

การหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อพิจารณาถึง  
การแกว่งของกำลังไฟฟ้าและความถี่

นายฉัตรตฤณ ทองแสง

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.

DETERMINING OPTIMAL BATTERY CAPACITY OF GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC  
SYSTEM WITH POWER AND FREQUENCY FLUCTUATION CONSIDERATION

Mr. Chattrin Thongsawaeng

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

การหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในระบบผลิต  
ไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อพิจารณาถึงการแกว่งของ  
กำลังไฟฟ้าและความถี่

โดย

นายฉัตรตฤณ ทองแสง

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษศ อุดมวงศ์เสรี

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษศ อุดมวงศ์เสรี)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนบบุญ หุ่นเจริญ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. สมภาพ อัมมมงคล)

ฉัตรตฤณ ทองแสง : การหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อพิจารณาถึงการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและความถี่. (DETERMINING OPTIMAL BATTERY CAPACITY OF GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM WITH POWER AND FREQUENCY FLUCTUATION CONSIDERATION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. กุลยศ อุดมวงศ์เสรี, 126 หน้า.

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานหมุนเวียนที่ได้รับความนิยมในการนำมาผลิตไฟฟ้า แต่ปัญหาใหญ่ที่พบจากการผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ คือ กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และความถี่ทางไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าไม่คงที่เนื่องจากความไม่แน่นอนของความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้าและเสถียรภาพของไฟฟ้า ทั้งนี้ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดย การติดตั้งแบตเตอรี่เข้ากับระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้แบตเตอรี่รับกำลังไฟฟ้าส่วนเกิน เมื่อระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าเกินความต้องการ และให้แบตเตอรี่จ่ายกำลังไฟฟ้าชดเชย เมื่อระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าน้อยกว่าความต้องการ อย่างไรก็ตาม สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการติดตั้งแบตเตอรี่ คือ ขนาดของแบตเตอรี่จะต้องมีความเหมาะสมกับกำลังการผลิต ซึ่งจะทำให้แบตเตอรี่สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า และช่วยควบคุมต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าไม่ให้สูงเกินความจำเป็น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการคำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม เพื่อช่วยแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและความถี่ โดยในขั้นตอนการวิเคราะห์ จะเริ่มจากการจำลองความเข้มแสงอาทิตย์ที่กระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละชั่วโมงซึ่งรวมผลของความไม่แน่นอนด้วยแบบจำลองที่เหมาะสม และคำนวณกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และความถี่ทางไฟฟ้า ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับโครงข่าย โดยใช้วิธีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ในส่วนของแบตเตอรี่นั้นจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว ร่วมกับวิธีการเชิงเลขเพื่อคำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม โดยจะเลือกใช้ขนาดแบตเตอรี่จากข้อมูลจริงของบริษัทผู้ผลิต วิธีการที่นำเสนอนี้ได้ถูกทดสอบกับระบบทดสอบที่กำหนดขึ้น ซึ่งผลจากการทดสอบพบว่าเป็นที่น่าพอใจ

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2555.....

# # 5470478621 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM / LEAD-ACID BATTERY / BATTERY SIZING / POWER FLUCTUATION / ENVIRONMENT DEPENDENCE

CHATTRIN THONGSAWAENG: DETERMINING OPTIMAL BATTERY CAPACITY OF GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM WITH POWER AND FREQUENCY FLUCTUATION CONSIDERATION. ADVISOR: ASST. PROF. KULYOS AUDOMVONGSEREE, Ph.D., 126 pp.

Solar cell has been widely used to generate electricity in recent years. However, it has some disadvantages, e.g. the generated power, voltage magnitude and frequency are intermittent due to the variation of irradiance and ambient temperature. Injection of such power into the utility grid affects the quality of electricity and system stability, in particular. Installing appropriate size of battery to the generation system could alleviate these difficulties. An optimal battery capacity could enable the total generation to meet the load demand, decrease fluctuation, and can limit total investment costs.

The purpose of this thesis is to determine the appropriate capacity of battery for the fluctuated power and frequency elimination. Firstly, irradiance and ambient temperature are simulated by a mathematical model considering uncertainty of these factors, including the correlation between them. Then the power output, voltage, and frequency can be computed based on Grid – connected Photovoltaic System. To determine an optimal battery capacity, the mathematical model of lead-acid battery is applied altogether with a numerical method. The battery's capacity will be chosen from actual manufacturer's data. This proposed algorithm has tested, and satisfactory results have been obtained.

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

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

Academic Year : .....2012.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ อุดมวงศ์เสรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขเนื้อหาจนสำเร็จเรียบร้อย ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย ศาสตราจารย์ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. แนบบุญ หุนเจริญ และ ดร. สมภพ อัมภมมงคล ที่ได้เสียเวลาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณมารดาของข้าพเจ้าที่สนับสนุนให้ข้าพเจ้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สันนิบาตการทําวิจัย เข้าใจในการทำงานและให้กำลังใจข้าพเจ้าตลอดมา และขอขอบคุณพี่ น้อง และเพื่อนๆ ทุกคนที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จในครั้งนี้ด้วย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ .....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 แนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ .....	2
1.3 วัตถุประสงค์.....	5
1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์ .....	6
1.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย .....	6
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ .....	7
1.7 เนื้อหาในวิทยานิพนธ์ .....	7
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์.....	9
2.1 ภาพรวมของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า .....	9
2.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell).....	9
2.1.2 อินเวอร์เตอร์ (Inverter).....	10
2.2 หลักการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	10
2.3 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	11
2.3.1 กลุ่มที่ทำจากสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอน .....	11
2.3.2 กลุ่มที่ทำจากสารประกอบที่ไม่ใช่ซิลิคอน .....	13
2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	14
2.5 ผลของความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ .....	17
2.5.1 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	18
2.5.2 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อแรงดันเปิดวงจร.....	19
2.5.3 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อกระแสลัดวงจร .....	19
2.5.4 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อ Diode ideality factor .....	20
2.5.5 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อความต่างศักย์เริ่มเปลี่ยน .....	20
2.5.6 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อความต้านทานอนุกรม .....	20
2.5.7 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อความต้านทานขนาน.....	20
2.5.8 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อกระแสโฟโตอิเล็กทริก.....	21

	หน้า
2.5.9 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อกระแสอิมตัวไดโอด .....	21
2.6 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการต่อชุดแผงเซลล์ แสงอาทิตย์ .....	24
2.6.1 จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรม.....	26
2.6.2 กระแสไฟโตอิเล็กทรอนิกส์.....	27
2.6.3 กระแสอิมตัวไดโอด.....	27
2.6.4 ความต้านทานขนาน.....	27
2.6.5 ความต้านทานอนุกรม.....	27
2.6.6 กระแสลัดวงจร .....	28
2.6.7 แรงดันเปิดวงจร.....	28
2.7 แนวทางในการพัฒนาโปรแกรมจากแบบจำลองที่นำเสนอ .....	31
2.7.1 การคำนวณหา 5 พารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	31
2.7.2 การคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์.....	33
บทที่ 3 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับอินเวอร์เตอร์ .....	34
3.1 หลักการพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์แบบ Double Stage .....	34
3.2 คอนเวอร์เตอร์แปลงไฟตรงเป็นไฟตรง (DC-DC Converter).....	35
3.2.1 แบบจำลองคอนเวอร์เตอร์ทบแรงดัน .....	35
3.2.2 คุณสมบัติเชิงพลวัตของคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	36
3.3 อินเวอร์เตอร์แบบ Three-level Neutral Point Clamped (NPC) .....	41
3.3.1 แบบจำลองของอินเวอร์เตอร์แบบ Three-level NPC.....	41
3.3.2 แบบจำลองเชิงพลวัตของอินเวอร์เตอร์แบบ Three-level NPC .....	41
3.3.3 การควบคุมอินเวอร์เตอร์.....	43
3.4 แนวทางในการพัฒนาโปรแกรมจากแบบจำลองที่นำเสนอ .....	47
3.4.1 สมการสถานะของกระแสฝั่งไฟฟ้ากระแสสลับ .....	47
3.4.2 สมการสถานะของแรงดันไฟตรงยกกำลังสอง.....	48
3.4.3 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์.....	48
บทที่ 4 การจำลองความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม .....	50
4.1 หลักการพื้นฐาน .....	50
4.2 แบบจำลองความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม .....	54
4.2.1 การขึ้นต่อเวลาของแบบจำลอง .....	54
4.2.2 การขึ้นต่อกันระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม .....	57
บทที่ 5 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่ และวิธีการหาขนาดที่เหมาะสม ของแบตเตอรี่.....	61
5.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน .....	61
5.1.1 แบตเตอรี่.....	62



	หน้า
5.1.2 ล้อช่วยแรง.....	63
5.1.3 การอัดอากาศ (Compressed Air Storage).....	63
5.1.4 ระบบสูบน้ำกลับ (Pumped Storage).....	63
5.2 คุณสมบัติของแบตเตอรี่.....	64
5.2.1 คุณสมบัติทางเคมี.....	64
5.2.2 แรงดัน.....	64
5.2.3 ความจุของแบตเตอรี่.....	64
5.2.4 พลังงานจำเพาะและความหนาแน่นพลังงาน.....	65
5.2.5 กำลังจำเพาะ.....	65
5.2.6 ซี-เรต (C-rate).....	65
5.3 ชนิดของแบตเตอรี่.....	65
5.3.1 แบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว (Lead-acid Battery).....	66
5.3.2 แบตเตอรี่ชนิดที่ใช้ निकเกิลเป็นวัสดุ (Nickel-based Batteries).....	66
5.3.3 แบตเตอรี่ชนิดที่ใช้ลิเทียมเป็นวัสดุ (Lithium-based Batteries).....	67
5.4 การต่อชุดแบตเตอรี่.....	68
5.4.1 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรม.....	68
5.4.2 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบขนาน.....	69
5.4.3 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบผสม.....	70
5.5 แบบจำลองแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว.....	70
5.6 การคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่.....	72
5.6.1 การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ต้องการให้ระบบแบตเตอรี่รับหรือจ่าย.....	72
5.6.2 การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ต้องการให้ชุดแบตเตอรี่รับหรือจ่าย.....	73
5.6.3 การคำนวณขนาดของแบตเตอรี่ในเบื้องต้น.....	75
5.6.4 การคำนวณขนาดของแบตเตอรี่เมื่อพิจารณาการแกว่งของควมถี่ทางไฟฟ้า และขนาดแรงดันของระบบ.....	77
บทที่ 6 การทดสอบและวิเคราะห์ผล.....	80
6.1 ระบบทดสอบ.....	80
6.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (SG).....	81
6.1.2 ความต้องการกำลังไฟฟ้า.....	81
6.2 ผลการทดสอบ.....	81
6.2.1 การทดสอบการสูมความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม.....	81
6.2.2 การทดสอบการสูมความต้องการไฟฟ้า.....	86
6.2.3 การทดสอบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด กำลังไฟฟ้า แรงดัน และควมถี่ของระบบ.....	89
6.2.4 ผลการหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในเบื้องต้น.....	93

6.2.5 การทดสอบหากำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่โครงข่ายเมื่อติดตั้งแบตเตอรี่ขนาดเท่า กับที่คำนวณได้.....	99
6.2.6 การหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่กรณีพิจารณามาตรฐานการเบี่ยงเบน ของความถี่และแรงดัน .....	101
บทที่ 7 สรุปผลงานวิจัย.....	106
รายการอ้างอิง .....	108
ภาคผนวก.....	113
ภาคผนวก ก.....	114
ภาคผนวก ข.....	121
ภาคผนวก ค.....	122
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	126

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	ข้อมูลทางเทคนิคของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC175GHT-2..... 18
ตารางที่ 5.1	เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแบตเตอรี่ประเภทต่างๆ..... 67
ตารางที่ 6.1	พารามิเตอร์สำหรับการทดสอบกำลังไฟฟ้าสูงสุด..... 89
ตารางที่ 6.2	สรุปค่าความต้องการไฟฟ้าในแต่ละชั่วโมงของแต่ละฤดูกาล ..... 94
ตารางที่ 6.3	สรุปค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และช่วงความเชื่อมั่น 95 % ในแต่ละฤดูกาล .... 98
ตารางที่ 6.4	มาตรฐานคุณภาพการบริการของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ในช่วงปี 2552-2553 (บางส่วน)..... 102
ตารางที่ 6.5	ค่าดัชนีการเบี่ยงเบนฯ หลังจากปรับลดขนาดแบตเตอรี่..... 102
ตารางที่ ก.1	ข้อมูลทางเทคนิคของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC175GHT-2 ..... 114
ตารางที่ ก.2	ค่าตัวแปรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC175GHT-2 ตามแบบจำลองแผงเซลล์ แสงอาทิตย์แบบ 5 พารามิเตอร์..... 115
ตารางที่ ก.3	ข้อมูลทางเทคนิคของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์..... 115
ตารางที่ ก.4	ค่าตัวแปรของคอนเวอร์เตอร์ทบแรงดันในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ..... 116
ตารางที่ ก.5	ค่าตัวแปรของอินเวอร์เตอร์ NPC ในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์..... 116
ตารางที่ ก.6	ค่าเริ่มต้นของจุดทำงานในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์..... 116
ตารางที่ ก.7	ค่าสัญญาณอ้างอิงของการควบคุมอินเวอร์เตอร์ใน ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์..... 116
ตารางที่ ก.8	ตัวแปรที่ใช้ควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ..... 117
ตารางที่ ก.9	ตัวแปรที่ใช้ควบคุมกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ และแรงดันไฟตรงในอินเวอร์เตอร์. 117
ตารางที่ ก.10	ข้อมูลทางเทคนิคของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วรุ่น S12-290AGM..... 117
ตารางที่ ก.11	ข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์ในระบบแบตเตอรี่..... 118
ตารางที่ ก.12	ค่าตัวแปรของอินเวอร์เตอร์ NPC ในระบบแบตเตอรี่..... 118
ตารางที่ ก.13	ค่าเริ่มต้นของจุดทำงานในระบบแบตเตอรี่..... 118
ตารางที่ ก.14	ค่าสัญญาณอ้างอิงของการควบคุมอินเวอร์เตอร์ในระบบแบตเตอรี่ ..... 118
ตารางที่ ก.15	ค่าตัวแปรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบทดสอบ ..... 120
ตารางที่ ก.16	ค่าตัวแปรในระบบกระตุ้น (Excitation System)..... 120
ตารางที่ ก.17	ค่าตัวแปรในระบบเสถียรภาพไฟฟ้ากำลัง (Power System Stabilizer; PSS) ..... 120
ตารางที่ ข.1	ข้อมูลล็บัสของระบบ ..... 121
ตารางที่ ข.2	ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ ..... 121
ตารางที่ ค.1	ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยรายชั่วโมงในฤดูร้อน ..... 122
ตารางที่ ค.2	ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยรายชั่วโมงในฤดูฝน ..... 123
ตารางที่ ค.3	ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยรายชั่วโมงในฤดูหนาว ..... 123
ตารางที่ ค.4	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มแสงอาทิตย์ในแต่ละชั่วโมง ..... 124

	หน้า
ตารางที่ ค.5 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในแต่ละชั่วโมง .....	124
ตารางที่ ค.6 ความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยรายชั่วโมง .....	125

## สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 2.1	ส่วนประกอบของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า .....	9
ภาพที่ 2.2	สารกึ่งตัวนำชนิด P และ N เชื่อมต่อกัน (P-N junction).....	10
ภาพที่ 2.3	กระบวนการเกิดกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	11
ภาพที่ 2.4	ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ .....	13
ภาพที่ 2.5	แบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง .....	14
ภาพที่ 2.6	คุณลักษณะกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ .....	16
ภาพที่ 2.7	คุณลักษณะกำลังและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ .....	16
ภาพที่ 2.8	กำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายให้โหลดความต้านทาน .....	17
ภาพที่ 2.9	คุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงอาทิตย์ค่าต่างๆ และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส .....	22
ภาพที่ 2.10	คุณลักษณะกำลังไฟฟ้า-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงอาทิตย์ค่าต่างๆ และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส .....	23
ภาพที่ 2.11	คุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ค่าต่างๆ และความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าคงที่เท่ากับ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร .....	23
ภาพที่ 2.12	คุณลักษณะกำลังไฟฟ้า-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ค่าต่างๆ และความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าคงที่เท่ากับ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร .....	24
ภาพที่ 2.13	สัญลักษณ์เซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง .....	24
ภาพที่ 2.14	สัญลักษณ์การต่อชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอาร์เรย์ .....	25
ภาพที่ 2.15	การสร้างวงจรสมมูลของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม .....	25
ภาพที่ 2.16	การสร้างวงจรสมมูลของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ .....	26
ภาพที่ 2.17	คุณลักษณะกระแส-แรงดันของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ 1 สายซึ่งมีจำนวนแผงต่ออนุกรมที่แตกต่างกัน ณ สภาวะมาตรฐาน .....	29
ภาพที่ 2.18	คุณลักษณะกำลังไฟฟ้า-แรงดันของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ 1 สายซึ่งมีจำนวนแผงต่ออนุกรมที่แตกต่างกัน ณ สภาวะมาตรฐาน .....	30
ภาพที่ 2.19	คุณลักษณะกระแส-แรงดันของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีจำนวนแผงต่อขนานที่แตกต่างกัน ณ สภาวะมาตรฐาน .....	30
ภาพที่ 2.20	คุณลักษณะกำลังไฟฟ้า-แรงดันของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีจำนวนแผงต่อขนานที่แตกต่างกัน ณ สภาวะมาตรฐาน .....	31
ภาพที่ 3.1	โครงสร้างเทคโนโลยีของอินเวอร์เตอร์แบบ Multi-string.....	34
ภาพที่ 3.2	โครงสร้างคอนเวอร์เตอร์ทบแรงดันและวงจรติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด .....	35
ภาพที่ 3.3	การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยสิ่งแวดล้อม .....	39
ภาพที่ 3.4	การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยสิ่งแวดล้อม .....	39

ภาพที่ 3.5	แผนผังการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธี Perturb and Observe .....	40
ภาพที่ 3.6	แบบจำลองอินเวอร์เตอร์แบบ Three-level Neutral Point Clamped .....	41
ภาพที่ 3.7	บล็อกไดอะแกรมการควบคุมของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ที่เชื่อมต่อกับโครงข่าย.....	49
ภาพที่ 4.1	การกระจายคอปูลาประเภท Gumbel ของคู่อันดับของตัวแปรสุ่ม X และ Y .....	51
ภาพที่ 4.2	การกระจายคอปูลาประเภท Clayton ของคู่อันดับของตัวแปรสุ่ม X และ Y .....	52
ภาพที่ 4.3	การกระจายคอปูลาประเภท Frank ของคู่อันดับของตัวแปรสุ่ม X และ Y .....	53
ภาพที่ 4.4	การกระจายคอปูลาประเภท Gaussian ของคู่อันดับของตัวแปรสุ่ม X และ Y .....	53
ภาพที่ 4.5	การกระจายตัวของคู่อันดับการแจกแจงสะสมและการแจกแจงสะสม การเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ช่วงเวลา 7.00-8.00 น. ในฤดูร้อน .....	59
ภาพที่ 4.6	การกระจายตัวของคู่อันดับการแจกแจงและการแจกแจงสะสมของ ตัวแปรสุ่ม $Z_G$ และ $Z_T$ ที่ได้จากการสุ่ม โดยคอปูลาประเภท Frank ช่วงเวลา 7.00-8.00 น. ในฤดูร้อน .....	60
ภาพที่ 5.1	ภาพร่างอุปกรณ์กักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้า .....	61
ภาพที่ 5.2	การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรม .....	69
ภาพที่ 5.3	การต่อชุดแบตเตอรี่แบบขนาน.....	69
ภาพที่ 5.4	การต่อชุดแบตเตอรี่แบบผสม .....	70
ภาพที่ 5.5	บล็อกไดอะแกรมการหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ .....	79
ภาพที่ 6.1	ระบบทดสอบ.....	80
ภาพที่ 6.2	ตัวอย่างการสุ่มความเข้มแสงอาทิตย์ในฤดูร้อน .....	82
ภาพที่ 6.3	ตัวอย่างการสุ่มความเข้มแสงอาทิตย์ในฤดูฝน .....	83
ภาพที่ 6.4	ตัวอย่างการสุ่มความเข้มแสงอาทิตย์ในฤดูหนาว .....	83
ภาพที่ 6.5	ตัวอย่างการสุ่มอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในฤดูร้อน .....	84
ภาพที่ 6.6	ตัวอย่างการสุ่มอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในฤดูฝน .....	84
ภาพที่ 6.7	ตัวอย่างการสุ่มอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในฤดูหนาว.....	85
ภาพที่ 6.8	ตัวอย่างการสุ่มความเข้มแสงอาทิตย์ในฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว .....	85
ภาพที่ 6.9	ตัวอย่างการสุ่มอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว .....	86
ภาพที่ 6.10	ตัวอย่างการสุ่มความต้องการไฟฟ้าในฤดูร้อน.....	87
ภาพที่ 6.11	ตัวอย่างการสุ่มความต้องการไฟฟ้าในฤดูฝน.....	87
ภาพที่ 6.12	ตัวอย่างการสุ่มความต้องการไฟฟ้าในฤดูหนาว.....	88
ภาพที่ 6.13	ตัวอย่างการสุ่มความต้องการไฟฟ้าในฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว .....	88
ภาพที่ 6.14	ขนาดวัฏจักรงาน.....	89
ภาพที่ 6.15	แรงดันขั้วของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์.....	90
ภาพที่ 6.16	กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากคอนเวอร์เตอร์ .....	90

ภาพที่ 6.17	ตัวอย่างกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ก่อนการติดตั้งแบตเตอรี่.....	91
ภาพที่ 6.18	ตัวอย่างขนาดของแรงดันไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ก่อนการติดตั้งแบตเตอรี่.....	92
ภาพที่ 6.19	ตัวอย่างผลความถี่ของระบบก่อนการติดตั้งแบตเตอรี่.....	92
ภาพที่ 6.20	ตัวอย่างกราฟแจกแจงความถี่ของความจุของแบตเตอรี่ในทุกช่วงเวลา ของ 1 ชุดข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในฤดูร้อน.....	95
ภาพที่ 6.21	กราฟแจกแจงความถี่ของขนาดของแบตเตอรี่ที่คำนวณได้จากข้อมูลความเข้ม แสงอาทิตย์และสิ่งแวดล้อม 1,000 ชุดข้อมูลในฤดูร้อน.....	96
ภาพที่ 6.22	ตัวอย่างกราฟแจกแจงความถี่ของความจุของแบตเตอรี่ในทุกช่วงเวลา ของ 1 ชุดข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในฤดูฝน.....	96
ภาพที่ 6.23	กราฟแจกแจงความถี่ของขนาดของแบตเตอรี่ที่คำนวณได้จากข้อมูลความเข้ม แสงอาทิตย์และสิ่งแวดล้อม 1,000 ชุดข้อมูล ในฤดูฝน.....	97
ภาพที่ 6.24	ตัวอย่างกราฟแจกแจงความถี่ของความจุของแบตเตอรี่ในทุกช่วงเวลา ของ 1 ชุดข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในฤดูหนาว.....	97
ภาพที่ 6.25	กราฟแจกแจงความถี่ของขนาดของแบตเตอรี่ที่คำนวณได้จากข้อมูลความเข้ม แสงอาทิตย์และสิ่งแวดล้อม 1,000 ชุดข้อมูล ในฤดูหนาว.....	98
ภาพที่ 6.26	ตัวอย่างกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ หลังการติดตั้งแบตเตอรี่.....	100
ภาพที่ 6.27	ตัวอย่างขนาดของแรงดันไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ หลังการติดตั้งแบตเตอรี่.....	100
ภาพที่ 6.28	ตัวอย่างผลความถี่ของระบบหลังการติดตั้งแบตเตอรี่.....	101
ภาพที่ 6.29	ตัวอย่างกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ หลังการติดตั้งแบตเตอรี่ที่คำนวณได้.....	103
ภาพที่ 6.30	ตัวอย่างขนาดของแรงดันไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ หลังการติดตั้งแบตเตอรี่ที่คำนวณได้.....	103
ภาพที่ 6.31	ตัวอย่างผลความถี่ของระบบหลังการติดตั้งแบตเตอรี่ที่คำนวณได้.....	104

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของประชากรและการขยายตัวทางเศรษฐกิจของโลกทำให้ความต้องการใช้พลังงานโดยเฉพาะไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นทุกปี และเนื่องจากพลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่ผลิตมาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ดังนั้นความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้เกิดปัญหาสองประการคือ ประการแรก เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วหมดไป ดังนั้น ในอนาคตจึงมีความเสี่ยงที่จะเกิดปัญหาขาดแคลนพลังงานขึ้นและส่งผลให้ราคาเชื้อเพลิงมีความผันผวนสูง ประการที่สอง การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลจะปล่อยก๊าซเรือนกระจกเข้าสู่ชั้นบรรยากาศ การสะสมของก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศโลกส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้น ซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์โลกร้อน ผลกระทบจากปรากฏการณ์ดังกล่าวจะทำให้เกิดสภาพอากาศแปรปรวนและภัยธรรมชาติรุนแรงมากขึ้น

สำหรับประเทศไทยซึ่งมีการนำก๊าซธรรมชาติมาใช้ผลิตไฟฟ้าในสัดส่วนที่มากนั้น เพื่อลดความเสี่ยงจากการพึ่งพาเชื้อเพลิงหลักไม่กี่ชนิดและแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงาน ภาครัฐมีนโยบายลดความเสี่ยงด้านพลังงานโดยสนับสนุนให้มีการใช้พลังงานหมุนเวียนเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันการใช้พลังงานหมุนเวียนยังอยู่ในช่วงของการพัฒนา และยังมีต้นทุนการผลิตสูง ภาครัฐจึงจำเป็นต้องกระตุ้นให้เอกชนลงทุนด้วยมาตรการสนับสนุนทางการเงินต่างๆ เช่น การรับซื้อไฟฟ้าจากเอกชนที่ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนในราคาที่เหมาะสมและโครงการไม่ประสพภาวะขาดทุนหรือการปล่อยกู้ในอัตราดอกเบี้ยต่ำ เป็นต้น

จากข้อมูลของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ในแผนพัฒนาพลังงาน 15 ปี ระบุว่าประเทศไทยมีศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์มากกว่า 50,000 เมกะวัตต์ ขณะที่ค่าความต้องการไฟฟ้าของประเทศไทย ณ ปัจจุบัน อยู่ที่ประมาณ 26,000 เมกะวัตต์ ดังนั้นจะเห็นว่าศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยมีศักยภาพที่สูงมาก และด้วยการสนับสนุนจากรัฐ ทำให้ปัจจุบันเริ่มมีเอกชนเห็นสนใจลงทุนผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นจำนวนมาก เช่น บริษัท ผลิตไฟฟ้า จำกัด (มหาชน) ลงทุนโครงการมูลค่ากว่า 8,000 ล้านบาท เพื่อสร้างโรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีกำลังผลิตติดตั้ง 73 เมกะวัตต์ ที่จังหวัดลพบุรี [1] และบริษัท โซล่า เพาเวอร์ จำกัด ลงทุนสร้างโรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ในพื้นที่ภาคอีสานจำนวน 34 โครงการ รวมกำลังผลิตติดตั้ง 205 เมกะวัตต์ ด้วยเงินลงทุนทั้งสิ้น 24,000 ล้านบาท โดยจะก่อสร้างให้แล้วเสร็จทั้งหมดภายในปี 2556 [2] เป็นต้น

ในอนาคต ภาครัฐมีแผนสนับสนุนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนอย่างต่อเนื่อง จากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25 % ใน 10 ปี (2555-2564) ที่กำหนดเป้าหมายการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้ 2,000 เมกะวัตต์ และมีการเปลี่ยนรูปแบบการรับซื้อไฟฟ้าจากการให้ส่วนเพิ่มราคาซื้อไฟฟ้า (ADDER) เป็นระบบ Feed-in Tariffs (FiT) [3] จึงคาดการณ์ได้



ว่าจะมีนักลงทุนเข้ามาลงทุนการผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์มากขึ้นและศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ที่ประเทศไทยที่มีอยู่ปริมาณมากจะได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์มากขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีความไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับความเข้มแสงอาทิตย์ที่กระทบแผงและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ซึ่งทั้งสองตัวแปรมีความไม่แน่นอนสูงและส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้ามีการแกว่ง (Fluctuation) หากระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีความแข็งแรงไม่เพียงพอ การรบกวนจากการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจะส่งผลให้แรงดัน และความถี่ของระบบไฟฟ้าบริเวณนั้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งมีความเสี่ยงที่ทำให้ระบบไฟฟ้าบริเวณนั้นขาดเสถียรภาพ และมีคุณภาพไฟฟ้าต่ำลง

ในการแก้ปัญหาดังกล่าว ผู้ผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่สามารถใช้อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน (Energy Storage Device) เช่น แบตเตอรี่ ต่อเข้าจุดต่อร่วม (Point of Common Coupling, PCC) เพื่อควบคุมและลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบได้ โดยแบตเตอรี่จะรับกำลังไฟฟ้าเมื่อกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าจุดต่อร่วมมีค่ามากกว่าความต้องการไฟฟ้าที่กำหนด ในทางกลับกัน แบตเตอรี่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าเมื่อกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าจุดต่อร่วมมีค่าน้อยกว่าความต้องการไฟฟ้าที่กำหนด ผู้ออกแบบอาจติดตั้งแบตเตอรี่ที่มีขนาดใหญ่ หากไม่ต้องการให้มีการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเลย ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนการก่อสร้างโรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์โดยไม่จำเป็น อย่างไรก็ตาม หากกำหนดขนาดแบตเตอรี่เล็กเกินไป ความสามารถในการรับและจ่ายกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะลดลง เนื่องจากแบตเตอรี่ไม่สามารถรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าตามความต้องการได้ จึงส่งผลให้ไม่สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า แรงดัน และความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพได้ จากที่กล่าวข้างต้น การหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่จึงมีความสำคัญที่จะต้องพิจารณา

## 1.2 แนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ สามารถแบ่งหัวข้องานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ได้ดังนี้

### 1.2.1 ผลกระทบจากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ต่อระบบไฟฟ้าในบริเวณที่ติดตั้ง

งานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบจากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ต่อระบบไฟฟ้าในบริเวณที่ติดตั้ง แสดงดังต่อไปนี้

บทความ [4], [5] และ [6] ศึกษาผลกระทบจากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ต่อระบบจำหน่าย โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่แต่ละตำแหน่งของระบบไฟฟ้า ซึ่งพบว่าหากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้มาก แรงดันของระบบไฟฟ้าบริเวณนั้นจะเพิ่มขึ้น และอาจจะเกิดแรงดันเกินขึ้นในระบบได้

บทความ [7] ศึกษาผลกระทบจากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ต่อระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยศึกษาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่

ระบบ และแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ ของระบบไฟฟ้า และทำการเปรียบเทียบผลกระทบเมื่อติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดที่แตกต่างกันด้วย

บทความ [8] ศึกษาผลกระทบจากการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ต่อการควบคุมแรงดันของระบบจำหน่าย พบว่า การควบคุมแรงดันของหม้อแปลงปรับแรงดันได้จะมีการทำงานที่ดีขึ้น เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าไม่คงที่ ทำให้เกิดการแกว่งของแรงดันไฟฟ้า

### 1.2.2 วิธีการแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้า แรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าในบริเวณที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

ในส่วนวิธีการแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้า แรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าในบริเวณที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ได้มีงานวิจัยที่นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาที่แตกต่างกัน ได้แก่

บทความ [6] นอกจากกล่าวถึงผลกระทบของการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ต่อระบบไฟฟ้าแล้ว ยังเสนอวิธีการลดการแกว่งของแรงดันไฟฟ้า 2 วิธี ได้แก่ การควบคุมตัวประกอบกำลัง และการควบคุมการผลิตกำลังรีแอกทีฟ ซึ่งพบว่า การควบคุมทั้ง 2 วิธีสามารถลดการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าในบริเวณที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าได้ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ไม่ได้กล่าวถึง การลดการแกว่งของความถี่ของระบบไฟฟ้า

บทความ [9] และ [10] นำเสนอวิธีการควบคุมการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อลดการแกว่งของความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ โดยใช้วิธีการควบคุมจำนวนระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบด้วยวิธีการ Fuzzy logic ซึ่งจำเป็นต้องมีระบบควบคุมส่วนกลางและระบบควบคุมย่อยที่ซับซ้อน

บทความ [11] นำเสนอวิธีการควบคุมการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อลดการแกว่งของความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าเชื่อมต่ออยู่ โดยใช้แบบจำลองระบบไฟฟ้าแบบ Minimal-order Observer เพื่อควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ให้เปลี่ยนแปลงตามความต้องการไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม วิธีการควบคุมอินเวอร์เตอร์นี้จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดลดลง

บทความ [12] นำเสนอวิธีการควบคุมแรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานลม และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล ด้วยวิธีการควบคุมความต้องการไฟฟ้า ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้มีข้อดีคือ ประหยัดเงินลงทุนติดตั้งระบบกักเก็บพลังงาน อย่างไรก็ตาม การนำมาใช้ในทางปฏิบัติอาจเป็นไปได้ยาก เนื่องการควบคุมความต้องการไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้า

บทความ [13] นำเสนอวิธีการควบคุมการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีควบคุมอัตราการผลิต (Ramp Rate) ของอินเวอร์เตอร์ โดยใช้ตัวเก็บประจุช่วยปรับกำลังไฟฟ้าบางส่วน อย่างไรก็ตาม การควบคุมที่นำเสนอนี้ส่งผลให้ระบบผลิตไฟฟ้าผลิต

กำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ไม่เต็มที่ เนื่องจากสูญเสียกำลังไฟฟ้าบางส่วนไปในตัวเก็บประจุ และหากตัวเก็บประจุมีขนาดเล็ก การสูญเสียในตัวเก็บประจุก็น่าจะยิ่งมากตามไปด้วย

บทความ [14] นำเสนอการแก้ปัญหาการเปลี่ยนแปลงของแรงดันด้วยแบตเตอรี่กักเก็บพลังงาน (Battery Energy Storage System; BESS) และ STATCOM

บทความ [15] นำเสนอวิธีการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ด้วยระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงาน โดยการแกว่งของกำลังไฟฟ้าจะต้องอยู่ในช่วงที่ต้องการ และรายได้จากการขายพลังงานไฟฟ้าจะต้องมากที่สุดอีกด้วย แต่บทความวิจัยนี้ไม่นำเสนอขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ และผลกระทบต่อความถี่ของระบบไฟฟ้า

### 1.2.3 การใช้ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่า มีการใช้งานระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานในหลายด้าน ได้แก่

บทความ [16] กล่าวถึงการใช้งานระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานเพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าแก่โหลดได้เพียงพอด้วยวิธีการติดตามความต้องการไฟฟ้า (Load-following)

บทความ [17]-[19] กล่าวถึงการใช้งานระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานในด้านการจัดสรรการผลิต (Dispatch) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า เพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีกำลังผลิตที่ไม่แน่นอน สามารถจัดสรรกำลังผลิตเฉลี่ยรายชั่วโมงได้ตามต้องการ และช่วยในด้านลดต้นทุนการผลิต

บทความ [20] กล่าวถึงการใช้งานระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานเพื่อวางแผนการผลิต (Unit Commitment) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดั้งเดิม และระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้ต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด

บทความ [21] กล่าวถึงการใช้ระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานเพื่อช่วยเลื่อนเวลาการผลิตกำลังไฟฟ้าให้เหมาะสมกับความต้องการไฟฟ้า (Shift the Peak Generation period)

ในส่วนการนำระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานมาใช้งานด้านการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าแรงดัน และความถี่ของระบบไฟฟ้านั้น ยังคงมีการศึกษาวิจัยกันเพียงเล็กน้อย เช่น บทความวิจัย [22] แสดงวิธีการควบคุมการแกว่งของความถี่ของระบบไฟฟ้าที่แยกโดดจากระบบไฟฟ้า ซึ่งในระบบนี้ประกอบด้วย ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบแบตเตอรี่สะสมพลังงาน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล และความต้องการไฟฟ้ากระแสสลับ โดยการควบคุมการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ด้วยวิธี Fuzzy logic ทำให้การแกว่งของความถี่ระบบไฟฟ้าลดลง

### 1.2.4 วิธีการหาขนาดแบตเตอรี่ที่ติดตั้งในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

จากการศึกษาการใช้งานระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ในหัวข้อที่แล้ว พบว่า มีวิธีการคำนวณขนาดแบตเตอรี่ที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทงานที่นำแบตเตอรี่ไปใช้งาน ดังแสดงต่อไปนี้

บทความ [17] ต้องการนำแบตเตอรี่มาช่วยจัดสรรกำลังการผลิตของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ และระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานลม ดังนั้นขนาดแบตเตอรี่ที่เลือกมาใช้งานจึงเลือกจากขนาดมากที่สุดของกราฟการแจกแจงความถี่ของความแตกต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ต้องการกับกำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าผลิตได้ อย่างไรก็ตาม ขนาดของแบตเตอรี่ที่นำมาติดตั้งในระบบผลิตไฟฟ้าสอดคล้องกับความเข้มแสงอาทิตย์หรือความเร็วลมเฉลี่ยรายชั่วโมงของ 1 วัน ที่งานวิจัยนำมาเลือกใช้เท่านั้น ซึ่งขนาดแบตเตอรี่อาจจะไม่สามารถครอบคลุมการจ่ายหรือรับกำลังไฟฟ้าได้ตลอด 1 ปี

บทความ [23] ได้แสดงการหาขนาดของแบตเตอรี่โดยให้ปริมาณการซื้อ-ขายไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าหลักน้อยที่สุด ลดความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (Peak Shaving) และเพียงพอต่อความต้องการไฟฟ้า

บทความ [24] ได้แสดงการหาขนาดแบตเตอรี่เพื่อช่วยลดความต้องการไฟฟ้าสูงสุดที่ระบบไฟฟ้าหลักจะต้องจ่ายให้กับระบบไฟฟ้าที่ประกอบด้วย ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบแบตเตอรี่ และความต้องการไฟฟ้า โดยเลือกขนาดแบตเตอรี่จากส่วนต่างพลังงานที่มากที่สุดในแต่ละวัน ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ และสถานะของแบตเตอรี่ (State of Charge)

### 1.2.5 การจำลองความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

สภาพสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ความเข้มแสงอาทิตย์ และอุณหภูมิ เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งงานวิจัยที่ศึกษาการจำลองความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ได้แก่

บทความ [25] แสดงวิธีการคาดการณ์ความเข้มแสงอาทิตย์เชิงพื้นที่ในประเทศเยอรมนี โดยวิเคราะห์จากความคลาดเคลื่อนของข้อมูลด้วยวิธี Root Mean Square Error (RMSE)

บทความ [26] แสดงวิธีการคาดการณ์ความเข้มแสงอาทิตย์ด้วยวิธี Autoregressive moving average (ARMA)

อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาการจำลองความเข้มแสงอาทิตย์ร่วมกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเพื่อคาดการณ์กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

## 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาการวิเคราะห์ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายและมีระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานติดตั้งอยู่ด้วย

- 2) เพื่อศึกษาการเลือกขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่เพื่อช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ความถี่ และแรงดันของระบบไฟฟ้าที่ต่ออยู่ได้

#### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) พิจารณาแบบจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 5 พารามิเตอร์
- 2) พิจารณาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ ความเข้มแสงอาทิตย์ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และการต่อชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- 3) ไม่พิจารณาผลของการบังแสงแดด (Shedding) และการไม่เข้ากันของเซลล์ (Mismatch)
- 4) ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ และอินเวอร์เตอร์
- 5) อุปกรณ์ในระบบแบตเตอรี่ก็เก็บพลังงานประกอบด้วยแบตเตอรี่ และอินเวอร์เตอร์
- 6) พิจารณาแบบจำลองอินเวอร์เตอร์แบบ Double Stages
- 7) พิจารณาการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธี Perturb and Observe
- 8) พิจารณาแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว (Lead Acid)
- 9) ไม่พิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อแบตเตอรี่
- 10) กำหนดประเภทความต้องการกำลังไฟฟ้าหรือโหลดเป็นกำลังไฟฟ้าคงที่
- 11) พิจารณาระบบไฟฟ้าขนาด 3 บัส แบบสามเฟสสมดุลที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสที่เป็นตัวแทนของระบบไฟฟ้าหลัก (Main grid) ผ่านทางหม้อแปลงและระบบสายส่ง
- 12) ไม่พิจารณาฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้า

#### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

- 1) ศึกษาแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Module) แบบ 5 พารามิเตอร์
- 2) ศึกษาผลกระทบของความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่อคุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- 3) ศึกษาผลกระทบของการต่อชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic array) ต่อคุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- 4) ทดสอบแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิจริง
- 5) ศึกษาแบบจำลองเชิงพลวัตแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว
- 6) ศึกษาแบบจำลองเชิงพลวัตเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบ 4 สถานะ
- 7) ศึกษาแบบจำลองเชิงพลวัตของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า
- 8) ศึกษาวิธีการหาขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและความถี่
- 9) พัฒนาโปรแกรมหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและความถี่กับระบบทดสอบที่นำมาใช้
- 10) วิเคราะห์ผลการทดสอบและสรุปผล
- 11) สรุปผลงานวิจัย

12) เรียบเรียงผลงานวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) วิธีการวิเคราะห์เพื่อเลือกขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่สำหรับติดตั้งในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและความถี่อย่างมีประสิทธิภาพ
- 2) โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้าและมีระบบแบตเตอรี่กักเก็บพลังงานติดตั้งอยู่ด้วย
- 3) โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณและเลือกขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่

## 1.7 เนื้อหาในวิทยานิพนธ์

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์ในแต่ละบทประกอบด้วย

บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงองค์ประกอบของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า หลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์ แบบจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 5 พารามิเตอร์ กล่าวถึงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ ปัจจัยจากสิ่งแวดล้อม และการต่อชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ รวมถึงแนวทางในการพัฒนาโปรแกรมจากแบบจำลองที่นำเสนอ

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับอินเวอร์เตอร์แบบ Double Stage แบบจำลองและการควบคุมของคอนเวอร์เตอร์ทบแรงดันที่มีระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบ Perturb and Observe แบบจำลองและการควบคุมของอินเวอร์เตอร์แบบ Three-level Neutral Point Clamped และแนวทางในการพัฒนาโปรแกรมแบบจำลองที่นำเสนอ

บทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการจำลองความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ซึ่งพิจารณาการขึ้นต่อเวลาของความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม รวมทั้งพิจารณาการขึ้นต่อกันระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

บทที่ 5 กล่าวถึงความรู้เบื้องต้นของแบตเตอรี่ คุณสมบัติของแบตเตอรี่ ชนิดของแบตเตอรี่ ลักษณะทางสมรรถนะของแบตเตอรี่ การต่อชุดแบตเตอรี่ แบบจำลองแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วซึ่งใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ และในที่สุดท้ายจะกล่าวถึงวิธีการหาความจุของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม

บทที่ 6 ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ด้วยวิธีการที่นำเสนอ โดยจะแบ่งหัวข้อการทดสอบออกเป็น 2 หัวข้อ คือ ระบบทดสอบที่นำมาใช้ และผลการทดสอบ ในส่วนของผลการทดสอบจะแบ่งเป็น 6 การทดสอบ ประกอบด้วย (1) การทดสอบการสูมความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (2) การทดสอบการสูมความต้องการไฟฟ้า (3) การทดสอบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด กำลังไฟฟ้า แรงดัน และความถี่ของระบบ (4) การหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในเบื้องต้น (5) การทดสอบหากำลังไฟฟ้า แรงดัน และความถี่ของระบบเมื่อติดตั้งแบตเตอรี่ขนาดเท่ากับที่คำนวณได้ และ (6) การหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่กรณีพิจารณามาตรฐานการเบี่ยงเบนของความถี่และแรงดัน

บทที่ 7 สรุปผลที่ได้จากงานวิจัย

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์

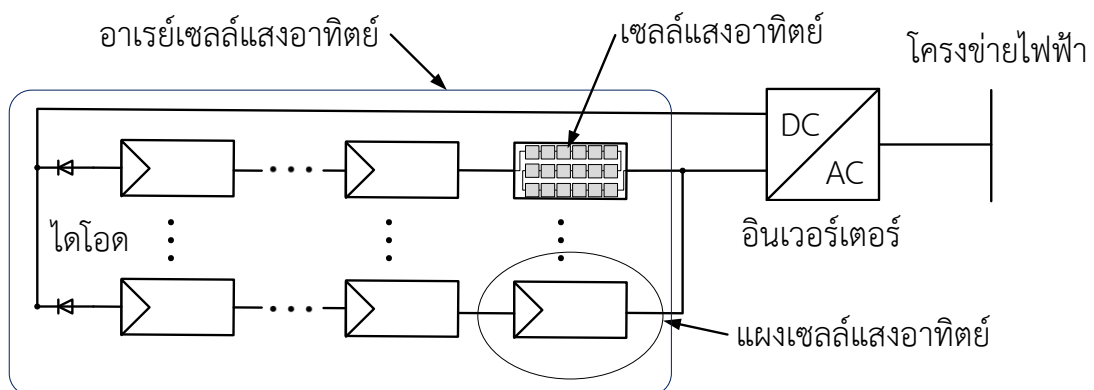
ในบทนี้จะนำเสนอภาพรวมของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ หลักการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์จากผลของความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิ สิ่งแวดล้อม การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการต่อชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ และแนวทางในการพัฒนาโปรแกรมจากแบบจำลองที่นำเสนอ

#### 2.1 ภาพรวมของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า

ส่วนประกอบสำคัญของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า [27] ดังแสดงในภาพที่ 2.1 มีดังนี้

