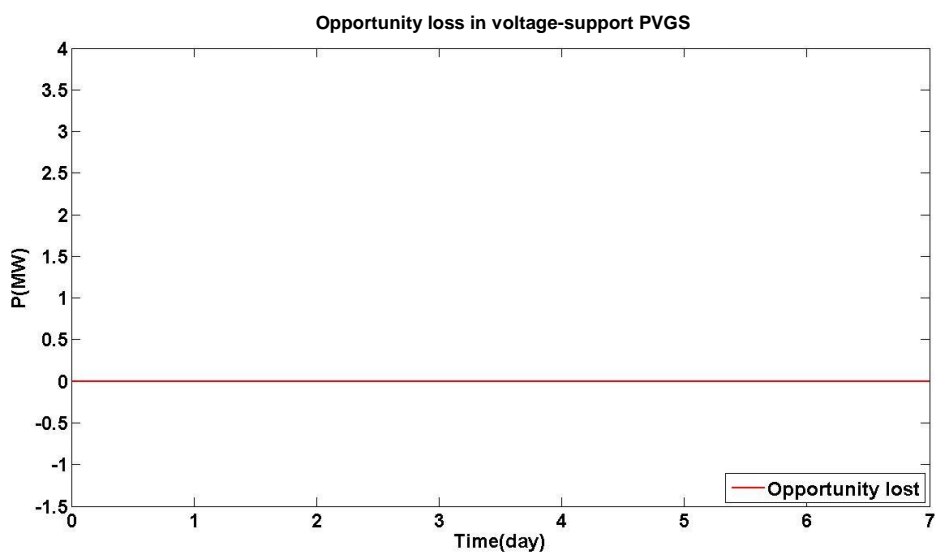
ภาพที่ 9.58 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57



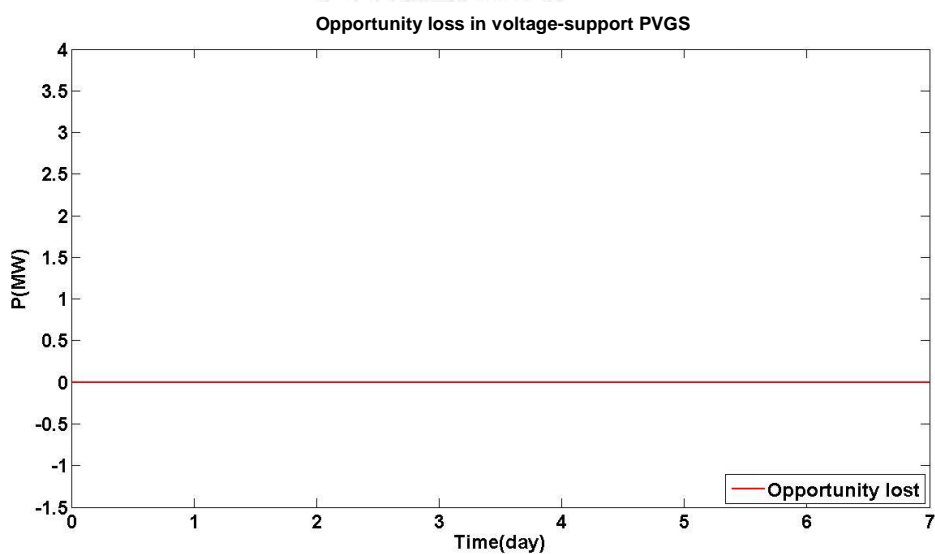
ภาพที่ 9.59 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57



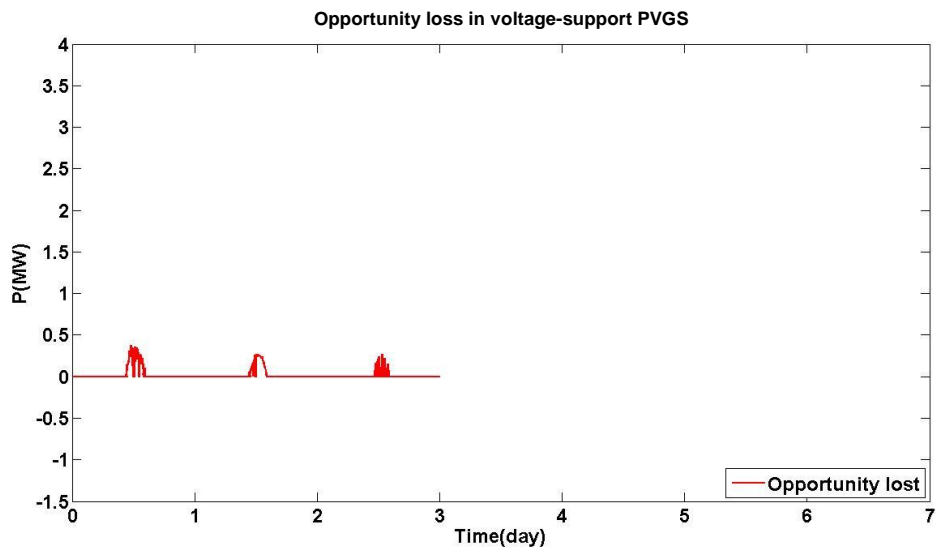
ภาพที่ 9.60 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57



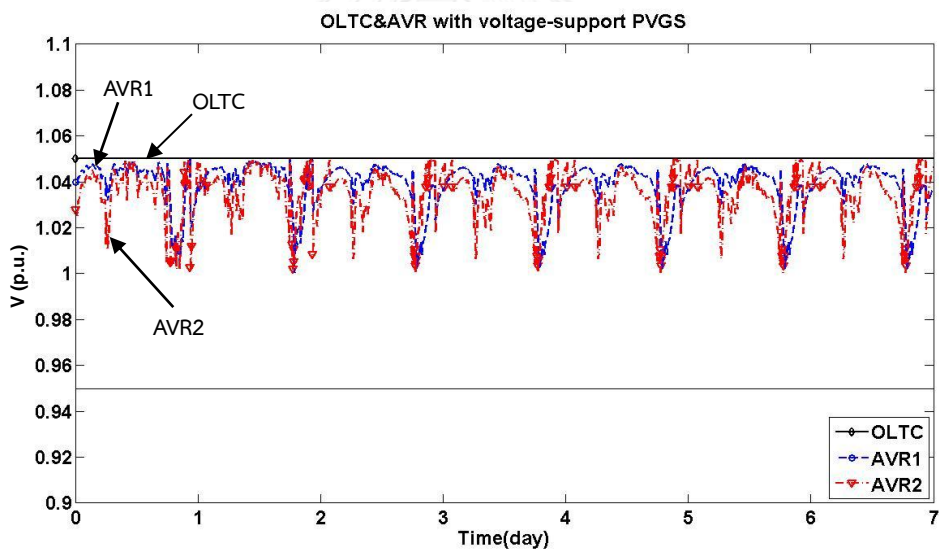
ภาพที่ 9.61 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57



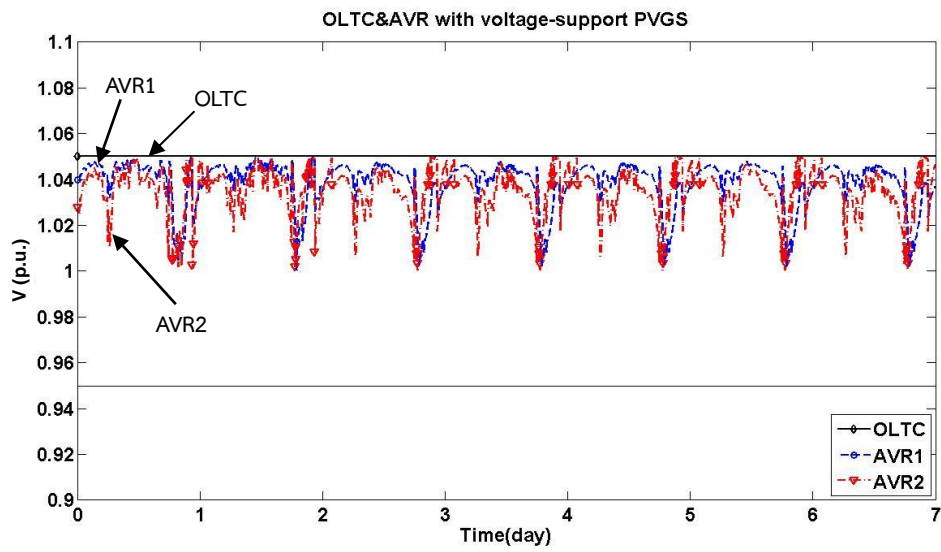
ภาพที่ 9.62 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57



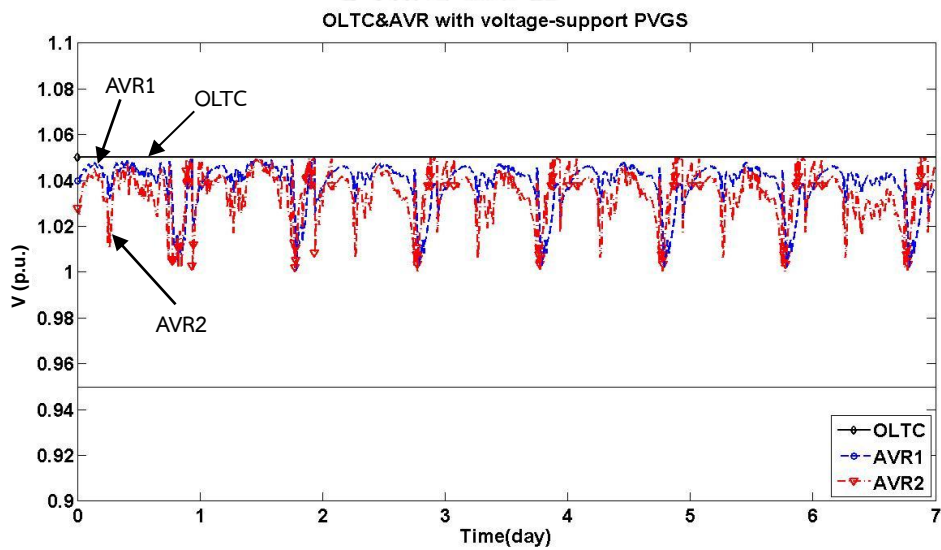
ภาพที่ 9.63 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57



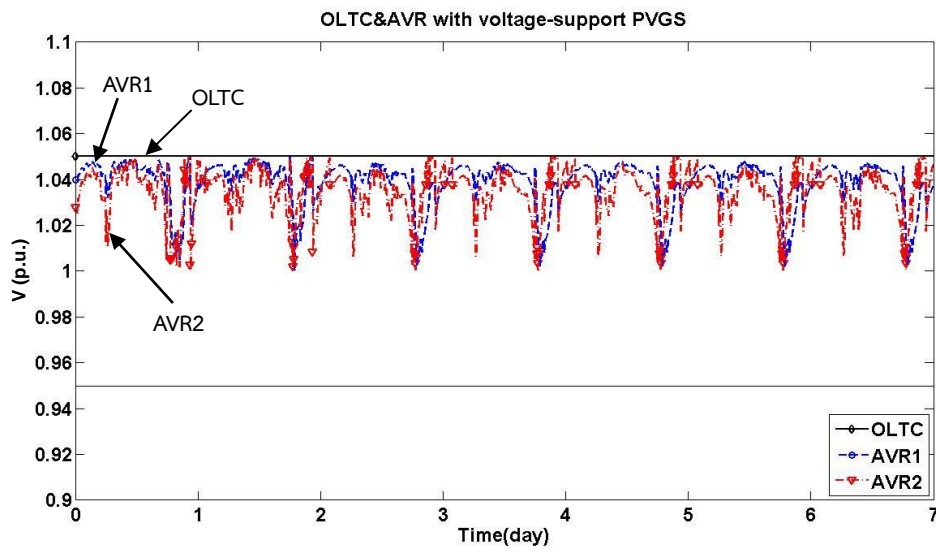
ภาพที่ 9.64 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57



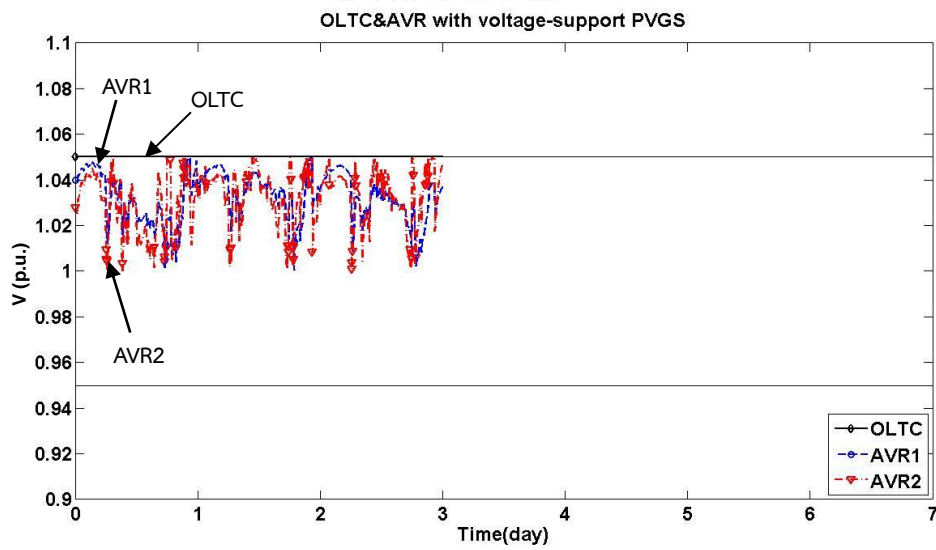
ภาพที่ 9.65 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57



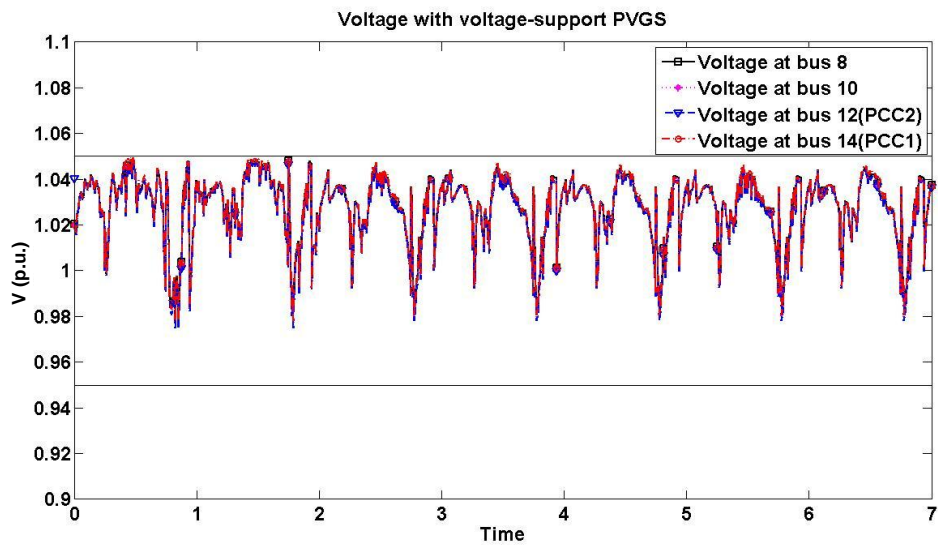
ภาพที่ 9.66 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57



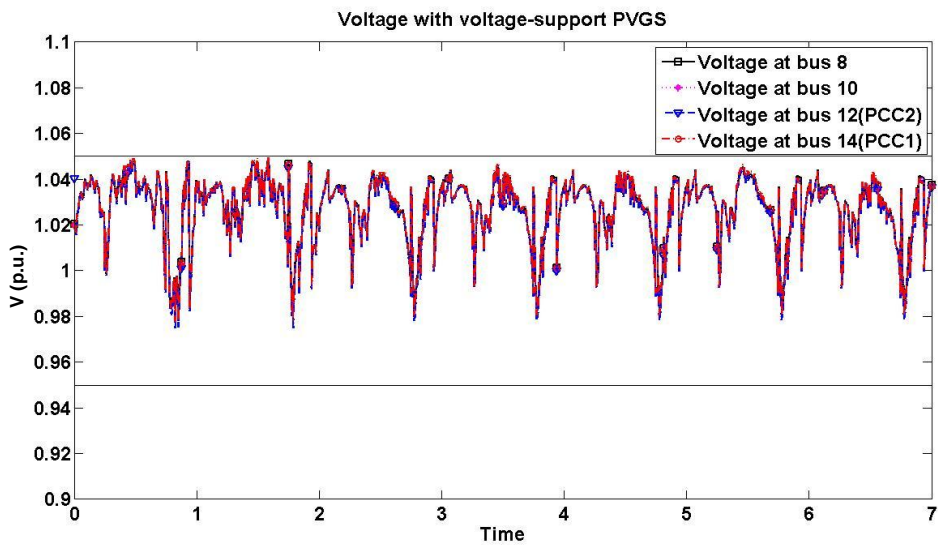
ภาพที่ 9.67 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57



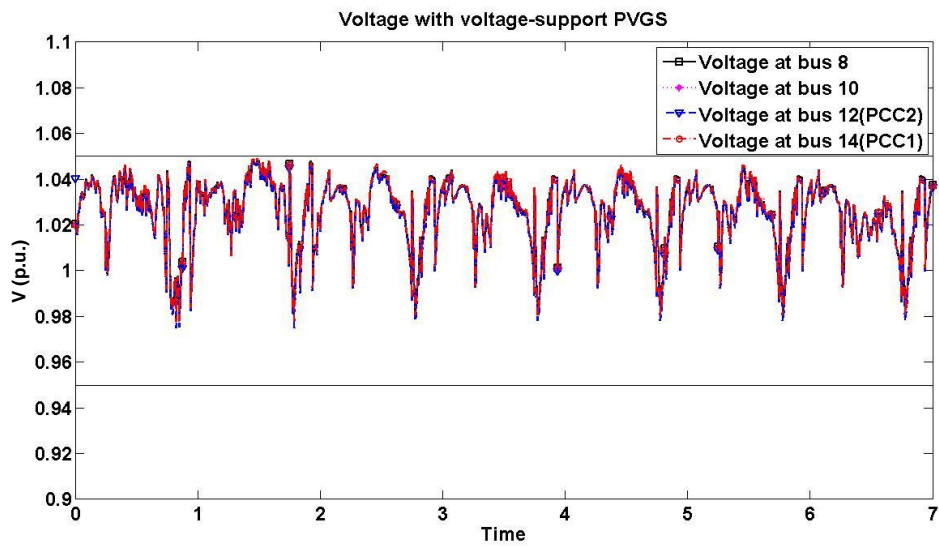
ภาพที่ 9.68 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57



