

การพัฒนาแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการประยุกต์ในการคำนวณ
การไหลของกำลังไฟฟ้าโดยคำนึงถึงการทำงานของอินเวอร์เตอร์

นายสินธุ์ชัย ตีलगานนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

MODELING OF PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEM AND ITS APPLICATION IN
LOAD FLOW CALCULATION CONSIDERING THE OPERATION OF INVERTER

Mr. Sinchai Tilaganon

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 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์
แสงอาทิตย์และการประยุกต์ในการคำนวณการไหล
ของกำลังไฟฟ้าโดยคำนึงถึงการทำงานของ
อินเวอร์เตอร์

โดย

นายสินธุ์ชัย ติลกานนท์

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศนีย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เนบบุญ หุนเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.สุรชัย ชัยทัศนีย์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงษ์ สุวรรณกวิน)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ฐิติพร สังข์เพชร)

สินธุ์ชัย ติลกานนท์ : การพัฒนาแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการประยุกต์ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยคำนึงถึงการทำงานของอินเวอร์เตอร์. (MODELING OF PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEM AND ITS APPLICATION IN LOAD FLOW CALCULATION CONSIDERING THE OPERATION OF INVERTER) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร.สุรัชย์ ชัยทัศนีย์, 140 หน้า.

ในปัจจุบันเนื่องจากแหล่งพลังงานหลักที่ใช้ในประเทศไทย ซึ่งได้แก่ น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป และต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้มีการนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้มากขึ้น ซึ่งโดยที่ตั้งของประเทศไทยเป็นพื้นที่ที่ได้รับแสงอาทิตย์เป็นปริมาณมาก ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จึงถือเป็นอีกหนึ่งพลังงานหมุนเวียนที่เหมาะสมในการนำมาใช้ผลิตไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยพิจารณาในส่วนของจุดทำงานสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ร่วมกับการทำงานในโหมดต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์เมื่อเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า

กระบวนการที่นำเสนอจะเป็นการหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการหาจุดทำงานสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และคำนวณหาค่ากระแสและแรงดันที่ผลิตได้ทดสอบเปรียบเทียบกับเอกสารข้อมูลจากผู้ผลิต และจากการตรวจวัดจริง นอกจากนี้ยังทดสอบการผลิตกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และท้ายสุดทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้ากับระบบทดสอบทำทราบดีดแปลง 34 บัส โดยคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าร่วมกับการพิจารณาการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในโหมดต่างๆ

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2555.....

5470489521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEM / INVERTER / MISMATCH / GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEM

SINCHAI TILAGANON: MODELING OF PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEM AND ITS APPLICATION IN LOAD FLOW CALCULATION CONSIDERING THE OPERATION OF INVERTER. ADVISOR : SURACHAI CHAITUSANEY, Ph.D., 140 pp.

At present, the energy sources used in Thailand, i.e., oil and natural gas, are the materials that are exhaustible and must be imported from foreign countries. The renewable energy will be much more used in the future. The solar energy is one of the suitable renewable energy for Thailand since Thailand is located at the high solar radiation area. This research will present the photovoltaic generation system modeling by considering the maximum power point of photovoltaic generation system and the operation of inverter in grid-connected system.

The procedure used in this research can estimate various parameters used for evaluating the maximum power point of photovoltaic generation system. Then, the current and voltage estimated from the model will be compared to the ones indicated in commercial specification datasheet and the measurement from the experimental system. Furthermore, the effects of mismatch in photovoltaic modules will be tested as well. Finally, the grid-connected photovoltaic generation system modeling will be tested with a modified Ta-sai 34 bus test system via load flow calculation by considering the operation of inverter.

Department : Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study : Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2012

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี กระผมขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. สุรชัย ชัยทัศนีย์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นในการทำวิจัย และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แนบบุญ หุนเจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกวิน พร้อมทั้ง ดร. ฐิติพร สังข์เพชร ที่ได้สละเวลา ตรวจสอบและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้า กำลัง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ดูแลและให้ทุนการศึกษาในการเรียนระดับปริญญาโทมาจนถึง

ขอขอบคุณโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยแห่งชาติของ สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาที่ได้ดูแลและให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ อาคารเจริญวิศวกรรม ชั้นดาดฟ้า

ขอขอบคุณคณะนิสิตระดับบัณฑิตศึกษา ห้องปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลังอาคารเจริญ วิศวกรรม ชั้น 12 ทุกคน ที่คอยให้กำลังใจและให้ความคิดเห็นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณบริษัท SMA ประเทศไทย จำกัด ที่ให้ความรู้เกี่ยวกับอินเวอร์เตอร์ของบริษัท และขอขอบคุณบริษัท บางจาก โซลาร์ ประเทศไทย ที่ให้ความกรุณาเข้าเยี่ยมชม โซลาร์ฟาร์ม และให้ข้อมูลเกี่ยวกับ โซลาร์ฟาร์มที่จังหวัดอยุธยา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ตลอดจนญาติทุกท่านที่คอยเป็น กำลังใจและให้การสนับสนุนแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์.....	7
2.1 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์	8
2.2 หลักการพื้นฐานของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์	10
2.2.1 เซลล์ โมดูล อาร์เรย์	10
2.2.2 แบบจำลองโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์.....	12
2.2.3 ผลของสภาพแวดล้อมที่มีต่อโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์.....	14
2.2.3.1 อุณหภูมิ.....	14
2.2.3.2 ความเข้มแสง	15
2.3 ข้อมูลทางเทคนิคของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์	16
2.4 สรุป.....	18
บทที่ 3 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์	19
3.1 การทำงานในการหาจุดทำงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT)...	19
3.2 การควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์	23

3.3	การทำงานของอินเวอร์เตอร์.....	25
3.3.1	การเริ่มและหยุดทำงานของอินเวอร์เตอร์.....	25
3.3.2	ระบบการทำงานของอินเวอร์เตอร์.....	25
3.3.2.1	การจำกัดค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ออกจากอินเวอร์เตอร์.....	26
3.3.2.2	การปรับค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ออกจากอินเวอร์เตอร์.....	26
3.3.2.3	การจำกัดกำลังไฟฟ้าจริงเพื่อรักษาสภาพความถี่ของระบบไฟฟ้า.....	27
3.3.2.4	ระบบ Grid support.....	27
3.4	ข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์.....	28
3.5	สรุป.....	29
บทที่ 4	การพัฒนาแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	31
4.1	งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	31
4.2	หลักในการหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นในแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	32
4.3	ผลของสภาพแวดล้อมต่อพารามิเตอร์ของแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	36
4.4	การปรับค่าพารามิเตอร์จากโมดูลเป็นอาร์เรย์.....	36
4.5	การทำงานของอินเวอร์เตอร์.....	37
4.6	ขั้นตอนการหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นในแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	38
4.7	ขั้นตอนการคำนวณแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	40
4.8	สรุป.....	43
บทที่ 5	ความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (Mismatch).....	44
5.1	ความหมายของการเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์.....	44
5.2	หลักในการคำนวณระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์.....	45
5.2.1	การคำนวณความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่ออาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่างรุ่นกันต่ออนุกรมกัน.....	45
5.2.2	การคำนวณความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่ออาร์เรย์	

	เซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่างรุ่นกันต่อขนานกัน	47
5.3	สรุป.....	49
บทที่ 6	แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า	50
6.1	ส่วนวงจรไฟฟ้ากระแสตรง (DC part).....	51
6.2	ส่วนอินเวอร์เตอร์ (Inverter part).....	51
6.3	ส่วนวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ (AC part)	52
6.4	ข้อกำหนดการเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า (Grid Code).....	55
6.4.1	การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า.....	56
6.4.2	การควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า.....	56
6.5	ขั้นตอนการคำนวณแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า.....	57
6.6	สรุป.....	60
บทที่ 7	ระบบทดสอบ	61
7.1	สถานที่.....	61
7.2	อุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	62
7.2.1	อาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์.....	62
7.2.2	อินเวอร์เตอร์.....	63
7.2.3	กล่องเซนเซอร์ตรวจวัดความเข้มแสงและอุณหภูมิ	65
7.2.4	ตัวเก็บข้อมูลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	66
7.3	รายละเอียดการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	67
7.4	ข้อมูลที่บันทึกได้จากการทดสอบ	68
บทที่ 8	ผลการทดสอบ	71
8.1	ผลการทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	71
8.1.1	ผลการทดสอบแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์กับข้อมูลจากผู้ผลิต.....	71
8.1.1.1	ผลของความเข้มแสง	73
8.1.1.2	ผลของอุณหภูมิ	75
8.1.2	ผลการทดสอบแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์กับการตรวจวัดจริง.....	77
8.1.2.1	กรณีพิจารณาแบบจำลองและการตรวจวัดจริงเฉพาะช่วง โหมมการทำงานสูงสุด.....	79

8.1.2.2	กรณีพิจารณาแบบจำลองและการตรวจวัดจริงตลอดทั้งวัน.....	81
8.1.3	สรุปผลการทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	83
8.2	ผลการทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์.....	83
8.2.1	ผลทดสอบเมื่อต่ออาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ต่างรุ่นกันแบบอนุกรม	85
8.2.2	ผลทดสอบเมื่อต่ออาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ต่างรุ่นกันแบบขนาน.....	86
8.2.3	สรุปผลการทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์	87
8.3	ผลการทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า	87
8.3.1	PQ mode.....	89
8.3.1.1	กรณีปกติโดยอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งโมดูลแบบอนุกรม 30 โมดูลและแบบขนาน 150 โมดูล.....	91
8.3.1.1.1	เมื่อปรับให้ไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า	92
8.3.1.1.2	เมื่อปรับให้มีการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโดยปรับค่าตัวประกอบกำลังเป็น 0.95	95
8.3.1.2	กรณีอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้เกินขีดจำกัดของอินเวอร์เตอร์ โดยอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งโมดูลแบบอนุกรม 30 โมดูลและแบบขนาน 200 โมดูล	98
8.3.1.2.1	เมื่อปรับให้ไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า	99
8.3.1.2.2	เมื่อปรับให้มีการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโดยปรับค่าตัวประกอบกำลังเป็น 0.95	103
8.3.2	PV mode.....	106
8.3.2.1	ทดสอบโดยใช้ระบบทำทราฟฟิก	106
8.3.2.2	ทดสอบโดยใช้ระบบทดสอบทำทราฟฟิกดัดแปลง	110
8.3.3	การเปรียบเทียบผลการทดสอบในกรณี 8.3.1.1.1, 8.3.1.1.2, 8.3.1.2.1, 8.3.1.2.2, และ 8.3.2.1.....	115

8.3.3.1 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริง.....	115
8.3.3.2 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ	116
8.3.3.3 การเปรียบเทียบแรงดัน	117
8.3.4 สรุปผลการทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์ แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า	118
บทที่ 9 สรุปวิทยานิพนธ์	119
9.1 สรุปผลการวิจัย.....	119
9.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	120
รายการอ้างอิง	121
ภาคผนวก	127
ภาคผนวก ก การเก็บข้อมูลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	128
ภาคผนวก ข ข้อมูลระบบทดสอบทำทราาย 34 บัศ	131
ภาคผนวก ค ตัวอย่างฐานข้อมูลความเข้มแสงและอุณหภูมิ.....	135
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	140

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัทเคียวเซร่า จำกัด (มหาชน)	17
ตารางที่ 2.2 ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัทโซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน).....	18
ตารางที่ 3.1 วิธีการหาจุดทำงานสูงสุด.....	21
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลอินเวอร์เตอร์รุ่น Sunny Central 1000MV ของบริษัท SMA จำกัด	28
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลอินเวอร์เตอร์รุ่น 2100TL (Sunny Boy 2100TL) ของบริษัท SMA จำกัด	29
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเชื่อมต่อโมดูลเป็นอาร์เรย์.....	37
ตารางที่ 6.1 มาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	56
ตารางที่ 7.1 พารามิเตอร์พื้นฐานของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น SP120 ของบริษัทโซลาร์ตรอน ...	63
ตารางที่ 7.2 รายละเอียดทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์รุ่น 2100TL.....	65
ตารางที่ 8.1 พารามิเตอร์พื้นฐานของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น KC200GT ของบริษัทเคียวเซร่า..	72
ตารางที่ 8.2 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	72
ตารางที่ 8.3 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	77
ตารางที่ 8.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เปลี่ยนเมื่อคิดเป็นอาร์เรย์	78
ตารางที่ 8.5 ข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบท่าทราย.....	89
ตารางที่ 8.6 ผลทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อกำหนด $N_s = 30$ และ $N_{sh} = 150$.	91
ตารางที่ 8.7 ผลทดสอบส่วนวงจรไฟฟ้ากระแสตรง	91
ตารางที่ 8.8 ผลทดสอบในส่วนของอินเวอร์เตอร์และวงจรไฟฟ้ากระแสสลับในสถานะ STC.....	92
ตารางที่ 8.9 ข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าที่สถานะ STC.....	92
ตารางที่ 8.10 ผลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 31 ตลอดทั้งวัน	94
ตารางที่ 8.11 ผลทดสอบในส่วนของอินเวอร์เตอร์และวงจรไฟฟ้ากระแสสลับในสถานะ STC.....	95
ตารางที่ 8.12 ผลทดสอบในส่วนของอินเวอร์เตอร์และวงจรไฟฟ้ากระแสสลับในสถานะ STC.....	96
ตารางที่ 8.13 ผลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 31 ตลอดทั้งวัน	97
ตารางที่ 8.14 ผลทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อกำหนด $N_s = 30$ และ $N_{sh} = 200$	99
ตารางที่ 8.15 ผลทดสอบส่วนวงจรไฟฟ้ากระแสตรง	99
ตารางที่ 8.16 ผลทดสอบในส่วนของอินเวอร์เตอร์และวงจรไฟฟ้ากระแสสลับในสถานะ STC....	100
ตารางที่ 8.17 ข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าที่สถานะ STC.....	100

ตารางที่ 8.18 ผลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 31 ตลอดทั้งวัน	102
ตารางที่ 8.19 ผลทดสอบในส่วนของอินเวอร์เตอร์และวงจรไฟฟ้ากระแสสลับในสถานะ STC....	103
ตารางที่ 8.20 ข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าที่สถานะ STC	103
ตารางที่ 8.21 ผลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 31 ตลอดทั้งวัน	105
ตารางที่ 8.22 ผลทดสอบในส่วนของอินเวอร์เตอร์และวงจรไฟฟ้ากระแสสลับในสถานะ STC....	107
ตารางที่ 8.23 ข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าที่สถานะ STC	107
ตารางที่ 8.24 ผลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 31 ตลอดทั้งวัน	109
ตารางที่ 8.25 ข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบทำทราบดีดแปลง.....	110
ตารางที่ 8.26 ผลทดสอบในส่วนของอินเวอร์เตอร์และวงจรไฟฟ้ากระแสสลับในสถานะ STC....	112
ตารางที่ 8.27 ข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าที่สถานะ STC	112
ตารางที่ 8.28 ผลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 31 ตลอดทั้งวัน	114
ตารางที่ ข.1 ข้อมูลสายส่งของระบบทำทราบดีดแปลง 34 บัส	131
ตารางที่ ข.2 ข้อมูลระบบทดสอบทำทราบดีดแปลง 34 บัส	133

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ	9
ภาพที่ 2.2 เซลล์ โมดูล อารีย์.....	10
ภาพที่ 2.3 ผลของแรงดันและกระแสเมื่อต่ออารีย์แบบอนุกรม	11
ภาพที่ 2.4 ผลของแรงดันและกระแสเมื่อต่ออารีย์แบบขนาน	11
ภาพที่ 2.5 แบบจำลอง โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่ง ไค โอค.....	12
ภาพที่ 3.1 ส่วนโค้งกระแส-แรงดัน (I-V curve) ของอารีย์เซลล์แสงอาทิตย์.....	19
ภาพที่ 3.2 ส่วนโค้งกระแส-แรงดัน เมื่อ (ก) เปลี่ยนค่าความเข้มแสง (ข) เปลี่ยนค่าอุณหภูมิ.....	20
ภาพที่ 3.3 ส่วนโค้งระหว่างกำลังไฟฟ้าของอารีย์เซลล์แสงอาทิตย์กับแรงดันและจุดทำงานสูงสุด	22
ภาพที่ 3.4 การหาจุดทำงานสูงสุดโดยวิธี P&O.....	23
ภาพที่ 3.5 ระบบผลิตไฟฟ้าโดยใช้อินเวอร์เตอร์	23
ภาพที่ 3.6 ระบบควบคุมของอินเวอร์เตอร์	24
ภาพที่ 3.7 การปรับจุดทำงานของอินเวอร์เตอร์	26
ภาพที่ 3.8 การจำกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์.....	27
ภาพที่ 4.1 ขั้นตอนการหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	39
ภาพที่ 4.2 ขั้นตอนการคำนวณแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	41
ภาพที่ 5.1 อารีย์เซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่างชนิดกัน	44
ภาพที่ 5.2 ผลของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากอารีย์เซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดความไม่เข้ากันของ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์	45
ภาพที่ 5.3 การต่ออนุกรมของอารีย์เซลล์แสงอาทิตย์สองรุ่น	45
ภาพที่ 5.4 I-V curve เมื่อเกิดการความไม่เข้ากันของ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่ออนุกรม	46
ภาพที่ 5.5 P-V curve เมื่อเกิดการความไม่เข้ากันของ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่ออนุกรม	46
ภาพที่ 5.6 การต่อขนานของอารีย์เซลล์แสงอาทิตย์สองรุ่น.....	47
ภาพที่ 5.7 I-V curve เมื่อเกิดการความไม่เข้ากันของ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อขนาน	48
ภาพที่ 5.8 P-V curve เมื่อเกิดการความไม่เข้ากันของ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อขนาน	48
ภาพที่ 6.1 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า.....	50
ภาพที่ 6.2 แบบจำลองระบบไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า.....	51
ภาพที่ 6.3 วงจรสมมูลของฟิลเตอร์.....	52

ภาพที่ 6.4	วงจรมุมของหม้อแปลง.....	53
ภาพที่ 6.5	วงจรมุมของฟิวเตอร์และหม้อแปลง.....	53
ภาพที่ 6.6	วงจรมุมของหม้อแปลงและฟิวเตอร์ในรูปแบบ Z1, Z2 และ Z3.....	53
ภาพที่ 6.7	วงจรมุมแบบเดลด้า.....	54
ภาพที่ 6.8	แผนผังขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า.....	58
ภาพที่ 7.1	คาตฟ้า อาคารเจริญวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	62
ภาพที่ 7.2	อาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาใช้เปรียบเทียบผล	63
ภาพที่ 7.3	อินเวอร์เตอร์รุ่น 2100TL	64
ภาพที่ 7.4	แผนผังภายในของอินเวอร์เตอร์รุ่น 2100TL.....	64
ภาพที่ 7.5	เซนเซอร์ตรวจวัดความเข้มแสง	65
ภาพที่ 7.6	เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม และอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์.....	66
ภาพที่ 7.7	ตัวเก็บข้อมูล	67
ภาพที่ 7.8	รายละเอียดการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	67
ภาพที่ 7.9	ตัวอย่างข้อมูลที่รับจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้ง ณ คาตฟ้าอาคาร 4 คณะวิศวกรรมศาสตร์	69
ภาพที่ 8.1	I-V curve เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจากข้อมูลของผู้ผลิต	73
ภาพที่ 8.2	I-V curve เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจากแบบจำลอง	74
ภาพที่ 8.3	การเปรียบเทียบ I-V curve เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง	74
ภาพที่ 8.4	P-V curve เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจากแบบจำลอง	75
ภาพที่ 8.5	I-V curve เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากข้อมูลของผู้ผลิต	75
ภาพที่ 8.6	I-V curve เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากแบบจำลอง	76
ภาพที่ 8.7	การเปรียบเทียบ I-V curve เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	76
ภาพที่ 8.8	P-V curve เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากแบบจำลอง	77
ภาพที่ 8.9	ความเข้มแสง ณ วันที่ 5 มกราคม 2556.....	78
ภาพที่ 8.10	อุณหภูมิของอาร์เรย์ ณ วันที่ 5 มกราคม 2556.....	79
ภาพที่ 8.11	การเปรียบเทียบกระแสที่ผลิตได้จากแบบจำลองและการตรวจวัดจริงในโหมด MPP..	80
ภาพที่ 8.12	การเปรียบเทียบแรงดันที่ผลิตได้จากแบบจำลองและการตรวจวัดจริงในโหมด MPP..	80
ภาพที่ 8.13	การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแบบจำลองและการตรวจวัดจริงใน	

โหมค MPP.....	81
ภาพที่ 8.14 การเปรียบเทียบค่ากระแสที่ผลิตได้จากแบบจำลองและการตรวจวัดจริงตลอดทั้งวัน ..	82
ภาพที่ 8.15 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่ผลิตได้จากแบบจำลองและการตรวจวัดจริงตลอดทั้งวัน ..	82
ภาพที่ 8.16 I-V curve เปรียบเทียบการผลิตไฟฟ้าของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ 2 รุ่น ..	84
ภาพที่ 8.17 P-V curve เปรียบเทียบการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ 2 รุ่น ..	84
ภาพที่ 8.18 I-V curve ของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์เมื่อประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ 2 รุ่น	
แบบอนุกรม.....	85
ภาพที่ 8.19 P-V curve ของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์เมื่อประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ 2 รุ่น	
แบบอนุกรม.....	85
ภาพที่ 8.20 I-V curve ของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์เมื่อประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ 2 รุ่นแบบขนาน .	86
ภาพที่ 8.21 P-V curve ของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์เมื่อประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ 2 รุ่นแบบขนาน	86
ภาพที่ 8.22 ระบบท่าทราย 34 บัส.....	88
ภาพที่ 8.23 ความเข้มแสง ณ วันที่ 25 พฤษภาคม 2555 ..	88
ภาพที่ 8.24 อุณหภูมิ ณ วันที่ 25 พฤษภาคม 2555 ..	89
ภาพที่ 8.25 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้ในแต่ละกรณี ..	115
ภาพที่ 8.26 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ผลิตได้ในแต่ละกรณี ..	117
ภาพที่ 8.27 การเปรียบเทียบแรงดันในแต่ละกรณี ..	118
ภาพที่ ก.1 เว็บเพจสำหรับการเก็บข้อมูล ..	128
ภาพที่ ก.2 หน้าจอบันทึกข้อมูล ..	129
ภาพที่ ก.3 ไฟล์ข้อมูลที่บันทึกได้.....	129
ภาพที่ ก.4 ข้อมูลที่บันทึกได้จากตัวเก็บข้อมูล ..	130
ภาพที่ ข.1 ระบบทดสอบท่าทราย 34 บัส ..	131
ภาพที่ ค.1 ข้อมูลความเข้มแสงในเดือนกุมภาพันธ์ 2556.....	136
ภาพที่ ค.2 ข้อมูลความเข้มแสงในเดือนกุมภาพันธ์ 2556.....	137
ภาพที่ ค.3 ข้อมูลกระแสที่ผลิตได้จากอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ในเดือนกุมภาพันธ์ 2556.....	138
ภาพที่ ค.4 ข้อมูลแรงดันที่ผลิตได้จากอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ในเดือนกุมภาพันธ์ 2556.....	139

บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาของบทนี้จะนำเสนอ ที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานถือเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการดำเนินชีวิตในปัจจุบันอย่างมาก เนื่องจากเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับภาคอุตสาหกรรม ในปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยอาศัยพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล อันได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน และน้ำมัน เป็นจำนวนมากที่สุด ซึ่งเชื้อเพลิงเหล่านี้เป็นเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไปและมีบางส่วนต้องนำเข้าจากต่างประเทศ จึงมีการนำพลังงานรูปแบบใหม่ที่เรียกว่า “พลังงานหมุนเวียน” มาใช้มากขึ้น โดยพลังงานหมุนเวียนที่ได้รับความสนใจอย่างมากก็คือ “พลังงานแสงอาทิตย์” ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่มีวันหมด เป็นพลังงานสะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ, และโดยที่ตั้งของประเทศไทย เป็นจุดที่สามารถได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างดี ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นที่น่าจับตามองที่สุดสำหรับพลังงานในอนาคตสำหรับประเทศไทย

ทั้งนี้เพื่อที่จะต้องการลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลในส่วนที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ และต้องการกระจายสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงเพื่อความมั่นคงของระบบไฟฟ้า ภาครัฐโดยกระทรวงพลังงานจึงมีโครงการส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียนเป็นจำนวนมาก เช่น ส่วนจ่ายเพิ่ม (Adder) สำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ หรือ การจัดทำโครงการศึกษามาตรการส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียน ของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) [1] เป็นต้น โดยข้อมูลของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) ในแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ.2555-2564) ระบุว่าเป้าหมายในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยในปี พ.ศ.2564 คือ 2,000 MW [2] (ปัจจุบันมีกำลังการผลิตรวม 138 MW)

อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณโรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียนมากขึ้น โดยเฉพาะการที่ระบบไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าอาจจะทำให้เกิดปัญหาต่อระบบไฟฟ้าได้ เช่น ก่อให้เกิดปัญหาแรงดันเกิน ความถี่เกิน เป็นต้น ซึ่งปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยให้มีการควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้านี้ออกที่ฟ แต่ในปัจจุบันผู้ขายไฟไม่มีการปรับให้จ่ายกำลังไฟฟ้านี้ออก

ที่ไฟเข้าสู่ระบบ ซึ่งจะทำให้เป็นภาระต่อการใช้ไฟฟ้าในภายหลัง ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนจึงต้องมีการจัดการป้องกันการเกิดปัญหาเหล่านี้

ในอดีตมีงานวิจัยมากมายที่จำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อหากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนมากจะคำนึงถึงการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในโหมดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPP) เท่านั้น โดยไม่คำนึงถึงกระบวนการทำงานและโหมดอื่นๆของอินเวอร์เตอร์ รวมถึงการพิจารณาการต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอถึงแบบจำลองของการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์, การทำงานของอินเวอร์เตอร์ รวมถึงระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า

1.2 วัตถุประสงค์

1. พัฒนาแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยคำนึงถึงความเข้มแสงและอุณหภูมิที่ส่งผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์
2. พัฒนาแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าโดยคำนึงถึงการทำงานของอินเวอร์เตอร์

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. พิจารณาแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะนำข้อมูลทางเทคนิคที่ได้จากผู้ผลิตมาพัฒนาแบบจำลอง
2. พิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะประกอบไปด้วยความเข้มแสง และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์
3. อุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะประกอบด้วย เซลล์แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์ หม้อแปลง และฟิลเตอร์
4. พิจารณาอินเวอร์เตอร์แบบ SPWM (Sinusoidal pulse width modulation) เพียงประเภทเดียว
5. พิจารณาระบบไฟฟ้ากำลังเป็นแบบ 3 เฟสสมดุล และทำงานในสถานะอยู่ตัว (Steady-state)
6. พิจารณาการตรวจวัดกับเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) (Solartron) รุ่น SP120 และของบริษัท เกียวเซรา จำกัด (Kyocera) รุ่น KC200GT
7. ละเอียดมุมตกกระทบของแสงอาทิตย์ต่อเซลล์แสงอาทิตย์

8. ไม่พิจารณาผลของฮาร์โมนิก
9. ละเลยการสูญเสียในอินเวอร์เตอร์

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบจำหน่าย หรือการไฟฟ้า
2. ศึกษาแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (Load flow calculation)
3. ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับปัจจัยที่ส่งผลต่อแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์
4. พัฒนาแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อที่จะใช้งานร่วมกับข้อมูลทางเทคนิคเซลล์แสงอาทิตย์ของแต่ละผู้ผลิต
5. พัฒนาโปรแกรมเพื่อศึกษากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เมื่อเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์
6. ศึกษาโหมคการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
7. พัฒนาแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า (Load flow calculation)
8. ทดสอบแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์กับข้อมูลทางเทคนิคของบริษัทเคียวเซระ่า จำกัด (มหาชน) (Kyocera) รุ่น KC200GT
9. ทดสอบแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์กับข้อมูลทางเทคนิคของบริษัทโซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) (Solartron) รุ่น SP120 เทียบกับระบบทดสอบจริง
10. ทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับระบบทดสอบทำทราย 34 บัส
11. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. ฐานข้อมูลของความเข้มแสง และอุณหภูมิที่อาคารเจริญวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสามารถรองรับข้อมูลทางเทคนิคโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ของแต่ละผู้ผลิตมาประมวลผลได้ ร่วมกับปัจจัยทางด้านความเข้มแสงและอุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์
3. แบบจำลองที่ศึกษาการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า ร่วมกับแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และโหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประเภทงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองระบบไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบไปด้วยบทความดังต่อไปนี้

บทความเรื่อง “Identification of Photovoltaic Source Models” [3] กล่าวถึง แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งใช้แบบจำลองชนิดหนึ่งไดโอด โดยการประมาณพารามิเตอร์บางค่าจากข้อมูลโมดูลที่ได้จากผู้ผลิต และคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยคำนึงถึงผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมต่อพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งแบบจำลองที่ใช้ในบทความนี้เป็นแบบจำลองที่เข้าใจง่าย และจะมีการนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งในแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้

บทความเรื่อง “Explicit model of photovoltaic panels to determine voltages and currents at the maximum power point” [4] กล่าวถึง แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย โดยคำนึงถึงผลของความเข้มแสงและอุณหภูมิ และละเลยผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อประมาณค่ากระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า เพื่อจะไม่ต้องใช้วิธีเชิงตัวเลขในการหาค่าพารามิเตอร์ แต่ใช้การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดในการหาค่าแทน

บทความเรื่อง “Characterization and Testing of a Tool for Photovoltaic Panel Modeling” [5] ศึกษาถึง แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการประมาณค่าความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนาน โดยแบบจำลองจะเป็นแบบจำลองชนิดสองไดโอด โดยมีการทดสอบเปรียบเทียบกับระบบทดสอบ โดยแบบจำลองสองไดโอดเป็นแบบจำลองที่มีความยุ่งยากในการนำมาใช้งาน จึงไม่นำมาใช้ในงานวิจัย

บทความเรื่อง “Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method” [6] ศึกษาถึง การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT) ควบคู่กับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเป็นการจำลอง MPPT โดยวิธี Perturb and Observe เพื่อดูการทำงานของ MPPT และมีการปรับค่า Duty cycle หรือช่วงเวลาทดสอบเพื่อดูผลที่เกิดขึ้นต่อวิธีการ P&O

บทความเรื่อง “Utility-Side Voltage Control with Inverter-based Photovoltaic Systems” [7] ศึกษาถึงการควบคุมแรงดัน, กำลังไฟจริง และ กำลังไฟรีแอกทีฟ ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้อินเวอร์เตอร์ โดยกล่าวถึงระบบควบคุมภายในของอินเวอร์เตอร์ และทดสอบโดยใช้ระบบจำลอง

บทความเรื่อง “Fault Current Calculation in Distribution Systems with Inverter-based Distributed Generations” [8] กล่าวถึงการวิเคราะห์ความผิดพลาดที่เกิดในระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้อินเวอร์เตอร์ ซึ่งนำการควบคุมกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์มาพิจารณาพร้อมกับการคำนวณความผิดพลาดในระบบไฟฟ้า

บทความเรื่อง “Steady-State Model and Power Flow Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Power System” [9] กล่าวถึง การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่มีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าขนาดใหญ่ โดยแบ่งการพิจารณาเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนกระแสตรง ส่วนอินเวอร์เตอร์ และส่วนกระแสสลับ แต่ยังไม่มีการนำการทำงานของอินเวอร์เตอร์มาใช้ งานวิจัยนี้จะนำมาใช้ในส่วนจากระบบผลิตไฟฟ้าเมื่อต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า

1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 บทนำ ซึ่งสามารถแบ่งการนำเสนอได้เป็น 7 หัวข้อ คือ ที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ จากวิทยานิพนธ์ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์ จะสามารถแบ่งการนำเสนอได้เป็น 4 หัวข้อ คือ ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์ หลักการพื้นฐานของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ข้อมูลทางเทคนิคของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และ สรุป

บทที่ 3 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์ จะสามารถแบ่งการนำเสนอได้เป็น 5 หัวข้อ คือ การทำงานในการหาจุดทำงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT) การควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ การทำงานของอินเวอร์เตอร์ ข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์ และ สรุป

บทที่ 4 การพัฒนาแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ จะสามารถแบ่งการนำเสนอได้เป็น 8 หัวข้อ คือ งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ หลักในการหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นในแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ผลของสภาพแวดล้อมต่อพารามิเตอร์ของแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ การปรับค่าพารามิเตอร์จากโมดูลเป็นอาร์เรย์ การทำงานของอินเวอร์เตอร์ ขั้นตอนการหาพารามิเตอร์ที่จำเป็น

ในแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ขั้นตอนการคำนวณแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และ สรุป

บทที่ 5 ความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (Mismatch) จะสามารถแบ่งการนำเสนอได้เป็น 3 หัวข้อ คือ ความหมายของการเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ หลักในการคำนวณระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และ สรุป

บทที่ 6 แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า จะสามารถแบ่งการนำเสนอได้เป็น 6 หัวข้อ คือ ส่วนวงจรไฟฟ้ากระแสตรง (DC part) ส่วนอินเวอร์เตอร์ (Inverter part) ส่วนวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ (AC part) ข้อกำหนดการเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า (Grid Code) ขั้นตอนการคำนวณแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า และ สรุป

บทที่ 7 ระบบทดสอบ จะสามารถแบ่งการนำเสนอได้เป็น 4 หัวข้อ คือ สถานที่ อุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ รายละเอียดการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และ ข้อมูลที่บันทึกได้จากการทดสอบ

บทที่ 8 ผลการทดสอบ จะสามารถแบ่งการนำเสนอได้เป็น 3 หัวข้อ คือ ผลการทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และ ผลการทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า

บทที่ 9 สรุปวิทยานิพนธ์ จะสามารถแบ่งการนำเสนอได้เป็น 2 หัวข้อ คือ สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์

ปัจจุบันประเทศไทยมีการผลิตไฟฟ้าโดยจึงใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้ามากกว่าร้อยละ 60 ของปริมาณพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไป โดยในปัจจุบันก๊าซธรรมชาติที่นำมาใช้ผลิตไฟฟ้านั้นจะมีแหล่งที่มาจากการขุดเจาะภายในประเทศ และการนำเข้าก๊าซธรรมชาติจากประเทศใกล้เคียง ดังนั้นจึงส่งผลให้มีการนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าเป็นปริมาณที่มากขึ้น โดยพลังงานหมุนเวียนจะประกอบไปด้วยหลายประเภท เช่น พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม เป็นต้น ซึ่งหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic cell) ที่มีความสำคัญมากเป็นอันดับต้นๆ ในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนทั้งหมด ทั้งนี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากลักษณะเด่นหรือข้อดีอันหลายๆประการของพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ [10]-[13] คือ

- เป็นการใช้พลังงานจากธรรมชาติ คือ แสงอาทิตย์ ซึ่งสะอาดและบริสุทธิ์ ไม่ก่อปฏิกิริยาที่จะทำให้สิ่งแวดล้อมเป็นพิษ หรือเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
- พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่ไม่มีวันหมดไปจากโลกนี้ และสามารถนำมาใช้ได้เลย โดยที่ไม่ต้องเสียค่าเชื้อเพลิง
- สามารถนำไปใช้เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ทุกพื้นที่บนโลกที่รับแสงอาทิตย์ได้
- ไม่ต้องใช้เชื้อเพลิงอื่นใดนอกจากแสงอาทิตย์ รวมถึงไม่มีการเผาไหม้ จึงไม่ก่อให้เกิดมลภาวะด้านอากาศและน้ำ
- ไม่เกิดของเสียขณะใช้งาน จึงไม่มีการปล่อยมลพิษทำลายสิ่งแวดล้อม
- ไม่เกิดเสียงและไม่มีการเคลื่อนไหวขณะใช้งาน จึงไม่เกิดมลภาวะด้านเสียง
- เป็นอุปกรณ์ที่จะต้องติดตั้งอยู่กับที่ และจะไม่มีชิ้นส่วนใดชิ้นใดที่มีการเคลื่อนไหวขณะทำงาน จึงทำให้ไม่เกิดการสึกหรอ
- ต้องการการบำรุงรักษาน้อยมาก

นอกจากนี้ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ยังคงที่จะมีข้อเสียอยู่บ้างในทางปฏิบัติ โดยจะประกอบไปด้วยดังต่อไปนี้ [10]-[13]

- ปริมาณไฟฟ้าที่ได้จะแปรผันตามสภาพอากาศ เนื่องจากพลังงานที่ผลิตออกมาได้ของเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงของแสงอาทิตย์และอุณหภูมิที่ล้อมรอบเซลล์แสงอาทิตย์

- ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีระบบกักเก็บพลังงานจะไม่สามารถที่จะเก็บไฟฟ้าไว้ได้ และเนื่องมาจากปัจจุบันแบตเตอรี่ที่ไว้กักเก็บพลังงานไฟฟ้ามีราคาที่สูงมากจึงทำให้ไม่นิยมนำมาใช้งาน
- พลังงานที่ผลิตออกมาได้จะต่ำ ถึงแม้ว่าแสงอาทิตย์จะสามารถให้ความเข้มแสงของแสงแดดไม่มีวันหมด แต่ปัจจุบันประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้านั้นยังต่ำอยู่จึงส่งผลให้พลังงานที่ผลิตออกมาได้ต่ำ
- ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ และอุปกรณ์ในการติดตั้งในปัจจุบันยังมีราคาค่อนข้างแพง หรือราคาของการลงทุนผลิตระบบไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ต่อพลังงานที่ผลิตได้ของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์จะมีอัตราส่วนที่ค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงในรูปแบบอื่นๆ

2.1 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic cell) คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่จะสามารถสร้างมาจากสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เป็นวัสดุหลัก ซึ่งจะมีหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงโดยอาจจะเป็นแสงที่มาจากดวงอาทิตย์หรือแสงที่มาจากหลอดไฟ เปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยพลังงานไฟฟ้าจะอยู่ในรูปแบบของพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current: DC) เช่นนั้นจะถือว่าพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากเซลล์แสงอาทิตย์นี้ เป็นพลังงานทดแทนชนิดหนึ่ง (Renewable energy) ซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาดและไม่สร้างมลภาวะใด ๆ ให้กับสิ่งแวดล้อมในขณะที่ใช้งาน นอกจากนี้กลุ่มสารประกอบที่นิยมนำมาสร้างเป็นเซลล์แสงที่ใช้กันในปัจจุบันนั้น จะสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม [10]-[12]

1) กลุ่มที่ทำจากสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอน

สารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอนเป็นสารที่นิยมนำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถแบ่งประเภทของซิลิคอนที่นำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ได้ออกเป็น 3 ประเภท คือ

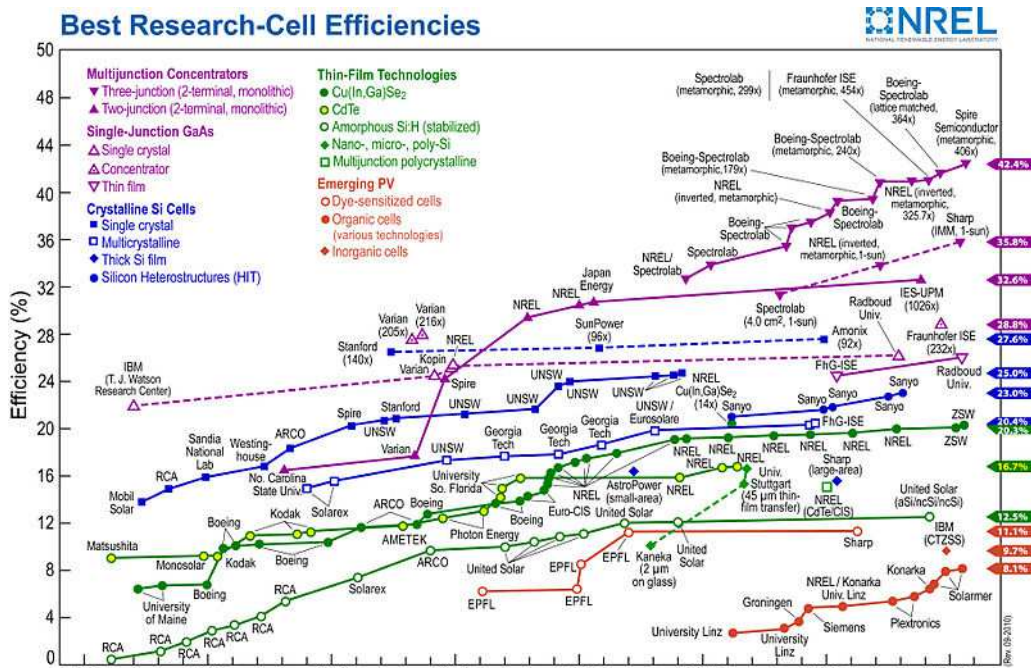
- เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (Single crystalline silicon solar cell หรือ c-Si) ซิลิคอนเป็นธาตุชนิดหนึ่งที่มีมากที่สุดในโลก จึงทำให้ซิลิคอนเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีราคาถูกที่สุด จึงได้รับความนิยมและใช้งานอย่างแพร่หลาย
- เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกโพลีซิลิคอน (Polycrystalline Silicon Solar Cell หรือ pc-Si) เกิดจากความพยายามในการที่จะลดต้นทุนการผลิตของ c-Si ทำให้ต้นทุนการผลิต pc-Si ต่ำกว่า c-Si ร้อยละ 10 โดยเทคโนโลยี pc-Si ได้รับความนิยมและใช้งานกันอย่างแพร่หลายเช่นกัน

- เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous Silicon Solar Cell หรือ a-Si) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ธาตุซิลิคอนที่ไม่เป็นผลึก ผลของสารอะมอร์ฟัสจะทำให้เกิดเป็นฟิล์มบางของซิลิคอน ซึ่งมีความบางประมาณ 300 นาโนเมตร ทำให้มีน้ำหนักเบา การผลิตทำได้ง่าย และไม่เกิดมลพิษกับสิ่งแวดล้อม จึงนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่กินไฟฟ้าน้อย เช่น เครื่องคิดเลข นาฬิกาข้อมือ วิทยุทรานซิสเตอร์ เป็นต้น

2) กลุ่มที่ทำจากสารประกอบที่ไม่ใช่ซิลิคอน

ประเภทนี้จะเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงถึง 25% ขึ้นไปแต่มีราคาสูงมาก ไม่นิยมนำมาใช้บนพื้นโลก จึงใช้งานสำหรับดาวเทียมและระบบรวมแสงเป็นส่วนใหญ่ แต่การพัฒนาขบวนการผลิตสมัยใหม่จะทำให้มีราคาถูกลง และนำมาใช้มากขึ้นในอนาคต โดยวัสดุที่จะนำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จะประกอบด้วย แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs: Gallium Arsenide), แคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe: Cadmium Telluride) และคอปเปอร์อินเดียมไดเซเลไนด์ (CIS: Copper Indium Diselenide) เป็นต้น ซึ่งจะมีทั้งชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) และผลึกรวม (Polycrystalline)

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทผลึกเดี่ยวซิลิคอน ผลึกโพลีซิลิคอน และฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนจะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ

(ที่มา: National Renewable Energy Laboratory (NREL), <http://www.nrel.gov/pv/>)