##### 2.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell)

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ โดยจะสามารถผลิตไฟฟ้ากระแสตรงออกมาได้เมื่อมีแสงมากระทบ ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์มีหลากหลายประเภทซึ่งขึ้นกับประเภทวัสดุที่นำมาผลิตเป็นเซลล์ ในปัจจุบัน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์อาทิตย์ที่นิยมใช้ในการอธิบายคุณสมบัติทางไฟฟ้ามี 2 ประเภทหลักๆ คือ (1) แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 2 ไดโอด และ (2) แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด 5 พารามิเตอร์ สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์แบบหนึ่งไดโอด 5 พารามิเตอร์ ซึ่งมีความซับซ้อนไม่มากแต่ยังคงให้ความแม่นยำในการคำนวณ [28]



ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า



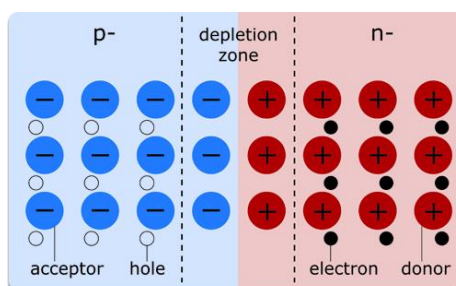
โดยปกติ เซลล์แสงอาทิตย์เพียง 1 เซลล์จะไม่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้เพียงพอสำหรับการใช้งานในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ ดังนั้นการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาเชื่อมต่อกันเป็นแผง (Module) แล้วนำแผงมาต่อชุดกันเป็นอาร์เรย์ (Array) จะทำให้ระบบผลิตไฟฟ้าสามารถผลิตพลังงานได้ตามต้องการ นอกจากนี้ ปัจจัยสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ความเข้มแสงอาทิตย์ และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมยังส่งผลกระทบต่อความสามารถในการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้วย ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดต่อไป

### 2.1.2 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สามารถแปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จำเป็นต้องมีการเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าหลัก (Main Grid) ดังนั้นอินเวอร์เตอร์จึงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่ช่วยเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้ากระแสสลับก่อนจ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้า นอกจากนี้ยังช่วยควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ และการซิงโครไนซ์กับโครงข่ายไฟฟ้าอีกด้วย สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้อินเวอร์เตอร์แบบ Double Stages และวิธีการควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธี Perturb and Observe ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

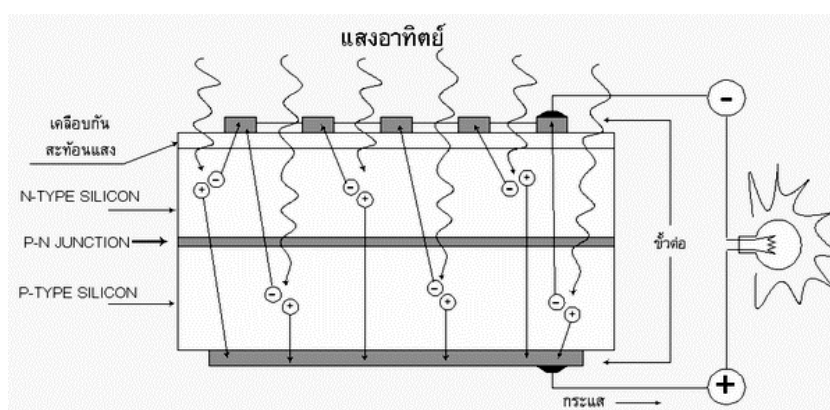
## 2.2 หลักการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ โดยเมื่อมีแสงอาทิตย์มาตกกระทบเซลล์แล้ว เซลล์จะเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง องค์ประกอบหลักของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ สารกึ่งตัวนำสองชนิดได้แก่ สารกึ่งตัวนำชนิด P ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่ขาดอิเล็กตรอนหรือเรียกสถานะนี้ว่า โฮลส์ (Holes) โดยจะทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน (Acceptor) และสารกึ่งตัวนำชนิด N ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีอิเล็กตรอนเกิน โดยจะทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอน (Donor) เมื่อนำสารกึ่งตัวนำทั้งสองมาเชื่อมต่อกัน สารกึ่งตัวนำชนิด N จะให้อิเล็กตรอนแก่สารกึ่งตัวนำชนิด P แล้วเกิดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮลส์ที่บริเวณรอยต่อ เกิดเป็นเขตปลอดพาหะ (Depletion Region) และเกิดสนามไฟฟ้าขึ้น โดยจะมีทิศทางจากสารกึ่งตัวนำชนิด N ไปยังสารกึ่งตัวนำชนิด P ดังภาพที่ 2.2 [29]



ภาพที่ 2.2 สารกึ่งตัวนำชนิด P และ N เชื่อมต่อกัน (P-N junction)

จากภาพที่ 2.3 [30] เมื่ออนุภาคโฟตอน (Photon) จากแสงอาทิตย์ที่มีพลังงานมากกว่า ช่องว่างพลังงาน (Energy Gap) มากระทบเซลล์แสงอาทิตย์ (ด้านสารกึ่งตัวนำชนิด N) จะทำให้อิเล็กตรอนส่วนเกินนี้หลุดออกจากอะตอม จากนั้นอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นนี้ จะเคลื่อนที่สวนทิศทางสนามไฟฟ้าไปสะสมที่ปลายอีกด้านของสารกึ่งตัวนำชนิด N ในขณะที่โฮลส์จะเคลื่อนที่ตามทิศทางสนามไฟฟ้าไปสะสมที่ปลายอีกด้านของสารกึ่งตัวนำชนิด P การสะสมของอิเล็กตรอนและโฮลส์ที่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกถ่ายเทเมื่อนำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มากับต่อวงจรภายนอก และทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น โดยอ้างอิงทิศทางกระแสไฟฟ้าในทิศทางเดียวกับการไหลของโฮลส์ ดังนั้นจากนิยามขั้วทางไฟฟ้า จึงกำหนดให้ขั้วบวกคือ ด้านสารกึ่งตัวนำชนิด P และขั้วลบคือด้านสารกึ่งตัวนำชนิด N



ภาพที่ 2.3 กระบวนการเกิดกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

## 2.3 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

การวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์และลดต้นทุนการผลิตทำให้มีการนำวัสดุที่หลากหลายมาใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการนำคุณสมบัติเด่นของแต่ละวัสดุมาใช้ประโยชน์ การผสมผสานวัสดุหลายชนิดทำให้ได้คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ตามต้องการ ซึ่งกลุ่มสารประกอบที่นิยมนำมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้กันในปัจจุบันสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม [31]-[34] ดังนี้

### 2.3.1 กลุ่มที่ทำจากสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอน

ซิลิคอนเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีราคาถูกที่สุด เนื่องจากซิลิคอนเป็นธาตุชนิดหนึ่งที่มีมากที่สุดในโลก สามารถถลุงได้จากหินและทราย นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ใช้ทำทรานซิสเตอร์ วงจรรวม และเซลล์แสงอาทิตย์ ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากกลุ่มสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอนยังคงมีประสิทธิภาพสูงและถูกนำมาใช้งานกันแพร่หลาย ประเภทของซิลิคอนที่นำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มนี้ แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

### 2.3.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (Single Crystalline Silicon)

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอนเดี่ยวเริ่มต้นจากนำสารซิลิคอนซึ่งผ่านการทำให้มีความบริสุทธิ์สูงมาก (99.999%) มาหลอมละลายในเตาเผาเพื่อทำการสร้างแท่งผลึกเดี่ยวขนาดใหญ่พร้อมกับใส่โบรอนเพื่อทำให้เกิดสารกึ่งตัวนำชนิด P แล้วทำให้เกิดการเย็นตัวเพื่อจับตัวกันเป็นผลึกด้วยการใช้ผลึกตั้งต้น (Seed) จากนั้นนำแท่งผลึกมาตัดให้เป็นแผ่นบาง ๆ เรียกว่า เวเฟอร์ (Wafer) ซึ่งจะได้แผ่นผลึกมีความหนาประมาณ 300 ไมโครเมตร จากนั้นนำไปเจือสารที่จำเป็นในการทำให้เกิดเป็น P-N junction ขึ้นบนแผ่นเวเฟอร์ ด้วยวิธีการแพร่ (Diffusion) จากนั้นนำไปทำขั้วไฟฟ้าเพื่อใช้งานต่อไป ด้วยเหตุที่กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวมีความซับซ้อน จึงส่งผลให้การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีต้นทุนสูง และทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีราคาแพง อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตนี้มีศักยภาพในการผลิตผลึกเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีคุณภาพสูง ดังนั้นประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จึงมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงสุดในกลุ่มสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอน ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.4 [35]

### 2.3.1.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกกรมซิลิคอน (Polycrystalline Silicon)

เทคโนโลยีประเภทนี้เกิดจากความพยายามในการที่จะลดต้นทุนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยต้นทุนที่ลดลงมาจากการเปลี่ยนวิธีการตกผลึกของซิลิคอนเหลว กล่าวคือ การปล่อยให้สารละลายซิลิคอนเหลวเย็นตัวลงบนแม่พิมพ์ ทำให้การตกผลึกของซิลิคอนไม่พร้อมกันทั้งแผ่น ดังนั้นคุณภาพของผลึกเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกกรมซิลิคอนจึงต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยว ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีผลึกกรมซิลิคอนต่ำกว่าเทคโนโลยีผลึกเดี่ยวซิลิคอนด้วย

### 2.3.1.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนอสัณฐาน (Amorphous Silicon)

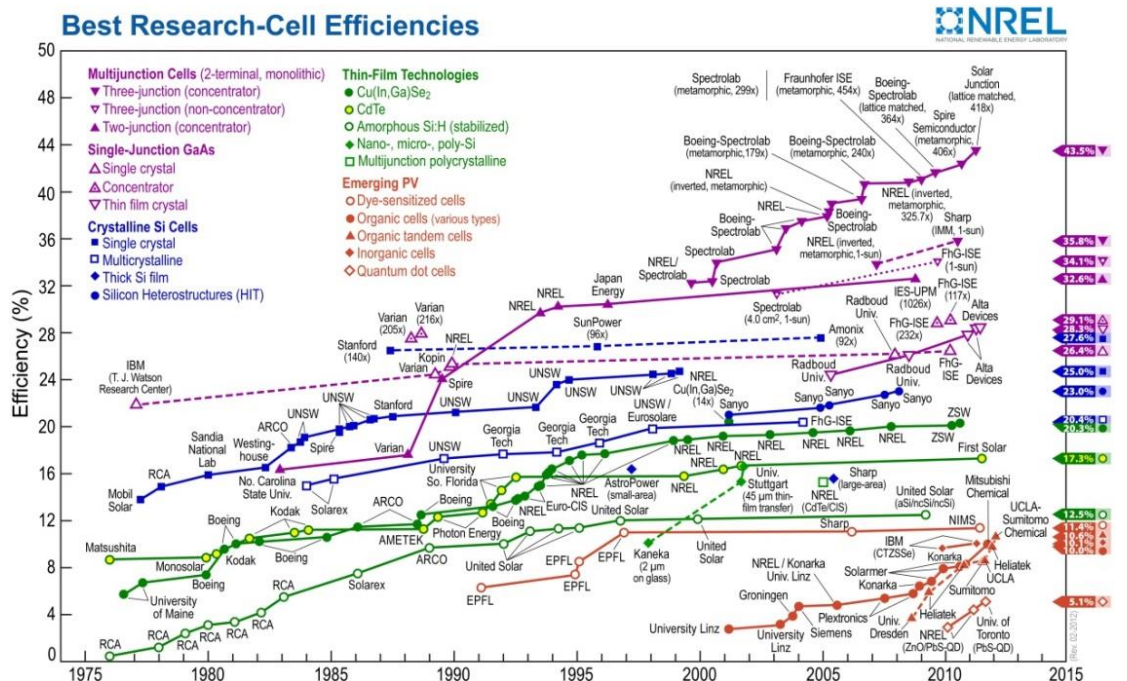
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนอสัณฐานไม่มีโครงสร้างของโมเลกุลที่จับตัวกันเป็นผลึกเหมือนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวและผลึกกรม แต่ประกอบด้วยแผ่นฟิล์มบาง (Thin Film) ของซิลิคอนที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรอง (โดยส่วนใหญ่จะเป็นแก้ว สแตนเลส หรือพลาสติก) และมีกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน กล่าวคือ กระบวนการผลิตแผ่นฟิล์มบางของซิลิคอนลงบนแผ่นฐานรองจะใช้เทคนิค Chemical Vapor Deposition ซึ่งนำก๊าซที่มีธาตุซิลิคอนอยู่ เช่น ก๊าซไซเลน ( $\text{SiH}_4$ ) ผ่านเข้าไปในท่อสุญญากาศ และตรงบริเวณที่วางแผ่นฐานรองก็จะมีกระแสกระตุ้น เช่น การกระตุ้นด้วยพลาสมา เพื่อส่งพลังงานให้ซิลิคอนแยกตัวออกจากก๊าซไซเลนเกิดเป็นซิลิคอนอิสระ ซึ่งจะจับตัวกันบนแผ่นฐานรองและเกิดการสะสมกันเป็นฟิล์มบางซิลิคอนอสัณฐาน ชนิดของสารกึ่งตัวนำสามารถเลือกได้จากขั้นตอนนี้ โดยสารกึ่งตัวนำชนิด P สามารถผลิตได้จากการผสมก๊าซที่มีธาตุโบรอน เช่น  $\text{B}_2\text{H}_6$  เข้าไปด้วย และสารกึ่งตัวนำชนิด N สามารถผลิตได้จากการผสมก๊าซที่มีฟอสเฟต เช่น  $\text{PH}_3$

เข้าไปด้วย ความหนาของฟิล์มสามารถควบคุมได้จากการไหลของก๊าซ ทำให้ไม่สิ้นเปลืองเนื้อวัสดุ มี น้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่น และมีราคาถูก ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนอสัณฐานสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าได้หลาย ประเภท เช่น เครื่องคิดเลข นาฬิกาข้อมือ วิทยุทรานซิสเตอร์ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนพลังงาน แสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีซิลิคอนอสัณฐานยังคงมีประสิทธิภาพต่ำที่สุดในกลุ่มสารกึ่งตัวนำ ประเภทซิลิคอน

### 2.3.2 กลุ่มที่ทำจากสารประกอบที่ไม่ใช่ซิลิคอน

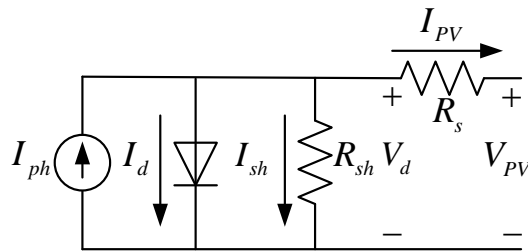
ในปัจจุบัน เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้มีประสิทธิภาพสูงถึง 26.4% ขึ้นไป [35] แต่มีราคาสูง มาก ไม่นิยมนำมาใช้บนพื้นโลก แต่นิยมใช้งานในระบบดาวเทียมและระบบรวมแสง อย่างไรก็ตาม การพัฒนากระบวนการผลิตสมัยใหม่มีแนวโน้มที่ทำให้ต้นทุนการผลิตมีราคาต่ำลงได้ และอาจมีการ นำมาใช้แพร่หลายมากขึ้นในอนาคต โดยวัสดุที่จะนำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จะประกอบด้วย แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs : Gallium Arsenide), แคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe : Cadmium Telluride) และคอปเปอร์อินเดียมไดเซเลไนด์ (CIS : Copper indium diselenide) เป็นต้น ซึ่งมีทั้ง ชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) และผลึกรวม (Polycrystalline)



ภาพที่ 2.4 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทต่างๆ

## 2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากหัวข้อที่ผ่านมา เมื่อโฟตอนจากแสงอาทิตย์กระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น โดยลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปของกระแสและแรงดันสามารถแสดงได้ตามแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 5 พารามิเตอร์ดังภาพที่ 2.5 [28], [36]–[37] ดังนี้



ภาพที่ 2.5 แบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง

จากภาพที่ 2.5 เมื่อนำมาเขียนเป็นสมการวงจรไฟฟ้าด้วยกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Circuit Law; KCL) จะได้ตั้งสมการที่ (2.1)

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2.1)$$

เมื่อ

$I_{PV}$	คือ	กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (A)
$I_{ph}$	คือ	กระแสโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric current) ที่เกิดจากแสงอาทิตย์ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งแผง (A)
$I_d$	คือ	กระแสไดโอด (Diode current) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (A)
$I_{sh}$	คือ	กระแสที่ไหลผ่านความต้านทานขนาน $R_{sh}$ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (A)

โดยสมการกระแสไหลผ่านไดโอด คือ

$$I_d = I_o \left( \exp\left(\frac{V_d}{n_s V_T}\right) - 1 \right) \quad (2.2)$$

เมื่อ

$I_o$	คือ	กระแสอิ่มตัวไดโอด (Saturation Current) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (A)
$V_d$	คือ	แรงดันตกคร่อมไดโอดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (V)
$n_s$	คือ	จำนวนของเซลล์ทั้งหมดที่นำมาประกอบกันเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (เซลล์)
$V_T$	คือ	ความต่างศักย์เริ่มเปลี่ยน (V)

ความต่างศักย์เริ่มเปลี่ยนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.3)

$$V_T = k_b A T_{module} / q \quad (2.3)$$

เมื่อ

$k_b$	คือ	ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann Constant) เท่ากับ $1.38 \times 10^{-23}$ J/K
$A$	คือ	Diode Ideality Factor คือ ค่าคงที่ของไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์
$T_{module}$	คือ	อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (K)
$q$	คือ	ค่าคงที่ของประจุอิเล็กตรอนหนึ่งอิเล็กตรอน เท่ากับ $1.6 \times 10^{-19}$ C

เมื่อพิจารณาแรงดันตกคร่อมไดโอดในรูปของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และแรงดันตกคร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะได้ว่า

$$V_d = V_{PV} + I_{PV} R_s \quad (2.4)$$

กระแสที่ไหลผ่านความต้านทานขนาน  $R_{sh}$  สามารถเขียนในรูปของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และแรงดันตกคร่อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ดังนี้

$$I_{sh} = (V_{PV} + I_{PV} R_s) / R_{sh} \quad (2.5)$$

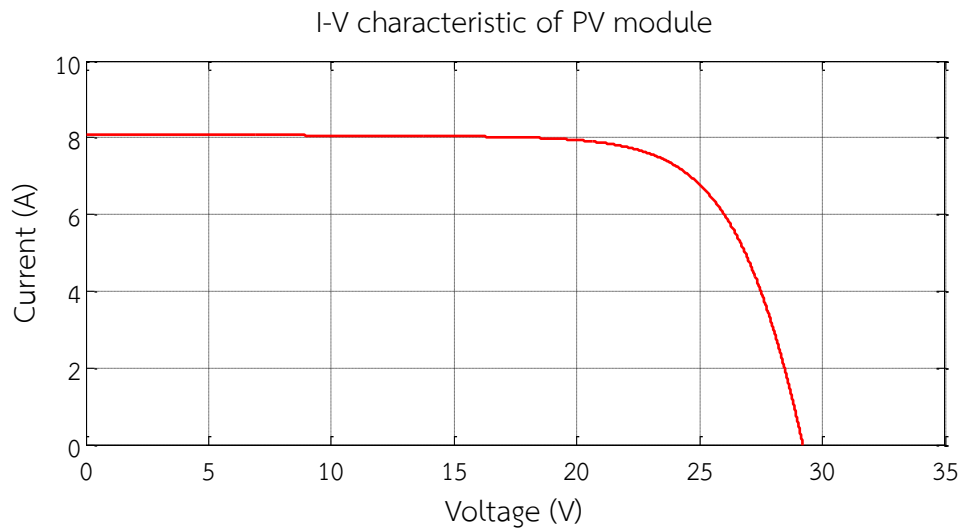
แทนสมการที่ (2.2), (2.4) และ (2.5) ลงในสมการที่ (2.1) จะได้ว่า

$$I_{PV} = I_{ph} - I_o \left( \exp \left( \frac{V_{PV} + I_{PV} R_s}{n_s V_T} \right) - 1 \right) - \frac{V_{PV} + I_{PV} R_s}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

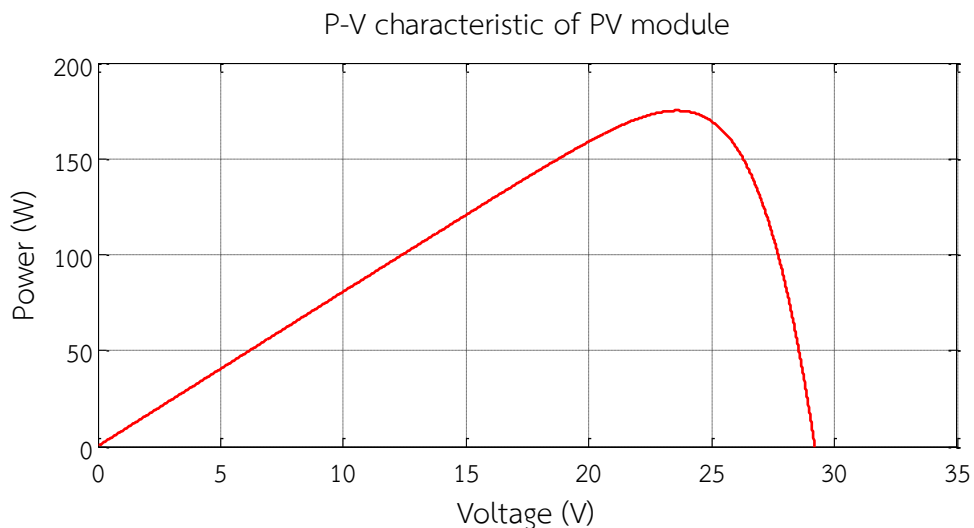
สมการที่ (2.6) เรียกว่า สมการคุณลักษณะกระแสและแรงดัน (I-V Characteristic Equation) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ตัวอย่างกราฟสมการคุณลักษณะแสดงดังภาพที่ 2.6 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำ กระแสไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้จะมีค่าประมาณ กระแสลัดวงจร (จุดตัดแกนตั้ง) และมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นใกล้แรงดันเปิดวงจร (จุดตัดแกนนอน)

พิจารณาภาพที่ 2.7 จะเห็นว่าความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีจุดทำงานที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เพียงจุดเดียว อย่างไรก็ตาม จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นกับโหลดที่เชื่อมต่อกับแผง และจุดทำงานดังกล่าวอาจไม่ใช่จุดทำงานที่แผงจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ตัวอย่างของปัญหาดังกล่าวสามารถแสดงดังภาพที่ 2.8 ซึ่งแสดงจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง ที่ต่ออนุกรมกับโหลดที่มีความต้านทาน 4 โอห์ม ที่สภาวะความเข้มแสงอาทิตย์เท่ากับ 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร และอุณหภูมิของแผงเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส โดยจะ

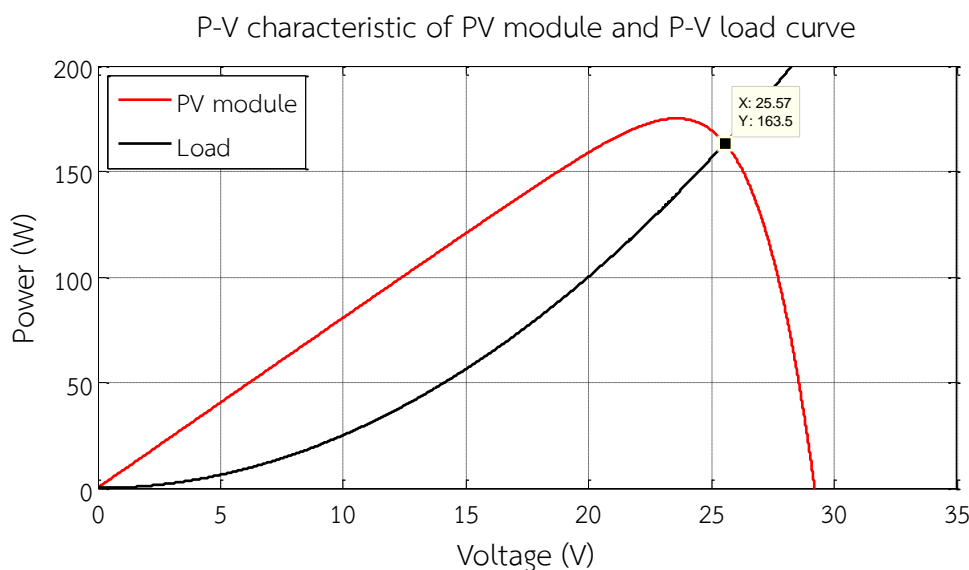
เห็นว่าจุดทำงานของระบบ คือ จุดตัดของ “กราฟคุณสมบัติกำลังไฟฟ้า-แรงดันของโหลด” กับ “กราฟคุณสมบัติกำลังไฟฟ้า-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์” ณ สถานะนี้ แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะจ่ายโหลดที่กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 163.5 วัตต์ ซึ่งไม่ใช่จุดทำงานที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงที่สุด



ภาพที่ 2.6 คุณลักษณะกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 2.7 คุณลักษณะกำลังและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 2.8 กำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายให้โหลดความต้านทาน

ดังนั้นระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นต้องมีระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด เพื่อให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุดตลอดเวลา ซึ่งการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดนี้จะกล่าวโดยละเอียดต่อไป

## 2.5 ผลของความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อม ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ซับซ้อน อย่างไรก็ตาม การศึกษาผลของความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีความสะดวกมากขึ้น โดยผลของสภาพแวดล้อมต่างๆ จะมีผลต่อการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 5 พารามิเตอร์

ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงผลของสองปัจจัย คือ ความเข้มแสงอาทิตย์ และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ที่มีต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนพื้นฐานของข้อมูลที่ทราบจากข้อมูลทางเทคนิคของแผงเซลล์ โดยทั่วไปผู้ผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะทดสอบสมรรถนะทางไฟฟ้าของแผงที่สภาวะมาตรฐานที่เรียกว่า *สภาวะทดสอบมาตรฐาน* (Standard Test Condition; STC) ซึ่งเป็นสภาวะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความเข้มแสงอาทิตย์ ( $G_n$ ) เท่ากับ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร สเปกตรัมของแสงที่ Air Mass (AM) เท่ากับ 1.5 และอุณหภูมิด้านหลังแผง ( $T_{STC}$ ) เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ผู้ผลิตจะแสดงค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่สภาวะทดสอบมาตรฐานและข้อมูลทางเทคนิคอื่นๆ แก่ผู้ใช้งาน ดังนี้ (1) กระแสไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะมาตรฐาน ( $I_{mpp,n}$ ) (2) แรงดันไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะมาตรฐาน ( $V_{mpp,n}$ ) (3) กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะมาตรฐาน ( $P_{mpp,n}$ ) (4) กระแสลัดวงจรที่สภาวะมาตรฐาน ( $I_{sc,n}$ ) (5) แรงดันเปิดวงจรที่สภาวะมาตรฐาน ( $V_{oc,n}$ ) (6) สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงดันเปิดวงจร ( $K_V$ ) (7) สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแส



ลัตวงจร ( $K_f$ ) (8) ค่า Nominal Operating Cell Temperature ( $NOCT$ ) และ (9) จำนวนเซลล์ ( $n_s$ ) ที่ต่ออนุกรมเป็นหนึ่งแผง

ตัวอย่างของข้อมูลทางเทคนิคของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัทเคียวเซรา จำกัด (มหาชน) รุ่น KC175GHT-2 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1 [38]

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลทางเทคนิคของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC175GHT-2

ข้อมูลทางเทคนิคของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	ปริมาณ (หน่วย)
กระแสไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะมาตรฐาน ( $I_{mpp,n}$ )	7.42 (A)
แรงดันไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะมาตรฐาน ( $V_{mpp,n}$ )	23.6 (V)
กำลังไฟฟ้าที่สภาวะมาตรฐาน ( $P_{mpp,n}$ )	175 (W)
กระแสลัตวงจรที่สภาวะมาตรฐาน ( $I_{sc,n}$ )	8.09 (A)
แรงดันเปิดวงจรที่สภาวะมาตรฐาน ( $V_{oc,n}$ )	29.2 (V)
สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงดันเปิดวงจร ( $K_V$ )	-0.0109 (V/°C)
สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัตวงจร ( $K_f$ )	0.00318 (A/°C)
ค่า Nominal Operating Cell Temperature ( $NOCT$ )	47 (°C)
จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรม ( $n_s$ )	48 (เซลล์)

ในทางปฏิบัติ การนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งานจริงจะทำให้สมรรถนะทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงอาทิตย์ (Irradiance) และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (Ambient Temperature) โดยความสัมพันธ์ของความเข้มแสงและอุณหภูมิต่อพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ [28] และ [37] แสดงดังนี้

### 2.5.1 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์

โดยทั่วไป สภาพสิ่งแวดล้อมบริเวณพื้นที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีความเข้มแสงอาทิตย์ต่ำและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมสูง สมรรถนะการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะต่ำลงเมื่ออุณหภูมิของแผงสูงขึ้น ซึ่งอุณหภูมิของแผงจะมีค่ามากกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการสะสมความร้อนของแผง ทั้งนี้ อุณหภูมิของแผงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.7) โดยตัวแปร  $NOCT$  (Nominal Operating Cell Temperatures) คือ อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะมาตรฐาน ซึ่งเป็นสภาวะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกเปิดวงจร มีความเข้มแสงอาทิตย์ตกกระทบเท่ากับ 800 วัตต์ต่อตารางเมตร อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 20 องศาเซลเซียส ความเร็วลมเท่ากับ 1 เมตรต่อวินาที และติดตั้งโดยการเปิดด้านหลังแผง [39] และ [40]

$$T_{module}(G, T_{ambient}) = T_{ambient} + \left( \frac{NOCT - 20}{0.8} \right) \frac{G}{G_n} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$T_{module}$	คือ	อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (K)
$T_{ambient}$	คือ	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (K)
$NOCT$	คือ	Nominal Operating Cell Temperature ( $^{\circ}C$ )
$G$	คือ	ความเข้มแสงอาทิตย์ ( $W/m^2$ )
$G_n$	คือ	ความเข้มแสงอาทิตย์ที่สภาวะทดสอบมาตรฐานเท่ากับ $1,000 W/m^2$

### 2.5.2 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อแรงดันเปิดวงจร

ขนาดของแรงดันเปิดวงจรจะสัมพันธ์กับค่าความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยมีค่าแปรผันตรงกับความเข้มแสงอาทิตย์ และมีค่าลดลงตามความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์และอุณหภูมิที่สภาวะมาตรฐาน ซึ่งแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_{oc}(G, T_{ambient}) = V_{oc,n} + V_T \log \frac{G}{G_n} + K_V(T_{module}(G, T_{ambient}) - T_{STC}) \quad (0.1)$$

เมื่อ

$V_{oc}(G, T_{module})$	คือ	แรงดันเปิดวงจรที่สภาวะใดๆ (V)
$V_{oc,n}$	คือ	แรงดันเปิดวงจรที่สภาวะทดสอบมาตรฐาน (V)
$K_V$	คือ	สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงดันเปิดวงจร (V/K)

### 2.5.3 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อกระแสลัดวงจร

ขนาดของกระแสลัดวงจรจะสัมพันธ์กับค่าความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยมีค่าแปรผันตรงกับความเข้มแสงอาทิตย์ และยังมีค่าแปรผันตรงกับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับอุณหภูมิที่สภาวะมาตรฐานด้วย ซึ่งแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$I_{sc}(G, T_{ambient}) = I_{sc,n} \frac{G}{G_n} + K_I(T_{module}(G, T_{ambient}) - T_{STC}) \quad (0.2)$$

เมื่อ

$I_{sc}(G, T_{ambient})$	คือ	กระแสลัดวงจรที่สภาวะใดๆ (A)
$I_{sc,n}$	คือ	กระแสลัดวงจรตามสภาวะทดสอบมาตรฐาน (A)
$K_I$	คือ	สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจร (A/K)

### 2.5.4 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อ Diode Ideality Factor

ค่า Diode Ideality Factor จะแปรตามสภาพแวดล้อม ซึ่งแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$A(T_{ambient}) = A_n \cdot T_{module}(G, T_{ambient})/T_{STC} \quad (0.3)$$

เมื่อ

$A(T_{ambient})$	คือ	Diode Ideality Factor ที่สภาวะใดๆ
$A_n$	คือ	Diode Ideality Factor ที่สภาวะมาตรฐาน
$T_{STC}$	คือ	อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะมาตรฐาน มีค่าเท่ากับ 298 K

### 2.5.5 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อความต่างศักย์เริ่มเปลี่ยน

จากสมการที่ (2.3) เนื่องจากค่าความต่างศักย์เริ่มเปลี่ยนสัมพันธ์กับค่า Diode Ideality Factor และอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นค่าความต่างศักย์เริ่มเปลี่ยนจึงแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_T(T_{ambient}) = A(T_{ambient}) \cdot k_b \cdot T_{module}(G, T_{ambient})/q \quad (2.11)$$

เมื่อ

$V_T(T_{ambient})$	ความต่างศักย์เริ่มเปลี่ยนที่สภาวะใดๆ (V)
--------------------	--

### 2.5.6 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อความต้านทานอนุกรม

ความต้านทานอนุกรมแปรผกผันกับความเข้มแสงอาทิตย์ แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$R_s(G) = R_{s,n} G_n/G \quad (2.12)$$

เมื่อ

$R_s(G)$	คือ	ความต้านทานอนุกรมที่สภาวะใดๆ (Ohm)
$R_{s,n}$	คือ	ความต้านทานอนุกรมที่สภาวะมาตรฐาน (Ohm)

### 2.5.7 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อความต้านทานขนาน

ความต้านทานขนานแปรผกผันกับความเข้มแสงอาทิตย์ แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$R_{sh}(G) = R_{sh,n} G_n/G \quad (2.13)$$

เมื่อ

$R_{sh}(G)$	คือ	ความต้านทานขนานที่สภาวะใดๆ (Ohm)
$R_{sh,n}$	คือ	ความต้านทานขนานที่สภาวะมาตรฐาน (Ohm)

### 2.5.8 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อกระแสโฟโตอิเล็กทริก

การตกกระทบของแสงอาทิตย์ทำให้เกิดกระแสโฟโตอิเล็กทริก ยิ่งความเข้มแสงมาก ยิ่งเพิ่มโอกาสการเกิดอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น ดังนั้น กระแสโฟโตอิเล็กทริกจึงแปรผันตรงกับความเข้มแสงอาทิตย์ แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$I_{ph}(G) = I_{ph,n} G_n/G \quad (2.14)$$

เมื่อ

$I_{ph}(G)$	คือ	กระแสโฟโตอิเล็กทริกที่สภาวะใดๆ (A)
$I_{ph,n}$	คือ	กระแสโฟโตอิเล็กทริกที่สภาวะทดสอบมาตรฐาน (A)

### 2.5.9 ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อกระแสอิ่มตัวไดโอด

ค่ากระแสอิ่มตัวไดโอดที่สภาวะใดๆ จะขึ้นกับกระแสโฟโตอิเล็กทริก แรงดันเปิดวงจร ความต้านทานขนาน และความต่างศักย์เริ่มเปลี่ยนที่สภาวะนั้นๆ แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$I_0(G, T_{ambient}) = \frac{I_{ph}(G) - \frac{V_{oc}(G, T_{ambient})}{R_{sh}(G)}}{\exp\left(\frac{V_{oc}(G, T_{ambient})}{n_s V_T(T_{ambient})}\right) - 1} \quad (2.15)$$

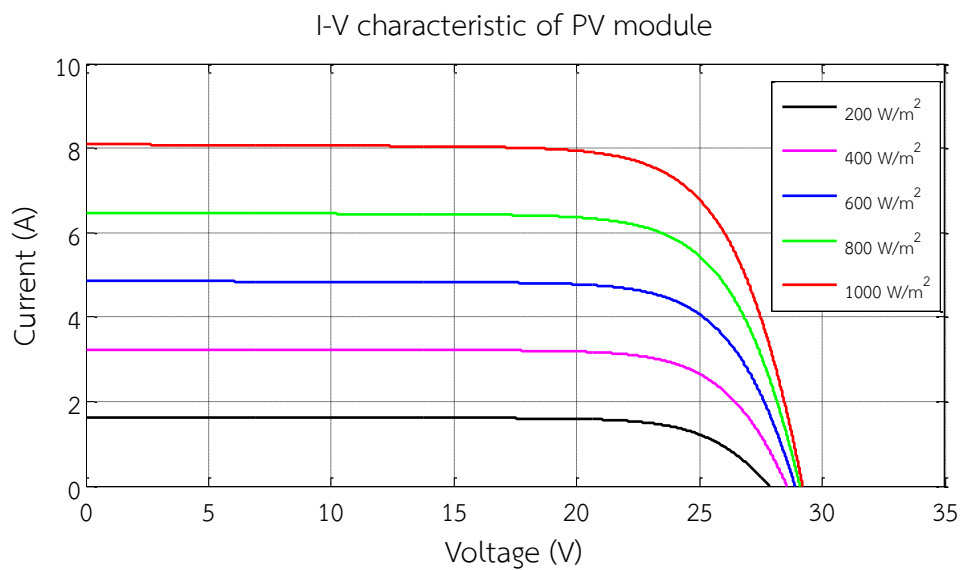
เมื่อ

$I_0(G, T_{module})$	คือ	กระแสอิ่มตัวไดโอดที่สภาวะใดๆ (A)
----------------------	-----	----------------------------------

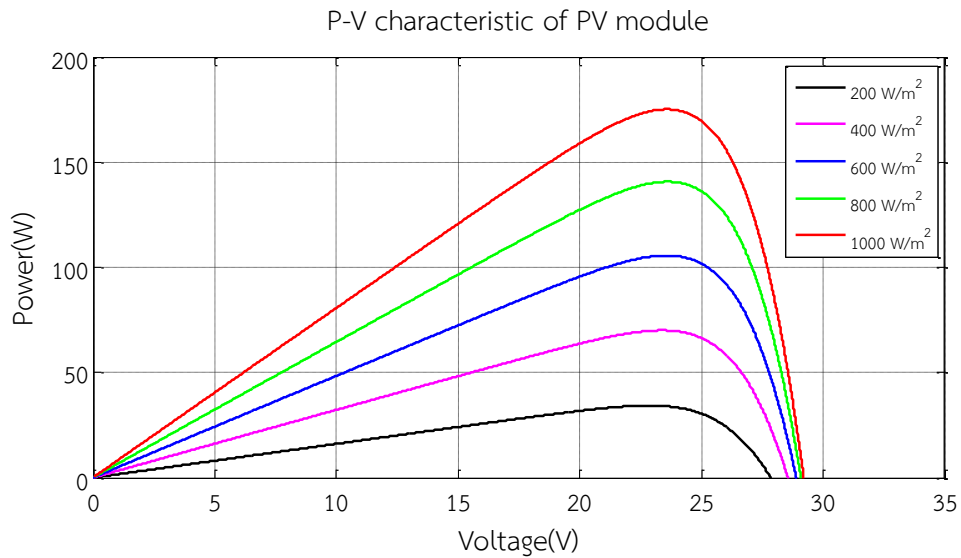
เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกปรับเปลี่ยนตามสมการที่ (2.7)-(2.15) มาแทนลงในสมการที่ (2.6) จะได้สมการคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่สภาวะความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใดๆ แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$I_{PV} = I_{ph}(G) - I_0(G, T_{module}) \left( \exp \left( \frac{V_{PV} + I_{PV} R_s(G)}{n_s V_T(T_{module})} \right) - 1 \right) - \frac{V_{PV} + I_{PV} R_s(G)}{R_{sh}(G)} \quad (2.16)$$

ภาพที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน โดยมีอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์คงที่เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส และมีความเข้มแสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน ซึ่งจะเห็นว่า กระแสลัดวงจรจะแปรผันตรงกับกับความเข้มแสงอาทิตย์ และความเข้มแสงอาทิตย์มีผลต่อแรงดันเปิดวงจรเล็กน้อย สำหรับภาพที่ 2.10 จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดแปรผันตรงกับกับความเข้มแสงอาทิตย์ด้วยเช่นกัน

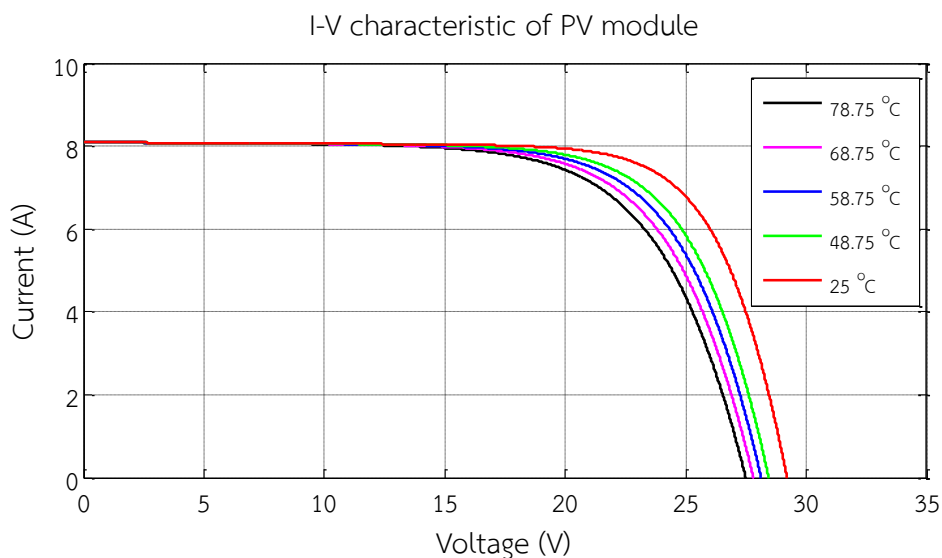


ภาพที่ 2.9 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงอาทิตย์ค่าต่างๆ และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส

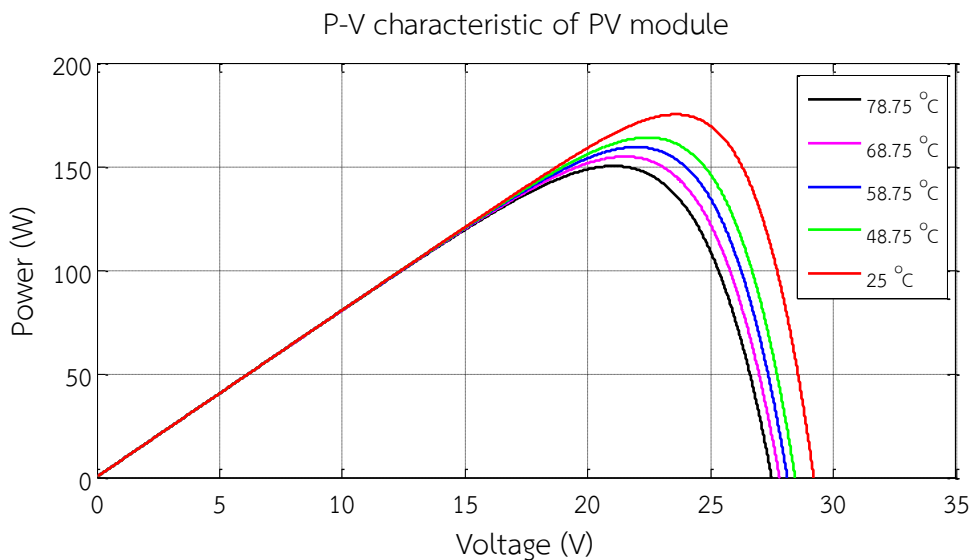


ภาพที่ 2.10 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้า-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงอาทิตย์ค่าต่างๆ และ อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 2.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน โดยมีความเข้มแสงอาทิตย์คงที่เท่ากับ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร และมีอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์แตกต่างกัน ซึ่งจะเห็นว่า กระแสลัดวงจรมีค่าแปรผันตรงกับอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพียงเล็กน้อย ส่วนแรงดันเปิดวงจรจะแปรผกผันกับอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และจากภาพที่ 2.12 จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจะแปรผกผันกับอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเช่นกัน



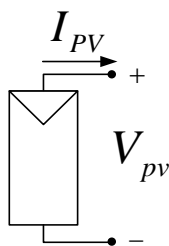
ภาพที่ 2.11 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ค่าต่างๆ และความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าคงที่เท่ากับ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร



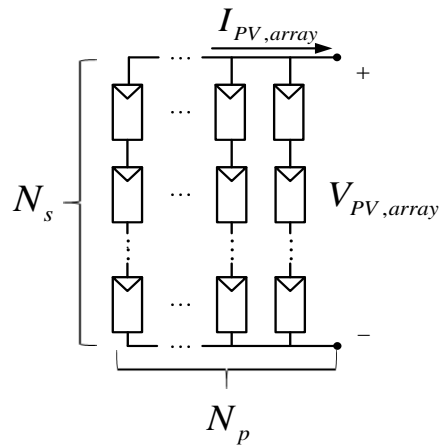
ภาพที่ 2.12 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้า-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ค่าต่างๆ และความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าคงที่เท่ากับ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร

## 2.6 การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการต่อชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์

สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาเมื่อนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปประยุกต์ใช้ในระบบผลิตไฟฟ้า คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องเพียงพอต่อความต้องการของโหลด ซึ่งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพียง 1 แผงอาจสร้างแรงดันหรือกำลังไฟฟ้าไม่เพียงพอในการจ่ายโหลด ดังนั้นเพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์นี้สามารถจ่ายโหลดได้เพียงพอ จึงต้องนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาเชื่อมต่อกัน ซึ่งเป็นการผสมผสานระหว่างการต่อชุดแผงแบบขนานและการต่อชุดแผงแบบอนุกรม การต่อชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนานจะเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ระบบสามารถผลิตไฟฟ้าได้ ส่วนการต่อชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมเป็นการเพิ่มแรงดันของระบบผลิตไฟฟ้า โดยเรียกชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อเข้าด้วยกันนี้ว่า อาเรย์ (Array) [36]