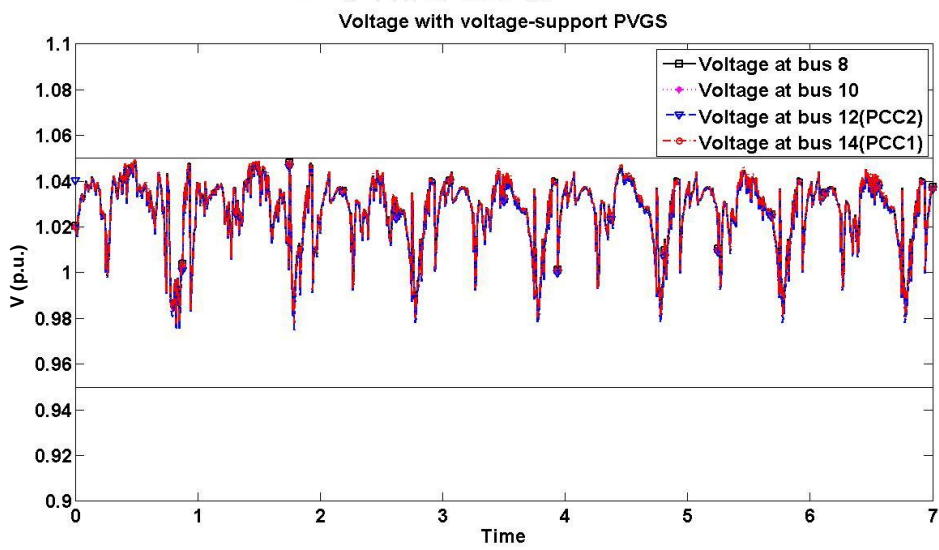
ภาพที่ 9.69 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57



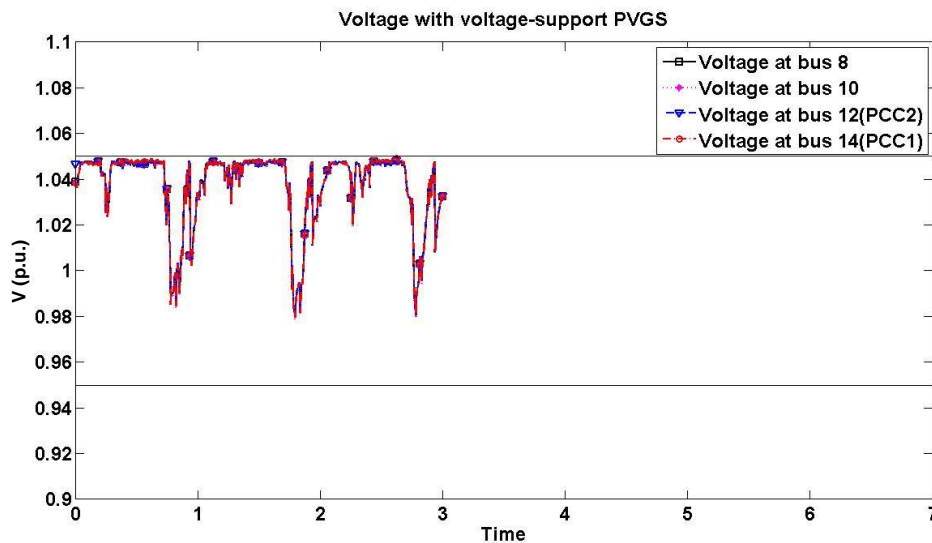
ภาพที่ 9.70 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57



ภาพที่ 9.71 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57



ภาพที่ 9.72 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57



ภาพที่ 9.73 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57

จากภาพที่ 9.49 ถึง 9.73 จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าในช่วงที่มีความเข้มแสงอาทิตย์ที่มากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายที่มากเช่นกัน ทำให้ในช่วงกลางวันซึ่งมีโหลดที่ค่อนข้างน้อยมีแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น และในบางช่วงเวลาระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าเกินกว่าร้อยละ 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ แต่ด้วยการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าซึ่งมีการรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ทำให้อุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้าซึ่งได้แก่ หม้อแปลงที่สามารถปรับแท็ปได้ ตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าตัวที่ 1 และ 2 ไม่จำเป็นต้องทำงานเพื่อช่วยให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าเข้าสู่ช่วงแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสม และในช่วงเวลากลางคืนที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้าก็จะมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลของโหลด ซึ่งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ได้ ทำให้อุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้ามีการทำงานที่น้อยลง ส่วนการทำงานในวันที่ 29 ถึง 31 มีนาคม 2557 ซึ่งเป็นช่วงที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงอย่างมากเนื่องจากการลดลงของโหลด ทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ยังคงสามารถช่วยให้ระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมได้ด้วยการรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟและการจำกัดกำลังไฟฟ้าจริง โดยกรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานในช่วงเวลาทุก 15 นาทีสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 9.15 และสรุปผลการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วย พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ค่าสูญเสียโอกาสจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริง ค่ารักษา

ระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า และค่าปรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้า สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 9.16 และการเปรียบเทียบรายรับของทั้ง 2 การทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 9.17

ตารางที่ 9.15 จำนวนครั้งของแต่ละกรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน (ค่าฐานนิยมใน 15 นาที)

	$nCase_1$	$nCase_2$	$nCase_3$	$nCase_4$	$nCase_0$	$nCase_{-1}$	$nCase_{-2}$
สัปดาห์ที่ 1	319	0	0	0	329	24	0
สัปดาห์ที่ 2	317	0	0	0	332	23	0
สัปดาห์ที่ 3	310	0	0	0	338	24	0
สัปดาห์ที่ 4	323	0	0	0	328	21	0
สัปดาห์ที่ 5	0	0	140	0	113	35	0
รวม	1,269	0	140	0	1,436	131	0

ตารางที่ 9.16 สรุปผลการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1 เดือน

	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (หน่วย)	ค่าสูญเสียโอกาสจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริง (หน่วย)	ค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า (เมกะวาร์)	ค่าปรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้า / โหลดสูงสุด (เมกะวาร์ / เมกะวัตต์)
สัปดาห์ที่ 1	131,580.40	0	0	0.2 / 0.05
สัปดาห์ที่ 2	119,302.82	0	0	
สัปดาห์ที่ 3	107,395.28	0	0	
สัปดาห์ที่ 4	123,917.50	0	0	
สัปดาห์ที่ 5	58,674.20	1,444.89	0	
รวม	540,870.20	1,444.89	-	0.2 / 0.05
คิดเป็นเงิน	5,879,259.08 บาท	15,705.95 บาท	0 บาท	9,476.67 บาท

ตารางที่ 9.17 เปรียบเทียบผลการดำเนินงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1 เดือน

	ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน	ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่สนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า
รวมรายได้คิดเป็นเงิน	5,840,789.65 บาท	5,854,076.46 บาท

9.3 การทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในกรณีที่ไม่มีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า ในระยะเวลา 1 เดือน

ในหัวข้อนี้จะได้ทำการทดสอบระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่มีการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในระยะเวลา 1 เดือน ซึ่งจะกำหนดให้อุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้าไม่มีการทำงาน โดยระบบทดสอบที่ใช้ในการทดสอบของหัวข้อนี้ คือ ระบบโครงข่ายไฟฟ้า อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน ดังหัวข้อที่ 8.1 และระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ทดสอบเป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการทำงานอยู่จริงในระบบโครงข่ายไฟฟ้า อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน ดังหัวข้อที่ 8.2 ส่วนข้อมูลความเข้มแสงและอุณหภูมิที่ใช้จำลองกำลังการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นข้อมูลที่ได้รับจากอินเวอร์เตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอยู่บนอาคารเจริญวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในเดือน มีนาคม พ.ศ. 2557 และใช้ข้อมูลลักษณะการใช้ไฟฟ้าตามหัวข้อที่ 8.3 โดยจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

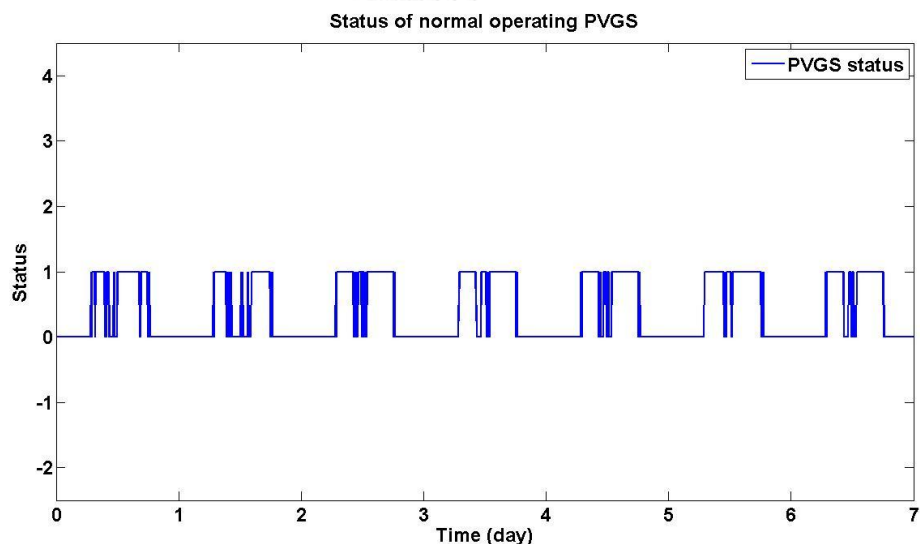
- 9.3.1 การทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ในกรณีที่ไม่มีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า ในระยะเวลา 1 เดือน
- 9.3.2 การทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณีที่ไม่มีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า ในระยะเวลา 1 เดือน

9.3.1 การทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ในกรณีที่ไม่มีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า ในระยะเวลา 1 เดือน

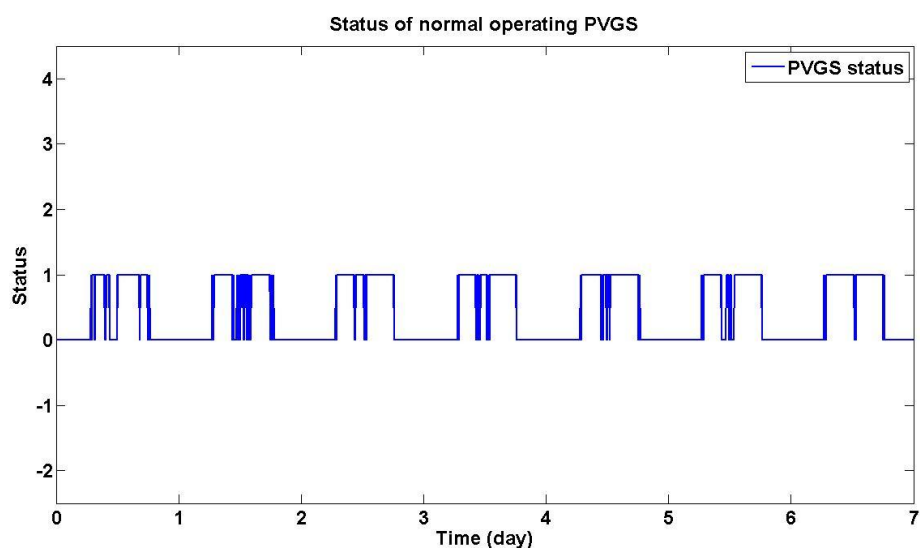
การทดสอบในส่วนนี้จะได้ทดสอบการทำงานของแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันซึ่งจะมีการคงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าไว้ที่ 1 ตลอดการทดสอบ โดยที่ไม่มีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า เพื่อศึกษาผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าและการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 8.2 ถึง 8.4 ความเข้มแสงอาทิตย์ ดังแสดงในภาพที่ 8.5 ถึง 8.9 และอุณหภูมิ ดังแสดงในภาพที่ 8.10 ถึง 8.14 ซึ่งการทดสอบในวันที่ 1 ถึง 31 มีนาคม 2557 ลักษณะของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ตามปกติ

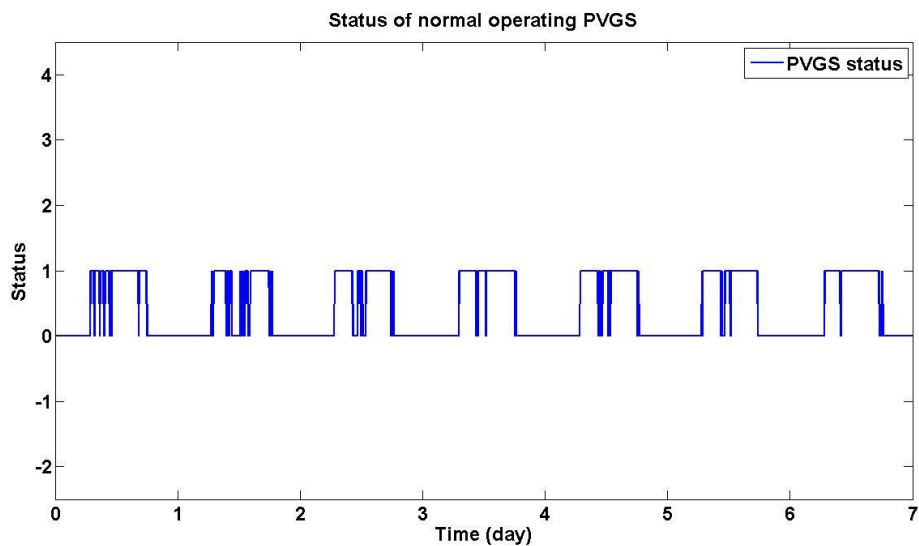
ผลการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น ส่วน ได้แก่ (1) กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ดังภาพที่ 9.74 ถึง 9.78 (2) กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ และกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากลดลงของกำลังไฟฟ้าจริง ดังภาพที่ 9.79 ถึง 9.83 และภาพที่ 9.84 ถึง 9.88 ตามลำดับ (3) แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ติดตั้งอุปกรณ์รักษา ระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า ดังภาพที่ 9.89 ถึง 9.93 (4) แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ดังภาพที่ 9.94 ถึง 9.98



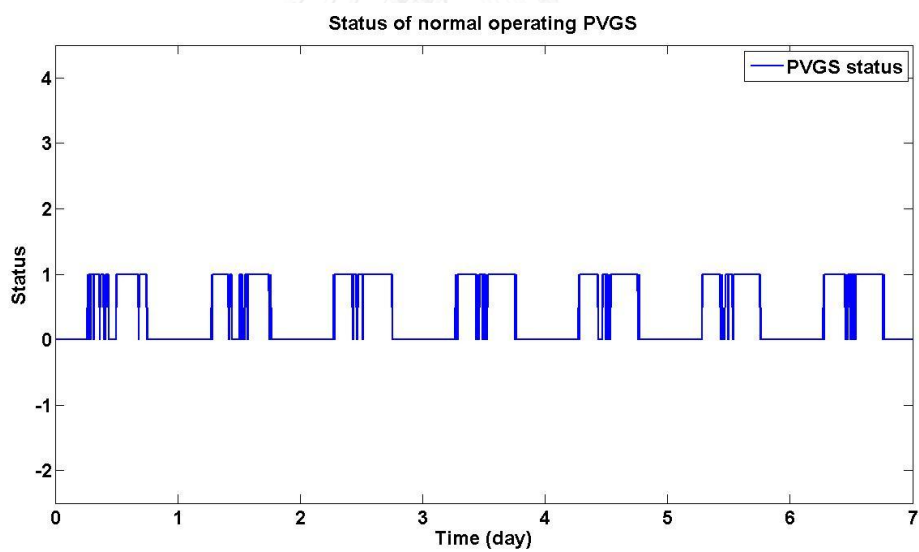
ภาพที่ 9.74 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57



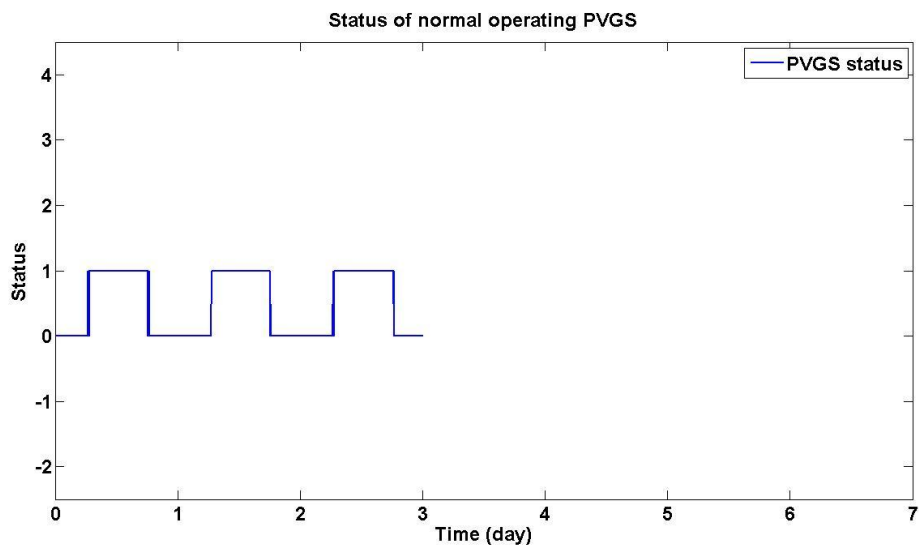
ภาพที่ 9.75 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57



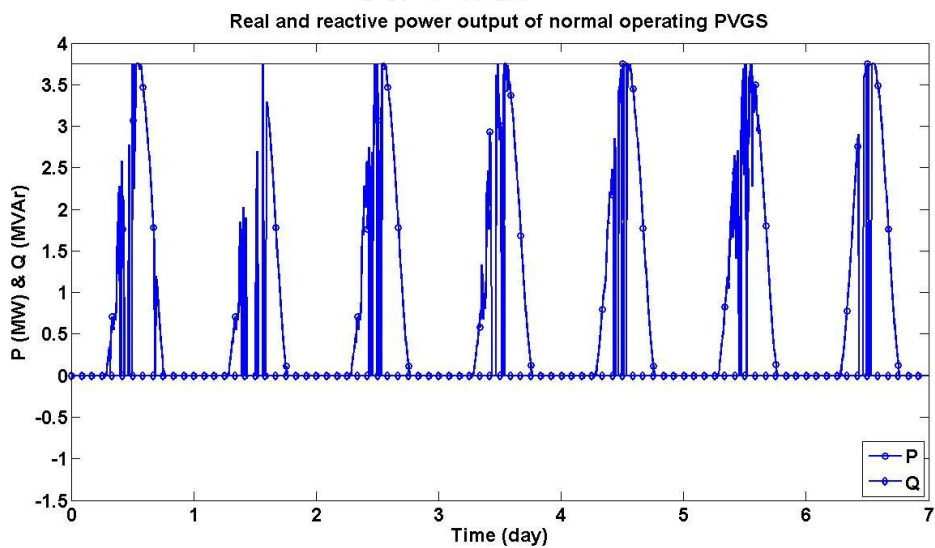
ภาพที่ 9.76 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57



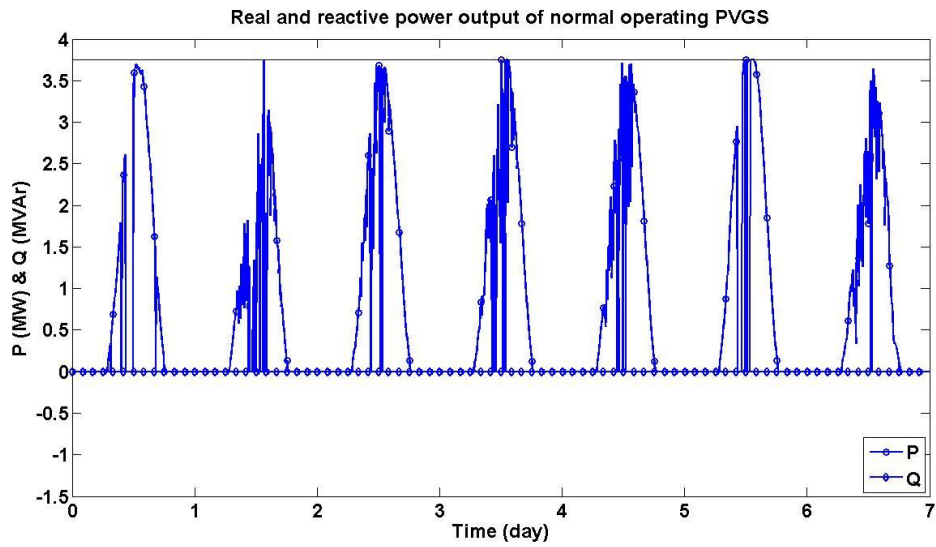
ภาพที่ 9.77 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57