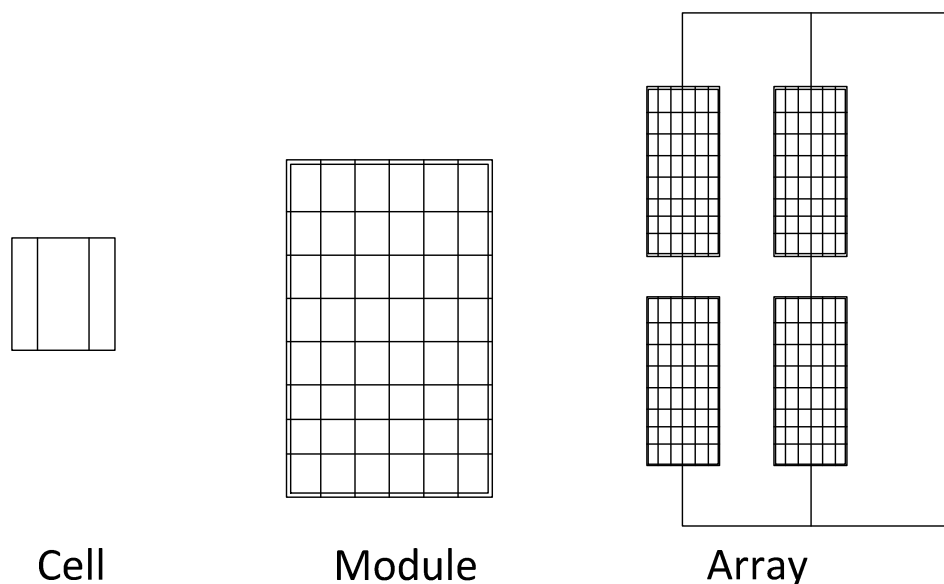
2.2 หลักการพื้นฐานของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ คือ สิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สารกึ่งตัวนำมาสร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า สำหรับการนำมาใช้งานนั้น เซลล์แสงอาทิตย์เพียง 1 เซลล์นั้นจะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อยมาก จึงต้องมีการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์เป็นจำนวนหนึ่ง เพื่อให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้ในปริมาณที่เหมาะสม โดยบล็อกเซลล์แสงอาทิตย์นี้จะเรียกว่า “โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์” โดยหลักการพื้นฐานของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 หัวข้อย่อย คือ

1. เซลล์ โมดูล อาร์เรย์
2. แบบจำลองโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์
3. ผลของสภาพแวดล้อมที่มีต่อโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

2.2.1 เซลล์ โมดูล อาร์เรย์

ส่วนนี้จะอธิบายถึงการปรับค่าการผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเริ่มจากการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์เป็น โมดูล และเอาโมดูลแต่ละ โมดูลประกอบกันเป็นอาร์เรย์ตามลำดับ

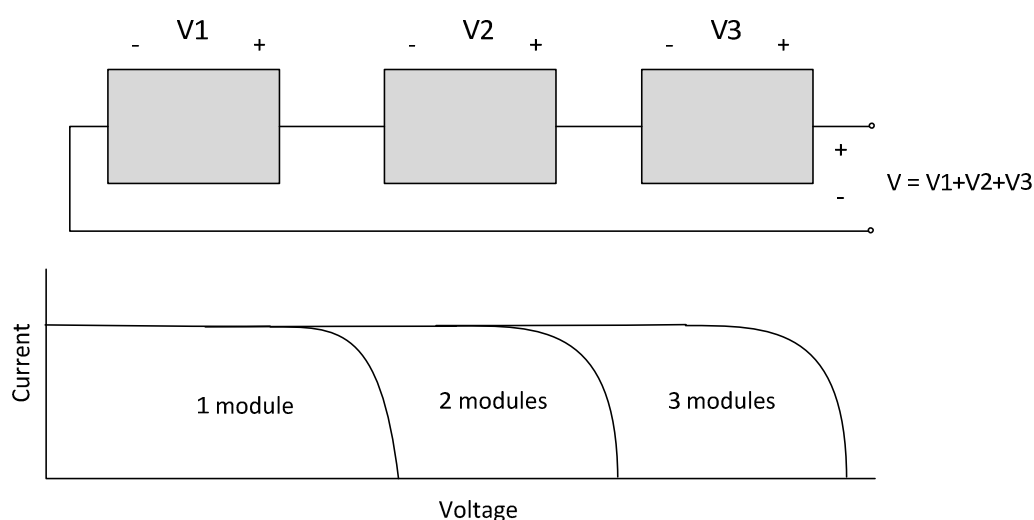


ภาพที่ 2.2 เซลล์ โมดูล อาร์เรย์

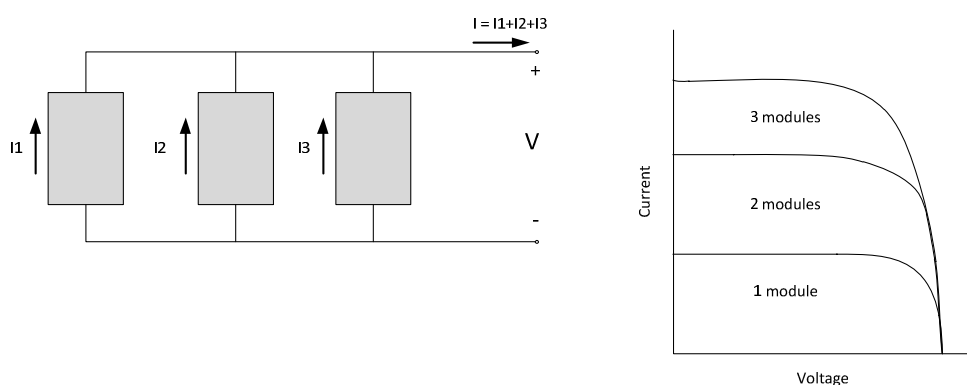
โดยทั่วไปแล้วสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์เพียงหนึ่งเซลล์จะสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้เพียง 0.5 V ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้งานจริงได้ จึงต้องมีการผลิตบล็อกเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใส่เซลล์แสงอาทิตย์ต่อกันอยู่ในภาชนะที่ทนต่อสภาพอากาศได้ ซึ่งสำหรับ โมดูลทั่วไปที่ประกอบ

ไปด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ 36 เซลล์ ต่ออนุกรมกันจะเรียกว่า “12-V module” ถึงแม้ว่าโมดูลนี้จะสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่า 12 V ก็ตาม [10]

โมดูลสามารถนำมาประกอบเข้ากันแบบอนุกรมได้เพื่อเพิ่มขนาดของแรงดันที่สามารถผลิตได้ ดังภาพที่ 2.3 และต่อแบบขนานเพื่อเพิ่มขนาดของกระแสได้ ดังภาพที่ 2.4 โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมและขนานกันได้เป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ผลิตไฟฟ้าได้นี้ เรียกว่า อาร์เรย์ โดยปกติการประกอบโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอาร์เรย์นั้นจะคำนึงถึงการต่อแบบอนุกรมก่อน เนื่องจากต้องทำให้แรงดันที่ผลิตได้รองรับกับระบบไฟฟ้า จากนั้นจึงคำนึงถึงการประกอบแบบขนาน เพื่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เป็นไปตามที่ต้องการ



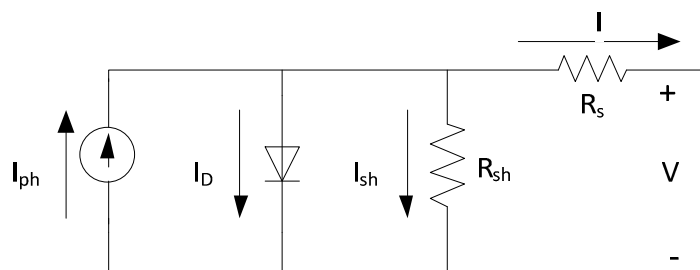
ภาพที่ 2.3 ผลของแรงดันและกระแสเมื่อต่ออาร์เรย์แบบอนุกรม



ภาพที่ 2.4 ผลของแรงดันและกระแสเมื่อต่ออาร์เรย์แบบขนาน

2.2.2 แบบจำลองโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

รอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำจะเรียกว่า p-n junction คือ รอยต่อระหว่างวัสดุที่เป็น p-type และ n-type ซึ่งเมื่อมีแสงตกกระทบต่อเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สารกึ่งตัวนำในการสร้างจะทำให้เกิดกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งปกติผลึกฐานที่ใช้จะเป็นสารกึ่งตัวนำแบบ p-type ดังนั้นขั้วไฟฟ้าด้านหลังจะเป็นขั้วบวก ในขณะที่สารกึ่งตัวนำด้านรับแสงจะเป็นแบบ n-type ขั้วไฟฟ้าทางด้านรับแสงจึงเป็นขั้วลบ ซึ่งเมื่อนำมาต่อให้ครบวงจรไฟฟ้าก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น โดยลักษณะของสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ในรูปของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะสามารถแสดงได้ตามแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้เป็นแบบจำลองของ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากเมื่อเป็น โมดูลแล้วจะจ่ายกำลังไฟฟ้าได้มากกว่า และข้อมูลจากฝ่ายผู้ผลิตที่ให้มาจะเป็นข้อมูลของ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ โดยแบบจำลอง โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาศึกษาในบทความนี้ ใช้แบบจำลอง โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่ง ไดโอด (PV single-diode model) [3], [4], และ [15] เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่เข้าใจง่าย และมีความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ดี [16] แบบจำลอง โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่ง ไดโอดแสดงได้ในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 แบบจำลอง โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่ง ไดโอด

จากแบบจำลองในภาพที่ 2.5 สามารถเขียนสมการของกระแสตามกฎของเคอร์ชอฟได้ดังสมการที่ (2.1)

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (2.1)$$

โดยที่

- I คือ กระแสที่ผลิตมาจาก โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (A)
- I_{ph} คือ กระแสโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric current) ที่จะเกิดมาจากความเข้มแสงที่ตกกระทบโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (A)
- I_D คือ กระแสไหลผ่าน ไดโอด (Diode current) ของ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (A)
- I_{sh} คือ กระแสที่ไหลผ่านความต้านทานที่มีลักษณะของการเชื่อมต่อแบบขนาน

(R_{sh}) ของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (A)

จากสมการที่ (2.1) นั้นจะสามารถเปลี่ยนรูปแบบของสมการให้อยู่ในรูปของแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ (V) โดยจะเริ่มพิจารณาจากแรงดันที่ตกคร่อมตัวของโอด (V_D) และแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานที่เชื่อมต่อแบบขนาน (R_{sh}) ดังแสดงในภาพที่ 2.5 โดยทั่วไปข้อมูลที่ได้จากผู้ผลิตจะเป็นข้อมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ 1 โมดูล ซึ่งจะสามารถที่จะแสดงค่าของกระแสที่ไหลผ่านไดโอด และกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานที่เชื่อมต่อแบบขนานเมื่อพิจารณาเป็นโมดูล ได้ดังสมการที่ (2.2) และ (2.3)

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_D}{n_s V_t}\right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

$$I_{sh} = \frac{V_D}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

โดยที่

I_0	คือ	กระแสอิ่มตัวไดโอด (Saturation current) ของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (A)
V_D	คือ	แรงดันตกคร่อมไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์ (V)
V_t	คือ	ขีดความต่างศักย์เริ่มเปลี่ยน (Threshold voltage) (V) หรือค่าของแรงดันจุดเปลี่ยนของไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์ (V) โดยจะมีหลักการในการคำนวณค่าของ V_t ซึ่งจะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.4)
R_{sh}	คือ	ความต้านทานที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อแบบขนานของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยลักษณะการเชื่อมต่อจะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.5 (Ω)
n_s	คือ	จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมกันเป็น โมดูล

$$V_t = \frac{kTA}{q} \quad (2.4)$$

โดยที่

T	คือ	อุณหภูมิของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (K)
q	คือ	ค่าคงที่ของประจุของอิเล็กตรอนหนึ่งอิเล็กตรอน ($=1.6 \times 10^{-19}$ C)
K	คือ	ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann constant) ($=1.38 \times 10^{-23}$ J/K)
A	คือ	แฟกเตอร์ของไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ ซึ่งจะกับเทคโนโลยีของแต่ละผู้ผลิตที่จะนำมาใช้

จากสมการที่ (2.2), (2.3) นำค่าของกระแสที่ไหลผ่านไดโอด และกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานที่เชื่อมต่อแบบขนานมาแทนค่าในสมการที่ (2.1) จะสามารถแสดงได้ในสมการที่ (2.5)

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_D}{n_s V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V_D}{R_{sh}} \quad (2.5)$$

จากภาพที่ 2.5 จะพบว่าค่าของแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดและค่าของแรงดันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ จะมีความสัมพันธ์ที่สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.6)

$$V_D = V + IR_s \quad (2.6)$$

โดยที่

V คือ แรงดันที่ผลิตออกมาได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (V)

R_s คือ ความต้านทานที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อแบบอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ (Ω)

นำสมการที่ (2.5) และ (2.6) มารวมกันจะได้สมการที่จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังสมการที่ (2.7)

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp\left(\frac{V + IR_s}{n_s V_t}\right) - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.7)$$

2.2.3 ผลของสภาพแวดล้อมที่มีต่อโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

สภาพแวดล้อมต่างๆ ในแต่ละช่วงเวลาจะเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการทำงานต่างกัน และส่งผลให้จุดทำงานของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ ภายในหนึ่งวัน ดังนั้นความสำคัญของผลดังกล่าวจึงต้องนำมาพิจารณาในแบบจำลอง โดยสภาพแวดล้อมที่มีผลโดยตรงต่อโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบไปด้วย 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิ และ ความเข้มแสง

2.2.3.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิจะเป็นปัจจัยหนึ่งที่จะทำให้จุดทำงานของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยจะส่งผลให้ค่าของแรงดันเปิดวงจรและกระแสลัดวงจรที่ใช้ในการทำงานเกิดการ

เปลี่ยนแปลงด้วย ซึ่งกระแสลัดวงจรจะแปรตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าของกระแสลัดวงจรจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิ ในขณะที่แรงดันเปิดวงจรจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นตามค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิเช่นกัน ซึ่งจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงตรงกันข้ามกับกระแสลัดวงจร โดยจะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.8) และ (2.9) [3], [17]

$$I_{sc}(T) = I_{sc}(T_{stc}) + K_i(T - T_{stc}) \quad (2.8)$$

$$V_{oc}(T) = V_{oc}(T_{stc}) + K_v(T - T_{stc}) \quad (2.9)$$

โดยที่

$I_{sc}(T)$	คือ	กระแสลัดวงจรที่อุณหภูมิ T °C (A)
$I_{sc}(T_{stc})$	คือ	กระแสลัดวงจรที่ Standard Test Condition (STC) (อุณหภูมิ 25 °C) (A)
T	คือ	อุณหภูมิ ณ เวลาที่พิจารณา (°C หรือ K)
T_{stc}	คือ	อุณหภูมิที่ Standard Test Condition (STC) (อุณหภูมิ 25 °C)
K_i	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิหนึ่ง องศาเซลเซียสหรือหนึ่งองศาเคลวิน (A/°C หรือ A/K)
K_v	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่อการเปลี่ยนอุณหภูมิหนึ่ง องศาเซลเซียสหรือหนึ่งองศาเคลวิน (V/°C หรือ V/K)
$V_{oc}(T)$	คือ	แรงดันเปิดวงจรที่อุณหภูมิ T °C (A)
$V_{oc}(T_{stc})$	คือ	แรงดันเปิดวงจรที่ Standard Test Condition (STC) (อุณหภูมิ 25 °C) (A)

2.2.3.2 ความเข้มแสง

กระแสไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของแสง ซึ่งจะหมายความว่าเมื่อความเข้มของแสงสูง กระแสที่ผลิตได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะสูงขึ้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าไม่แปรไปตามความเข้มของแสง ความเข้มของแสงที่ใช้วัดเป็นมาตรฐาน คือ ความเข้มของแสงที่วัดบนพื้นโลกในสภาพอากาศปลอดโปร่ง ปราศจากเมฆหมอก และวัดที่ระดับน้ำทะเลในสภาพที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลก ซึ่งความเข้มของแสงจะมีค่าเท่ากับ 100 mW/cm² หรือ 1,000 W/m² ดังนั้นความเข้มแสงที่เปลี่ยนไปจะส่งผลต่อจุดทำงานของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะมีผลต่อกระแสไฟฟ้อิเล็กทริกและกระแสลัดวงจร ซึ่งจะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.10) และ (2.11) [3], [17]

$$I_{ph}(G) = I_{ph}(G_{stc}) \frac{G}{G_{stc}} \quad (2.10)$$

$$I_{sc}(G) = I_{sc}(G_{stc}) \frac{G}{G_{stc}} \quad (2.11)$$

โดยที่

- $I_{ph}(G)$ คือ กระแสโฟโตอิเล็กทริกที่จะเกิดมาจากความเข้มแสงที่ตกกระทบ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ณ ความเข้มแสงเป็น $G \text{ W/m}^2$ (A)
- $I_{ph}(G_{stc})$ คือ กระแสโฟโตอิเล็กทริกที่จะเกิดมาจากความเข้มแสงที่ตกกระทบ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ณ ความเข้มแสงที่ STC ($G = 1000 \text{ W/m}^2$) (A)
- G คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ณ เวลาที่พิจารณา (W/m^2)
- G_{stc} คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ณ ความเข้มแสงที่ STC ($G = 1000 \text{ W/m}^2$) (A)

2.3 ข้อมูลทางเทคนิคของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

ข้อมูลทางเทคนิคของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ คือ รายละเอียดของพารามิเตอร์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่หาได้จากเอกสารข้อมูลของผู้ผลิตโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้จะได้อาจมาจากการทดลองในห้องทดลอง โดยหลักแล้วจะประกอบไปด้วย 8 พารามิเตอร์ ซึ่งสมการแบบจำลองโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จากหัวข้อที่ 2.2 ที่ได้กล่าวมานั้นจะพบว่าการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการใช้พารามิเตอร์เหล่านี้ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติไม่สามารถนำรายละเอียดของพารามิเตอร์โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ของแต่ละผู้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ได้กำหนดไว้มาใช้ในการคำนวณได้ เนื่องจากข้อมูลทางเทคนิคของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าวจะมีพารามิเตอร์ไม่เพียงพอจึงต้องมีการนำมาปรับปรุงแบบจำลองโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อที่จะรองรับกับข้อมูลทางเทคนิคของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้รับจากเอกสารข้อมูลจากผู้ผลิตให้ได้

ผู้ผลิตแต่ละรายจะมีเทคโนโลยีในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกันไป แต่โดยทั่วไปแล้วข้อมูลทางเทคนิคของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะเหมือนกัน โดยข้อมูลทางเทคนิคของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์นั้นผู้ผลิตจะจัดหาข้อมูลต่างๆ มาจากข้อมูลการทดลองของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ในห้องปฏิบัติการหรือห้องทดลอง ซึ่งโดยปกติการทดลองในห้องปฏิบัติการนั้นจะนิยมทดสอบที่อุณหภูมิและความเข้มแสงมาตรฐาน (Standard test condition: STC) คือ อุณหภูมิจะมีค่าเป็น $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ หรือ 278 K และค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบจะมีค่า $1,000 \text{ W/m}^2$ ที่ AM 1.5 ซึ่งประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ที่สำคัญ 8 พารามิเตอร์ คือ

- แรงดันเปิดวงจร (Open circuit voltage: V_{oc})
- กระแสลัดวงจร (Short circuit current: I_{sc})
- กำลังสูงสุดที่จะผลิตได้ (Maximum power: P_{mpp})
- แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังสูงสุดที่จะผลิตได้ (Maximum power voltage: V_{mpp})
- กระแสที่ทำให้เกิดกำลังสูงสุดที่จะผลิตได้ (Maximum power current: I_{mpp})
- ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของกระแสลัดวงจรต่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (Temperature coefficient short circuit: K_i)
- ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันเปิดวงจรต่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (Temperature coefficient open circuit: K_v)
- จำนวนของเซลล์ที่มีการต่ออนุกรมเป็น โมดูล (Number per module: n_s)

จากข้อมูลทางเทคนิคที่กล่าวมานั้น จะสามารถแสดงตัวอย่างของข้อมูลทางเทคนิคของ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัทเคียวเซรา จำกัด (มหาชน) (Kyocera) [18] และบริษัทโซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) (Solartron) [14] ซึ่งจะสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1 และ ตารางที่ 2.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัทเคียวเซรา จำกัด (มหาชน)

พารามิเตอร์ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่ง โมดูล	
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{mpp})	200.143 (W)
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{mpp})	26.3 (V)
กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{mpp})	7.61 (A)
แรงดันเปิดวงจร (V_{oc})	32.9 (V)
กระแสลัดวงจร (I_{sc})	8.21 (A)
ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของกระแสต่ออุณหภูมิ (K_i)	0.00318 (A/°C)
ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่ออุณหภูมิ (K_v)	-0.123 (V/°C)
จำนวนของเซลล์ที่มีการต่ออนุกรมเป็น โมดูล (n_s)	54

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน)

พารามิเตอร์ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล	
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{mpp})	130.130 (W)
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{mpp})	16.9 (V)
กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{mpp})	7.70 (A)
แรงดันเปิดวงจร (V_{oc})	22.0 (V)
กระแสลัดวงจร (I_{sc})	8.20 (A)
ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของกระแสต่ออุณหภูมิ (K_i)	0.0005 (A/°C)
ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่ออุณหภูมิ (K_v)	-0.0036 (V/°C)
จำนวนของเซลล์ที่มีการต่ออนุกรมเป็นโมดูล (n_s)	36

2.4 สรุป

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งได้แก่การนำเซลล์แสงอาทิตย์มาประกอบกันเป็นโมดูล และนำโมดูลมาประกอบกันเป็นอาร์เรย์เพื่อให้มีความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ และกล่าวถึงผลของสภาพแวดล้อมต่อโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ รวมถึงยกตัวอย่างข้อมูลทางเทคนิคของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากเอกสารข้อมูลของผู้ผลิต

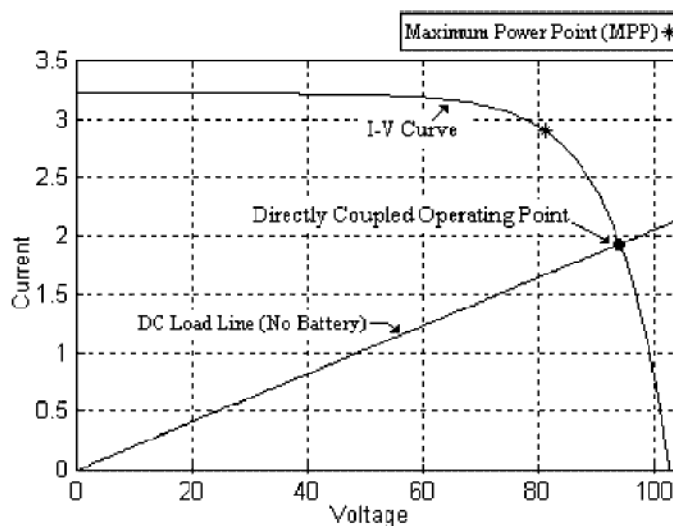
บทที่ 3

หลักการทํางานของอินเวอร์เตอร์

เนื่องจกําลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นกําลังไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้น ใน การทํางานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ จึงจะต้องมีอุปกรณ์ที่แปลงแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยอุปกรณ์ที่วํานั้นคือ อินเวอร์เตอร์นั่นเอง ซึ่งนอกจากการ แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแล้ว อินเวอร์เตอร์ยังเป็นอุปกรณ์สำคัญที่มีฟังก์ชัน การทํางานในการหาจุดทํางานสูงสุด (Maximum Power Point: MPP) เพื่อหากําลังไฟฟ้าสูงสุดที่ สามารถผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้วย

3.1 การทํางานในการหาจุดทํางานสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT)

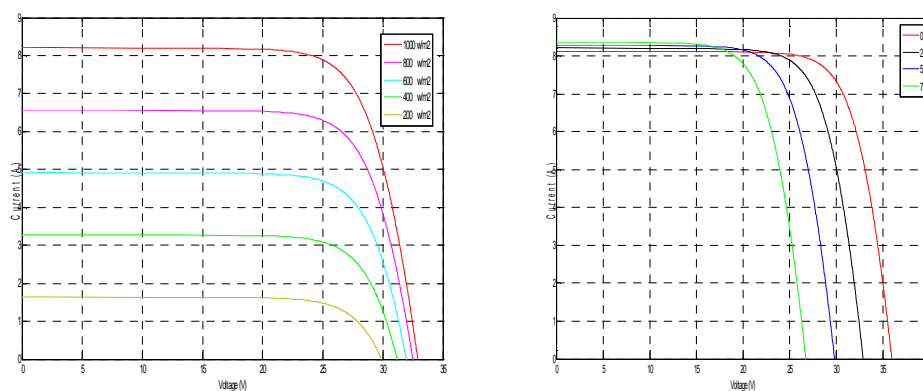
อาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงค่าหนึ่งจะมีกราฟ กระแส-แรงดัน (I-V curve) ดัง ภาพที่ 3.1 จากส่วนโค้งของกราฟจะพบว่ามิจุดหนึ่งซึ่งเป็นจุดที่เรียกว่าจุดกําลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point: MPP) ซึ่งเป็นจุดที่อาร์เรย์จะทํางานด้วยประสิทธิภาพสูงสุด และผลิต กําลังไฟฟ้าสูงสุด โดยถ้อาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ต่อเข้ากับโหลดโดยตรง จุดทํางานของระบบจะอยู่ ที่จุดตัดของ I-V curve ของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ กับ Load line [19] ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ส่วนโค้งกระแส-แรงดัน (I-V curve) ของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ (ที่มา: D. P. Hohm and M. E. Ropp, “Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms”)

โดยทั่วไปจุดทำงานของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์จะไม่ทำงานที่จุดทำงานสูงสุด ดังภาพที่ 3.1 ดังนั้นสำหรับการต่อโหลดโดยตรง อาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์จะต้องทำให้มีขนาดใหญ่เกินความจำเป็น (Oversize) เพื่อให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อโหลดได้ ทำให้ระบบมีค่าใช้จ่ายที่เกินความจำเป็น

เพื่อขจัดปัญหานี้ Switch-mode power converter หรือที่เรียกว่า Maximum Power Point Tracker (MPPT) จะนำมาใช้เพื่อให้อาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่จุด MPP โดยที่ MPPT จะควบคุมแรงดันหรือกระแสของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์โดยไม่ขึ้นกับโหลด ถ้าสามารถควบคุมโดยกระบวนการ MPPT ได้อย่างดีแล้ว MPPT จะสามารถหาจุดทำงานสูงสุดของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ได้ อย่างไรก็ตามตำแหน่งของ MPP บนระนาบ I-V จะต้องถูกกำหนดโดยการคำนวณจากแบบจำลองหรือกระบวนการค้นหา ซึ่งการค้นหาจะยิ่งซับซ้อนจากการที่จุดทำงานสูงสุดไม่มีพฤติกรรมเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง (nonlinear way) จากความเข้มแสงและอุณหภูมิ ดังภาพที่ 3.2 ภาพที่ 3.2 (ก) แสดงส่วนโค้ง I-V เมื่อเพิ่มความเข้มแสงและไม่เปลี่ยนอุณหภูมิ ภาพที่ 3.2 (ข) แสดงส่วนโค้ง I-V เมื่อมีความเข้มแสงเท่ากัน แต่เพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น โดยค่าที่เปลี่ยนไปคือค่าแรงดัน MPP ของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 3.2 ส่วนโค้งกระแส-แรงดัน เมื่อ (ก) เปลี่ยนค่าความเข้มแสง (ข) เปลี่ยนค่าอุณหภูมิ

ในปัจจุบันมีการนำเสนอวิธีการควบคุม MPPT หลากหลายรูปแบบ ตัวอย่างดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วิธีการหาจุดทำงานสูงสุด

วิธีการหาจุดทำงานสูงสุด	
Perturb and observe (P&O)	หาจุดทำงานสูงสุดโดยการปรับค่าแรงดันไปเรื่อยๆ เพื่อหาจุดที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่า
Constant voltage and current	เป็นวิธีการหาจุดทำงานสูงสุดโดยการตั้งค่าแรงดันหรือกระแสเป็นอัตราส่วนต่อแรงดันเปิดวงจรหรือกระแสลัดวงจร
Incremental conductance	เป็นการหาจุดทำงานสูงสุดโดยการใช้อ่อนุพันธ์

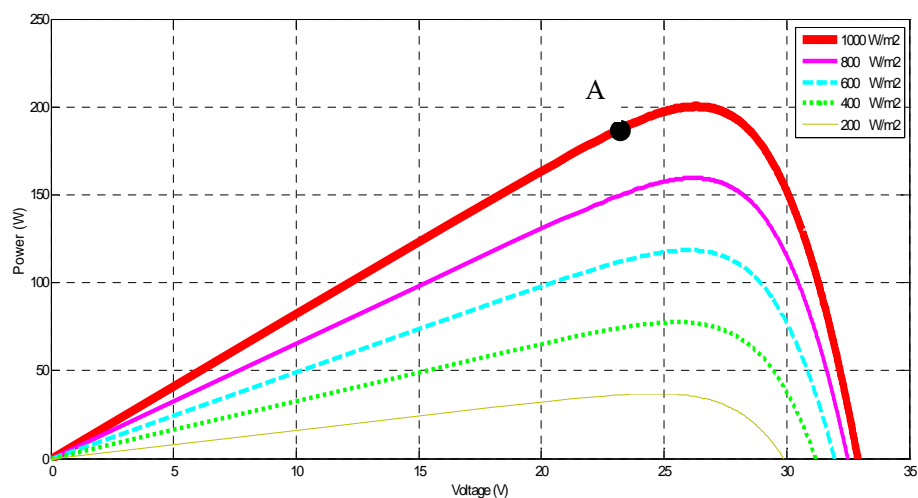
ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาวิธีรบกวนและสังเกต (Perturb and Observe: P&O) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและเข้าใจง่ายที่สุด ซึ่งมีประสิทธิภาพอยู่ในระดับดี [19]

วิธีรบกวนและสังเกต (Perturb and Observe: P&O)

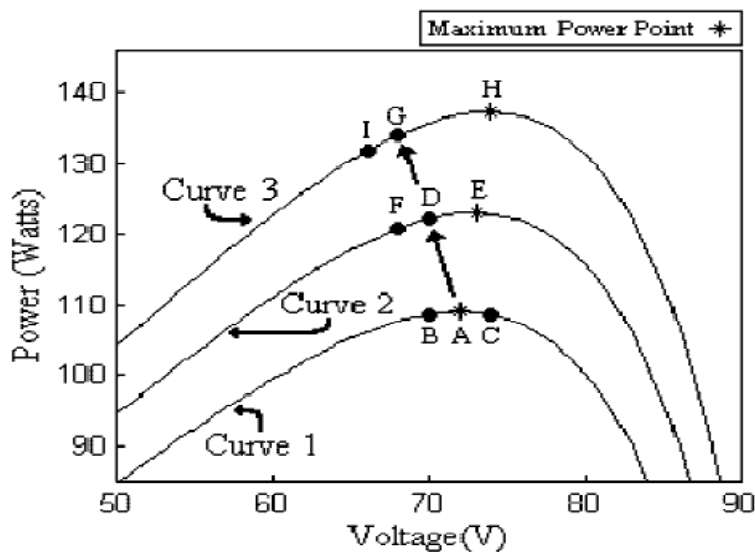
วิธี P&O เป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุดในการปฏิบัติเนื่องจากความง่ายในการนำไปปฏิบัติ [19], [20] สำหรับวิธีพื้นฐานที่สุดในการทำงานของวิธี P&O เป็นดังนี้ จากภาพที่ 3.3 ซึ่งแสดงกราฟระหว่างกำลังไฟฟ้าของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์กับแรงดัน (P-V curves) ที่ระดับความเข้มแสงต่างๆ และอุณหภูมิคงที่ ซึ่งกราฟนี้จะมีค่าสูงสุดที่จุด MPP สมมติให้อาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่จุด A ในภาพที่ 3.3 ซึ่งไม่ใช่จุด MPP วิธีการ P&O แรงดันของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์จะถูกรบกวนโดยการเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า (ΔP) เมื่อทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า ถ้า ΔP เป็นบวก หมายความว่า การรบกวนแรงดันนั้นทำให้จุดทำงานของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์เข้าใกล้จุด MPP มากขึ้น ดังนั้นการรบกวนครั้งต่อไปจะเป็นไปในทิศทางเดิม (ในกรณีนี้คือการเพิ่มแรงดันเช่นเดิม) จะทำให้จุดทำงานเข้าใกล้จุด MPP มากขึ้น แต่ถ้า ΔP เป็นลบ แปลว่าจุดทำงานอยู่ห่างจากจุด MPP มากขึ้น การรบกวนครั้งต่อไปจะต้องเป็นไปในทิศทางตรงกันข้ามกับครั้งก่อน เพื่อให้จุดทำงานเข้าใกล้จุด MPP

ข้อได้เปรียบของวิธีการนี้ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว คือ เข้าใจและนำไปปฏิบัติได้ง่าย อย่างไรก็ตาม P&O มีข้อจำกัดที่ลดประสิทธิภาพ MPPT เช่น เมื่อแสงอาทิตย์ลดลง P-V curve จะมีส่วนโค้งที่ลดลง (แบน) ดังในภาพที่ 3.3 ที่ความเข้มแสงเท่ากับ 200 W/m^2 ซึ่งทำให้เป็นการยากสำหรับ MPPT ในการหาตำแหน่ง MPP เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าน้อยมากเมื่อมีการรบกวนเกิดขึ้น และข้อเสียเปรียบอีกประการหนึ่งคือ P&O จะไม่สามารถตัดสินใจว่ากระทำถึงจุด MPP แล้วจริงๆ เพราะจะเกิดการกระเพื่อมรอบจุด MPP แทน ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนเครื่องหมาย (+,-) ทุก

ครั้งที่เกิดการรบกวนหลังจากการวัดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า นอกจากนี้มีการแสดงผลว่า P&O จะเกิดความผิดพลาดขึ้นได้เมื่อมีการเปลี่ยนระดับความเข้มแสงอย่างรวดเร็ว ดังภาพที่ 3.4 ซึ่งแสดง P-V curve ของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์เมื่อใกล้จุด MPP พิจารณาเมื่อความเข้มแสงก่อให้เกิด P-V curve 1 ในภาพที่ 3.4 MPPT จะควบคุมให้เกิดการกระเพื่อมอยู่รอบๆจุด MPP จากจุด B ไป A ไป C ไป A สลับไปเรื่อยๆ เมื่อสมมติให้ความเข้มแสงเพิ่มขึ้น และ P-V curve ของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์เลื่อนขึ้นไป curve 2 ถ้าในระหว่างที่เกิดการเพิ่มความเข้มแสงและกำลังไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว MPPT กำลังรบกวนจุดทำงานจากจุด A ไปจุด B MPPT จะปรับจากจุด A ไปจุด D ดังในภาพที่ 3.4 ผลคือทำให้ ΔP มีค่าเป็นบวก และทำให้ MPPT รบกวนไปในทิศทางเดิม เข้าสู่จุด F ถ้าความเข้มแสงยังคงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว P-V curve จะขยับเข้าสู่จุด G บน ส่วนโค้ง 3 แทนจุด F และ MPPT ยังคงเห็น ΔP เป็นบวกอยู่ MPPT ก็จะรบกวนจุดทำงานจนไปตกอยู่ที่จุด I จากจุด A ไปจุด D ไปจุด G และจุด I MPPT จะเลื่อนห่างจากจุด MPP ไปเรื่อยๆ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของวิธี P&O ลดลง



ภาพที่ 3.3 ส่วนโค้งระหว่างกำลังไฟฟ้าของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์กับแรงดันและจุดทำงานสูงสุด

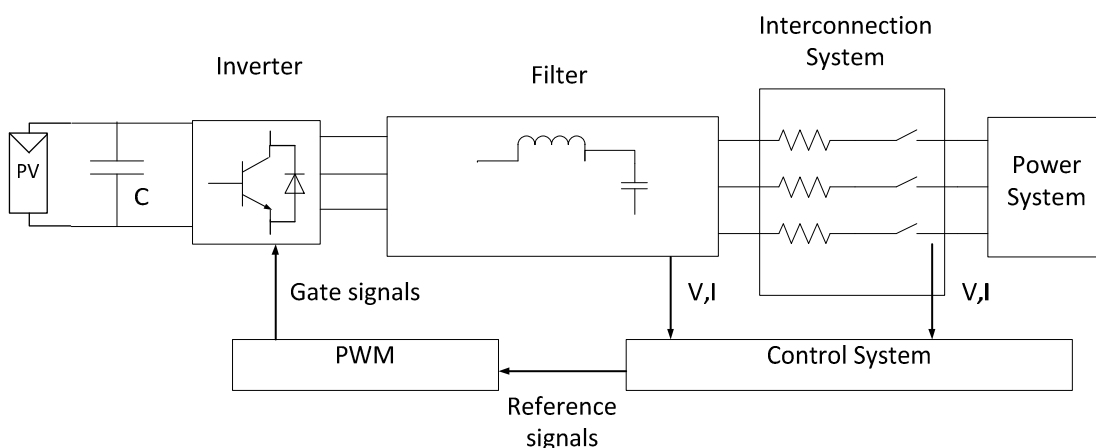


ภาพที่ 3.4 การหาจุดทำงานสูงสุดโดยวิธี P&O

(ที่มา: D. P. Hohm and M. E. Ropp, “Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms”)

3.2 การควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์

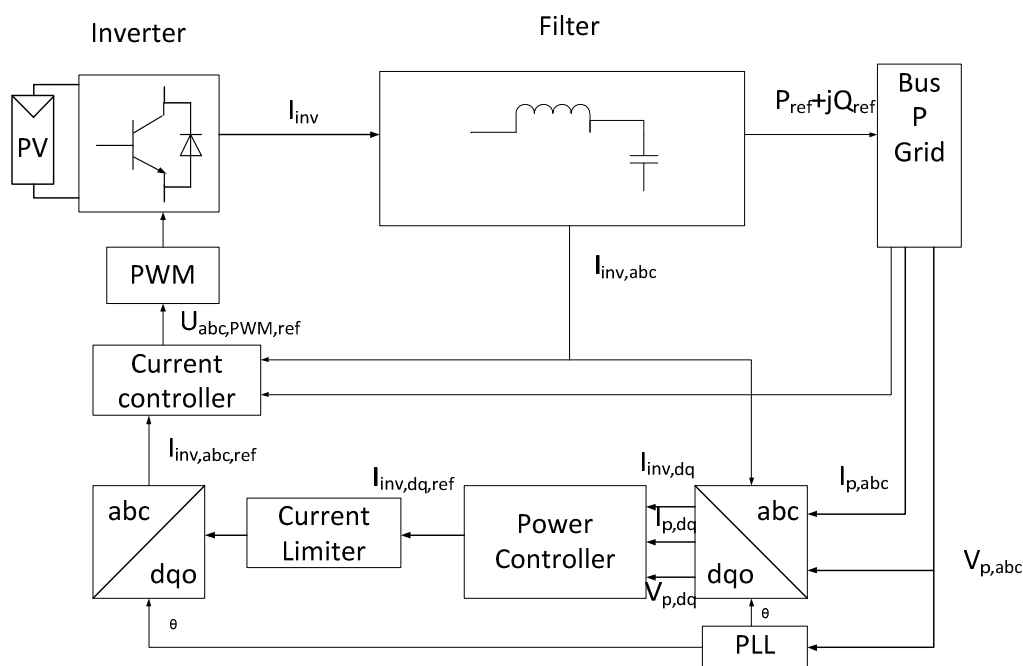
สำหรับระบบต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าจะต้องมีการควบคุมกำลังไฟฟ้า ทั้งกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าวีแอกทีฟ ซึ่งการที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้นจะต้องใช้การควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าโดยใช้อินเวอร์เตอร์โดยทั่วไปจะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.5 [8], [22]



ภาพที่ 3.5 ระบบผลิตไฟฟ้าโดยใช้อินเวอร์เตอร์

สำหรับระบบที่พิจารณาจะคิดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตเข้าระบบจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งจะผลิตค่าแรงดันกระแสตรงเท่านั้น ตัวเก็บประจุ C ที่มีไว้ก่อนที่จะเข้าอินเวอร์เตอร์

นั้น เพื่อให้คงค่าแรงดันกระแสตรงสำหรับฝั่งกระแสตรงได้ สำหรับฟิลเตอร์จะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กรององค์ประกอบของความถี่ที่ไม่ต้องการออกไป อินเวอร์เตอร์จะแปลงค่าแรงดันกระแสตรงนี้ให้เป็นแรงดันกระแสสลับที่เหมาะสมทั้งขนาดและความถี่ต่อระบบ โดยที่อินเวอร์เตอร์จะถูกควบคุมโดยสัญญาณจาก Pulse-width Modulation (PWM) โดยที่สัญญาณอ้างอิงจะถูกควบคุมโดยกระแสและแรงดันจากจุดเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า (PCC) และที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ ซึ่งระบบควบคุมจะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 ระบบควบคุมของอินเวอร์เตอร์

สำหรับการควบคุมของอินเวอร์เตอร์จะพิจารณาที่แกนอ้างอิง dqo เป็นหลัก [22] ซึ่งเมื่อพิจารณาที่วงจรสามเฟสสมดุลแล้ว แกนที่ออกมาจะเหลือเพียงสองแกนคือแกน d และ แกน q ซึ่งนำไปใช้ในการคำนวณการควบคุมสำหรับอินเวอร์เตอร์แบบสามเฟส ซึ่งการแปลงจากแกนอ้างอิง abc เป็น แกนอ้างอิง dqo สามารถทำได้โดยใช้ Clarke Transformation ดังสมการที่ (3.1)

$$I_{dqo} = T I_{abc} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

สำหรับการควบคุมจะกำหนดให้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าโครงข่ายไฟฟ้า (บัส P) เป็นกำลังไฟฟ้าอ้างอิง (P_{ref} , Q_{ref}) จากนั้นแปลงค่ากระแสขาออก ($I_{inv,abc}$, $I_{p,abc}$) และแรงดันที่บัส P ($V_{p,abc}$) ให้อยู่ในแกน dqo เพื่อที่จะสร้างกระแสอินเวอร์เตอร์อ้างอิง ($I_{inv,dq,ref}$) จากอุปกรณ์ควบคุมกำลัง (Power controller) ซึ่งกระแสนี้จะถูกแปลงกลับให้อยู่ในแกน abc เช่นเดิม จากนั้น จะสั่งการใช้ค่าความถี่จากโครงข่ายโดย Phase-Locked Loop (PLL) เพื่อให้ความถี่จากอินเวอร์เตอร์เข้ากับโครงข่ายไฟฟ้า เมื่อใช้ $I_{inv,dq,ref}$, $I_{inv,abc}$ และ $V_{p,abc}$ เข้าสู่ Current controller จะผลิตแรงดันเข้าสู่ PWM ซึ่งควบคุมสัญญาณ Switching ของอินเวอร์เตอร์เพื่อสร้างกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ

3.3 การทำงานของอินเวอร์เตอร์

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการทำงานในระบบต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งได้แก่

3.3.1 การเริ่มและหยุดทำงานของอินเวอร์เตอร์

การเริ่มทำงานของอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ จะเริ่มจากการรับค่าแรงดันและกำลังไฟฟ้าจากอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ หรือฝั่งไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ว่ามีแรงดันและกำลังไฟฟ้าเพียงพอต่อการทำงานของอินเวอร์เตอร์หรือไม่ [23] – [25] จากนั้นอินเวอร์เตอร์จะพิจารณาในส่วนของฝั่งโครงข่ายไฟฟ้า หรือฝั่งไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ว่ามีแรงดันและความถี่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมหรือไม่ ซึ่งในช่วงนี้คือช่วง “Grid monitoring” ของอินเวอร์เตอร์ [26] เมื่อพบว่าทั้งฝั่ง DC และฝั่ง AC มีคุณสมบัติตามค่าที่กำหนดแล้วอินเวอร์เตอร์จึงเริ่มทำงานในสภาวะปกติ

สำหรับการหยุดทำงานของอินเวอร์เตอร์นั้น จะพิจารณาฝั่ง DC และ AC เช่นเดียวกับการเริ่มทำงาน ถ้ามีส่วนใดมีคุณสมบัติไม่ตรง (เช่นเมื่อไม่มีแสงทำให้ไม่เกิดการผลิตกำลังไฟฟ้าที่ฝั่ง DC หรือ เกิดความผิดปกติที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า) อินเวอร์เตอร์จะทำการหน่วงเวลาเพื่อคุณภาพของระบบ และเมื่อเกินเวลาอินเวอร์เตอร์จะหยุดทำงาน และตัดระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ออกจากโครงข่ายไฟฟ้า [37]

3.3.2 ระบบการทำงานของอินเวอร์เตอร์

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงระบบการทำงานพื้นฐานต่างๆ ที่อินเวอร์เตอร์จะสามารถทำงานได้ สำหรับอินเวอร์เตอร์ขนาดเล็กซึ่งใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็ก จะมีเพียงฟังก์ชันการหาจุดทำงานสูงสุด และการตัดตัวเองออกเมื่อเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าเท่านั้น