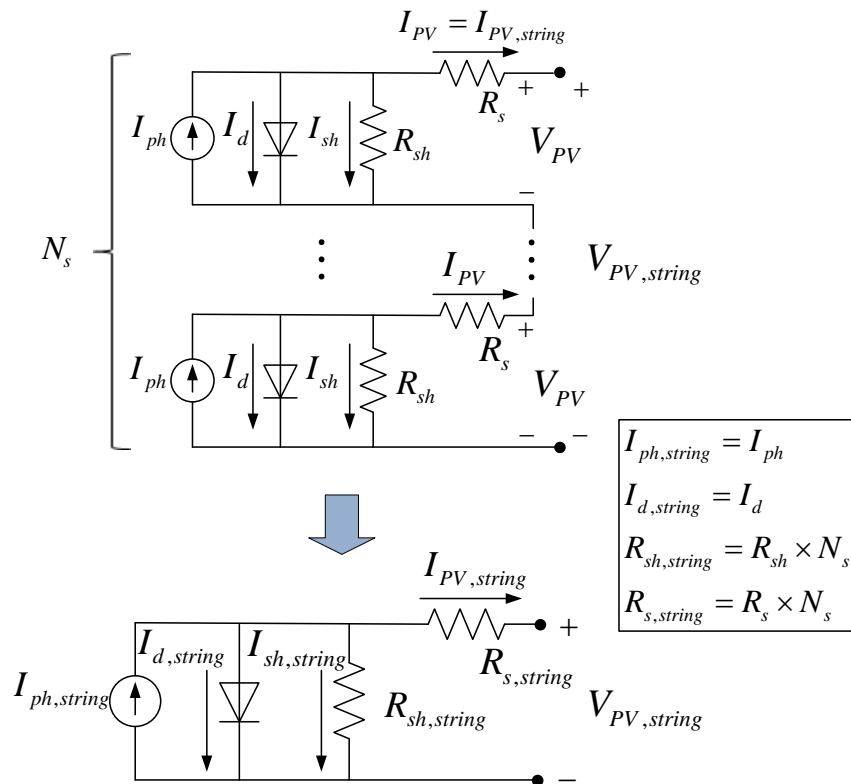


ภาพที่ 2.13 สัญลักษณ์เซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง



ภาพที่ 2.14 สัญลักษณ์การต่อชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอาร์เรย์

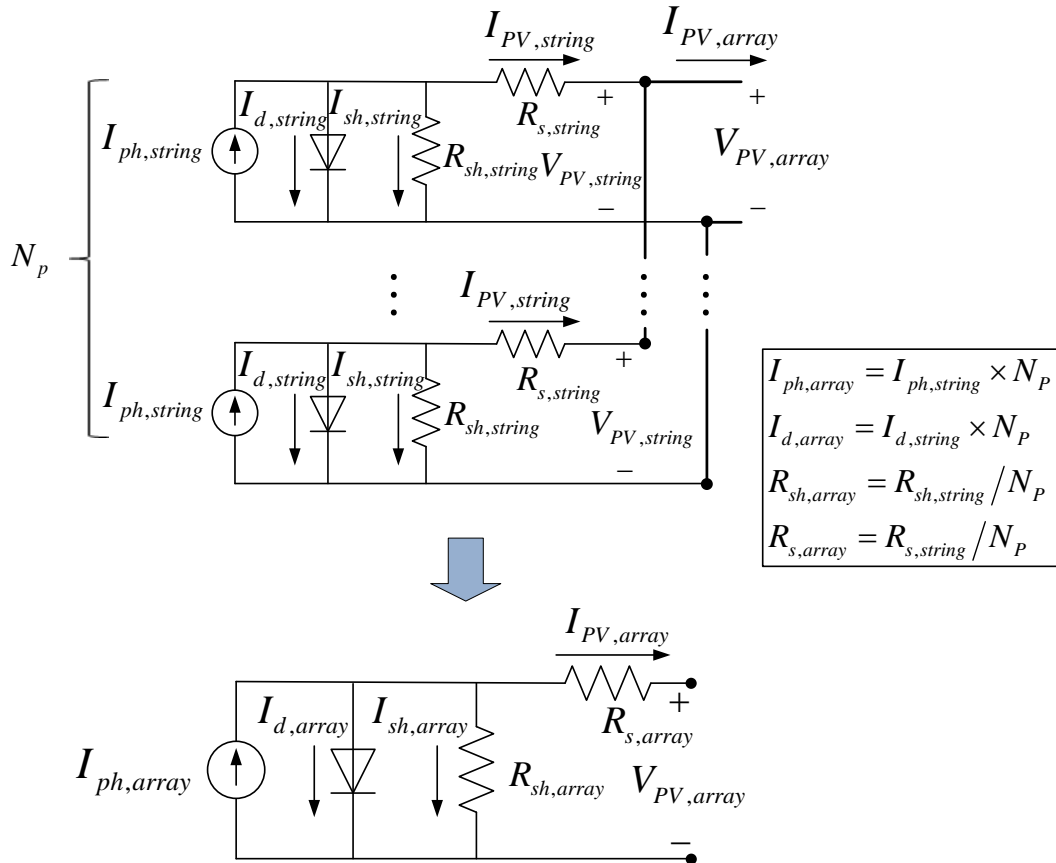
หากกำหนดให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผงมีคุณสมบัติเหมือนกัน มีความเข้มแสงอาทิตย์ตกกระทบสม่ำเสมอทุกแผง และมีอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมล้นรอบๆ แผงเท่ากันทุกแผง เมื่อใช้กฎของโอห์ม จะได้ว่า วงจรสมมูลของการต่อชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมกันจำนวน  $N_s$  จะมีแรงดันและกระแสรวมดังแสดงในภาพที่ 2.15 ดังนี้



ภาพที่ 2.15 การสร้างวงจรสมมูลของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม



โดยการใช้กฎของโอห์มเช่นกัน จะได้วงจรสมมูลของการต่อชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อขนานกันจำนวน  $N_p$  แผง แต่ละแถวต่ออนุกรมกันจำนวน  $N_s$  แผง จะมีแรงดันและกระแสรวม ดังนี้



ภาพที่ 2.16 การสร้างวงจรสมมูลของอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์

จากภาพที่ 2.15 และภาพที่ 2.16 สามารถสรุปสมการการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 5 พารามิเตอร์ ได้ดังสมการต่อไปนี้

### 2.6.1 จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรม

จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมของอาเรย์ เท่ากับจำนวนเซลล์อนุกรมของหนึ่งแผงคูณกับจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมกัน แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$n_{s,array} = n_s \times N_s \tag{2.17}$$

เมื่อ

$n_{s,array}$  คือ จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมกันของอาเรย์

### 2.6.2 กระแสโฟโตอิเล็กทริก

การนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อขนานกันจะทำให้กระแสโฟโตอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นตามจำนวนเส้นที่ต่อขนานกัน แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$I_{ph,array}(G) = I_{ph}(G) \times N_p \quad (2.18)$$

เมื่อ

$I_{ph,array}(G)$  คือ กระแสโฟโตอิเล็กทริกของอาเรย์ที่สภาวะใดๆ (A)

### 2.6.3 กระแสอิ่มตัวไดโอด

การนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อขนานกันจะทำให้กระแสอิ่มตัวไดโอดเพิ่มขึ้นตามจำนวนเส้นที่ต่อขนานกัน แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$I_{0,array}(G, T_{ambient}) = I_0(G, T_{ambient}) \times N_p \quad (2.19)$$

เมื่อ

$I_{0,array}(G, T_{ambient})$  คือ กระแสอิ่มตัวไดโอดของอาเรย์ที่สภาวะใดๆ (A)

### 2.6.4 ความต้านทานขนาน

จากวงจรสมมูลของอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ ความต้านทานขนานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผงจะถูกรวมเป็นความต้านทานขนานของอาเรย์ แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$R_{sh,array}(G) = R_{sh}(G) \times N_s/N_p \quad (2.20)$$

เมื่อ

$R_{sh,array}(G)$  คือ ความต้านทานขนานของอาเรย์ที่สภาวะใดๆ (Ohm)

### 2.6.5 ความต้านทานอนุกรม

จากวงจรสมมูลของอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ ความต้านทานอนุกรมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผงจะถูกรวมเป็นความต้านทานอนุกรมของอาเรย์ แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$R_{s,array}(G) = R_s(G) \times N_s/N_p \quad (2.21)$$

เมื่อ

$R_{s,array}(G)$  คือ ความต้านทานอนุกรมของอาเรย์ที่สภาวะใดๆ (Ohm)

### 2.6.6 กระแสลัดวงจร

จากวงจรสมมูลของอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ การนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อขนานกันจะทำให้กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นตามจำนวนเส้นที่ต่อขนานกัน แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$I_{sc,array}(G, T_{ambient}) = I_{sc}(G, T_{ambient}) \times N_p \quad (2.22)$$

เมื่อ

$I_{sc,array}(G, T_{ambient})$  คือ กระแสลัดวงจรของอาเรย์ที่สภาวะใดๆ (A)

### 2.6.7 แรงดันเปิดวงจร

จากวงจรสมมูลของอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ การนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาต่ออนุกรมกันจะทำให้แรงดันเปิดวงจรเพิ่มขึ้นตามจำนวนแผงที่นำมาต่ออนุกรมกัน แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$V_{oc,array}(G, T_{module}) = V_{oc}(G, T_{module}) \times N_s \quad (2.23)$$

เมื่อ

$V_{oc,array}(G, T_{module})$  คือ แรงดันเปิดวงจรของอาเรย์ที่สภาวะใดๆ (V)

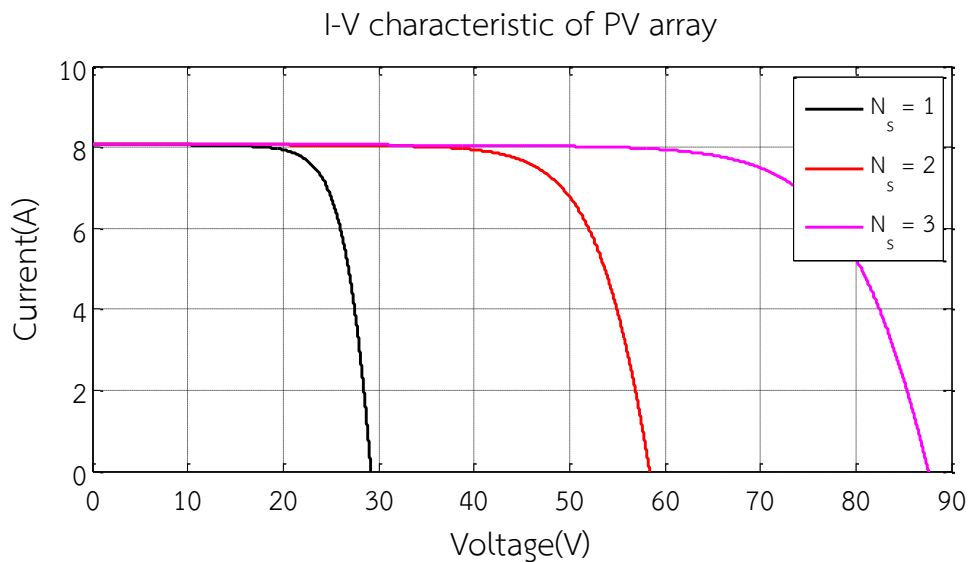
จากผลของปัจจัยส่งแวดล้อมและผลของการต่อชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอาเรย์ จะได้สมการคุณลักษณะกระแส-แรงดัน ของอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะใดๆ แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$I_{PV,array} = I_{ph,array}(G) - I_{0,array}(G, T_{module}) \left( \exp \left( \frac{V_{PV,array} + I_{PV,array} R_{s,array}(G)}{n_{s,array} V_{T,array}(T_{module})} \right) - 1 \right) - \frac{V_{PV,array} + I_{PV,array} R_{s,array}(G)}{R_{sh,array}(G)} \quad (2.24)$$

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่อาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ที่สภาวะใดๆ คำนวณจาก

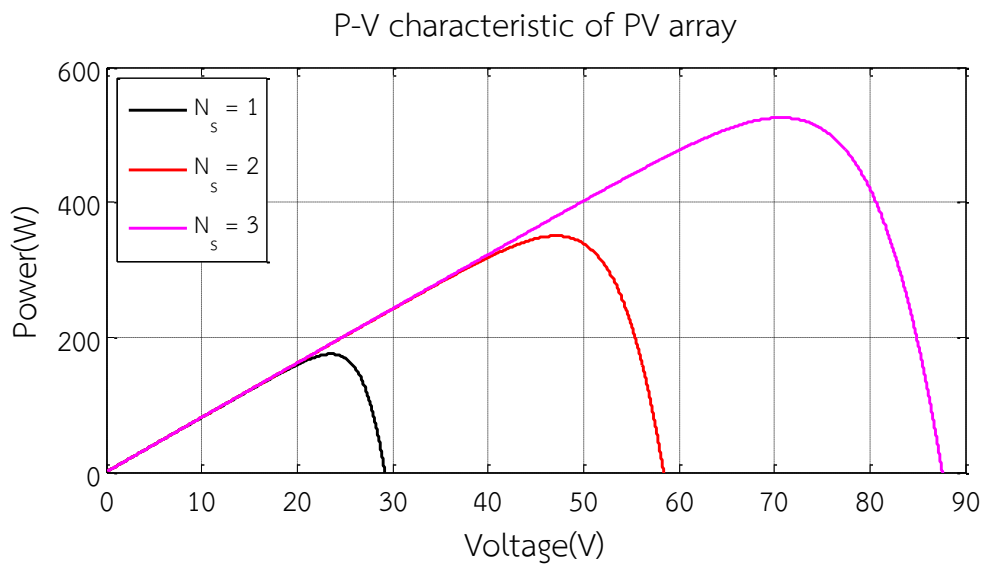
$$P_{PV,array} = I_{PV,array} \times V_{PV,array} \quad (2.25)$$

ตัวอย่างคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเกิดจากการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาต่ออนุกรมกันแสดงดังภาพที่ 2.17 และภาพที่ 2.18 ซึ่งจะเห็นว่า แรงดันเปิดวงจรของอาร์เรย์จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนแผงที่นำมาต่ออนุกรม แต่กระแสลัดวงจรของอาร์เรย์ยังคงเท่าเดิม และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่อาร์เรย์สามารถผลิตได้จะเพิ่มมากขึ้นโดยมีแนวโน้มเลื่อนไปทางขวาตามจำนวนแผงที่นำมาต่ออนุกรมด้วยเช่นกัน

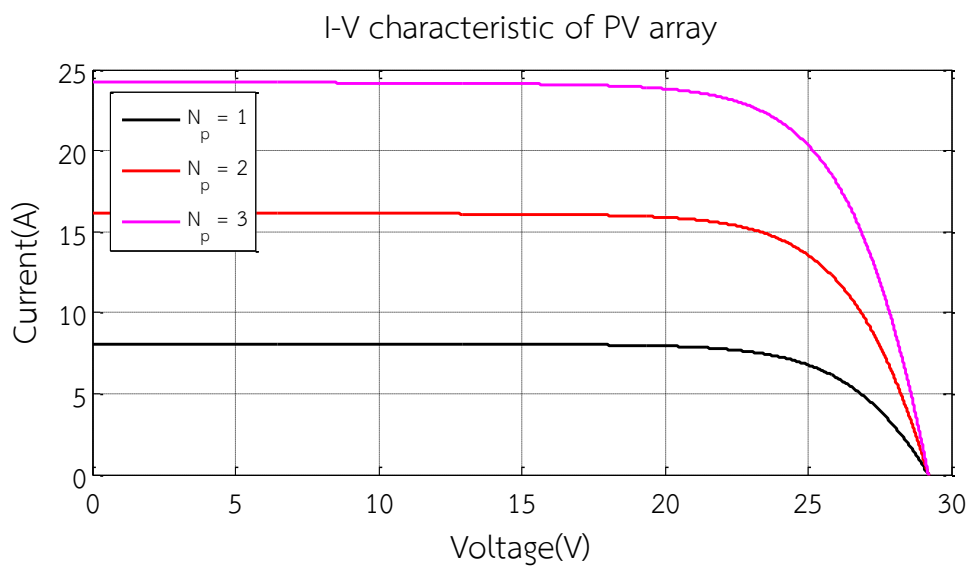


ภาพที่ 2.17 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ 1 สายซึ่งมีจำนวนแผงต่ออนุกรมที่แตกต่างกัน ณ สภาวะมาตรฐาน

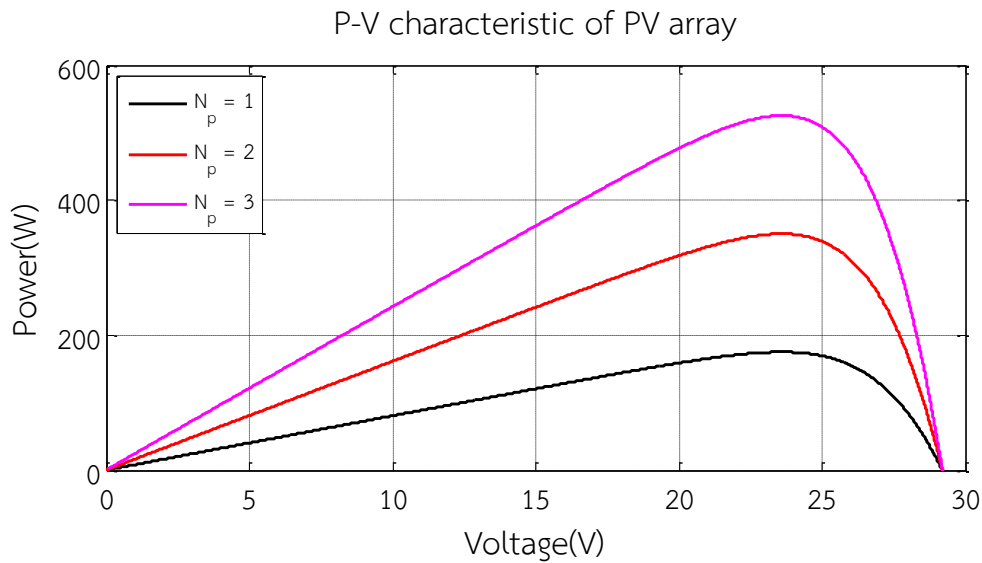
ตัวอย่างคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเกิดจากการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อขนานกันแสดงดังภาพที่ 2.19 และภาพที่ 2.20 ซึ่งจะเห็นว่า กระแสลัดวงจรของอาร์เรย์จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนแผงที่นำมาต่อขนาน แต่แรงดันเปิดวงจรของอาร์เรย์ยังคงเท่าเดิม และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่อาร์เรย์สามารถผลิตได้จะเพิ่มมากขึ้นโดยมีแนวโน้มเลื่อนขึ้นไปตามแกนตั้งตามจำนวนแผงที่นำมาต่อขนานด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 2.18 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้า-แรงดันของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ 1 สายซึ่งมีจำนวนแผงต่ออนุกรมที่แตกต่างกัน ณ สภาวะมาตรฐาน



ภาพที่ 2.19 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีจำนวนแผงต่อขนานที่แตกต่างกัน ณ สภาวะมาตรฐาน



ภาพที่ 2.20 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้า-แรงดันของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีจำนวนแผงต่อขนานที่แตกต่างกัน ณ สภาวะมาตรฐาน

## 2.7 แนวทางในการพัฒนาโปรแกรมจากแบบจำลองที่นำเสนอ

### 2.7.1 การคำนวณหา 5 พารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

หลังจากทราบถึงแบบจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 1 ไดโอด 5 พารามิเตอร์ ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการคำนวณหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองทั้ง 5 ( $I_{ph,n}$ ,  $I_{0,n}$ ,  $R_{s,n}$ ,  $R_{sh,n}$  และ  $V_{T,n}$ ) จากข้อมูลทางเทคนิคของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผู้ผลิตกำหนดมา โดยจะเริ่มจากการจัดรูปสมการที่ (2.6) ให้อยู่ในรูปของสมการสถานะทดสอบมาตรฐานเมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกลัดวงจร เปิดวงจร และทำงานที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด รวมถึงการสร้างสมการจากกฎทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ สมการอนุพันธ์ของกำลังไฟฟ้าเทียบกับแรงดันที่จุดทำงานกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าเท่ากับศูนย์ และสมการอนุพันธ์ของกระแสเทียบกับแรงดันที่สภาวะลัดวงจรเท่ากับค่าลบของส่วนกลับของความต้านทานขนาน [28] แล้วทำการคำนวณหาพารามิเตอร์โดยระเบียบวิธีการทำซ้ำแบบนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) เพื่อคำนวณหาพารามิเตอร์ทั้ง 5 ต่อไป โดยสมการที่จำเป็นทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังนี้

- 1) สมการสถานะทดสอบมาตรฐานเมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกลัดวงจร

$$I_{sc,n} = I_{ph,n} - I_{0,n} \left( \exp \left( \frac{I_{sc,n} R_{s,n}}{n_s V_{T,n}} \right) - 1 \right) - \frac{I_{sc,n} R_{s,n}}{R_{sh,n}} \quad (2.26)$$

2) สมการสภาวะทดสอบมาตรฐานเมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกเปิดวงจร

$$0 = I_{ph,n} - I_{0,n} \left( \exp \left( \frac{V_{oc,n}}{n_s V_{T,n}} \right) - 1 \right) - \frac{V_{oc,n}}{R_{sh,n}} \quad (2.27)$$

3) สมการสภาวะทดสอบมาตรฐานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ณ จุดทำงานกำลังไฟฟ้าสูงสุด

$$I_{mpp,n} = I_{ph,n} - I_{0,n} \left( \exp \left( \frac{V_{mpp,n} + I_{mpp,n} R_{s,n}}{n_s V_{T,n}} \right) - 1 \right) - \frac{V_{mpp,n} + I_{mpp,n} R_{s,n}}{R_{sh,n}} \quad (2.28)$$

4) สมการอนุพันธ์ของกำลังไฟฟ้าเทียบกับแรงดันที่จุดทำงานกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ สภาวะทดสอบมาตรฐานเท่ากับศูนย์ หรือ  $\left. \frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} \right|_{V=V_{mpp,n}} = 0$

$$\begin{aligned} 0 = & I_{ph,n} \\ & - I_{0,n} \left( \exp \left( \frac{V_{mpp,n} + I_{mpp,n} R_{s,n}}{n_s V_{T,n}} \right) - 1 \right) \\ & + I_{0,n} V_{mpp,n} \left( \frac{1 + R_{s,n} \left. \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \right|_{V_{PV}=V_{mpp,n}}}{n_s V_{T,n}} \right) \exp \left( \frac{V_{mpp,n} + I_{mpp,n} R_{s,n}}{n_s V_{T,n}} \right) \\ & - \left( \frac{2V_{mpp,n} + R_{s,n} \left( I_{mpp,n} + V_{mpp,n} \left. \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \right|_{V_{PV}=V_{mpp,n}} \right)}{R_{sh,n}} \right) \end{aligned} \quad (2.29)$$

โดยที่

$$\left. \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \right|_{V_{PV}=V_{mpp,n}} = - \frac{\frac{I_0}{n_s V_T} \exp \left( \frac{V_{PV} + I_{PV} R_s}{n_s V_T} \right) + \frac{1}{R_{sh}}}{1 + \frac{I_0 R_s}{n_s V_T} \exp \left( \frac{V_{PV} + I_{PV} R_s}{n_s V_T} \right) + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (2.30)$$

5) สมการอนุพันธ์ของกระแสเทียบกับแรงดันที่สภาวะลัดวงจรมีค่าประมาณเท่ากับค่าลบของส่วนกลับของความต้านทานขนาน

$$\left. \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \right|_{I_{PV}=I_{sc,n}} \approx - \frac{1}{R_{sh}} \quad (2.31)$$

## 2.7.2 การคำนวณหากำลังไฟฟ้าของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์

หลังจากทราบ 5 พารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รวมทั้งพิจารณาผลของความเข้มแสงอาทิตย์ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และการต่อชุดอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ ตามสมการที่ (2.7)-(2.24) แล้ว ในขั้นตอนต่อไปจะแสดงวิธีการคำนวณหาจุดทำงานของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ โดยเมื่อกำหนดแรงดันของอาร์เรย์ไว้ที่ค่าหนึ่ง จะสามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกจากอาร์เรย์ได้โดยการนำสมการที่ (2.24) มาคำนวณด้วยระเบียบวิธีการทำซ้ำแบบเกาส์-ไซเดล (Guass-Seidel) ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

- 1) กำหนดค่ากระแสเริ่มต้นเท่ากับกระแสลัดวงจร

$$I_{initial} = I_{sc}(G, T_{ambient})$$

- 2) แทนค่ากระแสเริ่มต้นลงในสมการที่ (2.24) เพื่อคำนวณคำนวณกระแส  $I_{new}$

$$I_{new} = I_{ph,array}(G) - I_{0,array}(G, T_{module}) \left( \exp \left( \frac{V_{PV,array} + I_{initial}R_{s,array}(G)}{n_{s,array}V_{T,array}(T_{module})} \right) - 1 \right) - \frac{V_{PV,array} + I_{initial}R_{s,array}(G)}{R_{sh,array}(G)} \quad (2.32)$$

- 3) คำนวณความผิดพลาดของการกระแสที่คำนวณได้ และกำหนดกระแสที่ใช้ในการคำนวณในรอบถัดไปจากสมการที่ (2.33) และ (2.34) ตามลำดับ

$$error = |I_{initial} - I_{new}| \quad (2.33)$$

$$I_{initial} = I_{new} \quad (2.34)$$

- 4) แทนค่ากระแสที่คำนวณได้ลงในสมการที่ (2.32) อีกครั้งเพื่อคำนวณค่ากระแสใหม่และความผิดพลาดของกระแสในรอบถัดไป ซึ่งการคำนวณในขั้นตอนที่ 2)-3) จะดำเนินต่อไปจนกระทั่งความผิดพลาดของการคำนวณอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

- 5) เมื่อทราบจุดทำงานของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์แล้ว จะสามารถคำนวณหา กำลังไฟฟ้าของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์จากกระแสที่คำนวณได้ดังนี้

$$P_{PV,array} = I_{PV,array} \times V_{PV,array} \quad (2.35)$$



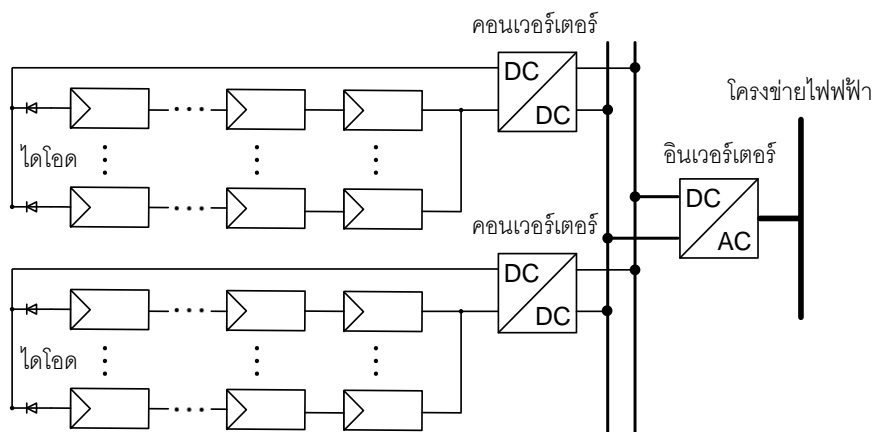
### บทที่ 3 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับอินเวอร์เตอร์

ในบทนี้จะนำเสนอหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับอินเวอร์เตอร์แบบ Double Stage ที่มีระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบ Perturb and Observe

#### 3.1 หลักการพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์แบบ Double Stage

อินเวอร์เตอร์แบบ Double Stage เป็นอินเวอร์เตอร์ที่มีกระบวนการควบคุมกำลังไฟฟ้า 2 ระดับ คือ คอนเวอร์เตอร์แปลงไฟตรงเป็นไฟตรง (DC-DC Converter) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมให้อาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking; MPPT) และส่วนที่สอง คือ อินเวอร์เตอร์ (DC-AC Inverter) ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ รวมถึงช่วยควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าและการซิงโครไนซ์กับระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเลือกใช้เทคโนโลยีอินเวอร์เตอร์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายแบบ Multi-string โดยแต่ละอาเรย์จะมีคอนเวอร์เตอร์ทำการควบคุมให้อาเรย์ผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด และคอนเวอร์เตอร์กระแสตรงทุกตัวจะเชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ข้อดีของการใช้เทคโนโลยีอินเวอร์เตอร์ประเภทนี้คือ เพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพราะการติดตั้งคอนเวอร์เตอร์ให้แต่ละชุดอาเรย์จะทำให้สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของชุดอาเรย์นั้นได้ทันที ทำให้ปัจจัยลบต่อสมรรถนะของเซลล์ที่เกิดจากเงาและการไม่เข้ากันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง [27] ตัวอย่างของเทคโนโลยีนี้แสดงดังภาพที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วย อาเรย์ 2 ชุด คอนเวอร์เตอร์กระแสตรงที่มี MPPT 2 ชุด และอินเวอร์เตอร์ซึ่งรับไฟฟ้ากระแสตรงจากคอนเวอร์เตอร์ 2 ชุดนี้

ในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงหลักการการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบ Double Stage โดยแบ่งการอธิบายออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ คอนเวอร์เตอร์แปลงไฟตรงเป็นไฟตรง และอินเวอร์เตอร์ ดังนี้



ภาพที่ 3.1 โครงสร้างเทคโนโลยีของอินเวอร์เตอร์แบบ Multi-string

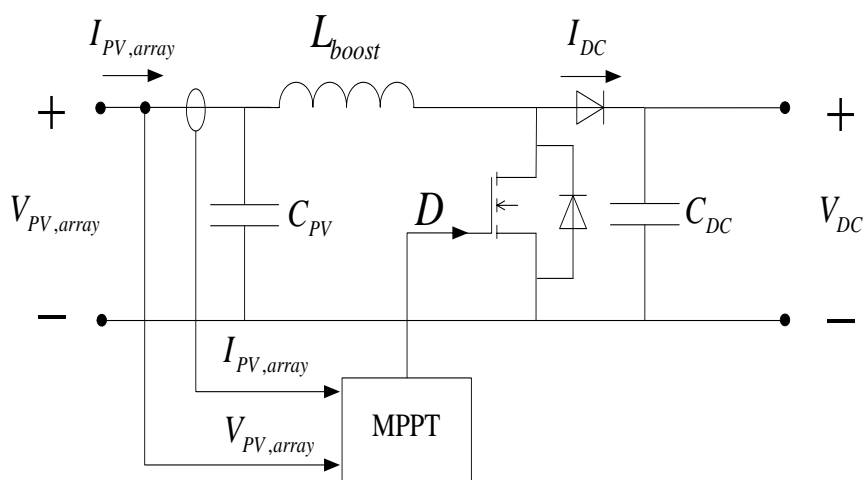
### 3.2 คอนเวอร์เตอร์แปลงไฟตรงเป็นไฟตรง (DC-DC Converter)

คอนเวอร์เตอร์แปลงไฟตรงเป็นไฟตรง เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถปรับเปลี่ยนขนาดแรงดันของแหล่งจ่ายให้ได้แรงดันไฟฟ้าขาออกตามที่ต้องการ ดังนั้นการนำคอนเวอร์เตอร์มาควบคุมแรงดันขั้วของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถช่วยการควบคุมอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ให้ทำงานที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ โดยในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์จะควบคุมแรงดันขาออกของคอนเวอร์เตอร์ให้มีขนาดคงที่โดยการต่อแรงดันขาออกกับตัวเก็บประจุที่มีค่าความจุขนาดใหญ่ และทำการควบคุมแรงดันด้านที่ต่อกับขั้วอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวัฏจักรงาน (duty cycle)

ในส่วนนี้จะแบ่งการอธิบายออกเป็น 2 หัวข้อ ได้แก่ แบบจำลองคอนเวอร์เตอร์ทบแรงดันและคุณสมบัติเชิงพลวัตของคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุด

#### 3.2.1 แบบจำลองคอนเวอร์เตอร์ทบแรงดัน

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ใช้คอนเวอร์เตอร์แบบทบแรงดัน (Boost Converter) เพื่อเพิ่มแรงดันอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้ตามต้องการ ซึ่งแบบจำลองคอนเวอร์เตอร์ทบแรงดันแสดงได้ดังภาพที่ 3.2 ซึ่งประกอบด้วย (1) ตัวเก็บประจุขาเข้า ( $C_{PV}$ ) ทำหน้าที่ช่วยลดแรงดันกระเพื่อมจากเซลล์แสงอาทิตย์ (2) ตัวเหนี่ยวนำ ( $L_{boost}$ ) โดยตัวเหนี่ยวนำของคอนเวอร์เตอร์จะต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอเพื่อให้กระแสที่ผลิตได้จากอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่และมีความต่อเนื่อง (3) ไดโอด เป็นอุปกรณ์ควบคุมทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า (4) Switching เป็นทรานซิสเตอร์ที่ควบคุมการไหลของกระแส โดยรับคำสั่งมาจาก MPPT และ (5) ตัวเก็บประจุขาออก ( $C_{DC}$ ) หรือตัวเก็บประจุของอินเวอร์เตอร์ ควรจะมีขนาดใหญ่เพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันขาออก และลดการรบกวนจากโครงข่ายไฟฟ้า



ภาพที่ 3.2 โครงสร้างคอนเวอร์เตอร์ทบแรงดันและวงจรติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

สมการควบคุมแรงดันของคอนเวอร์เตอร์ คือ [41]

$$V_{PV,array} = V_{DC}(1 - D) \quad (3.1)$$

เมื่อ

$D$	คือ	วัฏจักรงาน
$V_{DC}$	คือ	แรงดันขาออก
$V_{PV,array}$	คือ	แรงดันขาเข้าจากอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์

### 3.2.2 คุณสมบัติเชิงพลวัตของคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุด

คอนเวอร์เตอร์ทบทแรงดันสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีส่วนวงจรควบคุม Switching เพื่อควบคุมวัฏจักรงานให้ระบบสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งเทคนิคการหาลำลังไฟฟ้าสูงสุดที่นิยมใช้และเป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดคือ วิธี Perturb and Observe [42] โดยวิธีการนี้จะทำการปรับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านการควบคุมวัฏจักรงานด้วยการปรับเปลี่ยนขนาดของวัฏจักรงานด้วยการรบกวนเล็กๆ ( $\Delta d$ ) ซึ่งทำให้แรงดันขั้วอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์แกว่งอยู่รอบๆ แรงดันที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด นอกจากนี้ แม้ว่ากำลังไฟฟ้าที่อาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงแล้วก็ตาม วัฏจักรงานก็ยังถูกรบกวนอย่างสม่ำเสมอเพื่อช่วยให้ระบบพร้อมติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่จะเปลี่ยนแปลงต่อไปได้ โดยสมการการปรับค่าวัฏจักรงาน แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$D((k + 1)T_a) = D(kT_a) + \Delta d \times \text{sign}(P(kT_a) - P((k - 1)T_a)) \quad (3.2)$$

$$\Delta d = |D(kT_a) - D((k - 1)T_a)| \quad (3.3)$$

$$P(t) = f(I_{PV,array}(t), V_{PV,array}(t)) \quad (3.4)$$

เมื่อ

$D(kT_a)$	คือ	ขนาดของวัฏจักรงาน ณ ปัจจุบัน
$D((k + 1)T_a)$	คือ	ขนาดของวัฏจักรงาน ณ เวลาถัดไป
$P(kT_a)$	คือ	กำลังไฟฟ้าที่วัดได้ ณ ปัจจุบัน (W)
$P((k - 1)T_a)$	คือ	กำลังไฟฟ้าที่วัดได้ในรอบที่แล้ว (W)
$T_a$	คือ	ช่วงเวลาคงค่าขนาดวัฏจักรงาน (s)
$\Delta d$	คือ	ขนาดการรบกวนวัฏจักรงาน
$k$	คือ	จำนวนเต็มบวก
$P(t)$	คือ	กำลังไฟฟ้า ณ เวลาใดๆ ซึ่งขึ้นกับความเข้มแสง และอุณหภูมิ

สำหรับขนาดของการเปลี่ยนแปลงแรงดันชั่วของอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ จะวิเคราะห์จากคุณสมบัติพลวัตของคอนเวอร์เตอร์ทบแรงดันด้วยการประมาณการเปลี่ยนแปลงแรงดันเล็กน้อยรอบจุดทำงานที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งแรงดันของอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ขณะใดๆ รอบจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ [42]

$$V_{PV}(t) = V_{mpp}(t) + \hat{v}_{PV}(t) \quad (3.5)$$

เมื่อ

$\hat{v}_{PV}(t)$  คือ การแกว่งของแรงดันอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ (V)  
 $V_{mpp}(t)$  คือ แรงดันชั่วของอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ที่จุดทำงานกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V)

การแกว่งของแรงดันดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ได้จากแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็ก (Small Signal) ของคอนเวอร์เตอร์ทบแรงดัน โดยกำหนดให้คอนเวอร์เตอร์เป็นแบบอุดมคติและทำงานในโหมดกระแสต่อเนื่อง ดังนั้นสมการการแกว่งของแรงดันในโดเมน  $s$  สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\hat{V}_{pv}(s) = G_{vd}(s)\Delta d(s) + G_{vload}(s)\hat{i}_{load}(s) \quad (3.6)$$

โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$G_{vd}(s) = -\frac{V_{DC}}{LC_{PV}s^2 + \left(\frac{L}{R_{load}(1-D)^2}\right)s + 1} \quad (3.7)$$

$$G_{vload}(s) = \frac{R_{load}D'}{As^3 + Bs^2 + Cs + 2} \quad (3.8)$$

โดยพิจารณาคอนเวอร์เตอร์ในอุดมคติ ดังนั้น  $R_{load}(1-D)^2 = R_{mpp}(t)$ ,  $\hat{i}_{load} = \frac{\hat{v}_{DC}}{R_{load}}$

$$A = LC_{PV}R_{load}C_{DC}, \quad B = \left(C_{PV} + \frac{C_{DC}}{D'^2}\right)L \quad (3.9)$$

$$C = R_{load}(C_{PV}D'^2 + C_{DC}) + \frac{L}{R_{load}D'^2}, \quad D' = 1 - D \quad (3.10)$$

ดังนั้นแรงดันชั่วของอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ขณะใดๆ คำนวณจาก

$$V_{PV}((k+1)T_a) = V_{PV}(kT_a) + \hat{v}_{pv}(T_a) \quad (3.11)$$

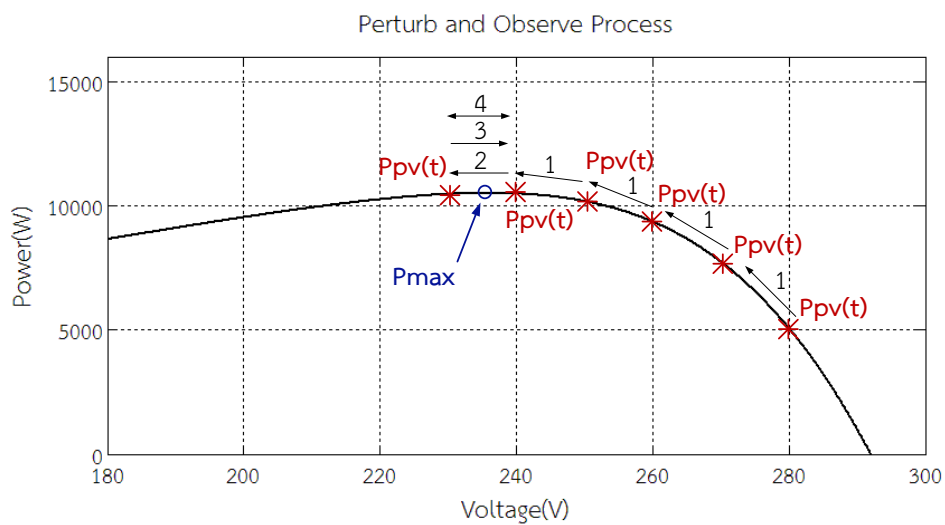
เมื่อ

$V_{pv}(kT_a)$	คือ	ขนาดของแรงดันอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ ณ ปัจจุบัน (V)
$V_{pv}((k + 1)T_a)$	คือ	ขนาดของแรงดันอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ ณ เวลาถัดไป (V)
$v_{pv}(T_a)$	คือ	ขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ณ ปัจจุบัน (V)

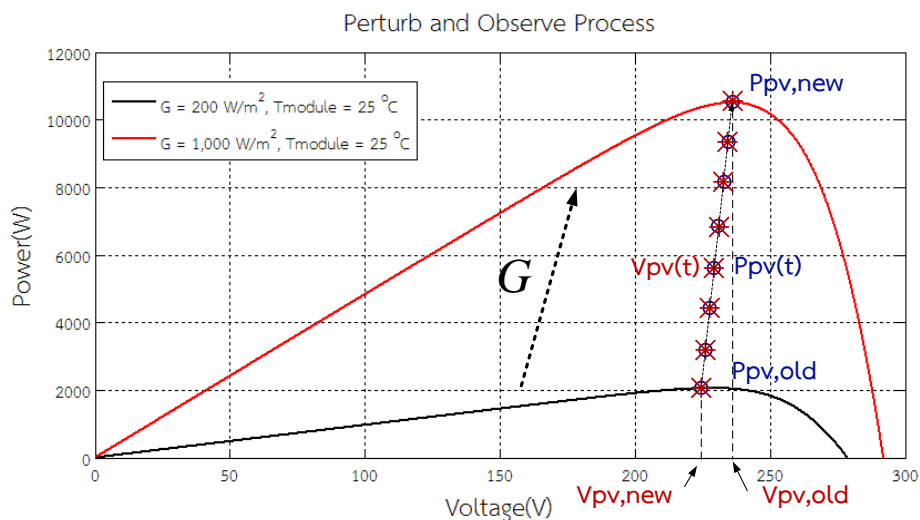
จากสมการที่ (3.2)-(3.11) สามารถอธิบายกระบวนการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ดังนี้

1. ในสภาวะการทำงานเริ่มต้น แรงดันชั่วของอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าประมาณแรงดันเปิดวงจร จุดทำงานของอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์จึงอยู่ทางด้านขวาของจุดทำงานที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด จากนั้น วงจรควบคุม MPPT จะทำการปรับขนาดของวัฏจักรงานด้วยการเพิ่มขนาดของวัฏจักรงานอีก  $\Delta d$  (สมการที่ (3.2)) ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันชั่วของอาเรย์ลดลงตามสมการที่ (3.1) ด้วยขนาดที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.5) และ (3.6) ขณะเดียวกันวงจรควบคุมจะทำการคำนวณหาผลต่างของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ขณะนั้นกับกำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากรอบก่อนหน้า เนื่องจากจุดทำงานยังอยู่ด้านขวาของตำแหน่งกำลังไฟฟ้าสูงสุด ดังนั้นผลต่างของกำลังไฟฟ้าจึงมีค่าเป็นบวก ด้วยเหตุนี้วงจรควบคุมจึงส่งคำสั่งเพิ่มขนาดของวัฏจักรงานขึ้นอีก  $\Delta d$  เพื่อลดแรงดันชั่วของอาเรย์และทำให้จุดทำงานเคลื่อนที่เข้าหาสภาวะที่อาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดมากขึ้น ซึ่งกระบวนการนี้จะทำวนซ้ำจนกระทั่งแรงดันชั่วของอาเรย์ลดลงและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้น้อยกว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจะทราบได้เมื่อผลต่างของกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้มีค่าเป็นลบ ดังแสดงในภาพที่ 3.3
2. เมื่อจุดทำงานของอาเรย์เปลี่ยนตำแหน่งมาอยู่ทางด้านซ้ายของตำแหน่งกำลังไฟฟ้าสูงสุด วงจรควบคุมจะทำการคำนวณหาผลต่างของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ขณะนั้นกับกำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากรอบก่อนหน้า จากภาพที่ 3.3 จะเห็นว่าผลต่างของกำลังไฟฟ้ามีค่าเป็นลบ ดังนั้นวงจรควบคุม MPPT จะทำการปรับขนาดของวัฏจักรงานด้วยการลดขนาดของวัฏจักรงานอีก  $\Delta d$  และทำให้แรงดันของอาเรย์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยหากปัจจัยสิ่งแวดล้อมไม่เปลี่ยนแปลง จุดทำงานของอาเรย์จะเคลื่อนที่กลับมาที่เดิม ณ ตำแหน่งก่อนผ่านตำแหน่งกำลังไฟฟ้าสูงสุด
3. จากกระบวนการทำงานในข้อที่ 2. หากวงจรควบคุมทำการคำนวณหาผลต่างของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ขณะนั้นกับกำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากรอบก่อนหน้าแล้วพบว่าผลต่างของกำลังไฟฟ้ามีค่าเป็นลบ วงจรควบคุมจะส่งคำสั่งเพิ่มขนาดของวัฏจักรงานขึ้นอีก  $\Delta d$  เพื่อลดแรงดันชั่วของอาเรย์ ในกรณีที่ปัจจัยสิ่งแวดล้อมไม่เปลี่ยนแปลง จุดทำงานของอาเรย์จะเคลื่อนที่กลับมาที่เดิม ณ ตำแหน่งหลังจากผ่านตำแหน่งกำลังไฟฟ้าสูงสุด (ย้อนกลับข้อ 2.)