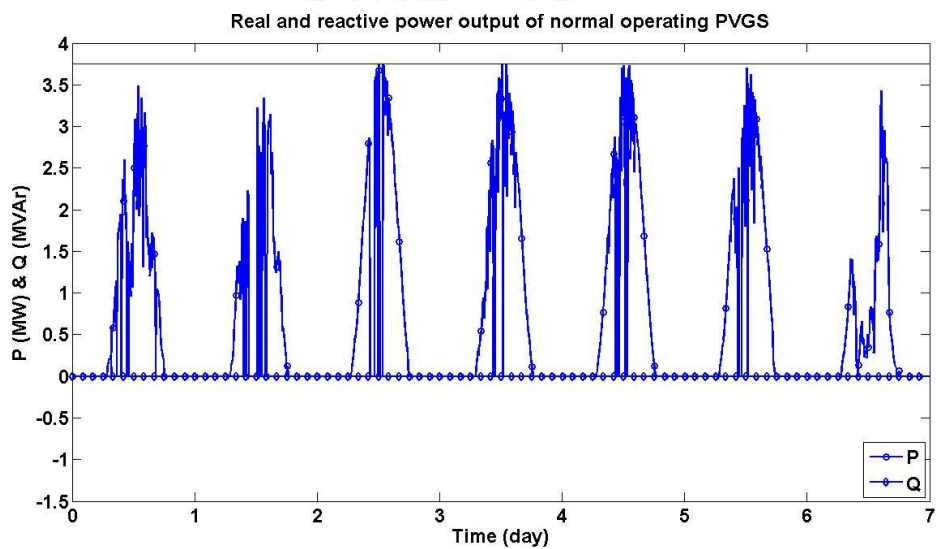
ภาพที่ 9.78 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57



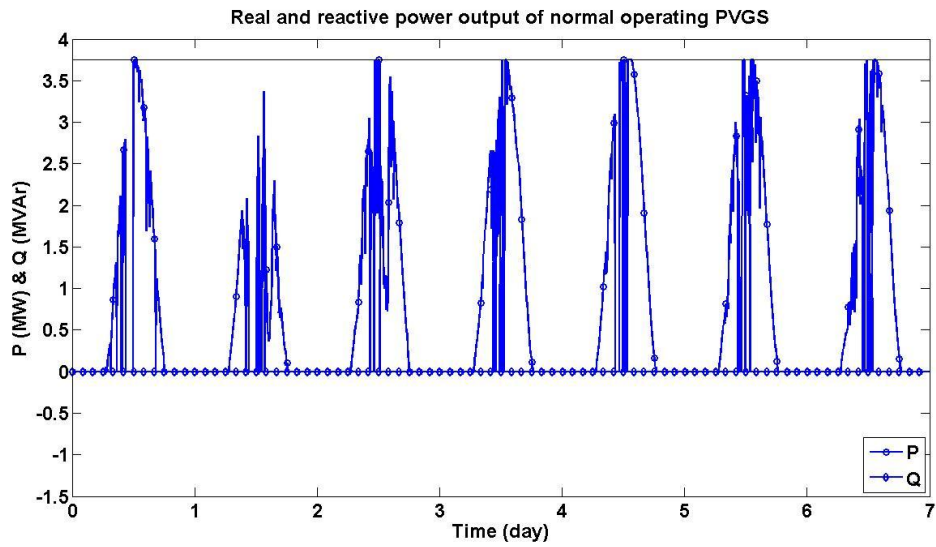
ภาพที่ 9.79 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57



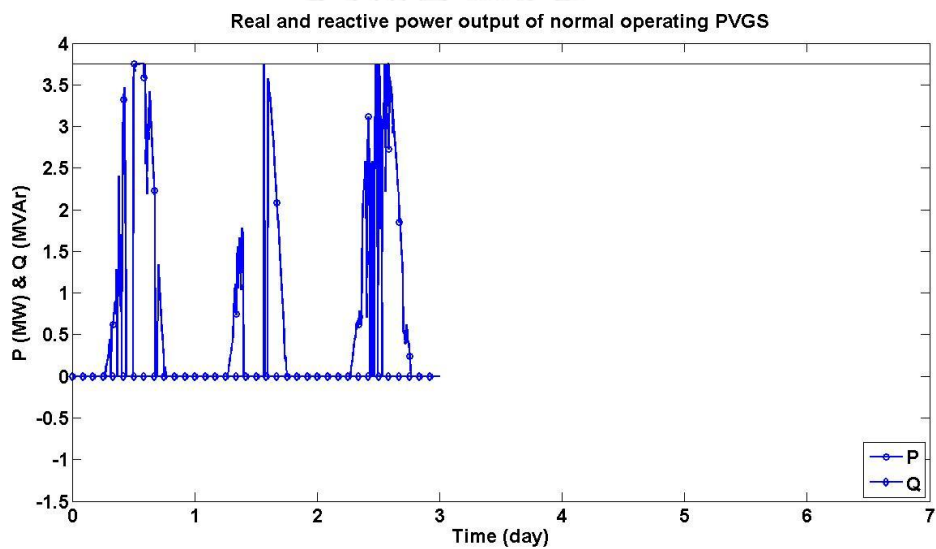
ภาพที่ 9.80 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57



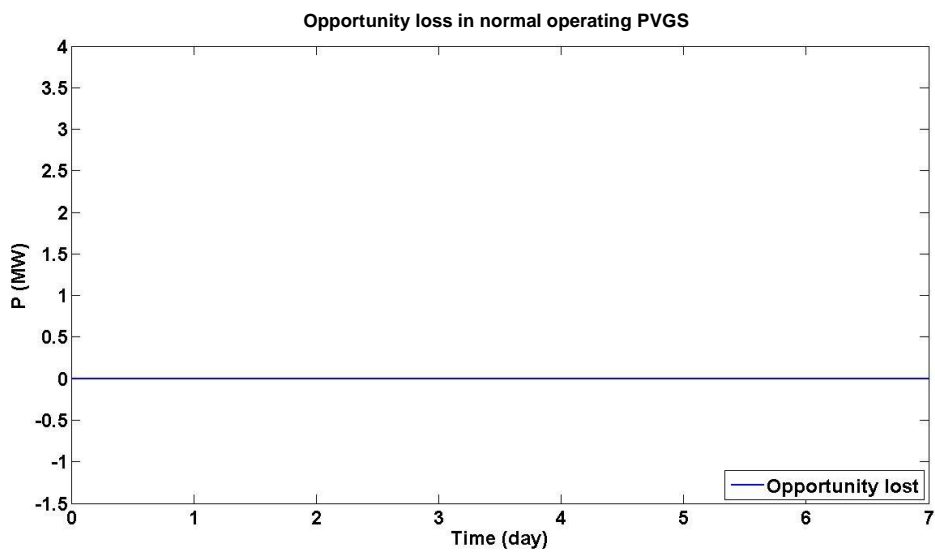
ภาพที่ 9.81 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57



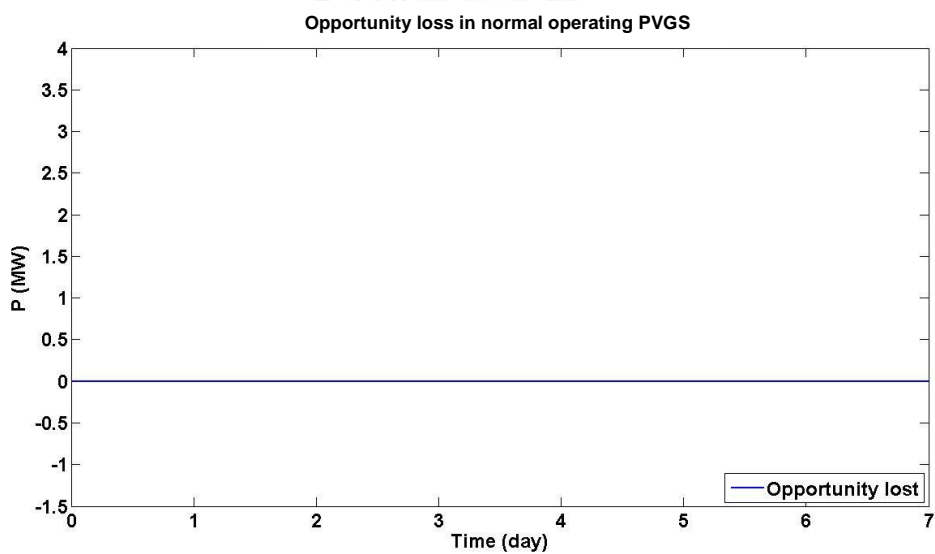
ภาพที่ 9.82 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57



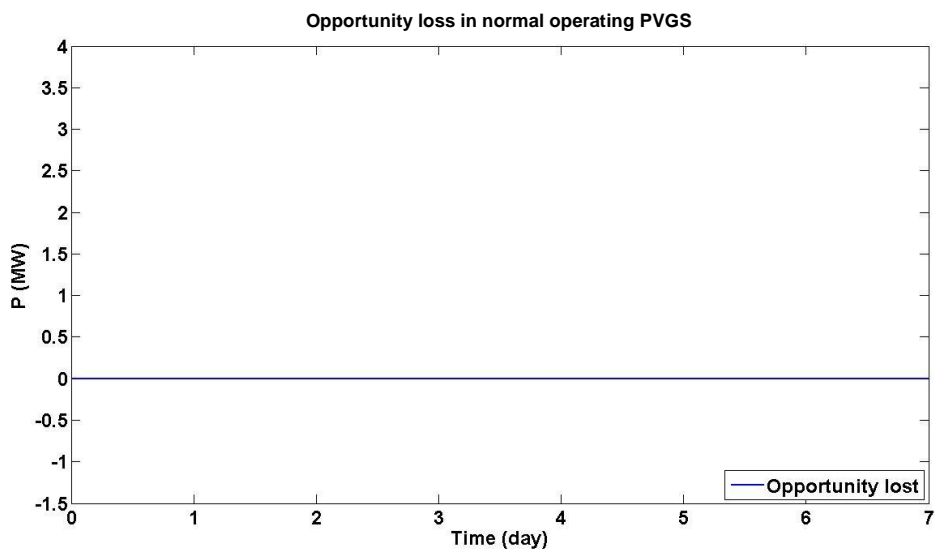
ภาพที่ 9.83 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57



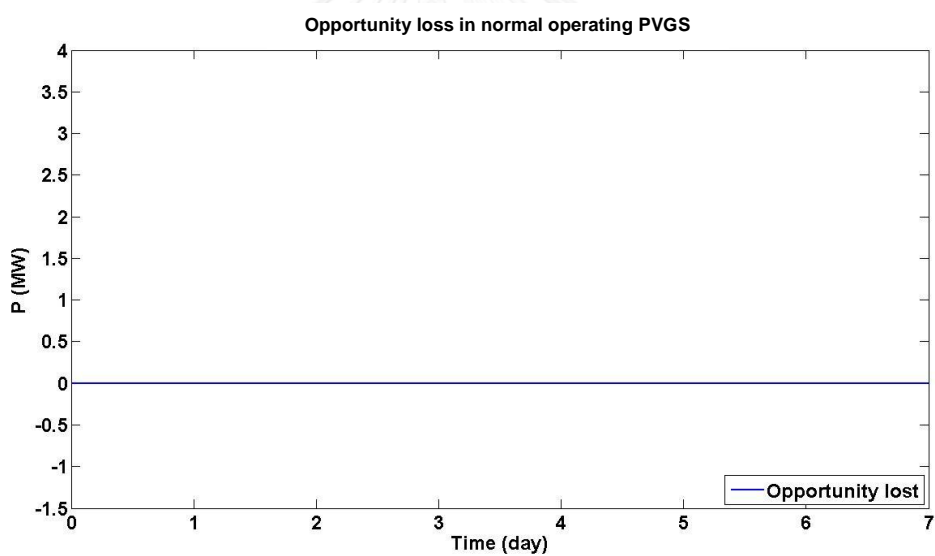
ภาพที่ 9.84 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57



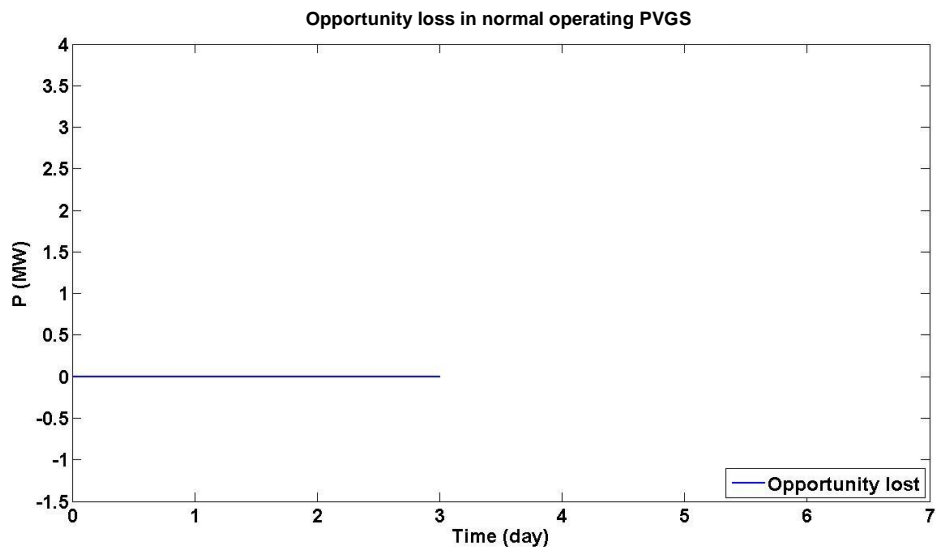
ภาพที่ 9.85 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57



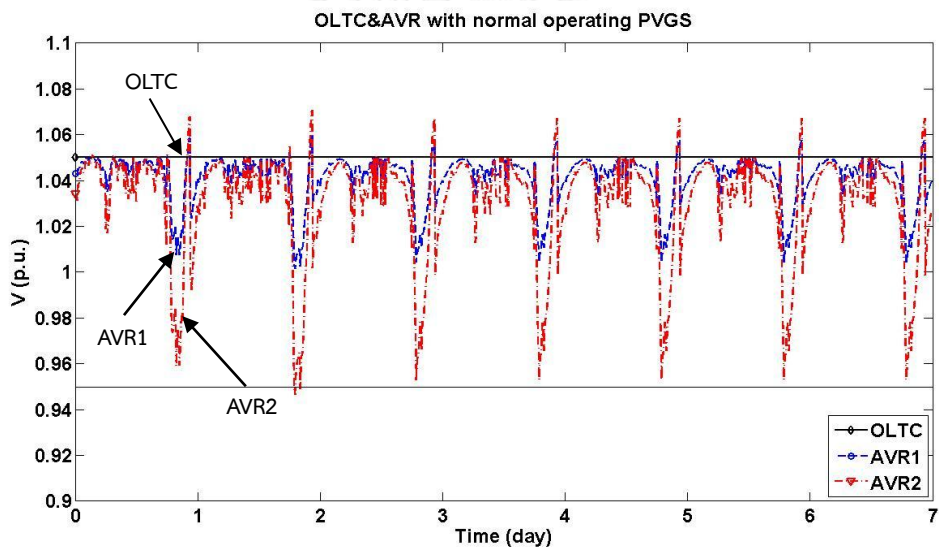
ภาพที่ 9.86 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57



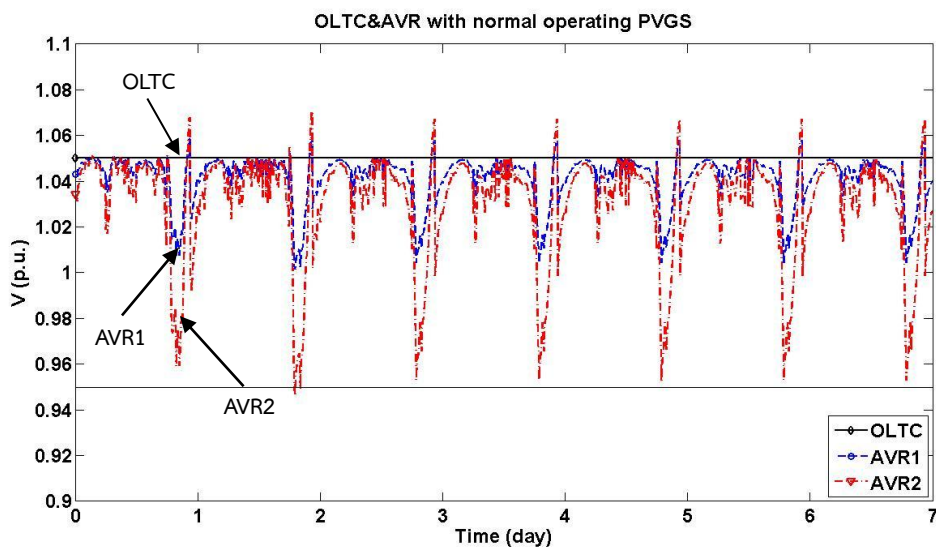
ภาพที่ 9.87 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57



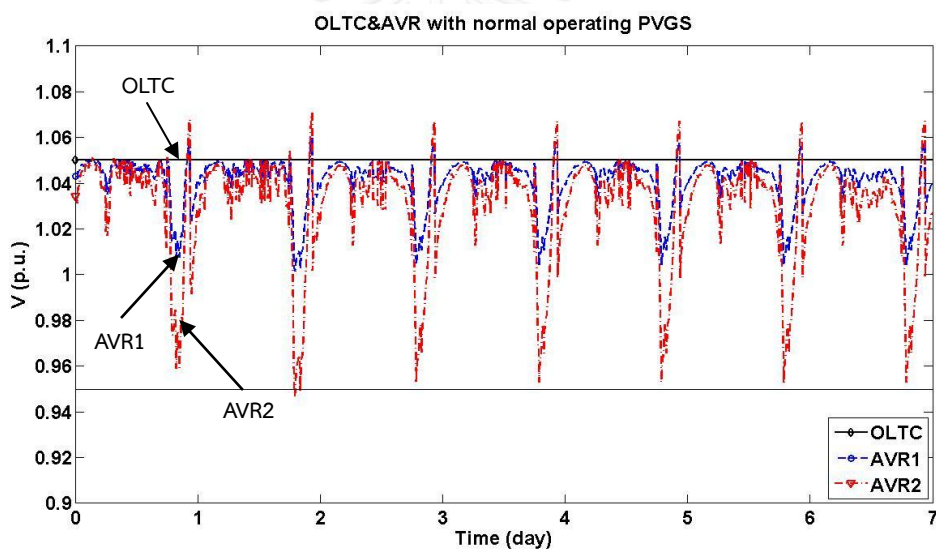
ภาพที่ 9.88 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57