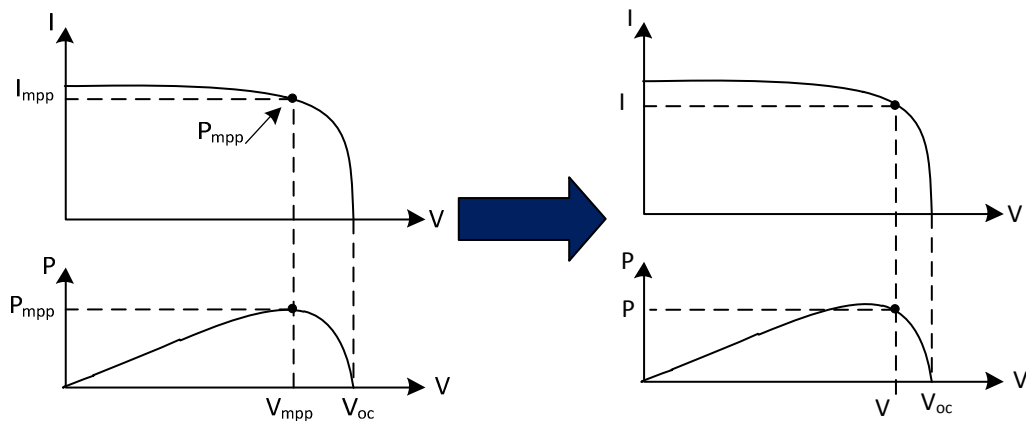
[18], [27] ในขณะที่อินเวอร์เตอร์สำหรับระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่จะต้องมีฟังก์ชันอื่นๆ เพิ่มเข้ามาเพื่อรองรับระบบไฟฟ้าได้ ซึ่งจากการศึกษาข้อมูลจากผู้ผลิตรายใหญ่ด้านอินเวอร์เตอร์ 3 รายคือ SMA, ABB, และ SIEMENS [28] – [30] จะสามารถสรุประบบการทำงานหลักๆ ของอินเวอร์เตอร์ได้ดังนี้

3.3.2.1 การจำกัดค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ออกจากอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์สามารถจำกัดค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ออกมา โดยสามารถปรับเป็นสัดส่วนของกำลังไฟฟ้าปกติที่จ่ายออก หรือปรับค่าเป็นกิโลวัตต์ นอกจากนี้เมื่อค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากกว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่อินเวอร์เตอร์สามารถรับและจ่ายได้ อินเวอร์เตอร์จะทำการปรับค่าแรงดันที่ผลิตจากอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้น เพื่อให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตลดลงอยู่ในระดับที่อินเวอร์เตอร์สามารถรับได้ [21] ดังแสดงได้ตามภาพที่ 3.7 และได้ผลตั้งสมการที่ (3.2) และ (3.3)

$$V_{new} > V_{mpp} \quad (3.2)$$

$$P_{new} < P_{mpp} \quad (3.3)$$



ภาพที่ 3.7 การปรับจุดทำงานของอินเวอร์เตอร์

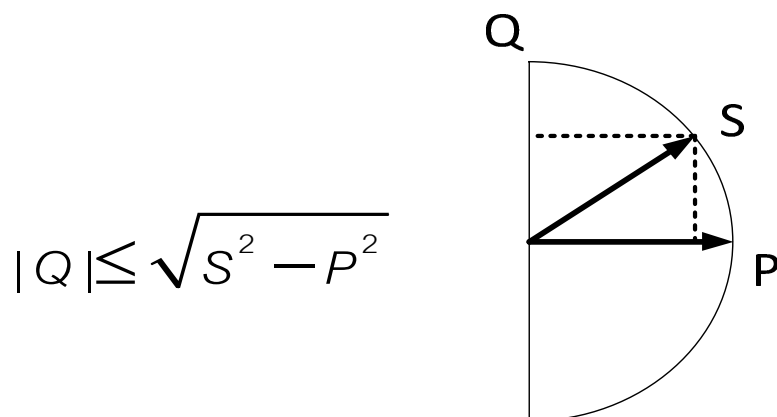
3.3.2.2 การปรับค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟที่ออกจากอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในส่วนการต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าจะต้องมีฟังก์ชันที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟให้แก่ระบบได้ เพื่อที่จะรองรับตามข้อกำหนดการใช้บริการระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยการจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟจะสามารถเลือกจ่ายได้ตามการตั้งค่าดังนี้

1. ปรับตามเปอร์เซ็นต์ของกำลังไฟฟ้าจริง (% ของ P) การปรับแบบนี้อินเวอร์เตอร์จะจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟตามสัดส่วนของกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้

2. ปรับตามค่าตัวประกอบกำลัง (Power factor หรือ $\cos\theta$) การปรับแบบนี้ อินเวอร์เตอร์จะปรับค่าตามตัวประกอบกำลัง โดยปกติจะปรับให้ตามข้อกำหนดของการไฟฟ้า
3. ปรับค่ากำลังไฟรีแอกทีฟ (Q) การปรับแบบนี้จะสามารถกำหนดค่ากำลังไฟรีแอกทีฟได้เลย
4. ปรับค่าแรงดันที่กำหนด (V) การปรับแบบนี้อินเวอร์เตอร์จะทำการจ่ายกำลังไฟรีแอกทีฟเพื่อให้แรงดันเป็นไปตามที่กำหนด

สำหรับการปรับค่ากำลังไฟรีแอกทีฟนี้จะสามารถกำหนดให้เป็นค่าตายตัวตลอดวัน หรือตามช่วงเวลาได้ตามแต่ระบบการใช้งาน โดยที่ค่ากำลังไฟรีแอกทีฟที่ผลิตได้จะต้องไม่เกินค่าจำกัดของกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 การจำกัดกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์

3.3.2.3 การจำกัดกำลังไฟฟ้าจริงเพื่อรักษาสภาพความถี่ของระบบไฟฟ้า

เมื่อการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบไฟฟ้าทำให้ความถี่ของระบบเพิ่มขึ้น อินเวอร์เตอร์จะมีการจำกัดกำลังไฟฟ้าจริงเพื่อรักษาสภาพความถี่ของระบบไฟฟ้า โดยการจำกัดกำลังไฟฟ้าจะเป็นไปโดยอัตโนมัติ

3.3.2.4 ระบบ Grid support

เป็นระบบที่อินเวอร์เตอร์จะยังไม่ตัดตัวเองออกทันทีเมื่อเกิดภาวะแรงดันตกชั่วขณะ โดยอินเวอร์เตอร์จะจ่ายกำลังไฟรีแอกทีฟเข้าสู่ระบบเพื่อรักษาแรงดันให้แก่ระบบ และหน่วงเวลาเพื่อคุณภาพของระบบไฟฟ้าในขณะนั้น ถ้าระบบไฟฟ้ายังไม่กลับคืนมาในช่วงที่กำหนด จะทำการตัวระบบตัวเองออกจากโครงข่ายไฟฟ้า

3.4 ข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์

ข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์ คือ รายละเอียดของอินเวอร์เตอร์ที่หาได้จากเอกสารข้อมูลของผู้ผลิตอินเวอร์เตอร์ ซึ่งส่วนประกอบหลักที่จะนำมาพิจารณาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนไฟฟ้ากระแสตรงขาเข้า (Input (DC)) และไฟฟ้ากระแสสลับขาออก (Output (DC)) โดยจะสามารถแสดงตัวอย่างโดยใช้เอกสารข้อมูลอินเวอร์เตอร์ของบริษัท SMA จำกัด รุ่น Sunny Central 1000MV [31] และรุ่น 2100TL (Sunny Boy 2100TL) [39] ดังตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลอินเวอร์เตอร์รุ่น Sunny Central 1000MV ของบริษัท SMA จำกัด

Sunny Central 1000MV	
Input (DC)	
กำลังไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุด	1,120 kW
แรงดันขาเข้าสูงสุด	1,000 V
ช่วงแรงดัน MPP	430 V – 820 V
กระแสขาเข้าสูงสุด	2,500 A
แรงดันขาเข้าต่ำสุด	430 V
Output (AC)	
กำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุด	1,000 kVA
ช่วงแรงดันปกติ	18 kV - 22 kV
แรงดันของโครงข่าย / ความถี่ของโครงข่าย	20 kV / 50 Hz
กระแสขาออกสูงสุด	31.8 A
ตัวประกอบกำลังปกติ / ช่วงตัวประกอบกำลังที่ปรับค่าได้	1 / 0.9 leading ... 0.9 lagging

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลอินเวอร์เตอร์รุ่น 2100TL (Sunny Boy 2100TL) ของบริษัท SMA จำกัด

Sunny Boy 2100TL	
Input (DC)	
กำลังไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุด	2200 W
แรงดันขาเข้าสูงสุด	600 V
ช่วงแรงดัน MPP	125 V – 600 V
กระแสขาเข้าสูงสุด	11 A
แรงดันขาเข้าต่ำสุด	125 V
Output (AC)	
กำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุด	2100 W
ช่วงแรงดันปกติ	220 V - 240 kV
ความถี่ปกติ	50 Hz
ตัวประกอบกำลัง	1

อินเวอร์เตอร์รุ่น Sunny Central 1000MV นี้เป็นอินเวอร์เตอร์ขนาด 1 MVA ที่ใช้ในการต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า โดยมีแรงดันและความถี่ที่เหมาะสมกับความต้องการของการไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถปรับให้มีการจ่ายค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟได้โดยการปรับค่าตัวประกอบกำลัง ซึ่งอินเวอร์เตอร์รุ่นนี้จะมีการนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต่อไป

ในขณะที่อินเวอร์เตอร์รุ่น 2100TL จะเป็นอินเวอร์เตอร์ขนาดเล็ก ใช้ในระบบที่เล็กมาก ซึ่งจะมีแรงดันขาออกเข้ากับแรงดันปกติที่ใช้งานตามบ้านเรือน และไม่สามารถปรับค่ากำลังไฟฟารีแอกทีฟได้ (ไม่สามารถปรับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้) โดยอินเวอร์เตอร์รุ่นนี้จะนำมาใช้ในแบบจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดจริงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ต่อไป

3.5 สรุป

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเริ่มจากกระบวนการหาจุดทำงานสูงสุดเพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งได้กล่าวถึงกระบวนการหาจุดทำงาน

สูงสุดแบบรบกวนและสังเกต จากนั้นกล่าวถึงกระบวนการควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ รวมถึงกล่าวถึงการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในโหมดหรือสถานการณ์ต่างๆ และท้ายสุดคือการยกตัวอย่างข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์ที่ได้จากเอกสารข้อมูลของผู้ผลิต

บทที่ 4

การพัฒนาแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ในบทนี้จะอธิบายถึงการพัฒนาแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อที่จะให้แบบจำลองมีความแม่นยำใกล้เคียงกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ของจริงมากที่สุด โดยในบทนี้จะแบ่งการนำเสนอออกเป็น 8 หัวข้อ ได้แก่

- 4.1 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- 4.2 หลักในการหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นในแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- 4.3 ผลของสภาพแวดล้อมต่อพารามิเตอร์ของแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- 4.4 การปรับค่าพารามิเตอร์จากโมเดลเป็นอาร์เรย์
- 4.5 การทำงานของอินเวอร์เตอร์
- 4.6 ขั้นตอนการหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นในแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- 4.7 ขั้นตอนการคำนวณแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- 4.8 สรุป

4.1 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ในอดีตที่ผ่านมา ได้มีการวิจัยแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งไดโอด (Single diode model) หลายงานวิจัย โดยภายในงานวิจัยนี้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะใช้แบบจำลองโมเดลเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอดแต่เพียงอย่างเดียว ซึ่งแต่ละนักวิจัยนั้นก็จะมีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยของที่แตกต่างกันไป ดังตัวอย่างเช่น งานวิจัย [32] และ [33] จะเป็นงานวิจัยที่จะใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบการประมาณ หรือภายในแบบจำลองจะพิจารณาเพียงแค่ความต้านทานที่เชื่อมต่อบนขานเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้จะศึกษาแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่รวมทั้งความต้านทานที่เชื่อมต่อบนขานและขานรวมกัน ซึ่งจะส่งผลให้มีความละเอียดและเสมือนจริงมากกว่าแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบการประมาณ นอกจากนี้บางงานวิจัยอาจจะไม่ได้พิจารณาเป็นรูปแบบของหนึ่งไดโอดแต่อาจจะมีการพิจารณาเป็นรูปแบบของสองไดโอด [5], [34] ซึ่งหลักการคำนวณก็จะมีลักษณะที่แตกต่างจากหนึ่งไดโอด แต่จะมีวิธีการคิดที่ซับซ้อนกว่าค่อนข้างมาก จึงไม่นำมาพิจารณา ต่อมาได้มีงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของโมเดลเซลล์แสงอาทิตย์ และปัจจัยต่างๆทางสิ่งแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อโมเดลของ

เซลล์แสงอาทิตย์ด้วย [32], [35] และส่วนใหญ่งานวิจัยที่เกี่ยวกับปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมซึ่งจะประกอบไปด้วยความเข้มแสง และอุณหภูมินั้น จะทำการศึกษาจากการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เรียกว่า MATLAB[®]/Simulink[®] โดยจะมุ่งเน้นการใช้ Simulink ซึ่งจะเป็นส่วนหนึ่งในเครื่องมือของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังกล่าว [3] อย่างไรก็ตามภายในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผ่านการใช้ MATLAB ซึ่งจะแตกต่างกับงานวิจัยที่ได้กล่าวไป สำหรับงานวิจัยบางส่วนได้มีการทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำข้อมูลในทางปฏิบัติจริง เช่น ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ มาใช้ในการสร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ได้ [16] ซึ่งจะยังมีความผิดพลาดเนื่องมาจากการคำนวณจะใช้การเพิ่มระดับของค่าความต้านทานที่เชื่อมต่อบนอนุกรมจนกระทั่งได้ค่าที่ต้องการ ซึ่งบางครั้งอาจจะยังมีความละเอียดไม่พอ

4.2 หลักในการหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นในแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

จากข้อมูลทางเทคนิคของ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ยกตัวอย่างในหัวข้อที่ 2.3 นั้น พบว่าเมื่อนำไปคำนวณหากระแสและแรงดันที่ผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะยังไม่เพียงพอ จากภาพที่ 2.5 และสมการที่ (2.7) พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการหากระแสและแรงดันที่ผลิตจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ กระแสโฟโตอิเล็กทริก (I_{ph}), กระแสอิ่มตัวของไดโอด (I_0), จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมกันเป็นโมดูล (n_s), จีตความต่างศักย์เริ่มเปลี่ยน (Threshold voltage) (V_t), ความต้านทานอนุกรม (R_s), และความต้านทานขนาน (R_{sh}) ซึ่งจากข้อมูลของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้รับจากผู้ผลิตนั้น จะทราบค่าเพียง 1 พารามิเตอร์ คือ จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมกันเป็นโมดูล (n_s) เท่านั้น พารามิเตอร์ที่เหลือจะต้องทำการหาเพิ่มเติม สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหลือ จะสามารถหาได้ดังต่อไปนี้

เริ่มด้วยรูปวงจрдังภาพที่ 2.5 นำสมการตามกฎของเคอร์ชอฟที่ดังสมการที่ (2.7) เมื่อทำการหาสมการของกระแสลัดวงจร (I_{sc}), กระแสที่ทำงานสูงสุด (I_{mpp}), และกระแสเปิดวงจร (I_{oc}) เนื่องจากพจน์ของเอ็กโพเนนเชียลมีค่ามากกว่าค่า 1 มาก จึงทำการละเลยพจน์ -1 เนื่องจากมีค่าน้อย

มากเมื่อเทียบกับพจน์ $\exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{n_s V_t}\right)$ จะได้สมการที่ (4.1) – (4.3)

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{n_s V_t}\right) \right\} - \frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}} \quad (4.1)$$

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left(\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{n_s V_t} \right) \right\} - \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{R_{sh}} \quad (4.2)$$

$$I_{oc} = 0 = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left(\frac{V_{oc}}{n_s V_t} \right) \right\} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (4.3)$$

ซึ่งการจะหาจุดทำงานสูงสุดได้นั้นจะต้องทำการหาอนุพันธ์ของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันไฟฟ้าต้องเท่ากับศูนย์ที่จุดทำงานสูงสุด ดังแสดงในสมการที่ (4.4)

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{\substack{V=V_{mpp} \\ I=I_{mpp}}} = 0 \quad (4.4)$$

ค่าความชันของกราฟคุณลักษณะ I-V ที่เกิดการลัดวงจรจะได้ดังสมการที่ (4.5)

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{\substack{V=0 \\ I=I_{sc}}} = -\frac{1}{R_{sho}} \quad (4.5)$$

โดยการละเลขพจน์ -1 ในสมการที่ (2.7) จะได้ดังสมการที่ (4.6)

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left(\frac{V + IR_s}{n_s V_t} \right) \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (4.6)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (4.3) จะได้สมการของ I_{ph} ดังสมการที่ (4.7)

$$I_{ph} = I_0 \left\{ \exp \left(\frac{V_{oc}}{n_s V_t} \right) \right\} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (4.7)$$

แทนค่า I_{ph} ในสมการที่ (4.7) ลงในสมการที่ (4.6) จะได้สมการของกระแสที่ออกมาดังสมการที่ (4.8)

$$I = I_0 \left\{ \exp \left(\frac{V_{oc}}{n_s V_t} \right) - \exp \left(\frac{V + IR_s}{n_s V_t} \right) \right\} + \frac{V_{oc} - V - IR_s}{R_{sh}} \quad (4.8)$$

แทนค่า I_{ph} ในสมการที่ (4.7) ลงในสมการที่ (4.1) จะได้สมการของกระแสลัดวงจร (I_{sc}) ดังสมการที่ (4.9)

$$I_{sc} = I_0 \left\{ \exp \left(\frac{V_{oc}}{n_s V_t} \right) - \exp \left(\frac{I_{sc} R_s}{n_s V_t} \right) \right\} + \frac{V_{oc} - I_{sc} R_s}{R_{sh}} \quad (4.9)$$

พจน์ $\exp \left(\frac{I_{sc} R_s}{n_s V_t} \right)$ ในสมการที่ (4.9) มีความสำคัญน้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนแรก จึงทำ

การละเลยและได้สมการของ I_{sc} ดังสมการที่ (4.10)

$$I_{sc} = I_0 \left\{ \exp \left(\frac{V_{oc}}{n_s V_t} \right) \right\} + \frac{V_{oc} - I_{sc} R_s}{R_{sh}} \quad (4.10)$$

ได้สมการของกระแสอิ่มตัวของไดโอด (I_0) จากการจัดรูปของสมการที่ (4.10) ดังสมการที่ (4.11)

$$I_0 = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc} - I_{sc} R_s}{R_{sh}} \right) \exp \left\{ -\frac{V_{oc}}{n_s V_t} \right\} \quad (4.11)$$

แทนค่า I_{ph} จากสมการที่ (4.7) และ I_0 จากสมการที่ (4.11) ลงในสมการที่ (4.2) จะได้สมการที่ (4.12)

$$I_{mpp} = I_{sc} - \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s - I_{sc} R_s}{R_{sh}} - \left(I_{sc} - \frac{V_{oc} - I_{sc} R_s}{R_{sh}} \right) \exp \left\{ \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s - V_{oc}}{n_s V_t} \right\} \quad (4.12)$$

สำหรับอนุพันธ์ของกำลังไฟฟ้าต่อแรงดันไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.13)

$$\left. \frac{dP}{dV} \right|_{MPP} = \left. \frac{dIV}{dV} \right|_{MPP} = I_{MPP} + V_{MPP} \left(\left. \frac{dI}{dV} \right|_{MPP} \right) = 0 \quad (4.13)$$

สามารถแทนค่าเพื่อหาค่า I_{mpp} ได้ดังสมการที่ (4.14)

$$I_{mpp} = \frac{V_{mpp} B \exp\{D\} + V_{mpp} / R_{sh}}{1 + B R_s \exp\{D\} + R_s / R_{sh}} \quad (4.14)$$

โดยที่

$$B = \frac{(I_{sc} R_{sh} - V_{oc} + I_{sc} R_s)}{n_s V_t R_{sh}}$$

$$D = V_{mpp} + I_{mpp} R_s - \frac{V_{oc}}{n_s V_t}$$

หาค่าอนุพันธ์ของกระแสที่ออกจากโมดูลดังสมการที่ (4.8) กับแรงดันที่ออกจากโมดูลภายใต้สถานะลัดวงจร และใช้สมการของ I_0 ในสมการที่ (4.11) แทนค่าลงในสมการที่ (4.5) และให้ค่า $R_{sh} = R_{sh0}$ จะได้

$$\frac{1}{R_{sh}} = \frac{B \exp\{E\} + 1/R_{sh}}{1 + B R_s \exp\{E\} + R_s / R_{sh}} \quad (4.15)$$

โดยที่

$$E = \frac{(I_{sc} R_s - V_{oc})}{n_s V_t}$$

จากสมการที่ (4.7), (4.11), (4.12), (4.14), และ (4.15) จะทำให้ได้ 5 สมการสำหรับ 5 ตัวแปรที่ต้องการทราบค่า โดยพบว่าสมการที่ (4.12), (4.14), และ (4.15) นั้นไม่สามารถแก้สมการออกมาโดยปกติได้ จึงต้องใช้วิธีการเชิงตัวเลข (Numerical method) ในการแก้สมการเพื่อหาค่าตัวแปรนั้น แต่ในส่วนของสมการที่ (4.7) และ (4.11) ที่ทำให้ได้ตัวแปร I_{ph} และ I_0 นั้นพบว่าไม่จำเป็นต้องทำการใช้วิธีการเชิงตัวเลข เพียงแทนค่าตัวแปรที่ได้จากสมการที่เหลือก็เพียงพอ ในส่วนสมการที่ (4.12), (4.14), และ (4.15) เป็นสมการที่ใช้สำหรับหาตัวแปร V_t , R_s , และ R_{sh} นั้นจะใช้วิธีการ Gauss-Seidel ในการหาค่าพารามิเตอร์ โดยวิธีการ Gauss-Seidel นั้นจะสามารถแก้ได้โดยการจัดรูปแบบสมการให้ได้ตามสมการที่ (4.16)

$$x_{k+1} = f(x_k) \quad (4.16)$$

โดยที่

- x_k คือ ค่าตัวแปร x ก่อนหน้าที่จะปรับค่าตามสมการ $f(x_k)$
- x_{k+1} คือ ค่าตัวแปร x หลังจากมีการปรับค่าตามสมการ $f(x_k)$
- $f(x_k)$ คือ สมการที่ใช้ปรับค่าตัวแปร x เพื่อให้เข้าสู่ค่าที่ถูกต้อง

โดยการทำงานของวิธีการ Gauss-Seidel นั้นคือการแทนค่าใหม่ไปเรื่อยๆจนกว่าค่าความผิดพลาด (Error: $x_{k+1} - x_k$) จะมีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้หรือใกล้เคียงศูนย์นั่นเอง

จากนั้นทำการจัดรูปสมการที่ (4.12), (4.14), และ (4.15) เพื่อให้สามารถหาค่าตัวแปร V_t , R_s , และ R_{sh} โดยวิธีการ Gauss-Seidel โดยได้สมการใหม่ ดังสมการที่ (4.17) - (4.19)

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

โดยที่

$$J = n_s \ln \left\{ \frac{[I_{sc} - I_{mpp}][R_s + R_{sh}] - V_{mpp}}{I_{sc} [R_s + R_{sh}] - V_{oc}} \right\}$$

$$R_s = \frac{V_{oc} - V_{mpp} + n_s V_t \ln(M)}{I_{mpp}} \quad (4.18)$$

โดยที่

$$M = \frac{n_s V_t (I_{mpp} R_s + I_{mpp} R_{sh} - V_{mpp})}{I_{sc} R_s V_{mpp} + I_{sc} R_{sh} V_{mpp} + I_{mpp} V_{oc} R_s - I_{mpp} I_{sc} R_s^2 - I_{mpp} I_{sc} R_{sh} R_s - V_{oc} V_{mpp}}$$

$$R_{sh} = \frac{n_s V_t R_s + n_s V_t R_{sh} + N}{n_s V_t + N} \quad (4.19)$$

โดยที่

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

จากสมการที่ (4.7), (4.11), (4.17) – (4.19) จะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่จำเป็นในการหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้

4.3 ผลของสภาพแวดล้อมต่อพารามิเตอร์ของแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับผลของสภาพแวดล้อมต่อพารามิเตอร์ของแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้น สามารถหาผลกระทบที่เกิดขึ้นได้ตามหัวข้อ 2.2.3 โดยสภาพแวดล้อมหลักที่มีผลต่อพารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์นั้น ได้แก่ อุณหภูมิ และความเข้มแสง

1) อุณหภูมิ

ตามที่อธิบายในหัวข้อที่ 2.2.3.1 อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีผลต่อกระแสลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจร ตามค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันต่ออุณหภูมิ ดังสมการที่ (2.8) และ (2.9)

2) ความเข้มแสง

ตามที่อธิบายในหัวข้อ 2.2.3.2 ความเข้มแสงจะมีผลโดยตรงต่อกระแสที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะแปรผันตรงกับความเข้มแสงในขณะนั้น ตามสมการที่ (2.10) และ (2.11)

4.4 การปรับค่าพารามิเตอร์จากโมดูลเป็นอาร์เรย์

จากหัวข้อที่ 2.2.1 การจะให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ในปริมาณที่เพียงพอต่อระบบไฟฟ้าจะต้องประกอบ โมดูลเป็นอาร์เรย์เสียก่อน ดังนั้นเมื่อได้ค่าพารามิเตอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลแล้วจะต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆของโมดูลตามที่คำนวณได้จากหัวข้อ 4.2 และ 4.3 มาปรับเป็นพารามิเตอร์จากอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์

เพื่อให้สามารถคำนวณแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ได้ โดยการปรับค่าพารามิเตอร์จากโมดูลเป็นอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 [3]

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเชื่อมต่อโมดูลเป็นอาร์เรย์

Datasheet Parameter		Estimated Parameter	
Module	Array	Module	Array
I_{sc}	$I_{sc} \times N_{sh}$	I_{ph}	$I_{ph} \times N_{sh}$
V_{oc}	$V_{oc} \times N_s$	I_0	$I_0 \times N_{sh}$
V_{mpp}	$V_{mpp} \times N_s$	R_s	$R_s \times N_s / N_{sh}$
I_{mpp}	$I_{mpp} \times N_{sh}$	R_{sh}	$R_{sh} \times N_s / N_{sh}$
n_s	$n_s \times N_s$		

จากตารางที่ 4.1 พบว่าการประกอบโมดูลแบบอนุกรมจะทำให้แรงดันที่ผลิตได้จากอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎแรงดันไฟฟ้า ในขณะที่การประกอบโมดูลแบบขนานจะทำให้กระแสที่ผลิตได้จากอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น ตามกฎกระแสไฟฟ้าเช่นกัน

4.5 การทำงานของอินเวอร์เตอร์

การทำงานของอินเวอร์เตอร์ จะทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถหาจุดทำงานสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ตามที่อธิบายในหัวข้อที่ 3.1 สำหรับส่วนที่จะนำมาพิจารณาในแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ คือ ช่วงการเริ่มและหยุดการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งในขณะที่ไม่มีความเข้มแสง หรือก็คือช่วงกลางคืน หรือยามฝนตก อินเวอร์เตอร์จะไม่ทำงานและจะไม่มีการผลิตกำลังไฟฟ้าเกิดขึ้น นอกจากนี้จะมีช่วงที่อินเวอร์เตอร์ไม่สามารถหาจุดทำงานสูงสุดได้แม้จะเริ่มมีแสงอาทิตย์แล้ว เนื่องจากแรงดันหรือกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ ไม่เพียงพอต่อการเริ่มการทำงานในโหมด MPP ซึ่งในช่วงนี้อินเวอร์เตอร์จะทำงานในโหมด “รอ” (Waiting) โดยในโหมดนี้จะไม่มีการหาจุดทำงานสูงสุด หรือก็คือรอจนกระทั่งเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอที่จะทำงานที่โหมด MPP ได้ ในโหมดนี้ค่ากระแสจะน้อยกว่าจากการที่มีความเข้มแสงน้อยตามสมการที่ (2.10) และ (2.11) ในส่วนนี้จะพิจารณาที่การทำงานที่ค่าแรงดัน Set-point เนื่องจากเมื่ออินเวอร์เตอร์

ทำงานในโหมด Waiting ค่าแรงดัน Set-point จะปรับค่าแรงดัน ไปยังจุดสูงสุดของอินเวอร์เตอร์ตามสมการที่ (4.20)

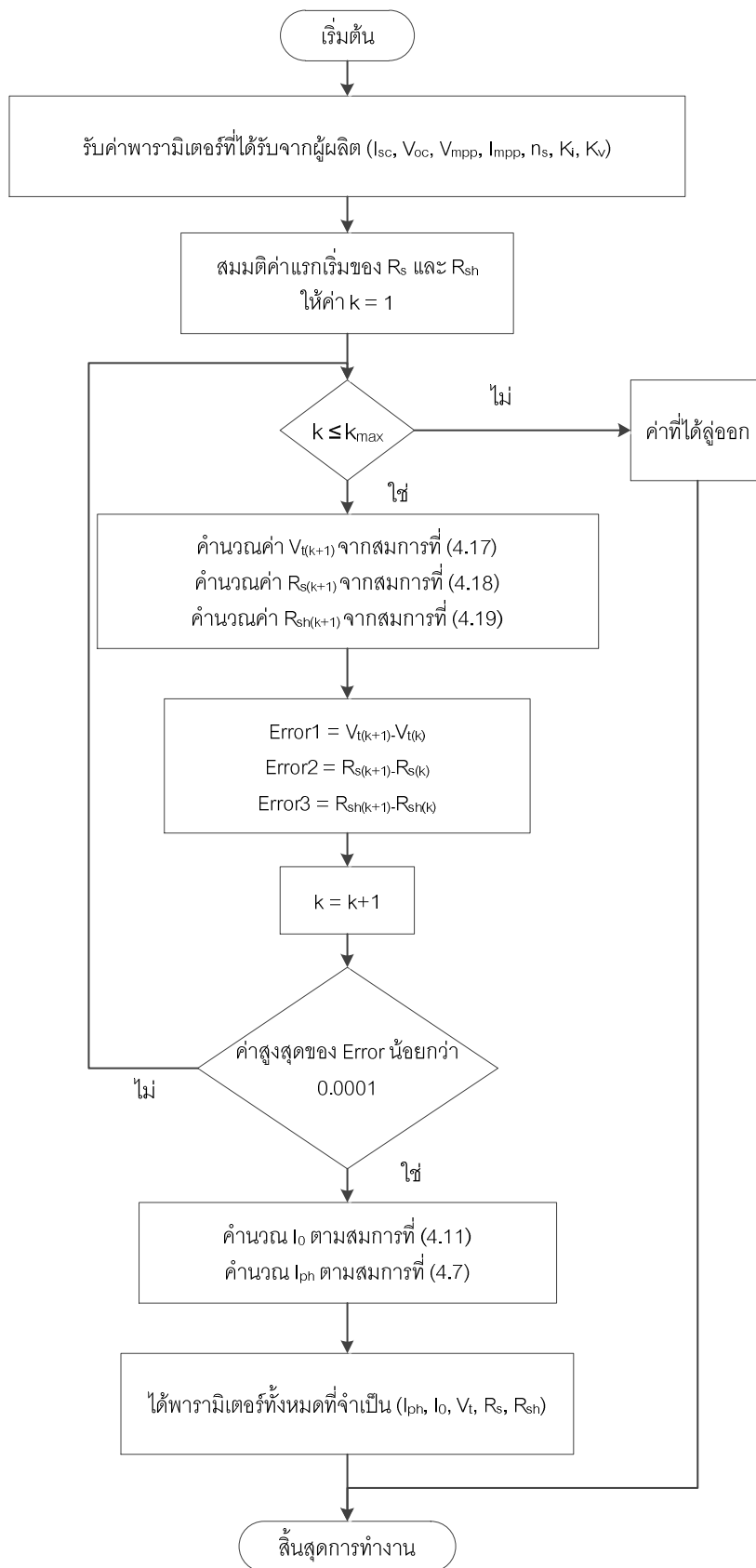
$$V = V_{max} \quad (4.20)$$

โดยที่

V_{max} คือ ค่าแรงดันขีดจำกัดของอินเวอร์เตอร์ (V)

4.6 ขั้นตอนการหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นในแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการคำนวณพารามิเตอร์ที่จำเป็นในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจากหัวข้อที่ 4.2 พบว่าสมการที่จำเป็นในการหาค่าพารามิเตอร์จะไม่ใช้สมการเส้นตรง จึงต้องมีการใช้วิธีการเชิงตัวเลขมาช่วยในการหาค่าของพารามิเตอร์ ซึ่งขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ นั้น สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.1

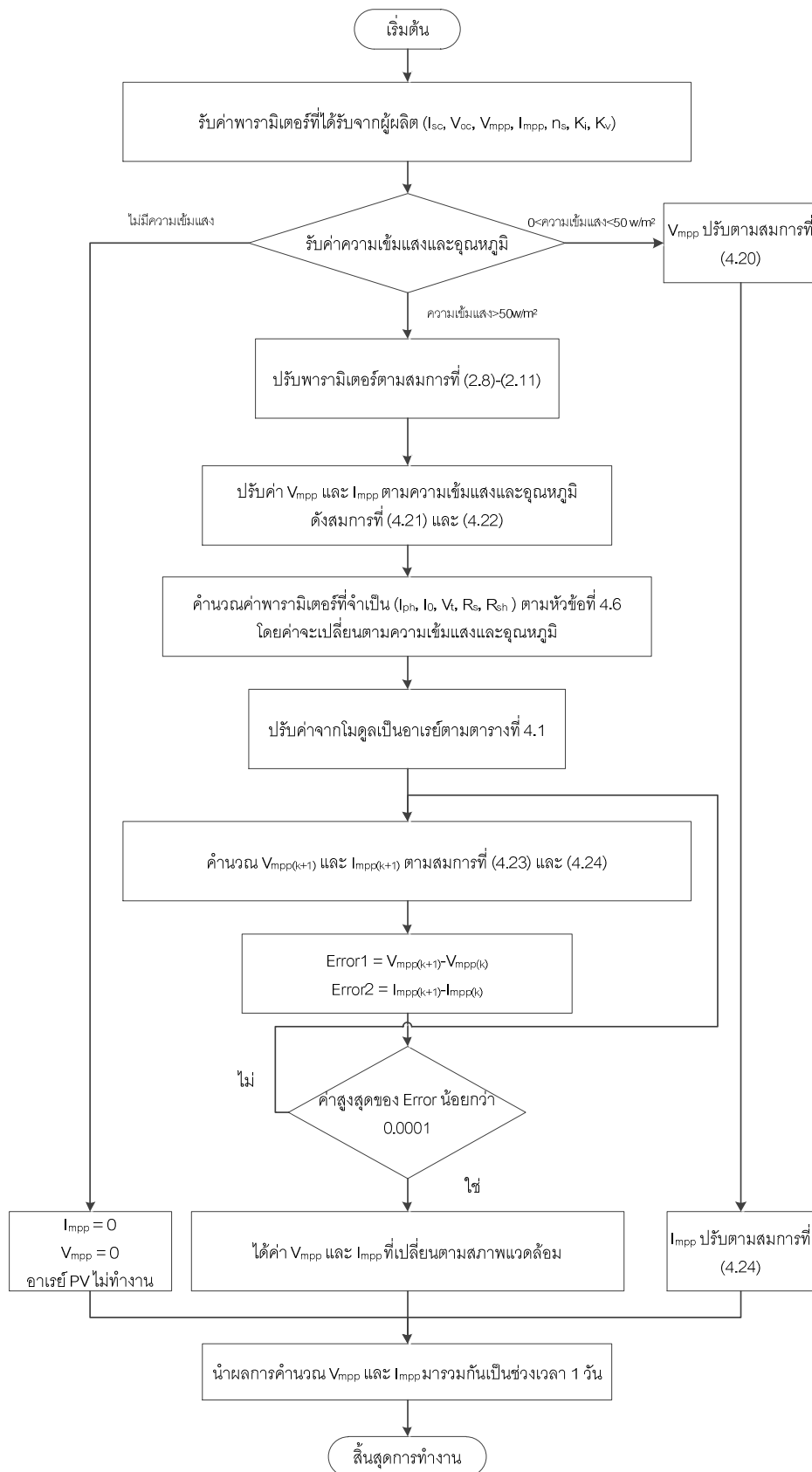


ภาพที่ 4.1 ขั้นตอนการหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

- ขั้นตอนที่ 1: รับข้อมูลพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลจากข้อมูลของผู้ผลิต ซึ่งได้แก่ $I_{sc}, V_{oc}, V_{mpp}, I_{mpp}, n_s, K_p$, และ K_v
- ขั้นตอนที่ 2: สมมติค่าแรกเริ่มของ R_s และ R_{sh} โดย R_s จะตั้งไว้ที่ 0Ω และ R_{sh} จะตั้งไว้ที่ $1,000 \Omega$ เนื่องจากตามค่าที่สำรวจมาค่าที่ได้จะใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้นนี้ และตั้งค่าคงที่ k เพื่อใช้เป็นค่าจำกัดจำนวนการวนรอบ โดยให้ $k=1$
- ขั้นตอนที่ 3: คำนวณค่าพารามิเตอร์ในรอบถัดไปโดยที่จะได้ V_t จากสมการที่ (4.17), R_s จากสมการที่ (4.18), และ R_{sh} จากสมการที่ (4.19)
- ขั้นตอนที่ 4: หาค่า Error จากแต่ละรอบ โดยการนำค่าพารามิเตอร์ที่หามาได้เทียบกับรอบก่อนหน้า จนกระทั่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้มีความแม่นยำ
- ขั้นตอนที่ 5: เมื่อได้ค่า V_t, R_s , และ R_{sh} ที่แม่นยำแล้วนำมาคำนวณหา I_0 ตามสมการที่ (4.11) และ I_{ph} ตามสมการที่ (4.7) ตามลำดับ
- ขั้นตอนที่ 6: เสร็จสิ้นการคำนวณ ได้ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่จำเป็น ($I_{ph}, I_0, V_t, R_s, R_{sh}$)

4.7 ขั้นตอนการคำนวณแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการคำนวณแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะนำขั้นตอนการหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นในแบบจำลองจากหัวข้อที่ 4.6, ผลของสภาพแวดล้อมที่มีต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในหัวข้อที่ 4.3, การปรับค่าพารามิเตอร์จากโมดูลเป็นอาร์เรย์ในหัวข้อที่ 4.4, และการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในหัวข้อที่ 4.5 มาพิจารณาในการคำนวณแบบจำลองของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดวัน ซึ่งขั้นตอนการหาแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ขั้นตอนการคำนวณแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

- ขั้นตอนที่ 1: รับข้อมูลพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่ง โมดูลจากข้อมูลของผู้ผลิต ซึ่งได้แก่ I_{sc} , V_{oc} , V_{mpp} , I_{mpp} , n_s , K_p , และ K_v
- ขั้นตอนที่ 2: รับข้อมูลความเข้มแสงและอุณหภูมิ
- ขั้นตอนที่ 3: พิจารณาแบ่งการทำงานของแบบจำลองออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) ช่วงที่ไม่มี ความเข้มแสง 2) ช่วงที่มีความเข้มแสงแต่มีค่าน้อยกว่า 50 W/m^2 3) ช่วงที่มีความเข้มแสงมากกว่า 50 W/m^2
- ขั้นตอนที่ 4: ถ้าความเข้มแสง = 0 หรือไม่มี ความเข้มแสงเลย ซึ่งก็คือช่วงกลางคืนหรือเกิดฝนตกขึ้น ในช่วงนี้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ จะได้ $V_{mpp} = 0$ และ $I_{mpp} = 0$
- ขั้นตอนที่ 5: ในช่วงที่ความเข้มแสงอยู่ในช่วง $0-50 \text{ W/m}^2$ ช่วงนี้คือช่วงเช้าหรือเย็นที่ความเข้มแสงต่ำ ในช่วงนี้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะไม่สามารถทำงานในโหมด MPP (Maximum Power Point: หาจุดทำงานสูงสุด) ได้ เนื่องจากแรงดันหรือกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ไม่เพียงพอต่อการเริ่มทำงานของ โหมด MPP ซึ่งช่วงนี้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะทำงานในโหมด Waiting (รอ) ซึ่งจะทำให้ V_{mpp} ปรับค่าแรงดันขึ้นสูงสุดตามสมการที่ (4.20) และ I_{mpp} ปรับค่าตามสมการที่ (4.14)
- ขั้นตอนที่ 6: ช่วงที่ความเข้มแสงมากกว่า 50 W/m^2 ในช่วงนี้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะทำงานในโหมด MPP
- ขั้นตอนที่ 7: ปรับค่าพารามิเตอร์ตามความเข้มแสงและอุณหภูมิ ดังสมการที่ (2.8) – (2.11)
- ขั้นตอนที่ 8: ปรับค่า V_{mpp} และ I_{mpp} เริ่มต้นตามความเข้มแสงและอุณหภูมิ ตามสมการที่ (4.21) และ (4.22)
- $$V_{mpp}(G,T) = V_{oc}(G,T) \frac{V_{mpp}(G_{stc}, T_{stc})}{V_{oc}(G_{stc}, T_{stc})} \quad (4.21)$$
- $$I_{mpp}(G,T) = I_{sc}(G,T) \frac{I_{mpp}(G_{stc}, T_{stc})}{I_{sc}(G_{stc}, T_{stc})} \quad (4.22)$$
- ขั้นตอนที่ 9: คำนวณค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่จำเป็น (I_{ph} , I_0 , V_t , R_s , R_{sh}) ตามวิธีการในหัวข้อที่ 4.6 โดยค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดจะเปลี่ยนตามความเข้มแสงและอุณหภูมิ
- ขั้นตอนที่ 10: ปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากโมดูลเป็นอาร์เรย์ตามตารางที่ 4.1

ขั้นตอนที่ 11: หาค่า V_{mpp} และ I_{mpp} โดยสมการ V_{mpp} มาจากการจัดรูปสมการที่ (4.12) ได้สมการที่ (4.23) และ I_{mpp} มาจากการจัดรูปสมการที่ (4.14) ได้สมการที่ (4.24) โดยวิธีการหาใช้วิธีการเชิงเลข

$$V_{mpp} = V_{oc} - I_{mpp} R_s + n_s V_t U \quad (4.23)$$

โดยที่

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

$$I_{mpp} = \frac{(V_{mpp} Q / (n_s V_t R_{sh})) + (V_{mpp} / R_{sh})}{1 + (QR_s / (n_s V_t R_{sh})) + (R_s / R_{sh})} \quad (4.24)$$

โดยที่

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

ขั้นตอนที่ 12: ได้ค่า V_{mpp} และ I_{mpp} ในโหมด MPP ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ขั้นตอนที่ 13: นำผลการคำนวณจากทั้งสามส่วนมารวมกันจะได้ค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดวัน

4.8 สรุป

ในบทนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะนำวิธีการหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการหากระแสและแรงดันสูงสุดที่ผลิตจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ และพิจารณาผลเมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงและอุณหภูมิ รวมถึงการประกอบโมดูลเป็นอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 5

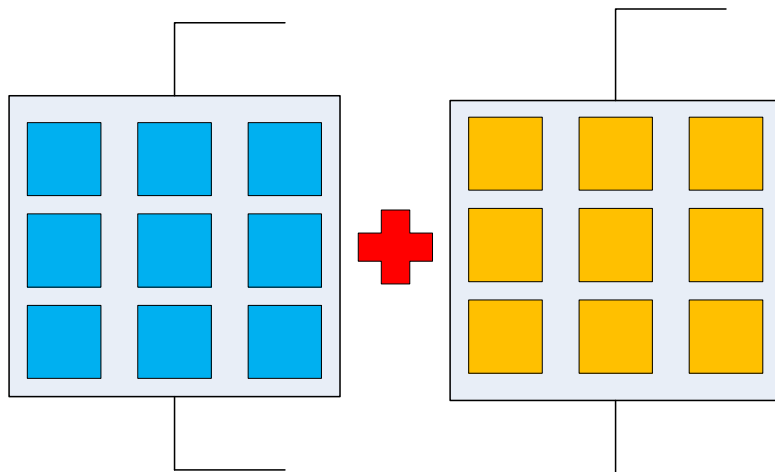
ความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (Mismatch)

ในบทนี้จะอธิบายถึงการคำนวณระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้น ซึ่งเป็นหนึ่งสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง โดยจะแบ่งออกสามหัวข้อคือ