4. ในกรณีที่ปัจจัยสิ่งแวดล้อมไม่เปลี่ยนแปลง กระบวนการทำงานในข้อที่ 2 และข้อที่ 3 จะกระทำวนซ้ำจนกว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของกำลังไฟฟ้าสูงสุด (เกิดการแกว่งของแรงดันรอบๆ จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด)
5. ในกรณีที่ตำแหน่งกำลังไฟฟ้าสูงสุดเปลี่ยนตำแหน่งเนื่องจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงนั้น วงจรควบคุมจะทำการปรับขนาดของวัฏจักรงานเพื่อให้แรงดันขั้วของอาร์เรย์เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด เมื่อแรงดันอาร์เรย์เคลื่อนเข้าใกล้แรงดันที่ กำลังไฟฟ้าสูงสุดแล้วจะเกิดการแกว่งของแรงดันรอบๆ จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเช่นกัน

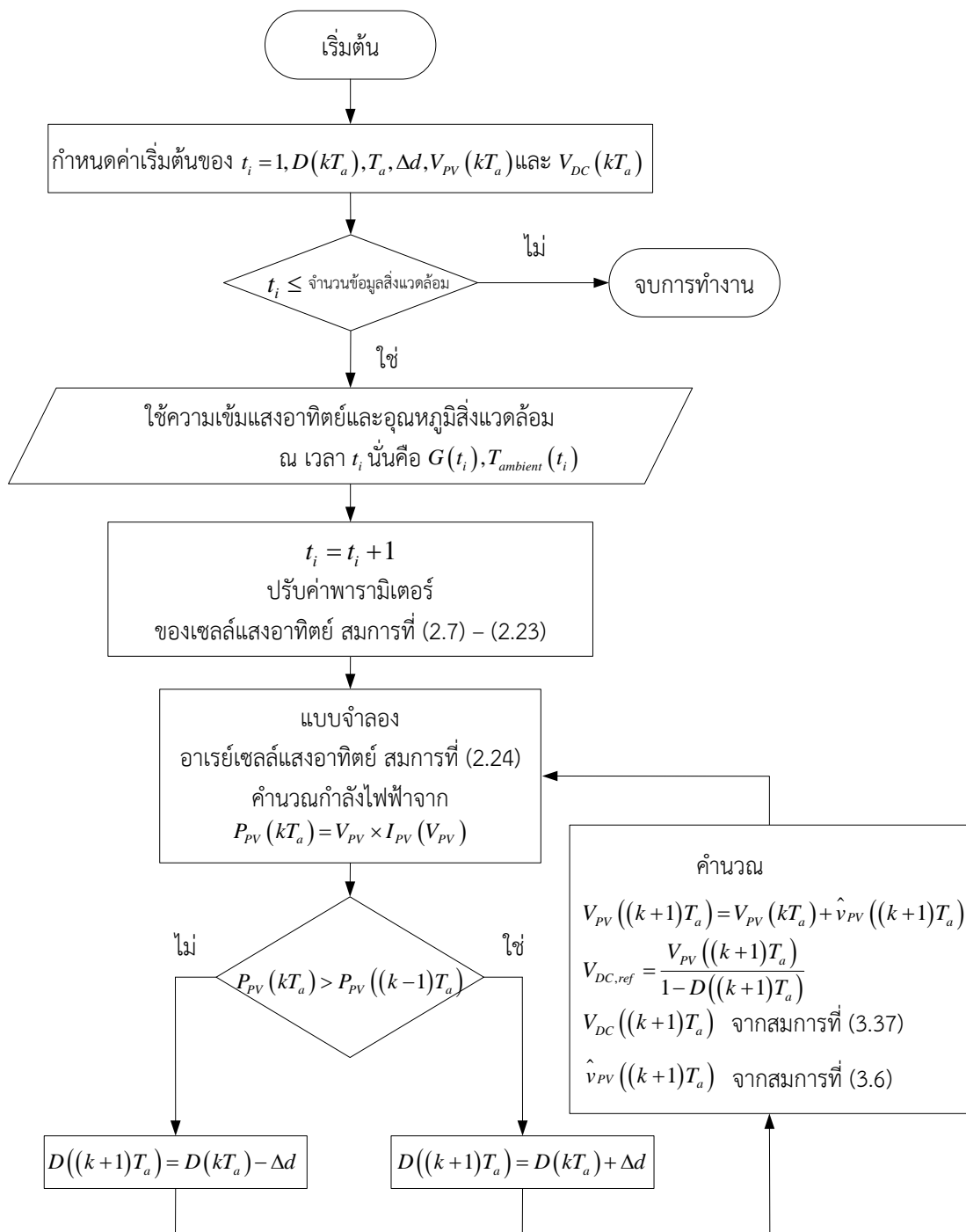


ภาพที่ 3.3 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยสิ่งแวดล้อม



ภาพที่ 3.4 การติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยสิ่งแวดล้อม

ภาพที่ 3.4 แสดงการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อความเข้มแสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงจาก 200 วัตต์ต่อตารางเมตร เป็น 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร ที่อุณหภูมิคงที่ 25 องศาเซลเซียส และภาพที่ 3.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดดังต่อไปนี้



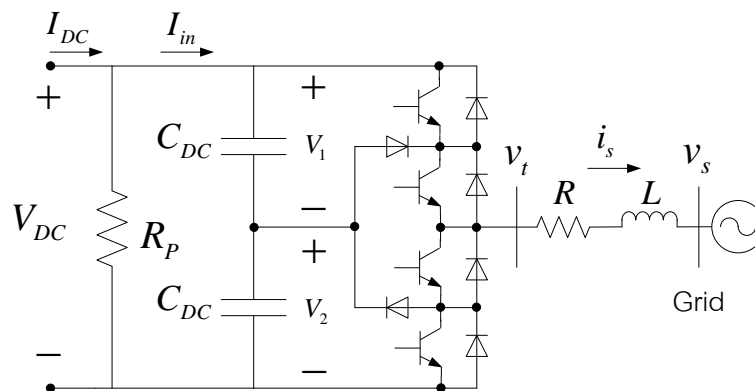
ภาพที่ 3.5 แผนผังการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธี Perturb and Observe

### 3.3 อินเวอร์เตอร์แบบ Three-level Neutral Point Clamped (NPC)

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงส่วนที่สองของกระบวนการควบคุมกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบ Double Stage ได้แก่ อินเวอร์เตอร์แปลงไฟสลับแบบ Three-Level NPC Inverter ซึ่งเป็นอินเวอร์เตอร์ประเภทหนึ่งของ Multilevel Inverter ข้อดีของอินเวอร์เตอร์ประเภทนี้คือ มีความสมดุลระหว่างสมรรถนะต่อการใช้งานในระดับแรงดันสูง สามารถใช้ สวิตช์ที่มีพิกัดแรงดันต่ำ สร้างฮาร์โมนิกต่ำ ทำให้ลดขนาดของตัวกรอง (filter) และมีการตอบสนองเชิงพลวัตที่ดี [43] ซึ่งในหัวข้อนี้จะแบ่งการอธิบายออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ แบบจำลองของอินเวอร์เตอร์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอินเวอร์เตอร์ และการควบคุมอินเวอร์เตอร์

#### 3.3.1 แบบจำลองของอินเวอร์เตอร์แบบ Three-level NPC

แบบจำลองอินเวอร์เตอร์ประเภทนี้ แสดงดังภาพที่ 3.6 ในที่นี้จะแสดงองค์ประกอบเพียง 1 เฟส ซึ่งประกอบด้วย (1) ตัวเก็บประจุขาเข้า ( $C_{DC}$ ) (2) ไดโอด (3) Switching (4) ความต้านทานซึ่งแทนกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการสวิตชิง ( $R_p$ ) (5) ความต้านทานแทน On-stage loss ( $R$ ) และ (6) ความเหนี่ยวนำ ( $L$ )



ภาพที่ 3.6 แบบจำลองอินเวอร์เตอร์แบบ Three-level Neutral Point Clamped

#### 3.3.2 แบบจำลองเชิงพลวัตของอินเวอร์เตอร์แบบ Three-level NPC

แบบจำลองเชิงพลวัตของ NPC สามารถอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้ [43]

$$\frac{di_{sd}}{dt} = -\frac{R}{L}i_{sd} + \omega_e i_{sq} - \frac{1}{L}v_{sd} + \frac{1}{L}\left[V_1\left(\frac{m_d}{2} + \frac{2\alpha_0}{\pi}\right) + V_2\left(\frac{m_d}{2} + \frac{2\beta_0}{\pi}\right)\right] \cos\phi \quad (3.12)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = -\frac{R}{L}i_{sq} - \omega_e i_{sd} - \frac{1}{L}v_{sq} + \frac{1}{L}\left[V_1\left(\frac{m_q}{2} + \frac{2\alpha_0}{\pi}\right) + V_2\left(\frac{m_q}{2} + \frac{2\beta_0}{\pi}\right)\right] \sin\phi \quad (3.13)$$



$$\frac{d(V_1 - V_2)}{dt} = -(3/\pi C_{DC})(i_{sd}\cos\phi + i_{sq}\sin\phi)(\alpha_0 - \beta_0) \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \frac{dV_{DC}}{dt} = & (2/C_{DC})I_{in} - (3/2C_{DC})(m_d i_{sd}\cos\phi + m_q i_{sq}\sin\phi) \\ & - (3/\pi C_{DC})(i_{sd}\cos\phi + i_{sq}\sin\phi)(\alpha_0 + \beta_0) \end{aligned} \quad (3.15)$$

เมื่อ

$m_d$	คือ	ขนาดของการมอดูเลตบนแกน $d$ ในกรอบอ้างอิง $dq$
$m_q$	คือ	ขนาดของการมอดูเลตบนแกน $q$ ในกรอบอ้างอิง $dq$
$\phi$	คือ	มุมของแรงดัน $v_t$ เทียบกับกรอบอ้างอิง $dq$
$\omega_e$	คือ	ความถี่เชิงโคโรนัส
$\alpha_0$	คือ	ค่า offset ในการมอดูเลต
$\beta_0$	คือ	ค่า offset ในการมอดูเลต
$i_{sd}$	คือ	ขนาดกระแสสูงสุด $i_s$ บนแกน $d$ ในกรอบอ้างอิง $dq$ (A)
$i_{sq}$	คือ	ขนาดกระแสสูงสุด $i_s$ บนแกน $q$ ในกรอบอ้างอิง $dq$ (A)
$v_{sd}$	คือ	ขนาดแรงดันเฟสสูงสุด $v_s$ บนแกน $d$ ในกรอบอ้างอิง $dq$ ( $V_{L-N}$ )
$v_{sq}$	คือ	ขนาดแรงดันเฟสสูงสุด $v_s$ บนแกน $q$ ในกรอบอ้างอิง $dq$ ( $V_{L-N}$ )

โดยปกติ  $\alpha_0$  และ  $\beta_0$  จะมีค่าน้อยมาก และเมื่อแทน  $V_1 + V_2 = V_{DC}$ ,  $V_1 - V_2 = 0$  และ  $I_{in} = I_{DC} - V_{DC}/R_p$  ลงในชุดสมการ จะได้ว่า

$$\frac{di_{sd}}{dt} = -\frac{R}{L}i_{sd} + \omega_e i_{sq} - \frac{1}{L}v_{sd} + \frac{m_d}{2L}V_{DC}\cos\phi \quad (3.16)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = -\omega_e i_{sd} - \frac{R}{L}i_{sq} - \frac{1}{L}v_{sq} + \frac{m_q}{2L}V_{DC}\sin\phi \quad (3.17)$$

$$\frac{dV_{DC}}{dt} = (2/C_{DC})I_{DC} - (2/R_p C_{DC})V_{DC} - (3/2C_{DC})(m_d i_{sd}\cos\phi + m_q i_{sq}\sin\phi) \quad (3.18)$$

และแรงดัน  $v_t$  ในกรอบอ้างอิง  $dq$  จะเป็นดังนี้

$$v_{td} = \frac{m_d}{2}V_{DC}\cos\phi \quad (3.19)$$

$$v_{tq} = \frac{m_q}{2}V_{DC}\sin\phi \quad (3.20)$$

### 3.3.3 การควบคุมอินเวอร์เตอร์

การควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่สำคัญ คือ การควบคุมกระแสฝั่งไฟฟ้ากระแสสลับ การควบคุมสมดุลของกำลังไฟฟาระหว่างฝั่งไฟฟ้ากระแสสลับกับฝั่งไฟฟ้ากระแสตรง และการควบคุมการซิงโครไนซ์ความถี่กับระบบไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม เพื่อความง่ายต่อการจำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในระบบไฟฟ้ากำลัง จะพิจารณาว่าอินเวอร์เตอร์สามารถซิงโครไนซ์ความถี่กับระบบไฟฟ้าได้ตลอดเวลา และไม่พิจารณากรรมวิธีการมอดูเลตเนื่องจากอยู่ในส่วนของอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ดังนั้น การควบคุมอินเวอร์เตอร์จึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังต่อไปนี้

#### 3.3.3.1 การควบคุมกระแสฝั่งไฟฟ้ากระแสสลับ

การแปลงกระแสฝั่งไฟฟ้ากระแสสลับจากกรอบอ้างอิง  $abc$  เป็นกรอบอ้างอิง  $dq$  ช่วยเพิ่มความสะดวกในการควบคุมกระแสของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่มีค่าแปรตามเวลา เปลี่ยนเป็นค่าที่ไม่แปรตามเวลา โดยมีสมการการแปลงแกนดังสมการที่ (3.21)

$$[i_{sd} \ i_{sq}]^T = T_{abc-dq}(\theta) \cdot [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T \quad (3.21)$$

โดย  $T_{abc-dq}(\theta)$  คือ เมทริกซ์การแปลงแกนจากกรอบอ้างอิง  $abc$  เป็นกรอบอ้างอิง  $dq$

$$T_{abc-dq}(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

เมื่อ

$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  คือ กระแสไฟสลับบนกรอบอ้างอิง  $abc$  ซึ่งเท่ากับ  $i_{s,max} \cos \omega_e t$ ,  $i_{s,max} \cos\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right)$  และ  $i_{s,max} \cos\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}\right)$  ตามลำดับ โดย  $\omega_e$  คือ ความถี่โครงข่ายไฟฟ้า

$\theta$  คือ มุมระหว่างแกน  $d$  และแกน  $a$

จากสมการที่ (3.16) และ (3.17) จะเห็นว่ากระแส  $i_{sd}$  และ  $i_{sq}$  มีตัวประกอบที่เชื่อมโยงต่อกัน ซึ่งส่งผลให้พลวัตของกระแสแต่ละแกนไม่เป็นอิสระต่อกัน และมีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น [44], [45] อย่างไรก็ตาม การควบคุมกระแสด้วยวิธีการ decoupling จะช่วยให้อินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมกระแสบนแกน  $d$  และแกน  $q$  ได้อย่างอิสระต่อกันได้ด้วยการควบคุมผ่านขนาดการมอดูเลต  $m_d$  และ  $m_q$  ซึ่งแสดงในสมการที่ (3.23) และ (3.24) ตามลำดับ

$$m_d = (2/V_{DC} \cos \phi)(u_d - L\omega i_{sq} + V_{sd}) \quad (3.23)$$

$$m_q = (2/V_{DC} \sin \phi)(u_q + L\omega i_{sd} + V_{sq}) \quad (3.24)$$

เมื่อแทนสมการที่ (3.23) และ (3.24) ลงในสมการที่ (3.16) และ (3.17) ตามลำดับ จะได้ว่า

$$L \frac{di_{sd}}{dt} = -Ri_{sd} + u_d \quad (3.25)$$

$$L \frac{di_{sq}}{dt} = -Ri_{sq} + u_q \quad (3.26)$$

โดยสัญญาณควบคุม  $u_d$  และ  $u_q$  เป็นตัวแปรใหม่ที่เกิดจากผลต่างของกระแส  $i_{sd,ref} - i_{sd}$  และ  $i_{sq,ref} - i_{sq}$  ซึ่งผ่านตัวควบคุมพีไอ (Proportional and Integral Controller; PI) ดังภาพที่ 3.7 ซึ่งอธิบายได้ด้วยสมการในโดเมนเวลา ดังนี้

$$u_d = K_{p,i}e_d + K_{i,i} \int_0^t e_d dt \quad (3.27)$$

โดย  $e_d = i_{sd,ref} - i_{sd}$  เมื่อพิจารณาในโดเมนความถี่ จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนลูเปิดของกระแสเป็น

$$l(s) = \frac{K_{p,i} \left( s + \frac{K_{i,i}}{K_{p,i}} \right)}{s} \times \frac{1/L}{s + R/L} \quad (3.28)$$

เมื่อเลือกให้  $K_{p,i} = L/\tau_i$  และ  $K_{i,i} = R/\tau_i$  จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนลูปิดดังต่อไปนี้

$$G_s(s) = \frac{I_{sd}(s)}{I_{sd,ref}(s)} = \frac{1}{\tau_i s + 1} \quad (3.29)$$

จากการแปลงลาปลาซผกผันของสมการที่ (3.29) และใช้วิธีการทำนองเดียวกันกับกระแสไฟฟ้าบนแกน  $q$  จะได้สมการสถานะของกระแสทั้งสองแกนดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{di_{sd}}{dt} = -i_{sd}/\tau_i + i_{sd,ref}/\tau_i \quad (3.30)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = -i_{sq}/\tau_i + i_{sq,ref}/\tau_i \quad (3.31)$$

จากสมการที่ (3.30) และสมการที่ (3.31) จะเห็นว่า อินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมกระแสของทั้งสองแกนได้อิสระจากกัน ซึ่งมีประโยชน์ต่อการควบคุมค่าตัวประกอบกำลังของอินเวอร์เตอร์ เพราะขนาดของกำลังไฟฟ้าจริงจะขึ้นกับกระแส  $i_{sd}$  และขนาดของกำลังไฟฟารีแอกทีฟจะขึ้นกับกระแส  $i_{sq}$  ยกตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการให้อินเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าที่ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 จะต้องควบคุมให้  $i_{sq,ref} = 0$  เป็นต้น สำหรับวิธีการสร้างกระแสควบคุมอ้างอิง  $i_{sd,ref}$  ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการควบคุมแรงดันไฟตรง จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

### 3.3.3.2 การควบคุมแรงดันไฟตรง

การควบคุมแรงดันไฟตรง (แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_{DC}$ ) ด้วยวิธีการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward) จะช่วยให้อินเวอร์เตอร์สามารถควบคุมกระแสและกำลังไฟฟ้า ณ จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling; PCC) ได้อย่างถูกต้อง โดยการนำสัญญาณแรงดันและกระแสที่วัดได้ ณ จุดต่อร่วมมาสร้างสัญญาณกระแสอ้างอิงในการควบคุมอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะช่วยชดเชยความผิดพลาดของการควบคุมกระแสเนื่องจากแรงดันตกและกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ของอินเวอร์เตอร์ได้

หลักการควบคุมแรงดันไฟตรงตั้งอยู่บนพื้นฐานของสมดุลกำลังไฟฟ้าระหว่างด้านไฟฟ้ากระแสตรงและด้านไฟฟ้ากระแสสลับ [44] จากสมการที่ (3.18) จะเห็นว่า มีตัวแปร  $i_{sd} \cos \phi$  และ  $i_{sq} \sin \phi$  ที่เป็นผลคูณของตัวแปรสถานะและตัวแปรควบคุม การกำจัดตัวแปรดังกล่าวเพื่อความง่ายต่อการควบคุมสามารถทำได้โดยการแทนให้  $C_{eq} = C_{DC}/2$  ลงในสมการที่ (3.18) ซึ่งจะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = (1/C_{eq})I_{dc} - (1/R_P C_{eq})V_{dc} - (3/4C_{eq})(m_d i_{sd} \cos \phi + m_q i_{sq} \sin \phi) \quad (3.32)$$

และนำ  $C_{eq} V_{DC}$  คูณทั้งสองข้างของสมการที่ (3.32) จะได้ว่า

$$\frac{d(\frac{1}{2}C_{eq}V_{DC}^2)}{dt} = V_{DC}I_{DC} - \frac{V_{DC}^2}{R_P} - (3/2)(i_{sd}m_d V_{DC} \cos \phi / 2 + i_{sq}m_q V_{DC} \sin \phi / 2) \quad (3.33)$$

แทนสมการที่ (3.19) และ (3.20) ลงในสมการที่ (3.33) จะได้ว่า

$$\frac{d(\frac{1}{2}C_{eq}V_{DC}^2)}{dt} = V_{DC}I_{DC} - V_{DC}^2/R_P - (3/2)(i_{sd}v_{td} + i_{sq}v_{tq}) \quad (3.34)$$

กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกจากขั้วของ NPC (บัส  $v_t$ ) จะต้องสมดุลกับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกไปยังโครงข่ายไฟฟารวมกับกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปในตัวต้านทาน และสะสมในตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้น

$$\frac{3}{2}(v_{td}i_{sd} + v_{tq}i_{sq}) = \frac{3}{2} \frac{d(\frac{1}{2}Li_{sd}^2 + \frac{1}{2}Li_{sq}^2)}{dt} + \frac{3}{2}(i_{sd}^2R + i_{sq}^2R) + \frac{3}{2}(v_{sd}i_{sd} + v_{sq}i_{sq}) \quad (3.35)$$

แทนสมการที่ (3.35) ลงในสมการที่ (3.34) และแทน  $P_{PV,array} = V_{DC}I_{DC}$  จะได้ว่า

$$\frac{d(\frac{1}{2}C_{eq}V_{DC}^2)}{dt} = P_{PV,array} - \frac{V_{DC}^2}{R_p} - \frac{3}{2} \frac{d(\frac{1}{2}Li_{sd}^2 + \frac{1}{2}Li_{sq}^2)}{dt} - \frac{3}{2}(i_{sd}^2R + i_{sq}^2R) - \frac{3}{2}(v_{sd}i_{sd} + v_{sq}i_{sq}) \quad (3.36)$$

จัดรูปสมการที่ (3.36) ใหม่โดยการหาร  $C_{eq}/2$  ทั้งสองข้างของสมการ จะได้สมการสถานะของแรงดันไฟตรงกำลังสอง ดังต่อไปนี้

$$\frac{dV_{DC}^2}{dt} = \frac{2}{C_{eq}} \left( P_{PV,array} - \frac{V_{DC}^2}{R_p} - \frac{3}{2} \frac{d(\frac{1}{2}Li_{sd}^2 + \frac{1}{2}Li_{sq}^2)}{dt} - \frac{3}{2}(i_{sd}^2R + i_{sq}^2R) - \frac{3}{2}(v_{sd}i_{sd} + v_{sq}i_{sq}) \right) \quad (3.37)$$

ในส่วนต่อไปจะกล่าวถึงการสร้างสัญญาณกระแสอ้างอิงซึ่งมีความสัมพันธ์กับการควบคุมแรงดันไฟตรง โดยกระแสอ้างอิงในแกน  $q$  จะถูกกำหนดให้เป็นศูนย์เนื่องจากไม่ต้องการจ่ายกำลังรีแอคทีฟให้ระบบโครงข่าย และสำหรับการสร้างสัญญาณกระแสอ้างอิงในแกน  $d$  จะใช้วิธีการ Feed Forward [45] ดังนี้

$$I_{sd,ref}(s) = U_v(s) + I_{ff}(s) \quad (3.38)$$

โดย  $I_{ff}(s)$  คือ กระแส Feed Forward ในโดเมนความถี่ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $2P_{PV,array}/3sV_{sd}$  และสัญญาณ  $U_v(s)$  เป็นสัญญาณควบคุมซึ่งคำนวณได้จาก

$$U_v(s) = H_v(s)E_v(s) = \frac{\alpha_1s + \alpha_2}{s(s + \alpha_3)} E_v(s) \quad (3.39)$$

โดย  $H_v(s)$  เป็นตัวควบคุมพีไอที่ประกอบด้วยส่วนขยายอัตราส่วน (Proportional Gain)  $\alpha_1$  ส่วนขยายอัตราส่วน  $\alpha_2$  และโพลล์ (Pole) ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)  $\alpha_3$  และสัญญาณเปรียบเทียบแรงดันไฟตรง  $E_v(s) = \mathcal{L}\{V_{DC,ref}^2 - V_{DC}^2\}$  หลังจากแทนสมการที่ (3.39) ลงในสมการที่ (3.38) จะได้สมการของสัญญาณกระแสอ้างอิงดังต่อไปนี้

$$I_{sd,ref}(s) = \frac{\alpha_1s + \alpha_2}{s(s + \alpha_3)} \mathcal{L}\{V_{DC,ref}^2 - V_{DC}^2\} + \frac{2P_{PV,array}}{3} \frac{1}{v_{sd} s} \quad (3.40)$$

จากการแปลงลาปลาซผกผันสมการที่ (3.40) จะได้สมการสถานะการควบคุมกระแสอ้างอิง  
ดังนี้

$$i_{sd,ref}(t) = \alpha_2 x_1 + \alpha_1 x_2 + i_{ff}(t) \quad (3.41)$$

โดยตัวแปร  $x_1$  และ  $x_2$  เป็นตัวแปรสถานะที่สามารถแสดงในรูปของสมการสถานะได้ดังนี้

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2 \quad (3.42)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -\alpha_3 x_2 - V_{DC}^2 + V_{DC,ref}^2 \quad (3.43)$$

### 3.4 แนวทางในการพัฒนาโปรแกรมจากแบบจำลองที่นำเสนอ

หลังจากทราบถึงแบบจำลองเชิงพลวัตของอินเวอร์เตอร์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะทำการจัดรูปสมการดังกล่าวข้างต้นให้อยู่ในรูปของสมการสถานะสำหรับประยุกต์ใช้กับ ODE23 solver ในโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณสมการการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป โดยสมการสถานะทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังนี้

#### 3.4.1 สมการสถานะของกระแสฝั่งไฟฟ้ากระแสสลับ

$$\frac{di_{sd}}{dt} = -i_{sd}/\tau_i + i_{sd,ref}/\tau_i \quad (3.44)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = -i_{sq}/\tau_i + i_{sq,ref}/\tau_i \quad (3.45)$$

โดย  $i_{sd,ref}$  และ  $i_{sq,ref}$  คือ สัญญาณกระแสอ้างอิงในแต่ละช่วงเวลาของการคำนวณซึ่งสามารถแสดงได้ตามสมการที่ (3.46)-(3.47) ตามลำดับ โดยสมการกระแสอ้างอิงบนแกน  $d$  จะแปรตามกำลังไฟฟ้าที่ได้รับจากการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของคอนเวอร์เตอร์ทบทแรงดัน แรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม และตัวแปรสถานะ  $x_1$  และ  $x_2$  สำหรับกระแสอ้างอิงบนแกน  $q$  จะถูกควบคุมให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนี้

$$i_{sd,ref} = \alpha_2 x_1 + \alpha_1 x_2 + \frac{2 P_{PV,array}}{3 v_{sd}} \quad (3.46)$$

$$i_{sq,ref} = 0 \quad (3.47)$$

โดยตัวแปรสถานะ  $x_1$  และ  $x_2$  สามารถคำนวณได้จากสมการของตัวแปรสถานะ  $x_1$  และ  $x_2$  ดังนี้

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2 \quad (3.48)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -\alpha_3 x_2 - V_{DC}^2 + V_{DC,ref}^2 \quad (3.49)$$

โดย  $V_{DC,ref}$  แรงดันไฟตรงอ้างอิงสามารถคำนวณได้จากแผนผังการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดในภาพที่ 3.5

### 3.4.2 สมการสถานะของแรงดันไฟตรงยกกำลังสอง

สมการสถานะของแรงดันไฟตรงยกกำลังสองเริ่มจากการจัดรูปสมการที่ 3.37 ในส่วนของกำลังไฟฟ้าสะสมในตัวเหนี่ยวนำดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{d(\frac{1}{2}Li_{sd}^2 + \frac{1}{2}Li_{sq}^2)}{dt} &= L \left( \frac{di_{sd}}{dt} + \frac{di_{sq}}{dt} \right) \\ &= L(-i_{sd}/\tau_i + i_{sd,ref}/\tau_i - i_{sq}/\tau_i + i_{sq,ref}/\tau_i) \end{aligned} \quad (3.50)$$

จากนั้นแทนสมการที่ 3.50 ลงในสมการที่ (3.37) จะได้สมการสถานะของแรงดันไฟตรงยกกำลังสองในรูปของกระแสดังนี้

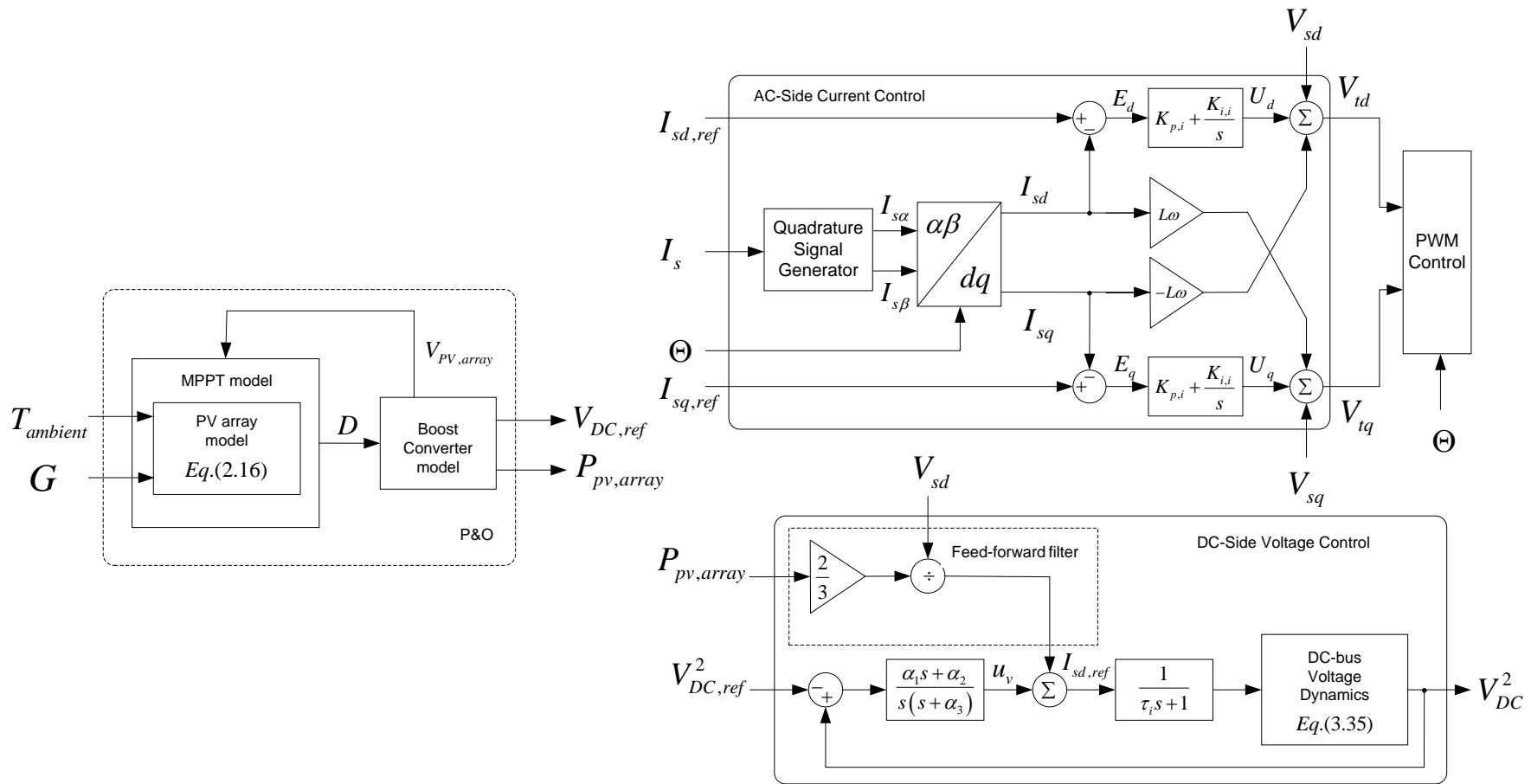
$$\begin{aligned} \frac{dV_{DC}^2}{dt} &= \frac{2}{C_{eq}} \left( P_{PV,array} - \frac{V_{DC}^2}{R_p} - \frac{3L}{2} (-i_{sd}/\tau_i + i_{sd,ref}/\tau_i - i_{sq}/\tau_i + i_{sq,ref}/\tau_i) \right. \\ &\quad \left. - \frac{3}{2} (i_{sd}^2 R + i_{sq}^2 R) - \frac{3}{2} (v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq}) \right) \end{aligned} \quad (3.51)$$

### 3.4.3 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

สมการคำนวณกำลังไฟฟ้าจริง ( $P_{PV}$ ) และกำลังไฟฟารีแอกทีฟ ( $Q_{PV}$ ) ที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$P_{PV} = (3/2)(i_{sd}v_{sd} + i_{sq}v_{sq}) \quad (3.52)$$

$$Q_{PV} = (3/2)(i_{sd}v_{sq} - i_{sq}v_{sd}) \quad (3.53)$$



ภาพที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับโครงข่าย



## บทที่ 4

### การจำลองความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

#### 4.1 หลักการพื้นฐาน

การหาขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและความถี่ จะใช้วิธีการจำลองเหตุการณ์เพื่อหาขนาดแบตเตอรี่ที่สามารถครอบคลุมการลดการแกว่งของความถี่และกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุด โดยในการจำลองเหตุการณ์จะต้องมีการจำลองปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งก็คือ ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

การจำลองความเข้มแสงและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมจะพิจารณาว่าทั้งสองปัจจัยมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาและสภาพภูมิอากาศ กล่าวคือ ความเข้มแสงจะขึ้นกับช่วงเวลา เช่น ในช่วงเช้าความเข้มแสงในประเทศไทยจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนมากสุดในช่วงเที่ยงแล้วค่อยๆลดลงในช่วงเย็น และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมจะขึ้นกับสภาพอากาศและภูมิประเทศ เช่น พื้นที่สูงอุณหภูมิจะต่ำ อย่างไรก็ตามปัจจัยทั้งสองไม่เป็นอิสระต่อกัน และอาจมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ช่วงเวลาที่ความเข้มแสงอาทิตย์สูง อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมก็อาจจะสูงตามไปด้วย ในทางกลับกันช่วงเวลาที่ความเข้มแสงอาทิตย์ต่ำ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมก็อาจจะต่ำตามไปด้วย ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมจึงไม่เหมาะสมนักที่จะสร้างโดยให้ปัจจัยทั้งสองเป็นอิสระต่อกัน โดยแบบจำลองดังกล่าวควรสร้างให้มีลักษณะที่มีความสัมพันธ์กันหรือขึ้นต่อกันด้วย

ในการจำลองความเข้มแสงและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมจะกำหนดให้ทั้งสองปัจจัยเป็นตัวแปรสุ่ม ดังนั้นการจำลองเหตุการณ์ก็คือ การสุ่มตัวแปร 2 ตัวที่มีความสัมพันธ์ต่อกัน ซึ่งตัวชี้วัดความสัมพันธ์ของตัวแปรสุ่มที่มักใช้กันทั่วไปคือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient;  $\rho$ ) โดยถ้า  $\rho$  มีค่าใกล้ 0 แสดงว่าตัวแปรทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์กัน ถ้ามีค่าใกล้ 1 แสดงว่ามีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน และถ้ามีค่าใกล้ -1 แสดงว่ามีความสัมพันธ์ตรงข้ามกัน อย่างไรก็ตาม สัมประสิทธิ์ดังกล่าวก็บอกได้เพียงระดับของความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นเท่านั้น [46]

วิทยานิพนธ์นี้จะสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมด้วยวิธีการคอปูลา (Copulas) ซึ่งเป็นทฤษฎีที่บอกรายละเอียดของความสัมพันธ์ของตัวแปรสุ่มมากกว่าสองตัวแปรขึ้นไปในรูปของฟังก์ชันการแจกแจงร่วม (Joint Distribution) โดยที่ตัวแปรสุ่มแต่ละตัวแปรมีการแจกแจงสะสม (Cumulative Marginal Distribution) เป็นการแจกแจงแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) บนช่วง  $[0, 1]$  กล่าวอีกนัยหนึ่ง วิธีการคอปูลาอธิบายทิศทางความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสุ่มจากคู่อันดับการแจกแจงสะสมร่วมของตัวแปรสุ่ม โดยบริเวณที่มีความหนาแน่นมากแสดงว่าตัวแปรสุ่มมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางดังกล่าว

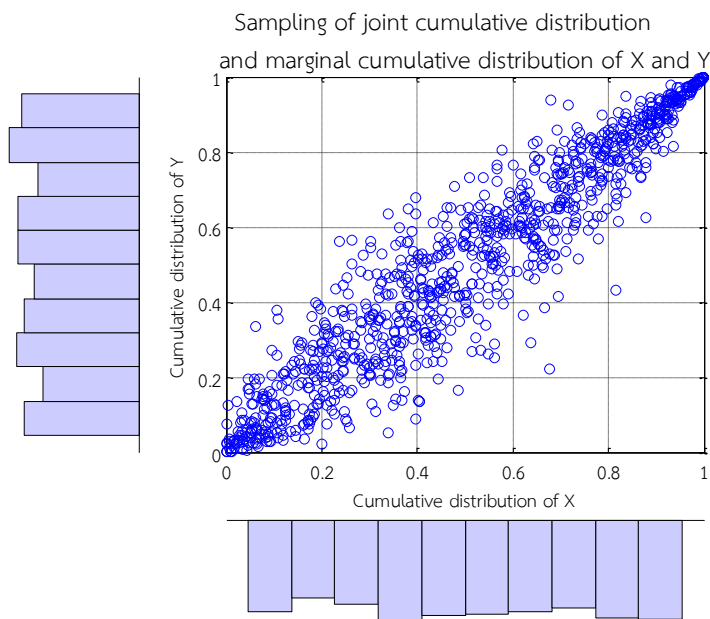
ทฤษฎีบทของสกลาร์ (Sklar's Theorem) เป็นทฤษฎีบทที่สำคัญในการศึกษาคอปูลา โดยทฤษฎีบทนี้จะกล่าวไว้ว่า  $H$  จะเป็นฟังก์ชันการแจกแจงร่วมของตัวแปรสุ่มก็ต่อเมื่อมีคอปูลา  $C$  ที่ทำให้ [46]-[49]

$$H(x, y) = C(U(x), V(y)) \quad (4.1)$$

โดยที่  $x, y \in R$  และ  $U(x), V(y)$  เป็นการแจกแจงแบบมาร์จินัลของ  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ ซึ่งมีค่าอยู่บนช่วง  $[0,1]$

ในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้กล่องเครื่องมือ “Copula” ในโปรแกรม MATLAB เพื่อศึกษาและจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยประเภทคอปูลาที่นำมาใช้มีดังนี้

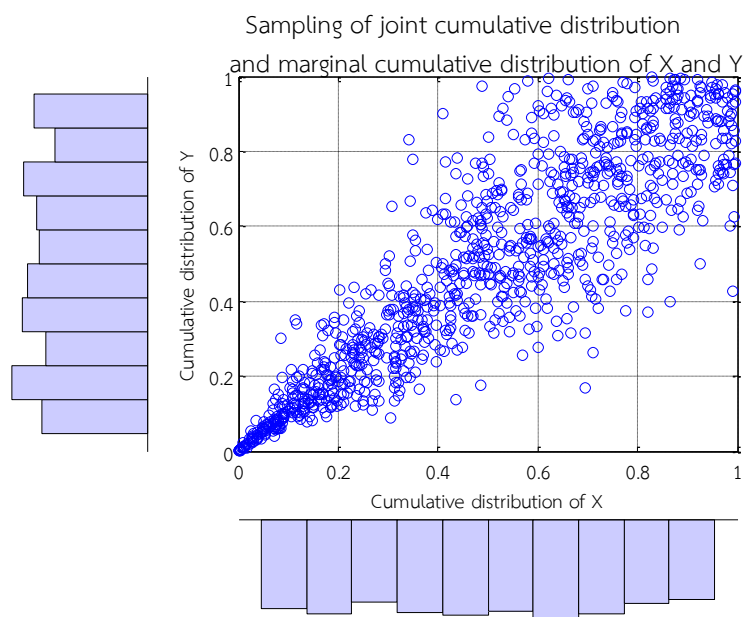
- 1) **Gumbel Copula** เป็นคอปูลาที่มีคู่อันดับการแจกแจงสะสมกระจายตัวหนาแน่นบริเวณบน-ขวา ของแผนภาพการกระจาย ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสุ่ม  $X$  และ  $Y$  ว่ามีทิศทางไปทางเดียวกันเมื่อการแจกแจงสะสมของตัวแปรมีค่ามาก กล่าวคือ ถ้าหากตัวแปรสุ่ม  $X$  มีค่ามากแล้วมีโอกาสที่ตัวแปรสุ่ม  $Y$  จะมีค่ามากสูงตามไปด้วย แต่หากตัวแปรสุ่ม  $X$  มีค่าน้อยแล้วมีโอกาสที่ตัวแปรสุ่ม  $Y$  จะมีค่าได้หลากหลายมีอยู่สูง



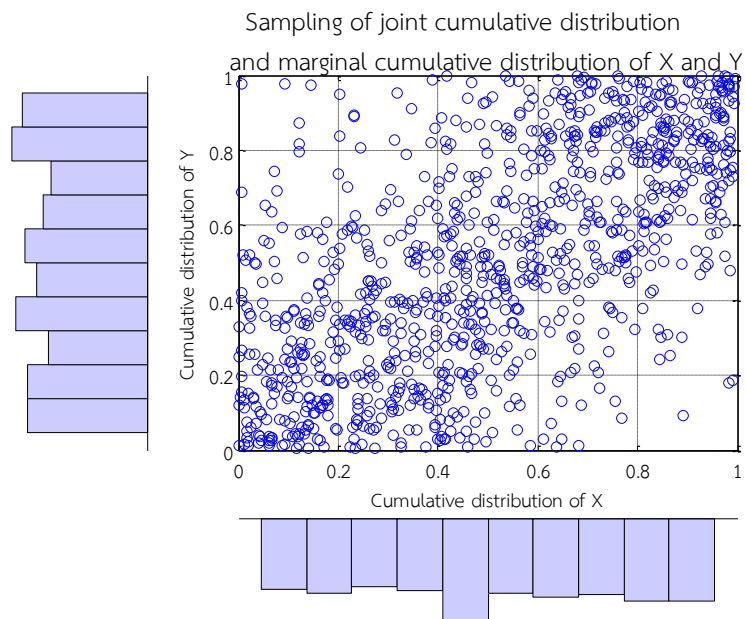
ภาพที่ 4.1 การกระจายคอปูลาประเภท Gumbel ของคู่อันดับของตัวแปรสุ่ม  $X$  และ  $Y$

- 2) **Clayton Copula** เป็นคอปูลาที่มีคู่อันดับการแจกแจงสะสมกระจายตัวหนาแน่นบริเวณล่าง-ซ้าย ของแผนภาพการกระจาย ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสุ่ม  $X$  และ  $Y$  ว่ามีทิศทางไปทางเดียวกันเมื่อการแจกแจงสะสมของตัวแปรมีค่าน้อย กล่าวคือ ถ้าหากตัวแปรสุ่ม  $X$  มีค่าน้อยแล้วมีโอกาสที่ตัวแปรสุ่ม  $Y$  จะมีค่าน้อยตามไปด้วย แต่หากตัวแปรสุ่ม  $X$  มีค่ามากแล้วมีโอกาสที่ตัวแปรสุ่ม  $Y$  จะมีค่าได้หลากหลายมีอยู่สูง

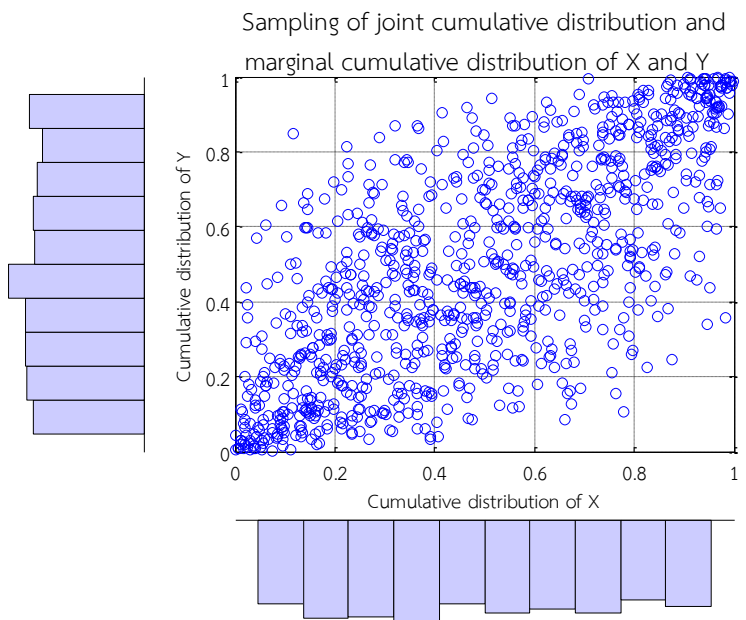
- 3) **Frank Copula** เป็นคอปูลาที่มีคู่อันดับการแจกแจงสะสมกระจายตัวหนาแน่นบริเวณแนวทแยงจากล่าง-ซ้าย ไปยังขวา-บน ของแผนภาพการกระจาย ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสุ่ม  $X$  และ  $Y$  ว่ามีทิศทางไปทางเดียวกันตลอดการแจกแจงสะสมของตัวแปรช่วง  $[0,1]$  กล่าวคือ ถ้าหากตัวแปรสุ่ม  $X$  มีค่ามากแล้วตัวแปรสุ่ม  $Y$  จะมีค่ามากตาม หรือถ้าตัวแปรสุ่ม  $X$  มีค่าน้อยแล้วตัวแปรสุ่ม  $Y$  จะมีค่าน้อยด้วย
- 4) **Gaussian Copula** เป็นคอปูลาที่มีคู่อันดับการแจกแจงสะสมกระจายตัวบริเวณตรงกลางของแผนภาพการกระจาย ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสุ่ม  $X$  และ  $Y$  ว่ามีทิศทางไปทางเดียวกันตลอดการแจกแจงสะสมของตัวแปรช่วง  $[0,1]$  เหมือนคอปูลาประเภท Frank แต่คู่อันดับการแจกแจงสะสมจะเกาะกลุ่มมันตรงกลางมากกว่า