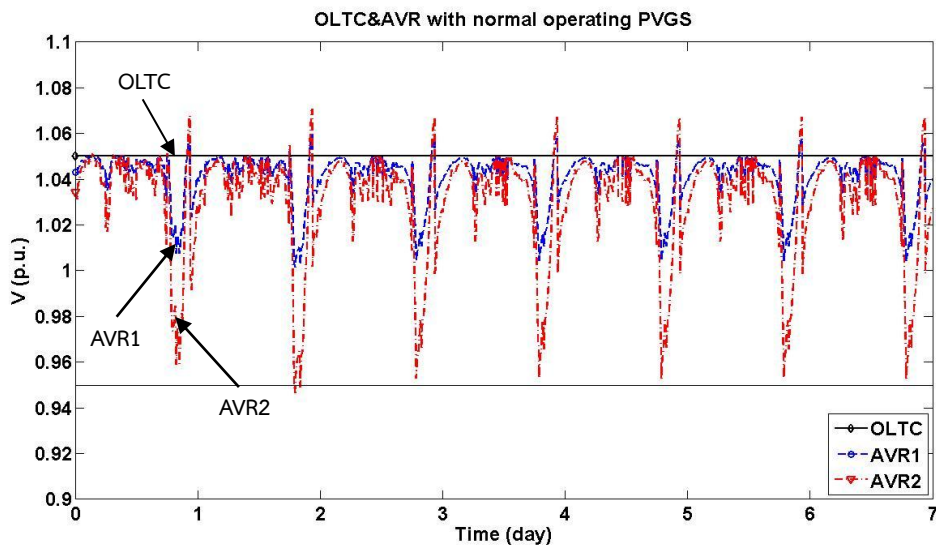
ภาพที่ 9.89 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57



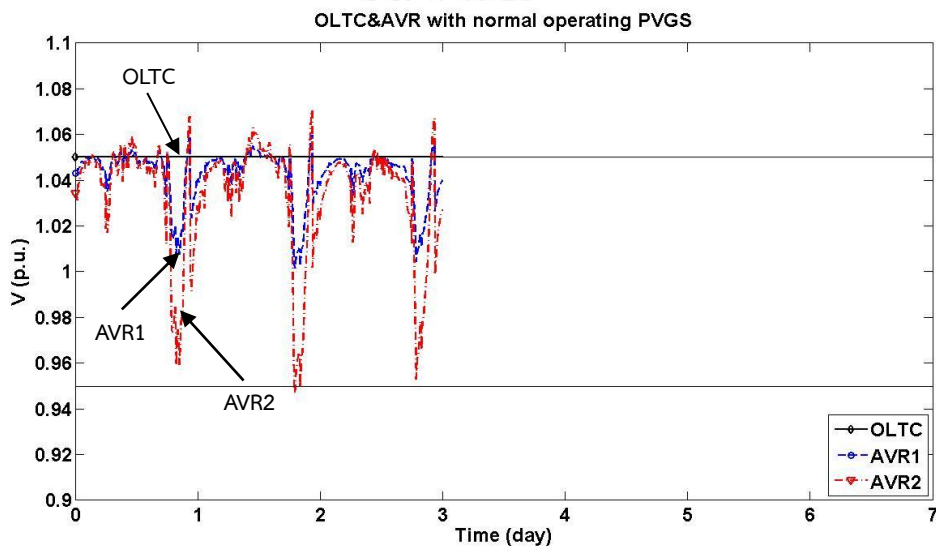
ภาพที่ 9.90 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57



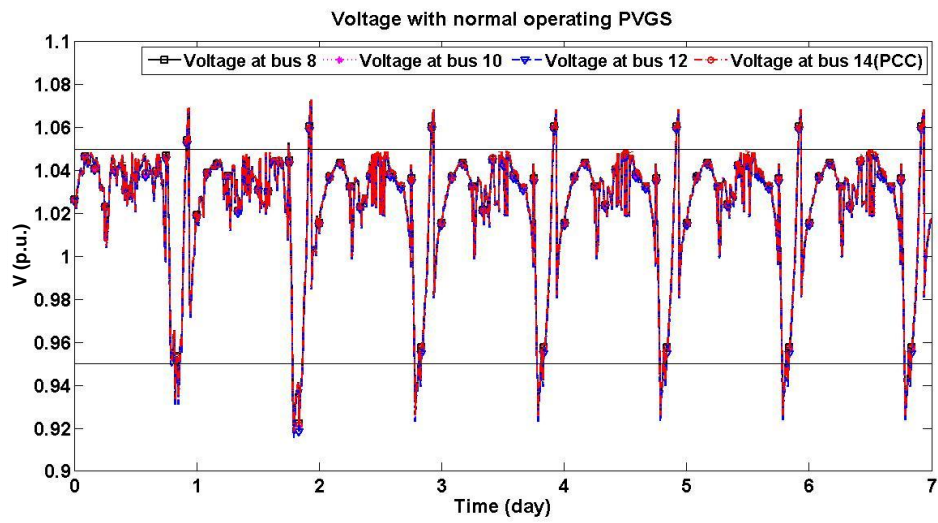
ภาพที่ 9.91 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57



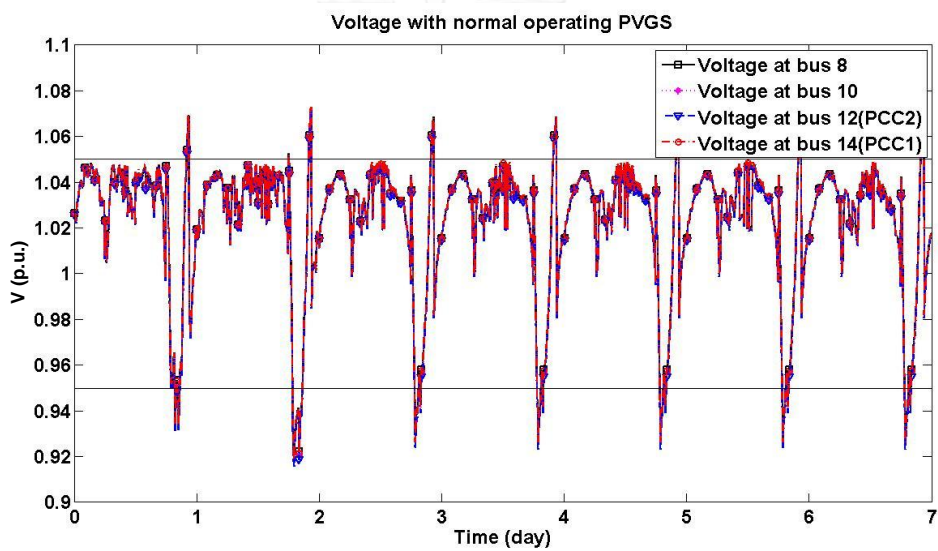
ภาพที่ 9.92 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 21-28 มี.ค. 57



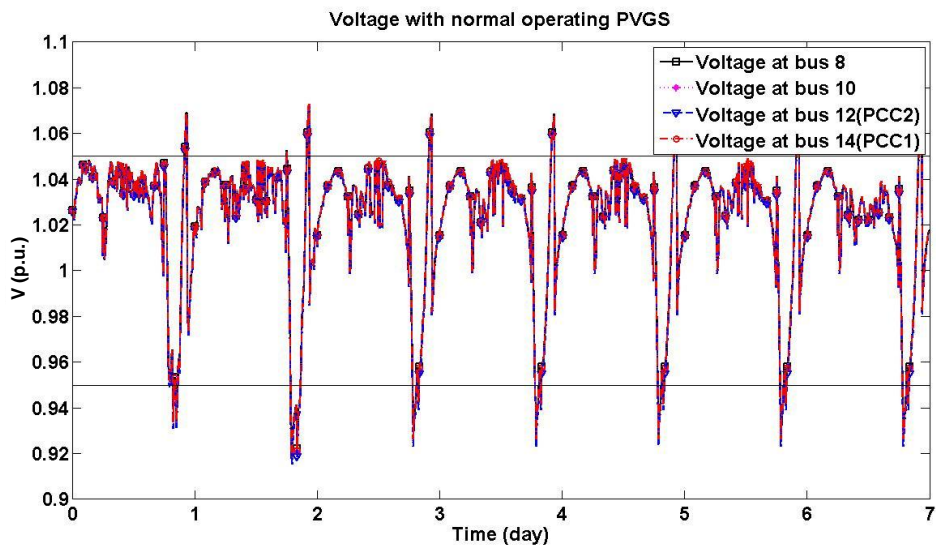
ภาพที่ 9.93 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57



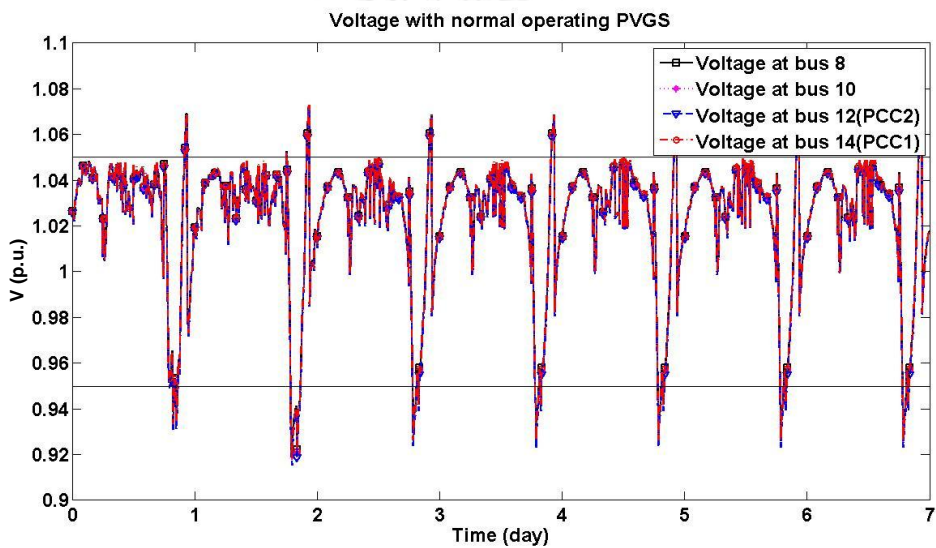
ภาพที่ 9.94 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57



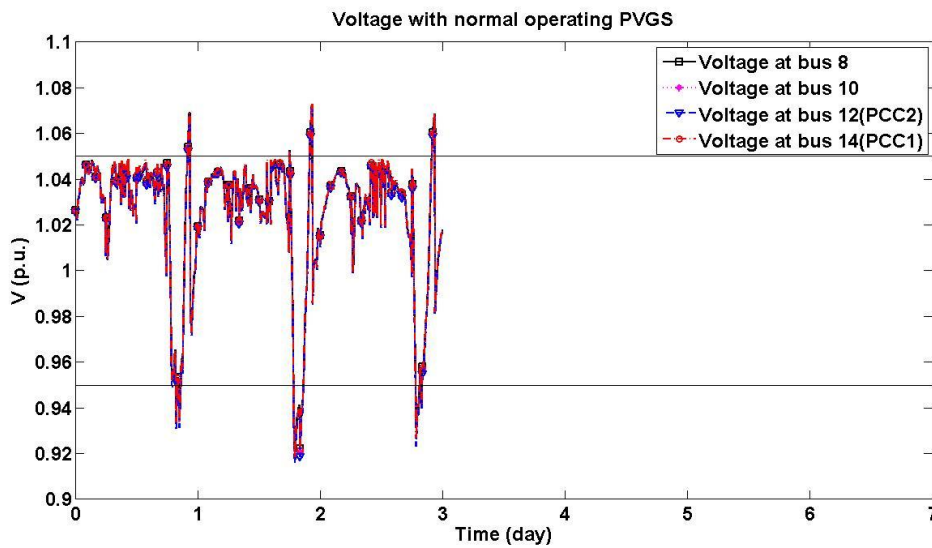
ภาพที่ 9.95 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57



ภาพที่ 9.96 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57



ภาพที่ 9.97 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57



ภาพที่ 9.98 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 28-31 มี.ค. 57

จากภาพที่ 9.74 ถึง 9.98 จะเห็นว่าในการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันซึ่งไม่มีการช่วยสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้านั้น แรงดันไฟฟ้าในช่วงที่มีความเข้มแสงอาทิตย์ที่มากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายที่มากเช่นกัน ทำให้ในช่วงกลางวันซึ่งมีโหลดที่ค่อนข้างน้อยมีแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น และในบางช่วงเวลาระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าเกินกว่าร้อยละ 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ และเนื่องจากไม่มีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้าจึงทำให้แรงดันไฟฟ้า ณ บัสเชื่อมต่อมีค่าเกินกว่าร้อยละ 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ ทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ต้องปลดตัวออกจากระบบโครงข่ายไฟฟ้า ดังนั้นในบางช่วงเวลาระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ และในช่วงเวลากลางคืนที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีการทำงาน แรงดันไฟฟ้าก็จะมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลของโหลด แรงดันไฟฟ้าจึงมีการเปลี่ยนแปลงออกนอกช่วงที่เหมาะสมเช่นกัน เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันจะไม่มีสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยกรณีจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานในช่วงเวลาทุก 15 นาทีสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 9.18 และสรุปผลการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วย พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ค่าสูญเสียโอกาสจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริง ค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า และค่าปรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้า สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 9.19

ตารางที่ 9.18 จำนวนครั้งของแต่ละกรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน (ค่าฐานนิยมใน 15 นาที)

	$nCase_1$	$nCase_2$	$nCase_3$	$nCase_4$	$nCase_0$	$nCase_{-1}$	$nCase_{-2}$
สัปดาห์ที่ 1	258	0	0	0	414	0	0
สัปดาห์ที่ 2	285	0	0	0	387	0	0
สัปดาห์ที่ 3	280	0	0	0	392	0	0
สัปดาห์ที่ 4	288	0	0	0	384	0	0
สัปดาห์ที่ 5	105	0	0	0	183	0	0
รวม	1,216	0	0	0	1,760	0	0

ตารางที่ 9.19 สรุปผลการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1 เดือน

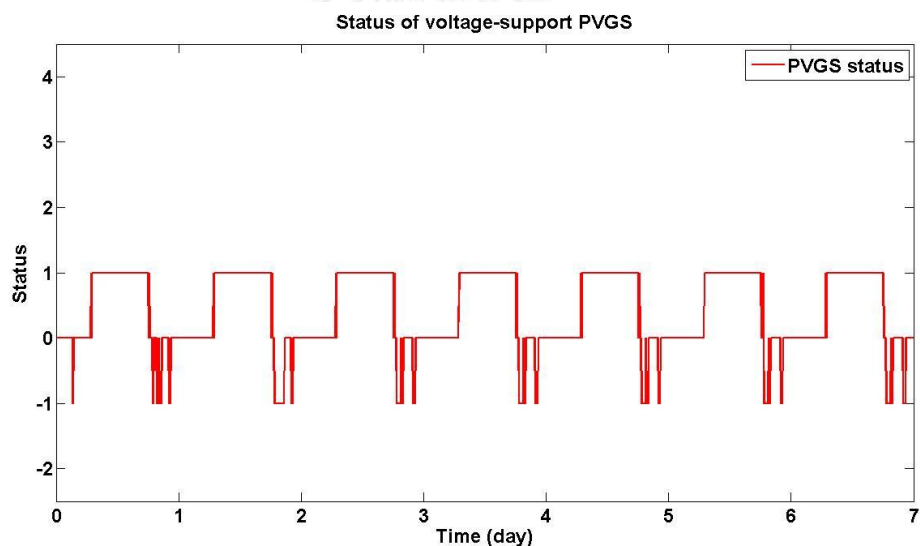
	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (หน่วย)	ค่าสูญเสียโอกาสจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริง (หน่วย)	ค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า (เมกะวาร์)	ค่าปรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้า / โหลดสูงสุด (เมกะวาร์ / เมกะวัตต์)
สัปดาห์ที่ 1	95,809.16	0	0	0 / 0.05
สัปดาห์ที่ 2	99,884.65	0	0	
สัปดาห์ที่ 3	88,158.13	0	0	
สัปดาห์ที่ 4	100,282.73	0	0	
สัปดาห์ที่ 5	38,146.27	0	0	
รวม	422,280.93	0	-	0 / 0.05
คิดเป็นเงิน	4,556,411.24 บาท	0 บาท	0 บาท	0 บาท

9.3.2 การทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่สนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณีที่ไม่มีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า ในระยะเวลา 1 เดือน

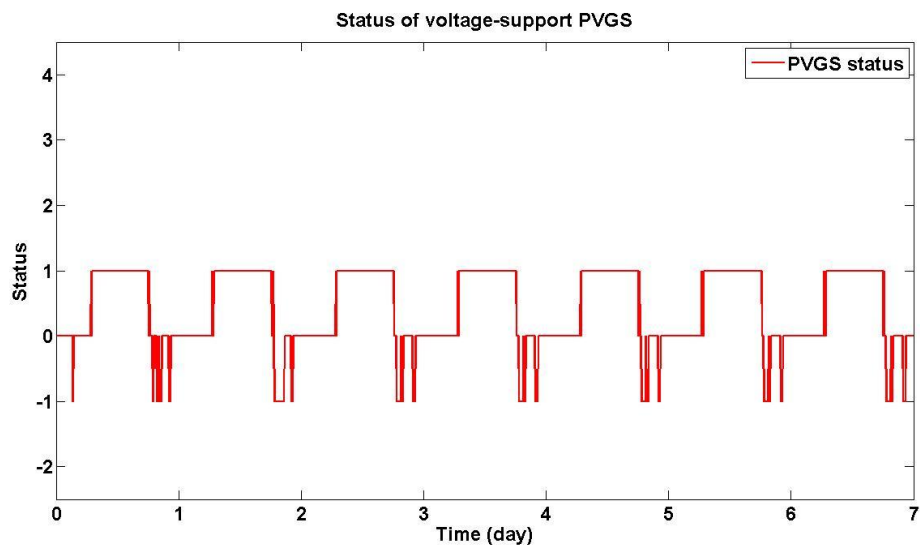
การทดสอบในส่วนนี้จะได้ทดสอบการทำงานของแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่จะมีการปรับการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในกรณีที่ไม่มีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับ

แรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า เพื่อศึกษาผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า การผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของโหลดในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 8.2 ถึง 8.4 ความเข้มแสงอาทิตย์ ดังแสดงในภาพที่ 8.5 ถึง 8.9 และอุณหภูมิ ดังแสดงในภาพที่ 8.10 ถึง 8.14 ซึ่งการทดสอบในวันที่ 1 ถึง 31 มีนาคม 2557 ลักษณะของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ตามปกติ