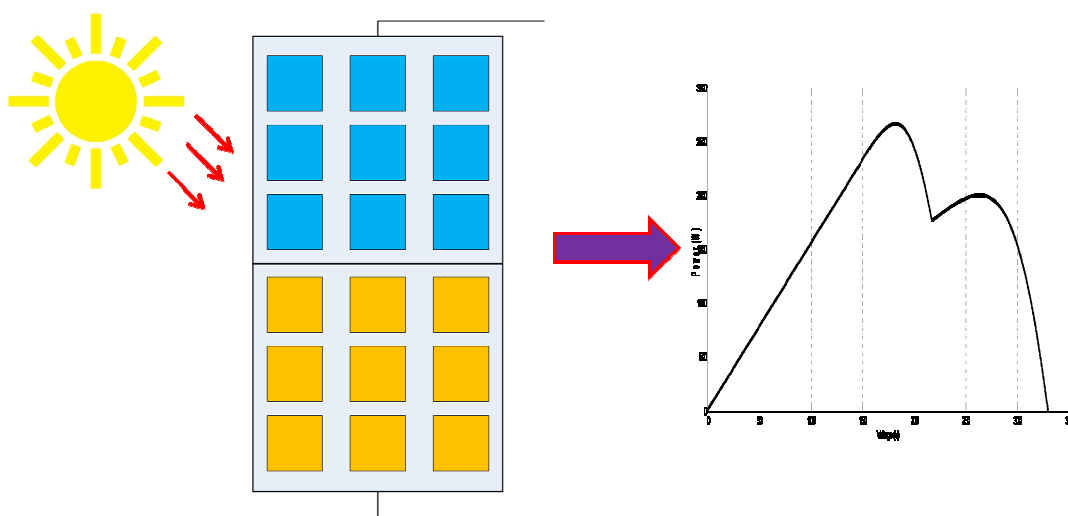
- 5.1 ความหมายของการเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์
- 5.2 หลักในการคำนวณระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์
- 5.3 สรุป

5.1 ความหมายของการเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

การเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ คือ การที่มีอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ 2 รุ่นที่มีการผลิตไฟฟ้าแตกต่างกัน นำมาประกอบเข้าด้วยกันไม่ว่าจะต่ออนุกรมหรือต่อขนาน ซึ่งการประกอบกันนี้อาจเกิดจากการที่มีการสำรองพื้นที่เพื่อขยายอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น โดยการเผื่อขนาดของอินเวอร์เตอร์ให้มีขนาดใหญ่กว่ากำลังผลิตไฟฟ้าของอาร์เรย์เริ่มต้น หรือ เกิดจากการเสื่อมสภาพของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งก่อน ซึ่งการเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ นี้จะทำให้เกิดปัญหาที่มีจุดสูงสุดของกำลังไฟฟ้า (Maximum Power Point: MPP) หลายจุดเกิดขึ้น ทำให้การทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพลดลง ซึ่งปรากฏการณ์ความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถอธิบายได้ตามภาพที่ 5.1 และ ภาพที่ 5.2



ภาพที่ 5.1 อาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่างชนิดกัน



ภาพที่ 5.2 ผลของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดความไม่เข้ากันของ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

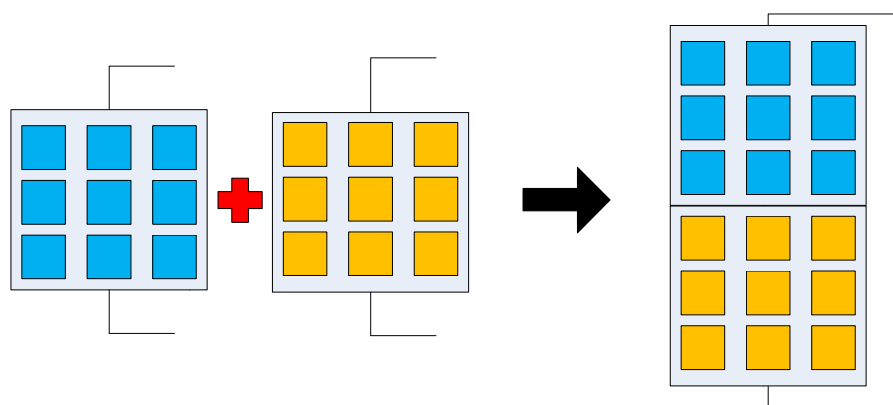
5.2 หลักในการคำนวณระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับการคำนวณระบบไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ นั้น จะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ (1) เมื่ออาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ต่ออนุกรมกัน (2) เมื่ออาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ต่อขนานกัน

5.2.1 การคำนวณความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่ออาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่างรุ่นกันต่ออนุกรมกัน

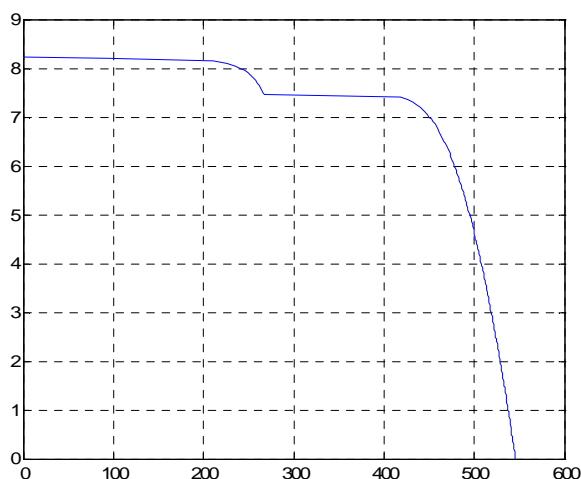
สำหรับการต่ออนุกรมของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่างรุ่นกันจะสามารถแสดงได้ดังภาพที่

5.3

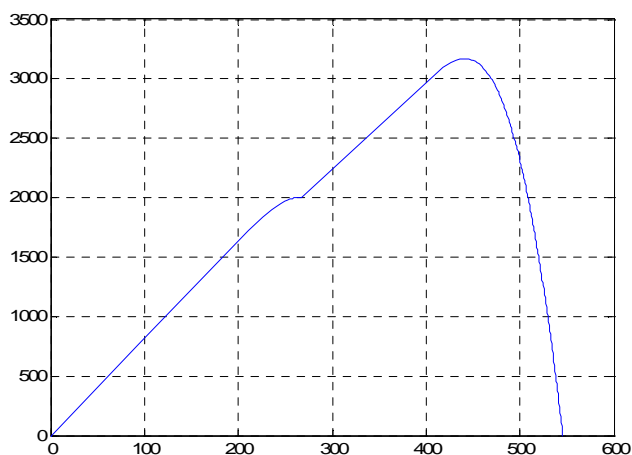


ภาพที่ 5.3 การต่ออนุกรมของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์สองรุ่น

เมื่ออาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ต่ออนุกรมกันจะเป็นการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้มากขึ้น ในขณะที่กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จะมีค่าเท่าเดิม ซึ่งการต่ออนุกรมแล้วเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการเปลี่ยนแปลงของ I-V curve และ P-V curve ซึ่งจากการจำลองการเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ จะได้ดังภาพที่ 5.4 และ ภาพที่ 5.5



ภาพที่ 5.4 I-V curve เมื่อเกิดการความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่ออนุกรม



ภาพที่ 5.5 P-V curve เมื่อเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่ออนุกรม

จากภาพที่ 5.4 I-V curve จะมีลักษณะคล้ายขั้นบันได ซึ่งแสดงถึงจุดทำงานสองจุดที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

จากภาพที่ 5.5 จะพบว่า P-V curve จะมีจุดทำงานสูงสุดอยู่ 2 จุดทำงาน ซึ่งจะเป็นปัญหาในการหาค่าสูงสุดที่แท้จริง (Global Maxima) นั่นเอง

สำหรับการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แท้จริงของการความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์แบบต่ออนุกรม จะสามารถทำได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: หาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ของทุกอาร์เรย์ ตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 4.7

ขั้นตอนที่ 2: เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทุกค่า เพื่อหาอาร์เรย์ที่ผลิตกำลังไฟฟ้าน้อยกว่า

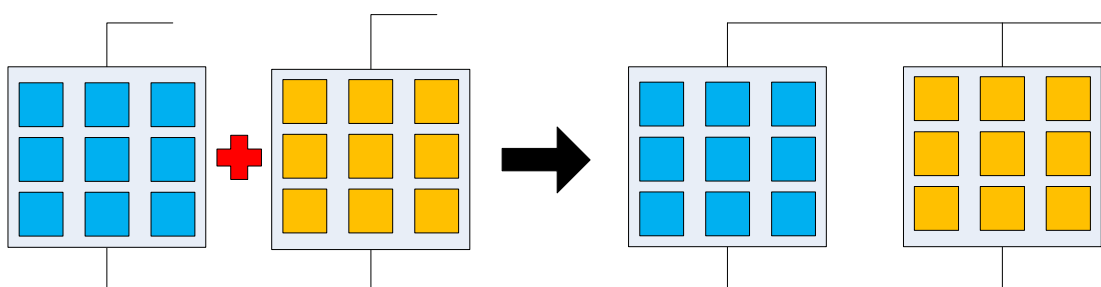
ขั้นตอนที่ 3: นำค่ากระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของอาร์เรย์ที่ผลิตกำลังไฟฟ้าน้อยกว่านั้น ไปหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของอาร์เรย์อื่นๆ และกำลังไฟฟ้ารวม ณ ขณะนั้น

ขั้นตอนที่ 4: เปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ของอาร์เรย์ที่มีขนาดใหญ่กว่า เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แท้จริงที่ผลิตได้

5.2.2 การคำนวณความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่ออาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่างรุ่นกันต่อขนานกัน

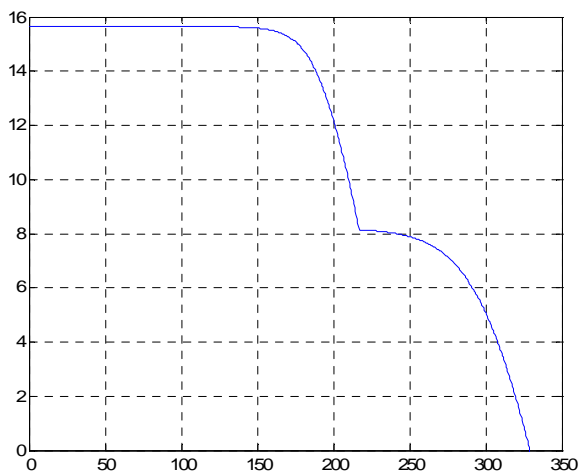
สำหรับการต่ออนุกรมของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่างรุ่นกันจะสามารถแสดงได้ดังภาพที่

5.6

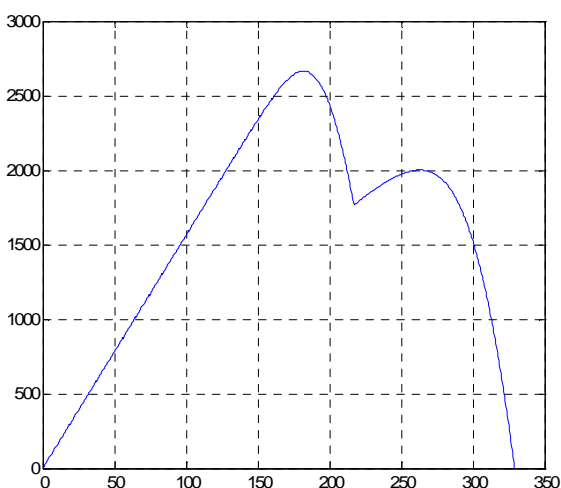


ภาพที่ 5.6 การต่อขนานของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์สองรุ่น

เมื่ออาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ต่อขนานกันจะเป็นการเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้มากขึ้น ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จะมีค่าเท่าเดิม ซึ่งการต่อขนานแล้วเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ จะมีการเปลี่ยนแปลงของ I-V curve และ P-V curve ดังภาพที่ 5.7 และ ภาพที่ 5.8



ภาพที่ 5.7 I-V curve เมื่อเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อขนาน



ภาพที่ 5.8 P-V curve เมื่อเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อขนาน

จากภาพที่ 5.7 I-V curve จะมีลักษณะคล้ายขั้นบันได ซึ่งแสดงถึงจุดทำงานสองจุดที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เช่นเดียวกับการต่อแบบอนุกรม

จากภาพที่ 5.8 จะพบว่า P-V curve จะมีจุดทำงานสูงสุดอยู่ 2 จุดทำงาน เช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นกับการต่อแบบอนุกรม ซึ่งจะเป็นปัญหาในการหาค่าสูงสุดที่แท้จริง (Global maxima) เช่นกัน

สำหรับการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แท้จริงของความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อขนาน จะสามารถทำได้ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1: หาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ของทุกอาเรย์ ตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 4.7
- ขั้นตอนที่ 2: เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ทุกค่า เพื่อหาอาเรย์ที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อยกว่า
- ขั้นตอนที่ 3: นำค่าแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของอาเรย์ที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อยกว่านั้น ไปหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ของอาเรย์อื่นๆ และกำลังไฟฟ้ารวม ณ ขณะนั้น
- ขั้นตอนที่ 4: เปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ของอาเรย์ที่มีขนาดใหญ่กว่า เพื่อหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แท้จริงที่ผลิตได้

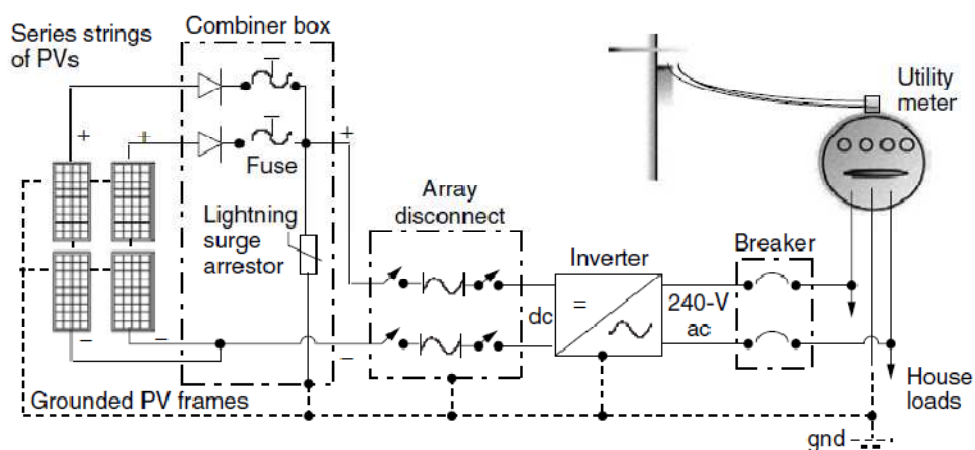
5.3 สรุป

ในบทนี้จะกล่าวถึงความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเริ่มจากการอธิบายความหมายของการเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และวิธีการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เมื่อเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมและแบบขนาน

บทที่ 6

แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า

สำหรับบทนี้จะกล่าวถึงระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งเป็นระบบที่ต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งจะทำงานโดยการผลิตกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (DC) จากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ผ่านอุปกรณ์แปลงกำลังไฟฟ้าให้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ซึ่งก็คืออินเวอร์เตอร์ และส่งกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เข้าสู่ผู้ใช้ไฟฟ้า หรือโหลด รวมถึงส่งกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้า โดยถ้าระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าได้ไม่เพียงพอต่อความต้องการของโหลด ระบบจำหน่ายไฟฟ้าจะจ่ายไฟฟ้าเข้ามาเพื่อให้มีกำลังไฟฟ้าเพียงพอสำหรับโหลด สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 6.1 [10]

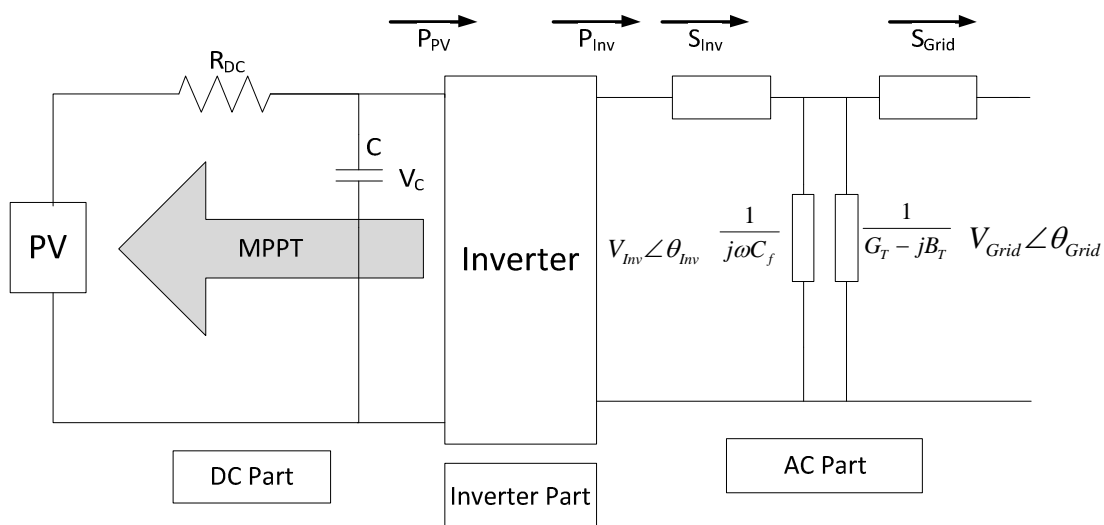


ภาพที่ 6.1 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า
(ที่มา: Gilbert M. Masters, “Renewable and Efficient Electric Power Systems”)

สำหรับแบบจำลองระบบไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะแบ่งพิจารณาเป็น 3 ส่วน [9], [44] คือ

- 1) ส่วนวงจรไฟฟ้ากระแสตรง (DC part)
- 2) ส่วนอินเวอร์เตอร์ (Inverter part)
- 3) ส่วนวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ (AC part)

แบบจำลองระบบไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า สามารถแสดงได้ดังในภาพที่ 6.2



ภาพที่ 6.2 แบบจำลองระบบไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า

6.1 ส่วนวงจรไฟฟ้ากระแสตรง (DC part)

สำหรับส่วนวงจรไฟฟ้ากระแสตรงในแบบจำลองระบบไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า จะประกอบไปด้วย อาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ (PV), อุปกรณ์ควบคุมการหาค่าจุดทำงานสูงสุด (Maximum Power Point Tracking: MPPT) จากอินเวอร์เตอร์, ความต้านทานของสายส่ง (R_{DC}), และ ตัวเก็บประจุ (C) ซึ่งการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้จากอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำได้ตามแบบจำลองในบทที่ 4 และในส่วนของความต้านทานของสายส่งจะถือว่ามิต้านน้อยมาก จึงคิดเสมือนว่าแรงดันจากอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นแรงดันในส่วนของวงจรไฟฟ้ากระแสตรง

6.2 ส่วนอินเวอร์เตอร์ (Inverter part)

สำหรับอินเวอร์เตอร์นั้นจะมีการทำงานดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 3 โดยส่วนที่จะนำมาใช้ในแบบจำลองจะประกอบไปด้วย อินเวอร์เตอร์ครึ่งบริดจ์สามเฟส (Three-phase half bridge inverter) และ Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) โดยที่สมการแรงดันของเฟส A จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (6.1) ในส่วนของแรงดันที่เฟส B และ C นั้นจะมีขนาดแรงดันเท่ากับเฟส A แต่มีการเลื่อนเฟสไปเฟสละ 120°

$$V_{inv} \angle \theta = \frac{\sqrt{2}}{4} MV_{DC} \angle \theta \quad (6.1)$$

และจากกฎสมมูลของกำลังไฟฟ้า จะถือว่ากำลังไฟฟ้าจากส่วนอินเวอร์เตอร์มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าจากส่วนวงจรไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อคิดในช่วง Steady state ดังแสดงในสมการที่ (6.2)

$$P_{inv} = P_{PV} \quad (6.2)$$

นอกจากนี้ในกรณีที่กำลังไฟฟ้าจากอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าที่อินเวอร์เตอร์จะรับและจ่ายได้ อินเวอร์เตอร์จะทำการปรับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้ลดลงตามหัวข้อที่ 3.3.2.1 โดยกำลังไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์จะเท่ากับกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้จากอินเวอร์เตอร์แทน

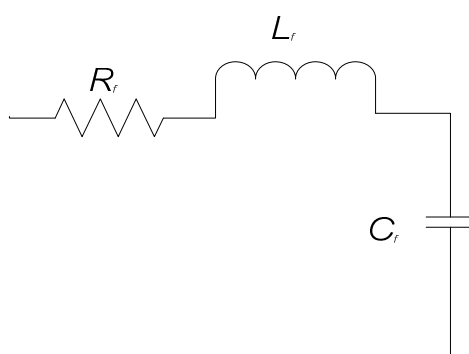
$$P_{inv} = P_{max,inv} \quad (6.3)$$

6.3 ส่วนวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ (AC part)

ในส่วนนี้จะจำลองส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ออกมาจากอินเวอร์เตอร์และส่วนที่จ่ายเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งจะมีเฉพาะไฟฟ้ากระแสสลับ ในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้า 2 อุปกรณ์ คือ ฟิลเตอร์และหม้อแปลง

ฟิลเตอร์

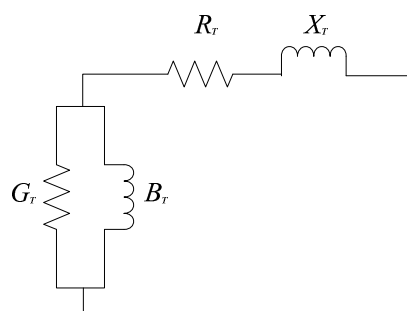
ฟิลเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ไว้ใช้กรองความถี่ที่ไม่ต้องการทิ้งไป ซึ่งภายในอุปกรณ์นี้จะประกอบไปด้วย ตัวต้านทาน (R_f), ตัวเหนี่ยวนำ (L_f), และตัวเก็บประจุ (C_f) ซึ่งวงจรสมมูลของฟิลเตอร์นั้นสามารถแสดงได้ตามภาพที่ 6.3



ภาพที่ 6.3 วงจรสมมูลของฟิลเตอร์

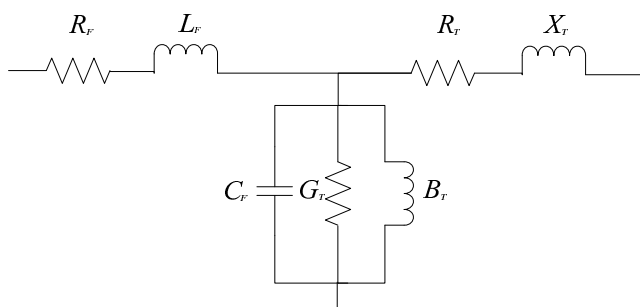
หม้อแปลง

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับยกระดับแรงดันเพื่อให้สามารถเชื่อมต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ ซึ่งประกอบไปด้วย แอดมิตแตนซ์ขนาน ($G_T + jB_T$) และ อิมพีแดนซ์ ($R_T + jX_T$) โดยวงจรสมมูลของหม้อแปลงสามารถแสดงได้ตามภาพที่ 6.4



ภาพที่ 6.4 วงจรสมมูลของหม้อแปลง

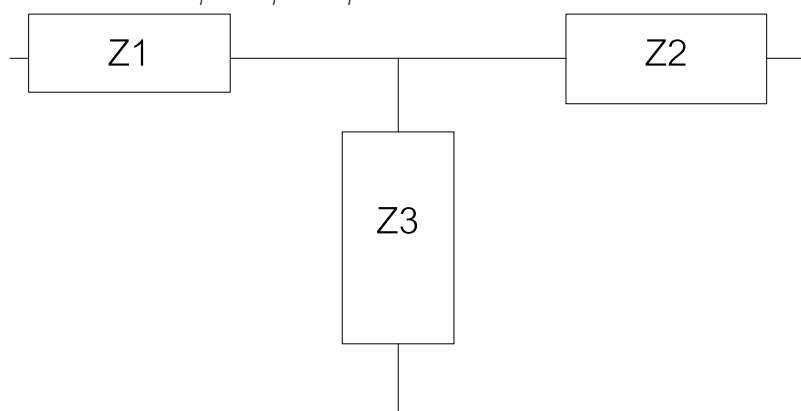
เมื่อนำวงจรสมมูลของฟิวดอร์และหม้อแปลงมาเชื่อมกันตามหลักการของแบบจำลองส่วนวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ จะพบว่าจะสามารถแสดงวงจรสมมูลของฟิวดอร์ และหม้อแปลงไฟฟ้ารวมกันได้ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 6.5



ภาพที่ 6.5 วงจรสมมูลของฟิวดอร์และหม้อแปลง

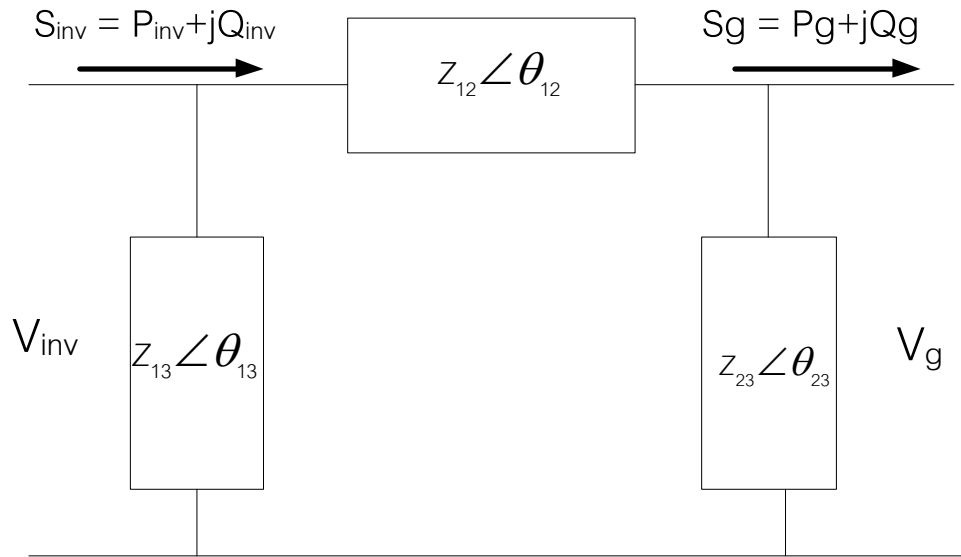
ซึ่งจากวงจรสมมูลของฟิวดอร์และหม้อแปลงนี้จะสามารถนำมาใช้เพื่อคำนวณหาแรงดันและกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ออกมาจากอินเวอร์เตอร์ และ แรงดันและกำลังไฟฟ้าปรากฏที่จ่ายเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าได้ โดยการแปลงวงจรสมมูลในภาพที่ 6.5 โดยเริ่มจากการมองให้ $Z_1 = R_r + j\omega L_r$

$Z_2 = R_r + jX_r$ และ $Z_3 = \frac{1}{j\omega C_r} // \frac{1}{G_r - jB_r}$ ดังภาพที่ 6.7



ภาพที่ 6.6 วงจรสมมูลของหม้อแปลงและฟิวดอร์ในรูปแบบ \$Z_1, Z_2\$ และ \$Z_3\$

จากนั้นแปลงวงจรสมมูลแบบวายเป็นแบบเคลด้าเพื่อคำนวณหาแรงดันและกำลังไฟฟ้าปรากฏดังภาพที่ 6.7



ภาพที่ 6.7 วงจรสมมูลแบบเคลด้า

สำหรับการแปลงค่าจากวงจรสมมูลแบบวายเป็นเคลด้านั้นจะสามารถแปลงได้ดังสมการที่

(6.4) - (6.6)

$$z_{12} \angle \theta_{12} = \frac{z_1 z_2 \angle (\theta_1 + \theta_2) + z_1 z_3 \angle (\theta_1 + \theta_3) + z_2 z_3 \angle (\theta_2 + \theta_3)}{z_3 \angle \theta_3} \quad (6.4)$$

$$z_{13} \angle \theta_{13} = \frac{z_1 z_2 \angle (\theta_1 + \theta_2) + z_1 z_3 \angle (\theta_1 + \theta_3) + z_2 z_3 \angle (\theta_2 + \theta_3)}{z_2 \angle \theta_2} \quad (6.5)$$

$$z_{23} \angle \theta_{23} = \frac{z_1 z_2 \angle (\theta_1 + \theta_2) + z_1 z_3 \angle (\theta_1 + \theta_3) + z_2 z_3 \angle (\theta_2 + \theta_3)}{z_1 \angle \theta_1} \quad (6.6)$$

โดยจะสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ได้ดังสมการที่ (6.7)

$$S_{inv} = V_{inv} I_{inv}^* \quad (6.7)$$

ซึ่งจากวงจรดังภาพที่ 6.7 จะสามารถหาลำดับกำลังไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ดังสมการที่

(6.8)

$$S_{inv} = V_{inv} \angle \theta_{inv} \left(\frac{V_{inv} \angle \theta_{inv} - V_g \angle \delta}{z_{12} \angle \theta_{12}} \right)^* + V_{inv} \angle \theta_{inv} \left(\frac{V_{inv} \angle \theta_{inv}}{z_{13} \angle \theta_{13}} \right)^* \quad (6.8)$$

ซึ่งสามารถหาลำดับกำลังไฟฟ้าปรากฏที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ได้ดังสมการที่ (6.9)

$$S_{inv} = V_{inv} \left(\frac{V_{inv}}{Z_{12}} \angle \theta_{12} - \frac{V_{grid}}{Z_{12}} \angle (\theta_{inv} + \theta_{12} - \delta) + \frac{V_{inv}}{Z_{13}} \angle \theta_{13} \right) \quad (6.9)$$

ซึ่งสามารถแยกเป็นกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟได้ดังสมการที่ (6.10) และ

(6.11)

$$P_{inv} = V_{inv} \left(\frac{V_{inv}}{Z_{12}} \cos \theta_{12} - \frac{V_{grid}}{Z_{12}} \cos(\theta_{inv} + \theta_{12} - \delta) + \frac{V_{inv}}{Z_{13}} \cos \theta_{13} \right) \quad (6.10)$$

$$Q_{inv} = V_{inv} \left(\frac{V_{inv}}{Z_{12}} \sin \theta_{12} - \frac{V_{grid}}{Z_{12}} \sin(\theta_{inv} + \theta_{12} - \delta) + \frac{V_{inv}}{Z_{13}} \sin \theta_{13} \right) \quad (6.11)$$

และสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าปรากฏที่จ่ายเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (6.12)

$$S_{grid} = V_{grid} I_{grid}^* \quad (6.12)$$

ซึ่งจากวงจรดังภาพที่ 6.7 จะสามารถหาลำดับไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (6.13)

$$S_{grid} = V_{grid} \angle \delta \left(\frac{V_{inv} \angle \theta_{inv} - V_{grid} \angle \delta}{Z_{12} \angle \theta_{12}} - \frac{V_{grid} \angle \delta}{Z_{23} \angle \theta_{23}} \right)^* \quad (6.13)$$

จะสามารถหาลำดับไฟฟ้าปรากฏที่จ่ายเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (6.14)

$$S_{grid} = V_{grid} \left(\frac{V_{inv}}{Z_{12}} \angle (\delta + \theta_{12} - \theta_{inv}) - \frac{V_{grid}}{Z_{12}} \angle \theta_{12} - \frac{V_{grid}}{Z_{23}} \angle \theta_{23} \right) \quad (6.14)$$

ซึ่งสามารถแยกเป็นกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟได้ดังสมการที่ (6.15) และ

(6.16)

$$P_{grid} = V_{grid} \left(\frac{V_{inv}}{Z_{12}} \cos(\delta + \theta_{12} - \theta_{inv}) - \frac{V_{grid}}{Z_{12}} \cos \theta_{12} - \frac{V_{grid}}{Z_{23}} \cos \theta_{23} \right) \quad (6.15)$$

$$Q_{grid} = V_{grid} \left(\frac{V_{inv}}{Z_{12}} \sin(\delta + \theta_{12} - \theta_{inv}) - \frac{V_{grid}}{Z_{12}} \sin \theta_{12} - \frac{V_{grid}}{Z_{23}} \sin \theta_{23} \right) \quad (6.16)$$

6.4 ข้อกำหนดการเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า (Grid Code)

ในการที่จะเชื่อมต่อบริษัทผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าได้นั้น ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องอยู่ในข้อกำหนดการเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า (Grid Code) ซึ่งกำหนดโดยการไฟฟ้าเสียก่อน โดยการไฟฟ้ามีวัตถุประสงค์เพื่อให้การให้บริการระบบโครงข่ายไฟฟ้าดำเนินไปด้วยความเรียบร้อย ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าและผู้ใช้บริการไฟฟ้ารายอื่น

ในส่วนที่จะนำมาพิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้จะนำข้อบังคับในส่วนของการควบคุมระดับแรงดันและตัวประกอบกำลังไฟฟ้ามาพิจารณาเท่านั้น โดยจะพิจารณาจากข้อกำหนดการเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ฉบับปี พ.ศ. 2551 [36]

6.4.1 การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า

ผู้ขอใช้บริการจะต้องออกแบบควบคุมระดับแรงดันให้อยู่ในระดับที่กำหนด ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 มาตรฐานระดับแรงดันสูงสุดและต่ำสุดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ระดับแรงดัน	ภาวะปกติ		ภาวะฉุกเฉิน	
	ค่าสูงสุด (kV)	ค่าต่ำสุด (kV)	ค่าสูงสุด (kV)	ค่าต่ำสุด (kV)
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	342	418	342
220 โวลต์	240	200	240	200

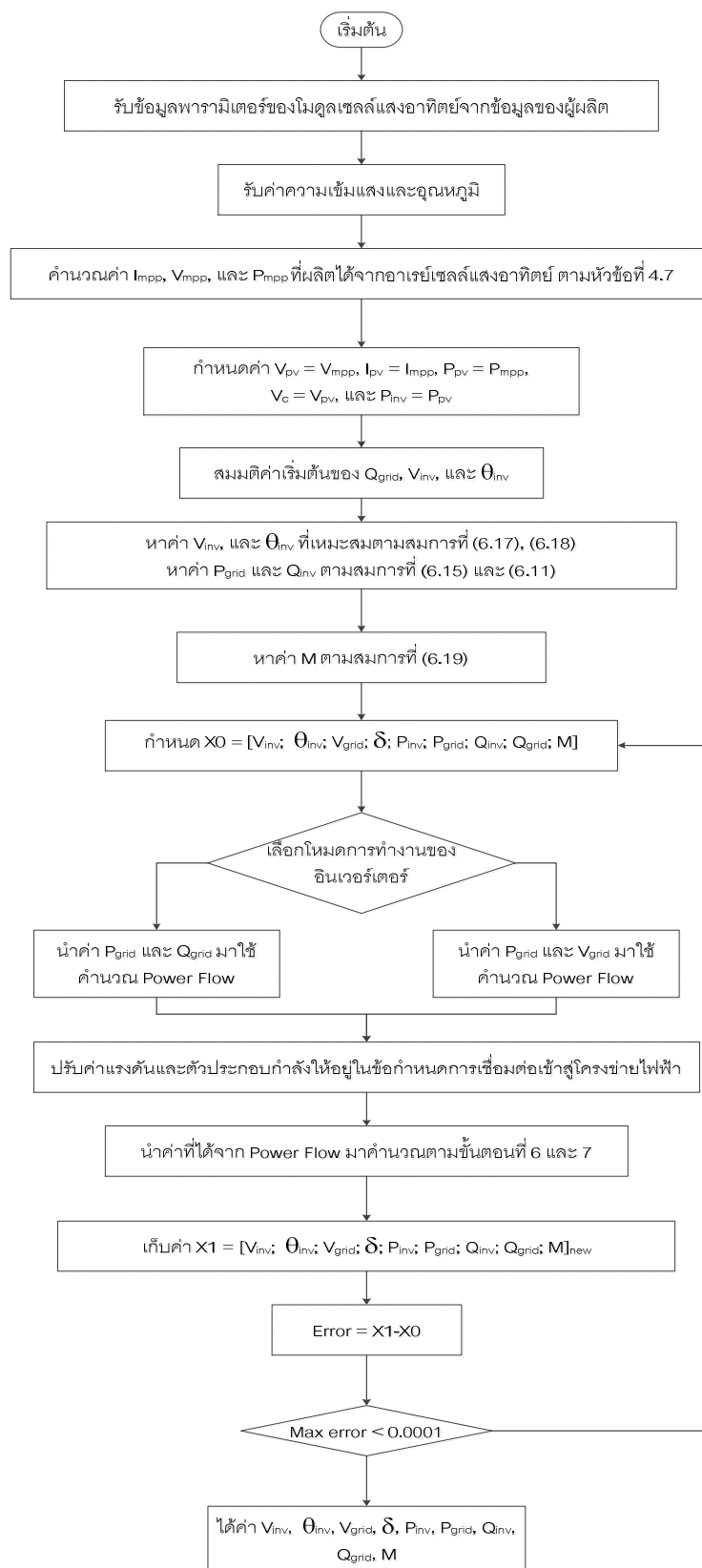
หรือในภาวะปกติคิดเป็น 0.95 – 1.05 p.u. และในภาวะฉุกเฉินคิดเป็น 0.90 – 1.10 p.u.

6.4.2 การควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

ผู้ขอใช้บริการต้องออกแบบระบบควบคุมตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเพื่อใช้ในการรักษาระดับแรงดันให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด โดยระบบที่มีอินเวอร์เตอร์ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจะต้องอยู่ในช่วง 0.9 นำหน้าถึง 0.9 ตามหลัง เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตออกมาเกินกว่าร้อยละ 10 ของขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของอินเวอร์เตอร์

6.5 ขั้นตอนการคำนวณแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า

สำหรับขั้นตอนการคำนวณระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า จะพิจารณาการคำนวณจากทั้ง 3 ส่วนที่กล่าวไว้ในขั้นต้น โดยจะพิจารณากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ และเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า โดยการคำนวณระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้านี้ จะมีการประยุกต์เข้ากับการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า ซึ่งสำหรับขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองนี้สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 6.8



ภาพที่ 6.8 แผนผังขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบ
เชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 1: รับข้อมูลพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่ง โมดูลจากข้อมูลของผู้ผลิต ซึ่งได้แก่ I_{sc} , V_{oc} , V_{mpp} , I_{mpp} , n_s , K_p , และ K_v

ขั้นตอนที่ 2: รับข้อมูลความเข้มแสงและอุณหภูมิ

ขั้นตอนที่ 3: คำนวณหา I_{mpp} , V_{mpp} , และ P_{mpp} จากแบบจำลองในหัวข้อที่ 4.7

ขั้นตอนที่ 4: กำหนดค่าเริ่มต้น $V_{pv} = V_{mpp}$, $I_{pv} = I_{mpp}$, $P_{pv} = P_{mpp}$, $V_c = V_{pv}$, และ $P_{inv} = P_{pv}$

ขั้นตอนที่ 5: สมมติค่าเริ่มต้นของ Q_{grid} , V_{inv} , และ θ_{inv} โดยให้ $Q_{grid} = 0$, $V_{inv} = 1$ p.u., และ $\theta_{inv} = 0^\circ$

ขั้นตอนที่ 6: หาค่า V_{inv} และ θ_{inv} ที่เหมาะสมโดยการหาจากการหาค่าความผิดพลาดที่ต่ำที่สุดจากสมการที่ (6.17), และ (6.18)

หาค่า P_{grid} และ Q_{inv} ตามสมการที่ (6.15) และ (6.11)

$$error1 = V_{inv} \left(\frac{V_{inv}}{Z_{12}} \cos \theta_{12} - \frac{V_g}{Z_{12}} \cos(\theta_{inv} + \theta_{12} - \delta) + \frac{V_{inv}}{Z_{13}} \cos \theta_{13} \right) - P_{inv} \quad (6.17)$$

$$error2 = V_g \left(\frac{V_{inv}}{Z_{12}} \sin(\delta + \theta_{12} - \theta_{inv}) - \frac{V_g}{Z_{12}} \sin \theta_{12} - \frac{V_g}{Z_{23}} \sin \theta_{23} \right) - Q_g \quad (6.18)$$

ขั้นตอนที่ 7: หาค่า M จากสมการที่ (6.1) จะสามารถหาค่า M ได้ตามสมการที่ (6.18)

$$M = \frac{4V_{inv}}{\sqrt{2V_{DC}}} \quad (6.19)$$

ขั้นตอนที่ 8: เก็บค่าที่คำนวณไว้ทั้งหมดเพื่อใช้เป็นค่าเปรียบเทียบในการวนซ้ำ

ขั้นตอนที่ 9: เลือกโหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ โดยโหมดที่จะทำงานมี 2 โหมด คือ โหมด PQ ที่จะควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟที่จ่ายเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า และ โหมด PV ที่จะควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและแรงดันที่บัส

ขั้นตอนที่ 10: นำค่าจากโหมดการทำงานมาคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 11: ปรับค่าแรงดันและตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้อยู่ในข้อกำหนดการเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าตามหัวข้อที่ 6.4

ขั้นตอนที่ 12: นำค่าที่ได้จากการไหลของกำลังไฟฟ้ามาคำนวณหาค่าต่างๆใหม่ตามขั้นตอนที่ 6 และ 7

ขั้นตอนที่ 13: เก็บค่าที่คำนวณใหม่นำมาเทียบกับค่าเดิม และทำการเทียบค่าความผิดพลาด ให้อยู่ในช่วงที่รับได้ ถ้าไม่ให้ทำการปรับค่าเป็นค่าใหม่และทำการวนซ้ำ

ขั้นตอนที่ 14: ได้ค่า V_{inv} , θ_{inv} , V_{grid} , δ , P_{inv} , Q_{inv} , P_{grid} , Q_{grid} และ M

6.6 สรุป

สำหรับบทนี้กล่าวถึงการพัฒนาแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า โดยเริ่มจากการแบ่งพิจารณาเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนวงจรไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนอินเวอร์เตอร์ และ ส่วนวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ โดยแบบจำลองจะจำลองการผลิตกำลังไฟฟ้าเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า รวมถึงคำนึงถึงข้อกำหนดการเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าของกริดไฟฟ้า

บทที่ 7

ระบบทดสอบ

บทนี้จะนำเสนอระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นระบบทดสอบในการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้นำเสนอและผลการตรวจวัดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จริง โดยภายในบทนี้จะสามารถแบ่งการนำเสนอได้เป็น 4 หัวข้อ คือ

1. สถานที่
2. อุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
3. รายละเอียดการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
4. ข้อมูลที่บันทึกได้จากการทดสอบ

7.1 สถานที่

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จาก “โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยแห่งชาติของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา” โดยมีการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จากบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) อย่างไรก็ตามการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะประกอบไปด้วยอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์และอุปกรณ์อื่นๆ เช่น อินเวอร์เตอร์ ตัวเก็บข้อมูล เป็นต้น ซึ่งบริษัท SMA Solar จำกัด (มหาชน) เข้ามาร่วมในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสถานที่ที่ทำการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะอยู่ที่ คาดฟ้า อาคารเจริญวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยจะสามารถแสดงภาพสถานที่ได้ดังภาพที่ 7.1



ภาพที่ 7.1 คาดฟ้า อาคารเจริญวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7.2 อุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้เชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ติดตั้งไว้ที่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ อาคารเจริญวิศวกรรม ชั้นคาดฟ้า ซึ่งจะประกอบไปด้วย 4 อุปกรณ์ คือ

- อารีย์เซลล์แสงอาทิตย์
- อินเวอร์เตอร์
- ก่อรงเซนเซอร์วัดความเข้มแสงและอุณหภูมิ
- ตัวเก็บข้อมูลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

7.2.1 อารีย์เซลล์แสงอาทิตย์

อารีย์เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเป็นรุ่น SP120 ของบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) จำนวน 10 โมดูล ซึ่งข้อมูลทางเทคนิคของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นดังตารางที่ 7.1 [38] และภาพของอารีย์เซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าว จะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 7.2

ตารางที่ 7.1 พารามิเตอร์พื้นฐานของ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น SP120 ของบริษัทโซลาร์ตรอน

พารามิเตอร์ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่ง โมดูล	
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{mpp})	120 (W)
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{mpp})	17.28 (V)
กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{mpp})	7.00 (A)
แรงดันเปิดวงจร (V_{oc})	21.70 (V)
กระแสลัดวงจร (I_{sc})	7.45 (A)
ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของกระแสต่ออุณหภูมิ (K_p)	0.0032 (A/C°)
ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่ออุณหภูมิ (K_v)	-0.0916 (V/C°)
จำนวนของเซลล์ที่มีการต่ออนุกรมเป็น โมดูล (n_s)	36