ภาพที่ 4.2 การกระจายคอปูลาประเภท Clayton ของคู่อันดับของตัวแปรสุ่ม  $X$  และ  $Y$



ภาพที่ 4.3 การกระจายคอปูลาประเภท Frank ของคู่อันดับของตัวแปรสุ่ม X และ Y



ภาพที่ 4.4 การกระจายคอปูลาประเภท Gaussian ของคู่อันดับของตัวแปรสุ่ม X และ Y

## 4.2 แบบจำลองความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

### 4.2.1 การขึ้นต่อเวลาของแบบจำลอง

ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นตัวแปรสุ่มที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของค่าเฉลี่ยรายชั่วโมง ณ ชั่วโมงที่  $k$  ( $x_{trend,k}$ ) ซึ่งมีค่าคงที่แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล และส่วนความไม่แน่นอนของตัวแปร ( $x_{noise,t}$ ) ที่อธิบายได้ด้วยกระบวนการเชิงสุ่ม (Stochastic Process) ซึ่งจะเป็นตัวแทนของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในช่วงเวลาสั้นๆ รอบค่าเฉลี่ย ดังแสดงในสมการที่ (4.2) [50]

$$x_{k,t} = x_{trend,k} + x_{noise,t} \quad (4.2)$$

จากนั้นจึงใช้ทฤษฎี Ito's Lemma เพื่อหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันในกระบวนการเชิงสุ่มในสมการที่ (4.2) เพื่อหาค่าของตัวแปรในช่วงเวลาที่สนใจ โดยกำหนดให้กระบวนการเชิงสุ่ม  $x(t)$  มีค่าขึ้นกับเวลาและความไม่แน่นอนที่อธิบายได้ด้วยกระบวนการวีเนอร์ ( $W_t$ ) ดังสมการอนุพันธ์เชิงสุ่ม (Stochastic Differential Equation; SDE) ต่อไปนี้

$$dx = a(x, t)dt + b(x, t)dW_t \quad (4.3)$$

เมื่อ

$a(x, t)$  และ  $b(x, t)$  คือ ฟังก์ชันที่มีค่าขึ้นกับตัวแปร  $x$  และ  $t$   
 $W_t$  คือ กระบวนการสุ่มแบบวีเนอร์ (Wiener Process) ที่มีการแจกแจงแบบปกติและมีความแปรปรวนเปลี่ยนแปลงตามเวลา  $W_t \sim N(0, t)$

และให้  $f(x, t)$  เป็นสมการอนุพันธ์อันดับสองที่มีค่าต่อเนื่องของ  $x$  และ  $t$  จะได้ว่า

$$df(x, t) \approx \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial t} dt + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} dx^2 + \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial t} dx dt + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} dt^2 \quad (4.4)$$

แทนค่าสมการที่ (4.3) ลงไปในสมการที่ (4.4) จะได้สมการอนุพันธ์ของฟังก์ชันที่ขึ้นกับตัวแปร  $x$  และ  $t$  หรือ  $f(x, t)$  ได้ดังนี้

$$df(x, t) \approx \left( \frac{\partial f}{\partial x} a(x, t) + \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{1}{2} b^2(x, t) \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right) dt + b(x, t) \frac{\partial f}{\partial x} dW_t \quad (4.5)$$

นำสมการที่ (4.3) และ (4.5) มาประยุกต์ใช้กับสมการที่ (4.2) เพื่อสร้างแบบจำลองความเข้มแสงอาทิตย์ ได้ดังนี้

$$dG_{k,t} = dG_{trend,k} + dG_{noise,t} \quad (4.6)$$

เนื่องจาก  $G_{trend,k}$  เป็นค่าคงที่ดังนั้นพจน์  $dG_{trend,k}$  จึงมีค่าเป็น 0 ส่วน  $dG_{noise,t}$  มีค่าตามกระบวนการสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และมีความแปรปรวนเปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสงอาทิตย์ ณ ขณะนั้นกับเวลา กล่าวคือ  $dG_{noise,t} \sim N(0, \sigma_{G,k}^2 G_{k,t}^2 dt)$  และสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$dG_{noise,t} = 0 + (\sigma_{G,k} G_{k,t} \sqrt{dt})Z \quad (4.7)$$

$$dG_{noise,t} = \sigma_{G,k} G_{k,t} dW_t \quad (4.8)$$

จากสมการที่ (4.3) และสมการที่ (4.6) – (4.8) จะได้ว่า

$$dG_{k,t} = (0)dt + \sigma_{G,k} G_{k,t} dW_t \quad (4.9)$$

เมื่อ

$dW_t$  คือ กระบวนการสุ่มแบบวีเนอร์ (Wiener Process) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\sqrt{dt} Z$   
 $Z$  คือ กระบวนการสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และมีความแปรปรวนเท่ากับหนึ่ง กล่าวคือ  $Z \sim N(0,1)$

เปรียบเทียบกับสมการ (4.3) กับสมการ (4.9) จะได้ว่า  $a(x,t) = 0$  และ  $b(x,t) = \sigma_{G,k} G_{k,t}$  และสามารถหาอนุพันธ์ของสมการที่ (4.9) ได้ดังนี้

$$df(G_{k,t}, t) = \frac{\partial f}{\partial t} dt + \frac{1}{2} (\sigma_{G,k} G_{k,t})^2 \frac{\partial^2 f}{\partial G_{k,t}^2} dt + \sigma_{G,k} G_{k,t} \frac{\partial f}{\partial G_{k,t}} dW_t \quad (4.10)$$

และเมื่อกำหนดให้  $f(G_{k,t}, t) = \ln(G_{k,t})$  จะได้ว่า

$$d \ln(G_{k,t}) = \frac{1}{2} (\sigma_{G,k} G_{k,t})^2 \left( \frac{-1}{G_{k,t}^2} \right) dt + (\sigma_{G,k} G_{k,t}) \left( \frac{1}{G_{k,t}} \right) dW_t \quad (4.11)$$

$$\int_{G_{k,0}}^{G_{k,t}} d \ln(G_{k,t}) = \int_0^t \left( -\frac{1}{2} \sigma_{G,k}^2 dt + \sigma_{G,k} dW_t \right) \quad (4.12)$$

$$\frac{G_{k,t}}{G_{k,0}} = \exp\left(-\frac{1}{2}\sigma_{G,k}^2 t + \sigma_{G,k} Z\sqrt{t}\right) \quad (4.13)$$

$$G_{k,t} = G_{k,0} \exp\left(-\frac{1}{2}\sigma_{G,k}^2 t + \sigma_{G,k} Z\sqrt{t}\right) \quad (4.14)$$

โดย  $G_{k,0} = G_{trend,k}$  ดังนั้น

$$G_{k,t} = G_{trend,k} \exp(\sigma_{G,k} Z_G \sqrt{t} - t \sigma_{G,k}^2 / 2) \quad (4.15)$$

ในทำนองเดียวกัน แบบจำลองอนุกรมสิ่งแวดลอมแสดงได้ดังนี้

$$T_{k,t} = T_{trend,k} \exp(\sigma_{T,k} Z_T \sqrt{t} - t \sigma_{T,k}^2 / 2) \quad (4.16)$$

เมื่อ

$G_{k,t}$	คือ	ความเข้มแสงอาทิตย์ ณ เวลาที่สนใจ $t$ ในชั่วโมงที่ $k$ ของแต่ละฤดูกาล
$G_{trend,k}$	คือ	ความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยในชั่วโมงที่ $k$ ของแต่ละฤดูกาล
$\sigma_{G,k}$	คือ	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มแสงอาทิตย์ ณ ชั่วโมงที่ $k$ ซึ่งมาจากการประมาณภาวะความน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimator; MLE)
$Z_G$	คือ	ตัวแปรสุ่มของกระบวนการสุ่มความเข้มแสงอาทิตย์ที่มีความสัมพันธ์กับอนุกรมสิ่งแวดลอม ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป
$t$	คือ	ช่วงเวลาของการสุ่ม $t$ นับจากเริ่มต้นชั่วโมงที่ $k$
$T_{k,t}$	คือ	อนุกรมสิ่งแวดลอม ณ เวลาที่สนใจ $t$ ในชั่วโมงที่ $k$ ของแต่ละฤดูกาล
$T_{trend,k}$	คือ	อนุกรมสิ่งแวดลอมเฉลี่ยในชั่วโมงที่ $k$ ของแต่ละฤดูกาล
$\sigma_{T,k}$	คือ	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอนุกรมสิ่งแวดลอม ณ ชั่วโมงที่ $k$ ซึ่งมาจากการประมาณภาวะความน่าจะเป็นสูงสุด (MLE)
$Z_T$	คือ	ตัวแปรสุ่มของกระบวนการสุ่มอนุกรมสิ่งแวดลอมที่มีความสัมพันธ์กับความเข้มแสงอาทิตย์ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

หลังจากทราบแบบจำลองของความเข้มแสงอาทิตย์และอนุกรมของสิ่งแวดลอมที่ขึ้นกับเวลาแล้ว ในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึง การจำลองการขึ้นต่อกันระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์และอนุกรมสิ่งแวดลอมโดยอาศัยการวิเคราะห์การขึ้นต่อกันระหว่างตัวแปรสุ่ม  $Z_G$  และ  $Z_T$  รวมถึงการวิเคราะห์หาความแปรปรวนของความเข้มแสงอาทิตย์และอนุกรมสิ่งแวดลอมอีกด้วย

#### 4.2.2 การขึ้นต่อกันระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

การขึ้นต่อกันของตัวแปรสุ่ม  $Z_G$  และ  $Z_T$  ที่ปรากฏในสมการที่ (4.15) และ (4.16) จะเป็นตัวแทนแสดงการขึ้นต่อกันระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยการนำข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่วัด ณ เวลาเดียวกันมาทำการวิเคราะห์ทางสถิติดังนี้

กำหนดให้ ความเข้มแสงอาทิตย์หรืออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมขณะใดๆ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (4.17) และ (4.18) ดังนี้

$$G_{k,t} = G_{trend,k} + G_{noise,t} \quad (4.17)$$

$$T_{k,t} = T_{trend,k} + T_{noise,t} \quad (4.18)$$

เมื่อเทียบเคียงกับสมการที่ (4.7) จะได้ว่าตัวแปร  $G_{noise,t}$  และ  $T_{noise,t}$  จะมีค่าประมาณตามกระบวนการสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติ ดังนี้

$$G_{noise,t} \approx \sigma_{G,k} G_{trend,k} \sqrt{t} \times Z_G \quad (4.19)$$

$$T_{noise,t} \approx \sigma_{T,k} T_{trend,k} \sqrt{t} \times Z_T \quad (4.20)$$

จากสมการที่ (4.17) – (4.20) เมื่อให้  $t$  มีระยะเวลาเท่ากับ 1 ชั่วโมงแล้ว จึงประมาณได้ว่า

$$G_k - G_{trend,k} \approx \sigma_{G,k} G_{trend,k} \times Z_G \quad (4.21)$$

$$T_k - T_{trend,k} \approx \sigma_{T,k} T_{trend,k} \times Z_T \quad (4.22)$$

ดังนั้นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ  $\sigma_{G,k}$  และ  $\sigma_{T,k}$  จึงหาได้จากการประมาณภาวะความน่าจะเป็นสูงสุด (MLE) ของชุดข้อมูลที่ถูกสร้างขึ้นจากสมการที่ (4.23) และ (4.24) ซึ่งเป็นการแจกแจงความเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ที่มีการแจกแจงแบบปกติโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ  $\sigma_{G,k}$  และ  $\sigma_{T,k}$  ตามลำดับ ดังนี้

$$(G_k - G_{trend,k})/G_{trend,k} \sim N(0, \sigma_{G,k}^2) \quad (4.23)$$

$$(T_k - T_{trend,k})/T_{trend,k} \sim N(0, \sigma_{T,k}^2) \quad (4.24)$$



เมื่อ

$G_k$  คือ เซตของข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์ ณ ชั่วโมงที่  $k$  ของแต่ละฤดูกาล  
 $T_k$  คือ เซตของข้อมูลอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ณ ชั่วโมงที่  $k$  ของแต่ละฤดูกาล

ในขั้นตอนต่อมา จะทำการหาค่าการแจกแจงสะสมร่วมของข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเพื่อหารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยรูปแบบคอปูลาที่เหมาะสมกับการแจกแจงของข้อมูลดังกล่าวนี้สามารถหาได้ ดังนี้

$$H(Z_G, Z_T) = C(\Phi(Z_G), \Phi(Z_T)) \quad (4.25)$$

เมื่อ

$\Phi(Z_G) = u$  คือ ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมแบบปกติมาตรฐาน (Standard Normal Distribution) ของ  $Z_G = (G_k - G_{trend,k})/\sigma_{G,k}G_{trend,k}$   
 $\Phi(Z_T) = v$  คือ ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมแบบปกติมาตรฐาน (Standard Normal Distribution) ของ  $Z_T = (T_k - T_{trend,k})/\sigma_{T,k}T_{trend,k}$   
 $C(u, v)$  คือ ฟังก์ชันคอปูลาของตัวแปร  $u$  และ  $v$   
 $H(Z_G, Z_T)$  คือ ฟังก์ชันการแจกแจงร่วมระหว่าง  $Z_G$  และ  $Z_T$

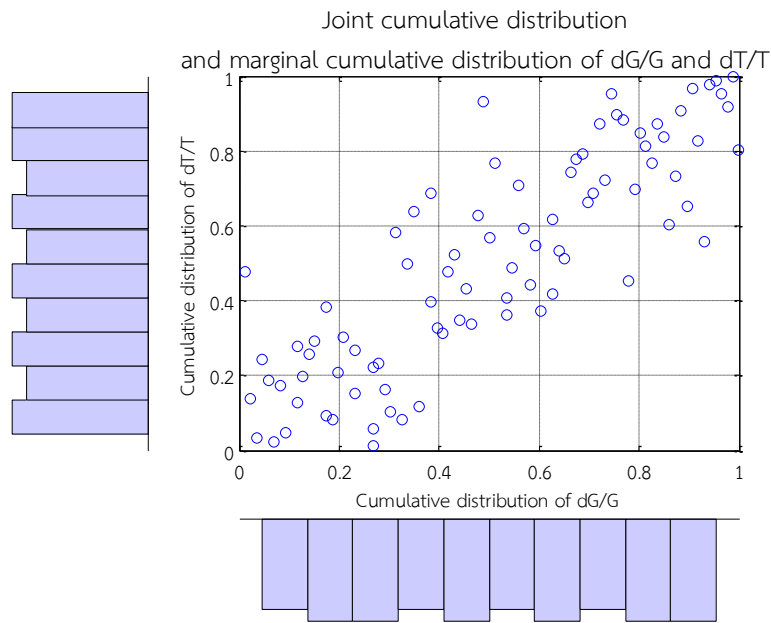
เมื่อได้คู่อันดับความสัมพันธ์  $(u, v)$  จากการแทนค่า  $(Z_G, Z_T)$  ลงไปในฟังก์ชันการแจกแจงสะสมแบบปกติมาตรฐานแล้ว จะทำการเลือกรูปแบบคอปูลา  $C(u, v)$  ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสุ่มที่เหมาะสมโดยใช้วิธีประมาณค่าความน่าจะเป็นสูงสุด (MLE) ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยกล่องเครื่องมือรูปแบบคอปูลาใน MATLAB ชื่อ “copulafit”

เมื่อได้รูปแบบคอปูลาที่เหมาะสมจากรูปแบบคอปูลามาตรฐานแล้ว ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการสุ่มตัวแปร  $(Z_G, Z_T)$  ที่มีความสัมพันธ์กันกลับมาโดยอาศัยกล่องเครื่องมือรูปแบบคอปูลาใน MATLAB ชื่อ “copularnd” ซึ่งจะให้ค่าตัวแปร  $(u, v)$  ออกมาก่อน ส่วนค่าตัวแปรสุ่ม  $Z_G$  และ  $Z_T$  นั้นสามารถหาได้โดยทำการแปลงผ่านฟังก์ชันผกผันของการแจกแจงสะสมแบบปกติมาตรฐาน (Inverse Standard Normal cdf) ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ใช้กล่องเครื่องมือ “icdf” ของโปรแกรม MATLAB เพื่อหาการแจกแจงของตัวแปรสุ่ม  $Z_G$  และ  $Z_T$  ดังสมการต่อไปนี้

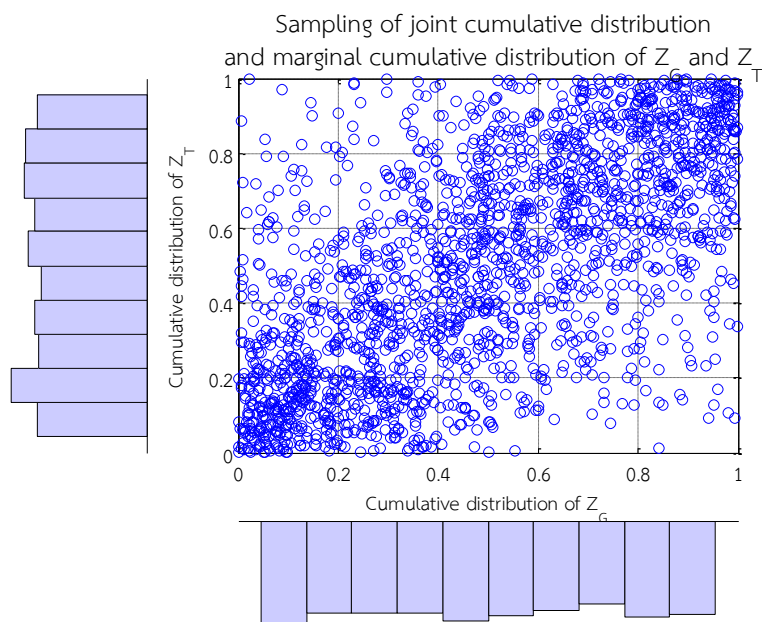
$$Z_G = \Phi^{-1}(u) \quad (4.26)$$

$$Z_T = \Phi^{-1}(v) \quad (4.27)$$

ตัวอย่างเช่น ภาพที่ 4.5 แสดงการกระจายของคู่อันดับและการแจกแจงสะสมของการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ในฤดูร้อน ณ ช่วงเวลา 7.00-8.00 น. ซึ่งมีการกระจายที่สามารถใช้คอปูลาประเภท Frank มาจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ณ ช่วงเวลานี้ได้ และภาพที่ 4.6 แสดงการกระจายของคู่อันดับของการแจกแจงสะสมของตัวแปรสุ่ม  $Z_G$  (แกน X) และ  $Z_T$  (แกน Y) ที่ได้จากการสุ่มในช่วงเวลาเดียวกันโดยใช้คอปูลาประเภท Frank



ภาพที่ 4.5 การกระจายตัวของคู่อันดับการแจกแจงสะสมและการแจกแจงสะสมการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ช่วงเวลา 7.00-8.00 น. ในฤดูร้อน



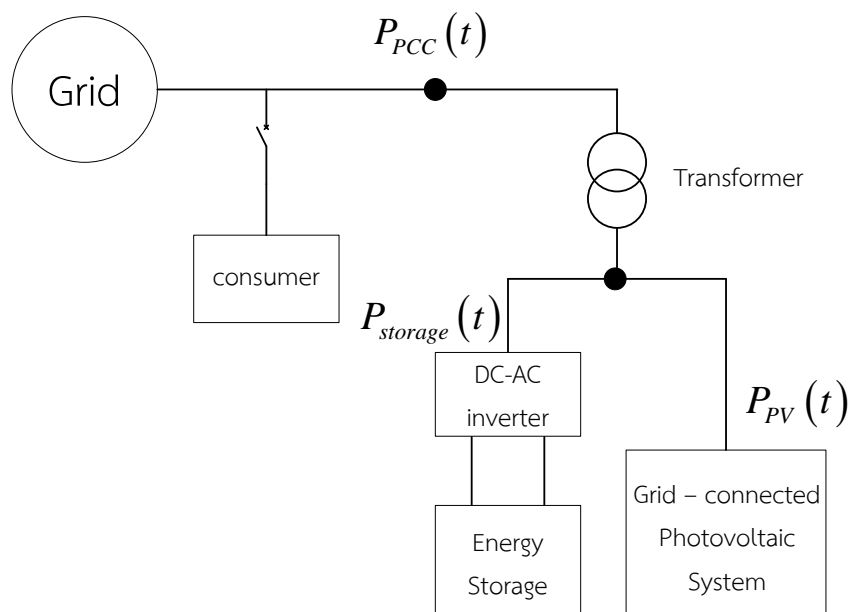
ภาพที่ 4.6 การกระจายตัวของคู่อันดับการแจกแจงและการแจกแจงสะสมของตัวแปรสุ่ม  $Z_G$  และ  $Z_T$  ที่ได้จากการสุ่ม โดยคอปูลาประเภท Frank ช่วงเวลา 7.00-8.00 น. ในฤดูร้อน

## บทที่ 5 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแบตเตอรี่ และวิธีการหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่

ในบทนี้จะกล่าวถึงความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานในรูปแบบต่างๆ จากนั้นจึงกล่าวถึงแบตเตอรี่ซึ่งเป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ โดยจะกล่าวถึงคุณสมบัติของแบตเตอรี่ ชนิดของแบตเตอรี่ การต่อชุดแบตเตอรี่ แบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วซึ่งเป็นแบตเตอรี่ชนิดที่ถูกเลือกมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ และรวมถึงวิธีการหาขนาดแบตเตอรี่

### 5.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน

เนื่องจากพลังงานที่ได้จากการใช้พลังงานหมุนเวียน โดยเฉพาะพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ในการผลิตไฟฟ้านั้นจะมีค่าไม่คงที่ จึงต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเพื่อช่วยให้งำลังการผลิตเพียงพอต่อความต้องการของโหลด ซึ่งอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจะต่อขนานอยู่กับแหล่งพลังงานหมุนเวียน และเชื่อมต่อกับโครงข่ายผ่านหม้อแปลงดังภาพที่ 5.1 [51],[52]



ภาพที่ 5.1 ภาพร่างอุปกรณ์กักเก็บพลังงานในระบบไฟฟ้า

อุปกรณ์กักเก็บพลังงานสามารถจำแนกออกได้เป็นหลายชนิดตามลักษณะหรือรูปแบบของพลังงานที่เก็บสะสม โดยสามารถยกตัวอย่างได้ดังนี้ [53]

### 5.1.1 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ถือเป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานในรูปแบบไฟฟ้าเคมีที่เป็นที่นิยมและมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยทั่วไป แบตเตอรี่จะมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานด้านเดียวประมาณ 85%-90% และแบตเตอรี่สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ชนิดตามความสามารถในการแปลงพลังงาน ดังนี้

#### 5.1.1.1 แบตเตอรี่ปฐมภูมิ (Primary Battery)

แบตเตอรี่ชนิดนี้จะแปลงพลังงานเคมีในแบตเตอรี่เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งปฏิกิริยาทางเคมีนี้ไม่สามารถเกิดย้อนกลับได้ ดังนั้นเมื่อแบตเตอรี่คายประจุออกหมดแล้ว แบตเตอรี่ก็จะนำไปใช้งานไม่ได้ อีก แต่ด้วยความสามารถในการกักเก็บพลังงานได้ปริมาณมาก (พลังงานจำเพาะสูง) และมีการรั่วไหลของประจุน้อย ดังนั้นแบตเตอรี่ชนิดนี้จึงนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องการพลังงานสูง และพร้อมใช้งานตลอดเวลา (Readiness)

#### 5.1.1.2 แบตเตอรี่ทุติยภูมิ (Secondary Battery)

แบตเตอรี่ชนิดนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แบตเตอรี่ที่สามารถอัดประจุไฟใหม่ได้ เพราะปฏิกิริยาเคมีในแบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถเกิดย้อนกลับได้ กล่าวคือ หลังจากแบตเตอรี่คายประจุออกไปหมดแล้ว แบตเตอรี่สามารถอัดประจุกลับซ้ำใหม่อีกครั้งโดยการจ่ายกระแสตรงจากแหล่งจ่ายภายนอกเข้าแบตเตอรี่ ซึ่งแบตเตอรี่จะแปลงพลังงานไฟฟ้ากลับเป็นพลังงานเคมี ในกลับกันขณะที่เกิดการคายประจุ แบตเตอรี่จะแปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า ช่วงเวลาที่แบตเตอรี่อัดประจุหรือคายประจุนั้นจะมีพลังงานเล็กน้อยที่แปลงไปเป็นความร้อน ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานไปกลับลดลงอยู่ที่ประมาณร้อยละ 70-80

ในแบตเตอรี่ 1 ตัว จะประกอบไปด้วยเซลล์เคมีไฟฟ้าจำนวนมากต่อแบบอนุกรมผสมกับแบบขนานเพื่อให้ได้แรงดันและกระแสตามที่ต้องการ ค่าพิกัดของแบตเตอรี่จะบอกในรูปของแรงดันเฉลี่ยเมื่อแบตเตอรี่คายประจุ และความจุในหน่วยแอมแปร์-ชั่วโมงที่แบตเตอรี่จ่ายได้ก่อนที่แรงดันจะตกลงถึงค่าที่จำกัดไว้ ผลคูณของแรงดันและความจุดังกล่าวจะอยู่ในรูปของค่าพิกัดพลังงาน มีหน่วยเป็นวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายออกสู่โหลดได้จากสถานะที่แบตเตอรี่อัดประจุเต็ม ดัชนีชี้วัดที่แสดงถึงความสามารถในการคายประจุของแบตเตอรี่คือ สถานะการอัด / คายประจุ (State-Of-Charge; SOC) ซึ่งนิยามได้ดังสมการที่ (5.1) ดังนี้

$$SOC = \frac{\text{ความจุของแบตเตอรี่ในหน่วยแอมแปร์-ชั่วโมงที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่ ณ เวลาช่วงเวลานั้น}}{\text{ค่าพิกัดความจุของแบตเตอรี่ในหน่วยแอมแปร์-ชั่วโมง}} \quad (5.1)$$

### 5.1.2 ล้อช่วยแรง

อุปกรณ์กักเก็บพลังงานชนิดนี้จะเก็บพลังงานไว้ในรูปของพลังงานจลน์ โดยพลังงานที่สะสมในล้อช่วยแรงนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.2)

$$E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (5.2)$$

เมื่อ

$J$	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยซึ่งแปรผันตามมวลและรัศมีของวงล้อ
$\omega$	คือ	ความเร็วเชิงมุมของการหมุนของวงล้อ

ล้อช่วยแรงดังกล่าวนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ล้อช่วยแรงแนวแกนตั้ง และล้อช่วยแรงแนวแกนนอน แต่เนื่องจากการหมุนในแนวแกนตั้ง สามารถสร้างปริมาณพลังงานจลน์ได้มากกว่าชนิดแกนนอน จึงทำให้เกิดการนำล้อช่วยแรงชนิดแนวแกนตั้งไปประยุกต์ใช้เพื่อตอบสนองความต้องการในการบริโภคพลังงานมากกว่าชนิดแกนนอน

### 5.1.3 การอัดอากาศ (Compressed Air Storage)

อุปกรณ์กักเก็บพลังงานชนิดนี้จะเก็บพลังงานในรูปของพลังงานนิวเมติก (Pneumatic Energy) โดยการอัดอากาศลงในถังขนาดใหญ่ใต้พื้นดิน โครงสร้างของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานชนิดนี้จะประกอบไปด้วย มอเตอร์อัดอากาศ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ชุดกังหัน เครื่องกู้สภาพ (Recuperator) และถังขนาดใหญ่ใต้ดิน ซึ่งหลักการทำงานของอุปกรณ์ชนิดนี้ คือ การนำพลังงานไฟฟ้าที่เหลือใช้จากการบริโภคช่วงเวลาไหลต่ำมาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์อัดอากาศ เพื่ออัดอากาศด้วยความดันสูงลงสู่ถังใต้พื้นดิน เมื่ออากาศถูกอัดด้วยแรงดันสูงจึงทำให้อุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น ถ้าต้องการนำเอาอากาศร้อนที่สะสมอยู่มาใช้ ก็สามารถทำได้โดยการอุ่นอากาศด้วยเครื่องกู้สภาพและนำขึ้นสู่พื้นดินด้วยเครื่องอัดไอ อากาศร้อนจะถูกนำมาเจอกับน้ำมันหรือแก๊สเพื่อทำให้เกิดการจุดติดไฟที่ง่ายขึ้น ซึ่งความร้อนที่ได้จากกระบวนการดังกล่าว จะถูกนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้ในช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้ไหลต่ำสูง

### 5.1.4 ระบบสูบน้ำกลับ (Pumped Storage)

ระบบสูบน้ำกลับนี้จะกักเก็บพลังงานไว้ในรูปของพลังงานศักย์ โดยการนำพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลาที่ความต้องการใช้ไฟฟ้าต่ำมาใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อสูบน้ำในอ่างเก็บน้ำไปเก็บไว้บนบริเวณที่สูงกว่า จึงทำให้เกิดการสะสมพลังงานศักย์ของน้ำที่สูบขึ้นไป ในช่วงเวลาที่ความต้องการใช้ไฟฟ้าสูง

อ่างเก็บน้ำจะปล่อยน้ำที่เก็บไว้ลงมาผ่านกังหันและส่งกำลังผ่านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นพลังงานไฟฟ้าแล้วจ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าต่อไป

วิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานสำหรับทำงานร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับโครงข่าย เนื่องจากแบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่ใช้งานอย่างแพร่หลาย มีบริษัทผู้ผลิตหลายราย จึงสามารถเลือกชนิดและรุ่นของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมกับการใช้งานได้รวมถึงมีราคาไม่สูงมากนัก อีกทั้งยังมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ซับซ้อนจนเกินไป และสามารถพัฒนาโปรแกรมคำนวณสถานะการทำงานร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ได้

## 5.2 คุณสมบัติของแบตเตอรี่

โดยทั่วไปสามารถจำแนกแบตเตอรี่ได้ด้วยคุณสมบัติหลายประการ เช่น คุณสมบัติทางเคมี, แรงดัน, ความจุของแบตเตอรี่, พลังงานจำเพาะ, กำลังจำเพาะ (กำลังที่จ่ายออกไปจากแบตเตอรี่) เป็นต้น แบตเตอรี่ต่างชนิดกันก็จะมีคุณสมบัติเหล่านี้แตกต่างกันด้วย [54]

### 5.2.1 คุณสมบัติทางเคมี

วัสดุทางเคมีที่ใช้ทำแบตเตอรี่มีหลายชนิด แต่ชนิดที่เป็นที่รู้จักกันแพร่หลาย ได้แก่ ตะกั่ว, นิกเกิล และลิเทียม ซึ่งความแตกต่างของวัสดุทางเคมีนี้เอง ทำให้ลักษณะคุณสมบัติของแบตเตอรี่มีความแตกต่างกันไปรวมถึงวิธีการอัดประจุด้วย

### 5.2.2 แรงดัน

แรงดันในที่นี้หมายถึงแรงดันที่ขั้วของแบตเตอรี่ (Terminal Battery Voltage) ซึ่งค่าแรงดันนี้จะแปรตามวัสดุทางเคมีที่ใช้ทำแบตเตอรี่และจำนวนของเซลล์แบตเตอรี่ที่นำมาต่ออนุกรมกัน โดยแรงดันที่ขั้วขณะเปิดวงจรจะมีค่าสูงกว่าแรงดันที่ระบุ (Nominal Battery Voltage) เล็กน้อย ส่วนแรงดันที่ขั้วขณะต่อโหลดหรืออัดประจุ จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามสถานะการใช้งาน ณ ขณะนั้น

### 5.2.3 ความจุของแบตเตอรี่

ความจุของแบตเตอรี่ (Capacity) แสดงถึงค่าจำนวนประจุในหน่วยแอมแปร์-ชั่วโมง (Ampere-hour; Ah) โดยทั่วไปผู้ผลิตแบตเตอรี่จะกำหนดค่าความจุแบตเตอรี่สูงกว่าขนาดที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายพลังงานได้ แบตเตอรี่ที่บอกค่าพิกัดความจุของแบตเตอรี่ค่าหนึ่งสามารถถูกใช้ในงานที่ต้องการความจุของแบตเตอรี่แตกต่างกันไปจากพิกัดนั้นได้ แต่ต้องไม่เกินค่าพิกัดความจุของแบตเตอรี่ลูกนั้น และต้องเข้ากับแรงดันที่ถูกต้องตามที่แบตเตอรี่ลูกนั้นกำหนด

#### 5.2.4 พลังงานจำเพาะและความหนาแน่นพลังงาน

พลังงานจำเพาะ (Specific Energy) หมายถึง ความสามารถในการจ่ายพลังงานของแบตเตอรี่ต่อหน่วยน้ำหนักของแบตเตอรี่ มีหน่วยเป็น วัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม (Wh/kg) ส่วนความหนาแน่นของพลังงาน (Energy Density) หมายถึง ความสามารถในการจ่ายพลังงานของแบตเตอรี่ต่อหน่วยปริมาตรของแบตเตอรี่ มีหน่วยเป็น วัตต์-ชั่วโมงต่อลิตร (Wh/l) แบตเตอรี่ที่มีพลังงานจำเพาะหรือความหนาแน่นพลังงานสูงจะใช้ระยะเวลาในการคายประจุจนหมด ดังนั้นพลังงานจำเพาะหรือความหนาแน่นพลังงานจึงมีความหมายเปรียบเสมือนความจุของแบตเตอรี่

#### 5.2.5 กำลังจำเพาะ

กำลังจำเพาะ (Specific power) หมายถึง ความสามารถในการจ่ายโหลด หรือปริมาณกระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้ ซึ่งแสดงถึงค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ กล่าวคือ หากกำลังจำเพาะสูง ค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่จะมีค่าน้อย แต่ในทางตรงกันข้าม หากกำลังจำเพาะต่ำ ค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่จะมีค่ามากด้วย

#### 5.2.6 ซี - เรต (C - rate)

ซี-เรตเป็นค่าที่บอกอัตราส่วนระหว่างกระแสคายประจุเทียบกับขนาดความจุของแบตเตอรี่ ตัวอย่างเช่น การคายประจุที่ 1C คือ แบตเตอรี่จ่ายกระแสคายประจุในปริมาณที่เท่ากับค่าพิคัดความจุของแบตเตอรี่ได้นานติดต่อกันได้ 1 ชั่วโมงจนประจุหมด หรือการคายประจุที่ 0.5C คือ แบตเตอรี่จะจ่ายกระแสลดลงครึ่งหนึ่งเป็นเวลา 2 ชั่วโมงจนประจุหมด เป็นต้น ในขณะที่ถ้าเป็นการอัดประจุแล้ว 1C จะหมายถึง แบตเตอรี่จะถูกอัดประจุเต็มได้ภายใน 1 ชั่วโมง และ 0.5C หมายถึง การอัดประจุจนเต็มจะต้องใช้เวลา 2 ชั่วโมง เป็นต้น

### 5.3 ชนิดของแบตเตอรี่

โดยทั่วไปแบตเตอรี่สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ แบตเตอรี่ชนิดอัดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ และแบตเตอรี่ชนิดอัดประจุไฟฟ้าใหม่ไม่ได้ ในวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาเฉพาะแบตเตอรี่ชนิดอัดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ เนื่องจากแบตเตอรี่ที่ใช้ในการลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและความถี่จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นต้องทำหน้าที่ที่รับและจ่ายพลังงานได้ โดยแบตเตอรี่ชนิดอัดประจุไฟฟ้าใหม่ได้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามชนิดของวัสดุทางเคมีได้ดังนี้ [54]



### 5.3.1 แบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว (Lead-acid Battery)

แบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วนี้เป็นแบตเตอรี่แบบอัดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ชนิดแรกที่ถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ และเนื่องด้วยแบตเตอรี่ชนิดนี้มีการพัฒนามาก่อนแบตเตอรี่ชนิดอื่น ดังนั้นจึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน และอีกสาเหตุที่ทำให้แบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้คือ มีราคาต่อวัตต์-ชั่วโมงต่ำ และมีกำลังจำเพาะสูง แม้ว่าแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วนี้จะมีความหนาแน่นของพลังงานต่อน้ำหนักและพลังงานต่อปริมาตรของแบตเตอรี่ต่ำก็ตาม

### 5.3.2 แบตเตอรี่ชนิดที่ใช้ निकิลเป็นวัสดุ (Nickel-based Batteries)

แบตเตอรี่ชนิดนี้ประกอบไปด้วย 2 ชนิดหลักได้แก่ ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม (Nickel-Cadmium Battery: NiCd) และชนิดนิกเกิล-โลหะไฮไดรด์ (Nickel-Metal Hydride Battery: NiMH) ดังนี้

#### 5.3.2.1 แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม (Nickel-Cadmium Battery; NiCd)

แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียมนี้มีข้อได้เปรียบเหนือแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดหลายประการ เช่น น้ำหนักเบากว่า มีรอบการคายประจุลึกมากกว่า และสามารถทนอุณหภูมิสูงได้มากกว่า เป็นต้น จึงมีการนำแบตเตอรี่ชนิดนี้ไปใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น อุปกรณ์ทางการแพทย์ กล้องวิดีโอ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม วัสดุที่ใช้มีราคาแพง และสารแคดเมียมมีมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ แบตเตอรี่ชนิดนี้ยังมีปัญหาเกี่ยวกับ ผลกระทบทางความจำ (Memory effect) กล่าวคือ เมื่อแบตเตอรี่ถูกใช้ประจุไฟฟ้าจนกระทั่งแรงดันที่ขั้วลดลงจนถึงค่าหนึ่ง แล้วไม่ได้ใช้เป็นระยะเวลาเวลานาน จะทำให้แบตเตอรี่จำแรงดันค่านั้นเป็นแรงดันสูงสุดแทน และเปลี่ยนคุณสมบัติเหมือนแรงดัน ณ จุดนั้นเป็นค่าแรงดันขณะที่ยังอัดประจุเต็ม ส่งผลให้ความจุของแบตเตอรี่มีค่าลดลงตามไปด้วย ดังนั้นการใช้แบตเตอรี่ชนิดนี้จะต้องมีควบคุมการอัดและคายประจุที่เหมาะสมเพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

#### 5.3.2.2 แบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-โลหะไฮไดรด์ (Nickel-Metal Hydride battery; NiMH)

แบตเตอรี่ชนิดนี้ถูกพัฒนาต่อจากแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม ซึ่งเพิ่มความหนาแน่นของพลังงานในแบตเตอรี่ และขั้วแอโนดที่ใช้โลหะไฮไดรด์แทนแคดเมียมยังช่วยลดปัญหาสารพิษปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมอีกด้วย นอกจากนี้แบตเตอรี่ชนิดนี้ยังมีข้อได้เปรียบแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียมตรงที่สามารถลดปัญหาเกี่ยวกับผลกระทบทางความจำได้ แบตเตอรี่ชนิดนี้จึงถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในรถยนต์ประเภทไฮบริดจ์ อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของแบตเตอรี่ชนิดนี้ คือ ความสามารถในการ

การจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าน้อย, อัตราการคายประจุเอง (self-discharge) ที่สูง, ไวต่อความเสียหายเมื่ออัดประจุมากเกินไป และยังมีราคาแพงเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม

### 5.3.3 แบตเตอรี่ชนิดที่ใช้ลิเทียมเป็นวัสดุ (Lithium-based Batteries)

แบตเตอรี่ชนิดนี้ประกอบไปด้วย 2 ชนิดหลักได้แก่ ชนิดลิเทียม-ไอออน (Lithium-Ion Battery; Li-ion) และชนิดลิเทียม-โพลีเมอร์ (Lithium-Polymer Battery; Li-poly) ดังนี้

#### 5.3.3.1 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-ไอออน (Lithium-Ion Battery; Li-ion)

แบตเตอรี่ชนิดนี้มีความหนาแน่นของพลังงานมากกว่าแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดถึง 3 เท่า และยังมีค่าแรงดันที่สูงถึง 3.5 โวลต์ต่อเซลล์ ดังนั้นในการติดตั้งแบตเตอรี่ชนิดนี้จึงใช้จำนวนแบตเตอรี่น้อยในการต่ออนุกรมเพื่อให้ได้แรงดันตามที่ต้องการ แต่แบตเตอรี่ชนิดนี้ต้องใช้แผ่นขั้วไฟฟ้าที่มีความหนา ทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตโดยรวมมีค่าสูง นอกจากนี้แบตเตอรี่ชนิดนี้ยังไวต่อความเสียหายถ้ามีการอัดประจุที่มากเกินไปอีกด้วย

#### 5.3.3.2 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียม-โพลีเมอร์ (Lithium-Polymer battery)

แบตเตอรี่ชนิดนี้มีลิเทียมเป็นขั้วไฟฟ้าและนำโพลีเมอร์ที่อยู่ในรูปของแข็งมาทำเป็นอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งอิเล็กโทรไลต์ดังกล่าวนี้จะช่วยเพิ่มค่าพลังงานจำเพาะให้แก่เซลล์ของแบตเตอรี่

จากชนิดของแบตเตอรี่ดังที่กล่าวไปข้างต้นทั้ง 3 ชนิด สามารถเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแบตเตอรี่แต่ละชนิดได้ดังนี้

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแบตเตอรี่ประเภทต่างๆ

ประเภทของแบตเตอรี่	ข้อดี	ข้อเสีย
ชนิดกรดตะกั่ว	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ราคาต่อความจุวัตต์ - ชั่วโมง มีค่าไม่สูง</li> <li>- เป็นเทคโนโลยีที่รู้จักแพร่หลาย มีหลากหลายขนาดและบริษัทผู้ผลิต</li> <li>- มีอัตราการคายประจุตัวเองต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่น</li> <li>- กำลังจำเพาะสูง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีพลังงานจำเพาะต่ำ</li> <li>- ใช้เวลานานในการอัดประจุให้เต็ม</li> <li>- มีจำนวนรอบการอัดและคายประจุจำกัด</li> </ul>

ประเภทของแบตเตอรี่	ข้อดี	ข้อเสีย
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงและต่ำได้ โดยที่ประสิทธิภาพการอัด / คายประจุยังคงดีอยู่</li> </ul>	
ชนิดใช้นิกเกิลเป็นวัสดุ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้เวลาในการอัดประจุเต็ม น้อย ถึงแม้ว่าจะไม่ใช่แบตเตอรี่เป็นเวลานาน</li> <li>- มีจำนวนวัฏจักรการอัดและคายประจุสูง</li> <li>- มีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนาน และสามารถเก็บไว้ในสภาวะที่แบตเตอรี่คายประจุหมดได้</li> <li>- มีให้เลือกหลากหลายขนาดและประสิทธิภาพ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีค่าพลังงานจำเพาะต่ำ</li> <li>- มีผลจากภาวะผลกระทบทางความจำ</li> <li>- มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ถ้าใช้แคดเมียมเป็นส่วนประกอบ</li> <li>- มีอัตราการคายประจุเองสูง</li> <li>- เกิดความร้อนเมื่ออัดประจุอย่างรวดเร็ว และคายประจุค่าสูง</li> </ul>
ชนิดใช้ลิเทียมเป็นวัสดุ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ความหนาแน่นของพลังงานมีค่าสูง</li> <li>- มีอัตราการคายประจุเองต่ำเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดที่ใช้นิกเกิลเป็นวัสดุ</li> <li>- ไม่ต้องบำรุงรักษาบ่อย</li> <li>- ไม่มีผลของผลกระทบทางความจำ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องใช้วงจรการป้องกันเพื่อจำกัดแรงดันและกระแส</li> </ul>

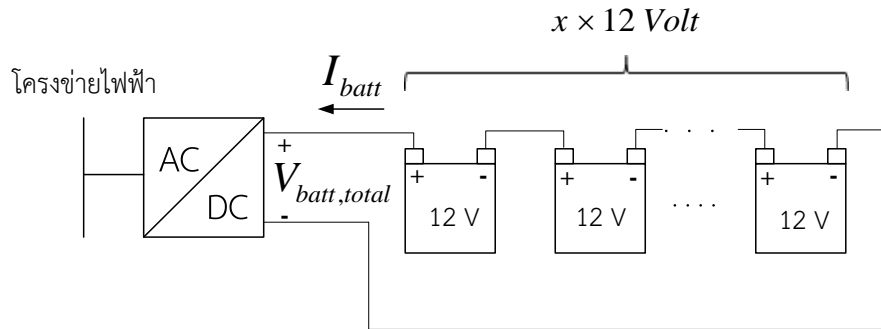
## 5.4 การต่อชุดแบตเตอรี่

การต่อชุดแบตเตอรี่ หมายถึง การต่อแบตเตอรี่ในการใช้งานเพื่อให้ได้แรงดันและความจุของแบตเตอรี่ตามที่ต้องการ การต่อชุดแบตเตอรี่นั้นสามารถทำได้ 3 วิธีด้วยกัน [54] ได้แก่

### 5.4.1 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรม

การต่อชุดแบตเตอรี่แบบนี้ เป็นการต่อเพื่อเพิ่มแรงดันให้เพียงพอและเหมาะสมกับการใช้งาน โดยที่ความจุของแบตเตอรี่จะมีค่าเท่าเดิม การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรมนี้ ขั้วบวกของแบตเตอรี่แต่ละตัวจะเชื่อมต่อกับขั้วลบของแบตเตอรี่ตัวถัดไป ซึ่งขนาดแรงดันที่ได้จะมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงดันของแบตเตอรี่ทุกตัวที่นำมาต่อ ตัวอย่างเช่นในภาพที่ 5.2 ถ้าแบตเตอรี่แต่ละตัวมีแรงดันขนาด 12 โวลต์ และนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมกัน  $x$  ตัว จะสามารถคำนวณแรงดันได้ตามสมการที่ (5.2)