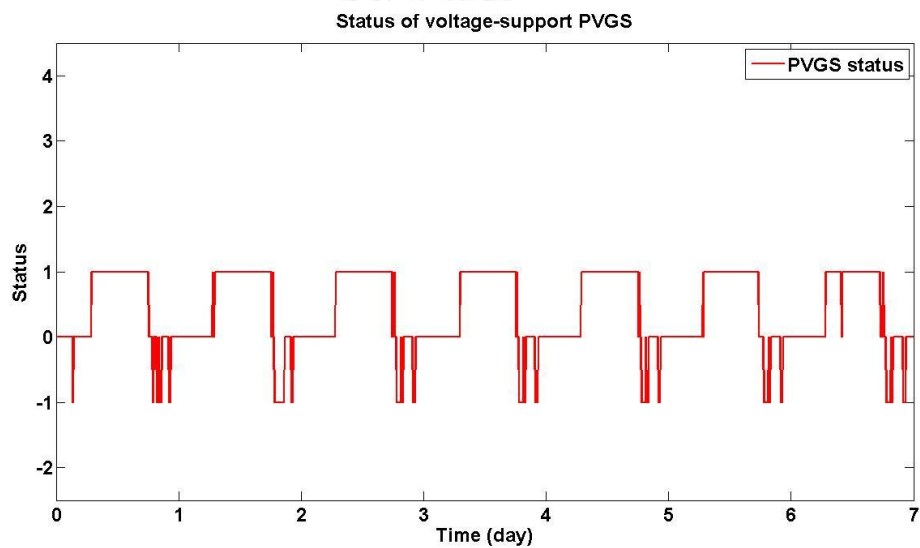
ผลการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น ส่วน ได้แก่ (1) กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ดังภาพที่ 9.99 ถึง 9.103 (2) กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ และกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากโหลดของกำลังไฟฟ้าจริง ดังภาพที่ 9.104 ถึง 9.108 และ ภาพที่ 9.109 ถึง 9.113 ตามลำดับ (3) แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ติดตั้งอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า ดังภาพที่ 9.114 ถึง 9.118 (4) แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ดังภาพที่ 9.119 ถึง 9.123



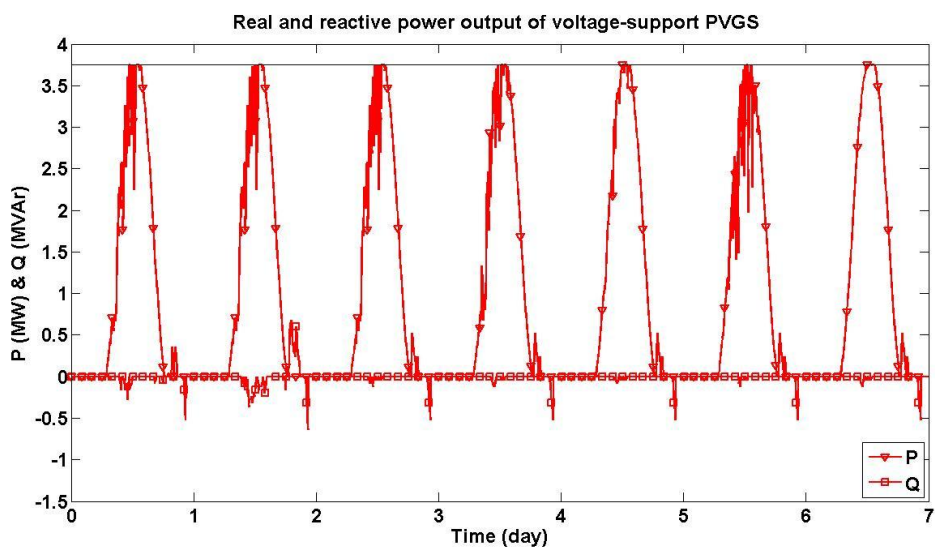
ภาพที่ 9.99 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57



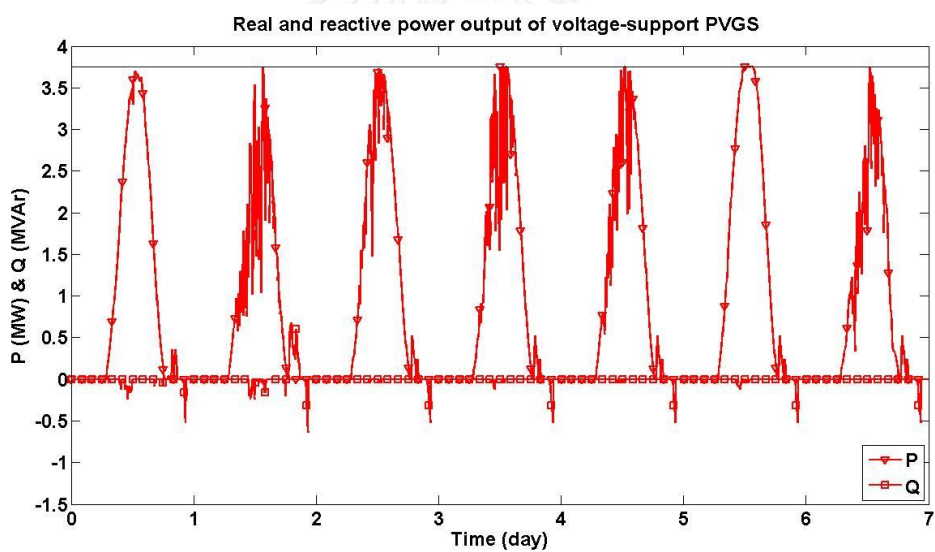
ภาพที่ 9.100 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57



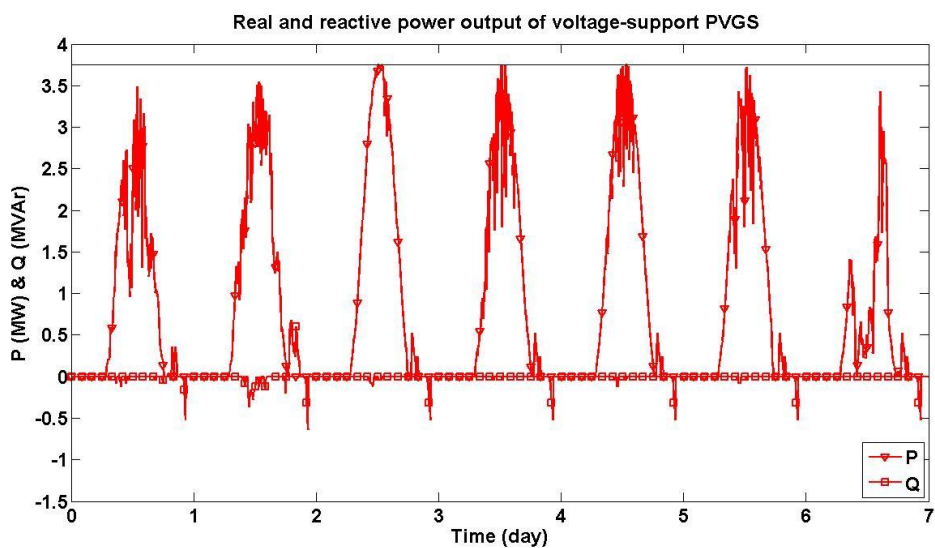
ภาพที่ 9.101 กรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57



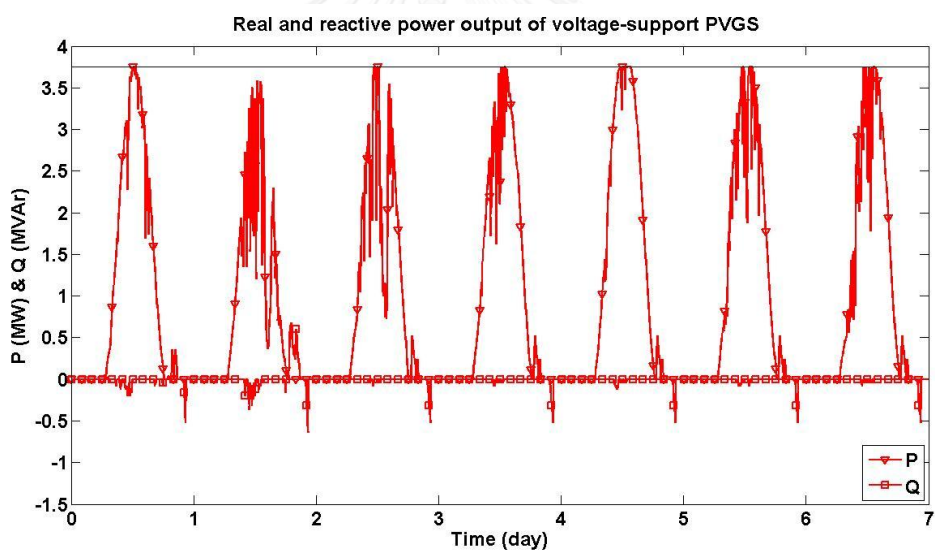
ภาพที่ 9.104 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57



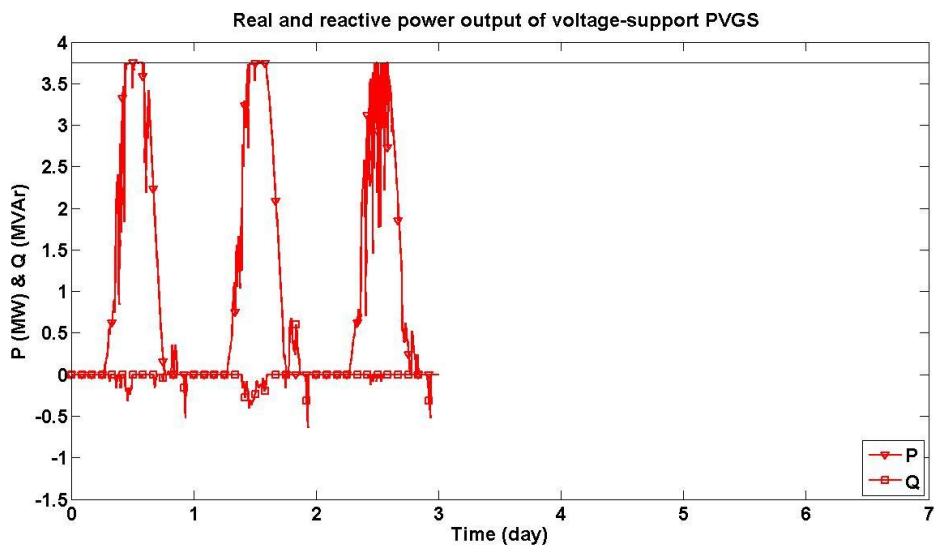
ภาพที่ 9.105 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57



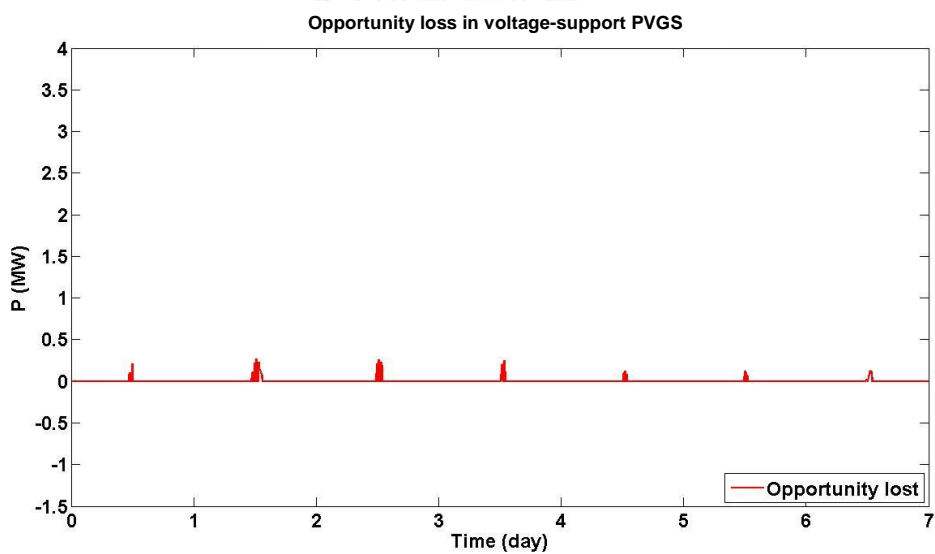
ภาพที่ 9.106 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57



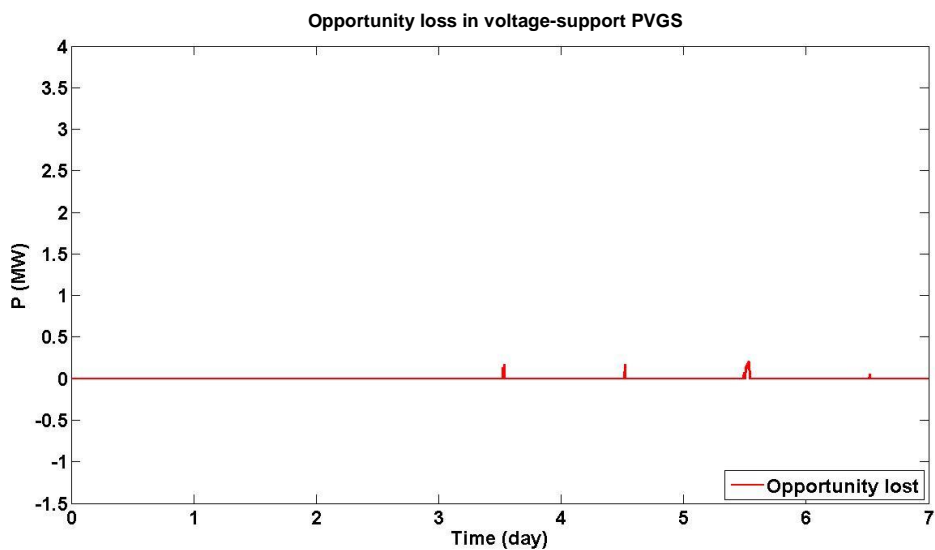
ภาพที่ 9.107 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57



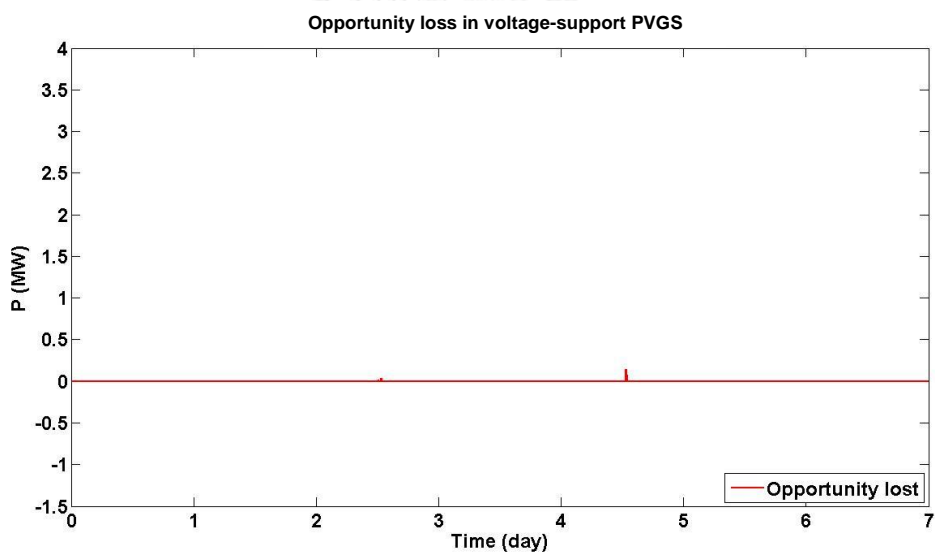
ภาพที่ 9.108 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57



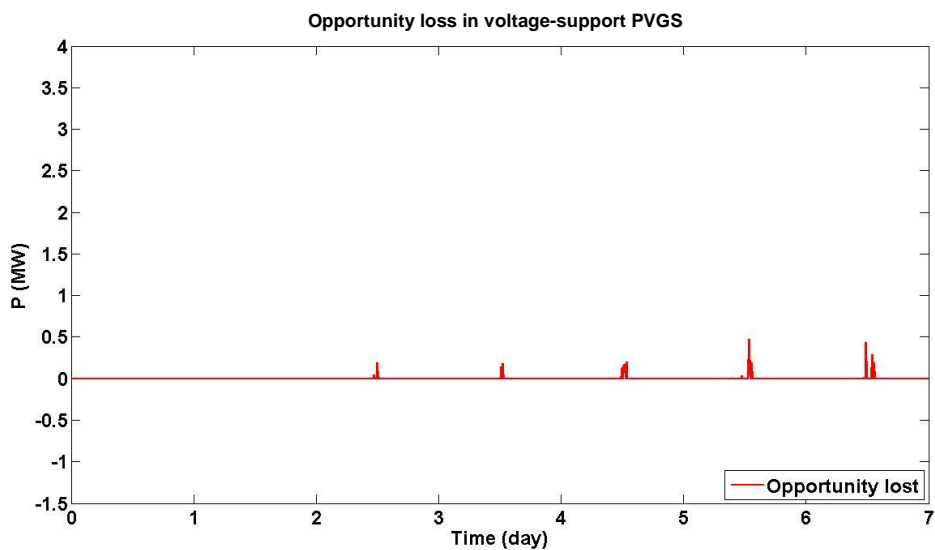
ภาพที่ 9.109 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์
แสงอาทิตย์ ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57



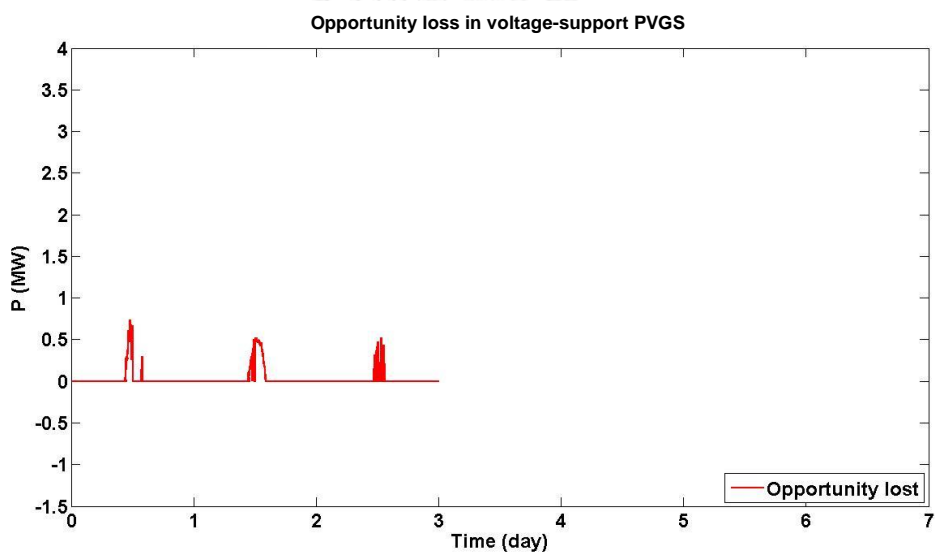
ภาพที่ 9.110 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57



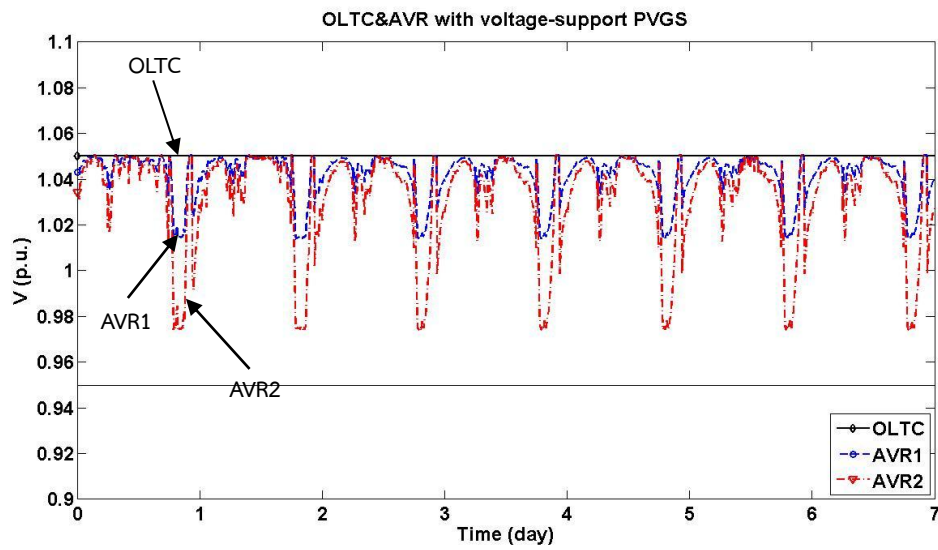
ภาพที่ 9.111 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57