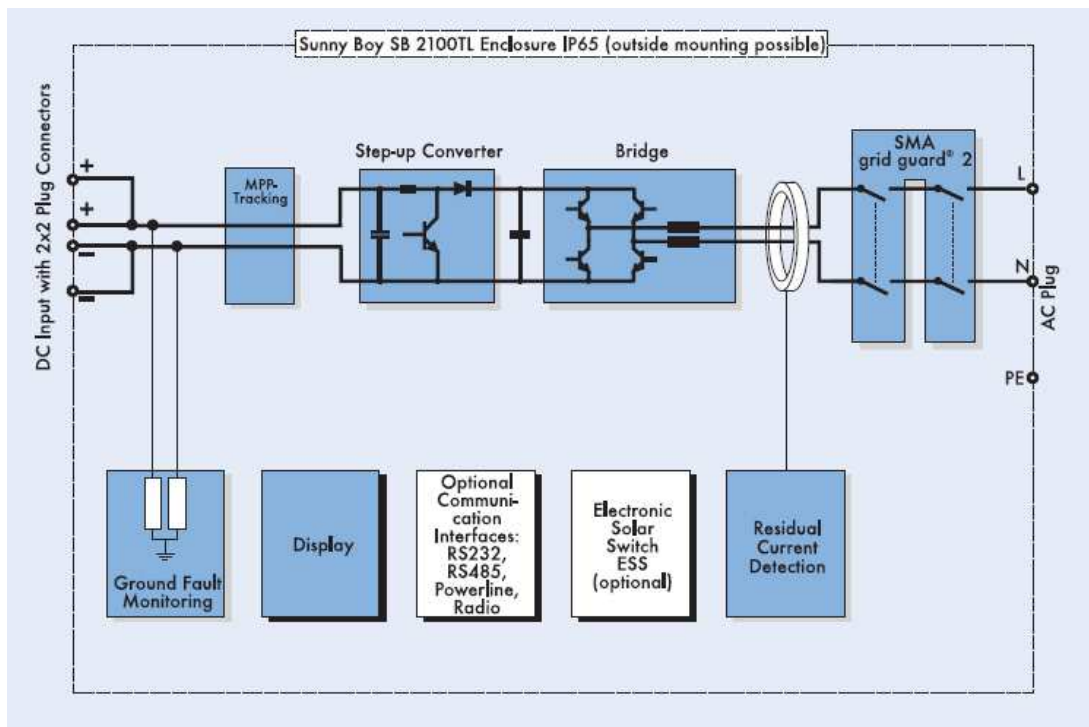
ภาพที่ 7.2 อารีย์เซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาใช้เปรียบเทียบผล

7.2.2 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ทดสอบ ใช้อินเวอร์เตอร์รุ่น 2100TL (Sunny Boy 2100TL) [39] โดยภาพลักษณะของอินเวอร์เตอร์จะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 7.3 ซึ่งมีแผนผังภายในดังภาพที่ 7.4 และมีรายละเอียดอินเวอร์เตอร์ดังตารางที่ 7.2



ภาพที่ 7.3 อินเวอร์เตอร์รุ่น 2100TL



ภาพที่ 7.4 แผนผังภายในของอินเวอร์เตอร์รุ่น 2100TL
(ที่มา: SMA, “Sunny Boy SB2100TL”)

ตารางที่ 7.2 รายละเอียดทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์รุ่น 2100TL

รายละเอียดของอินเวอร์เตอร์	
กำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดที่เข้าสู่อินเวอร์เตอร์	2,200 (W)
แรงดันสูงสุดที่เข้าสู่อินเวอร์เตอร์	600 (V)
กระแสสูงสุดที่เข้าสู่อินเวอร์เตอร์	11 (A)
ช่วงของแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้	125-600 (V)
กำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดที่ออกจากอินเวอร์เตอร์	2,100 (W)
กระแสสูงสุดที่ออกจากอินเวอร์เตอร์	11 (A)
ช่วงของแรงดันที่ออกจากอินเวอร์เตอร์	220-240 (V)
ประสิทธิภาพสูงสุด	96%

7.2.3 กล่องเซนเซอร์ตรวจวัดความเข้มแสงและอุณหภูมิ

กล่องเซนเซอร์ (Sensor Box) ตรวจวัด จะติดตั้งไว้ข้างอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ โดยภายในจะประกอบไปด้วย เซนเซอร์ที่ใช้วัดความเข้มแสงและอุณหภูมิของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเซนเซอร์ที่ใช้ตรวจวัดอุณหภูมิของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์จะตรวจวัดอุณหภูมิได้เป็น 2 ประเภท นั่นคือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม และอุณหภูมิของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งอุณหภูมิทั้งสองค่าจะมีค่าที่ไม่เท่ากัน ซึ่งจะสามารถแสดงรูปของกล่องเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดความเข้มแสงและอุณหภูมิของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ ได้ดังภาพที่ 7.5 และ ภาพที่ 7.6



ภาพที่ 7.5 เซนเซอร์ตรวจวัดความเข้มแสง



ภาพที่ 7.6 เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม และอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์

7.2.4 ตัวเก็บข้อมูลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

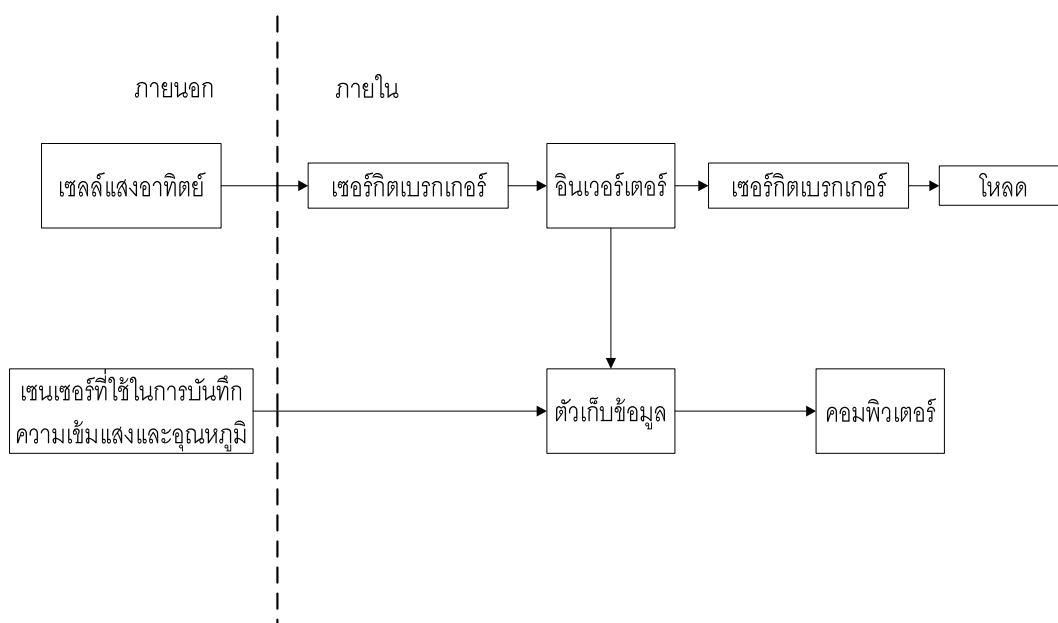
ตัวเก็บข้อมูล (Data recorder) เป็นอุปกรณ์ประสิทธิภาพสูงที่ใช้ในเก็บข้อมูลที่ต้องการ และเชื่อมต่อกับ โครนข่ายคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบข้อมูลได้ โดยปกติตัวเก็บข้อมูลจะใช้ในการสะสมข้อมูลที่มาจากหลายแห่ง เช่น จากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้เชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และ เซนเซอร์เก็บข้อมูล โดยข้อมูลจากอินเวอร์เตอร์จะประกอบไปด้วยสภาวะโหมดการทำงาน ของอินเวอร์เตอร์ หรือข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น ในส่วนของข้อมูลจากเซนเซอร์เก็บข้อมูลจะเป็นข้อมูลของความเข้มแสงและอุณหภูมิของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนี้ตัวเก็บข้อมูลจะมีความสามารถในการเตือน เมื่อเกิดเหตุการณ์การทำงานที่ผิดพลาด โดยที่ตัวเก็บข้อมูลจะมีการส่งข้อความเตือนไปยังโครนข่ายคอมพิวเตอร์หรือเตือนผ่านไปยังอีเมล (E-mail) และถึงแม้ว่าพื้นที่ที่ใช้ในการติดตั้งตัวเก็บข้อมูลจะไม่มี การเชื่อมต่อของสายโทรศัพท์ ข้อมูลที่ตรวจวัดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถถูกส่งผ่านโดยผ่านพอร์ตสื่อสาร (Global system for mobile communications modem: GSM modem) ได้ ซึ่งภาพลักษณะของตัวเก็บข้อมูลจะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 7.7



ภาพที่ 7.7 ตัวเก็บข้อมูล

7.3 รายละเอียดการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

จากหัวข้อที่ 7.2 ซึ่งกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับอาคาร ภายในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ดังกล่าว โดยจะสามารถแสดงรายละเอียดของการเชื่อมต่อได้ดังภาพที่ 7.8



ภาพที่ 7.8 รายละเอียดการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

จากภาพที่ 7.8 อาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งไว้ภายนอกอาคาร จะประกอบด้วยโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SP120 มีการเชื่อมต่อแบบอนุกรมเป็นจำนวน 10 โมดูล โดยอาร์เรย์เซลล์

แสงอาทิตย์จะเชื่อมต่อกับเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit breaker) ในการป้องกันอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์จากเหตุการณ์ที่จะทำให้อันตรายต่ออาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นจะเชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์รุ่น SB2100TL ซึ่งมีหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าตรงจากอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อที่จะจ่ายเข้าสู่โหนดภายในอาคาร ถัดจากอินเวอร์เตอร์จะแบ่งการเชื่อมต่อออกเป็น 2 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 7.8 ส่วนแรกเป็นส่วนที่ใช้ในการส่งข้อมูลที่ตรวจวัดได้เข้าสู่ตัวเก็บข้อมูล นอกจากนี้ข้อมูลทางด้านความเข้มแสงและอุณหภูมิของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์จะถูกบันทึกจากเซนเซอร์ แล้วจะส่งข้อมูลดังกล่าวไปยังตัวเก็บข้อมูลด้วยเช่นกัน แล้วตัวเก็บข้อมูลจะส่งข้อมูลที่ได้ทำการตรวจวัดได้ผ่านไปยังโครงข่ายคอมพิวเตอร์ในอาคารเพื่อที่จะแสดงข้อมูลต่างๆที่ได้ทำการตรวจวัดได้ และส่วนที่สองจากอินเวอร์เตอร์จะส่งผ่านไปยังเซอร์กิตเบรกเกอร์อีก 1 ชุดเพื่อป้องกันภัยอันตรายจากภายนอก แล้วค่อยทำการเชื่อมต่อเข้าสู่โหนดของอาคาร

7.4 ข้อมูลที่บันทึกได้จากการทดสอบ

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงความหมายของข้อมูลที่ได้นับที่จากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ตัวเก็บข้อมูล (Data recorder) ดังที่กล่าวไปในหัวข้อย่อยที่ 7.2.4 ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะประกอบไปด้วยหลากหลายพารามิเตอร์ โดยจะสามารถแสดงตัวอย่างพารามิเตอร์ที่สำคัญได้ดังภาพที่ 7.9 [40]

TimeStamp hh:mm	IntSolIrr W/m ²	SMA-h-On h	TmpAmb °C	TmpMdul °C	Fac Hz	Iac-Ist mA	Ipv mA	Pac W	RErd-Start kOhm	Status	Uac V	Upv-Ist V	Upv-Soll V	Zac Ohm
5:40	0	7224.06	29.2	28.68										
5:45	0	7224.14	29.2	28.75										
5:50	0	7224.22	29.05	28.73										
5:55	0.3	7224.31	29.05	28.75										
6:00	5.7	7224.39	29.17	28.75	47.69	0	24.77	0	9908.19	3: Warten	218.35	133.26	644.65	0
6:05	12.11	7224.47	29.11	28.83	50.02	0	22.21	0	9906	2: Netzeub	228.96	154.33	660	0
6:10	18.95	7224.56	29.1	28.84	50.01	2.14	30.69	0.43	9906	3: Warten	228.24	160.79	622.83	0.19
6:15	27.22	7224.64	29.24	29.06	50.02	0	20	0	9906	3: Warten	228.94	170.38	660	0.46
6:25	38.44	7224.79	29.31	29.42	50.01	13.85	88.73	2.77	9906	7: Mpp	228.04	153.56	415.42	0.46
6:30	49.36	7224.87	29.47	29.81	50.04	34.25	187.13	7	9906	7: Mpp	227.18	127.38	128	0.45
6:35	55.34	7224.95	29.49	30.01	50.02	46.14	238.96	9.79	9906	7: Mpp	226.96	122.88	123.2	0.44
6:40	61.1	7225.04	29.62	30.21	50.02	66.71	300.4	14.57	9906	7: Mpp	226.98	123	123	0.46
11:00	992.88	7229.34	31.3	46.75	50.01	3778.95	6050.91	849.84	9906	7: Mpp	225	151.16	151.23	0.45
11:05	1188.49	7229.42	32.06	48.5	50.01	4435.98	7281.47	998.35	9906	7: Mpp	225.14	148.2	148.39	0.46
11:10	740.82	7229.5	32.22	49.47	50.01	2765.18	4543.75	619.77	9906	7: Mpp	224.2	147.27	147.43	0.45
11:15	593.59	7229.59	31.38	44.92	50.02	2271.88	3569.67	508.53	9906	7: Mpp	224	153.82	154.04	0.45
11:20	582.79	7229.67	31.31	42.32	50.01	2270.14	3577.21	508.02	9906	7: Mpp	224	153.36	153.62	0.46
11:25	637.1	7229.75	31.83	43.09	50.03	2475.49	3915.41	556.16	9906	7: Mpp	224.84	153.06	153.18	0.45
11:30	498.41	7229.84	32.24	44.24	50.02	1866.86	2944.82	419.72	9906	7: Mpp	225	154.93	155.09	0.45
11:35	425.24	7229.92	32.04	42.36	50.02	1603.87	2531.76	360.67	9906	7: Mpp	225.07	155.02	155.18	0.45
11:40	539.07	7230	32.65	42.63	50.02	2051.02	3219.25	463.14	9906	7: Mpp	225.98	155.77	155.98	0.45
11:45	597.32	7230.09	32.79	44.75	50.02	2275.89	3693.93	513.98	9906	7: Mpp	226	150.14	150.33	0.45
11:50	519.02	7230.17	32.25	44.03	50.02	1946.63	3138.08	439.83	9906	7: Mpp	226.12	152.4	152.62	0.45
11:55	670.82	7230.25	32.39	44.69	50.03	2532.36	4166.58	574.72	9906	7: Mpp	227.13	149.05	149.15	0.46
18:00	7.93	7236.29	27.02	25.64	50.01	0	23.78	0	9906	2: Netzeub	228.96	144.63	660	0.45
18:05	5.48	7236.38	27.24	25.75	50.01	0	27.12	0	9906	2: Netzeub	228.96	126.77	660	0.45
18:10	4.03	7236.44	27.14	25.77	50.02	0	31.5	0	9906	3: Warten	229	110.18	660	0.45
18:15	2.81	7236.53	27.26	25.72	49.98	0	35.5	0	9906	3: Warten	229	97.5	660	0.45
18:20	1.73	7236.61	27.38	25.73										
18:25	0.45	7236.69	27.3	25.8										
18:30	0	7236.78	27.33	26.47										
18:35	0	7236.86	27.32	26.77										

ภาพที่ 7.9 ตัวอย่างข้อมูลที่รับจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้ง ณ คาดฟ้าอาคาร
4 คณะวิศวกรรมศาสตร์

โดยที่

- Time คือ เวลาที่ได้ทำการบันทึกข้อมูลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งการบันทึกจะบันทึกทุกๆ 5 นาที*
- IntSolIrr คือ ความเข้มแสง โดยความเข้มแสงดังกล่าวจะเป็นความเข้มแสงเฉลี่ยภายในทุกๆ 5 นาที*
- TmpAmb คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมภายนอกอาคารเซลล์แสงอาทิตย์ โดยอุณหภูมิดังกล่าวจะเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยทุกๆ 5 นาที*
- TmpMdul คือ อุณหภูมิของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ โดยอุณหภูมิดังกล่าวจะเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยทุกๆ 5 นาที*
- Fac คือ ความถี่ของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
- Iac คือ ไฟฟ้ากระแสลับที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้จ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ ตึก 4 ชั้น คาดฟ้า โดยกระแสดังกล่าวจะเป็นกระแสเฉลี่ยทุกๆ 5 นาที*
- Ipv คือ ไฟฟ้ากระแสตรงจากอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ โดยกระแสดังกล่าวจะเป็นกระแสเฉลี่ยทุกๆ 5 นาที*

Pac	คือ	กำลังไฟฟ้าจริงของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยกำลังไฟฟ้าจริงดังกล่าวจะเป็นกำลังไฟฟ้าจริงเฉลี่ยทุกๆ 5 นาที*
Status	คือ	สถานะการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
Uac	คือ	แรงดันของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ณ จุดเชื่อมต่อระหว่างระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และระบบไฟฟ้าที่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ อาคารเจริญวิศวกรรม ชั้น 20 โดยแรงดันดังกล่าวจะเป็นแรงดันเฉลี่ยทุกๆ 5 นาที*
Upv-Ist	คือ	แรงดันที่ผลิตได้จากอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ โดยแรงดันดังกล่าวจะเป็นแรงดันเฉลี่ยทุกๆ 5 นาที*
Upv-Soll	คือ	แรงดัน Set-point ที่ MPPT ตั้งไว้เพื่อให้อาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ปรับค่าแรงดันที่ผลิตได้ให้เป็นไปตามนี้ เพื่อให้ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด
Zac	คือ	ความต้านทานของระบบไฟฟ้าที่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ อาคารเจริญวิศวกรรม ชั้น 20

*สามารถปรับเป็นทุกๆ 10 และ 15 นาทีได้

โดยสถานะการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ จะมีสถานะทำงานหลักที่ปรากฏ 3 สถานะ คือ

- MPP คือ สถานะช่วงที่ทำงานที่โหลดหาจุดทำงานสูงสุด
- Warten หรือ Waiting คือ สถานะที่รอแสงอาทิตย์จะสามารถทำให้ผลิตแรงดันหรือกำลังไฟฟ้าที่เพียงพอในการทำงานที่โหลด MPP ได้ ซึ่งในสถานะนี้ยังไม่มีการผลิตกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้า
- Netzueb หรือ Grid monitoring คือ สถานะดูโครงข่ายเพื่อเตรียมปรับเป็นโหมด MPP

บทที่ 8

ผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบแบบจำลองต่างๆ ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ ซึ่งจะแบ่งได้เป็น 3 หัวข้อใหญ่ คือ

1. ผลการทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
2. ผลการทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์
3. ผลการทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า

8.1 ผลการทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ในส่วนนี้จะเป็นผลการศึกษาเกี่ยวกับการหาพารามิเตอร์ที่จำเป็น และจำลองการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ตามสภาพความเข้มแสงและอุณหภูมิ รวมถึงคิดผลของอินเวอร์เตอร์เมื่อไม่สามารถทำงานที่โหมด MPP ได้ตามแบบจำลองในบทที่ 4 โดยในส่วนนี้จะแบ่งหัวข้อออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. ผลการทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับข้อมูลจากผู้ผลิต
2. ผลการทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับการตรวจวัดจริง
3. สรุปผลการทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

8.1.1 ผลการทดสอบแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์กับข้อมูลจากผู้ผลิต

หัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบการทำงานของแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จากบทที่ 4 กับข้อมูลที่สามารถหาได้จากผู้ผลิต โดยจะใช้ข้อมูลโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC200GT ของบริษัทเคียวเซรา จำกัด [18] ซึ่งข้อมูลพารามิเตอร์พื้นฐานสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 พารามิเตอร์พื้นฐานของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น KC200GT ของบริษัทเคียวเซรา

พารามิเตอร์พื้นฐานของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น KC200GT	
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{mpp})	200 (W) (+10%,-5%)
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{mpp})	26.3 (V)
กระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{mpp})	7.61 (A)
แรงดันเปิดวงจร (V_{oc})	32.9 (V)
กระแสลัดวงจร (I_{sc})	8.210 (A)
ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของกระแสต่ออุณหภูมิ (K_i)	0.00318 (A/C ^o)
ค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่ออุณหภูมิ (K_v)	-0.123 (V/C ^o)
จำนวนของเซลล์ที่มีการต่ออนุกรมเป็น โมดูล (n_s)	54

สำหรับพารามิเตอร์ที่จำเป็นซึ่งได้แก่ กระแสโฟโตอิเล็กทริก (I_{ph}), กระแสอิ่มตัวของไดโอด (I_0), จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมกันเป็นโมดูล (n_s), จิตความต่างศักย์เริ่มเปลี่ยน (Threshold voltage) (V_t), ความต้านทานอนุกรม (R_s), และความต้านทานขนาน (R_{sh}) สามารถหาค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ได้ตามหัวข้อที่ 4.6 ซึ่งผลการคำนวณตามแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 8.2 ซึ่งค่าทั้งหมดเป็นค่าที่คำนวณเมื่ออยู่ในระบบทดสอบมาตรฐาน (Standard Test Condition: STC) คือ ที่ความเข้มแสง 1000 w/m² และ อุณหภูมิ 25°C

ตารางที่ 8.2 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

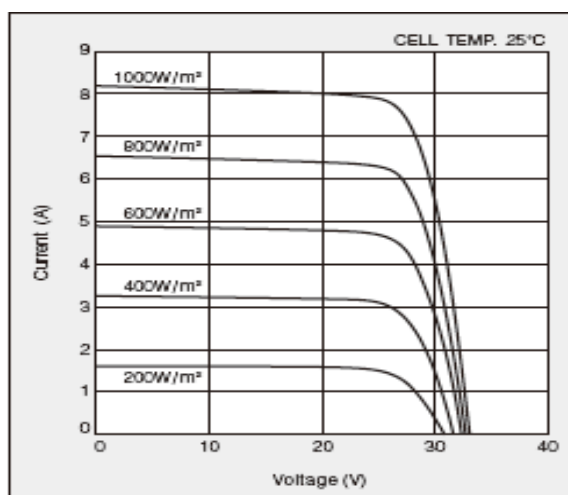
พารามิเตอร์ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล	
กระแสโฟโตอิเล็กทริก (I_{ph})	8.212 (A)
กระแสอิ่มตัวของไดโอด (I_0)	1.71×10^{-7} (A)
จิตความต่างศักย์เริ่มเปลี่ยน (V_t)	0.0345 (V)
ความต้านทานอนุกรม (R_s)	0.2172 (Ω)
ความต้านทานขนาน (R_{sh})	951.95 (Ω)

สำหรับปัจจัยหลักที่ทำให้การผลิตกระแสและแรงดันของ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนไป คือ ความเข้มแสงและอุณหภูมิ จึงแบ่งการทดสอบในส่วนนี้ออกเป็น 2 การทดสอบ โดยจะแสดง

เป็นกราฟคุณลักษณะ แรงดัน-กระแส (I-V curve) และ กราฟคุณลักษณะ แรงดัน-กำลังไฟฟ้า (P-V curve) โดยสำหรับ I-V curve นั้นจะมีการเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากผู้ผลิตซึ่งสามารถหาได้จากเอกสารข้อมูลจากผู้ผลิต [18]

8.1.1.1 ผลของความเข้มแสง

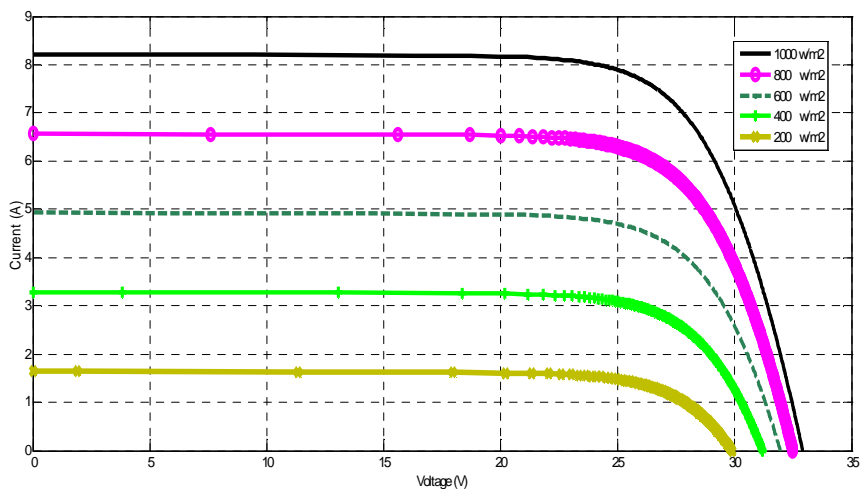
สำหรับผลของความเข้มแสงจะมีผลต่อค่ากระแสที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการทดสอบจะทดสอบที่ค่าอุณหภูมิ 25°C และที่ความเข้มแสง 200, 400, 600, 800, 1000 W/m^2 ตามลำดับ ซึ่งสำหรับ I-V curve เมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนไปจากข้อมูลของผู้ผลิต จะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 8.1



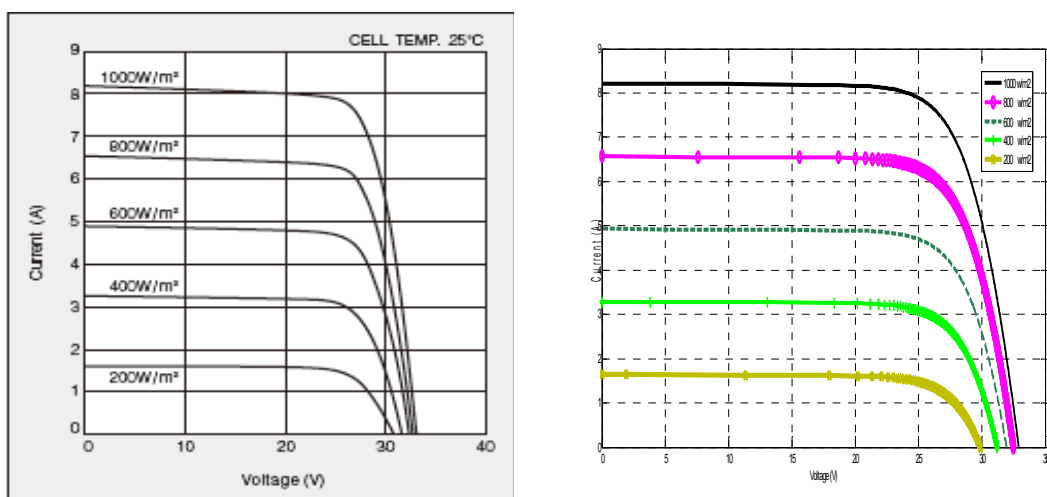
ภาพที่ 8.1 I-V curve เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจากข้อมูลของผู้ผลิต

ที่มา: บริษัท เคียวเซรา จำกัด (มหาชน), “KC200GT”

สำหรับ I-V curve เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจากแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ จะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 8.2 และการแสดงเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลจากผู้ผลิตและการคำนวณจากแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 8.3



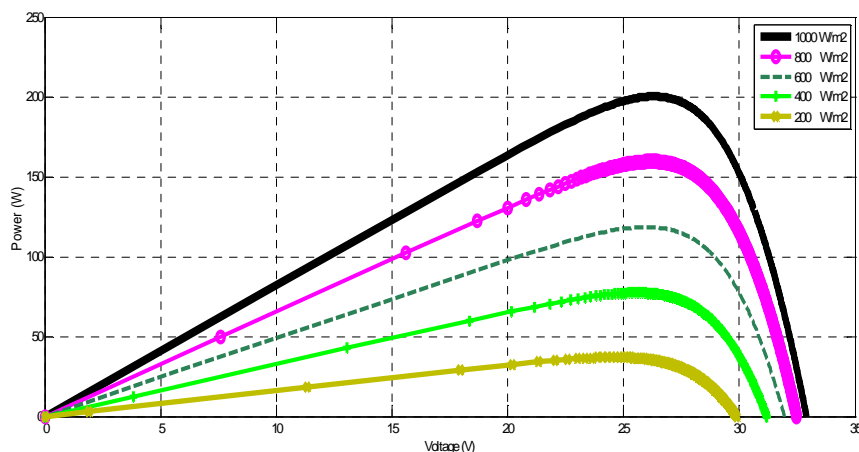
ภาพที่ 8.2 I-V curve เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจากแบบจำลอง



ภาพที่ 8.3 การเปรียบเทียบ I-V curve เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงระหว่างข้อมูลจากผู้ผลิตและแบบจำลอง

จากภาพที่ 8.3 พบว่าเมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้น ค่ากระแสที่ผลิตได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบ I-V curve จากแบบจำลองและข้อมูลจากผู้ผลิตพบว่ากราฟ I-V curve ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผู้ผลิตมาก จะมีจุดที่ผิดพลาดมากเฉพาะในช่วงที่ความเข้มแสงมีค่า 200 W/m² ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเข้มแสงน้อย แบบจำลองจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นเนื่องจากแบบจำลองที่ใช้จะใช้ข้อมูลกระแสสูงสุดในขณะ STC เป็นจุดอ้างอิงในการหากระแสสูงสุดในแต่ละสภาวะ

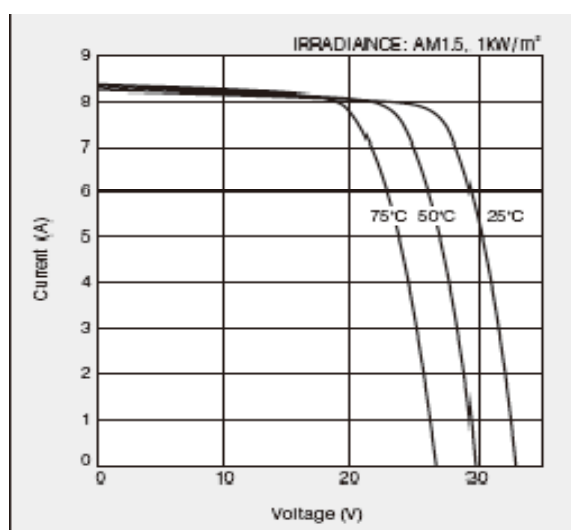
สำหรับ P-V curve จากแบบจำลองจะสามารถแสดงได้ตามภาพที่ 8.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มแสงสูงขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะสูงขึ้นเนื่องจากกระแสที่ผลิตได้มีค่าสูงขึ้นนั่นเอง



ภาพที่ 8.4 P-V curve เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจากแบบจำลอง

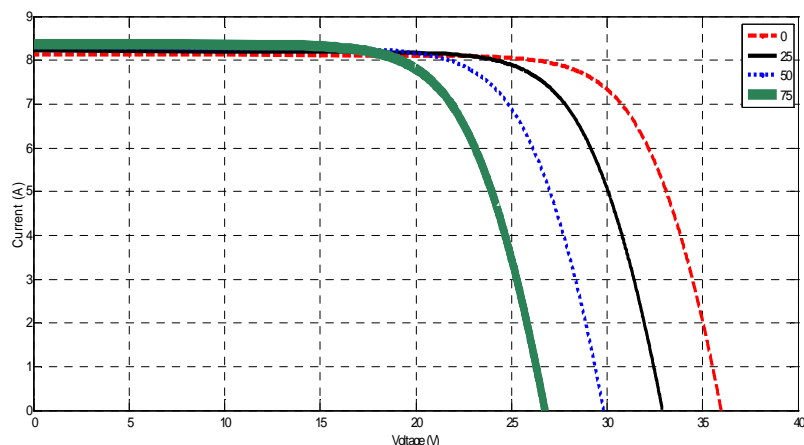
8.1.1.2 ผลของอุณหภูมิ

สำหรับผลของอุณหภูมิจะมีผลต่อค่าแรงดันที่ผลิตได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการทดสอบจะทดสอบที่ค่าความเข้มแสง 1000 W/m^2 และที่อุณหภูมิ 0°C , 25°C , 50°C และ 75°C ตามลำดับ ซึ่งสำหรับ I-V curve เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปจากข้อมูลของผู้ผลิต จะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 8.5

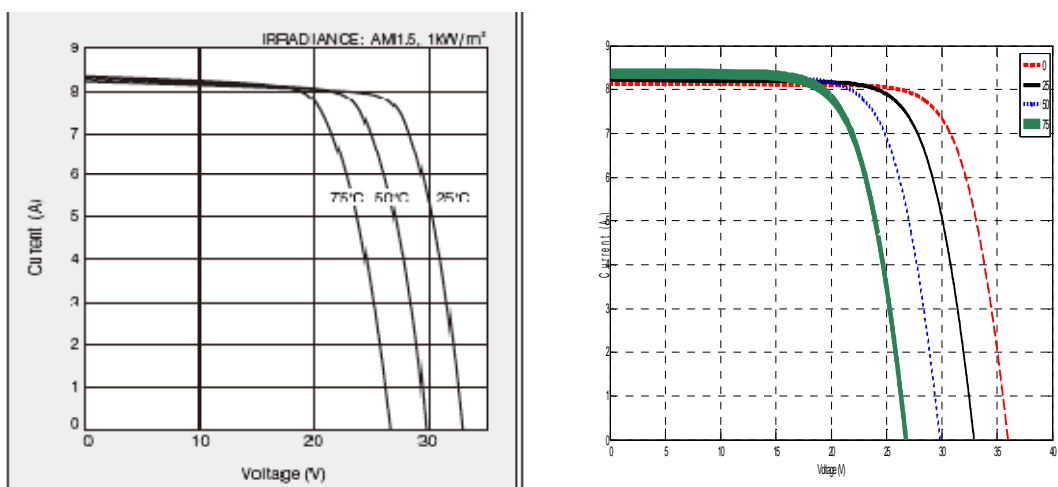


ภาพที่ 8.5 I-V curve เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากข้อมูลของผู้ผลิต
ที่มา: บริษัท เคียวเซรา จำกัด (มหาชน), "KC200GT"

สำหรับ I-V curve เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ จะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 8.6 และการแสดงเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลจากผู้ผลิตและการคำนวณจากแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 8.7



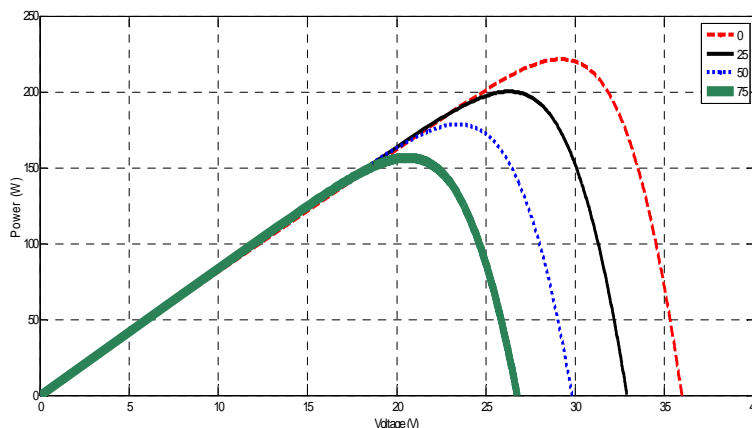
ภาพที่ 8.6 I-V curve เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากแบบจำลอง



ภาพที่ 8.7 การเปรียบเทียบ I-V curve เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างข้อมูลจากผู้ผลิตและแบบจำลอง

จากภาพที่ 8.7 พบว่าเมื่ออุณหภูมิมียค่าสูงขึ้น ค่าแรงดันที่ผลิตได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบ I-V curve จากแบบจำลองและข้อมูลจากผู้ผลิตพบว่ากราฟ I-V curve ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลจากผู้ผลิตมาก

สำหรับ P-V curve จากแบบจำลองจะสามารถแสดงได้ตามภาพที่ 8.8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะลดลงเนื่องจากแรงดันที่ผลิตได้มีค่าลดลงนั่นเอง



ภาพที่ 8.8 P-V curve เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากแบบจำลอง

8.1.2 ผลการทดสอบแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์กับการตรวจวัดจริง

หัวข้อนี้จะเป็นการเปรียบเทียบการทำงานของแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จากบทที่ 4 กับข้อมูลจริงที่ได้จากการตรวจวัด ซึ่งจะใช้ข้อมูลจากอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SP120 ของบริษัทโซลาร์ตรอน จำกัด ซึ่งข้อมูลระบบทดสอบจะเป็นดังที่อธิบายในบทที่ 7

สำหรับการเริ่มต้นการทดสอบจะเริ่มจากการหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นซึ่งได้แก่ กระแสโฟโตอิเล็กทริก (I_{ph}), กระแสอิ่มตัวของไดโอด (I_0), จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมกันเป็นโมดูล (n_s), ชีตความต่างศักย์เริ่มเปลี่ยน (Threshold voltage) (V_t), ความต้านทานอนุกรม (R_s), และความต้านทานขนาน (R_{sh}) ที่สถานะ STC ก่อน โดยพารามิเตอร์เหล่านี้ที่ได้จากแบบจำลองที่สถานะ STC จะมีค่าดังตารางที่ 8.3

ตารางที่ 8.3 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

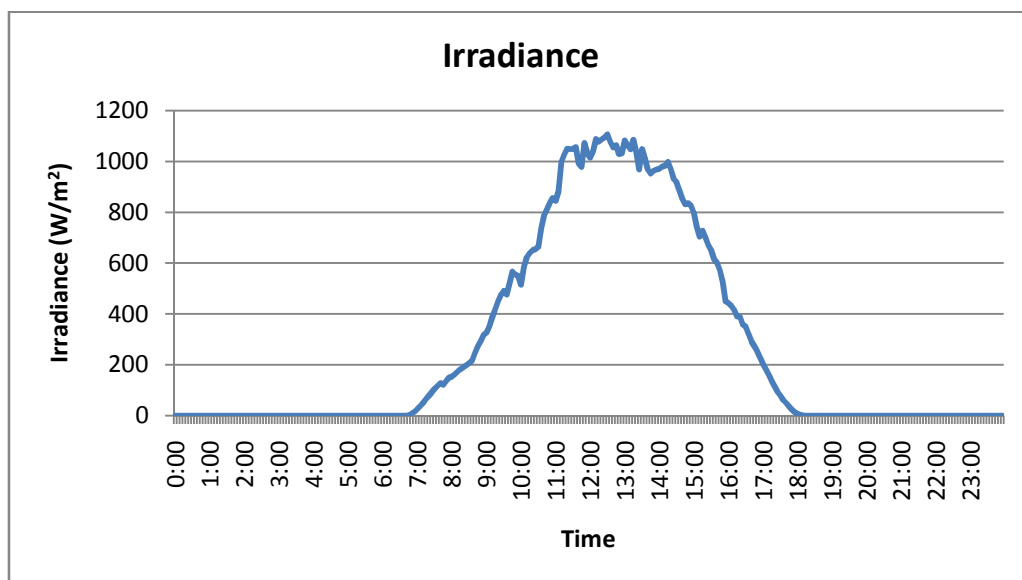
พารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล	
กระแสโฟโตอิเล็กทริก (I_{ph})	7.4502 (A)
กระแสอิ่มตัวของไดโอด (I_0)	3.01×10^{-9} (A)
ชีตความต่างศักย์เริ่มเปลี่ยน (V_t)	0.0279 (V)
ความต้านทานอนุกรม (R_s)	0.2284 (Ω)
ความต้านทานขนาน (R_{sh})	7,785.8 (Ω)

เมื่อปรับค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดจากโมดูลเป็นอาร์เรย์ตามตารางที่ 4.1 จะได้ค่าพารามิเตอร์ใหม่ดังตารางที่ 8.4

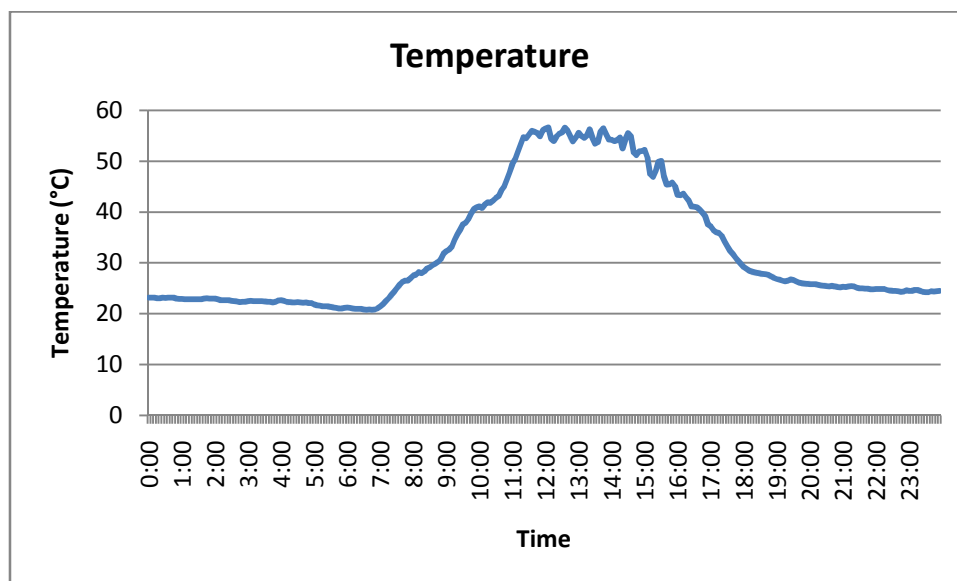
ตารางที่ 8.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เปลี่ยนเมื่อคิดเป็นอาร์เรย์

Datasheet Parameter	Module	Array	Estimated Parameter	Module	Array
I_{sc} (A)	7.45	7.45	I_{ph} (A)	7.4502	7.4502
V_{oc} (V)	21.70	217.0	I_0 (A)	3.01×10^{-9}	3.01×10^{-9}
V_{mpp} (V)	26.3	263.0	V_t (V)	0.0279	0.0279
I_{mpp} (A)	7.61	7.61	R_s (Ω)	0.2284	2.284
n_s	36	36	R_{sh} (Ω)	7,785.8	77,858

สำหรับการทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับการตรวจวัดจริง จะใช้ข้อมูลของวันที่ 5 มกราคม 2556 ในการทดสอบ ซึ่งมีข้อมูลความเข้มแสงและอุณหภูมิดังภาพที่ 8.9 และ ภาพที่ 8.10



ภาพที่ 8.9 ความเข้มแสง ณ วันที่ 5 มกราคม 2556



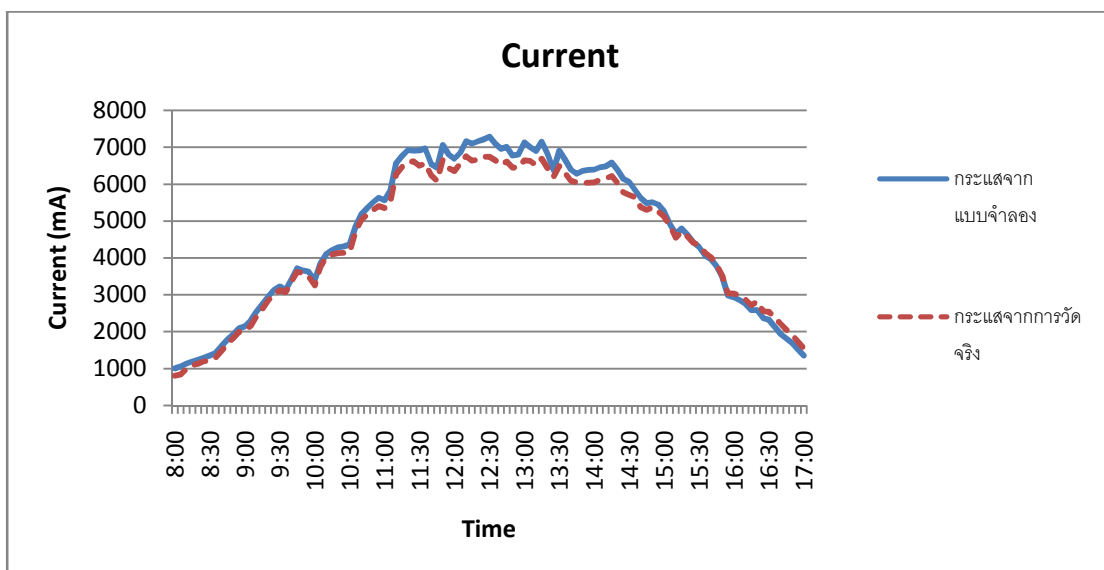
ภาพที่ 8.10 อุณหภูมิของอาเรีย ณ วันที่ 5 มกราคม 2556