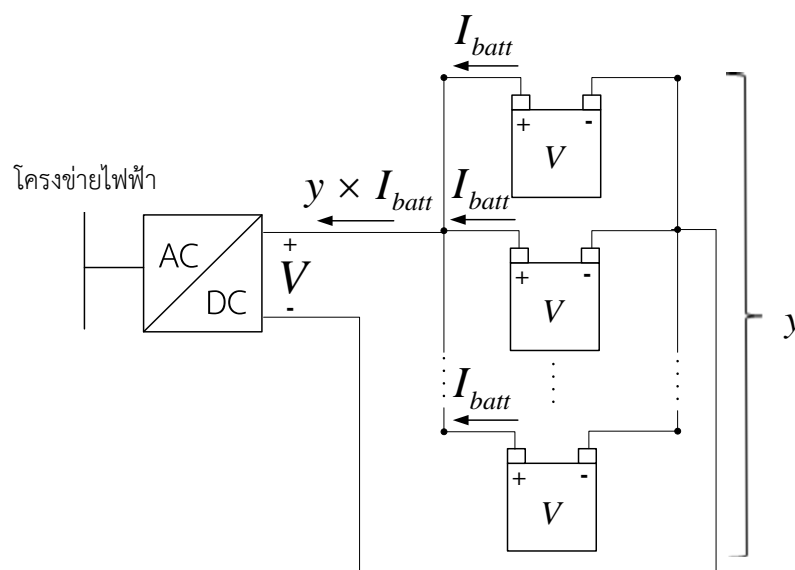
$$V_{batt,total} = x \times 12 \quad (5.2)$$



ภาพที่ 5.2 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรม

#### 5.4.2 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบขนาน

การต่อชุดแบตเตอรี่แบบขนานเป็นการต่อชุดแบตเตอรี่เพื่อเพิ่มความจุของชุดแบตเตอรี่ให้เพียงพอและเหมาะสมกับการใช้งาน หรือเพิ่มระยะเวลาที่ต้องการสำรองไฟฟ้าไว้ใช้งาน โดยที่แรงดันยังมีขนาดเท่าเดิม การต่อชุดแบตเตอรี่แบบนี้ขั้วบวกของแบตเตอรี่แต่ละตัวจะต่อขนานกับขั้วบวกของแบตเตอรี่ตัวถัดไป และขั้วลบของแบตเตอรี่แต่ละตัวก็จะต่อขนานกับขั้วลบของแบตเตอรี่ตัวถัดไป ความจุของชุดแบตเตอรี่จะมีค่าเท่ากับผลรวมของความจุของแบตเตอรี่แต่ละตัวที่นำมาต่อตัวอย่างเช่นในภาพที่ 5.3 ถ้าแบตเตอรี่แต่ละตัวมีขนาดความจุ 260 แอมแปร์-ชั่วโมง และนำแบตเตอรี่มาต่อขนานกัน  $y$  ตัว จะคำนวณความจุแบตเตอรี่รวมได้ตามสมการที่ (5.3)

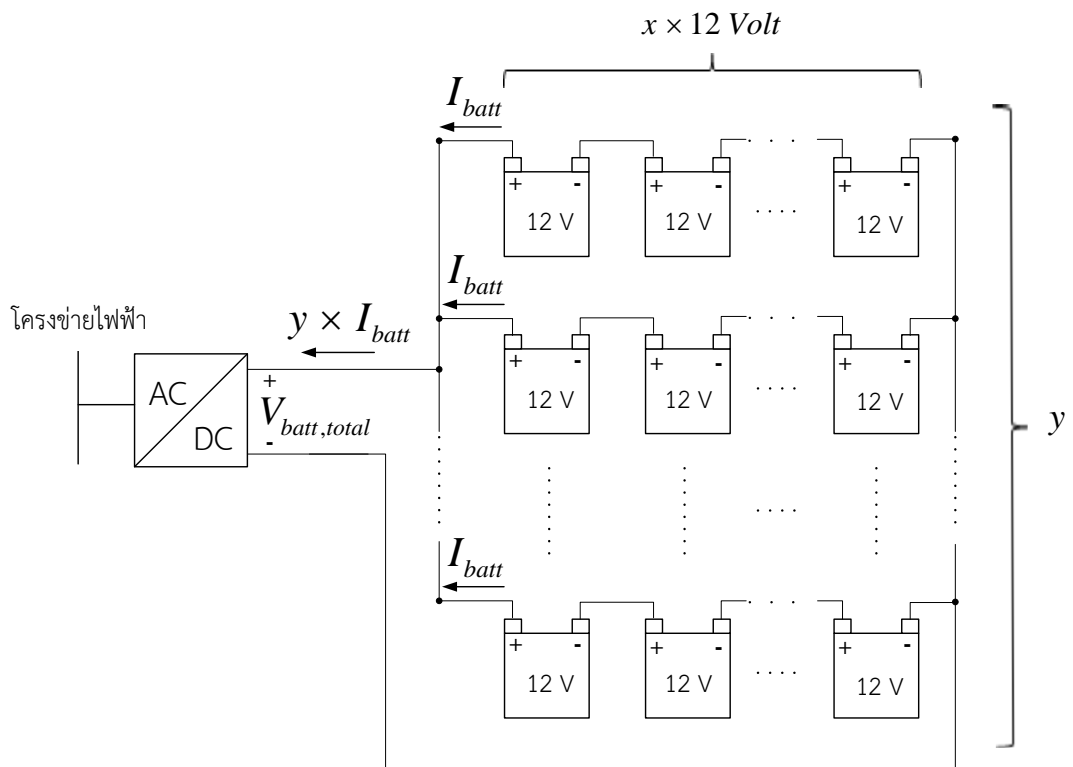


ภาพที่ 5.3 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบขนาน

$$C_{batt,total} = y \times 260 \quad (5.3)$$

### 5.4.3 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบผสม

การต่อชุดแบตเตอรี่แบบผสมเป็นการต่อเพื่อเพิ่มแรงดันและความจุของชุดแบตเตอรี่ให้เพียงพอและเหมาะสมกับการใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น การต่อชุดแบตเตอรี่แบบต่ออนุกรมจะต้องมีแรงดันรวมไม่เกินพิกัดของเครื่องควบคุมการประจุ และควรจะมีการต่อชุดแบตเตอรี่แบบขนานไม่ให้เกิดกระแสรวมเกินพิกัดของเครื่องควบคุมการอัดประจุ เป็นต้น การต่อชุดแบตเตอรี่แบบผสมนี้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.4 โดยแรงดันรวมของชุดแบตเตอรี่จะมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงดันของแบตเตอรี่ทุกตัวที่นำมาต่ออนุกรม และความจุแอมแปร์-ชั่วโมงของชุดแบตเตอรี่จะมีค่าเท่ากับผลรวมของความจุของแบตเตอรี่แต่ละตัวที่นำมาต่อขนาน



ภาพที่ 5.4 การต่อชุดแบตเตอรี่แบบผสม

### 5.5 แบบจำลองแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว

วิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นแบตเตอรี่ที่มีราคาถูก มีบริษัทผู้ผลิตหลายราย จึงมีหลายขนาดและหลายชนิดให้เลือกใช้งานได้ตรงตามความต้องการ อีกทั้งแบตเตอรี่ชนิดนี้ยังมีความทนทานและไม่ต้องการการบำรุงรักษามากด้วย ในส่วนนี้จะ

กล่าวถึงแบบจำลองของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วโดยใช้แบบจำลองเชิงพลวัตของแบตเตอรี่ชนิด Electrochemical-based [55] มาใช้ในการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอนี้ กำหนดให้แรงดันขั้วของแบตเตอรี่ ( $V_{batt}$ ) ทำหน้าที่เป็นตัวแทนของพฤติกรรมทางไฟฟ้าเคมีของแบตเตอรี่ที่เป็นผลมาจากสถานะของประจุ รวมถึงขนาดและทิศทางกรไหลของกระแสของแบตเตอรี่ ดังนั้นสมการทางคณิตศาสตร์ของขนาดแรงดันขั้วของแบตเตอรี่ จึงสามารถแบ่งออกเป็น 2 สถานะ กล่าวคือ สถานะคายประจุ และสถานะอัดประจุ ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

- ช่วงการคายประจุ

$$V_{batt,dch} = E_0 - Ri - K \frac{Q}{Q - it} i^* - K \frac{Q}{Q - it} it + Exp(t) \quad (5.4)$$

- ช่วงการอัดประจุ

$$V_{batt,ch} = E_0 - Ri - K \frac{Q}{it + 0.1 * Q} i^* - K \frac{Q}{Q - it} it + Exp(t) \quad (5.5)$$

เมื่อ

$V_{batt,dch}$	คือ	ขนาดแรงดันขั้วแบตเตอรี่ในสถานะคายประจุ (V)
$V_{batt,ch}$	คือ	ขนาดแรงดันขั้วแบตเตอรี่ในสถานะอัดประจุ (V)
$E_0$	คือ	แรงดันส่วนที่คงที่ของแบตเตอรี่ (V)
$R$	คือ	ความต้านทานภายในแบตเตอรี่ (Ohm)
$K$	คือ	ความต้านทานโพลาริเซชัน (Ohm) หรือค่าคงที่โพลาริเซชัน (V/Ah)
$Q$	คือ	ความจุของแบตเตอรี่ขนาดมาตรฐาน 1 ลูก (Ah)
$i$	คือ	กระแสของแบตเตอรี่ (A)
$i^*$	คือ	กระแสผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (A)

ประจุของแบตเตอรี่ที่ถูกใช้ไป ( $it$ ) ทำหน้าที่เป็นตัวระบุปริมาณของประจุในหน่วยแอมแปร์-ชั่วโมง (Ah) ที่แบตเตอรี่ใช้ในการจ่ายให้กับโหลดตลอดช่วงเวลาที่พิจารณา ( $t$ ) ดังนั้นประจุของแบตเตอรี่ที่ถูกใช้ไปนี้จึงสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$it = \int_0^t idt \quad (5.6)$$

ส่วน  $Exp(t)$  คือพจน์ที่แทนปรากฏการณ์ฮิสเทอรีซิสของแบตเตอรี่ สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\frac{dExp(t)}{dt} = B \cdot |i(t)| \cdot (-Exp(t) + A \cdot u(t)) \quad (5.7)$$

เมื่อ

$A$	คือ	แอมพลิจูดของย่านเอกซ์โพเนนเชียล (V)
$B$	คือ	ค่าคงที่ทางเวลาผกผันของย่านเอกซ์โพเนนเชียล ( $Ah^{-1}$ )
$u(t)$	คือ	สภาวะการคายประจุ ( $u(t) = 0$ ) หรือการอัดประจุ ( $u(t) = 1$ )

## 5.6 การคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่

ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ไม่มีความแน่นอนในการผลิตพลังงานเนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ขึ้นปัจจัยสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ความไม่แน่นอนนี้ทำให้เกิดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้า และความถี่ของระบบไฟฟ้าได้ ซึ่งการติดตั้งแบตเตอรี่เข้ากับระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์จะช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว โดยแบตเตอรี่จะพยายามชดเชยกำลังไฟฟ้าให้ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานได้สม่ำเสมอและทำให้ระบบผลิตไฟฟ้ามีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับระบบผลิตไฟฟ้าแบบดั้งเดิม

เพื่อแก้ปัญหการแกว่งของกำลังไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ การเลือกขนาดของแบตเตอรี่จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา เนื่องจากถ้าเลือกขนาดแบตเตอรี่ที่ใช้ติดตั้งขนาดใหญ่มากจะส่งผลให้มูลค่าการลงทุนระบบผลิตไฟฟ้าสูงเกินไปถึงแม้ว่าแบตเตอรี่จะช่วยลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี แต่หากเลือกขนาดของแบตเตอรี่ที่ใช้ติดตั้งเล็กเกินไป ก็อาจทำให้แบตเตอรี่ไม่สามารถกักเก็บหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่สามารถแก้ปัญหการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้ตามต้องการ จากที่กล่าวข้างต้นจึงมีความจำเป็นต้องเลือกขนาดแบตเตอรี่เพื่อใช้ติดตั้งในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีความเหมาะสม

### 5.6.1 การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ต้องการให้ระบบแบตเตอรี่รับหรือจ่าย

การคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่เริ่มต้นจากการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ต้องการให้แบตเตอรี่รับหรือจ่าย ( $P_{batt}$ ) ในแต่ละช่วงเวลาก่อน โดยสามารถกำหนดได้จากกำลังไฟฟารวมที่ต้องการให้ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้า ( $P_{set}$ ) และกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ขณะนั้น ( $P_{PV}$ ) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$P_{batt} = P_{set} - P_{PV} \quad (5.8)$$

จากสมการข้างต้น ในช่วงเวลาที่  $P_{batt} > 0$  แสดงว่าระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้น้อยกว่าที่ต้องการดังนั้นแบตเตอรี่จึงต้องช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าชดเชยให้กำลังไฟฟารวมมีค่าเท่ากับค่าที่กำหนด และในทางตรงกันข้าม เมื่อ  $P_{batt} < 0$  แสดงว่าแบตเตอรี่ต้องช่วยรับ

กำลังไฟฟ้าส่วนเกินจากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ เพื่อให้กำลังไฟฟ้ามามีค่าเท่ากับค่าที่กำหนดเช่นกัน

## 5.6.2 การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ต้องการให้ชุดแบตเตอรี่รับหรือจ่าย

เนื่องจากชุดแบตเตอรี่ (Battery Bank) รับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยไฟฟ้ากระแสตรง ในขณะที่ระบบไฟฟ้าส่วนที่เหลือเป็นระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้น หากต้องการให้ชุดแบตเตอรี่รับกำลังไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าหรืออัดประจุ จึงจำเป็นต้องแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสสลับจากระบบไฟฟ้าให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยคอนเวอร์เตอร์ แล้วจึงอัดประจุให้กับชุดแบตเตอรี่ และในทำนองเดียวกัน หากต้องการให้ชุดแบตเตอรี่จ่ายกำลังไฟฟ้าสู่ระบบไฟฟ้าหรือคายประจุ จึงจำเป็นต้องแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้วยอินเวอร์เตอร์ แล้วจึงจ่ายกำลังให้กับระบบไฟฟ้าต่อไป วิทยานิพนธ์นี้ นำแบบจำลองพลวัตของอินเวอร์เตอร์ NPC มาควบคุมการรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ โดยทำการจัดรูปสมการสถานะของแบตเตอรี่และอินเวอร์เตอร์ให้อยู่ในรูปของสมการสถานะสำหรับประยุกต์ใช้กับ ODE23 solver ในโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณสภาวะการทำงานของระบบแบตเตอรี่ต่อไป โดยสมการสถานะทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังนี้

### 5.6.2.1 สมการสถานะของแบตเตอรี่

ปริมาณประจุที่แบตเตอรี่รับหรือจ่าย ( $Q_i$ ) ในช่วงที่พิจารณา ( $t$ ) ในรูปของสมการสถานะแสดงได้ดังสมการที่ 5.9

$$\frac{dQ_i}{dt} = -I_{batt} \quad (5.9)$$

โดย  $Q_i > 0$  คือปริมาณประจุที่แบตเตอรี่รับ และ  $Q_i < 0$  คือปริมาณประจุที่แบตเตอรี่จ่าย และสมการสถานะของแรงดันแบตเตอรี่ในส่วนของปรากฏการณ์ฮิสเทอรีซิสแสดงได้ดังนี้

$$\frac{dExp}{dt} = B \cdot |I_{batt}| \cdot (-Exp + A \cdot u(t)) \quad (5.10)$$

โดยขนาดกระแสที่แบตเตอรี่รับหรือจ่าย ( $I_{batt}$ ) สำหรับการคำนวณหาขนาดแบตเตอรี่ในแต่ละช่วงเวลามีขนาดเท่ากับกระแสสูงสุดที่อินเวอร์เตอร์ทนได้ ( $i_{charger}^{max}$ ) สำหรับในกรณีที่ทราบการต่อชุดของแบตเตอรี่แล้ว ขนาดกระแสที่แบตเตอรี่รับหรือจ่ายจะคำนวณจากกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่รับหรือจ่ายในแต่ละช่วงเวลาดังสมการต่อไปนี้



$$I_{batt} = \begin{cases} \frac{P_{batt}}{n_p n_s V_{batt,dch}}, & P_{batt} > 0 \\ \frac{P_{batt}}{n_p n_s V_{batt,ch}}, & P_{batt} < 0 \end{cases} \quad (5.11)$$

เมื่อ

$n_p$  คือ จำนวนแถวของชุดแบตเตอรี่แบบขนาน (แถว)  
 $n_s$  คือ จำนวนแบตเตอรี่ที่นำมาต่อเป็นชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรม (ก้อน)

### 5.6.2.2 สมการสถานะของอินเวอร์เตอร์สำหรับระบบแบตเตอรี่

สมการสถานะของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับบนกรอบอ้างอิง  $dq$  ของอินเวอร์เตอร์ของระบบแบตเตอรี่ แสดงได้ดังนี้

$$\frac{di_{batt,d}}{dt} = -i_{batt,d}/\tau_i + i_{batt,d}^{ref}/\tau_i \quad (5.12)$$

$$\frac{di_{batt,q}}{dt} = -i_{batt,q}/\tau_i + i_{batt,q}^{ref}/\tau_i \quad (5.13)$$

โดย  $i_{batt,d}^{ref}$  และ  $i_{batt,q}^{ref}$  คือ สัญญาณกระแสอ้างอิงในแต่ละช่วงเวลาของการคำนวณ สามารถแสดงได้ตามสมการที่ 5.14–5.15 ตามลำดับ ซึ่งสมการกระแสอ้างอิงบนแกน  $d$  จะแปรตามกำลังไฟฟ้าที่ต้องจ่ายชดเชย ( $P_{batt}$ ) แรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม และตัวแปรสถานะ  $x_{1,batt}$  และ  $x_{2,batt}$  สำหรับกระแสอ้างอิงบนแกน  $q$  จะควบคุมให้เท่ากับศูนย์ แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$i_{batt,d}^{ref} = \alpha_2 x_{1,batt} + \alpha_1 x_{2,batt} + \frac{2 P_{batt}}{3 V_{sd}} \quad (5.14)$$

$$i_{batt,q}^{ref} = 0 \quad (5.15)$$

โดยตัวแปรสถานะ  $x_{1,batt}$  และ  $x_{2,batt}$  สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\frac{dx_{1,batt}}{dt} = x_{2,batt} \quad (5.16)$$

$$\frac{dx_{2,batt}}{dt} = -\alpha_3 x_{2,batt} - V_{DC,batt}^2 + V_{ref,batt}^2 \quad (5.17)$$

โดย  $V_{ref,batt}$  คือ แรงดันไฟตรงอ้างอิงของอินเวอร์เตอร์ของระบบแบตเตอรี่

สมการสถานะของแรงดันไฟตรงยกกำลังสอง ( $V_{DC,batt}^2$ ) สำหรับอินเวอร์เตอร์ของระบบ แบตเตอรี่ แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{dV_{DC,batt}^2}{dt} = & \frac{2}{C_{eq}} \left( P_{batt} - \frac{V_{DC,batt}^2}{R_p} \right. \\ & - \frac{3L}{2} (-i_{batt,d}/\tau_i + i_{batt,d}^{ref}/\tau_i - i_{batt,q}/\tau_i + i_{batt,q}^{ref}/\tau_i) \\ & \left. - \frac{3}{2} (i_{batt,d}^2 R + i_{batt,q}^2 R) - \frac{3}{2} (v_{sd} i_{batt,d} + v_{sq} i_{batt,q}) \right) \end{aligned} \quad (5.18)$$

เมื่อทราบกระแสฝั่งไฟฟ้ากระแสสลับแล้ว จึงสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าจริง ( $P_{batt}$ ) และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ( $Q_{batt}$ ) ที่ระบบแบตเตอรี่ต้องรับหรือจ่าย ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$P_{batt} = (3/2)(i_{sd,batt} v_{sd} + i_{sq,batt} v_{sq}) \quad (5.19)$$

$$Q_{batt} = (3/2)(i_{sd,batt} v_{sq} - i_{sq,batt} v_{sd}) \quad (5.20)$$

### 5.6.3 การคำนวณขนาดของแบตเตอรี่ในเบื้องต้น

หลังจากทราบค่ากำลังไฟฟ้าที่ต้องการให้ระบบแบตเตอรี่รับหรือจ่าย ( $P_{batt}$ ) แล้ว การกำหนดขนาดของแบตเตอรี่ที่แต่ละช่วงเวลาสามารถทำได้โดยพิจารณากำลังไฟฟ้าที่ต้องการจากแบตเตอรี่ร่วมกับกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่สามารถรับหรือจ่ายได้ในเวลาที่กำหนดดังสมการต่อไปนี้

$$Q_{opt} = \begin{cases} \frac{|P_{batt}|}{V_{batt,dch} i_{charger}^{max}} Q, & P_{batt} > 0 \\ \frac{|P_{batt}|}{V_{batt,ch} i_{charger}^{max}} Q, & P_{batt} < 0 \end{cases} \quad (5.21)$$

เมื่อ

$Q$	คือ	ขนาดของแบตเตอรี่ที่นำมาใช้ต่อชุดแบตเตอรี่ในหน่วย Wh
$i_{charger}^{max}$	คือ	กระแสสูงสุดที่เครื่องควบคุมการประจุ (Charger) ทนได้ (A)

เมื่อคำนวณขนาดของแบตเตอรี่ที่ทุกช่วงเวลาตลอดทั้งปีได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ นำขนาดแบตเตอรี่นั้นมาสร้างกราฟแจกแจงความถี่ และทำการเลือกขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่สำหรับชุดเหตุการณ์นั้น โดยกำหนดให้ขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ต้องรองรับเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของเหตุการณ์ทั้งหมด

อย่างไรก็ดี ขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมดังกล่าวเป็นเพียงคำตอบที่สอดคล้องกับข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมทั้งปีที่สุ่มได้เพียง 1 ชุดเท่านั้นซึ่งยังไม่สามารถใช้เป็นตัวแทนของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ ดังนั้นจึงนำความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยรายชั่วโมงของทั้งปีนั้น มาสร้างความสัมพันธ์ความน่าจะเป็นของข้อมูล (บทที่ 4) แล้วทำการสุ่มเหตุการณ์ทั้งปีเป็นจำนวน 1,000 ชุดแล้วนำมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ( $P_{PV}$ ) และกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ต้องรับหรือจ่าย ( $P_{batt}$ ) ใหม่ จากนั้นทำการคำนวณหาค่าขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมด้วยวิธีการเดิม เมื่อได้ค่าขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม 1,000 ค่า จึงสามารถสร้างกราฟแจกแจงความถี่ซึ่งเป็นตัวแทนของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function) ของขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมของความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมทั้งปีได้

จากฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นดังกล่าว ด้วยความเชื่อมั่น 95% จะสามารถสรุปได้ว่าขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมของข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมตลอดทั้งปีจะอยู่ในช่วงหนึ่ง ซึ่งขนาดแบตเตอรี่ดังกล่าวอาจมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับขนาดแบตเตอรี่ที่มีในท้องตลาด ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงการต่อแบตเตอรี่หลายลูกเข้าด้วยกันเป็นชุดแบตเตอรี่เพื่อให้ได้ขนาดของแบตเตอรี่ตามที่ต้องการด้วย

ในทางปฏิบัติ ความจุของแบตเตอรี่ 1 ลูกสามารถทราบได้จากเอกสารข้อมูลของแบตเตอรี่ที่ผู้ผลิตกำหนดมาให้ แต่เพื่อให้ได้แรงดันไฟตรงที่เหมาะสมสำหรับใช้งานกับอินเวอร์เตอร์จึงจำเป็นต้องพิจารณาการต่อชุดแบตเตอรี่แบบอนุกรมจนได้แรงดันที่ต้องการ และเพื่อให้ได้ความจุรวมของชุดแบตเตอรี่เป็นไปตามที่ต้องการ จึงจำเป็นต้องพิจารณาการต่อชุดแบตเตอรี่แบบขนานเช่นกัน ดังนั้นชุดแบตเตอรี่ที่ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์นี้จึงต่อแบบอนุกรมร่วมกับแบบขนานดังแสดงในภาพที่ 5.4

จากภาพที่ 5.4 จำนวนแบตเตอรี่ที่นำมาต่ออนุกรมกัน ( $n_s$ ) สามารถคำนวณได้จากแรงดันที่ระบุของแบตเตอรี่ ( $V_{batt}$ ) และแรงดันด้านไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ ( $V_{total}$ ) ดังสมการต่อไปนี้

$$n_s = \frac{V_{total}}{V_{batt}} \quad (5.22)$$

หลังจากทราบจำนวนแบตเตอรี่ที่นำมาต่ออนุกรมกันแล้ว จะสามารถคำนวณจำนวนแบตเตอรี่ที่นำมาต่อขนานกัน ( $n_p$ ) ได้จากสมการต่อไปนี้

$$n_p = \frac{C_{Wh,Opt}}{n_s \cdot V_{batt} \cdot C_{Ah}} \quad (5.23)$$

เมื่อ

$C_{Wh,Opt}$  คือ ขนาดของแบตเตอรี่ที่คำนวณได้จากฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมในหน่วยวัตต์-ชั่วโมง

$C_{Ah}$  คือ ขนาดมาตรฐานของแบตเตอรี่ 1 ลูกในหน่วยแอมแปร์-ชั่วโมง

อย่างไรก็ดี ขนาดของชุดแบตเตอรี่ที่คำนวณได้จากวิธีการที่นำเสนอนี้ เป็นเพียงขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในเบื้องต้น เนื่องจากพิจารณาเฉพาะเงื่อนไขการแกว่งของกำลังไฟฟ้าเท่านั้น โดยเงื่อนไขการแกว่งของความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบจะพิจารณาในหัวข้อถัดไป

#### 5.6.4 การคำนวณขนาดของแบตเตอรี่เมื่อพิจารณาการแกว่งของความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบ

ในการพิจารณาการแกว่งของความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบ จำเป็นต้องกำหนดตัวชี้วัดที่สามารถบ่งชี้ถึงปริมาณการแกว่งเหล่านี้ได้ โดยในมาตรฐานคุณภาพการบริการของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตในช่วงปี 2552-2553 ได้กำหนดดัชนีวัดผลการดำเนินงานหลักและเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพการบริการไว้ [56] ซึ่งมีดัชนีที่เกี่ยวข้องกับการแกว่งของความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันทั้งหมด 2 ดัชนี ได้แก่

##### 1. ดัชนีการเบี่ยงเบนความถี่จากช่วงการยอมรับ (Frequency Deviation)

ความถี่ทางไฟฟ้าเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ของคุณภาพไฟฟ้าที่ผู้ผลิตไฟฟ้าส่งให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า ดังนั้นการควบคุมความถี่ให้ได้มาตรฐานจึงเป็นการช่วยลดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นตัวกำหนดมาตรฐานการเชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้าด้วย

การเบี่ยงเบนความถี่จากช่วงการยอมรับ (Frequency Deviation) หมายถึง จำนวนครั้งที่ความถี่ออกนอกย่านความถี่ที่กำหนดไว้ ซึ่งย่านความถี่ดังกล่าวมีค่าเท่ากับ  $50 \pm 0.225$  เฮิร์ตซ์ หรือระหว่าง 49.775-50.225 เฮิร์ตซ์ โดยค่าของดัชนีสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$FD = \frac{\sum_{t=1}^{SP} FD_t}{SP} \times 100 \quad (5.24)$$

โดย

$FD$  คือ ดัชนีการเบี่ยงเบนความถี่จากช่วงการยอมรับ (%) ซึ่งถูกกำหนดให้มีค่าไม่เกิน 0.054%

$FD_t$  คือ ผลการวัดทุกช่วงเวลา  $t$  ที่กำหนด โดยที่

$$FD_t = 1 \text{ เมื่อความถี่ของระบบออกนอกช่วงการยอมรับ}$$

$$FD_t = 0 \text{ เมื่อความถี่ของระบบอยู่ในช่วงการยอมรับ}$$

$SP$  คือ จำนวนครั้งที่ทำการวัดในระยะเวลาที่กำหนด

## 2. ดัชนีการเบี่ยงเบนแรงดันจากช่วงการยอมรับ (Voltage Deviation)

แรงดันถือเป็นอีกหนึ่งในพารามิเตอร์ของคุณภาพไฟฟ้าที่ผู้ผลิตไฟฟ้าส่งให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า ดังนั้นการควบคุมแรงดันให้ได้มาตรฐานจึงถือเป็นสิ่งที่ควรให้ความสำคัญเช่นกัน

การเบี่ยงเบนแรงดันจากช่วงการยอมรับ (Voltage Deviation) หมายถึง จำนวนครั้งที่แรงดันเบี่ยงเบนออกนอกช่วงการยอมรับที่กำหนดไว้ ซึ่งช่วงการยอมรับดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 95% - 105% ( $\pm 5\%$ ) ของแรงดันปกติ โดยค่าของดัชนีสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$VD = \frac{\sum_{t=1}^{SP} VD_t}{SP} \times 100 \quad (5.25)$$

โดย

$VD$  คือ ดัชนีการเบี่ยงเบนแรงดันจากช่วงการยอมรับ (%) ซึ่งถูกกำหนดให้มีค่าไม่เกิน 2.852%

$VD_t$  คือ ผลการวัดทุกช่วงเวลา  $t$  ที่กำหนด โดยที่

$$VD_t = 1 \text{ เมื่อแรงดันออกนอกช่วงการยอมรับ}$$

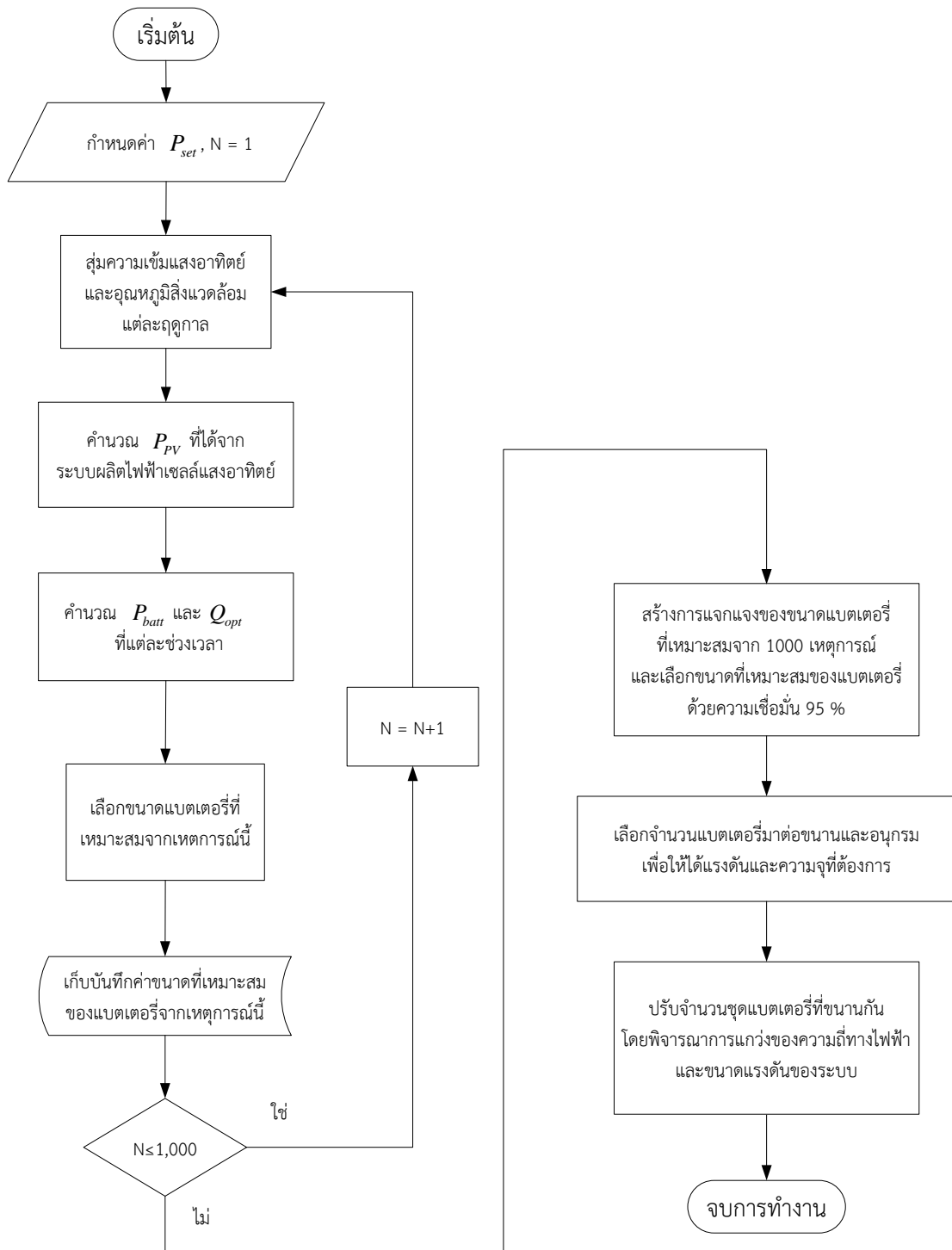
$$VD_t = 0 \text{ เมื่อแรงดันอยู่ในช่วงการยอมรับ}$$

เนื่องจากขนาดของแบตเตอรี่ที่คำนวณได้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ สามารถรองรับกำลังไฟฟ้าที่ต้องการให้แบตเตอรี่รับหรือจ่ายได้ถึง 95% ของเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ ดังนั้น กำลังไฟฟารวมที่ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้หลังจากติดตั้งแบตเตอรี่ขนาดดังกล่าวจึงมีการแกว่งอยู่ในกรอบที่ค่อนข้างแคบ ส่งผลให้ความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบไฟฟ้ามีการแกว่งอยู่ในกรอบที่แคบมากตามไปด้วยจนสามารถรับรองได้ว่าการเบี่ยงเบนของความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบไฟฟ้าจะอยู่ในช่วงที่กำหนดแน่นอน

อย่างไรก็ดี แบตเตอรี่ดังกล่าวยังสามารถปรับลดขนาดลงได้อีก เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการติดตั้งแบตเตอรี่ให้กับโรงไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ โดยที่ยอมให้การแกว่งของกำลังไฟฟ้า การแกว่งของความถี่ และการแกว่งของแรงดันมีค่ามากขึ้น แต่การเบี่ยงเบนของความถี่และแรงดันจากช่วงการยอมรับยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด

การปรับลดขนาดของแบตเตอรี่สามารถทำได้โดยการลดจำนวนแถวของแบตเตอรี่ที่นำมาต่อขนานกัน ( $n_p$ ) ลงด้วยวิธี Bisection โดยมีเงื่อนไขว่าขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่จะต้องเป็นขนาดที่เล็กที่สุดซึ่งยังคงทำให้ดัชนีการเบี่ยงเบนความถี่จากช่วงการยอมรับ ( $FD$ ) และดัชนีการเบี่ยงเบนแรงดันจากช่วงการยอมรับ ( $VD$ ) ยังอยู่ภายใต้เกณฑ์ที่กำหนด

ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่สามารถสรุปเป็นแผนผังขั้นตอนการคำนวณได้ดังภาพต่อไปนี้



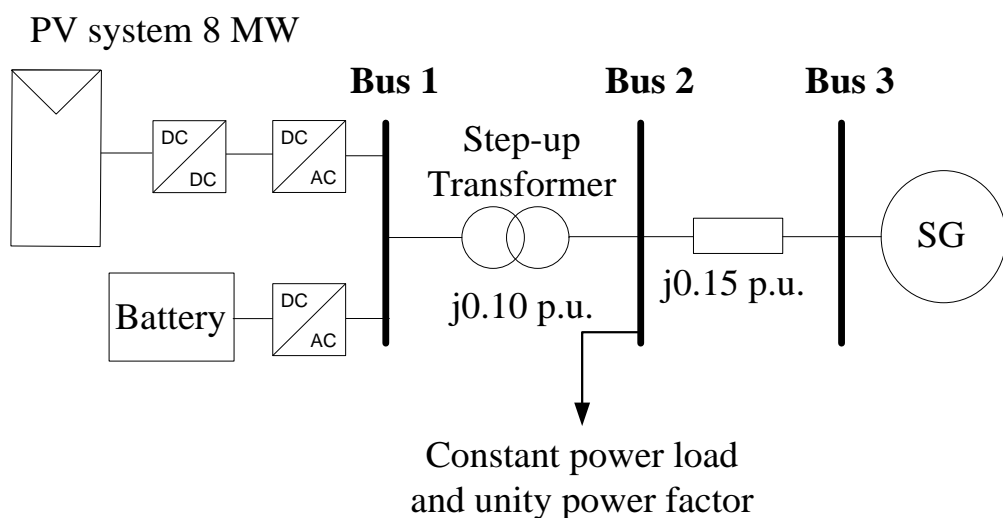
ภาพที่ 5.5 บล็อกไดอะแกรมการหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่

## บทที่ 6 การทดสอบและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ด้วยวิธีการที่นำเสนอ โดยจะแบ่งหัวข้อการทดสอบออกเป็น 2 หัวข้อ คือ ระบบทดสอบที่นำมาใช้ ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย (1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และ (2) แบบจำลองความต้องการกำลังไฟฟ้า ในส่วนของผลการทดสอบจะแบ่งเป็น 6 การทดสอบ ประกอบด้วย (1) การทดสอบการลู่ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (2) การทดสอบการลู่ความต้องการไฟฟ้า (3) การทดสอบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด กำลังไฟฟ้า แรงดัน และความถี่ของระบบ (4) การหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในเบื้องต้น (5) การทดสอบหาลำดับกำลังไฟฟ้า แรงดัน และความถี่ของระบบเมื่อติดตั้งแบตเตอรี่ขนาดเท่ากับที่คำนวณได้ และ (6) การหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่กรณีพิจารณามาตรฐานการเบี่ยงเบนของความถี่และแรงดัน

### 6.1 ระบบทดสอบ

การคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่จะใช้ระบบทดสอบตามที่กำหนด ดังภาพที่ 6.1 โดยระบบทดสอบนี้จะประกอบด้วยระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ต่ออยู่กับแบตเตอรี่ในบัสที่ 1 และมีหม้อแปลงแรงดันขึ้นต่ออยู่ระหว่างบัสที่ 1 และบัสที่ 2 โดยบัสที่ 2 จะมีความต้องการกำลังไฟฟ้าแบบกำลังคงที่ และมีอิมพีแดนซ์ต่ออยู่ระหว่างบัสที่ 2 และบัสที่ 3 ซึ่งบัสที่ 3 เป็นโครงข่ายไฟฟ้าที่จำลองเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยข้อมูลของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบแบตเตอรี่ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่กล่าวมานี้แสดงอยู่ในภาคผนวก ก. ในส่วนของข้อมูลระบบทดสอบไฟฟ้ากำลังได้แสดงในภาคผนวก ข.



ภาพที่ 6.1 ระบบทดสอบ

### 6.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (SG)

วิทยานิพนธ์นี้ใช้แบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ละเลยผลของสภาวะชั่วคราวทางไฟฟ้าในขดลวดสเตเตอร์และขดลวดโรเตอร์ที่ส่งผลในช่วงซับทรานเซียนต์ [57] โดยระบบควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสนี้จะประกอบไปด้วย ระบบควบคุมความเร็ว (Speed Governor) และระบบกระตุ้น (Excitation System) ซึ่งแบ่งออกเป็นส่วรักษาขนาดแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator; AVR) และส่วนลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (Power System Stabilizer; PSS)

### 6.1.2 ความต้องการกำลังไฟฟ้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้แบบจำลองความต้องการกำลังไฟฟ้าหรือโหลดแบบกำลังไฟฟ้าคงที่ (Constant Power Load) ซึ่งมีขนาดที่ขึ้นกับกระบวนการสุ่ม (Stochastic Process) ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$P_{k,t} = P_{trend,k} \exp(\sigma_{P,k} Z_P \sqrt{t} - t \sigma_{P,k}^2 / 2) \quad (6.1)$$

เมื่อ

$P_{k,t}$	คือ	ความต้องการไฟฟ้า ณ เวลาที่สนใจ $t$ ในชั่วโมงที่ $k$ ของแต่ละฤดูกาล
$P_{trend,k}$	คือ	ความต้องการไฟฟ้าเฉลี่ย ในชั่วโมงที่ $k$ ของแต่ละฤดูกาล
$\sigma_{P,k}$	คือ	ค่าเบี่ยงเบนของความต้องการไฟฟ้า ในชั่วโมงที่ $k$ ของแต่ละฤดูกาล
$Z_P$	คือ	กระบวนการสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และมีความแปรปรวนเท่ากับ 1 กล่าวคือ $Z_P \sim N(0,1)$
$t$	คือ	ช่วงเวลาการสุ่ม $t$ นับจากต้นชั่วโมงที่ $k$ ของแต่ละฤดูกาล

## 6.2 ผลการทดสอบ

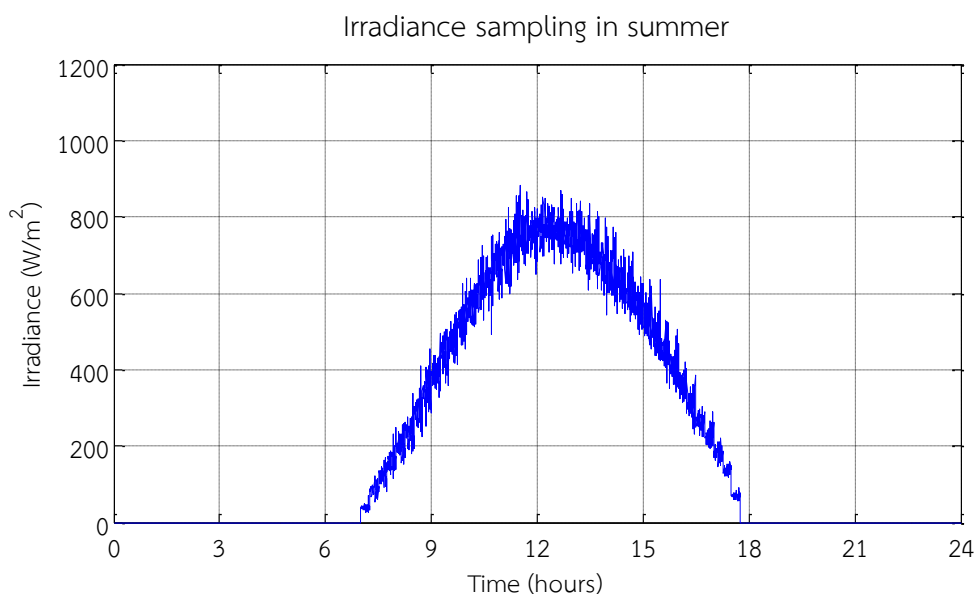
### 6.2.1 การทดสอบการสุ่มความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยรายชั่วโมงของจังหวัดเชียงใหม่ที่วัดได้ในปี 2007 ซึ่งข้อมูลสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยดังกล่าวจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ฤดูร้อน คือช่วงวันที่ 15 กุมภาพันธ์ ถึง วันที่ 15 พฤษภาคม ฤดูฝน คือช่วงวันที่ 16 พฤษภาคม ถึง วันที่ 15 ตุลาคม และฤดูหนาว คือช่วงวันที่ 16 ตุลาคม ถึง วันที่ 14 กุมภาพันธ์ โดยข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยในแต่ละชั่วโมงของแต่ละฤดูกาลนี้ได้แสดงในภาคผนวก ค.1

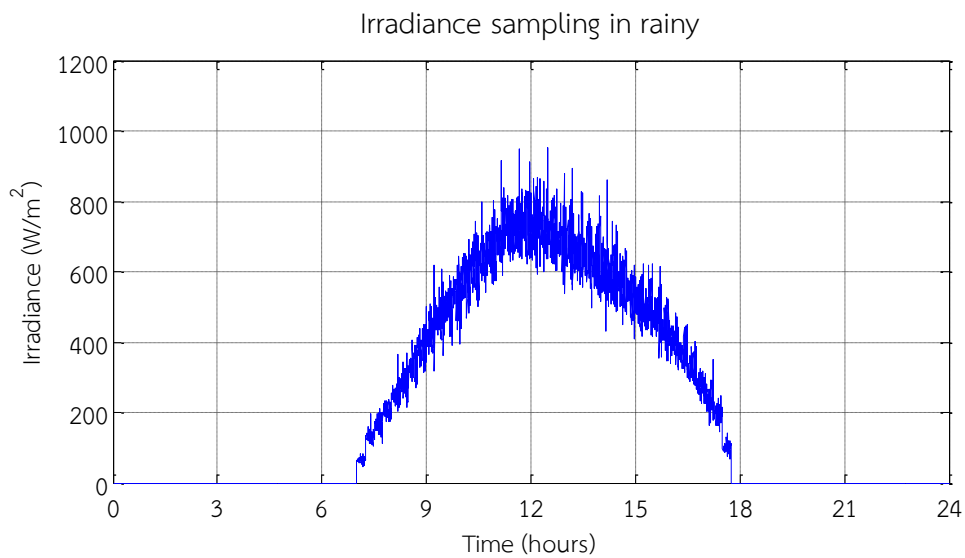


จากการจำลองความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในบทที่ 4 จึงได้ข้อมูลค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $\sigma_{G,k}$  และ  $\sigma_{T,k}$  แต่ละชั่วโมงซึ่งแสดงในภาคผนวก ค.2 อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การจำลองปัจจัยสิ่งแวดล้อมนี้มีความเหมาะสมมากขึ้น จึงนำข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยในแต่ละชั่วโมงมาปรับปรุงให้ข้อมูลมีความต่อเนื่องมากขึ้น โดยการเชื่อมต่อค่าเฉลี่ยแต่ละชั่วโมงของข้อมูลเดิมแล้วสร้างค่าเฉลี่ยทุกๆ 15 นาที ดังนั้นความเข้มแสงเฉลี่ยและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยทุกๆ 15 นาทีนี้จะเป็ค่าคงที่  $G_{trend}$  และ  $T_{trend}$  ของการคำนวณความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในช่วงเวลา 15 นาที