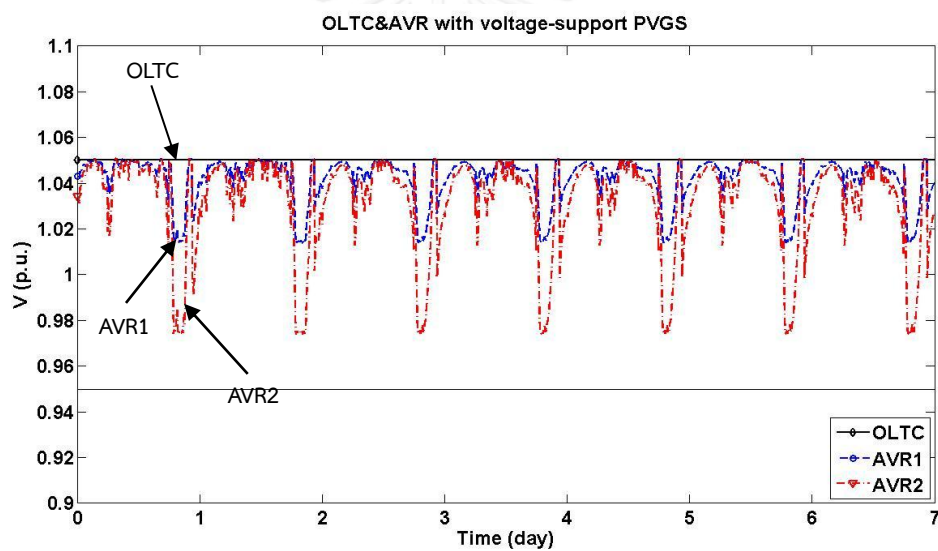
ภาพที่ 9.112 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57



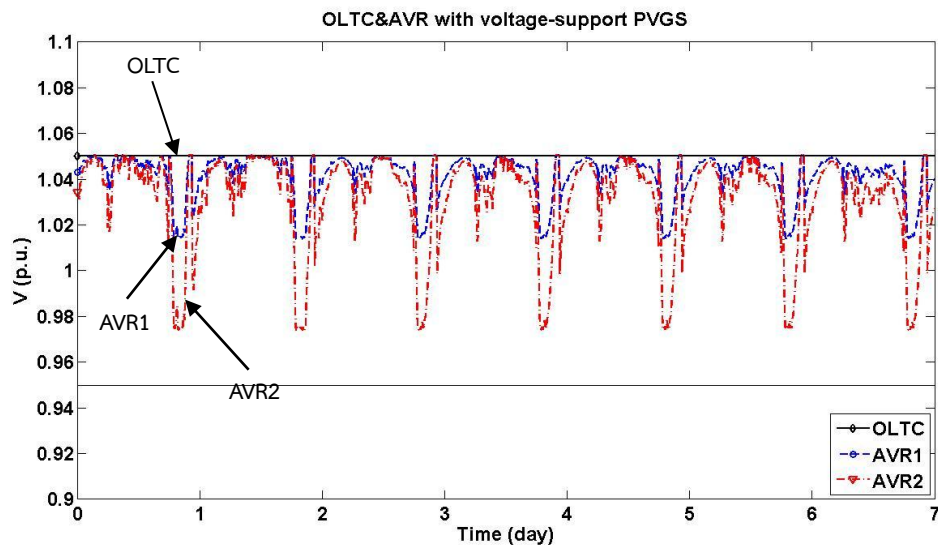
ภาพที่ 9.113 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57



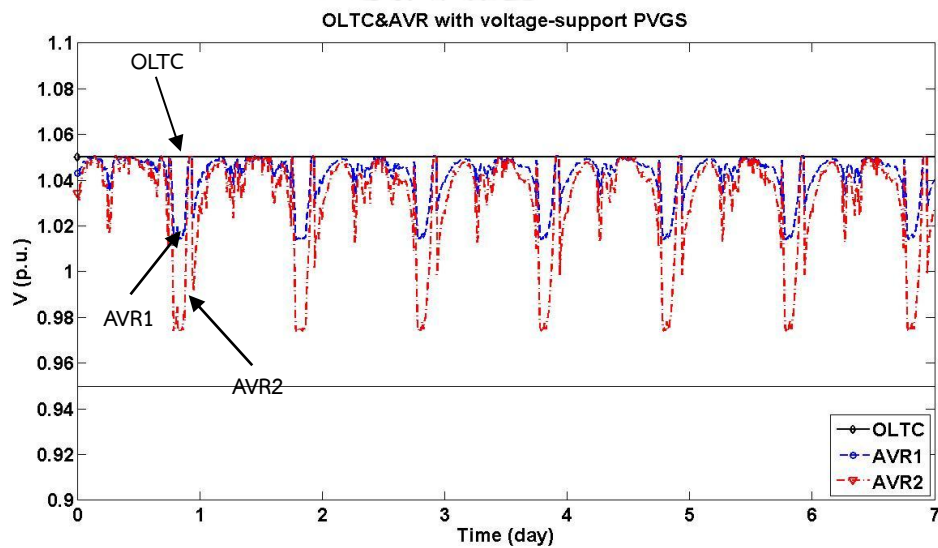
ภาพที่ 9.114 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57



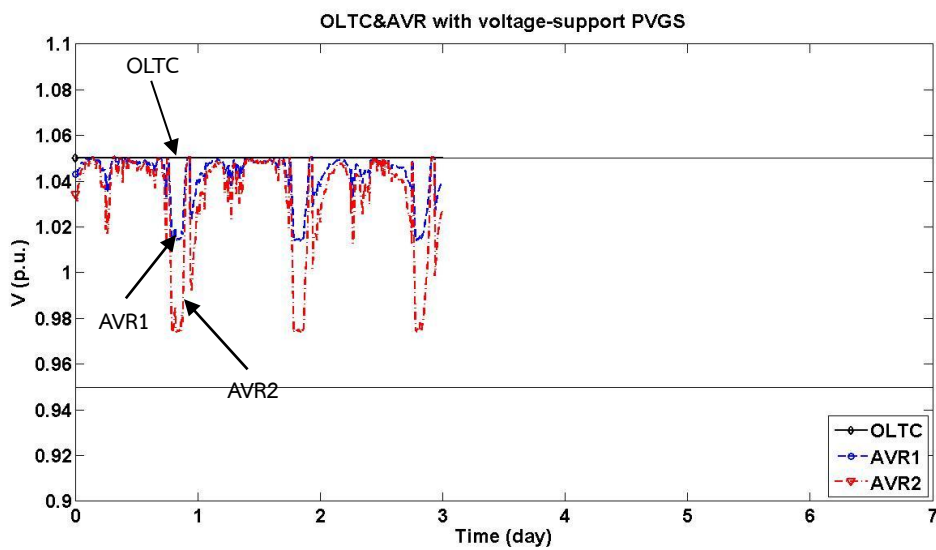
ภาพที่ 9.115 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57



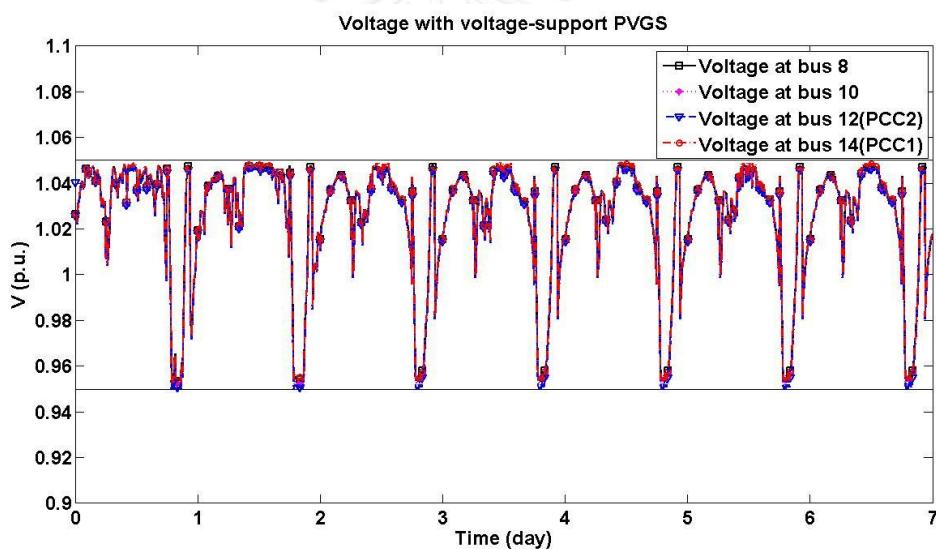
ภาพที่ 9.116 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57



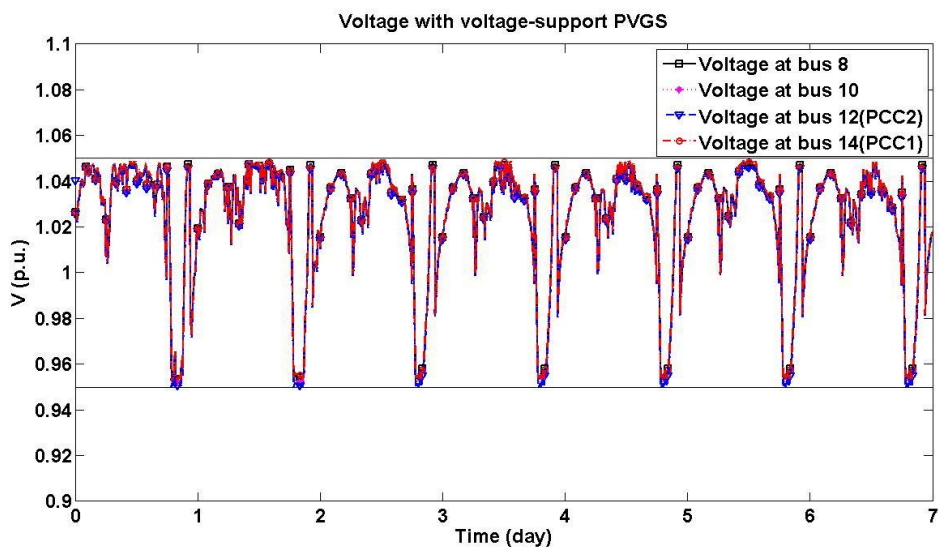
ภาพที่ 9.117 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57



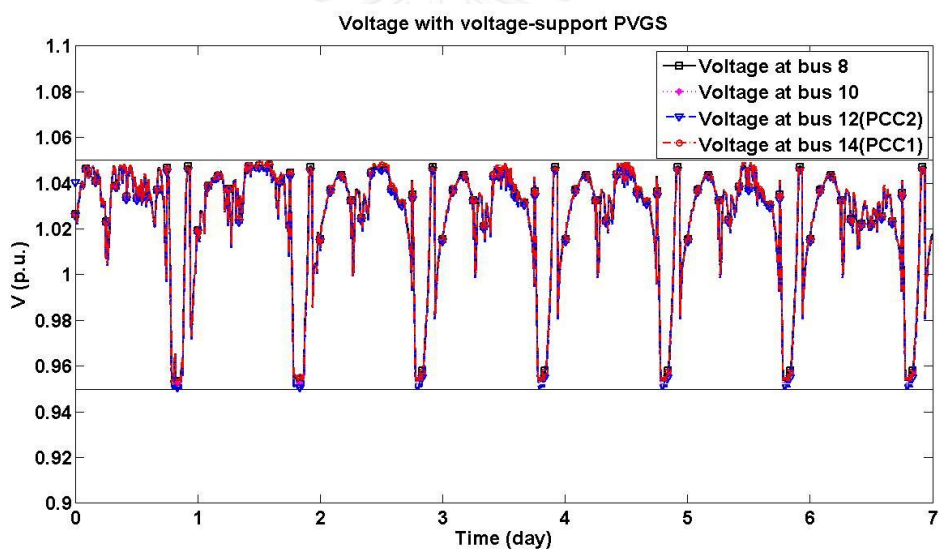
ภาพที่ 9.118 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5 ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57



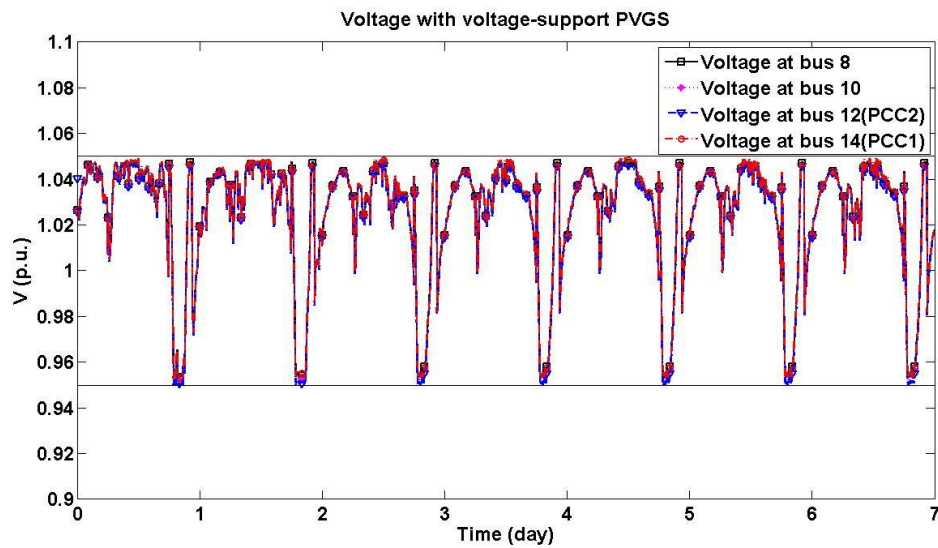
ภาพที่ 9.119 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 1-7 มี.ค. 57



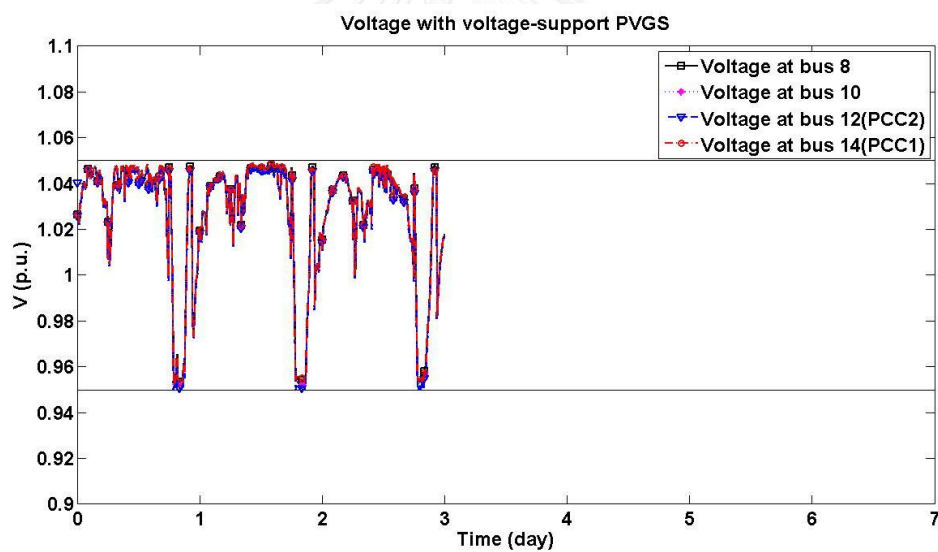
ภาพที่ 9.120 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 8-14 มี.ค. 57



ภาพที่ 9.121 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 15-21 มี.ค. 57



ภาพที่ 9.122 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 22-28 มี.ค. 57



ภาพที่ 9.123 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14 ในวันที่ 29-31 มี.ค. 57

จากภาพที่ 9.109 ถึง 9.123 จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าในช่วงที่มีความเข้มแสงอาทิตย์ที่มาก กระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายที่มากขึ้น ทำให้ในช่วงกลางวันซึ่งมีโหลดที่ค่อนข้างน้อยมีแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น และในบางช่วงเวลาระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าเกินกว่าร้อยละ 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติ แต่ด้วยการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าซึ่งมีการรับกำลังไฟฟ้านี้แต่ก็ไม่มีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้าซึ่งได้แก่ หม้อแปลงที่สามารถปรับแท็ปได้ ตัวคุมค่าแรงดันไฟฟ้าตัวที่ 1 และ 2 แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าก็สามารถมีค่าเข้าสู่ช่วงแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมได้ แต่การที่ไม่มีการทำงานของ

อุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้าจึงทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีการทำงานเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ามากขึ้น ทำให้บางช่วงการทำงานมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจริงจากการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟเพื่อช่วยเหลือระบบโครงข่ายไฟฟ้า แต่การที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ช่วยสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าทำให้แรงดันไฟฟ้า ณ บัสเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ซึ่งส่งผลให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง และในช่วงเวลากลางคืนที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าก็จะมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลของโหลด ซึ่งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถรักษาแรงดันไฟฟ้าในอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ได้ โดยกรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานในช่วงเวลาทุก 15 นาทีสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 9.20 และสรุปผลการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วย พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ค่าสูญเสียโอกาสจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริง ค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า และค่าปรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้า สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 9.21 และการเปรียบเทียบรายรับของทั้ง 2 การทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 9.22

ตารางที่ 9.20 จำนวนครั้งของแต่ละกรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงาน (ค่าฐานนิยมใน 15 นาที)

	$nCase_1$	$nCase_2$	$nCase_3$	$nCase_4$	$nCase_0$	$nCase_{-1}$	$nCase_{-2}$
สัปดาห์ที่ 1	319	0	0	0	291	62	0
สัปดาห์ที่ 2	317	0	0	0	300	55	0
สัปดาห์ที่ 3	310	0	0	0	303	59	0
สัปดาห์ที่ 4	323	0	0	0	288	61	0
สัปดาห์ที่ 5	140	0	0	0	122	26	0
รวม	1,269	0	0	0	1,304	263	0

ตารางที่ 9.21 สรุปผลการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1 เดือน

	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (หน่วย)	ค่าสูญเสียโอกาสจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริง (หน่วย)	ค่ารักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า (เมกะวาร์)	ค่าปรับตัวประกอบกำลังไฟฟ้า / โหลดสูงสุด (เมกะวาร์ / เมกะวัตต์)
สัปดาห์ที่ 1	131,051.22	529.18	0	0.4 / 0.05
สัปดาห์ที่ 2	119,131.74	171.08	0	
สัปดาห์ที่ 3	107,378.48	16.80	0	
สัปดาห์ที่ 4	123,593.84	323.66	0	
สัปดาห์ที่ 5	58,674.20	968.90	0	
รวม	539,829.48	2,009.62	-	0.4 / 0.05
คิดเป็นเงิน	5,867,946.45 บาท	21,904.86 บาท	0 บาท	20,690.67 บาท