สำหรับการทดสอบจะแบ่งพิจารณาเป็น 2 กรณี คือ

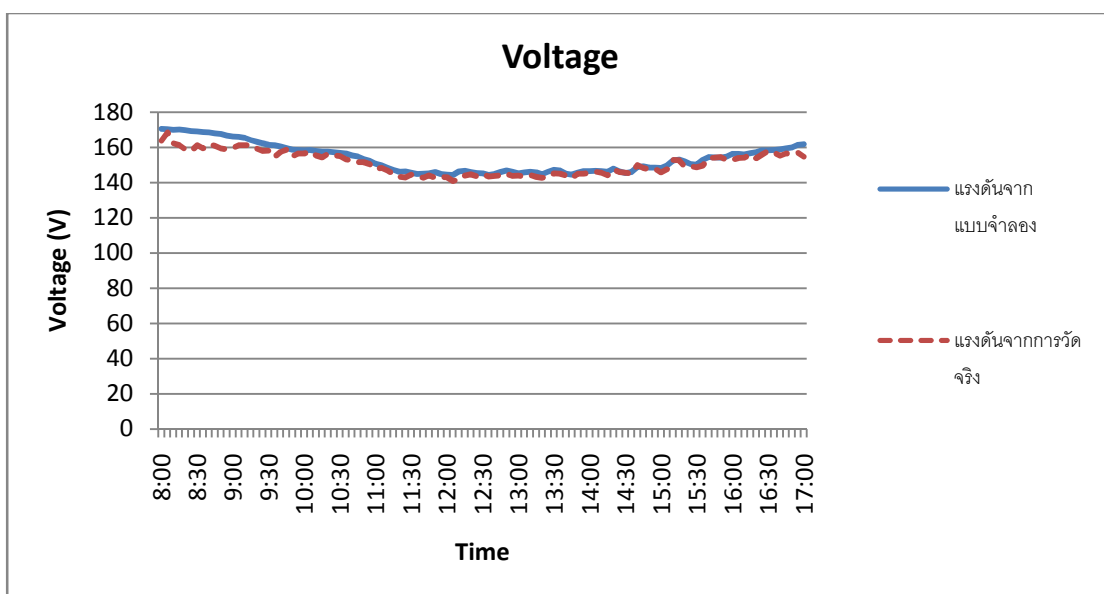
- (1) กรณีพิจารณาแบบจำลองและการตรวจวัดจริงเฉพาะช่วงโหมคการทำงานสูงสุด
- (2) กรณีพิจารณาแบบจำลองและการตรวจวัดจริงตลอดทั้งวัน

8.1.2.1 กรณีพิจารณาแบบจำลองและการตรวจวัดจริงเฉพาะช่วงโหมคการทำงานสูงสุด

เป็นการพิจารณาเฉพาะช่วงโหมคการทำงานสูงสุด (Maximum Power Point: MPP) เท่านั้น เนื่องจากเป็นช่วงที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ออกมาสูงสุดตามแบบจำลอง ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปตามภาพที่ 8.11 และ ภาพที่ 8.12



ภาพที่ 8.11 การเปรียบเทียบกระแสที่ผลิตได้จากแบบจำลองและการตรวจวัดจริงในโหมด MPP



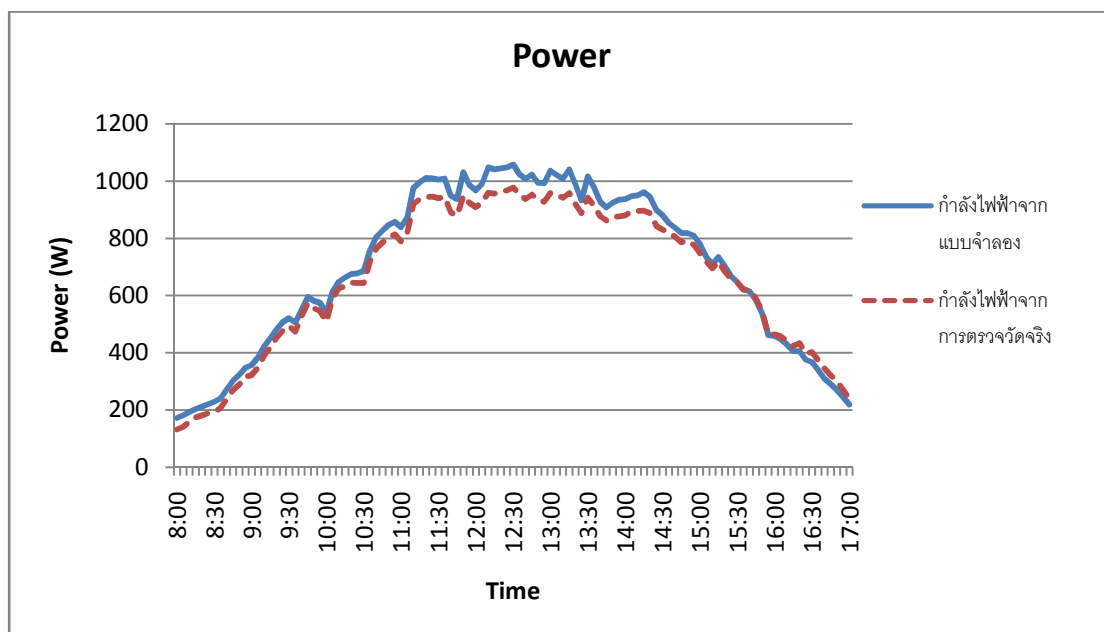
ภาพที่ 8.12 การเปรียบเทียบแรงดันที่ผลิตได้จากแบบจำลองและการตรวจวัดจริงในโหมด MPP

จากภาพที่ 8.11 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่โหมด MPP จะคำนวณได้กระแสใกล้เคียงและมีรูปกราฟเหมือนกับการตรวจวัดจริง โดยจะแปรผันไปตามความเข้มแสงในแต่ละช่วงเวลา แต่จะมีช่วงที่แบบจำลองคำนวณได้สูงกว่าการตรวจวัดจริงอยู่ ซึ่งค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 7% ซึ่งถือว่ามีค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ที่มีความผิดพลาดต่ำกว่า 10% [41] และ [42]

จากภาพที่ 8.12 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่โหมด MPP จะคำนวณได้แรงดันใกล้เคียงกับแรงดันที่ตรวจวัดจริงมาก แต่รูปกราฟในช่วงแรกจะค่อนข้าง

ต่างกับการตรวจวัดจริง ซึ่งคาดว่าอาจเกิดจากการแกว่งของแรงดันในขณะการทำงานสูงสุด ซึ่งค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 5%

สำหรับค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้จากอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์จะไม่มีค่าที่บันทึกจากตัวเก็บข้อมูล แต่สามารถหาได้จากผลคูณของกระแสและแรงดันที่ผลิตจากอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถแสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองและการตรวจวัดจริงได้ดังภาพที่ 8.13



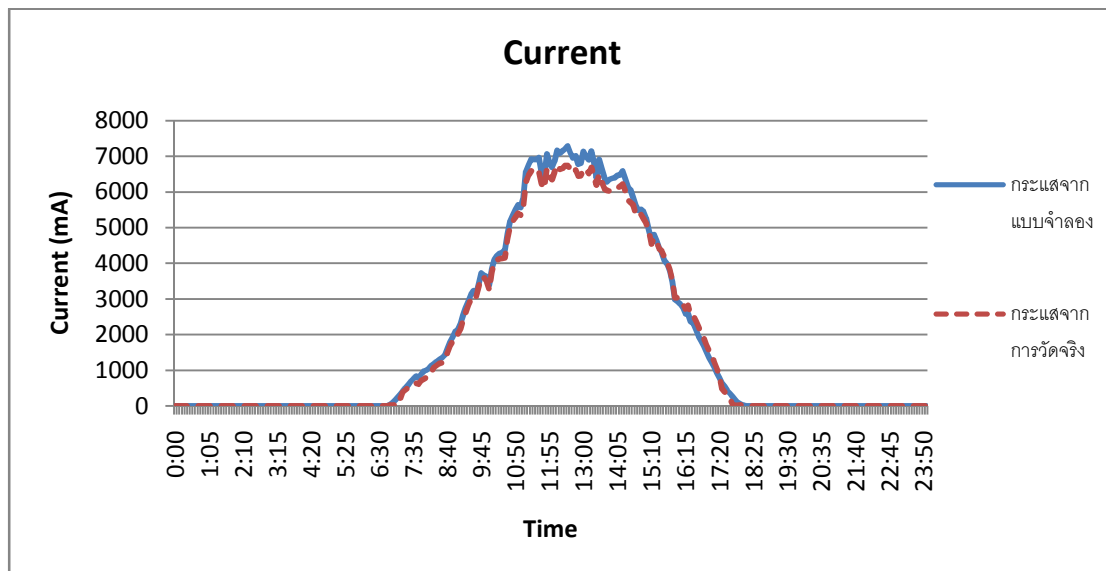
ภาพที่ 8.13 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแบบจำลองและการตรวจวัดจริงในโหมด MPP

จากภาพที่ 8.13 จะพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับการตรวจวัดจริง โดยกราฟจะมีลักษณะตามกราฟกระแส และสำหรับกราฟกำลังไฟฟ้าจริงจะมีค่าผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 7% เช่นเดียวกับกราฟกระแสซึ่งถือว่ามีค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ที่มีความผิดพลาดต่ำกว่า 10% [41] และ [42] โดยที่ความผิดพลาดเหล่านี้มาจากความผิดพลาดของกล่องเซนเซอร์ซึ่งมีความผิดพลาดอยู่ประมาณ 7% และมีความผิดพลาดจากอินเวอร์เตอร์อยู่ราว 3%

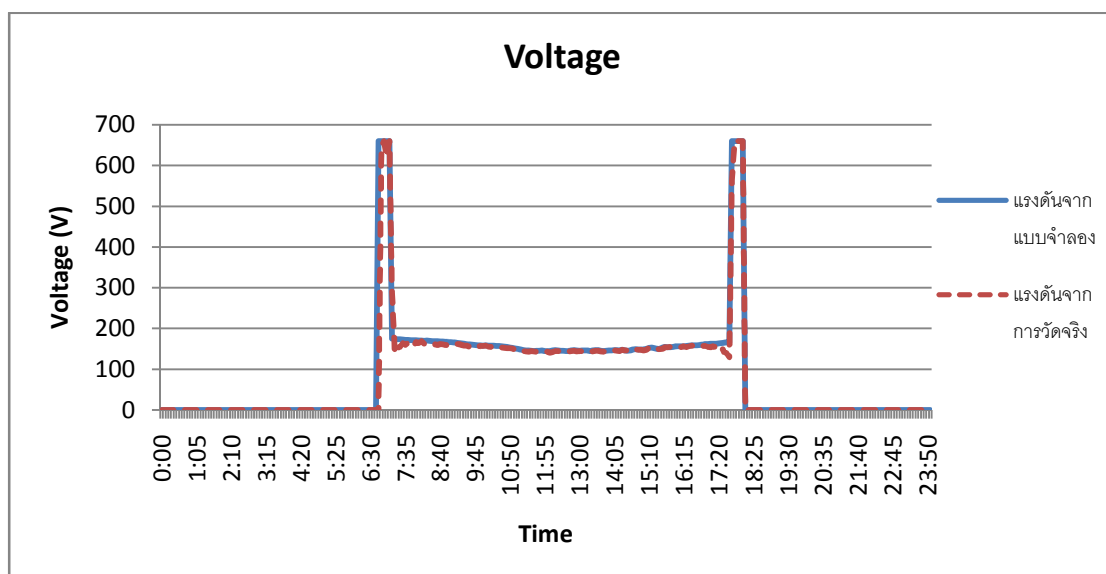
8.1.2.2 กรณีพิจารณาแบบจำลองและการตรวจวัดจริงตลอดทั้งวัน

ในส่วนนี้จะพิจารณาแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการตรวจวัดจริง โดยคำนึงถึงผลของโหมดอื่นๆที่ไม่ใช่โหมด MPP เข้าไปในการเปรียบเทียบด้วย ซึ่งตามภาพที่ 7.9 จะมีโหมด Warten หรือ Waiting และ โหมด Netzeub หรือ Grid monitoring โดยที่สองโหมดนี้จะเกิดขึ้นในช่วงที่มีความเข้มแสงน้อย หรือช่วงการเริ่มการทำงาน ก่อนที่ระบบจะเชื่อมต่อกับ

โครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งการทำงานในช่วงนี้จะไม่เหมือนโหมด MPP ซึ่งได้ผลการทดสอบดังภาพที่ 8.14 และ ภาพที่ 8.15



ภาพที่ 8.14 การเปรียบเทียบค่ากระแสที่ผลิตได้จากแบบจำลองและการตรวจวัดจริงตลอดทั้งวัน



ภาพที่ 8.15 การเปรียบเทียบค่าแรงดันที่ผลิตได้จากแบบจำลองและการตรวจวัดจริงตลอดทั้งวัน

จากภาพที่ 8.14 เมื่อแสดงการเปรียบเทียบกระแสที่ผลิตได้ระหว่างแบบจำลองกับการตรวจวัดจริงตลอดทั้งวัน พบว่าในช่วง MPP จะคำนวณค่าของกระแสได้เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 8.1.2.1 ส่วนในช่วงที่ไม่มีความเข้มแสงจะไม่มีการผลิตกระแสไฟฟ้า

จากภาพที่ 8.15 เมื่อแสดงการเปรียบเทียบแรงดันระหว่างแบบจำลองกับการตรวจวัดจริงตลอดทั้งวัน โดยในส่วนนี้จะนำแรงดัน Setpoint มาพิจารณา เพื่อให้ให้เห็นการปรับโหมดของ

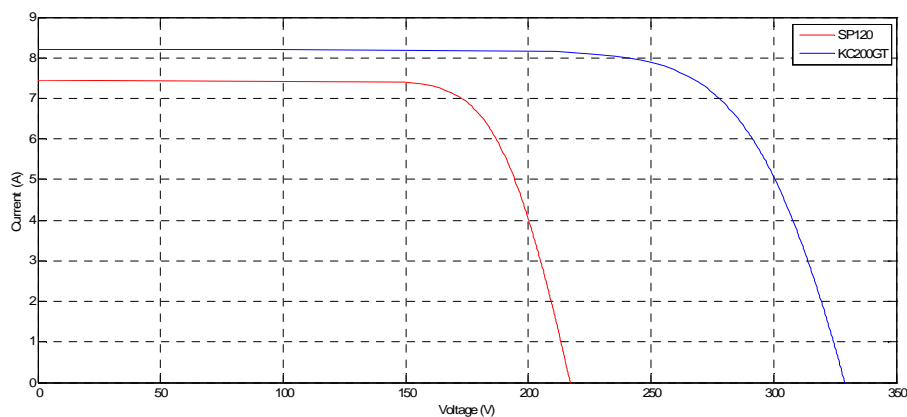
อินเวอร์เตอร์ได้อย่างชัดเจน ซึ่งพบว่าในช่วง MPP จะคำนวณค่าของแรงดันได้เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 8.1.2.1 ส่วนในช่วงที่ไม่มีความเข้มแสงจะไม่มีการผลิตแรงดันไฟฟ้า และในช่วงเริ่มการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งไม่ใช่ช่วงโหมด MPP ซึ่งได้แก่ช่วง Waiting และ Grid-monitoring ค่าแรงดัน Setpoint ที่ได้จะมีการปรับค่าขึ้นไปจนถึงขีดจำกัดของอินเวอร์เตอร์ คือประมาณ 660 V เพื่อให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าสูงสุด แต่แรงดันจริงๆ ที่ผลิตได้จะมีค่าสูงสุดได้เพียงค่าแรงดันเปิดวงจรเท่านั้น ซึ่งในส่วนโหมดอื่นๆที่ไม่ใช่โหมด MPP นี้จะไม่มีการผลิตกำลังไฟฟ้าเข้าสู่โหลดของอาคาร

8.1.3 สรุปผลการทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

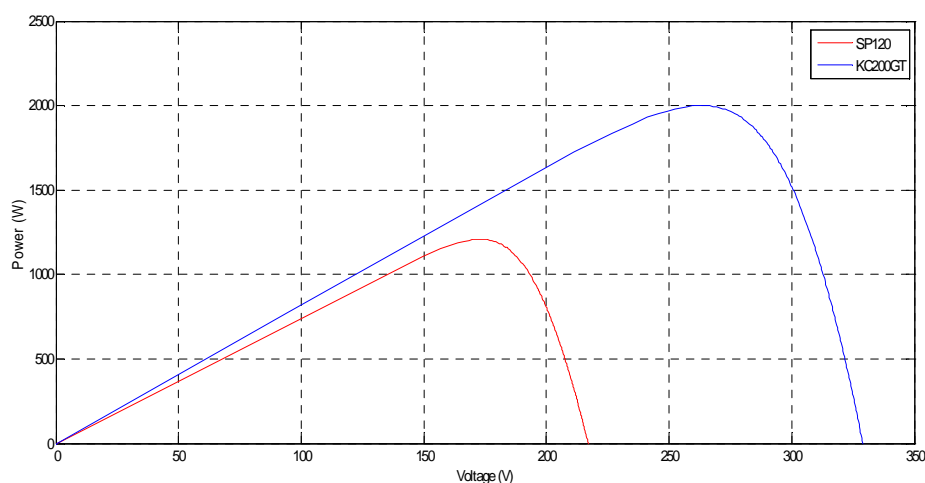
สำหรับแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำเสนอในส่วนนี้จะคำนวณโดยการหาค่าพารามิเตอร์ของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่จำเป็นเสียก่อน จากนั้นจึงปรับค่าพารามิเตอร์ของโมดูลเป็นอาร์เรย์ และหาค่ากระแสและแรงดันสูงสุดที่ผลิตได้จากอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเมื่อได้นำมาเปรียบเทียบกับเอกสารข้อมูลจากผู้ผลิตในหัวข้อที่ 8.1.1 และเปรียบเทียบกับผลทดสอบจริงในหัวข้อที่ 8.1.2 พบว่าแบบจำลองที่ได้มีความแม่นยำในการคำนวณหากระแสและแรงดันจากสภาพความเข้มแสงและอุณหภูมิในระดับที่อยู่ในช่วงยอมรับได้ และสามารถแสดงการทำงานในช่วงที่ไม่ใช่ช่วงการทำงานสูงสุดเปรียบเทียบกับการตรวจวัดจริงได้

8.2 ผลการทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับการทดสอบเรื่องความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (Mismatch) จะใช้ข้อมูลของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC200GT ของบริษัทเคียวเซรา จำกัด ซึ่งมีข้อมูลพารามิเตอร์ดังตารางที่ 8.1 และโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SP120 ของบริษัทโซลาร์ตรอน จำกัด ซึ่งมีข้อมูลพารามิเตอร์ดังตารางที่ 7.1 โดยที่ในหัวข้อนี้จะแสดงกราฟ I-V curve และ P-V curve ที่เกิดขึ้นเมื่อมีการนำอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองรุ่นมาประกอบกัน และคำนวณหาจุดทำงานสูงสุดที่แท้จริง (Global Maxima) จากแบบจำลองเมื่อเกิด Mismatch ตามบทที่ 5 ซึ่งจะกำหนดให้แต่ละอาร์เรย์ที่นำมาประกอบกันจะประกอบไปด้วยโมดูล 10 โมดูลต่ออนุกรมกัน ซึ่งสามารถแสดงกราฟ I-V curve และ P-V curve ของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองรุ่นเปรียบเทียบกันได้ดังภาพที่ 8.16 และภาพที่ 8.17



ภาพที่ 8.16 I-V curve เปรียบเทียบการผลิตไฟฟ้าของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ 2 รุ่น



ภาพที่ 8.17 P-V curve เปรียบเทียบการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ 2 รุ่น

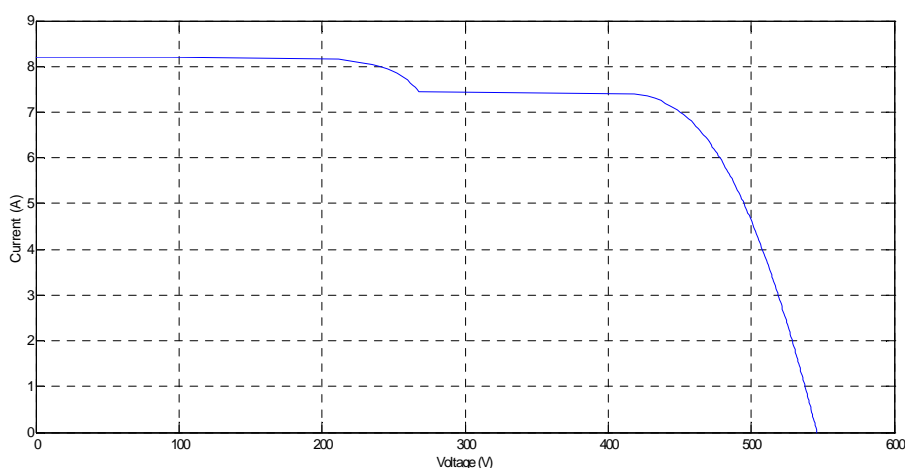
เมื่อพิจารณาภาพที่ 8.16 และ ภาพที่ 8.17 แล้ว จะพบว่า อาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC200GT สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์รุ่น SP120 อย่างชัดเจน ซึ่งเมื่อนำมาประกอบกันจะทำให้เกิดการ Mismatch อย่างแน่นอน

สำหรับการทดสอบ Mismatch จะแบ่งหัวข้อออกเป็น 3 หัวข้อ คือ

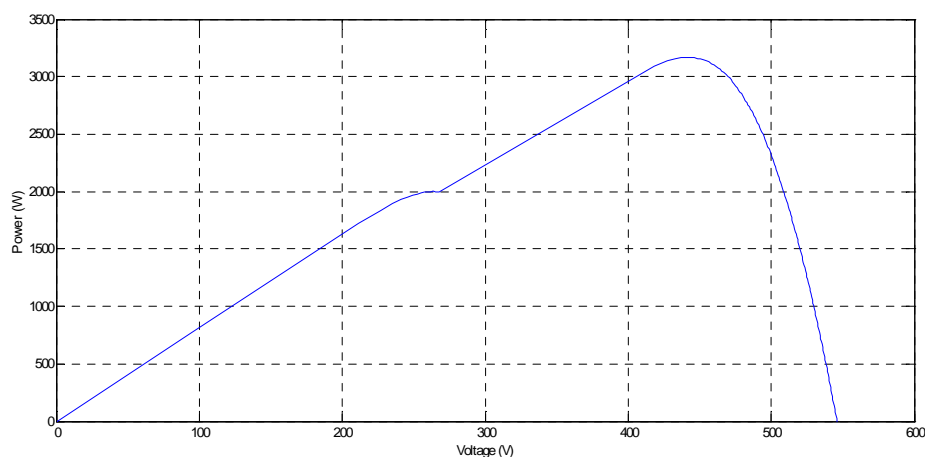
- (1) ผลทดสอบเมื่อต่ออาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ต่างรุ่นกันแบบอนุกรม
- (2) ผลทดสอบเมื่อต่ออาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ต่างรุ่นกันแบบขนาน
- (3) สรุปผลการทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

8.2.1 ผลทดสอบเมื่อต่ออาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ต่างรุ่นกันแบบอนุกรม

ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 5 เมื่อนำอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ต่ออนุกรมกันจะเป็นการเพิ่มระดับแรงดันของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ ในขณะที่กระแสที่ผลิตได้จะยังคงเป็นค่าๆหนึ่ง ซึ่งอาร์เรย์ทั้งสองจะผลิตได้เท่ากัน โดย I-V curve และ P-V curve ที่ได้จากการต่ออนุกรมของอาร์เรย์ทั้งสองจะเป็นดังภาพที่ 8.18 และ ภาพที่ 8.19



ภาพที่ 8.18 I-V curve ของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์เมื่อประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ 2 รุ่นแบบอนุกรม



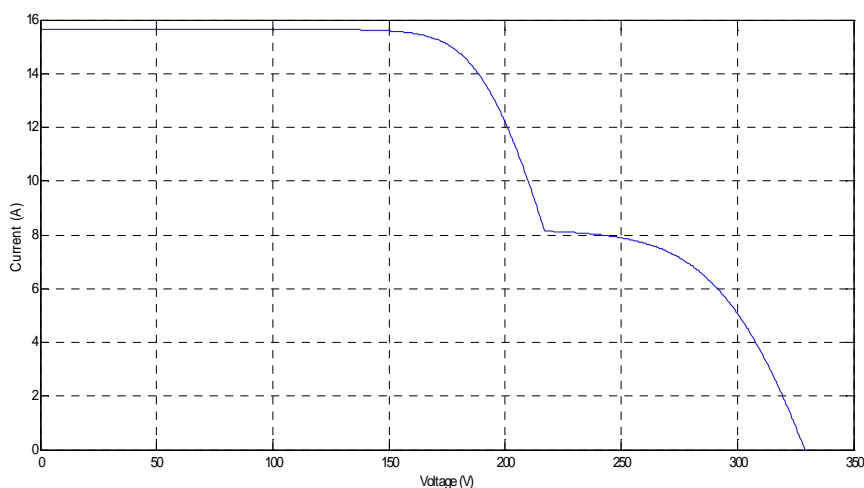
ภาพที่ 8.19 P-V curve ของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์เมื่อประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ 2 รุ่นแบบอนุกรม

จากภาพที่ 8.18 และ ภาพที่ 8.19 พบว่าเมื่อมีการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม จะเป็นการเพิ่มแรงดันที่ผลิตได้ของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจากภาพที่ 8.18 จะเห็นได้ชัดเจนว่ากราฟจะขยายออกมาทางขวา หรือเพิ่มแรงดันขึ้นนั่นเอง และจากภาพที่ 8.19 จะเห็นว่าช่วงแรงดันประมาณ 275 V จะมียอดของกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมาอีกหนึ่งยอด ซึ่งในการหาจุดทำงานสูงสุดอาจ

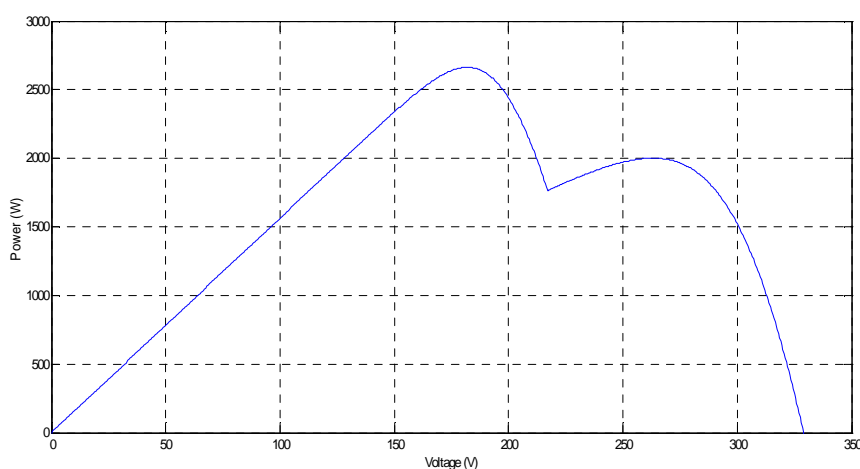
เกิดความผิดพลาดได้ ซึ่งจากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองในบทที่ 5 จะได้ค่าจุดทำงานสูงสุดที่แท้จริง คือที่ กระแส 7 A หรือก็คือกระแสที่จุดทำงานสูงสุดของรุ่นที่เล็กกว่า แรงดัน 450.59 V และได้กำลังไฟสูงสุด 3,154 W

8.2.2 ผลทดสอบเมื่อต่ออาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ต่างรุ่นกันแบบขนาน

ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 5 เมื่อนำอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ต่อขนานกันจะเป็นการเพิ่มระดับกระแสของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ ในขณะที่แรงดันที่ผลิตได้จะยังคงเป็นค่าๆหนึ่ง ซึ่งอาร์เรย์ทั้งสองจะผลิตได้เท่ากัน โดย I-V curve และ P-V curve ที่ได้จากการต่อขนานของอาร์เรย์ทั้งสองจะเป็นดังภาพที่ 8.20 และ ภาพที่ 8.21



ภาพที่ 8.20 I-V curve ของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์เมื่อประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ 2 รุ่นแบบขนาน



ภาพที่ 8.21 P-V curve ของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์เมื่อประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ 2 รุ่นแบบขนาน

จากภาพที่ 8.20 และ ภาพที่ 8.21 พบว่าเมื่อมีการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน จะเป็นการเพิ่มกระแสที่ผลิตได้ของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจากภาพที่ 8.20 จะพบว่ากราฟจะขยายออกมาทางด้านบน ในช่วงที่เซลล์แสงอาทิตย์รุ่นเล็กยังจ่ายแรงดันได้ หรือเพิ่มกระแสขึ้นนั่นเอง และจากภาพที่ 8.21 จะเห็นว่าช่วงแรงดันประมาณ 175 V จะมียอดของกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นไปอีก หนึ่งยอดเช่นเดียวกับการต่อแบบอนุกรม ซึ่งในการหาจุดทำงานสูงสุดอาจเกิดความผิดพลาดได้ ซึ่งจากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองในบทที่ 5 จะได้ค่าจุดทำงานสูงสุดที่แท้จริง คือที่ แรงดัน 172.8 V หรือก็คือแรงดันที่จุดทำงานสูงสุดของรุ่นที่เล็กกว่า กระแส 15.19 A และได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 2,624 W

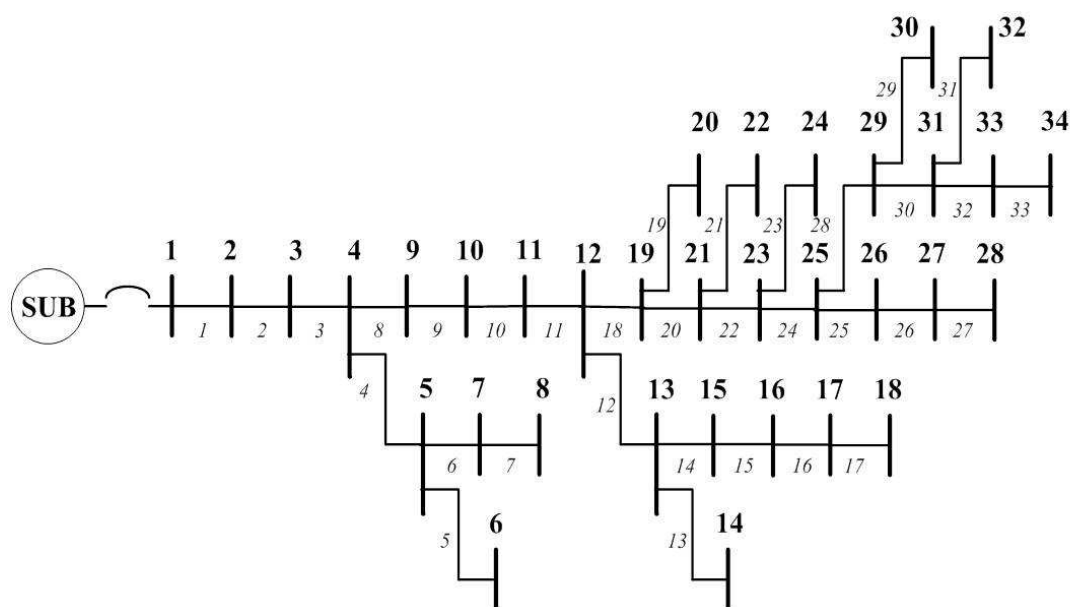
8.2.3 สรุปผลการทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับการเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์นี้ โดยมากจะเกิดจากการนำโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มาติดตั้งเพิ่มเติมจากอาร์เรย์ที่มีอยู่เดิม โดยอาจจะนำโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์รุ่นอื่น หรืออาจเกิดการเสื่อมสภาพของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์เดิมที่ติดตั้งอยู่ ซึ่งแบบจำลองสามารถแสดงผลของการเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลแสงอาทิตย์ รวมถึงหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แท้จริง เมื่อเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ได้ แต่ในทางปฏิบัติแล้ว สำหรับการทำงานของ MPPT เช่น วิธีรบกวนและสังเกตุ จะทำให้เกิดการสูญเสียประสิทธิภาพของการผลิตกำลังไฟฟ้า เนื่องจากเกิดการระบุงค่าที่ผิดไปจากจุดยอดของกำลังไฟฟ้าหลายจุด การทำให้เกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จึงไม่ควรทำ โดยจากการสอบถามกับผู้ทำกิจการ โซลาร์ฟาร์ม (Solar farm) พบว่าในการติดตั้งอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์จะมีการนำโมดูลแต่ละ โมดูลมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ให้มีประสิทธิภาพในการผลิตกำลังไฟฟ้าต่างกันไม่เกิน 2%

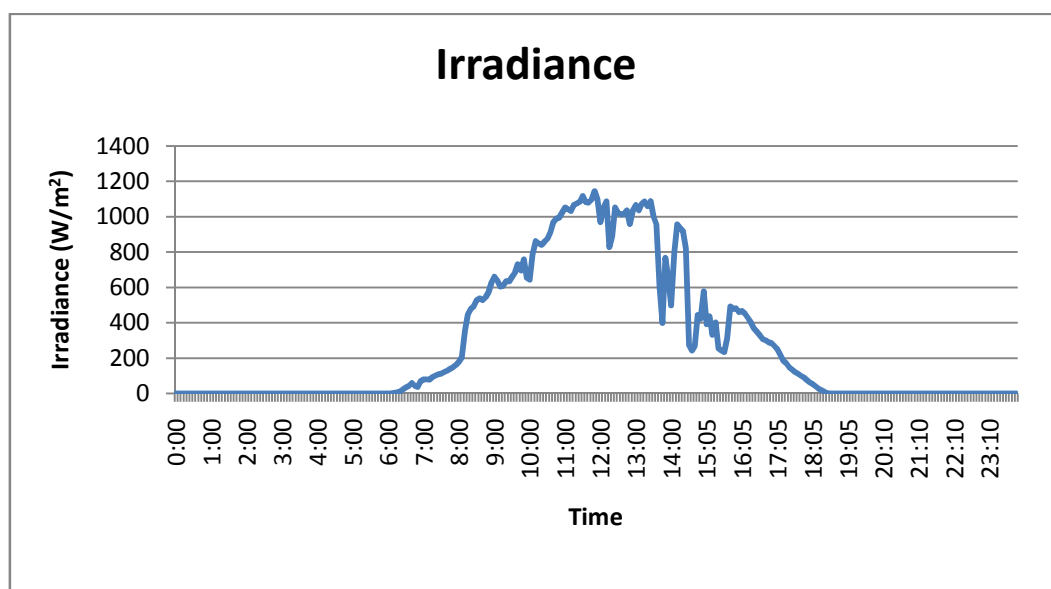
8.3 ผลการทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า

สำหรับหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งแบบจำลองสามารถจำลองการจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสงและอุณหภูมิระหว่างวัน โดยพิจารณาใช้อาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC200GT ของบริษัทเคียวเซรา จำกัด ซึ่งมีพารามิเตอร์พื้นฐานดังตารางที่ 8.1 และใช้อินเวอร์เตอร์รุ่น Sunny Central 1000MV ตามตารางที่ 3.2 ทดสอบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าทำ

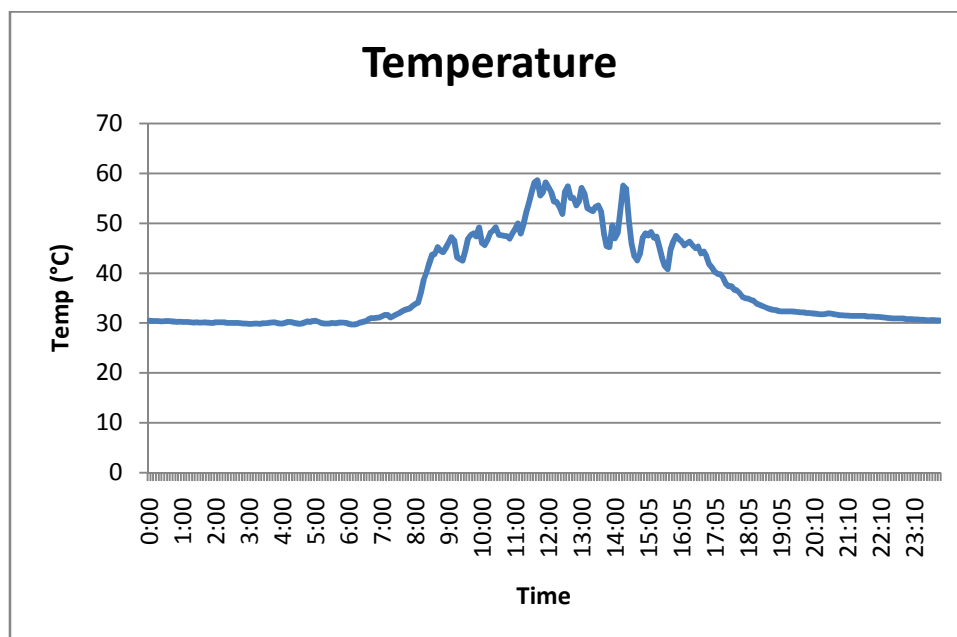
ทราย 34 บัส ซึ่งมีระบบดังภาพที่ 8.22 โดยจะติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าไปที่ บัส 31 ของระบบทำทราย และผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 1.51Ω โดยใช้ข้อมูลความเข้มแสงและอุณหภูมิของวันที่ 25 พฤษภาคม 2555 วัดจากระบบทดสอบในบัทที่ 7 ซึ่งมีข้อมูลดัง ภาพที่ 8.23 และ ภาพที่ 8.24



ภาพที่ 8.22 ระบบทำทราย 34 บัส



ภาพที่ 8.23 ความเข้มแสง ณ วันที่ 25 พฤษภาคม 2555



ภาพที่ 8.24 อุณหภูมิ ณ วันที่ 25 พฤษภาคม 2555

ทำการทดสอบโดยแบ่งการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าโครงข่ายไฟฟ้าเป็น 2 โหมดคือ (1) PQ mode และ (2) PV mode

8.3.1 PQ mode

สำหรับ PQ mode ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะทำงานโดยการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า โดยข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าก่อนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นดังตารางที่ 8.5

ตารางที่ 8.5 ข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบทำทรา

Bus #	Voltage		Generation		Load	
	Mag (p.u.)	Ang (deg)	P (MW)	Q (MVA _r)	P (MW)	Q (MVA _r)
1	1	0	9.05	5.83	-	-
2	0.999	-0.036	-	-	-	-
3	0.994	-0.187	-	-	-	-
4	0.988	-0.391	-	-	-	-
5	0.988	-0.422	-	-	-	-
6	0.988	-0.422	-	-	0.53	0.33
7	0.987	-0.44	-	-	-	-

8	0.987	-0.44	-	-	0.66	0.41
9	0.988	-0.4	-	-	0.07	0.04
10	0.988	-0.418	-	-	0.33	0.2
11	0.987	-0.451	-	-	0.53	0.33
12	0.968	-1.111	-	-	-	-
13	0.967	-1.152	-	-	-	-
14	0.967	-1.153	-	-	0.66	0.41
15	0.966	-1.197	-	-	0.17	0.1
16	0.964	-1.239	-	-	0.62	0.39
17	0.963	-1.272	-	-	0.99	0.61
18	0.963	-1.286	-	-	0.66	0.41
19	0.968	-1.116	-	-	-	-
20	0.968	-1.116	-	-	0.07	0.04
21	0.967	-1.153	-	-	-	-
22	0.967	-1.153	-	-	0.33	0.2
23	0.966	-1.187	-	-	-	-
24	0.966	-1.194	-	-	1.65	1.02
25	0.965	-1.211	-	-	-	-
26	0.965	-1.212	-	-	0.11	0.07
27	0.965	-1.216	-	-	-	-
28	0.965	-1.216	-	-	0.03	0.02
29	0.965	-1.235	-	-	-	-
30	0.964	-1.237	-	-	0.99	0.61
31	0.964	-1.244	-	-	-	-
32	0.964	-1.244	-	-	0.33	0.2
33	0.964	-1.247	-	-	-	-
34	0.964	-1.247	-	-	0.17	0.1
		Total:	8.24	5.78	8.9	5.5

การทดสอบในส่วนนี้จะทดสอบเมื่อปรับค่าให้ไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟและปรับค่าตัวประกอบกำลังเป็น 0.95 โดยให้อาเรย์มีการต่อโมดูลแบบอนุกรม 30 โมดูลเพื่อให้แรงดันที่ผลิตได้อยู่ในช่วงที่อินเวอร์เตอร์ทำงาน และแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนคือ (1) กรณีปกติโดยอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งโมดูลแบบอนุกรม 30 โมดูลและแบบขนาน 150 โมดูล (2) กรณีอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้เกินขีดจำกัดของอินเวอร์เตอร์ โดยอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งโมดูลแบบอนุกรม 30 โมดูลและแบบขนาน 200 โมดูล

8.3.1.1 กรณีปกติโดยอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งโมดูลแบบอนุกรม 30 โมดูลและแบบขนาน 150 โมดูล

สำหรับกรณีอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งโมดูลแบบอนุกรม (N_s) 30 โมดูลและแบบขนาน (N_{sh}) 150 โมดูล จะได้ผลทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังตารางที่ 8.6 ตารางที่ 8.6 ผลทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อกำหนด $N_s = 30$ และ $N_{sh} = 150$

Datasheet Parameter	Module	Array	Estimated Parameter	Module	Array
I_{sc} (A)	8.210	1231	I_{ph} (A)	8.212	1231
V_{oc} (V)	32.9	987	I_o (A)	1.71×10^{-7}	3.184×10^{-5}
V_{mpp} (V)	26.3	789	R_s (Ω)	0.2172	0.0423
I_{mpp} (A)	7.61	1141	R_{sh} (Ω)	951.95	249.89
n_s	54	1620			

เมื่อนำมาพิจารณาในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะทดสอบมาตรฐาน (STC) จะได้ผลในส่วนของวงจรไฟฟ้ากระแสตรงดังตารางที่ 8.7 ตารางที่ 8.7 ผลทดสอบส่วนวงจรไฟฟ้ากระแสตรง

DC Part	
V_{pv} (V)	789
I_{pv} (A)	1141
P_{pv} (MW)	0.9

8.3.1.1.1 เมื่อปรับให้ไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า

สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าโดยทั่วไปจะจ่ายเพียงกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าเท่านั้น ไม่มีการปรับให้จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งได้ผลทดสอบในส่วนของอินเวอร์เตอร์และโครงข่ายไฟฟ้าดังตารางที่ 8.8

ตารางที่ 8.8 ผลทดสอบในส่วนของอินเวอร์เตอร์และวงจรไฟฟ้ากระแสสลับในสถานะ STC

PQ Mode ($Q_{Grid} = 0$)			
Inverter		Grid power system (AC part)	
P_{Inv} (MW)	0.9006	P_{Grid} (MW)	0.9000
Q_{Inv} (MVar)	0.0392	Q_{Grid} (MVar)	0
V_{Inv} (p.u.)	0.9679	V_{Grid} (p.u.)	0.9670
θ (°)	1.57	θ_{Grid} (°)	-0.95
M	0.7633		

ได้ผลข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบท่าทรายดังตารางที่ 8.9

ตารางที่ 8.9 ข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าที่สถานะ STC

Bus #	Voltage		Generation		Load	
	Mag(pu)	Ang(deg)	P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)
1	1	0	8.12	5.77	-	-
2	0.999	-0.031	-	-	-	-
3	0.995	-0.159	-	-	-	-
4	0.989	-0.333	-	-	-	-
5	0.988	-0.364	-	-	-	-
6	0.988	-0.364	-	-	0.53	0.33
7	0.988	-0.382	-	-	-	-
8	0.988	-0.382	-	-	0.66	0.41
9	0.989	-0.34	-	-	0.07	0.04
10	0.988	-0.355	-	-	0.33	0.2