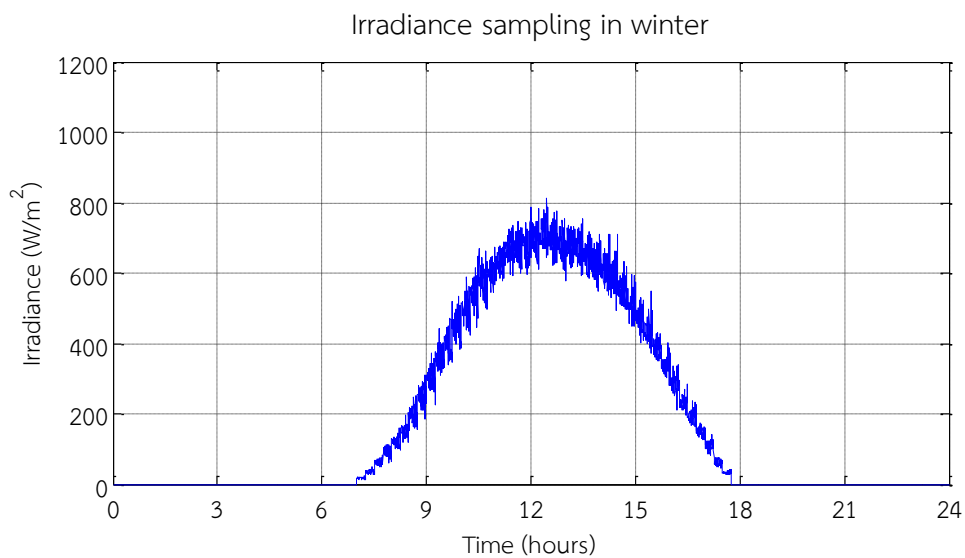
เมื่อทราบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละชั่วโมง ประเภทคอปูลาในแต่ละชั่วโมง และความเข้มแสงเฉลี่ยและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยทุกๆ 15 นาทีแล้ว จึงสามารถคำนวณความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมได้ตามสมการที่ (4.15) และ (4.16) ตามลำดับ โดยกำหนดให้ในทุก 15 นาที ต้องทำการสุ่มความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 900 ค่า กล่าวคือ ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมจะมีค่าเปลี่ยนไปทุกๆ 1 วินาทีนั่นเอง ดังนั้นค่าช่วงเวลาที่ใช้คือ  $t = \frac{1}{900}, \frac{2}{900}, \frac{3}{900}, \dots, 1$  ดังนั้นใน 1 วัน ตั้งแต่ 7:00 น. ถึง 18:00 น. จะมีความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่เปลี่ยนไปทั้งหมด 39,600 ค่า โดยตัวอย่างของความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่ได้จากการสุ่มในแต่ละฤดูกาลสามารถแสดงได้ภาพที่ 6.2-6.7 ดังนี้



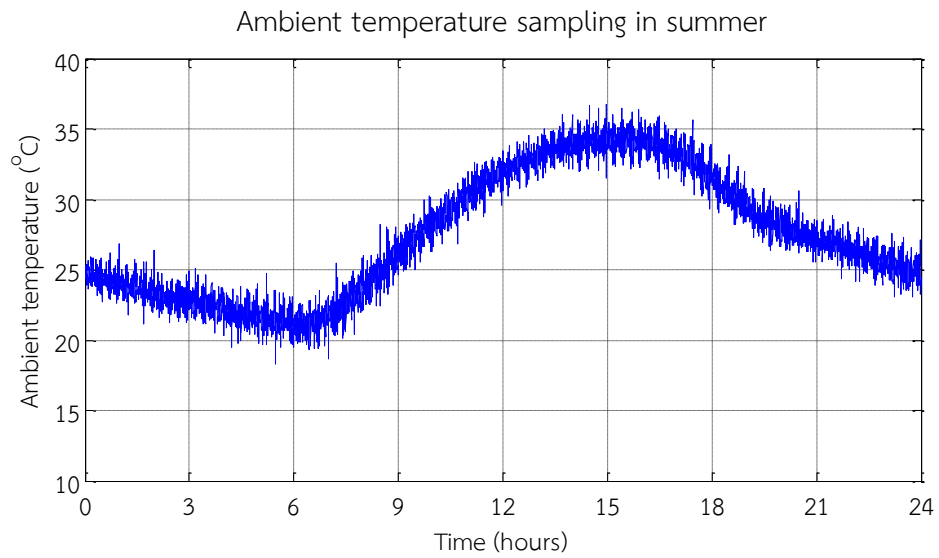
ภาพที่ 6.2 ตัวอย่างการสุ่มความเข้มแสงอาทิตย์ในฤดูร้อน



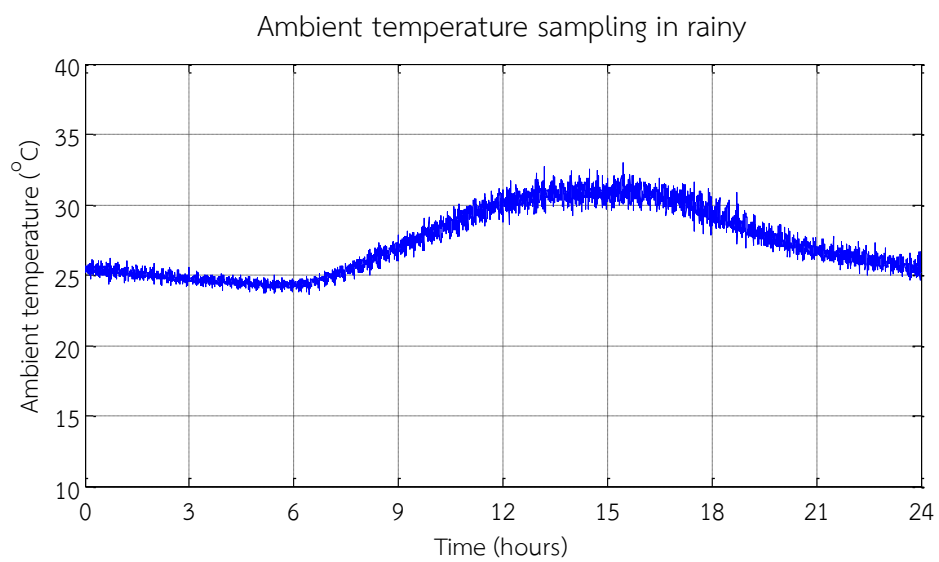
ภาพที่ 6.3 ตัวอย่างการสุ่มความเข้มแสงอาทิตย์ในฤดูฝน



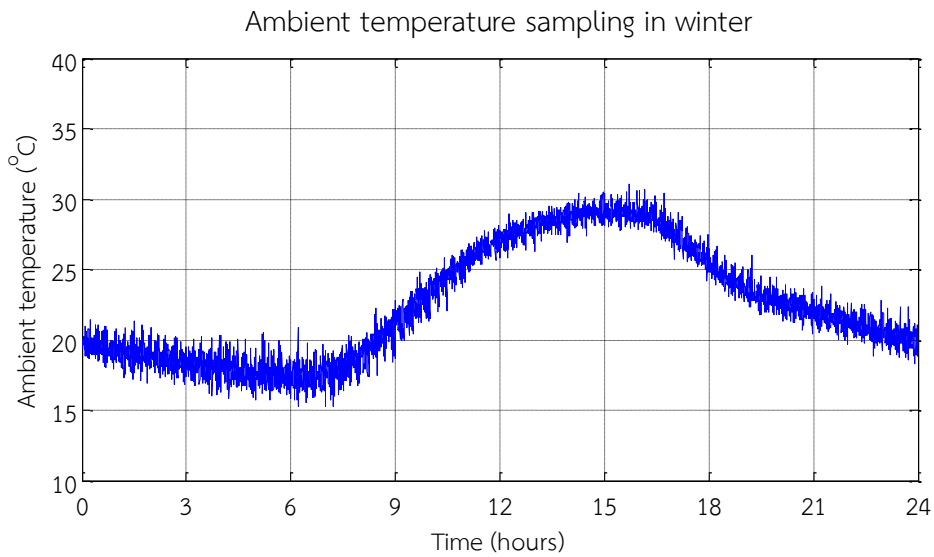
ภาพที่ 6.4 ตัวอย่างการสุ่มความเข้มแสงอาทิตย์ในฤดูหนาว



ภาพที่ 6.5 ตัวอย่างการสุ่มอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในฤดูร้อน

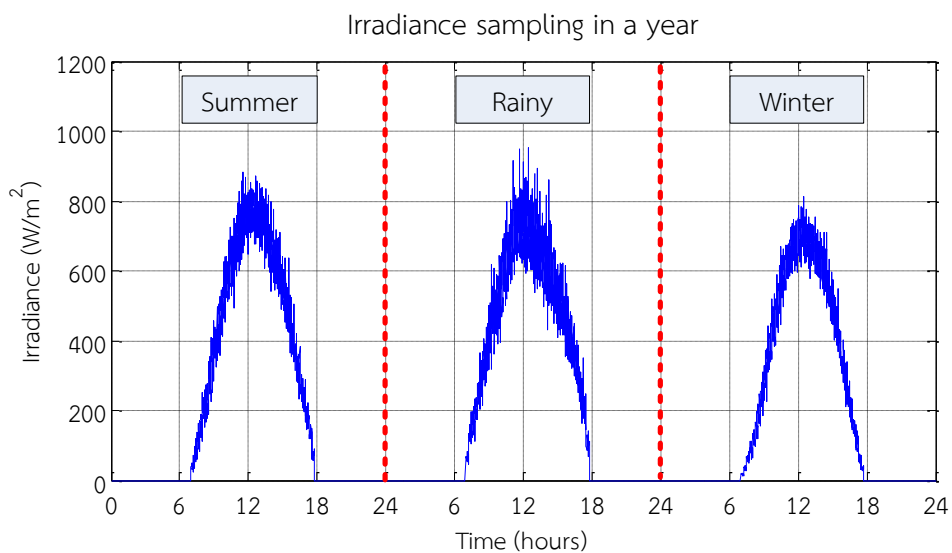


ภาพที่ 6.6 ตัวอย่างการสุ่มอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในฤดูฝน

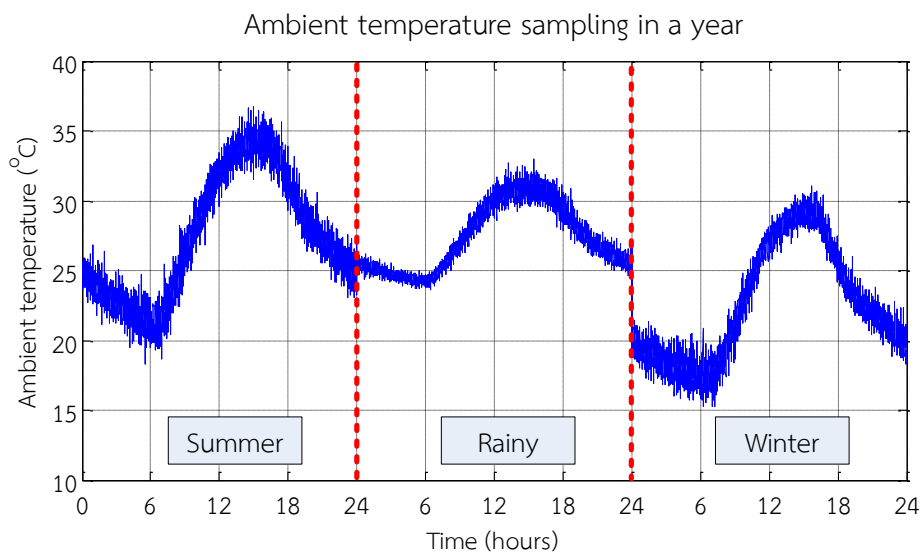


ภาพที่ 6.7 ตัวอย่างการสุ่มอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในฤดูหนาว

เนื่องด้วยความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ย ความแปรปรวน และความสัมพันธ์เชิงคอปูลาในแต่ละชั่วโมงของแต่ละฤดูกาลมีค่าเท่ากัน ดังนั้นตัวแทนความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมสำหรับระยะเวลา 1 ปี จึงนำมาจากการสุ่มความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในระยะเวลา 1 วันของแต่ละฤดูกาล ดังแสดงต่อไปนี้



ภาพที่ 6.8 ตัวอย่างการสุ่มความเข้มแสงอาทิตย์ในฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว

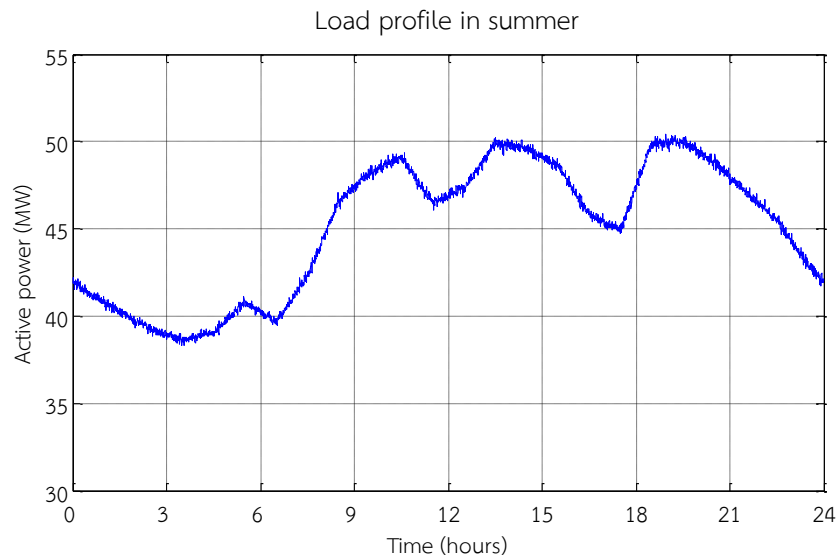


ภาพที่ 6.9 ตัวอย่างการสุ่มอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว

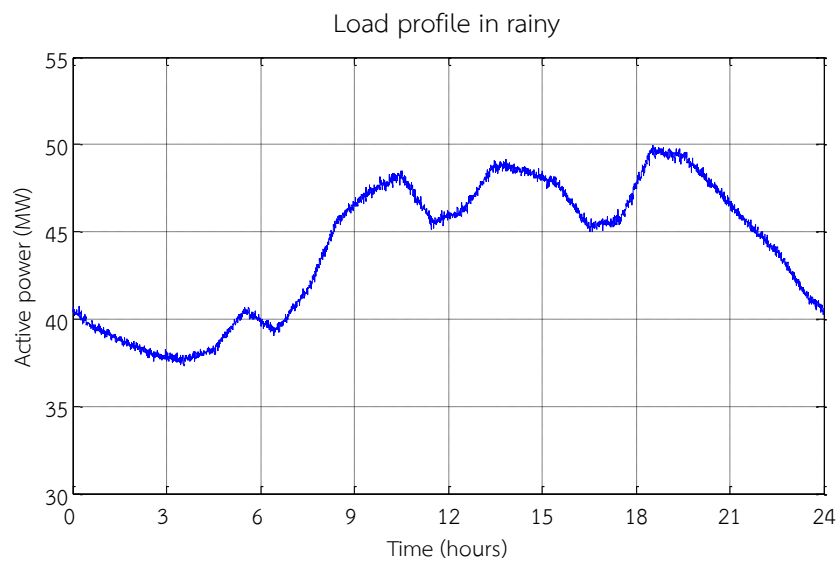
## 6.2.2 การทดสอบการสุ่มความต้องการไฟฟ้า

ความต้องการกำลังไฟฟ้าถือเป็นหนึ่งในตัวแปรของระบบไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและมีความไม่แน่นอน ดังนั้นเพื่อคาดการณ์ความต้องการกำลังไฟฟ้างกล่าว วิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้แบบจำลองกำลังไฟฟ้าจริงซึ่งมีขนาดขึ้นอยู่กับกระบวนการสุ่ม (Stochastic Load Model) ดังแสดงในสมการที่ (6.1) โดยใช้ข้อมูลความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยรายชั่วโมงที่ดัดแปลงจากข้อมูลความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยรายชั่วโมงในปี 2010 ให้มีค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 50 เมกะวัตต์

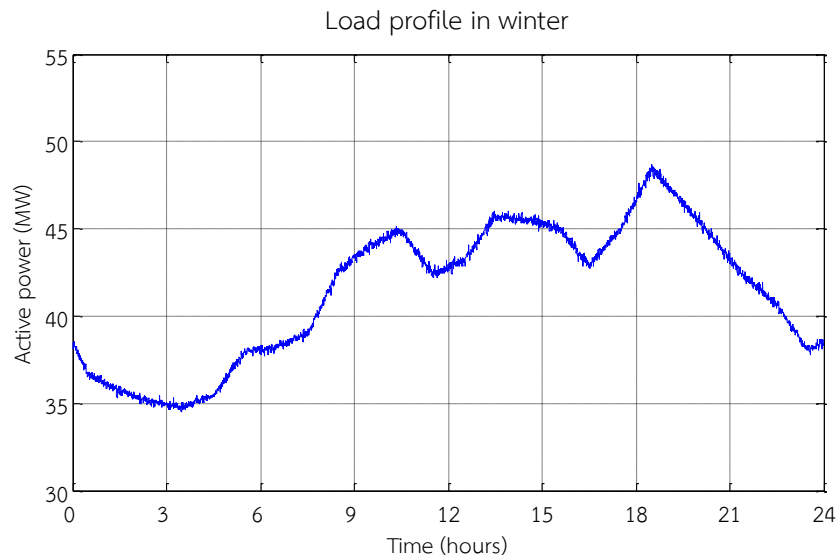
ข้อมูลความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยดังที่กล่าวมานี้แสดงอยู่ในภาคผนวก ค.3 ซึ่งข้อมูลความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยดังกล่าวแบ่งออกเป็น 3 ช่วงเช่นเดียวกับข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว โดยผลจากการทดสอบการสุ่มความต้องการกำลังไฟฟ้าเมื่อกำหนดให้ความเบี่ยงเบนของความต้องการไฟฟ้าเท่ากับ 3% สามารถแสดงได้ดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 6.10 ตัวอย่างการสุ่มความต้องการไฟฟ้าในฤดูร้อน

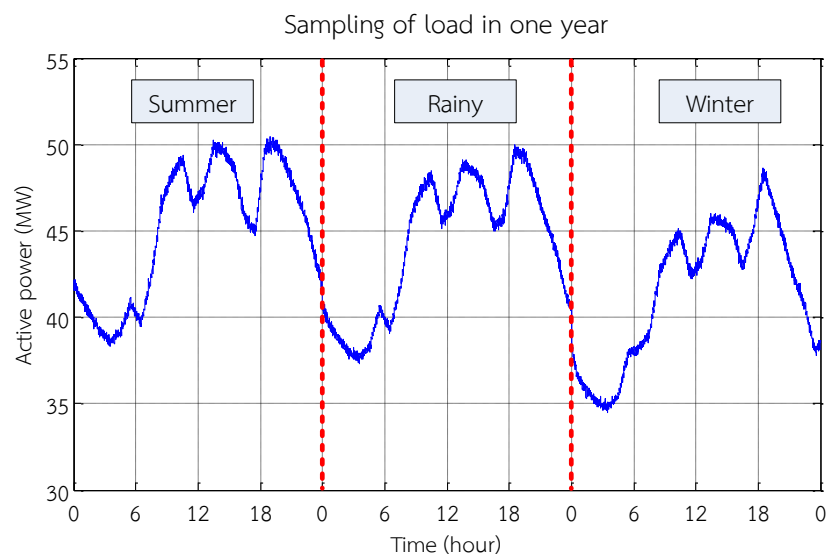


ภาพที่ 6.11 ตัวอย่างการสุ่มความต้องการไฟฟ้าในฤดูฝน



ภาพที่ 6.12 ตัวอย่างการสุ่มความต้องการไฟฟ้าในฤดูหนาว

เนื่องด้วยความต้องการไฟฟ้าเฉลี่ย และความแปรปรวนของความต้องการไฟฟ้าในแต่ละชั่วโมงของแต่ละฤดูกาลมีค่าเท่ากัน ดังนั้นตัวแทนความต้องการไฟฟ้าสำหรับระยะเวลา 1 ปี จึงนำมาจากการสุ่มความต้องการไฟฟ้าในระยะเวลา 1 วันของแต่ละฤดูกาล ดังแสดงต่อไปนี้



ภาพที่ 6.13 ตัวอย่างการสุ่มความต้องการไฟฟ้าในฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว

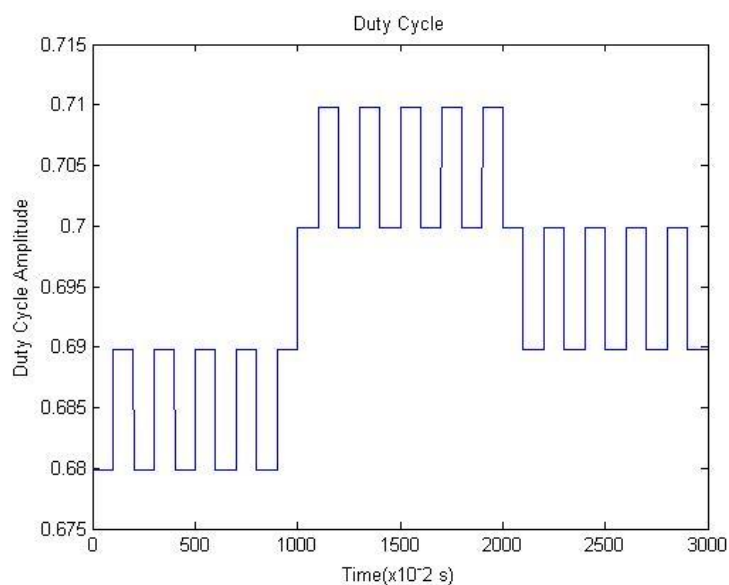
### 6.2.3 การทดสอบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด กำลังไฟฟ้า แรงดัน และความถี่ของระบบ

เมื่อทราบข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมจากวิธีการสุ่มในบทที่ 4 แล้ว จึงสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าของอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ได้จากสมการที่ (2.35) และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่อาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้จะถูกควบคุมด้วยระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของคอนเวอร์เตอร์ทบทแรงดัน

ตัวอย่างการทดสอบการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดแสดงดังภาพที่ 6.14-6.16 โดยทำการทดสอบกับระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการต่อชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนานกัน 6 ชุด แต่ละชุดต่ออนุกรมกัน 10 แผง และปัจจัยสิ่งแวดล้อมสำหรับการทดสอบแสดงในตารางที่ 6.1 จากผลการทดสอบพบว่าคอนเวอร์เตอร์ทบทแรงดันสามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เป็นที่น่าพอใจ ดังนี้

ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์สำหรับการทดสอบกำลังไฟฟ้าสูงสุด

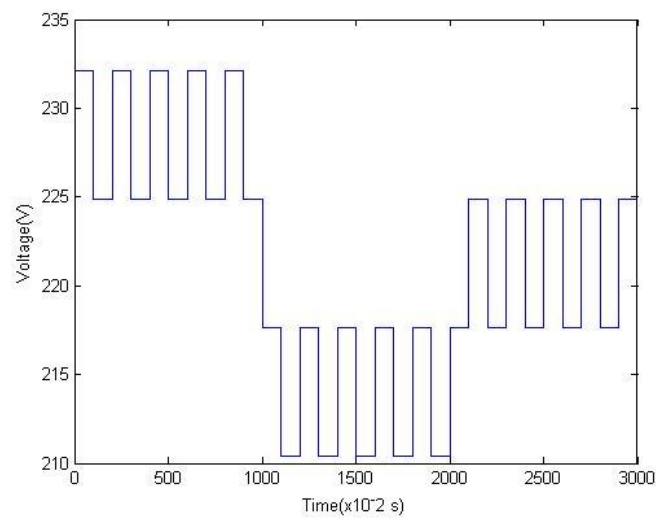
ช่วงเวลา (วินาที)	ความเข้มแสงอาทิตย์ (วัตต์ต่อตารางเมตร)	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (องศาเซลเซียส)	แรงดันที่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด (โวลต์)	กำลังไฟฟ้าสูงสุด (วัตต์)
0 – 10	200	25	232	2,058
10 – 20	1,000	40	213	9,150
20 - 30	500	30	225	4,939



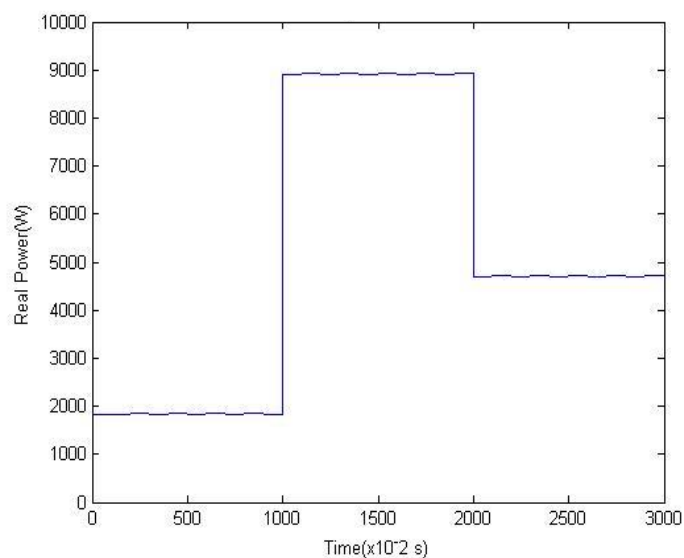
ภาพที่ 6.14 ขนาดสัญญาณ



ตัวอย่างการทดสอบการติดตามกำลังไฟฟ้สูงสุดด้วยวิธี Perturb and Observe ใช้การรบกวนขนาดวัฏจักรงาน ( $\Delta d$ ) เท่ากับ 0.01 และช่วงเวลาการคงค่าขนาดวัฏจักรงาน ( $T_d$ ) เท่ากับ 1 วินาที การทดสอบแสดงให้เห็นว่า การรบกวนวัฏจักรงานขนาดเล็กส่งผลให้แรงดันขั้วของอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์แกว่งรอบแรงดัน ณ จุดกำลังไฟฟ้สูงสุดตามที่ได้แสดงไว้ในสมการที่ (3.2)-(3.11) และกำลังไฟฟ้ที่ออกจากคอนเวอร์เตอร์มีขนาดน้อยกว่าการคำนวณทางทฤษฎีเล็กน้อย เนื่องจากส่วนหนึ่งของกำลังไฟฟ้จากอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์ที่เข้าสู่คอนเวอร์เตอร์ จะเปลี่ยนรูปไปเป็นกำลังไฟฟ้สูญเสียในคอนเวอร์เตอร์



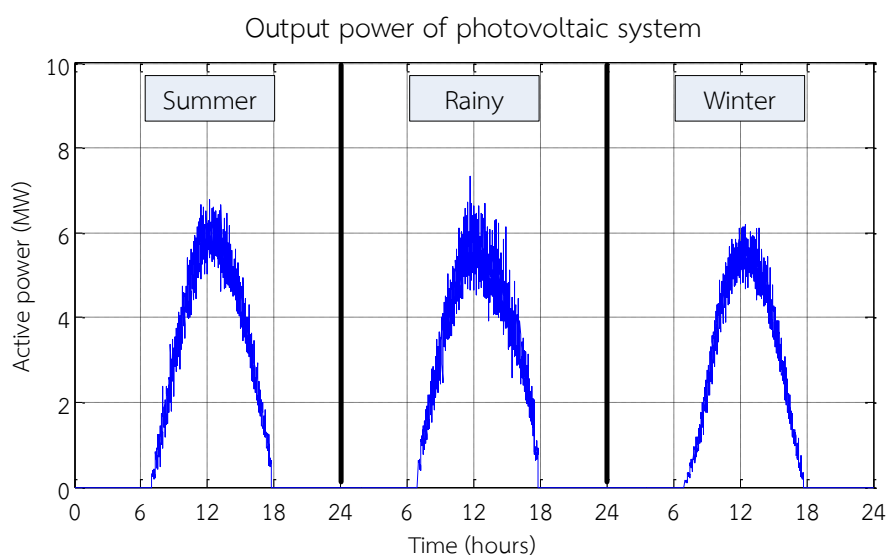
ภาพที่ 6.15 แรงดันขั้วของอาเรย์เซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 6.16 กำลังไฟฟ้ที่ผลิตได้จากคอนเวอร์เตอร์

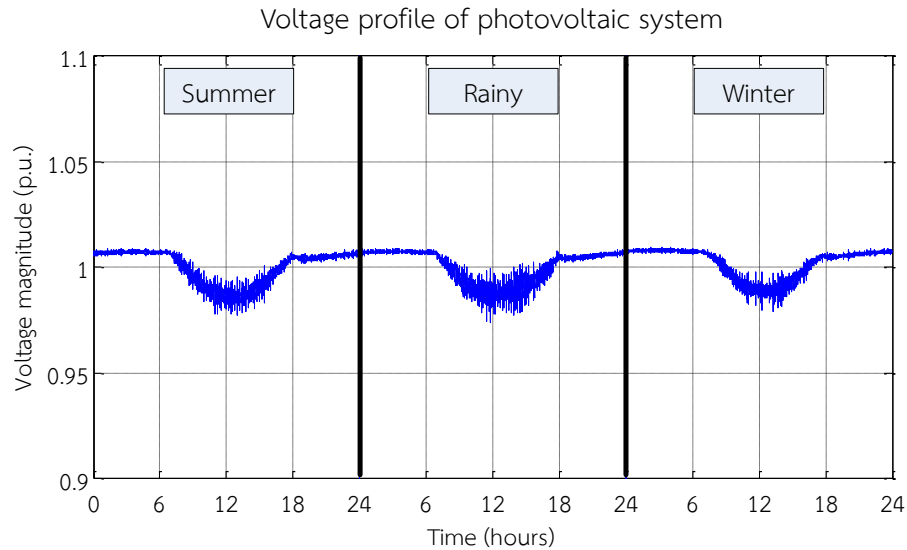
หลังจากคอนเวอร์เตอร์ทบแรงดันควบคุมกำลังไฟฟ้าสูงสุดแล้ว อินเวอร์เตอร์ NPC จึงแปลงไฟฟ้ากระแสตรงจากคอนเวอร์เตอร์ทบแรงดันเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และควบคุมการผลิตกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟารีแอกทีฟด้วยวิธีที่กล่าวในบทที่ 3 ตามสมการที่ (3.44)-(3.51) ซึ่งใช้วิธีการควบคุมแบบ decouple การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feedback Forward Control) และการควบคุมแบบ PI (Proportional Integral Controller) โดยตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมนั้นจะแสดงในภาคผนวก ก. สำหรับตัวอย่างผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าจริง แรงดัน และความถี่ของระบบ โดยใช้ข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมทั้งปีที่สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 6.17-6.19 ตามลำดับดังนี้

### ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าจริงจากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์



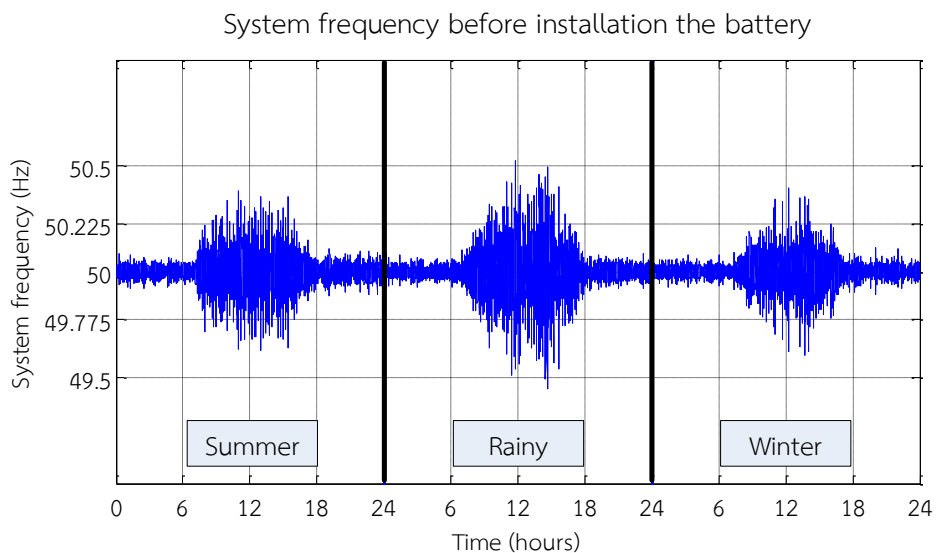
ภาพที่ 6.17 ตัวอย่างกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ก่อนการติดตั้งแบตเตอรี่

### ผลการทดสอบแรงดันของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 6.18 ตัวอย่างขนาดของแรงดันไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ก่อนการติดตั้งแบตเตอรี่

### ผลการทดสอบความถี่ไฟฟ้าของระบบ



ภาพที่ 6.19 ตัวอย่างผลความถี่ของระบบก่อนการติดตั้งแบตเตอรี่

จากผลการคำนวณที่แสดงข้างต้นพบว่า ในช่วงเวลากลางวันซึ่งเป็นช่วงเวลาผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์นั้น กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้มีค่าไม่คงที่ตามความเข้มแสงอาทิตย์

และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้ขนาดของแรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าบริเวณนั้นมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความถี่จะแปรผันตามกำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ กล่าวคือ เมื่อระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงขึ้น ความถี่ของระบบไฟฟ้าจะสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากทางด้านโครงข่ายไฟฟ้าจะมองเห็นความต้องการไฟฟ้ามีปริมาณลดลง จึงส่งผลให้ความถี่ของระบบไฟฟ้าสูงขึ้น และในทางกลับกัน เมื่อระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้ต่ำลง ความถี่ของระบบไฟฟ้าจะต่ำลงตามไปด้วย เนื่องจากด้านโครงข่ายไฟฟ้าจะมองเห็นความต้องการไฟฟ้ามีปริมาณเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ความถี่ของระบบไฟฟ้าต่ำลง สำหรับในช่วงเวลากลางคืนซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์หยุดทำงานและไม่มีการผลิตไฟฟ้าที่มีค่าไม่คงที่เข้าสู่ระบบ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความถี่ของระบบไฟฟ้าจึงแปรตามการเปลี่ยนแปลงของความต้องการไฟฟ้าในช่วงเวลานั้น

ในส่วนการแกว่งของขนาดแรงดันพบว่า ขนาดแรงดันมีแนวโน้มแปรผกผันกับความต้องการไฟฟ้าหรือโหลด กล่าวคือ ช่วงเวลาที่ความต้องการไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ขนาดแรงดันในช่วงเวลาดังกล่าวจะลดลง และในทางกลับกัน ช่วงเวลาที่ความต้องการไฟฟ้าลดลง ขนาดของแรงดันในช่วงเวลาดังกล่าวจะเพิ่มขึ้น นอกจากความเปลี่ยนแปลงของความต้องการไฟฟ้าจะส่งผลต่อการแกว่งของแรงดันแล้ว การแกว่งของแรงดันยังแปรตามกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้วย โดยในช่วงเวลากลางวันซึ่งเป็นช่วงเวลาผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์นั้น กำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้มีค่าไม่คงที่ ส่งผลให้ขนาดแรงดันบริเวณนั้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของแรงดันจะแปรตามกำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ กล่าวคือ เมื่อระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าวรวมสูงขึ้น ขนาดแรงดันของระบบไฟฟ้าบริเวณนั้นจะสูงขึ้นด้วย เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่โหลดไปบางส่วน จึงส่งผลให้โครงข่ายไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่โหลดลดลงและขนาดแรงดันเพิ่มสูงขึ้น ในทางกลับกัน เมื่อระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าวรวมลดลง ขนาดแรงดันของระบบไฟฟ้าบริเวณนั้นจะลดลงตามไปด้วย เนื่องจากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่โหลดลดลง จึงส่งผลให้โครงข่ายไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่โหลดเพิ่มขึ้นและขนาดแรงดันลดต่ำลง อย่างไรก็ตาม การแกว่งของแรงดันยังคงรักษาเสถียรภาพได้จากการควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารีในส่วนของารรักษาขนาดแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator หรือ AVR) และส่วนลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (Power System Stabilizer หรือ PSS) ที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวแทนของโครงข่ายไฟฟ้าส่วนที่ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่ออยู่

#### 6.2.4 ผลการหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในเบื้องต้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้แบตเตอรี่กรดตะกั่วของบริษัท Rolls รุ่น S12-290AGM 12V 260Ah [58] ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ที่มีความจุกัก 260 แอมแปร์-ชั่วโมง หรือประมาณ 3,120 วัตต์-ชั่วโมง สำหรับพารามิเตอร์ของแบบจำลองแบตเตอรี่กรดตะกั่วจะแสดงในภาคผนวก ก. ในส่วนของเครื่องควบคุมการอัดประจุจะเลือกใช้ของบริษัท HindlePower รุ่น AT30 series 130Vdc [59] ซึ่งมีพิกัดของกระแส 50 แอมแปร์ มีแรงดันพิกัดฝั่งไฟตรงเท่ากับ 130 โวลต์ และแรงดันพิกัดฝั่งไฟสลับ

เท่ากับ 220 โวลต์ โดยจะใช้พารามิเตอร์และแบบจำลองเครื่องควบคุมการประจุเดียวกันกับพารามิเตอร์และแบบจำลองของอินเวอร์เตอร์ในบทที่ 3

เมื่อทราบพารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ พารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมการประจุ และข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลาแล้ว จะสามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ต้องรับหรือจ่ายได้ตามสมการที่ (5.19) และขนาดแบตเตอรี่ในแต่ละช่วงเวลาจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.21)

ค่าความต้องการทางไฟฟ้าที่กำหนด หรือ  $P_{set}$  เป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อการคำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่ ซึ่งถ้าความต้องการทางไฟฟ้าที่กำหนดมีค่าแตกต่างจากกำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้มาก จะมีผลให้ต้องใช้แบตเตอรี่ขนาดใหญ่ เพราะกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จะต้องชดเชยมีค่าสูง ดังนั้นเพื่อให้การหาขนาดแบตเตอรี่มีขนาดที่ไม่ใหญ่จนเกินไป และขนาดความต้องการไฟฟ้าที่กำหนดเหมาะสมกับศักยภาพของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งแปรตามสภาพแวดล้อม และรวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงระดับขนาดความต้องการไฟฟ้าที่กำหนดมีความสะดวกต่อการวางแผนการผลิตไฟฟ้าของการไฟฟ้า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ของแต่ละฤดู ด้วยการกำหนดค่า  $P_{set}$  ให้เท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้เฉลี่ยในแต่ละชั่วโมงของแต่ละฤดูกาล ดังแสดงในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 สรุปค่าความต้องการไฟฟ้าในแต่ละชั่วโมงของแต่ละฤดูกาล

เวลา	ค่าความต้องการทางไฟฟ้าที่กำหนด หรือ $P_{set}$ (เมกะวัตต์)		
	ฤดูร้อน	ฤดูฝน	ฤดูหนาว
07:00-08:00	0.77	1.15	0.47
08:00-09:00	2.12	2.51	1.50
09:00-10:00	3.57	4.04	3.13
10:00-11:00	5.03	4.60	4.40
11:00-12:00	5.85	5.82	5.07
12:00-13:00	5.60	5.40	5.41
13:00-14:00	5.21	4.76	5.13
14:00-15:00	4.68	4.47	4.42
15:00-16:00	3.92	3.46	3.35
16:00-17:00	2.19	2.75	1.80
17:00-18:00	0.74	0.97	0.44

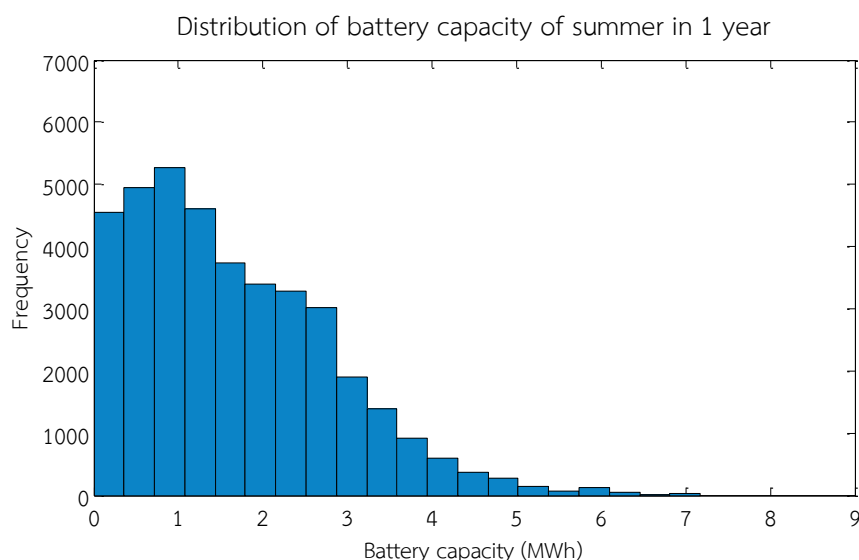
โดยวิธีการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในแต่ละฤดูกาลจะมีกระบวนการเดียวกันดังนี้ เมื่อคำนวณขนาดของแบตเตอรี่ที่ทุกช่วงเวลาในฤดูกาลที่พิจารณาได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ นำขนาดแบตเตอรี่นั้นมาสร้างกราฟแจกแจงความถี่ และทำการเลือกขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่สำหรับชุดเหตุการณ์นั้น โดยกำหนดให้ขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ต้องรองรับเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ของเหตุการณ์ทั้งหมด อย่างไรก็ตาม ขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม

ดังกล่าวเป็นเพียงคำตอบที่สอดคล้องกับข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมของฤดูกาลที่พิจารณาที่สุ่มได้เพียง 1 ชุดเท่านั้น ซึ่งยังไม่สามารถใช้เป็นตัวแทนของคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ ดังนั้นจึงนำความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยรายชั่วโมงของทั้งฤดูกาลนั้น มาสร้างความสัมพันธ์ความน่าจะเป็นของข้อมูล (บทที่ 4) แล้วทำการสุ่มเหตุการณ์ทั้งปีเป็นจำนวน 1,000 ชุดแล้วนำมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ( $P_{pv}$ ) และกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ต้องรับหรือจ่าย ( $P_{batt}$ ) ใหม่ จากนั้นทำการคำนวณหาค่าขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมด้วยวิธีการเดิม เมื่อได้ค่าขนาดของแบตเตอรี่ที่เหมาะสม 1,000 ค่า จึงสามารถสร้างกราฟแจกแจงความถี่ซึ่งเป็นตัวแทนของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability density function) ของขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมของความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในแต่ละฤดูกาลได้

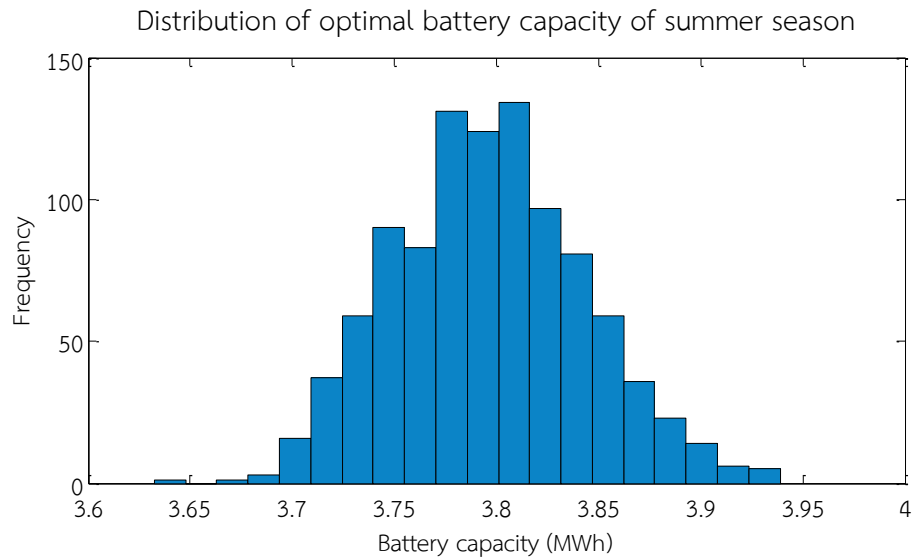
หลังจากทราบขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมกับแต่ละฤดูกาลแล้ว และในทางปฏิบัติขนาดแบตเตอรี่ที่ติดตั้งควรจะต้องพอต่อการรับและจ่ายกำลังไฟฟ้าตลอดทั้งปี ดังนั้นขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่จึงเลือกจากขนาดแบตเตอรี่ที่ใหญ่ที่สุด โดยผลการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

#### 6.2.4.1 ผลการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในฤดูร้อน

ผลการทดสอบหาขนาดของแบตเตอรี่จากข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในฤดูร้อน เมื่อกำหนด  $P_{set}$  ตามที่กำหนด สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 6.20-6.21 ดังนี้



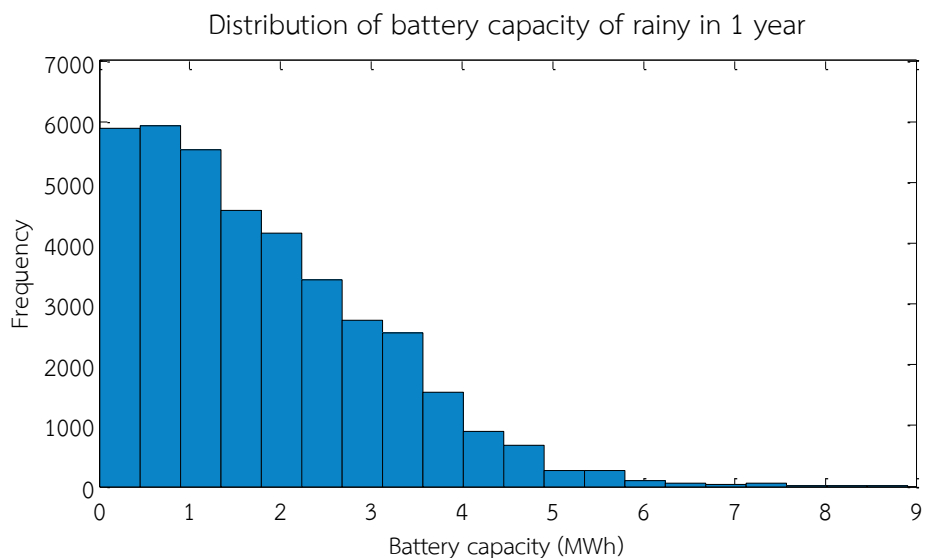
ภาพที่ 6.20 ตัวอย่างกราฟแจกแจงความถี่ของความจุของแบตเตอรี่ในทุกช่วงเวลาของ 1 ชุดข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในฤดูร้อน