ตารางที่ 9.22 เปรียบเทียบผลการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1 เดือน

	ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน	ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่สนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า
รวมรายได้คิดเป็นเงิน	4,556,411.24 บาท	5,825,350.92 บาท

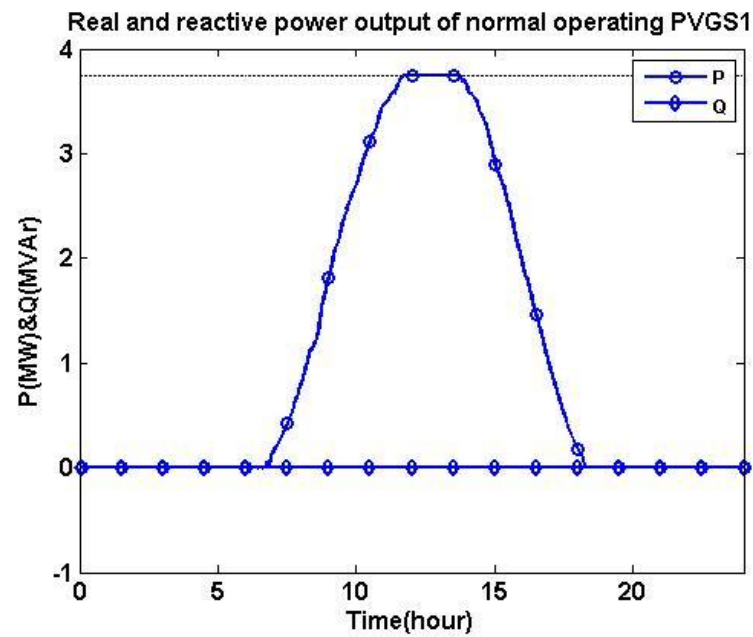
9.4 การทดสอบระบบโครงข่ายไฟฟ้าเมื่อมีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ระบบเชื่อมต่อบนสายป้อนเดียวกัน

การทดสอบส่วนนี้จะเป็นการทดสอบระบบโครงข่ายไฟฟ้าเมื่อมีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ระบบเชื่อมต่อบนสายป้อนเดียวกัน โดยระบบทดสอบที่ใช้ในการทดสอบของหัวข้อนี้คือ ระบบโครงข่ายไฟฟ้า อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน ดังหัวข้อที่ 8.1 และระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ทดสอบ เป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการทำงานอยู่จริงในระบบโครงข่ายไฟฟ้า อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน ดังหัวข้อที่ 8.2 ส่วนข้อมูลความเข้มแสงและอุณหภูมิที่ใช้จำลองกำลังการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นข้อมูลที่ได้รับจากอินเวอร์เตอร์ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งอยู่บนอาคารเจริญวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในวันที่ 13 มีนาคม พ.ศ. 2557 โดยการทดสอบจะกำหนดให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์อีกระบบหนึ่ง (ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์

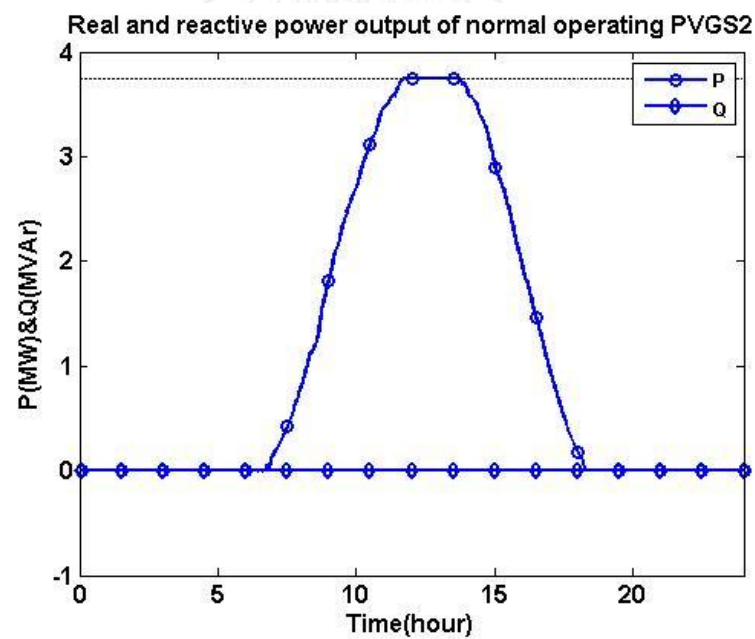
แสงอาทิตย์ระบบที่ 2) ซึ่งมีขนาดกำลังการผลิตติดตั้งรวม 4.112 เมกะวัตต์และมีข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เช่นเดียวกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งอยู่ในระบบโครงข่าย อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอนเดิม (ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 1) ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 8.2 โดยระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 2 นี้จะเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้า ณ บัสที่ 12 และกำหนดให้ไม่มีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าทั้ง 3 อุปกรณ์ที่อยู่ในระบบโครงข่ายไฟฟ้าเพื่อให้เห็นผลการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ 2 ที่ชัดเจนขึ้น

การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 การทดสอบ ได้แก่ (1) การทดสอบระบบโครงข่ายไฟฟ้าเมื่อมีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ระบบเชื่อมต่อบนสายป้อนเดียวกันที่มีการทำงานตามแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน (2) การทดสอบระบบโครงข่ายไฟฟ้าเมื่อมีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ระบบเชื่อมต่อบนสายป้อนเดียวกันที่มีการทำงานตามแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า

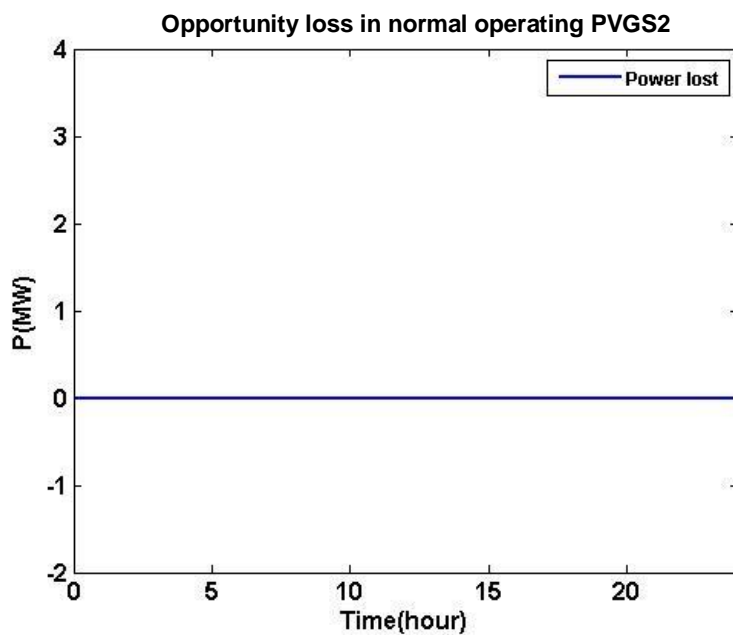
จะได้ผลการทดสอบระบบโครงข่ายไฟฟ้าเมื่อมีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ระบบเชื่อมต่อบนสายป้อนเดียวกันที่มีการทำงานตามแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน คือ (1) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 1 และ 2 สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9.124 และ 9.125 ตามลำดับ (2) ค่าสูญเสียโอกาสจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 1 และ 2 สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9.126 และ 9.127 (3) แรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ในระบบโครงข่ายไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9.128 และ 9.129



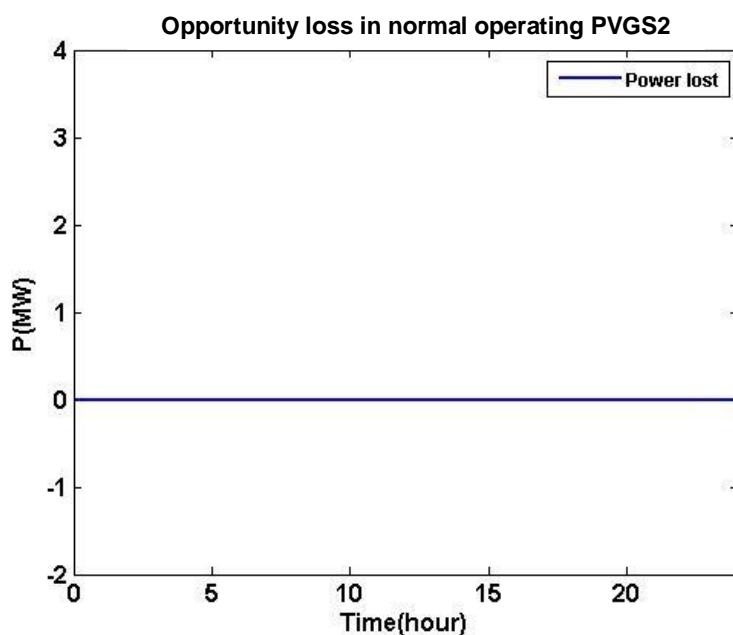
ภาพที่ 9.124 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 1



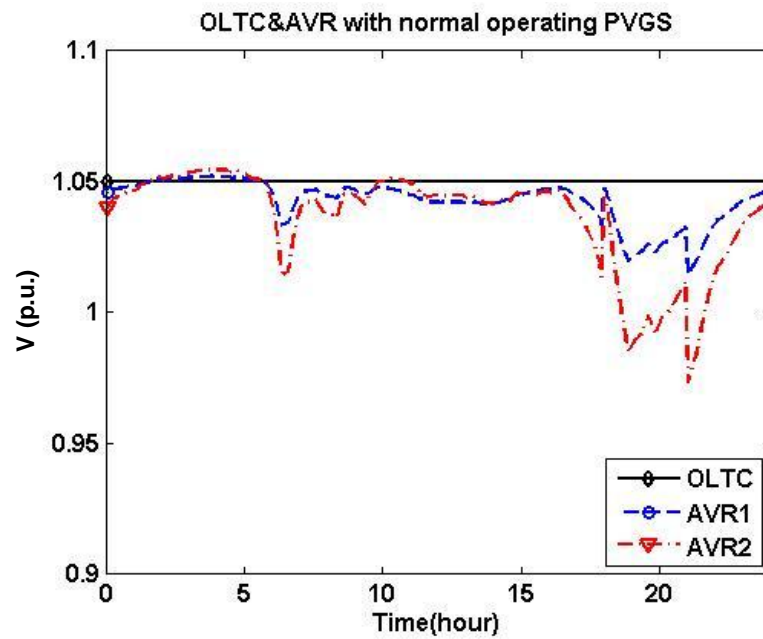
ภาพที่ 9.125 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 2



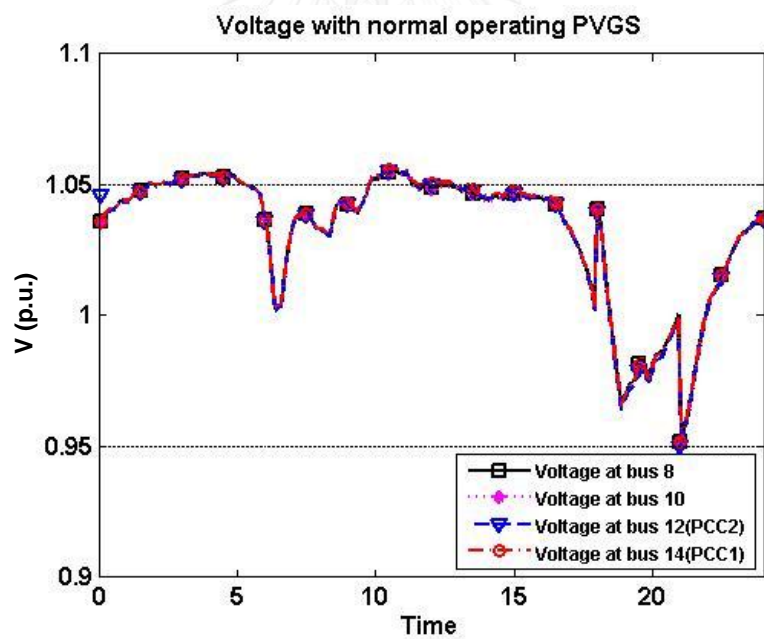
ภาพที่ 9.126 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 1



ภาพที่ 9.127 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 2



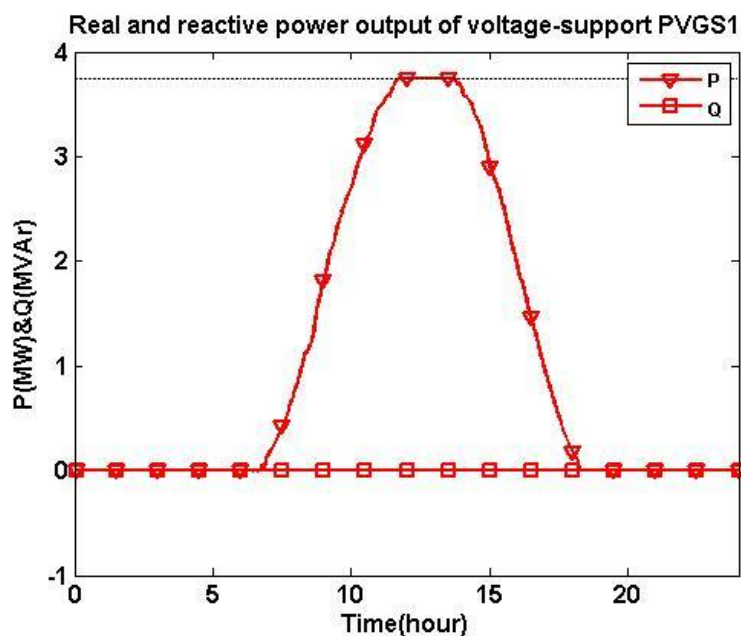
ภาพที่ 9.128 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5



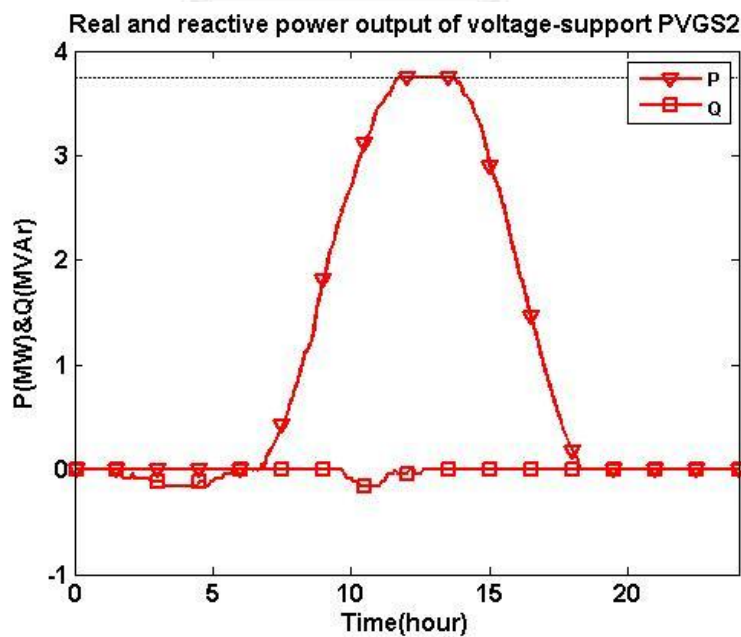
ภาพที่ 9.129 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14

ส่วนการทดสอบระบบโครงข่ายไฟฟ้าเมื่อมีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ระบบ เชื่อมต่อบนสายป้อนเดียวกันที่มีการทำงานตามแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าได้ผลการทดสอบ คือ (1) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 1 และ 2 สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9.130

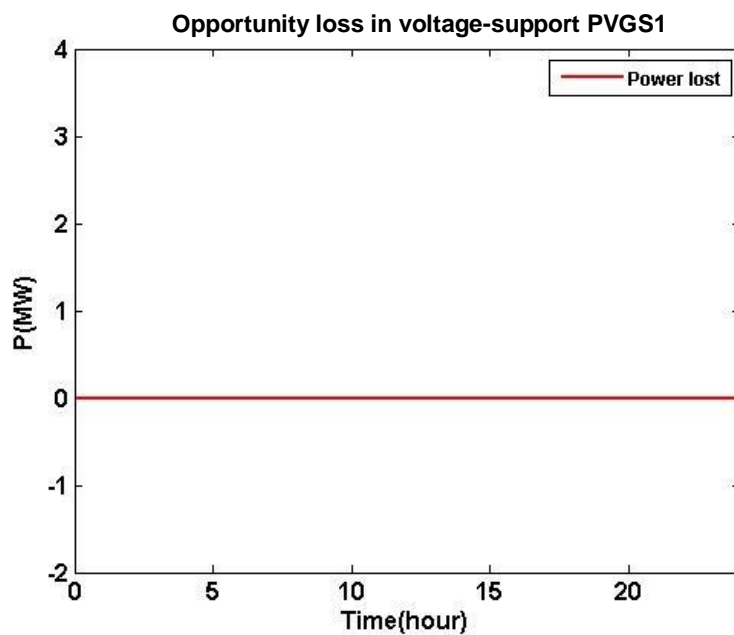
และ 9.131 ตามลำดับ (2) ค่าสูญเสียโอกาสจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 1 และ 2 สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9.132 และ 9.133 (3) แรงดันไฟฟ้าที่บัสต่างๆ ในระบบโครงข่ายไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9.134 และ 9.135



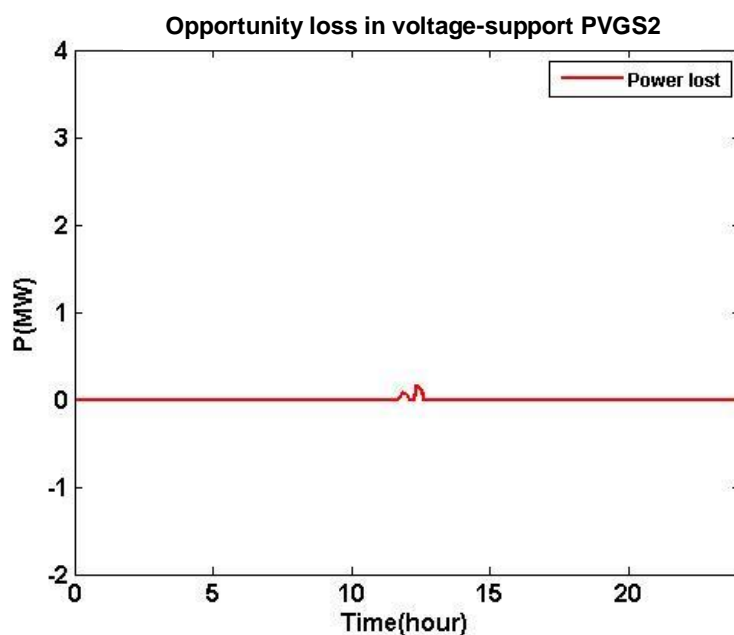
ภาพที่ 9.130 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 1