11	0.987	-0.383	-	-	0.53	0.33
12	0.97	-0.913	-	-	-	-
13	0.969	-0.954	-	-	-	-
14	0.969	-0.955	-	-	0.66	0.41
15	0.967	-0.998	-	-	0.17	0.1
16	0.966	-1.041	-	-	0.62	0.39
17	0.965	-1.074	-	-	0.99	0.61
18	0.965	-1.088	-	-	0.66	0.41
19	0.97	-0.916	-	-	-	-
20	0.97	-0.916	-	-	0.07	0.04
21	0.969	-0.939	-	-	-	-
22	0.969	-0.939	-	-	0.33	0.2
23	0.968	-0.96	-	-	-	-
24	0.968	-0.967	-	-	1.65	1.02
25	0.967	-0.964	-	-	-	-
26	0.967	-0.966	-	-	0.11	0.07
27	0.967	-0.969	-	-	-	-
28	0.967	-0.969	-	-	0.03	0.02
29	0.967	-0.967	-	-	-	-
30	0.967	-0.968	-	-	0.99	0.61
31	0.967	-0.953	0.9	0	-	-
32	0.967	-0.953	-	-	0.33	0.2
33	0.967	-0.956	-	-	-	-
34	0.967	-0.956	-	-	0.17	0.1
Total:			9.02	5.77	8.88	5.5

และได้ผลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 31 ตลอดทั้งวันดัง

ตารางที่ 8.10

ตารางที่ 8.10 ผลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 31 ตลอดทั้งวัน

Time	Pgrid (MW)	Pinv (MW)	Qgrid (MVar)	Qinv (MVar)	Vgrid (p.u.)	Vinv (p.u.)	pfgrid
1:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
2:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
3:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
4:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
5:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
6:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
7:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
8:00 AM	0.081	0.082	0	0	0.965	0.965	1
9:00 AM	0.144	0.144	0	0.002	0.965	0.965	1
10:00 AM	0.244	0.244	0	0.004	0.965	0.965	1
11:00 AM	0.499	0.499	0	0.011	0.966	0.966	1
12:00 PM	0.666	0.666	0	0.021	0.966	0.967	1
1:00 PM	0.909	0.91	0	0.04	0.967	0.968	1
2:00 PM	0.577	0.577	0	0.015	0.966	0.966	1
3:00 PM	0.367	0.368	0	0.006	0.965	0.966	1
4:00 PM	0.531	0.531	0	0.013	0.966	0.966	1
5:00 PM	0.289	0.29	0	0.004	0.965	0.965	1
6:00 PM	0.242	0.243	0	0.003	0.965	0.965	1
7:00 PM	0.044	0.044	0	0	0.964	0.964	1
8:00 PM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
9:00 PM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
10:00 PM	0	0	0	0	0.964	0.964	0

11:00 PM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
12:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0

จากผลทดสอบในตารางที่ 8.8 พบว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบเพียงอย่างเดียว แต่ในส่วนของอินเวอร์เตอร์จะมีการจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟเพื่อชดเชยที่เสียไปในหม้อแปลง และจากผลในตารางที่ 8.9 พบว่าการติดระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าไปที่บัส 31 จะช่วยให้ยกระดับแรงดันของบัสนั้นขึ้นมาเพียงเล็กน้อย ซึ่งไม่เป็นผลเสียหายต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในส่วนของ

ตารางที่ 8.10 จะแสดงผลของการผลิตกำลังไฟฟ้าตลอดทั้งวัน ซึ่งการผลิตไฟฟ้าจะดีที่สุดในช่วงเวลากลางวันถึงเวลาบ่ายโมงซึ่งเป็นช่วงที่มีความเข้มแสงมากที่สุดนั่นเอง

8.3.1.1.2 เมื่อปรับให้มีการจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟโดยปรับค่าตัวประกอบกำลังเป็น 0.95

ในส่วนนี้จะเป็นการทดสอบเมื่อมีการปรับค่าตัวประกอบกำลังของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า เพื่อพิจารณาการจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งได้ผลทดสอบในส่วนของอินเวอร์เตอร์และโครงข่ายไฟฟ้าดังตารางที่ 8.11

ตารางที่ 8.11 ผลทดสอบในส่วนของอินเวอร์เตอร์และวงจรไฟฟ้ากระแสสลับในสภาวะ STC

PQ Mode (Power factor = 0.95)			
Inverter		Grid power system (AC part)	
P_{Inv} (MW)	0.9006	P_{Grid} (MW)	0.9000
Q_{Inv} (MVA _r)	0.3400	Q_{Grid} (MVA _r)	0.3000
V_{Inv} (p.u.)	0.9835	V_{Grid} (p.u.)	0.9686
θ (°)	1.47	θ_{Grid} (°)	-1.00
M	0.7756		

ได้ผลข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบท่าทรายดังตารางที่ 8.12

ตารางที่ 8.12 ผลทดสอบในส่วนของอินเวอร์เตอร์และวงจรไฟฟ้ากระแสสลับในสถานะ STC

Bus	Voltage		Generation		Load	
	Mag(pu)	Ang(deg)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)
1	1	0	8.11	5.47	-	-
2	0.999	-0.031	-	-	-	-
3	0.995	-0.164	-	-	-	-
4	0.989	-0.343	-	-	-	-
5	0.989	-0.374	-	-	-	-
6	0.988	-0.373	-	-	0.53	0.33
7	0.988	-0.391	-	-	-	-
8	0.988	-0.391	-	-	0.66	0.41
9	0.989	-0.35	-	-	0.07	0.04
10	0.989	-0.365	-	-	0.33	0.2
11	0.988	-0.394	-	-	0.53	0.33
12	0.971	-0.945	-	-	-	-
13	0.97	-0.986	-	-	-	-
14	0.97	-0.987	-	-	0.66	0.41
15	0.969	-1.03	-	-	0.17	0.1
16	0.967	-1.072	-	-	0.62	0.39
17	0.967	-1.105	-	-	0.99	0.61
18	0.966	-1.119	-	-	0.66	0.41
19	0.971	-0.948	-	-	-	-
20	0.971	-0.948	-	-	0.07	0.04
21	0.97	-0.974	-	-	-	-

22	0.97	-0.974	-	-	0.33	0.2
23	0.969	-0.996	-	-	-	-
24	0.969	-1.004	-	-	1.65	1.02
25	0.969	-1.004	-	-	-	-
26	0.969	-1.005	-	-	0.11	0.07
27	0.969	-1.008	-	-	-	-
28	0.969	-1.008	-	-	0.03	0.02
29	0.969	-1.01	-	-	-	-
30	0.969	-1.011	-	-	0.99	0.61
31	0.969	-1	0.9	0.3	-	-
32	0.969	-1	-	-	0.33	0.2
33	0.969	-1.003	-	-	-	-
34	0.969	-1.003	-	-	0.17	0.1
Total:			9.01	5.76	8.88	5.5

และได้ผลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 31 ตลอดทั้งวันดังตารางที่ 8.13

ตารางที่ 8.13 ผลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 31 ตลอดทั้งวัน

Time	Pgrid (MW)	Pinv (MW)	Qgrid (MVA _r)	Qinv (MVA _r)	Vgrid (p.u.)	Vinv (p.u.)	pfgrid
1:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
2:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
3:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
4:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
5:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
6:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
7:00 AM	0.006	0.006	0.002	0.004	0.964	0.964	0.95
8:00 AM	0.081	0.082	0.027	0.028	0.965	0.966	0.95
9:00 AM	0.145	0.144	0.048	0.049	0.965	0.967	0.95

10:00 AM	0.244	0.244	0.08	0.083	0.965	0.969	0.95
11:00 AM	0.499	0.499	0.164	0.178	0.967	0.975	0.95
12:00 PM	0.666	0.666	0.219	0.243	0.967	0.978	0.95
1:00 PM	0.91	0.91	0.299	0.343	0.969	0.984	0.95
2:00 PM	0.577	0.577	0.19	0.207	0.967	0.976	0.95
3:00 PM	0.368	0.368	0.121	0.128	0.966	0.972	0.95
4:00 PM	0.531	0.531	0.174	0.19	0.967	0.975	0.95
5:00 PM	0.291	0.29	0.096	0.1	0.966	0.97	0.95
6:00 PM	0.242	0.243	0.08	0.083	0.965	0.969	0.95
7:00 PM	0.045	0.044	0.015	0.015	0.965	0.965	0.95
8:00 PM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
9:00 PM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
10:00 PM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
11:00 PM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
12:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0

จากผลทดสอบในตารางที่ 8.13 พบว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟเข้าระบบตามค่าตัวประกอบกำลัง และจากผลในตารางที่ 8.12 พบว่าการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าไปที่บัส 31 จะช่วยให้ยกระดับแรงดันของบัสนั้นขึ้นมาได้มากกว่าการที่จ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟจะส่งผลต่อระดับแรงดันที่บัสมากกว่ากำลังไฟฟ้าจริง ซึ่งไม่เป็นผลเสียหายต่อระบบโครงข่ายไฟฟ้า ในส่วนของตารางที่ 8.13 จะแสดงผลของการผลิตกำลังไฟฟ้าตลอดทั้งวัน ซึ่งการจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟจะจ่ายได้มาก-น้อยตามกำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายออกมา ตามผลของตัวประกอบกำลัง

8.3.1.2 กรณีอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้เกินขีดจำกัดของอินเวอร์เตอร์ โดยอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งโมดูลแบบอนุกรม 30 โมดูลและแบบขนาน 200 โมดูล

สำหรับกรณีอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งโมดูลแบบอนุกรม (N_s) 30 โมดูลและแบบขนาน (N_{sh}) 200 โมดูล ซึ่งจะได้ผลทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังตารางที่ 8.14

ตารางที่ 8.14 ผลทดสอบระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อกำหนด $N_s = 30$ และ $N_{sh} = 200$

Datasheet Parameter	Module	Array	Estimated Parameter	Module	Array
I_{sc} (A)	8.210	1642	I_{ph} (A)	8.212	1642.4
V_{oc} (V)	32.9	987	I_o (A)	1.71×10^{-7}	3.42×10^{-5}
V_{mpp} (V)	26.3	789	R_s (Ω)	0.2172	0.03258
I_{mpp} (A)	7.61	1522	R_{sh} (Ω)	951.95	142.7925
n_s	54	1620			

เมื่อนำมาพิจารณาในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะทดสอบมาตรฐาน (STC) จะได้ผลในส่วนของวงจรไฟฟ้ากระแสตรงดังตารางที่ 8.15

ตารางที่ 8.15 ผลทดสอบส่วนวงจรไฟฟ้ากระแสตรง

DC Part	
V_{pv} (V)	789
I_{pv} (A)	1522
P_{pv} (MW)	1.2

8.3.1.2.1 เมื่อปรับให้ไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า

สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าโดยทั่วไปจะจ่ายเพียงกำลังไฟฟ้าจริงเข้าสู่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าเท่านั้น ไม่มีการปรับให้จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า แต่ในการทดลองนี้กำลังไฟฟ้าจริงที่เข้าสู่อินเวอร์เตอร์มีค่ามากกว่ากำลังไฟฟ้าจริงขาเข้าที่อินเวอร์เตอร์สามารถรับได้ ในกรณีนี้อินเวอร์เตอร์จะทำการปรับค่ากำลังไฟฟ้าลงไปที่ขีดจำกัดที่อินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ ซึ่งได้ผลทดสอบในส่วนของอินเวอร์เตอร์และโครงข่ายไฟฟ้าดังตารางที่ 8.16

ตารางที่ 8.16 ผลทดสอบในส่วนของอินเวอร์เตอร์และวงจรไฟฟ้ากระแสสลับในสถานะ STC

PQ Mode ($Q_{Grid} = 0$)			
Inverter		Grid power system (AC part)	
P_{Inv} (MW)	1.0000	P_{Grid} (MW)	1.0000
Q_{Inv} (MVar)	0.0487	Q_{Grid} (MVar)	0
V_{Inv} (p.u.)	0.9684	V_{Grid} (p.u.)	0.9672
θ (°)	1.87	θ_{Grid} (°)	-0.92
M	0.7637		

ได้ผลข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทำทราบดีดังตารางที่ 8.17

ตารางที่ 8.17 ข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าที่สถานะ STC

Bus #	Voltage		Generation		Load	
	Mag(pu)	Ang(deg)	P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)
1	1	0	8.02	5.77	-	-
2	0.999	-0.03	-	-	-	-
3	0.995	-0.156	-	-	-	-
4	0.989	-0.327	-	-	-	-

5	0.988	-0.358	-	-	-	-
6	0.988	-0.358	-	-	0.53	0.33
7	0.988	-0.376	-	-	-	-
8	0.988	-0.375	-	-	0.66	0.41
9	0.989	-0.334	-	-	0.07	0.04
10	0.988	-0.348	-	-	0.33	0.2
11	0.987	-0.375	-	-	0.53	0.33
12	0.97	-0.892	-	-	-	-
13	0.969	-0.933	-	-	-	-
14	0.969	-0.933	-	-	0.66	0.41
15	0.968	-0.976	-	-	0.17	0.1
16	0.966	-1.019	-	-	0.62	0.39
17	0.966	-1.052	-	-	0.99	0.61
18	0.965	-1.066	-	-	0.66	0.41
19	0.97	-0.894	-	-	-	-
20	0.97	-0.894	-	-	0.07	0.04
21	0.969	-0.916	-	-	-	-
22	0.969	-0.916	-	-	0.33	0.2
23	0.968	-0.935	-	-	-	-
24	0.968	-0.942	-	-	1.65	1.02
25	0.968	-0.937	-	-	-	-
26	0.968	-0.939	-	-	0.11	0.07
27	0.968	-0.942	-	-	-	-
28	0.968	-0.942	-	-	0.03	0.02
29	0.967	-0.938	-	-	-	-
30	0.967	-0.939	-	-	0.99	0.61
31	0.967	-0.921	1	0	-	-
32	0.967	-0.921	-	-	0.33	0.2
33	0.967	-0.924	-	-	-	-

34	0.967	-0.924	-	-	0.17	0.1
Total:			9.02	5.77	8.88	5.5

และได้ผลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 31 ตลอดทั้งวันดังตารางที่ 8.18

ตารางที่ 8.18 ผลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 31 ตลอดทั้งวัน

Time	Pgrid (MW)	Pinv (MW)	Qgrid (MVA _r)	Qinv (MVA _r)	Vgrid (p.u.)	Vinv (p.u.)	pfgrid
1:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
2:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
3:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
4:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
5:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
6:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
7:00 AM	0.008	0.008	0	0	0.964	0.964	1
8:00 AM	0.108	0.109	0	0	0.965	0.965	1
9:00 AM	0.192	0.192	0	0.003	0.965	0.965	1
10:00 AM	0.326	0.325	0	0.005	0.965	0.965	1
11:00 AM	0.666	0.666	0	0.021	0.966	0.967	1
12:00 PM	0.888	0.888	0	0.038	0.967	0.968	1
1:00 PM	1	1	0	0.049	0.967	0.968	1
2:00 PM	0.769	0.77	0	0.028	0.967	0.967	1
3:00 PM	0.49	0.49	0	0.012	0.966	0.966	1
4:00 PM	0.707	0.708	0	0.024	0.966	0.967	1
5:00 PM	0.386	0.387	0	0.007	0.965	0.966	1

6:00 PM	0.324	0.323	0	0.005	0.965	0.965	1
7:00 PM	0.06	0.059	0	0	0.964	0.964	1
8:00 PM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
9:00 PM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
10:00 PM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
11:00 PM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
12:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0

จากผลทดสอบในตารางที่ 8.16 พบว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าระบบเพียงอย่างเดียว แต่จ่ายได้เพียง 1 MW เท่านั้นเนื่องจากขีดจำกัดของอินเวอร์เตอร์ที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าออกได้เพียง 1 MVA และจากผลในตารางที่ 8.17 และ ตารางที่ 8.18 จะแสดงผลเช่นเดียวกับในหัวข้อ 8.3.1.2.1 ซึ่งจุดที่แตกต่างจริงมีเพียงช่วงเวลา 1.00 PM ที่จ่ายกำลังไฟฟ้าได้เท่ากับที่ถูกจำกัดจากอินเวอร์เตอร์เท่านั้น

8.3.1.2.2 เมื่อปรับให้มีการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟโดยปรับค่าตัวประกอบกำลังเป็น 0.95

ในส่วนนี้จะเป็นการทดสอบเมื่อมีการปรับค่าตัวประกอบกำลังของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า เพื่อพิจารณาการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งได้ผลทดสอบในส่วนของอินเวอร์เตอร์และโครงข่ายไฟฟ้างดังตารางที่ 8.19

ตารางที่ 8.19 ผลทดสอบในส่วนของอินเวอร์เตอร์และวงจรไฟฟ้ากระแสสลับในสถานะ STC

PQ Mode (Power factor = 0.95)			
Inverter		Grid power system (AC part)	
P_{Inv} (MW)	0.9506	P_{Grid} (MW)	0.9500
Q_{Inv} (MVA _r)	0.3700	Q_{Grid} (MVA _r)	0.3100
V_{Inv} (p.u.)	0.9847	V_{Grid} (p.u.)	0.9689
θ (°)	1.76	θ_{Grid} (°)	-0.9855
M	0.7766		

ได้ผลข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบท่าทรายดังตารางที่ 8.20
 ตารางที่ 8.20 ข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าที่สภาวะ STC

Bus #	Voltage		Generation		Load	
	Mag(pu)	Ang(deg)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)
1	1	0	8.06	5.45	-	-
2	0.999	-0.031	-	-	-	-
3	0.995	-0.163	-	-	-	-
4	0.989	-0.34	-	-	-	-
5	0.989	-0.371	-	-	-	-
6	0.989	-0.371	-	-	0.53	0.33
7	0.988	-0.389	-	-	-	-
8	0.988	-0.389	-	-	0.66	0.41
9	0.989	-0.348	-	-	0.07	0.04
10	0.989	-0.362	-	-	0.33	0.2
11	0.988	-0.391	-	-	0.53	0.33
12	0.971	-0.936	-	-	-	-
13	0.97	-0.977	-	-	-	-
14	0.97	-0.977	-	-	0.66	0.41
15	0.969	-1.02	-	-	0.17	0.1
16	0.968	-1.063	-	-	0.62	0.39
17	0.967	-1.096	-	-	0.99	0.61
18	0.966	-1.11	-	-	0.66	0.41
19	0.971	-0.939	-	-	-	-
20	0.971	-0.939	-	-	0.07	0.04
21	0.97	-0.964	-	-	-	-
22	0.97	-0.964	-	-	0.33	0.2
23	0.969	-0.985	-	-	-	-
24	0.969	-0.993	-	-	1.65	1.02
25	0.969	-0.992	-	-	-	-

26	0.969	-0.994	-	-	0.11	0.07
27	0.969	-0.997	-	-	-	-
28	0.969	-0.997	-	-	0.03	0.02
29	0.969	-0.998	-	-	-	-
30	0.969	-0.999	-	-	0.99	0.61
31	0.969	-0.986	0.95	0.31	-	-
32	0.969	-0.986	-	-	0.33	0.2
33	0.969	-0.989	-	-	-	-
34	0.969	-0.989	-	-	0.17	0.1
Total:			9.01	5.76	8.88	5.5

และได้ผลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 31 ตลอดทั้งวันดังตารางที่ 8.21

ตารางที่ 8.21 ผลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 31 ตลอดทั้งวัน

Time	Pgrid (MW)	Pinv (MW)	Qgrid (MVar)	Qinv (MVar)	Vgrid (p.u.)	Vinv (p.u.)	pfgrid
1:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
2:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
3:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
4:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
5:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
6:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
7:00 AM	0.008	0.008	0.003	0.001	0.964	0.964	0.95
8:00 AM	0.109	0.109	0.036	0.037	0.965	0.967	0.95
9:00 AM	0.193	0.192	0.063	0.064	0.965	0.968	0.95
10:00 AM	0.325	0.325	0.107	0.112	0.966	0.971	0.95
11:00 AM	0.665	0.666	0.219	0.242	0.967	0.978	0.95
12:00 PM	0.889	0.888	0.292	0.335	0.969	0.983	0.95
1:00 PM	0.95	0.95	0.312	0.365	0.969	0.985	0.95
2:00 PM	0.77	0.77	0.253	0.286	0.968	0.981	0.95

3:00 PM	0.49	0.49	0.161	0.174	0.967	0.975	0.95
4:00 PM	0.707	0.708	0.232	0.26	0.968	0.979	0.95
5:00 PM	0.386	0.387	0.127	0.135	0.966	0.972	0.95
6:00 PM	0.324	0.323	0.107	0.112	0.966	0.971	0.95
7:00 PM	0.059	0.059	0.019	0.019	0.965	0.965	0.95
8:00 PM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
9:00 PM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
10:00 PM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
11:00 PM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
12:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0

จากผลทดสอบในตารางที่ 8.19 พบว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟเข้าระบบตามค่าตัวประกอบกำลัง แต่ค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าจะลดลงเหลือเพียง 0.95 MW เท่านั้น เนื่องจากผลของการปรับค่าตัวประกอบกำลังเพื่อจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ทำให้กำลังไฟฟ้าปรากฏถึงขีดจำกัดของอินเวอร์เตอร์ (1 MVA) จึงต้องมีการลดกำลังไฟฟ้าจริงลง [45] และจากผลในตารางที่ 8.20 และตารางที่ 8.21 จะแสดงผลคล้ายในหัวข้อ 8.3.1.1.2 ซึ่งจุดที่แตกต่างจริงมีเพียงช่วง 1 PM ที่จ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟได้เท่ากับที่ถูกจำกัดจากอินเวอร์เตอร์เท่านั้น

8.3.2 PV mode

สำหรับ PV mode ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงและควบคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า โดยจะใช้ระบบเช่นเดียวกับหัวข้อที่ **Error! Reference source not found.** คือใช้อาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ต่ออนุกรมกัน 30 โมดูล และต่อขนานกัน 150 โมดูล ซึ่งจะได้ผลทดสอบในส่วนของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ดังตารางที่ 8.6 โดยจะทดสอบให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถควบคุมแรงดันที่บัส 31 เป็น 1 p.u. ได้ แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนคือ (1) ทดสอบโดยใช้ระบบทดสอบทำทราายปกติ (2) ทดสอบโดยใช้ระบบทดสอบทำทราายดัดแปลง

8.3.2.1 ทดสอบโดยใช้ระบบทำทราเยปกติ

ในส่วนนี้จะใช้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทดสอบกับระบบทดสอบทำทราเยปกติเหมือนหัวข้อที่ 8.3.1 โดยข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าจะเป็นดังตารางที่ 8.5 และได้ผลทดสอบในส่วนของอินเวอร์เตอร์และโครงข่ายไฟฟ้าในสภาวะ STC ดังตารางที่ 8.22

ตารางที่ 8.22 ผลทดสอบในส่วนของอินเวอร์เตอร์และวงจรไฟฟ้ากระแสสลับในสภาวะ STC

PV Mode ($V_{Grid} = 1$ p.u.)			
Inverter		Grid power system (AC part)	
P_{Inv} (MW)	0.9006	P_{Grid} (MW)	0.9000
Q_{Inv} (MVAr)	0.4821	Q_{Grid} (MVAr)	0.4338
V_{Inv} (p.u.)	0.9907	V_{Grid} (p.u.)	0.9694
θ (°)	1.43	θ_{Grid} (°)	-1.02
M	0.7813		

ได้ผลข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทำทราเยดังตารางที่ 8.23

ตารางที่ 8.23 ข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าที่สภาวะ STC

Bus #	Voltage		Generation		Load	
	Mag(pu)	Ang(deg)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)
1	1	0	8.11	5.32	-	-
2	0.999	-0.032	-	-	-	-
3	0.995	-0.166	-	-	-	-
4	0.99	-0.347	-	-	-	-

5	0.989	-0.378	-	-	-	-
6	0.989	-0.378	-	-	0.53	0.33
7	0.988	-0.396	-	-	-	-
8	0.988	-0.396	-	-	0.66	0.41
9	0.989	-0.355	-	-	0.07	0.04
10	0.989	-0.37	-	-	0.33	0.2
11	0.988	-0.399	-	-	0.53	0.33
12	0.972	-0.959	-	-	-	-
13	0.97	-1	-	-	-	-
14	0.97	-1.001	-	-	0.66	0.41
15	0.969	-1.044	-	-	0.17	0.1
16	0.968	-1.087	-	-	0.62	0.39
17	0.967	-1.119	-	-	0.99	0.61
18	0.967	-1.133	-	-	0.66	0.41
19	0.971	-0.963	-	-	-	-
20	0.971	-0.963	-	-	0.07	0.04
21	0.971	-0.989	-	-	-	-
22	0.971	-0.989	-	-	0.33	0.2
23	0.97	-1.013	-	-	-	-
24	0.97	-1.02	-	-	1.65	1.02
25	0.97	-1.022	-	-	-	-
26	0.97	-1.023	-	-	0.11	0.07
27	0.969	-1.027	-	-	-	-
28	0.969	-1.027	-	-	0.03	0.02
29	0.969	-1.03	-	-	-	-
30	0.969	-1.031	-	-	0.99	0.61
31	0.969	-1.021	0.9	0.43	-	-
32	0.969	-1.021	-	-	0.33	0.2
33	0.969	-1.025	-	-	-	-

34	0.969	-1.024	-	-	0.17	0.1
Total:			9.01	5.76	8.88	5.5

และได้ผลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 31 ตลอดทั้งวันดังตารางที่ 8.24

ตารางที่ 8.24 ผลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 31 ตลอดทั้งวัน

Time	Pgrid (MW)	Pinv (MW)	Qgrid (MVA _r)	Qinv (MVA _r)	Vgrid (p.u.)	Vinv (p.u.)	pfgrid
1:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
2:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
3:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
4:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
5:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
6:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
7:00 AM	0.006	0.006	0.003	0.003	0.964	0.964	0.905
8:00 AM	0.082	0.082	0.040	0.039	0.965	0.967	0.901
9:00 AM	0.145	0.144	0.070	0.071	0.965	0.968	0.900
10:00 AM	0.244	0.244	0.119	0.122	0.966	0.971	0.899
11:00 AM	0.499	0.499	0.241	0.256	0.967	0.979	0.900
12:00 PM	0.665	0.666	0.322	0.349	0.968	0.984	0.900
1:00 PM	0.910	0.910	0.417	0.466	0.969	0.990	0.909
2:00 PM	0.576	0.577	0.279	0.300	0.968	0.981	0.900
3:00 PM	0.367	0.368	0.178	0.186	0.966	0.975	0.900

4:00 PM	0.532	0.531	0.257	0.275	0.967	0.980	0.900
5:00 PM	0.290	0.290	0.140	0.145	0.966	0.973	0.900
6:00 PM	0.243	0.243	0.118	0.121	0.966	0.971	0.900
7:00 PM	0.044	0.044	0.021	0.022	0.965	0.966	0.899
8:00 PM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
9:00 PM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
10:00 PM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
11:00 PM	0	0	0	0	0.964	0.964	0
12:00 AM	0	0	0	0	0.964	0.964	0

จากผลทดสอบในตารางที่ 8.22 พบว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าระบบ แต่ไม่สามารถควบคุมให้แรงดันที่บัส 31 เป็น 1 p.u. ได้ เนื่องจากการจะควบคุมแรงดันที่บัสให้เป็น 1 p.u. ได้นั้นจะต้องจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่บัสเป็นปริมาณมาก ซึ่งอินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายได้เพียง 0.4338 MVA_r หรือที่ 1 MVA เท่านั้น ทำให้ไม่สามารถควบคุมแรงดันให้เท่ากับ 1 p.u. ได้ และจากผลในตารางที่ 8.23 และตารางที่ 8.24 จะแสดงผลให้เห็นชัดว่ามีการยกระดับแรงดันขึ้นมาจากผลของกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และในส่วนของ การจ่ายกำลังไฟฟ้าตลอดวันนั้นจะพบว่าในช่วงอื่นๆ ที่อินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้โดยไม่คิดขีดจำกัดการจ่ายกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ แต่จะคิดไปที่ข้อจำกัดด้านการควบคุมตัวประกอบกำลังให้ไม่ต่ำกว่า 0.9 แทน ซึ่งระบบจะพยายามจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟให้มากที่สุด จึงมีค่าตัวประกอบกำลัง 0.9 นำหน้า

8.3.2.2 ทดสอบโดยใช้ระบบทดสอบทำทรายัดแปลง

ในการทดสอบนี้จะมีการดัดแปลงระบบทดสอบทำทรายเพื่อแสดงในกรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าสามารถควบคุมแรงดันที่บัส 31 ได้ โดยจะมีการลดโหลดบางส่วนออกจากระบบทดสอบ และเพิ่มเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าจริง 1.5 MW และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 0.9 MVA_r ที่บัส 29 เพื่อช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อใช้จำลองเหตุการณ์ที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าสามารถควบคุมแรงดันที่จุดเชื่อมต่อได้ โดยข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบทดสอบทำทรายดัดแปลงจะเป็นดังตารางที่ 8.25

ตารางที่ 8.25 ข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบทดสอบทำทราบดีดแปลง

Bus	Voltage		Generation		Load	
	#	Mag(pu)	Ang(deg)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)
1	1	0	3.23	0.21	-	-
2	1	-0.019	-	-	-	-
3	0.999	-0.096	-	-	-	-
4	0.998	-0.199	-	-	-	-
5	0.997	-0.229	-	-	-	-
6	0.997	-0.229	-	-	0.53	0.33
7	0.997	-0.247	-	-	-	-
8	0.996	-0.247	-	-	0.66	0.41
9	0.998	-0.203	-	-	0.07	0.04
10	0.998	-0.21	-	-	0.33	0.2
11	0.998	-0.224	-	-	-	-
12	0.998	-0.502	-	-	-	-
13	0.998	-0.528	-	-	-	-
14	0.998	-0.529	-	-	0.66	0
15	0.997	-0.548	-	-	0.17	0
16	0.997	-0.564	-	-	0.62	0
17	0.997	-0.564	-	-	-	-
18	0.997	-0.564	-	-	-	-
19	0.998	-0.503	-	-	-	-
20	0.998	-0.503	-	-	0.07	0
21	0.998	-0.51	-	-	-	-
22	0.998	-0.51	-	-	-	-
23	0.998	-0.518	-	-	-	-
24	0.998	-0.518	-	-	-	-
25	0.998	-0.528	-	-	-	-
26	0.998	-0.53	-	-	0.11	0

27	0.998	-0.535	-	-	-	-
28	0.998	-0.535	-	-	0.03	0
29	0.999	-0.537	1.5	0.9	-	-
30	0.999	-0.539	-	-	0.99	0
31	0.999	-0.548	0	0	-	-
32	0.999	-0.549	-	-	0.33	0
33	0.999	-0.551	-	-	-	-
34	0.999	-0.551	-	-	0.17	0.1
Total:			4.73	1.11	4.72	1.08

เมื่อทำการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าที่บัส 31 จะได้ผลทดสอบในส่วนของอินเวอร์เตอร์และโครงข่ายไฟฟ้าในสถานะ STC ดังตารางที่ 8.26

ตารางที่ 8.26 ผลทดสอบในส่วนของอินเวอร์เตอร์และวงจรไฟฟ้ากระแสสลับในสถานะ STC

PV Mode ($V_{Grid} = 1$ p.u.)			
Inverter		Grid power system (AC part)	
P_{Inv} (MW)	0.9006	P_{Grid} (MW)	0.9000
Q_{Inv} (MVar)	-0.1669	Q_{Grid} (MVar)	-0.2055
V_{Inv} (p.u.)	0.9915	V_{Grid} (p.u.)	1
θ (°)	2.14	θ_{Grid} (°)	-0.24
M	0.7819		

ได้ผลข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบท่าทรายตัดแปลงดังตารางที่ 8.27

ตารางที่ 8.27 ข้อมูลการไหลของกำลังไฟฟ้าที่สถานะ STC

Bus	Voltage		Generation		Load	
	Mag(pu)	Ang(deg)	P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)
1	1	0	2.33	0.4	-	-

2	1	-0.013	-	-	-	-
3	0.999	-0.065	-	-	-	-
4	0.998	-0.135	-	-	-	-
5	0.997	-0.165	-	-	-	-
6	0.997	-0.165	-	-	0.53	0.33
7	0.997	-0.183	-	-	-	-
8	0.997	-0.183	-	-	0.66	0.41
9	0.998	-0.137	-	-	0.07	0.04
10	0.998	-0.141	-	-	0.33	0.2
11	0.998	-0.148	-	-	-	-
12	0.999	-0.289	-	-	-	-
13	0.999	-0.315	-	-	-	-
14	0.999	-0.316	-	-	0.66	0
15	0.998	-0.335	-	-	0.17	0
16	0.998	-0.351	-	-	0.62	0
17	0.998	-0.351	-	-	-	-
18	0.998	-0.351	-	-	-	-
19	0.999	-0.288	-	-	-	-
20	0.999	-0.288	-	-	0.07	0
21	0.999	-0.282	-	-	-	-
22	0.999	-0.282	-	-	-	-
23	0.999	-0.275	-	-	-	-
24	0.999	-0.275	-	-	-	-
25	1	-0.265	-	-	-	-
26	1	-0.267	-	-	0.11	0
27	1	-0.271	-	-	-	-
28	1	-0.272	-	-	0.03	0
29	1	-0.251	1.5	0.9	-	-
30	1	-0.253	-	-	0.99	0

31	1	-0.238	0.9	-0.21	-	-
32	1	-0.239	-	-	0.33	0
33	1	-0.241	-	-	-	-
34	1	-0.241	-	-	0.17	0.1
Total:			4.73	1.09	4.72	1.08

และได้ผลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 31 ตลอดทั้งวันดังตารางที่ 8.28

ตารางที่ 8.28 ผลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่บัส 31 ตลอดทั้งวัน

Time	Pgrid (MW)	Pinv (MW)	Qgrid (MVA _r)	Qinv (MVA _r)	Vgrid (p.u.)	Vinv (p.u.)	pfgrid
1:00 AM	0	0	0.000	0	0.999	0.999	0
2:00 AM	0	0	0.000	0	0.999	0.999	0
3:00 AM	0	0	0.000	0	0.999	0.999	0
4:00 AM	0	0	0.000	0	0.999	0.999	0
5:00 AM	0	0	0.000	0	0.999	0.999	0
6:00 AM	0	0	0.000	0	0.999	0.999	0
7:00 AM	0.007	0.006	0.003	0.004	0.999	0.999	0.9
8:00 AM	0.082	0.082	0.040	0.041	0.999	0.999	0.899
9:00 AM	0.144	0.144	0.070	0.07	0.999	1.001	0.9
10:00 AM	0.244	0.244	0.118	0.122	1	1.003	0.9
11:00 AM	0.499	0.499	0.000	0.011	1	1.005	1
12:00 PM	0.666	0.666	-0.086	-0.065	1	1	-0.992
1:00 PM	0.91	0.91	-0.210	-0.171	1	0.997	-0.974
2:00 PM	0.578	0.577	-0.041	-0.025	1	0.991	-0.997
3:00 PM	0.367	0.368	0.066	0.072	1	0.998	0.984
4:00 PM	0.53	0.531	-0.017	-0.005	1	1.003	-0.999

5:00 PM	0.29	0.29	0.107	0.112	1	0.999	0.938
6:00 PM	0.243	0.243	0.118	0.121	1	1.005	0.9
7:00 PM	0.044	0.044	0.022	0.021	0.999	0.999	0.899
8:00 PM	0	0	0.000	0	0.999	0.999	0
9:00 PM	0	0	0.000	0	0.999	0.999	0
10:00 PM	0	0	0.000	0	0.999	0.999	0
11:00 PM	0	0	0.000	0	0.999	0.999	0
12:00 AM	0	0	0.000	0	0.999	0.999	0

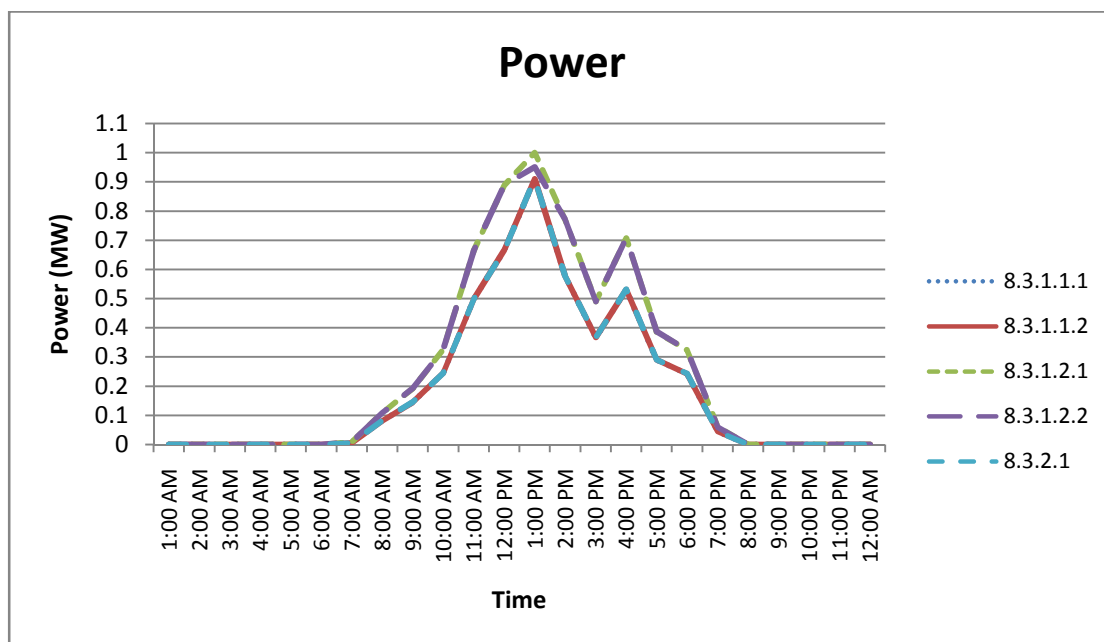
จากผลทดสอบในตารางที่ 8.26 พบว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงเข้าระบบแต่จะรับกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟออกจากระบบแทน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเพิ่มกำลังไฟฟ้าจริงเข้าไปจะทำให้แรงดันที่บัส 31 มีค่าเกิน 1 p.u. ทำให้อินเวอร์เตอร์ต้องมีการปรับการควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และจากผลในตารางที่ 8.27 และตารางที่ 8.28 จะแสดงผลให้เห็นชัดว่ามีการควบคุมแรงดันที่บัส 31 ที่ 1 p.u. ได้ โดยที่ค่าตัวประกอบกำลังจะมีการปรับทั้งเป็นแบบนำหน้าและตามหลังตามแต่สภาพแรงดัน ณ ขณะนั้น

8.3.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบในกรณี 8.3.1.1.1, 8.3.1.1.2, 8.3.1.2.1, 8.3.1.2.2, และ 8.3.2.1

ส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบผลทดสอบเมื่อปรับค่ากรณีต่างๆ ที่ได้ทดสอบไปแล้วข้างต้น โดยจะแสดงการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริง, กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ, และแรงดันไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า

8.3.3.1 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริง

ส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้จากกรณีต่างๆ ซึ่งเมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกันจะได้ดังภาพที่ 8.25



ภาพที่ 8.25 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้ในแต่ละกรณี

โดยที่

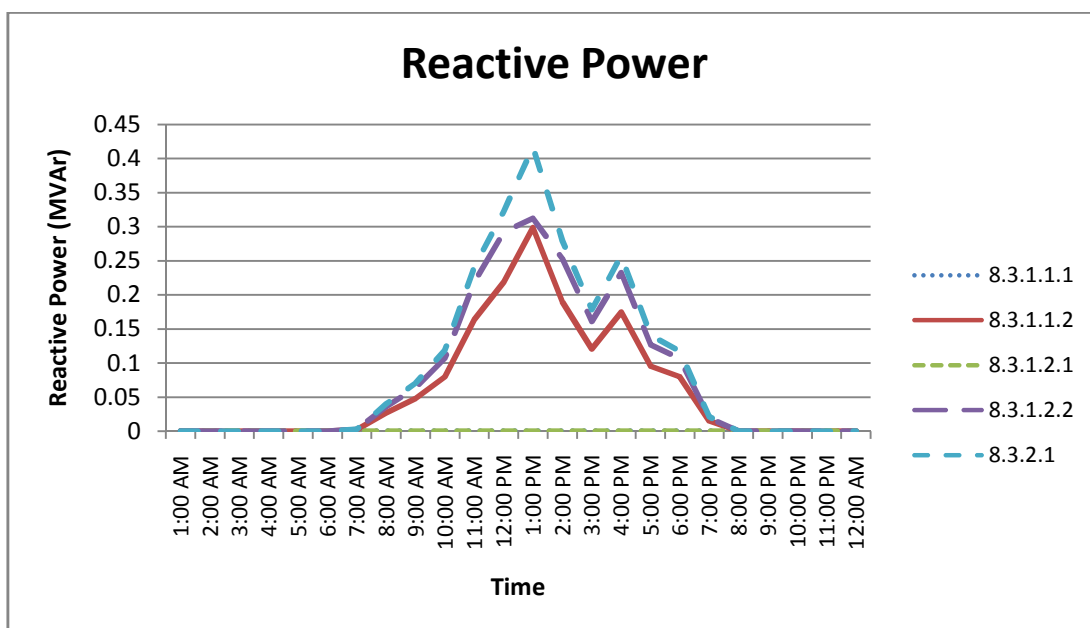
- 8.3.1.1.1 คือ กรณี PQ mode ปกติ ไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ
- 8.3.1.1.2 คือ กรณี PQ mode ปกติ มีการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ตัวประกอบกำลัง 0.95
- 8.3.1.2.1 คือ กรณี PQ mode ที่อาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าขีดจำกัดของอินเวอร์เตอร์ ไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ
- 8.3.1.2.2 คือ กรณี PQ mode ที่อาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าขีดจำกัดของอินเวอร์เตอร์ มีการจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ตัวประกอบกำลัง 0.95
- 8.3.2.1 คือ กรณี PV mode ระบบทดสอบทำทราายปกติ

จากภาพที่ 8.25 พบว่ากรณี 8.3.1.2.1 และ 8.3.1.2.2 จะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าจริงได้มากกว่ากรณีอื่นๆ เนื่องจากจำนวน โมดูลที่ต่อแบบอนุกรมมีมากกว่า ทำให้อาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่านั่นเอง แต่ในช่วง 13:00 PM หรือช่วงที่ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด กรณี 8.3.1.2.1 จะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าจริงได้สูงสุด 1 MW ตามขีดจำกัดของอินเวอร์เตอร์ ในขณะที่กรณี 8.3.1.2.2 จะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้า

จริงได้เพียง 0.95 MW เท่านั้น เนื่องจากการปรับตั้งค่าตัวประกอบกำลังไว้ที่ 0.95 ซึ่งต้องมีการจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟด้วย กำลังไฟฟ้าจริงจึงถูกจำกัดอยู่ที่ 0.95 MW เท่านั้น

8.3.3.2 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ

ส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ผลิตได้จากกรณีต่างๆ ซึ่งเมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกันจะได้ดังภาพที่ 8.26

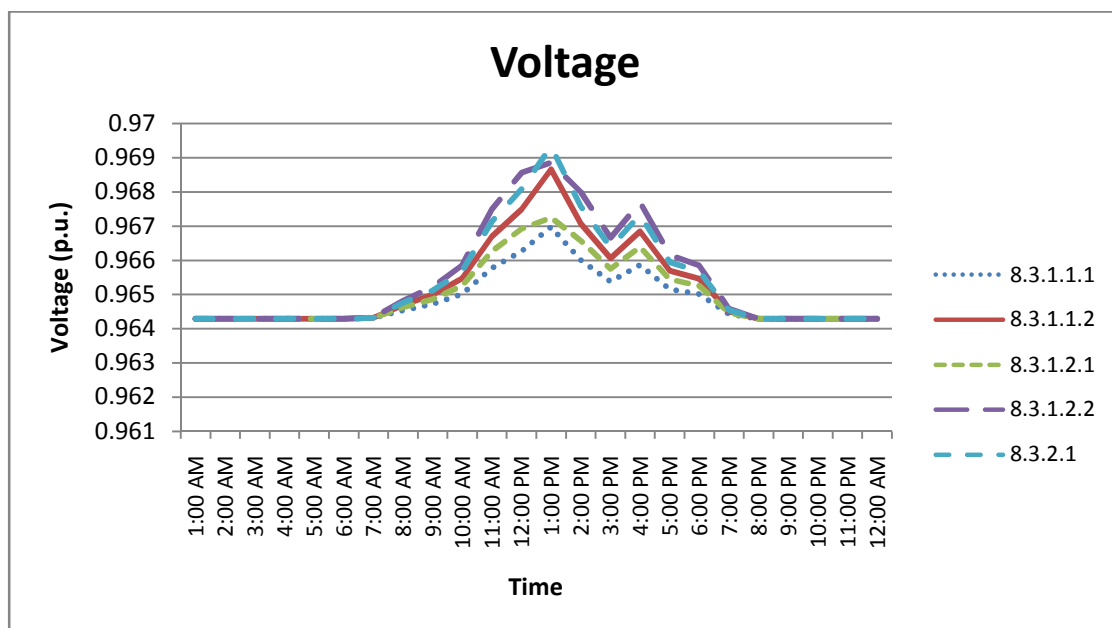


ภาพที่ 8.26 การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟที่ผลิตได้ในแต่ละกรณี

จากภาพที่ 8.26 พบว่ากรณี 8.3.2.1 สามารถผลิตกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟได้สูงสุด เนื่องจากสามารถปรับค่าตัวประกอบกำลังได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (0.90) ส่วนกรณีที่ 8.3.1.1.1 และ 8.3.1.1.2 นั้นไม่มีการปรับค่าตัวประกอบกำลัง ทำให้ไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟออกมา

8.3.3.3 การเปรียบเทียบแรงดัน

ส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบแรงดันจากกรณีต่างๆ ซึ่งเมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกันจะได้ดังภาพที่ 8.27



ภาพที่ 8.27 การเปรียบเทียบแรงดันในแต่ละกรณี

จากภาพที่ 8.27 พบว่ากรณี 8.3.1.2.2 จะยกแรงดันโดยเฉลี่ยได้มากที่สุด เนื่องจากสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าจริงได้มากที่สุด และมีการปรับให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้ แต่ในช่วง 13.00 PM จะยกแรงดันได้ต่ำกว่ากรณี 8.3.2.1 เนื่องจากในช่วงนั้นกรณี 8.3.1.2.2 จะถูกจำกัดปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากอินเวอร์เตอร์ ทำให้กรณี 8.3.2.1 ซึ่งผลิตกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟได้มากกว่าสามารถยกแรงดันได้มากกว่านั่นเอง

8.3.4 สรุปผลการทดสอบแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า

สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้านั้น ในระบบที่มีขนาดใหญ่จะต้องสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าได้ ซึ่งแบบจำลองที่นำเสนอขึ้นได้แสดงถึงการจ่ายกำลังไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ การไม่จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเลย การปรับให้จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ตัวประกอบกำลัง 0.95 การทดสอบเมื่ออาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากเกินไปจนขีดจำกัดของอินเวอร์เตอร์ และการทดสอบให้มีการควบคุมกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเพื่อรักษาแรงดันที่ต้องการ โดยที่อยู่ในข้อกำหนดของการไฟฟ้า ซึ่งสามารถแบบจำลองแสดงผลการจ่ายกำลังไฟฟ้าในสถานการณ์ต่างๆ ได้

บทที่ 9

สรุปวิทยานิพนธ์

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการวิจัยทั้งหมดภายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยจะแบ่งเป็น 2 หัวข้อ คือ

1. สรุปผลการวิจัย
2. ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

9.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสรุปได้เป็น 3 งานวิจัย ดังนี้

1. สำหรับการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ข้อมูลทางเทคนิคที่ได้จากเอกสารข้อมูลของผู้ผลิตนั้น จะให้พารามิเตอร์ไม่เพียงพอสำหรับการคำนวณหาจุดทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงถึงการสร้างแบบจำลองโดยการหาพารามิเตอร์เพิ่มเติมที่จำเป็นในการคำนวณ และคำนวณจุดทำงานออกมาเป็นค่ากระแสและแรงดัน เมื่อความเข้มแสงและอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไป โดยแบบจำลองมีการนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับเอกสารข้อมูลจากผู้ผลิตและการตรวจวัดจริง ซึ่งผลการทดสอบถือว่ามีความแม่นยำ และมีค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้
2. การเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลแสงอาทิตย์นั้น จะก่อให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ควรผลิตได้ ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้ได้จำลองผลเมื่อเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ และคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แท้จริงที่ควรผลิตได้เมื่อเกิดความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์
3. ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าจะเริ่มมีการนำมาใช้งานมากขึ้น โดยสิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือการที่ระบบจะต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดการเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า ซึ่งสิ่งที่จำเป็นก็คือการสามารถปรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟตามที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้าต้องการได้ แบบจำลองในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองผลโดยนำอินเวอร์เตอร์ที่ใช้จริงมาใช้ในการจำลองผลกับระบบทดสอบ ซึ่งอินเวอร์เตอร์นั้นสามารถปรับค่าการจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ โดยจะมีการติดข้อจำกัดในด้านของขนาดการจ่ายกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์เท่านั้น

9.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. ในการศึกษาเกี่ยวกับความไม่เข้ากันของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถพัฒนาต่อไปในเรื่องของการเกิดการบังแสงอาทิตย์ได้
2. นำโหมคอื่นๆ ของอินเวอร์เตอร์ เช่น การปรับกำลังไฟฟ้าตามค่าความถี่ของระบบโครงข่ายไฟฟ้า หรือการจ่ายกำลังไฟฟารีแอกทีฟในช่วงที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะมาใช้ในการวิจัยในอนาคต
3. พัฒนาแบบจำลองขึ้นเป็นโปรแกรมเพื่อสามารถนำไปใช้ได้สะดวกมากขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] พลังงาน, กระทรวง. ผลการศึกษารส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปแบบ Feed - in Tariff (FIT). [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: <http://www.eppo.go.th/power/Part1-FIT%20Solar-ERI.pdf> [1 มีนาคม 2556]
- [2] พลังงาน, กระทรวง. The Renewable and Alternative Energy Development Plan for 25 Percent in 10 Years (AEDP 2012-2021). [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: http://www.dede.go.th/dede/images/stories/dede_aedp_2012_2021.pdf [1 มีนาคม 2556]
- [3] Chatterjee, A., Keyhani, A., and Kapoor, D. Identification of Photovoltaic Source Models. IEEE Transactions on Energy Conversion (2011): 883-889.
- [4] Saloux, E., Teyssedou, A., and Sorin, M. Explicit model of photovoltaic panels to determine voltages and currents at the maximum power point. Solar Energy 85 (2011): 713-722.
- [5] Adamo, F., Attivissimo, F., Di Nisio, A., and Spadavecchia, M. Characterization and Testing of a Tool for Photovoltaic Panel Modeling. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 60, 5 (May 2011): 1613–1622.
- [6] Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., and Vitelli, M. Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method. IEEE Transactions on Power Electronics 20, 4 (July 2005): 963–973.
- [7] Adhikari, S., Xu, Y., Li, F., Li, H., Kueck, J.D., Snyder, I.B., Barker, T. J., and Hite, R. Utility-Side Voltage Control with Inverter-based Photovoltaic Systems. World Congress 18 (2011): 6110-6116.
- [8] Van Tu, D., and Chaitusaney, S. Fault Current Calculation in Distribution Systems with Inverter-based Distributed Generations. (Unpublished Manuscript).

- [9] Yi-Bo, W., Chun-Sheng, W., Hua, L., and Hong-Hua, X. Steady-State Model and Power Flow Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Power System. International Conference Industrial Technology (2008): 1-6.
- [10] Gilbert, M. Renewable and Efficient Electric Power Systems. New Jersey: Wiley-Interscience, 2004.
- [11] Goetzberger, A. and Hoffmann, V.U. Photovoltaic Solar Energy Generation. Berlin: Springer, 2005.
- [12] บริษัท ลีโอนิกส์ จำกัด. ความรู้เซลล์แสงอาทิตย์. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: http://www.leonics.co.th/html/th/aboutpower/solar_knowledge.php [1 มีนาคม 2556]
- [13] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. เซลล์แสงอาทิตย์: ข้อดี ข้อเสีย. [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา: <http://www.nstda.or.th/sci-kids-menu/2326-solar-cell-advantage-disadvantage> [1 มีนาคม 2556]
- [14] บริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน). Multi-Crystalline Silicon Solar Modules 130 Watt SP130. 2548. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.solartron.co.th/Catalog/SP130_TH.pdf [30 มกราคม 2555]
- [15] Adamo, F., Attivissimo, F., Di Nisio, A., and Spadavecchia, M. Parameter Estimation for a Model of Photovoltaic Panels. World Congress (2009).
- [16] Villalva, M.G., Gazoli, J.R., and Filho, E.R. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. IEEE Transactions on Power Electronics 24, 5 (May 2009): 1198–1208.
- [17] Sera, D., Teodorescu, R., and Rodriguez, P. PV panel model based on datasheet values. IEEE Transactions on Industrial Electronics (Jun 2007): 2392–2396.
- [18] Kyocera. KC200GT Photovoltaic Module Datasheet. [ออนไลน์]. 2548. แหล่งที่มา: <http://www.kyocera.com.sg/products/solar/pdf/kc200gt.pdf> [1 มีนาคม 2556]

- [19] Hohm, D. P., and Ropp, M. E. Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms. PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS 11 (2003): 47–62.
- [20] National Instruments. Maximum Power Point Tracking. [Online]. 2009. Available from: <http://www.ni.com/white-paper/8106/en> [1 March 2013]
- [21] Advanced Energy. DC Loading of PV Powered Inverters. [Online]. 2011. Available from: <http://solarenergy.advanced-energy.com/> [1 March 2013]
- [22] Teodorescu R., Liserre M., and Rodriguez P. Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems. United Kingdom: John Wiley & Sons, 2011.
- [23] Orion. ORION HIGH EFFICIENCY GRID FEED INVERTER OPERATION AND INSTALLATION MANUAL. [Online]. 2011. Available from: http://www.solaraustralia.com.au/product_specification_sheets/orion%204.6.pdf [1 March 2013]
- [24] Growatt. Growatt 2500MTL 3000MTL Installation & Operation Manual. [Online]. 2012. Available from: http://www.growatt.com/Upload/%E4%B8%8B%E8%BD%BD%E4%B8%AD%E5%BF%83/Manual/MTL/Growatt25003000MTL_Manual-19130124334.pdf [1 March 2013]
- [25] CMS. Installation and Operation Manual. [Online]. 2010. Available from: <http://www.eco-kinetics.com/pdfs/cms/CMS%201500-2800%20Manual.pdf> [1 March 2013]
- [26] SMA. Sunny Boy 3000 Technical Description. [Online]. 2011. Available from: <http://files.sma.de/dl/5673/SB3000-11-EE3801.pdf> [1 March 2013]
- [27] SMA. PV Inverter SUNNY BOY 1300TL/ 1600TL/ 2100TL User Manual. [Online]. 2012. Available from: http://files.sma.de/dl/5684/SB13_21TL-BA-BEN121021.pdf [1 March 2013]

- [28] SMA. Central Inverter Operating Manual. [Online]. 2012. Available from: <http://www.civicsolar.com/sites/default/files/documents/scxxxxcp-us-ba-en-20-70453.pdf> [1 March 2013]
- [29] ABB. Firmware manual PVS800 central inverters. [Online]. 2012. Available from: [http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/a14f15de84ea9a1ac12579d000401d71/\\$file/PVS800_FW_manual_REVB_commenting_enabled.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/a14f15de84ea9a1ac12579d000401d71/$file/PVS800_FW_manual_REVB_commenting_enabled.pdf) [1 March 2013]
- [30] SIEMENS. SINVERT PVS ControlBox 300 Operating Instructions 11/2011. [Online]. 2011. Available from: <http://support.automation.siemens.com> [1 March 2013]
- [31] SMA. SUNNY CENTRAL 500MV / 630MV / 800MV / 1000MV / 1250MV / 1600MV. [Online]. 2012. Available from: <http://support.automation.siemens.com> [1 March 2013]
- [32] Altas, I. H., and Sharaf, A.M. A Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab-Simulink GUI Environment. International Conference Clean Electrical Power (2007): 341–345.
- [33] Dondi, D., Brunelli, D., Benini, L., Pavan, P., Bertacchini, A., and Larcher, L. Photovoltaic Cell Modeling for Solar Energy Powered Sensor Networks. IEEE International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces (2007): 1-6.
- [34] Salam, Z., Ishaque, K., and Taheri, H. An improved two-diode photovoltaic (PV) model for PV system. Power Electronics Drives and Energy Systems (2010): 1–5.
- [35] Wang NianCHun, Sun Zuo, Yukita, K., Goto, Y., and Ichiyanagi, K. Research of PV Model and MPPT Methods in Matlab. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (2010): 1–4.
- [36] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. ระเบียบการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยข้อกำหนดการให้บริการระบบโครงข่ายไฟฟ้าพ.ศ. 2551. [ออนไลน์]. 2551. แหล่งที่มา: <http://www.erc.or.th/ERCWeb2/Upload/Document/3.3.2%20%E0%B8%81%E0>

%B8%9F%E0%B8%A0%20%E0%B9%83%E0%B8%8A%E0%B9%89%E0%B8%9A%E0%B8%A3%E0%B8%B4%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3.pdf [1 มีนาคม 2556]

- [37] International Energy Agency. GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS: SURVEY OF INVERTER AND RELATED PROTECTION EQUIPMENTS. [Online]. 2002. Available from: http://www.iea-pvps.org/index.php?id=9&eID=dam_frontend_push&docID=382 [1 March 2013]
- [38] บริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน). แผงเซลล์แสงอาทิตย์โซลาร์ตรอน รุ่น : SP120. 2548. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.solartron.co.th/Catalog/sp120.pdf> [30 มกราคม 2555]
- [39] SMA. Sunny Boy SB2100TL. [Online]. 2012. Available from: <http://www.independentsolarsystems.nl/contents/nl/SB2100TL.pdf> [1 March 2013]
- [40] SMA. Sunny Boy and Sunny Mini Central Solar Inverters for Photovoltaic Plants. [Online]. 2012. Available from: http://www.rpc.com.au/pdf/SB_SMC-11-FE3206-ops.pdf [1 March 2013]
- [41] Zhao, B., Ge, X., Xue, M., Zhang, X., and Xu, W. Research on Model for Photovoltaic System Power Forecasting. 2010 China International Conference on Electricity Distribution (2010): 1–5.
- [42] MacAlpine, S. M. and Brandemuehl, M. J. Photovoltaic module model accuracy at varying light levels and its effect on predicted annual energy output. Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2011 37th IEEE (2011): 2894–2899.
- [43] SMA. Reactive Power and Grid Integration with SUNNY MINI CENTRAL and SUNNY TRIPOWER. [Online]. 2012. Available from: <http://files.sma.de/dl/7418/ReactivePower-UEN101310.pdf> [1 March 2013]

- [44] วรพต แสงสว่าง. แบบจำลองและการคำนวณข้อมูลทางเทคนิคของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และการประยุกต์ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2555

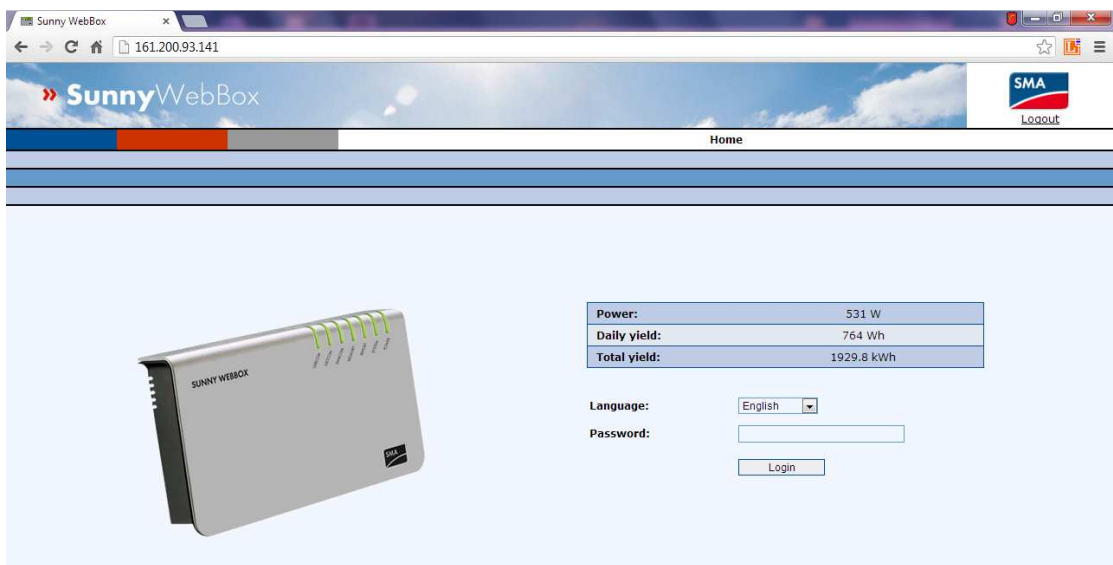
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การเก็บข้อมูลของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

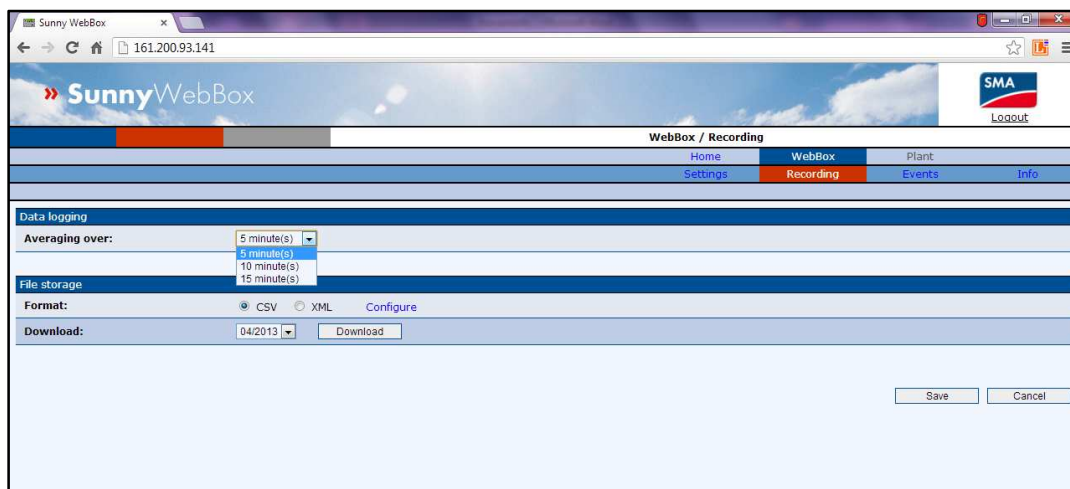
ในบทนี้จะอธิบายถึงการเก็บข้อมูลที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะอธิบายเป็นขั้นตอน

1. เข้าไปที่คอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับเครือข่าย Lan ของอาคาร 4
2. เข้าไปที่เว็บเพจ 161.200.93.141 ตามภาพที่ ก.1



ภาพที่ ก.1 เว็บเพจสำหรับการเก็บข้อมูล

3. เข้าไปที่ WebBox --> Recording จะเห็นหน้าจอที่สามารถบันทึกข้อมูลลงคอมพิวเตอร์ได้ โดยสามารถบันทึกตามค่าเฉลี่ยเวลาเป็น 5, 10 หรือ 15 นาทีได้ และข้อมูลที่บันทึกจะเป็นเอกสาร Excel หน้าจอบันทึกข้อมูลจะเป็นดังภาพที่ ก.2 และไฟล์ข้อมูลที่บันทึกได้จะเป็นดังภาพที่ ก.3



ภาพที่ ก.2 หน้าจอบันทึกข้อมูล

Name	Size	Type	Date Modified
2013-01-01.csv	29 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-02.csv	29 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-03.csv	29 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-03.xlsx	38 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:52 PM
2013-01-04.csv	28 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-05.csv	29 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-05.xlsx	38 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:22 PM
2013-01-06.csv	29 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-07.csv	29 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:48 PM
2013-01-07.xlsx	38 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:48 PM
2013-01-08.csv	29 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-09.csv	29 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-10.csv	29 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-11.csv	29 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-12.csv	29 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-13.csv	29 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-14.csv	29 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-15.csv	29 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-16.csv	29 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-17.csv	29 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-18.csv	29 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-19.csv	29 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-20.csv	29 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-21.csv	28 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-22.csv	29 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-23.csv	28 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-24.csv	29 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-25.csv	28 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-26.csv	28 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-27.csv	29 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-28.csv	28 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-29.csv	28 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-30.csv	29 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM
2013-01-31.csv	29 KB	Microsoft Office Exc...	2/28/2013 2:17 PM

ภาพที่ ก.3 ไฟล์ข้อมูลที่บันทึกได้

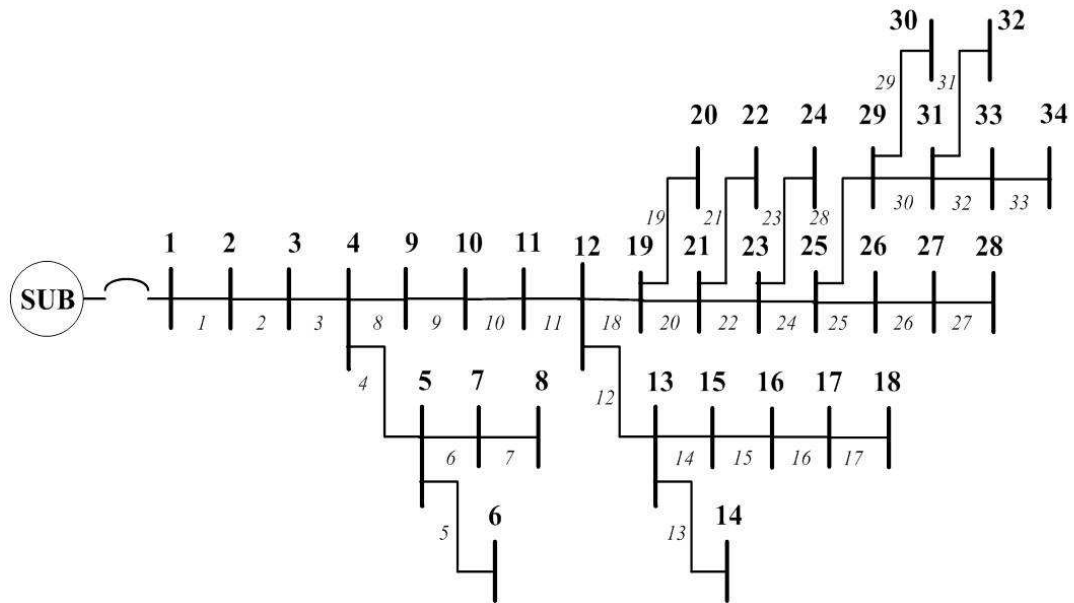
4. ข้อมูลที่ได้จากการบันทึกจะเป็นไฟล์ข้อมูล 1 เดือนดังภาพที่ ก.3 โดยแต่ละไฟล์จะเป็นข้อมูลที่บันทึกใน 1 วัน (เช่นในเดือนมีนาคมจะมี 31 ไฟล์)
5. ข้อมูลที่บันทึกจะเป็นดังภาพที่ ก.4 ซึ่งรายละเอียดของพารามิเตอร์ต่างๆจะเป็นดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 7.4

TimeStamp hh:mm	IntSolIrr W/m ²	SMA-h-On h	TmpAmb C °C	TmpMdul °C	Fac Hz	Iac-Ist mA	Ipv mA	Pac W	RErd-Start kOhm	Status	Uac V	Upv-Ist V	Upv-Soll V	Zac Ohm
5:40	0	7224.06	29.2	28.68										
5:45	0	7224.14	29.2	28.75										
5:50	0	7224.22	29.05	28.73										
5:55	0.3	7224.31	29.05	28.75										
6:00	5.7	7224.39	29.17	28.75	47.69	0	24.77	0	9908.19	3: Warten	218.35	133.26	644.65	0
6:05	12.11	7224.47	29.11	28.83	50.02	0	22.21	0	9906	2: Netzeub	228.96	154.33	660	0
6:10	18.95	7224.56	29.1	28.84	50.01	2.14	30.69	0.43	9906	3: Warten	228.24	160.79	622.83	0.19
6:15	27.22	7224.64	29.24	29.06	50.02	0	20	0	9906	3: Warten	228.94	170.38	660	0.46
6:25	38.44	7224.79	29.31	29.42	50.01	13.85	88.73	2.77	9906	7: Mpp	228.04	153.56	415.42	0.46
6:30	49.36	7224.87	29.47	29.81	50.04	34.25	187.13	7	9906	7: Mpp	227.18	127.38	128	0.45
6:35	55.34	7224.95	29.49	30.01	50.02	46.14	238.96	9.79	9906	7: Mpp	226.96	122.88	123.2	0.44
6:40	61.1	7225.04	29.62	30.21	50.02	66.71	300.4	14.57	9906	7: Mpp	226.98	123	123	0.46
11:00	992.88	7229.34	31.3	46.75	50.01	3778.95	6050.91	849.84	9906	7: Mpp	225	151.16	151.23	0.45
11:05	1188.49	7229.42	32.06	48.5	50.01	4435.98	7281.47	998.35	9906	7: Mpp	225.14	148.2	148.39	0.46
11:10	740.82	7229.5	32.22	49.47	50.01	2765.18	4543.75	619.77	9906	7: Mpp	224.2	147.27	147.43	0.45
11:15	593.59	7229.59	31.38	44.92	50.02	2271.88	3569.67	508.53	9906	7: Mpp	224	153.82	154.04	0.45
11:20	582.79	7229.67	31.31	42.32	50.01	2270.14	3577.21	508.02	9906	7: Mpp	224	153.36	153.62	0.46
11:25	637.1	7229.75	31.83	43.09	50.03	2475.49	3915.41	556.16	9906	7: Mpp	224.84	153.06	153.18	0.45
11:30	498.41	7229.84	32.24	44.24	50.02	1866.86	2944.82	419.72	9906	7: Mpp	225	154.93	155.09	0.45
11:35	425.24	7229.92	32.04	42.36	50.02	1603.87	2531.76	360.67	9906	7: Mpp	225.07	155.02	155.18	0.45
11:40	539.07	7230	32.65	42.63	50.02	2051.02	3219.25	463.14	9906	7: Mpp	225.98	155.77	155.98	0.45
11:45	597.32	7230.09	32.79	44.75	50.02	2275.89	3693.93	513.98	9906	7: Mpp	226	150.14	150.33	0.45
11:50	519.02	7230.17	32.25	44.03	50.02	1946.63	3138.08	439.83	9906	7: Mpp	226.12	152.4	152.62	0.45
11:55	670.68	7230.25	32.39	44.69	50.03	2532.36	4166.56	574.72	9906	7: Mpp	227.13	149.05	149.15	0.46
18:00	7.93	7236.29	27.02	25.64	50.01	0	23.78	0	9906	2: Netzeub	228.96	144.63	660	0.45
18:05	5.48	7236.38	27.24	25.75	50.01	0	27.12	0	9906	2: Netzeub	228.96	126.77	660	0.45
18:10	4.03	7236.44	27.14	25.77	50.02	0	31.5	0	9906	3: Warten	229	110.18	660	0.45
18:15	2.81	7236.53	27.26	25.72	49.98	0	35.5	0	9906	3: Warten	229	97.5	660	0.45
18:20	1.73	7236.61	27.38	25.73										
18:25	0.45	7236.69	27.3	25.8										
18:30	0	7236.78	27.33	26.47										
18:35	0	7236.86	27.32	26.77										

ภาพที่ ก.4 ข้อมูลที่บันทึกได้จากตัวเก็บข้อมูล

ภาคผนวก ข

ข้อมูลระบบทดสอบทำทราย 34 บัส



ภาพที่ ข.1 ระบบทดสอบทำทราย 34 บัส

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลสายส่งของระบบทำทราย 34 บัส

From bus	To bus	R (p.u.)	X (p.u.)	b (p.u.)
1	2	0.0054	0.0104	0
2	3	0.0218	0.043	0
3	4	0.029	0.0574	0
4	5	0.0327	0.0646	0
5	6	0.0055	0.0031	0
5	7	0.0341	0.0674	0
7	8	0.011	0.0063	0
4	9	0.0015	0.0029	0
10	11	0.0058	0.0115	0
11	12	0.1198	0.2367	0
12	13	0.016	0.0316	0
13	14	0.0015	0.0028	0

13	15	0.0218	0.043	0
15	16	0.0225	0.0445	0
16	17	0.024	0.0473	0
17	18	0.0254	0.0502	0
12	19	0.0015	0.0029	0
19	20	0.0028	0.0016	0
19	21	0.0123	0.0244	0
21	22	0.0055	0.0032	0
21	23	0.0123	0.0244	0
23	24	0.0058	0.0111	0
23	25	0.0182	0.0359	0
25	26	0.0116	0.023	0
26	27	0.1133	0.2238	0
27	28	0.0441	0.0257	0
25	29	0.0196	0.0387	0
29	30	0.0015	0.0028	0
29	31	0.0211	0.0416	0
31	32	0.011	0.0064	0
31	33	0.0225	0.0445	0
33	34	0.0055	0.0032	0

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลระบบทดสอบท่าทราย 34 บัส

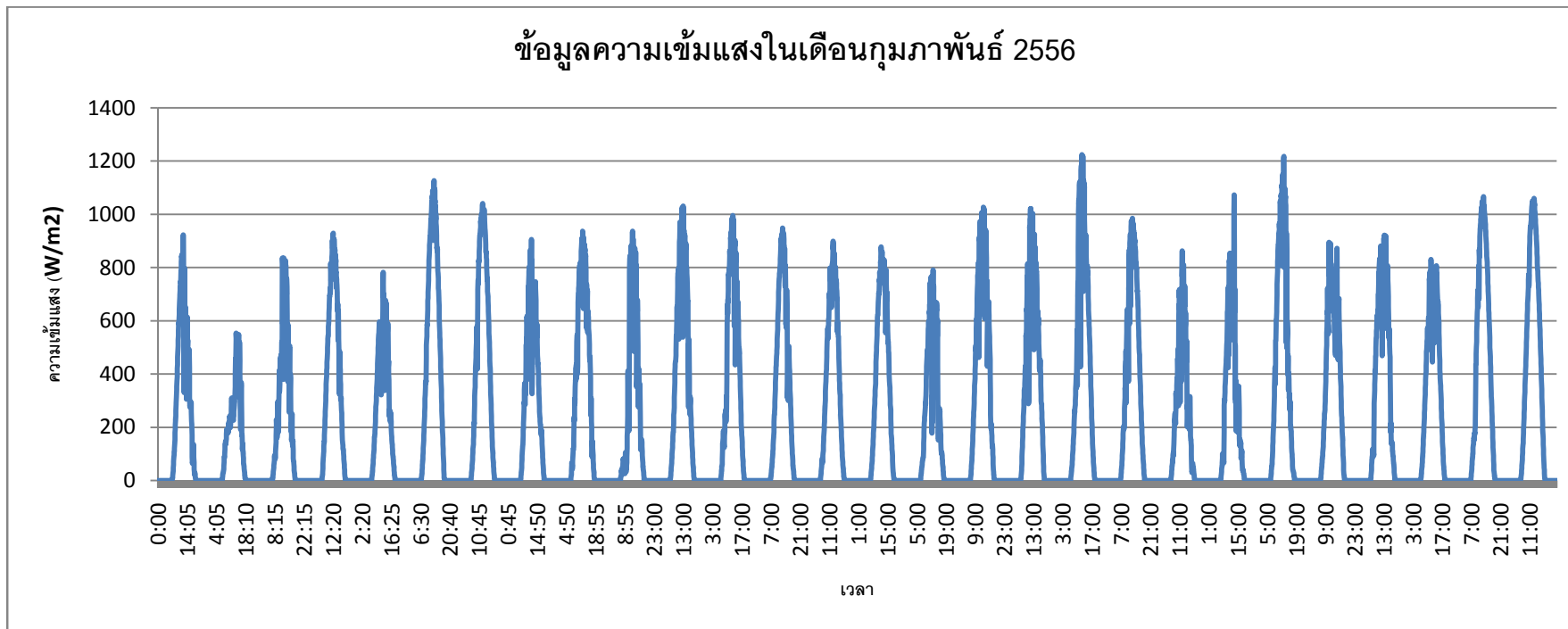
Bus	Voltage		Generation		Load	
	#	Mag (p.u.)	Ang (deg)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)
1	1	0	9.05	5.83	-	-
2	0.999	-0.036	-	-	-	-
3	0.994	-0.187	-	-	-	-
4	0.988	-0.391	-	-	-	-
5	0.988	-0.422	-	-	-	-
6	0.988	-0.422	-	-	0.53	0.33
7	0.987	-0.44	-	-	-	-
8	0.987	-0.44	-	-	0.66	0.41
9	0.988	-0.4	-	-	0.07	0.04
10	0.988	-0.418	-	-	0.33	0.2
11	0.987	-0.451	-	-	0.53	0.33
12	0.968	-1.111	-	-	-	-
13	0.967	-1.152	-	-	-	-
14	0.967	-1.153	-	-	0.66	0.41
15	0.966	-1.197	-	-	0.17	0.1
16	0.964	-1.239	-	-	0.62	0.39
17	0.963	-1.272	-	-	0.99	0.61
18	0.963	-1.286	-	-	0.66	0.41
19	0.968	-1.116	-	-	-	-
20	0.968	-1.116	-	-	0.07	0.04
21	0.967	-1.153	-	-	-	-
22	0.967	-1.153	-	-	0.33	0.2
23	0.966	-1.187	-	-	-	-
24	0.966	-1.194	-	-	1.65	1.02
25	0.965	-1.211	-	-	-	-
26	0.965	-1.212	-	-	0.11	0.07

27	0.965	-1.216	-	-	-	-
28	0.965	-1.216	-	-	0.03	0.02
29	0.965	-1.235	-	-	-	-
30	0.964	-1.237	-	-	0.99	0.61
31	0.964	-1.244	-	-	-	-
32	0.964	-1.244	-	-	0.33	0.2
33	0.964	-1.247	-	-	-	-
34	0.964	-1.247	-	-	0.17	0.1
		Total:	8.24	5.78	8.9	5.5

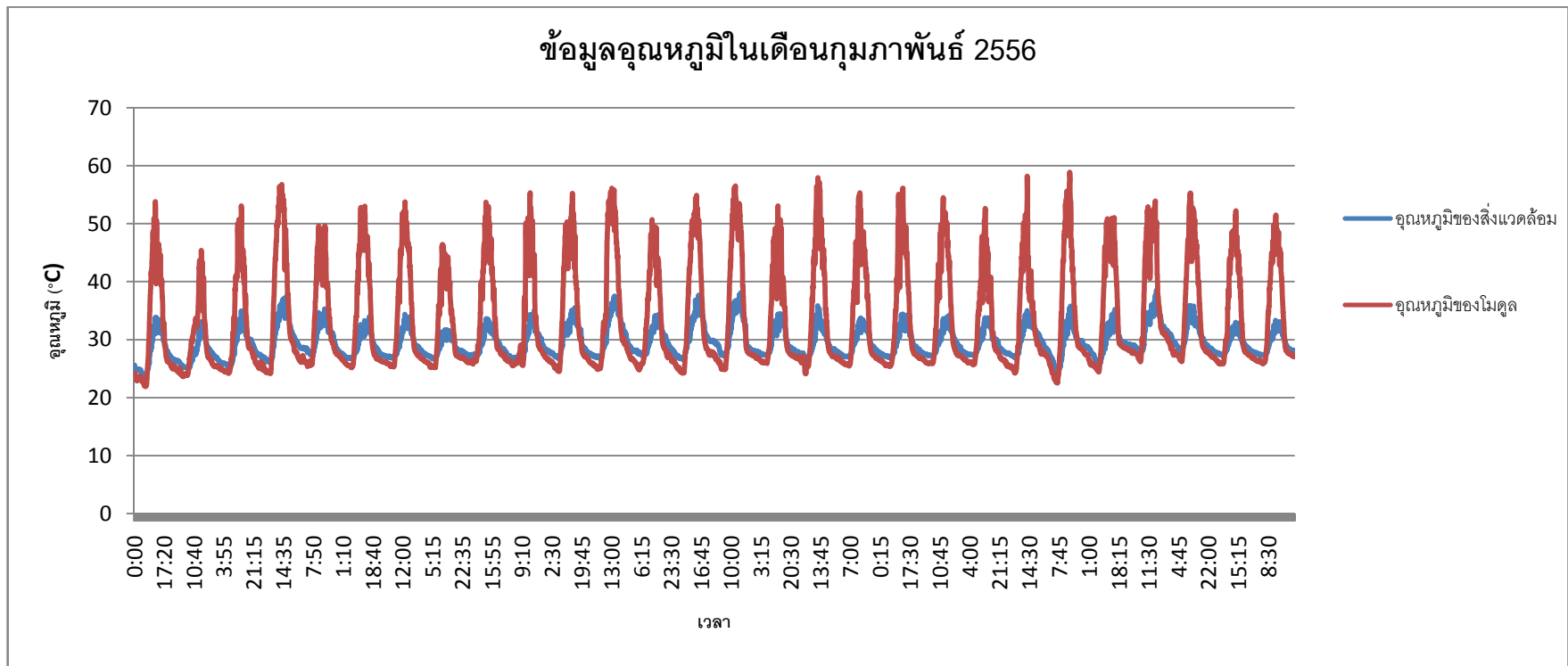
ภาคผนวก ค

ตัวอย่างฐานข้อมูลความเข้มแสงและอุณหภูมิ

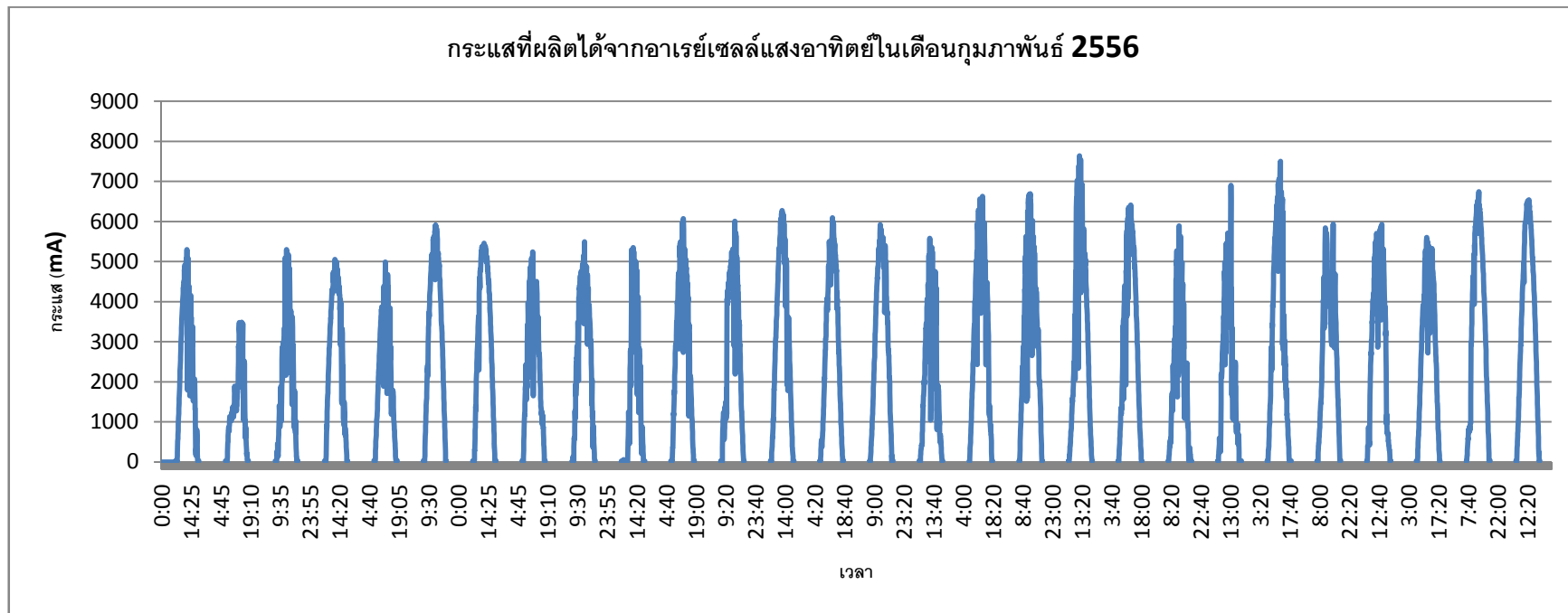
ในส่วนนี้จะแสดงตัวอย่างฐานข้อมูลที่เก็บได้จากอาคารเจริญวิศวกรรม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



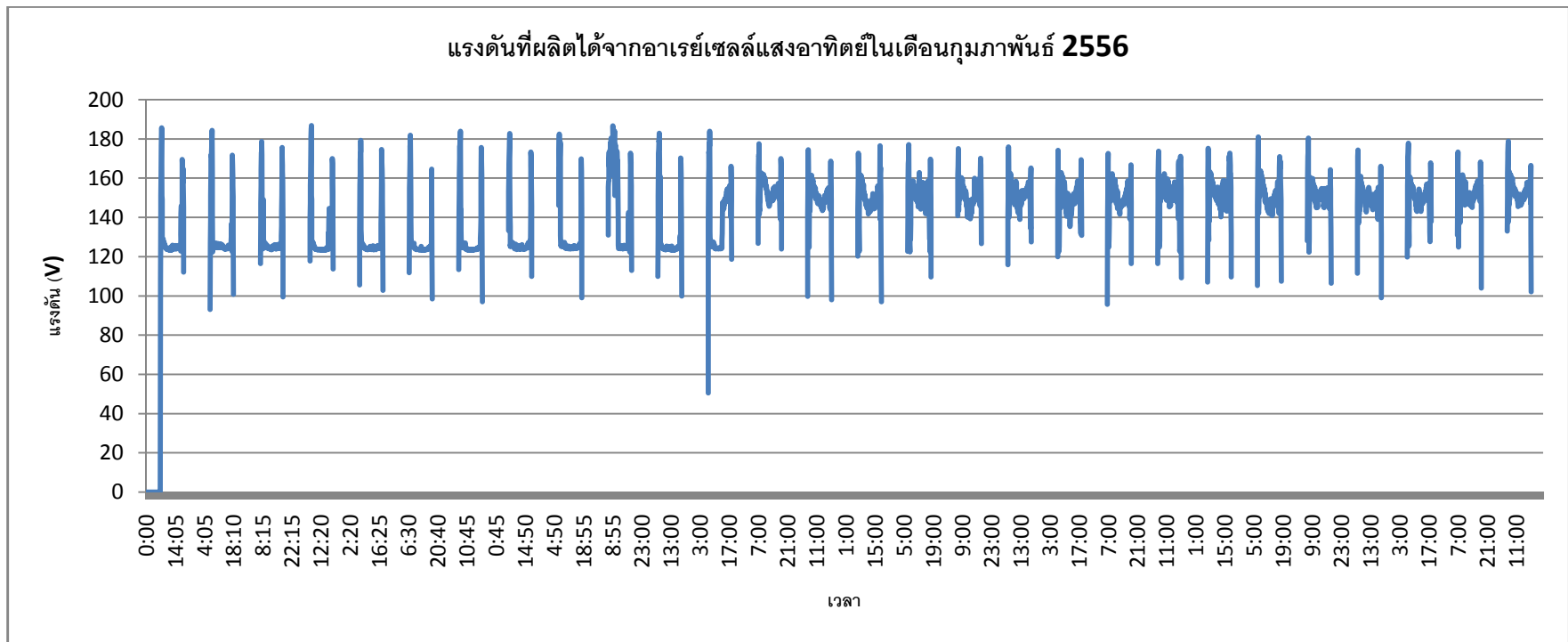
ภาพที่ ค.1 ข้อมูลความเข้มแสงในเดือนกุมภาพันธ์ 2556



ภาพที่ ค.2 ข้อมูลความเข้มแสงในเดือนกุมภาพันธ์ 2556



ภาพที่ ค.3 ข้อมูลกระแสที่ผลิตได้จากอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ในเดือนกุมภาพันธ์ 2556



ภาพที่ ค.4 ข้อมูลแรงดันที่ผลิตได้จากอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ในเดือนกุมภาพันธ์ 2556

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสินธุ์ชัย ตีลังกานนท์ เกิดวันที่ 6 มีนาคม พ.ศ. 2532 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554

ในระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย นายสินธุ์ชัย ตีลังกานนท์ ได้ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยวิจัยห้องปฏิบัติการไฟฟ้ากำลัง (Power System Laboratory Research: PSRL) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในงานวิจัย/โครงการที่ปรึกษา ได้แก่ โครงการศึกษาเพื่อกำหนดนโยบายและแผนการพัฒนาระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน

นอกจากนี้งานวิจัยจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการตีพิมพ์ในงานประชุมวิชาการ 2 แห่ง คือ (1) การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (Electrical Engineering Conference ครั้งที่ 35) (EECON 35) และ (2) การประชุมวิชาการของสมาคมวิชาการไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ โทรคมนาคม และสารสนเทศ (Electrical Engineering Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology Association of Thailand) (ECTI 2013)