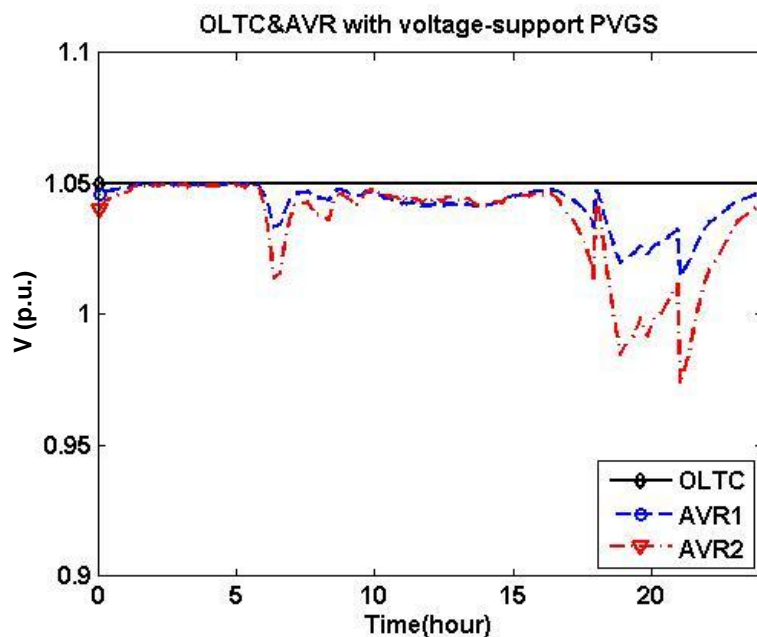
ภาพที่ 9.131 กำลังไฟฟ้าจริงและรีแอกทีฟของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 2



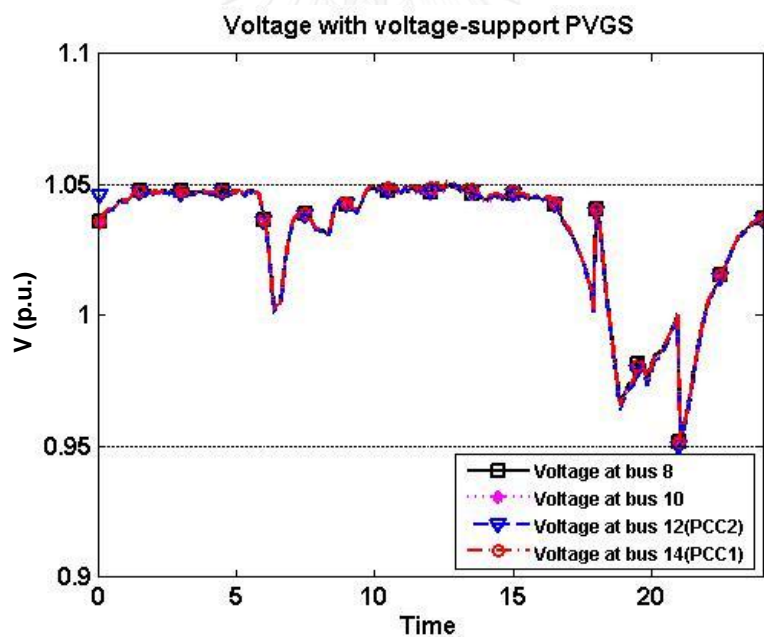
ภาพที่ 9.132 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 1



ภาพที่ 9.133 กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 2



ภาพที่ 9.134 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 1, 3 และ 5



ภาพที่ 9.135 แรงดันไฟฟ้า ณ บัสที่ 8, 10, 12 และ 14

จากภาพที่ 9.124 ถึง 9.135 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบที่ 2 เชื่อมต่อเข้ามาในระบบโครงข่ายไฟฟ้า จะทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้า ณ บัสต่างๆ มีค่าที่เพิ่มสูงขึ้น และโดยในการทดสอบระบบโครงข่ายไฟฟ้าเมื่อมีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ระบบ เชื่อมต่อบนสายป้อนเดียวกันที่มีการทำงานตามแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์

แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน การจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 ระบบ จะทำให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าเกินกว่าร้อยละ 105 ของแรงดันไฟฟ้าปกติในบางช่วง ซึ่งการที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าที่ไม่เหมาะสมจะทำให้เกิดการปลดตัวออกของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบระบบโครงข่ายไฟฟ้าเมื่อมีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ระบบ เชื่อมต่อบนสายป้อนเดียวกันที่มีการทำงานตามแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่าย จะเห็นว่าการที่มีการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในบางช่วงเวลาจะทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าสามารถมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ได้ แม้ว่าการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟารีแอกทีฟนี้จะทำให้เกิดค่าสูญเสียโอกาสจากการลดลงของกำลังไฟฟ้าจริงบ้าง แต่จะทำให้ในระบบโครงข่ายไฟฟ้าสามารถมีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้เพิ่มมากขึ้น



บทที่ 10

สรุปวิทยานิพนธ์

ในบทนี้จะเป็นการสรุปเนื้อหาของงานวิจัยทั้งหมดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยจะแบ่งการนำเสนอออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

10.1 สรุป

10.2 ข้อเสนอแนะ

10.1 สรุป

- 1) ในส่วนของการทดสอบแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันและแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในกรณีต่างๆ พบว่ากรณีการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ จะขึ้นกับโหลดในระบบโครงข่ายไฟฟ้า ความเข้มแสงและอุณหภูมิ รวมทั้งลักษณะของการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งกรณีต่างๆ ที่เกิดขึ้นจะทำให้สามารถระบุได้ว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีทั้งการทำงานที่เป็นประโยชน์และสร้างภาระต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าในด้านแรงดันไฟฟ้า
- 2) ในส่วนของการทดสอบระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่มีการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในระยะเวลา 1 เดือน ซึ่งมีระบบโครงข่ายไฟฟ้า อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน เป็นระบบทดสอบ แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เนื่องจากโหลดในระบบโครงข่ายไฟฟ้า กำลังการผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ รวมทั้งการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งพบว่า แม้ว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะทำงานตามแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะคงค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้จากการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งได้ผลลัพธ์ที่คล้ายกับการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการทำงานตามแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า แต่หากในระบบโครงข่ายไฟฟ้าไม่มีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้า การทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันอาจทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้ามีค่านอกช่วงร้อยละ 95 ถึง 105 ได้ นอกจากนี้การคำนวณข้อมูล

ต่างๆ ซึ่งเกี่ยวกับรายรับและรายจ่ายของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะมีความแตกต่างกัน เนื่องจากกรณีการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน

- 3) ในส่วนของการทดสอบการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ในกรณีที่ไม่มีการทำงานของอุปกรณ์รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของการไฟฟ้า ในระยะเวลา 1 เดือน ทำให้เห็นว่าหากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า อาจทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายมีค่าอยู่นอกช่วงที่เหมาะสมได้ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงได้ในบางช่วงเวลาและรายรับจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้า
- 4) ในส่วนของการทดสอบระบบโครงข่ายไฟฟ้าเมื่อมีระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ระบบเชื่อมต่อบนสายป้อนเดียวกัน หากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีการทำงานตามแบบจำลองการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการสนับสนุนแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าจะทำให้การเข้ามาของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ระบบใหม่ส่งผลกระทบต่อด้านลบต่อแรงดันไฟฟ้าในระบบโครงข่ายไฟฟ้าที่น้อยลง ซึ่งจะทำให้ระบบโครงข่ายไฟฟ้าสามารถรองรับการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้เพิ่มมากขึ้น

10.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรมีการทดสอบแนวคิดต่างๆ ที่ได้นำเสนอกับระบบทดสอบที่เป็นระบบโครงข่ายไฟฟ้าอื่นๆ ที่หลากหลายมากขึ้น พร้อมทั้งศึกษาผลกระทบด้านอื่นนอกเหนือจากผลกระทบด้านแรงดันไฟฟ้า
- 2) ในส่วนของแนวคิดการคำนวณรายรับและรายจ่าย ค่าชดเชยและค่าปรับที่เสนอขึ้นใหม่ อาจไม่จูงใจให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานตามรูปแบบที่ได้นำเสนอ ซึ่งอาจจะต้องมีการปรับค่าชดเชยและค่าปรับในส่วนต่างๆ ให้ความน่าสนใจเพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานเพื่อสนับสนุนแรงดันไฟฟ้า
- 3) ควรมีการปรับปรุงในส่วนของโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ทำให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าที่เหมาะสม โดยอาจใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มีจุดประสงค์อื่นร่วมด้วย เช่น การทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบมีค่าน้อยที่สุด เป็นต้น เพื่อให้การปรับตั้งค่าการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพมากขึ้น

รายการอ้างอิง

1. กระทรวงพลังงาน, แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2555-2573 (ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 3). 2555.
2. กระทรวงพลังงาน, แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ. 2555-2564).
3. Solarbuzz. *Retail Pricing Environment 2555*. 2555 10 เมษายน 2557]; Available from: <http://www.solarbuzz.com/facts-and-figures/retail-price-environment/module-prices>.
4. คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.). *ฐานข้อมูลผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กและผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก*. 2557 13 พฤษภาคม 2557]; Available from: <http://www.erc.or.th/ERCSP/Default.aspx?x=0&muid=23&pid=41>.
5. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, *ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วย ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2551*.
6. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, *ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วย ข้อกำหนดการปฏิบัติการระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2551*.
7. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, *ประกาศคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน เรื่อง การรับซื้อไฟฟ้าจากการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค*. 2556.
8. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, *ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วย ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ. 2557*.
9. การไฟฟ้านครหลวง, *ระเบียบการไฟฟ้านครหลวงว่าด้วย ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ.2551*.
10. การไฟฟ้านครหลวง, *ระเบียบการไฟฟ้านครหลวงว่าด้วย ข้อกำหนดการปฏิบัติการระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ.2551*.
11. การไฟฟ้านครหลวง, *ประกาศคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน เรื่อง การรับซื้อไฟฟ้าจากการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง*. 2556.

12. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, ระเบียบการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยว่าด้วย ข้อกำหนดการเชื่อมต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ.2551.
13. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, ระเบียบการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยว่าด้วย ข้อกำหนดการปฏิบัติการระบบโครงข่ายไฟฟ้า พ.ศ.2551.
14. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. วิธีการคิดค่า *Power Factor*. 11 สิงหาคม 2557]; Available from: https://www.pea.co.th/peawiki/Pages/wiki_017.aspx
15. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (*Power Factor: PF*). 11 สิงหาคม 2557]; Available from: <http://www.mea.or.th/profile/index.php?l=th&tid=3&mid=269&pid=110>
16. Ghias Farivar, B.A., *Photovoltaic Module Single Diode Model Parameters Extraction Based on Manufacturer Datasheet Parameters*. IEEE International Conference on Power and Energy, 2010.
17. Hyeonah Park, H.K., *PV cell modeling on single-diode equivalent circuit*. IEEE, 2013.
18. Sudhanshu Gupta, H.T., Manoj Fozdar, Vinay Chandna, *Development of a Two Diode Model for Photovoltaic Modules Suitable for use in Simulation Studies*. IEEE, 2012.
19. Zainal Salam, K.I., Hamed Taheri, *An Improved Two-Diode Photovoltaic Model for PV System*. IEEE, 2010.
20. Li Jing, X.H., Zhao Haixiang, Peng Yanchang, *Research on the Grid-connected PV Power Station*. CIGRE, 2008.
21. O. Waszynczuk, N.A.A., *Modeling and Dynamic Performance of a Self-commutated Photovoltaic Inverter System*. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1989.
22. F. Delfino, R.P., M. Rossi, G. Ronda, *Integration of Large-size Photovoltaic Systems into the Distribution Grids: a P-Q Chart Approach to assess Reactive Support Capability*. IET Renewable Power Generation, 2009.
23. G. C. Pyo, H.W.K., S. I. Moon, *A New Operation Method for Grid-Connected PV System Considering Voltage Regulation in Distribution System*. IEEE, 2008.

24. T. Alquthami, H.R., M. O. Faruque, M. Steurer, T. Baldwin, *Study of Photovoltaic Integration Impact on System Stability Using Custom Model of PV Arrays Integrated with PSS/E*. IEEE, 2010.
25. Konstantin Turitsyn, S.B., Michael Chertkov, *Options of Control of Reactive Power by Distributed Photovoltaic Generators*. IEEE, 2011.
26. Fei Wang, J.L.D., Marcel A. M. Hendrix, *Active and Reactive Power Control Schemes for Distributed Generation System Under Voltage Dips*. IEEE, 2009.
27. A. Ellis, e.a., *Reactive Power Performance Requirements for Wind and Solar Plants*. Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2012.
28. P. R. Sujin, D.T.R.D.P., M. Mary Linda, *Particle Swarm Optimization Based Reactive Power Optimization*. Journal of Computing, 2010.
29. P. Sreejaya, R.R., *Reactive power and Voltage Control in Kerala Grid and Optimization of Control Variables Using Genetic Algorithm*. IEEE, 2008.
30. Stefania Conti, A.M.G., *Voltage Regulation through Optimal Reactive Power Dispatching in Active Distribution Networks*. IEEE, 2008.
31. Hao, S., *A Reactive Power Management Proposal for Transmission Operators*. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003.
32. Edson Luiz da Silva, J.J.H., Joao Carlos O. Mello, Joao Carlos Ferreira da Luz, *Practical Cost-Based Approach for the Voltage Ancillary Service*. IEEE Transactions on Power Electronics, 2001.
33. R. Deksnys, R.S., *Pricing of Reactive Power Service*. Oil Shale, 2007.
34. Sung-Hwan Song, H.-C.L., Yong Tae Yoon, Seung Moon, *Cluster Design compatible with Market for Effective Reactive Power Management*. IEEE, 2006.
35. รศ.ดร. ไชยยะ แซ่มซ้อย, *คู่มือคุณภาพไฟฟ้า*. 2554: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.
36. นายชวินทร์ ประภาณุกุล, *การปรับตั้งระบบป้องกันที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระจายตัวโดยคำนึงถึงแรงดันตกชั่วขณะ และระยะเวลาการต่อกลับของอุปกรณ์ป้องกันในระบบจำหน่าย*, in สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ 2555, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

37. IEEE, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality Guide for IEEE Std 1547TM*, in *IEEE Std 1159-1995*. 1995.
38. M.Boontheinthong, S.T.a., *Technique for Voltage Control in Distribution System*. International Journal of Electrical, Robotics, Electronics and Communications Engineering, 2013.
39. GmbH, E.O.N., *E.ON. Grid Code High and Extra High Voltage*. 2006.
40. IEEE, *IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems*, in *IEEE Std 929-2000*. 2000.
41. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. ประกาศการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เรื่องโครงสร้างอัตราค่าไฟฟ้า. 9 กันยายน 2557]; Available from: www.pea.co.th.
42. การไฟฟ้านครหลวง. อัตราค่าไฟฟ้าประเภทต่างๆ. 9 กันยายน 2557]; Available from: www.meo.or.th.
43. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, ระเบียบการรับซื้อไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (สำหรับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน).
44. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. อัตราค่าไฟขายส่ง กฟน. และ กฟภ. และสถิติค่า Ft ขายปลีก การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 9 กันยายน 2557]; Available from: www.egat.co.th.
45. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. เซลล์แสงอาทิตย์: ข้อดี ข้อเสีย. 2552 10 มกราคม 2556]; Available from: <http://www.nstda.or.th/sci-kids-menu/2326-solar-cell-advantage-disadvantage>.
46. Kyocera. *KC200GTF Photovoltaic Module Datasheet*. 2548 5 มกราคม 2556]; Available from: <http://www.kyocera.com.sg/products/solar/pdf/kc200gt.pdf>
47. วิทยาลัยการอาชีพบางละมุง. หลักการเบื้องต้นของคอนเวอร์เตอร์. 2550 18 มกราคม 2556]; Available from: <http://www.blmiacec.ac.th/E-learning/elec/8-1.htm>
48. บริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน). *Multi-Crystalline Silicon Solar Modules 130 Watt SP130*. 2548 30 มกราคม 2555]; Available from: http://www.solartron.co.th/Catalog/SP130_TH.pdf
49. Villalva, M.G., Gazoli, J.R., and Filho, E.R., *Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays*. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009.

50. Power, G.S. *Product specification*. 19 กันยายน 2557]; Available from: www.solargsp.com
51. นายดาว วาน ตู, การผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวสูงสุดที่รับได้โดยพิจารณาถึงข้อกำหนดการทำงานผ่านช่วงการลัดวงจรและระบบป้องกันของการไฟฟ้า, in สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2555, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
52. Hausmair, K.S.C., Peter Singerl, Christian Vogel, *Aliasing-Free Digital Pulse-Width Modulation for Burst-Mode RF Transmitters*. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2013.
53. ABB. *ABB Central Inverters PVS800 100 to 1000 kW*. 2556 10 ตุลาคม 2556]; Available from: [http://www05.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/5650f067fdc49236c1257b94002ba8e9/\\$file/16931_PVS800_central_inverters_flyer_3AUA0000057380_RevJ_lowres.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/5650f067fdc49236c1257b94002ba8e9/$file/16931_PVS800_central_inverters_flyer_3AUA0000057380_RevJ_lowres.pdf).
54. Energy, G.P.a.W.R. *Utility Scale Solar Solutions*. 2556 10 ตุลาคม 2556]; Available from: http://www.ge-energy.com/content/multimedia/_files/downloads/GEA17910B_UtilityScaleSolarBroch_r7.pdf.
55. Electric, S. *Schneider Electric Solar Business Catalog*. 2556 10 ตุลาคม 2556]; Available from: <http://www2.schneider-electric.com/sites/corporate/en/products-services/solar/solar.page>
56. SMA. *Sunny Central 500CP-US / 630CP-US / 720CP-US / 750CP-US / 800CP-US / 850CP-US / 900CP-US*. 2555 10 ตุลาคม 2556]; Available from: http://www.sma-america.com/en_US/products/grid-tied-inverters/sunny-central/sunny-central-500cp-us-630cp-us-720cp-us-750cp-us-800cp-us-850cp-us-900-cp-us.html
57. Leonics. *Apollo GTP-500 series Three Phase Grid Connected Central Inverter Specifications*. 2555 11 ตุลาคม 2557]; Available from: http://www.leonics.co.th/download/download_rep_en.php.
58. Choice, S. *Types of Solar Inverter Efficiency*. 2547 20 กุมภาพันธ์ 2557]; Available from: <http://www.solarchoice.net.au/blog/types-of-solar-inverter-efficiency>.

59. สิ้นธุ์ชัย ตีลกานนท์, การพัฒนาแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการประยุกต์ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยคำนึงถึงการทำงานของอินเวอร์เตอร์, in สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ 2555, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
60. Solarpro. *Optimal PV-to-Inverter Sizing Ratio*. 2557 25 ตุลาคม 2557]; Available from: <http://www.http://solarprofessional.com/articles/design-installation/optimal-pv-to-inverter-sizing-ratio>.
61. Richard O'Neill, M.C., David Mead and staff, *Principles for Efficient and Reliable Reactive Power Supply and Consumption*. Washington, 2005.
62. Grayson Heffner, C.G., Brendan Kirby and Michael Kintner-Meyer, *Loads Providing Ancillary Services: Review of International Experience*. Environmental Energy Technologies Division, 2007.
63. Erik Ela, B.K., Nivad Navid and J.Charlse Smith, *Effective Ancillary Services Market Designs on High Wind Power Penetration Systems*. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2012.
64. Kirdy, B., *Ancillary Services: Technical and Commercial Insights*. 2007.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ชนนท์ ธีระนันท์ เกิดวันที่ 25 มิถุนายน พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2555 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