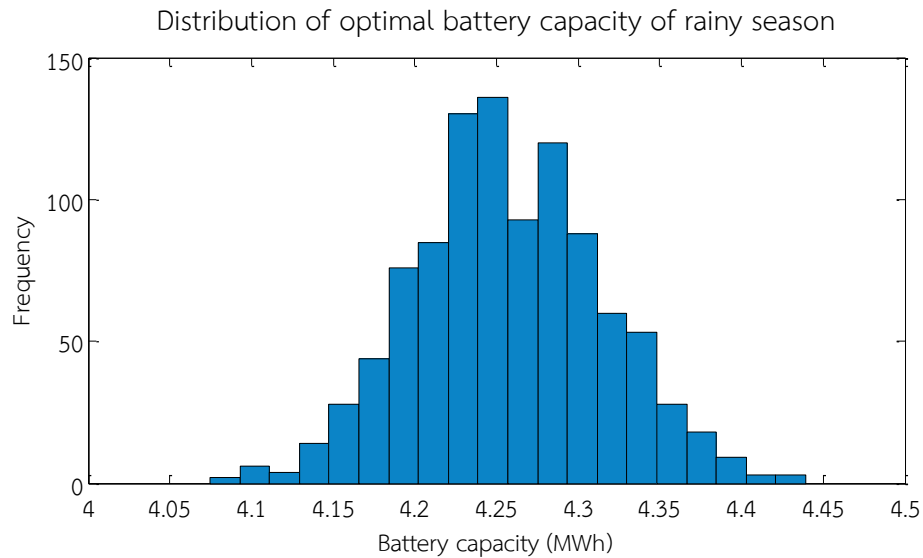
ภาพที่ 6.21 กราฟแจกแจงความถี่ของขนาดของแบตเตอรี่ที่คำนวณได้จากข้อมูลข้อมูล ความเข้มแสงอาทิตย์และสิ่งแวดล้อม 1,000 ชุดข้อมูลในฤดูร้อน

#### 6.2.4.2 ผลการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในฤดูฝน

ผลการทดสอบหาขนาดของแบตเตอรี่จากข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิ สิ่งแวดล้อมในฤดูฝน เมื่อกำหนด  $P_{set}$  ตามที่กำหนด สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 6.22-6.23 ดังนี้



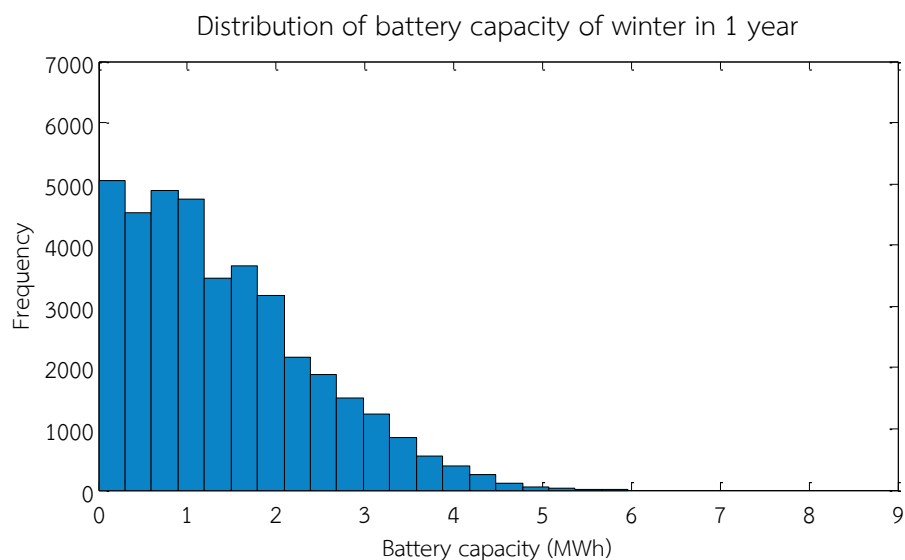
ภาพที่ 6.22 ตัวอย่างกราฟแจกแจงความถี่ของความจุของแบตเตอรี่ในทุกช่วงเวลา ของ 1 ชุดข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในฤดูฝน



ภาพที่ 6.23 กราฟแจกแจงความถี่ของขนาดของแบตเตอรี่ที่คำนวณได้จากข้อมูลสุ่ม ความเข้มแสงอาทิตย์และสิ่งแวดล้อม 1,000 ชุดข้อมูล ในฤดูฝน

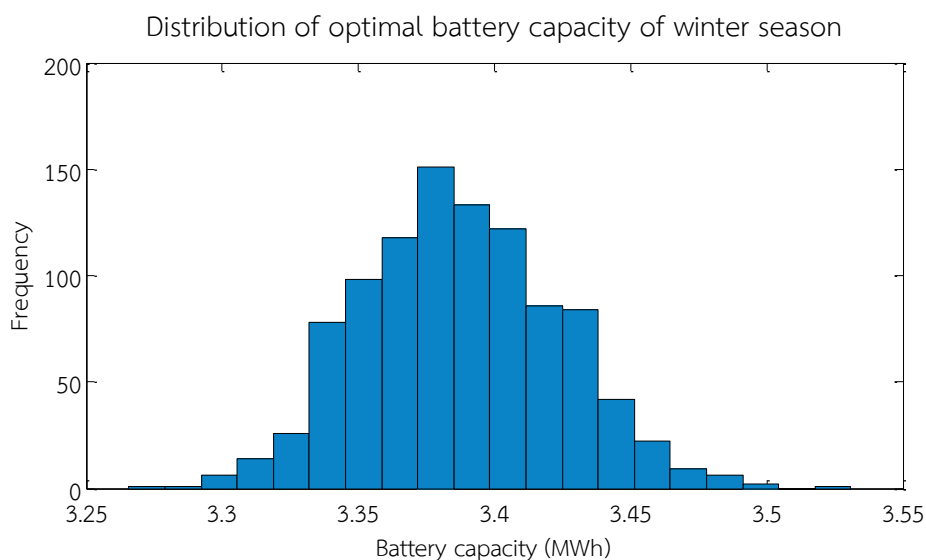
#### 6.2.4.3 ผลการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในฤดูหนาว

ผลการทดสอบหาขนาดของแบตเตอรี่จากข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในฤดูหนาว เมื่อกำหนด  $P_{set}$  ตามที่กำหนด สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 6.24-6.25 ดังนี้



ภาพที่ 6.24 ตัวอย่างกราฟแจกแจงความถี่ของความจุของแบตเตอรี่ในทุกช่วงเวลา ของ 1 ชุดข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในฤดูหนาว





ภาพที่ 6.25 กราฟแจกแจงความถี่ของขนาดของแบตเตอรี่ที่คำนวณได้จากข้อมูลสุ่ม ความเข้มแสงอาทิตย์และสิ่งแวดล้อม 1,000 ชุดข้อมูล ในฤดูหนาว

จากการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในแต่ละฤดูกาล พบว่าการแจกแจงความถี่ของขนาดแบตเตอรี่ที่คำนวณได้จากข้อมูลสุ่มความเข้มแสงอาทิตย์และสิ่งแวดล้อม 1,000 ชุดข้อมูล ในแต่ละฤดูกาล มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) ดังนั้นขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในแต่ละฤดูกาลจึงเลือกจากช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (Confident Interval) ดังแสดงในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 6.3 สรุปค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และช่วงความเชื่อมั่น 95 % ในแต่ละฤดูกาล

ปริมาณทางสถิติ	ขนาดแบตเตอรี่ (วัตต์-ชั่วโมง)		
	ฤดูร้อน	ฤดูฝน	ฤดูหนาว
ค่าเฉลี่ย	3,796,018	4,257,341	3,387,244
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	46,810	58,344	36,443
ความเชื่อมั่นต่ำสุด	3,702,399	4,140,653	3,314,358
ความเชื่อมั่นสูงสุด	3,889,637	4,374,029	3,460,131

โดยการพิจารณาความเชื่อมั่นสูงสุดในตารางที่ 6.3 พบว่าขนาดแบตเตอรี่ที่ใหญ่ที่สุด คือขนาดแบตเตอรี่ที่คำนวณได้ในฤดูฝน มีขนาดเท่ากับ 4,374,029 วัตต์-ชั่วโมง ดังนั้นขนาดแบตเตอรี่นี้จึงเป็นตัวแทนของขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ได้ สิ่งที่ต้องคำนวณต่อไป คือ จำนวนของแบตเตอรี่ที่ต้องนำมาต่อเป็นชุดแบตเตอรี่แบบผสมเพื่อให้ได้ขนาดแรงดันและความจุตามที่ต้องการ ซึ่งขนาดแรงดันนี้จะทราบได้จากขนาดแรงดันพิกัดของเครื่องควบคุมการกระทำที่ต่ออยู่กับแบตเตอรี่ เมื่อ

พิจารณาจากเครื่องควบคุมการประจุที่นำมาใช้ซึ่งมีแรงดันไฟตรง 130 โวลต์ ดังนั้นจึงใช้แบตเตอรี่ต่อชุดอนุกรมกันแฉวละ 10 ลูก เพื่อให้ได้แรงดันที่เหมาะสมกับอินเวอร์เตอร์นี้

เมื่อทราบจำนวนแบตเตอรี่ที่ต่อชุดอนุกรมกันแล้ว จึงสามารถคำนวณหาจำนวนแฉวของแบตเตอรี่ที่จะต่อชุดขนานกันได้ เพื่อให้จำนวนลูกของแบตเตอรี่เป็นเลขลงตัว ในที่นี้จะเลือกขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสมคือ 4,399,200 วัตต์-ชั่วโมง หมายความว่า จะต้องใช้แบตเตอรี่จำนวน 141 แฉวต่อขนานกัน เพื่อให้ได้ความจุของชุดแบตเตอรี่ตามที่ต้องการ จากการคำนวณขนาดของแบตเตอรี่ดังกล่าว สรุปได้ว่า จะต้องใช้แบตเตอรี่ต่ออนุกรมและขนานกันเป็นชุดแบตเตอรี่ทั้งหมด 1,410 ลูก

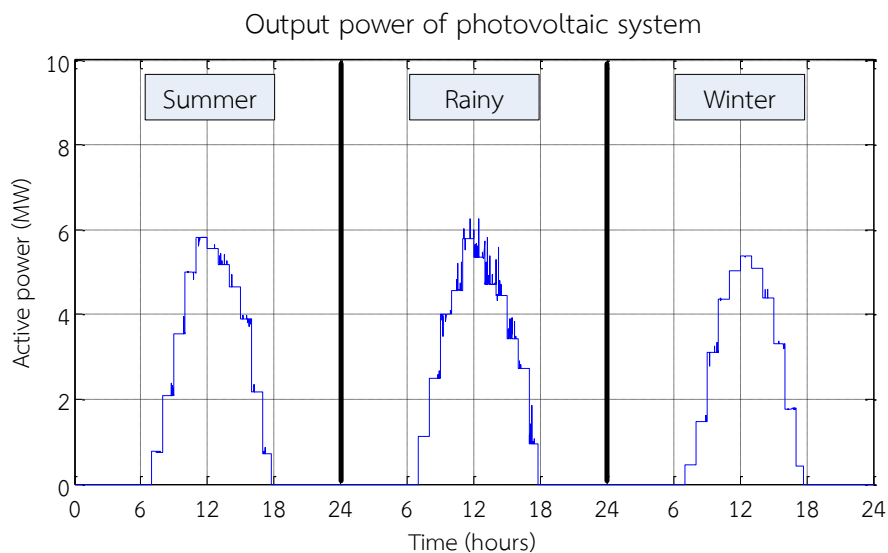
### 6.2.5 การทดสอบหากำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่โครงข่ายเมื่อติดตั้งแบตเตอรี่ขนาดเท่ากับที่คำนวณได้

เพื่อทดสอบว่าขนาดแบตเตอรี่ที่คำนวณได้จะสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าและความถี่ได้จริง ในการทดสอบนี้จึงทำการสุ่มความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมขึ้นมาใหม่ 1 ชุด และกำหนดให้กำลังไฟฟ้ารวมที่ต้องการให้ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายสู่ระบบไฟฟ้าในฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว หรือ  $P_{set}$  มีค่าเท่ากับที่ได้กำหนดไว้ในตารางที่ 6.2 เมื่อทราบข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมแล้วจะสามารถคำนวณหา กำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์และทราบกำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จะรับหรือจ่ายได้ โดยกำลังไฟฟ้ารวมที่เข้าสู่ระบบ ( $P_{total}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$P_{total} = P_{batt} + P_{pv} \quad (6.2)$$

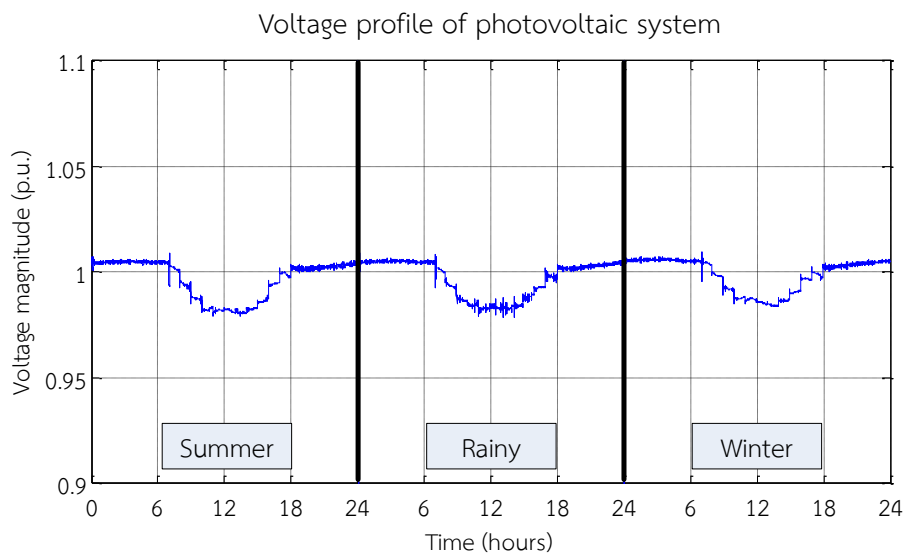
ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้ารวมที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อติดตั้งแบตเตอรี่ที่มีขนาดเหมาะสม รวมถึงผลการทดสอบความถี่และแรงดันของระบบไฟฟ้าบริเวณนั้น โดยใช้ข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมทั้งปีที่สามารถแสดงได้ดังภาพต่อไปนี้

### ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าจริงจากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์



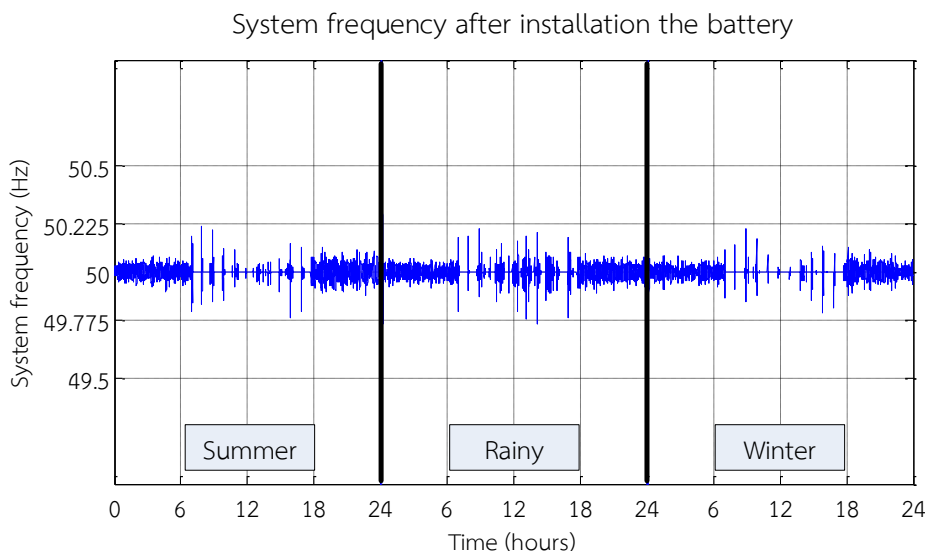
ภาพที่ 6.26 ตัวอย่างกำลังไฟฟ้าจริงที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์  
หลังการติดตั้งแบตเตอรี่

### ผลการทดสอบแรงดันของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 6.27 ตัวอย่างขนาดของแรงดันไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์  
หลังการติดตั้งแบตเตอรี่

## ผลการทดสอบความถี่ไฟฟ้าของระบบ



ภาพที่ 6.28 ตัวอย่างผลความถี่ของระบบหลังการติดตั้งแบตเตอรี่

จากผลการทดสอบที่ได้จะเห็นว่า กำลังไฟฟ้าจริงที่เข้าสู่ระบบไฟฟ้าในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง มีขนาดประมาณเท่ากับความต้องการไฟฟ้าที่กำหนด ( $P_{set}$ ) ในแต่ละชั่วโมงของแต่ละฤดูกาล และกำลังไฟฟ้าจริงที่เข้าสู่ระบบไฟฟ้ายังมีการแกว่งของกำลังไฟฟาลดลง ซึ่งส่งผลให้แรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้ามักแกว่งลดลงตามไปด้วย โดยสาเหตุที่กำลังไฟฟ้ายังมีการแกว่งอยู่เล็กน้อยนั้นเป็นผลมาจากพฤติกรรมของแบตเตอรี่ที่ไม่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าได้ทัน รวมถึงขีดจำกัดการอัดและคายประจุสูงสุดของแบตเตอรี่ และอีกสาเหตุหนึ่งซึ่งส่งผลต่อการแกว่งของความถี่ทางไฟฟ้าและแรงดันของระบบ คือ การเปลี่ยนแปลงความต้องการไฟฟ้าที่กำหนดระหว่างสองชั่วโมงที่ติดกัน รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงความต้องการทางไฟฟ้าที่เกิดจากแนวโน้มของความต้องการไฟฟ้ารายวันและกระบวนการสู่มความต้องการไฟฟ้าอีกด้วย

### 6.2.6 การหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่กรณีพิจารณามาตรฐานการเบี่ยงเบนของความถี่และแรงดัน

ผลการทดสอบในหัวข้อก่อนหน้านี้นี้ได้แสดงให้เห็นว่า ขนาดของชุดแบตเตอรี่ที่คำนวณได้จากวิธีการที่นำเสนอ สามารถแก้ปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี เพราะสามารถลดปัญหาการแกว่งของความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบได้ โดยทั้งความถี่และแรงดันดังกล่าวจะแกว่งตัวอยู่ในช่วงการยอมรับตลอดเวลาที่ทำการทดสอบ นั่นคือ ดัชนีการเบี่ยงเบนความถี่จากการยอมรับ ( $FD$ ) และดัชนีการเบี่ยงเบนแรงดันจากการยอมรับ ( $VD$ ) มีค่าเท่ากับ 0 ทั้งสองดัชนี

อย่างไรก็ดี ในทางปฏิบัติ ดัชนีการเบี่ยงเบนทั้งสองดัชนีนี้อาจไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากับ 0 เพียงแต่ต้องไม่เกินค่าที่ผู้ดูแลระบบไฟฟ้ากำหนดไว้ ซึ่งมาตรฐานคุณภาพการบริการของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตในช่วงปี 2552-2553 ได้กำหนดเกณฑ์มาตรฐานของดัชนีการเบี่ยงเบนทั้งสองไว้ดังนี้

ตารางที่ 6.4 มาตรฐานคุณภาพการบริการของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตในช่วงปี 2552-2553 (บางส่วน)

ชื่อดัชนีวัดผลการดำเนินงานหลัก	เกณฑ์มาตรฐานคุณภาพการบริการ
การเบี่ยงเบนความถี่จากช่วงการยอมรับ (Frequency Deviation)	ไม่เกิน ร้อยละ 0.054
การเบี่ยงเบนแรงดันไฟฟ้าจากช่วงการยอมรับ (Voltage Deviation)	ไม่เกิน ร้อยละ 2.852

ดังนั้น ขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ที่คำนวณได้ในเบื้องต้น จึงสามารถปรับลดลงได้อีก โดยอาศัยการปรับลดจำนวนแถวของชุดแบตเตอรี่ที่นำมาต่อขนานกันด้วยวิธี Bisection โดยมีเงื่อนไขว่าขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่จะต้องเป็นขนาดที่เล็กที่สุดซึ่งยังคงทำให้ดัชนีการเบี่ยงเบนความถี่จากช่วงการยอมรับ (*FD*) และดัชนีการเบี่ยงเบนแรงดันจากช่วงการยอมรับ (*VD*) ยังอยู่ภายใต้เกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

ผลลัพธ์จากการคำนวณดังกล่าวมานี้ สามารถลดจำนวนแถวของชุดแบตเตอรี่จาก 141 แถว เหลือเพียง 110 แถว หรือลดจำนวนแบตเตอรี่จาก 1,410 ลูก เหลือเพียง 1,100 ลูก โดยค่าดัชนีการเบี่ยงเบนความถี่จากช่วงการยอมรับ (*FD*) และดัชนีการเบี่ยงเบนแรงดันจากช่วงการยอมรับ (*VD*) ที่คำนวณได้หลังจากปรับลดขนาดแบตเตอรี่สามารถแสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

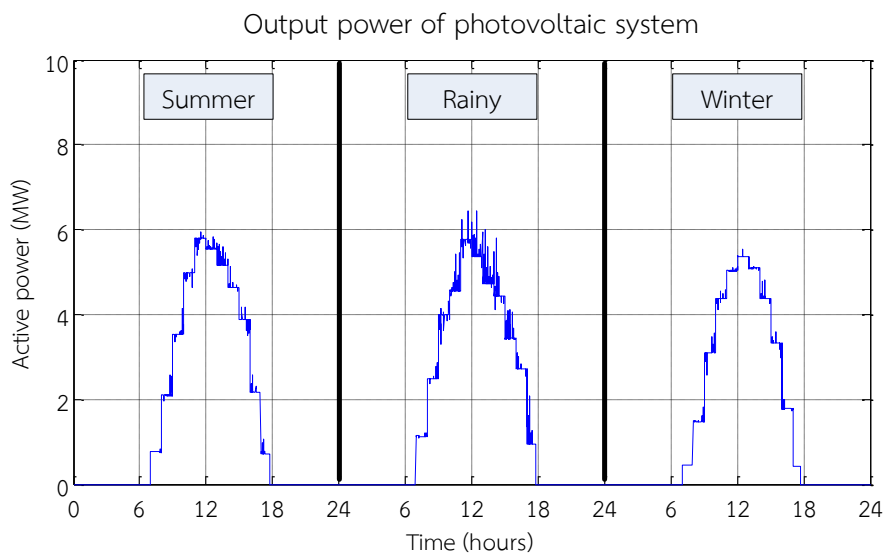
ตารางที่ 6.5 ค่าดัชนีการเบี่ยงเบนฯ หลังจากปรับลดขนาดแบตเตอรี่

ดัชนี	ค่าของดัชนี
การเบี่ยงเบนความถี่จากช่วงการยอมรับ (Frequency Deviation)	0.0505
การเบี่ยงเบนแรงดันไฟฟ้าจากช่วงการยอมรับ (Voltage Deviation)	0.0000

ส่วนผลการทดสอบกำลังไฟฟารวมที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อติดตั้งแบตเตอรี่ที่มีขนาดเหมาะสมนี้ รวมถึงแรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าบริเวณนั้น สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 6.29 ถึงภาพที่ 6.31

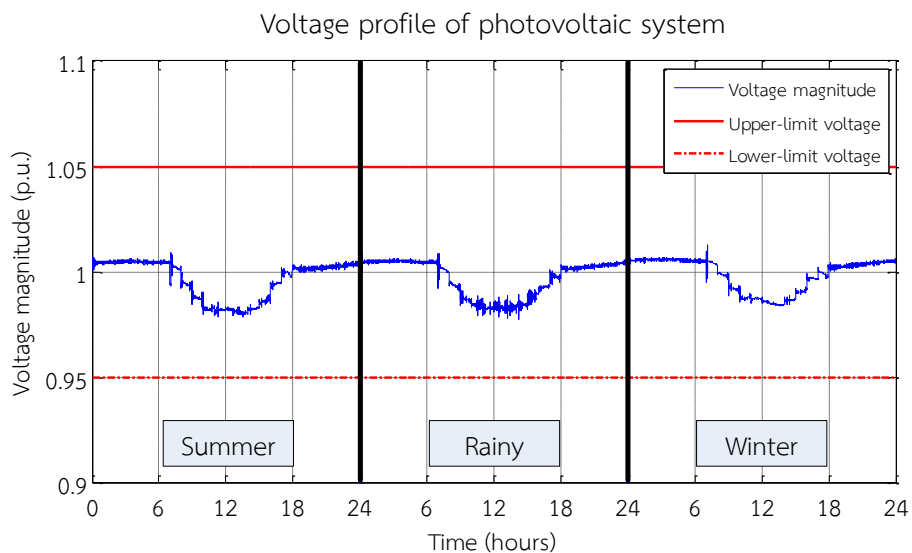
จากภาพที่ 6.29 ซึ่งแสดงตัวอย่างกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์หลังจากติดตั้งแบตเตอรี่ที่คำนวณได้ พบว่า กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีการแกว่งเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ ซึ่งแสดงในภาพที่ 6.26 ดังนั้นความถี่ทางไฟฟ้าและแรงดันของระบบจึงเกิดการแกว่งเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในภาพที่ 6.30 และภาพที่ 6.31

### ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าจริงจากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์



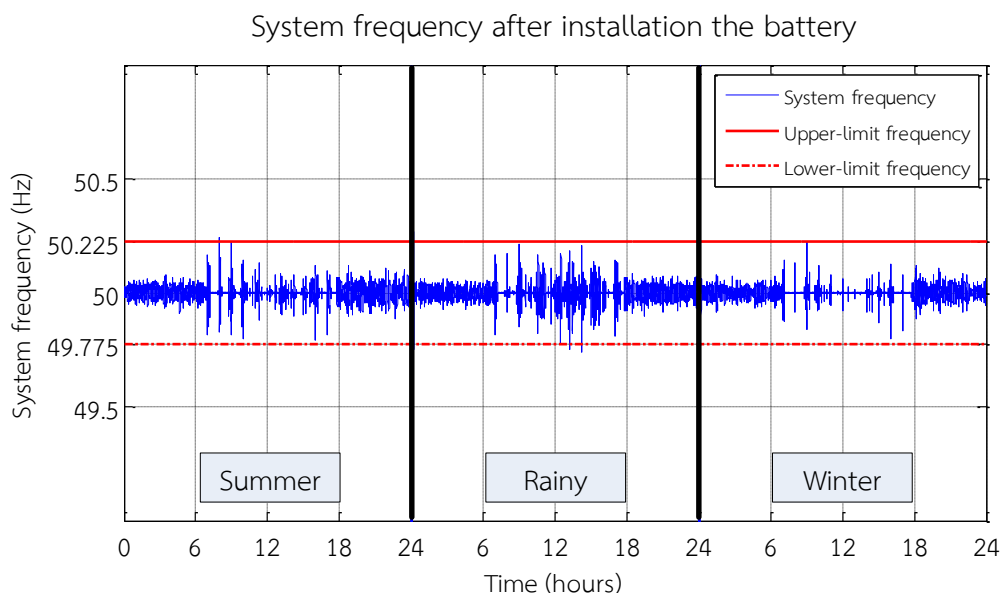
ภาพที่ 6.29 ตัวอย่างกำลังไฟฟ้าจริงที่ได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์  
หลังการติดตั้งแบตเตอรี่ที่คำนวณได้

### ผลการทดสอบแรงดันของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพที่ 6.30 ตัวอย่างขนาดของแรงดันไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์  
หลังการติดตั้งแบตเตอรี่ที่คำนวณได้

## ผลการทดสอบความถี่ไฟฟ้าของระบบ



ภาพที่ 6.31 ตัวอย่างผลความถี่ของระบบหลังการติดตั้งแบตเตอรี่ที่คำนวณได้

ทั้งนี้ ภาพที่ 6.29 ยังแสดงให้เห็นอีกว่า กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้บางส่วนมีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้ามรวมที่ต้องการให้ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายสู่ระบบไฟฟ้า หรือ  $P_{set}$  ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดของชุดแบตเตอรี่ที่เล็กลงนี้ ไม่สามารถช่วยรับกำลังไฟฟ้าที่เกินจากความต้องการได้ทั้งหมด นอกจากนี้ ชุดแบตเตอรี่ยังไม่สามารถช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ต่ำกว่าความต้องการได้ทั้งหมดอีกด้วย เนื่องจากในขณะที่กำลังไฟฟ้าที่ต่ำกว่าความต้องการนั้น กำลังไฟฟ้าที่แบตเตอรี่ต้องจ่ายชดเชยเกินความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้าของชุดแบตเตอรี่ที่มีขนาดเล็กลงนี้

จากผลการคำนวณที่แสดงข้างต้น กำลังไฟฟ้ามรวมที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ส่งผลให้ขนาดแรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าบริเวณนั้นเปลี่ยนแปลงไป ในทำนองเดียวกันกับลักษณะการแกว่งของขนาดแรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าก่อนการติดตั้งชุดแบตเตอรี่ กล่าวคือ แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความถี่จะแปรผันตามกำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ โดยในกรณีที่ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้ามรวมได้สูงขึ้น ความถี่ของระบบไฟฟ้าจะสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากทางด้านระบบไฟฟ้าจะมองเห็นโหลดมีค่าลดลง ส่งผลให้ความถี่ของระบบสูงขึ้น และในทางตรงข้าม เมื่อระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้ามรวมได้ต่ำลง ความถี่ของระบบไฟฟ้าจะต่ำลงตามไปด้วย เนื่องจากทางด้านระบบไฟฟ้าจะมองเห็นโหลดมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ความถี่ของระบบต่ำลง

ในส่วนการแกว่งของขนาดแรงดันพบว่า ขนาดแรงดันยังคงมีแนวโน้มแปรผกผันกับความต้องการไฟฟ้าหรือโหลด และแปรตามกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตาม การแกว่งของแรงดันยังคงรักษาเสถียรภาพได้จากการควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ซึ่งโครนัสในส่วนของการรักษาขนาดแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator หรือ AVR) และส่วนลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า (Power System Stabilizer หรือ PSS) ที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวแทนของโครงข่ายไฟฟ้าส่วนที่ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่ออยู่



## บทที่ 7

### สรุปผลงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการคำนวณหาขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ เพื่อช่วยลดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าอันเนื่องมาจากความไม่แน่นอนของความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมซึ่งขึ้นอยู่กับศักยภาพความเข้มแสงอาทิตย์ของแต่ละพื้นที่ รวมถึงสภาพอากาศในแต่ละฤดูกาล โดยปัญหาที่เกิดจากการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้นี้ คือ แรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าบริเวณที่มีระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่ออยู่จะเกิดการแกว่งตามไปด้วย ซึ่งหากปล่อยให้กำลังไฟฟ้าที่มีความไม่แน่นอนนี้ผ่านเข้าสู่ระบบไฟฟ้าโดยไม่ติดตั้งอุปกรณ์กักเก็บพลังงานสำหรับช่วยลดการแกว่งแล้ว อาจทำให้ระบบไฟฟ้าเกิดปัญหาในด้านเสถียรภาพและคุณภาพไฟฟ้าได้ ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้แบตเตอรี่เพื่อช่วยรับกำลังไฟฟ้า เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ เกินจากระดับกำลังการผลิตที่ต้องการ และในทางตรงกันข้าม แบตเตอรี่จะช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้า เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่ำกว่าระดับกำลังการผลิตที่ต้องการเช่นกัน ด้วยสาเหตุและแนวทางแก้ปัญหาดังกล่าวมานี้ จึงเห็นว่าแบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่สามารถช่วยลดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้า แรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าบริเวณดังกล่าวได้

ทั้งนี้ สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง คือขนาดความจุที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ เนื่องจากหากกำหนดขนาดของแบตเตอรี่ต่ำเกินไป แบตเตอรี่ดังกล่าวจะไม่สามารถลดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะกำลังไฟฟ้าที่ต้องการให้แบตเตอรี่ช่วยรับหรือจ่าย จะสูงกว่าความสามารถในการรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าของแบตเตอรี่ แต่หากกำหนดขนาดของแบตเตอรี่สูงจนเกินไป จะส่งผลต่อต้นทุนในการผลิตไฟฟ้า เพราะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการลงทุนเกินความจำเป็น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการกำหนดขนาดของแบตเตอรี่ที่ใช้งานกับระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์นี้อย่างเหมาะสม

ขั้นตอนในการวิเคราะห์ขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่เพื่อใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์โดยคำนึงถึงผลของกำลังไฟฟ้า แรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าบริเวณที่มีระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งอยู่นี้ เริ่มจากการจำลองความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในแต่ละช่วงเวลาด้วยแบบจำลองที่นำเสนอ ซึ่งแบบจำลองความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่นำเสนอนี้ได้พิจารณาถึงผลของความไม่แน่นอนด้วยกระบวนการสุ่มที่แปรตามเวลาและความขึ้นต่อกันระหว่างความเข้มแสงอาทิตย์กับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม จากนั้น ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมที่สุ่มได้นี้จะถูกแปลงให้กลายเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสตรงด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 5 พารามิเตอร์ แล้วจึงเปลี่ยนกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่คำนวณได้นี้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าด้วยแบบจำลองเชิงพลวัตของอินเวอร์เตอร์แบบ Double Stage ซึ่งถือเป็นตัวแทนของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อทราบกำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้แล้ว จึงทำการคำนวณค่าแรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าบริเวณที่มีระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์นี้เชื่อมต่ออยู่ โดยอาศัยแบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ร่วมกับแบบจำลองกำลังไฟฟ้าจริงซึ่งมีขนาดขึ้นอยู่กับกระบวนการสุ่ม มาเป็นตัวแทนของความต้องการกำลังไฟฟ้าในบริเวณนั้นตามแต่ละช่วงเวลา ข้อดีของแบบจำลองที่ใช้กันนี้ คือสามารถคำนวณตัวแปรต่างๆ ของระบบไฟฟ้าได้ใกล้เคียงความจริง

หลังจากทราบตัวแปรต่างๆของระบบไฟฟ้าที่แต่ละช่วงเวลาแล้ว จึงทำการกำหนดขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ โดยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นแบตเตอรี่ที่มีราคาถูก มีบริษัทผู้ผลิตหลายราย จึงมีหลายขนาดและหลายชนิดให้เลือกใช้งานได้ตรงตามความต้องการ อีกทั้งแบตเตอรี่ชนิดนี้ยังมีความทนทานและไม่ต้องการการบำรุงรักษามาก โดยการกำหนดขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ เริ่มจากการกำหนดกำลังไฟฟ้าที่ต้องการให้ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายเข้าสู่ระบบโดยมีการแกว่งน้อยที่สุดหรือมีกำลังขาออกสู่ระบบไฟฟ้าสม่ำเสมอมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ จากนั้นจึงคำนวณหาขนาดของแบตเตอรี่ที่ต้องการในช่วงเวลานั้น โดยกำหนดให้ขนาดของแบตเตอรี่ต้องสามารถรับหรือจ่ายกำลังไฟฟ้าในส่วนที่เป็นผลต่างระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ต้องการ และกำลังไฟฟ้าที่ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ ณ ขณะนั้น วิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่ในเบื้องต้นต้องสามารถรองรับกำลังไฟฟ้าได้ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 95 ของเหตุการณ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้น เมื่อทราบขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่แล้ว ขั้นตอนต่อมาคือ การคำนวณหาจำนวนของแบตเตอรี่ที่ต้องนำมาต่อเป็นชุดแบตเตอรี่ จากนั้นจึงนำขนาดของชุดแบตเตอรี่ที่คำนวณได้ไปทดสอบกับระบบทดสอบที่กำหนดขึ้น เพื่อดูผลของแบตเตอรี่ที่มีต่อกำลังไฟฟ้า แรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าบริเวณนั้น

จากผลการทดสอบพบว่า กำลังไฟฟ้ารวมที่ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้หลังจากติดตั้งแบตเตอรี่ขนาดดังกล่าว จะมีการแกว่งอยู่ในกรอบที่ค่อนข้างแคบ ส่งผลให้ความถี่ทางไฟฟ้าและขนาดแรงดันของระบบไฟฟ้ามีการแกว่งอยู่ในกรอบที่แคบตามไปด้วย ซึ่งสามารถรับรองได้ว่า การเบี่ยงเบนของความถี่และขนาดแรงดันของระบบไฟฟ้าจะอยู่ในช่วงที่กำหนดแน่นอน ดังนั้น ขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่จึงสามารถปรับลดลงได้อีก โดยที่การเบี่ยงเบนของความถี่และแรงดันจากช่วงการยอมรับยังคงต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

การปรับลดขนาดของแบตเตอรี่สามารถทำได้โดยการลดจำนวนแถวของแบตเตอรี่ที่นำมาต่อขนานกันลงด้วยวิธี Bisection โดยมีเงื่อนไขว่าขนาดที่เหมาะสมของแบตเตอรี่จะต้องเป็นขนาดที่เล็กที่สุดซึ่งยังคงทำให้ดัชนีการเบี่ยงเบนความถี่จากช่วงการยอมรับ ( $FD$ ) และดัชนีการเบี่ยงเบนแรงดันจากช่วงการยอมรับ ( $VD$ ) ยังอยู่ภายในเกณฑ์ที่กำหนด

จากการทดสอบพบว่าได้ผลเป็นที่น่าพอใจ เนื่องจาก เมื่อติดตั้งชุดแบตเตอรี่ตามขนาดที่คำนวณได้แล้ว สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า แรงดันและความถี่ของระบบไฟฟ้าได้อย่างมีนัยสำคัญ

## รายการอ้างอิง

- [1] ไทยนิวส์. “ลพบุรี โซลาร์” เริ่มเดินเครื่องเชิงพาณิชย์แล้ว. [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: <http://www.thainews-online.com/index.php?mo=14&newsid=297566> [2554, ธันวาคม]
- [2] ธนาคารกสิกรไทย. กสิกรไทยนำร่อง Infra Fund พลังงานแสงอาทิตย์. [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: <http://www.kasikornbank.com/th/whathot/pages/InfraFund.aspx> [2555, กรกฎาคม]
- [3] พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กรม. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ.2555-2564). [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: [www.dede.go.th/dede/images/stories/aedp25.pdf](http://www.dede.go.th/dede/images/stories/aedp25.pdf) [2556, มกราคม]
- [4] Canova, A., Giaccone, L., Spertino, F., and Tartaglia, M. Electrical impact of photovoltaic plant in distributed network. IEEE Transactions on Industry Applications 45, 1 (January 2009) : 341-347.
- [5] Chowdhury, B. H. Effect of central station photovoltaic plan on power system security. Photovoltaic Specialist Conference, 1990, Conference Record of Twenty-First IEEE 2 (May 1990) : 831-835.
- [6] Yan, R., and Saha, T. K. Investigation of voltage variations in unbalanced distribution systems due to high photovoltaic penetrations. Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE (July 2011) : 1-8.
- [7] Tan, Y. T., and Kirschen, D. S. Impact on the power system of a large penetration of photovoltaic generation. Power Engineering Society General Meeting, 2007 IEEE (June 2007) : 1-8.
- [8] Ari, G. K., and Baghzouz, Y. Impact of high PV penetration on voltage regulation in electrical distribution systems. International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), 2011 (June 2011) : 744-748.
- [9] Datta, M., Senjyu, T., Yona, A., Funabashi, T., and Kim, C. H. A coordinated control method for leveling PV output power fluctuations of PV–diesel hybrid systems connected to isolated power utility. IEEE Transactions on Energy Conversion 24, 1 (March 2009) : 153-162.
- [10] Senjyu, T., Datta, M., Yona, A., Sekine, H., and Funabashi, T. A new method for smoothing output power fluctuations of PV system connected to small power utility. The 7<sup>th</sup> International Conference on Power Electronics (October 2007) : 829-834.
- [11] Senjyu, T., Datta, M., Yona, A., and Kim, C. H. A control method for small utility connected large PV system to reduce frequency deviation using a

- minimal-order observer. IEEE Transactions on Energy Conversion 24, 2 (June 2009) : 520-528.
- [12] Tokudome, M., Tanaka, K., Senjyu, T., Yona, A., and Funabashi, T. Frequency and voltage control of small power systems by decentralized controllable loads. International Conference on Power Electronics and Drive systems, 2009 (November 2009) : 666-671.
- [13] Kakimoto, N., Satoh, H., Takayama, S., and Nakamura, K. Ramp-rate control of photovoltaic generator with electric double-layer capacitor. IEEE Transactions On Energy Conversion 24, 2, (June 2009) : 465-473.
- [14] Enslin, J. Network impacts of high penetration of photovoltaic solar power systems. Power Engineering Society General Meeting, 2010 IEEE (July 2010) : 1-5.
- [15] Omran, W. A., Kazerani, M., and Salama, M. M. A. Investigation of methods for reduction of power fluctuations generated from large grid-connected photovoltaic systems. IEEE Transactions on Energy Conversion 26, 1 (March 2011) : 318-327.
- [16] Fakham, H., Lu, D., and Francois, B. Power control design of a battery charger in a hybrid active PV generator for load-following applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics 58, 1 (January 2011) : 85-94.
- [17] Teleke, S., Baran, M. E., Bhattacharya, S., and Huang, A. Q. Rule-based control of battery energy storage for dispatching intermittent renewable sources. IEEE Transactions on Sustainable Energy 1, 3 (October 2010) : 117-124.
- [18] Riffonneau, Y., Bacha, S., Barruel, F., and Ploix, S. Optimal power flow management for grid connected PV systems with batteries. IEEE Transactions on Sustainable Energy 2, 3 (July 2011) : 309-320.
- [19] Lu, B., and Shahidehpour, M. Short-term scheduling of battery in a grid-connected PV/battery system. IEEE Transactions on Power Systems 20, 2 (May 2005) : 1053-1061.
- [20] Marwali, K. C., Ma, H., Shahidehpour, S. M., and Abdul-Rahman, K. H. Short term generation scheduling in photovoltaic-utility grid with battery storage. IEEE Transactions on Power Systems 13, 3 (August 1998) : 1057-1062.
- [21] Chiang, S. J., Chang, K. T., and Yen, C. Y. Residential photovoltaic energy storage system. IEEE Transactions on Industrial Electronics 45, 3 (June 1998) : 385-394.
- [22] Datta, M., Senjyu, T., Yona, A., Funabashi, T., and Kim, C. H. A frequency-control

- approach by photovoltaic generator in a PV–diesel hybrid power system. IEEE Transactions on Energy Conversion 26, 2 (June 2011) : 559-571.
- [23] Ru, Y., Kleissl, J., and Martinez, S. Storage size determination for grid-connected photovoltaic systems. IEEE Transactions on Sustainable Energy 4, 1 (January 2013) : 68-81.
- [24] Venu, C., Riffonneau, Y., Bacha, S., and Baghzouz, Y. Battery storage system sizing in distribution feeders with distributed photovoltaic systems. PowerTech, 2009 IEEE Bucharest (July 2009) : 1-5.
- [25] Lorenz, E., Hurka, J., Heinemann, D., and Beyer, H. G. Irradiance forecasting for the power prediction of grid-connected photovoltaic systems. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 2, 1 (March 2009) : 2-10.
- [26] Moreno-Muñoz, A., De La Rosa, J. J. G., Posadillo, R., and Pallarés, V. Short term forecasting of solar radiation. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2008 (June 2008) : 1537-1541.
- [27] Kjaer, S.B., Pedersen, J.K., and Blaabjerg, F.A. Review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules. IEEE Transactions on Industry Applications 41, 5 (October 2005) : 1292-1306.
- [28] Brano, V. L., Orioli, A., Ciulla, G., and Gangi, A. D. An improved five-parameter model for photovoltaic modules. Solar Energy Materials & Solar Cells 94 (2010) : 1358-1370.
- [29] EvoEnergy Photovoltaic Cells. Solar PV. [Online]. 2010. Available from: <http://www.evoenergy.co.uk/wpcontent/uploads/2010/07/photovoltaic-cells-pn-junction1.jpg> [2012, January]
- [30] ชาย ชีวะเกตุ และชนานันท์ บัวเขียว. การผลิตไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์. [ออนไลน์]. 2543. แหล่งที่มา: <http://www.eppo.go.th/vrs/VRS49-09-Solar.html> [2555, มกราคม]
- [31] Gilbert, M. Renewable and efficient electric power systems. Singapore: Wiley & Sons, 2004.
- [32] Goetzberger, A., and Hoffmann, V. U. Photovoltaic Solar Energy Generation. Berlin: Springer, 2010
- [33] พัฒนาพลังงานทดแทน ฝ่ายแผนงานพัฒนาโรงไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิต, กอง. ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์. [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา: [http://www2.egat.co.th/re/solarcell/solarcell\\_pg5.htm](http://www2.egat.co.th/re/solarcell/solarcell_pg5.htm) [2555, กรกฎาคม]
- [34] บริษัท ลีโอนิคส์ จำกัด. ความรู้เกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์. [ออนไลน์]. 2546. แหล่งที่มา:

- [http://www.leonics.co.th/html/th/aboutpower/solar\\_knowledge.php](http://www.leonics.co.th/html/th/aboutpower/solar_knowledge.php)  
[2555, กรกฎาคม]
- [35] National Renewable Energy Laboratory (NREL). Research Cell Efficiency Records. [Online]. 2012. Available from: <http://www.nrel.gov/ncpv> [2012, July]
- [36] Sera, D., Teodorescu, R., and Rodriguez P. PV panel model based on datasheet values. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2007 (June 2007) : 2392-2396.
- [37] Soto, W. D., Klein, S. A., and Beckman, W. A. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. Solar Energy 80 (2006) : 78-88
- [38] Kyocera company limited. KC175GHT-2 high efficiency multicrystal photovoltaic module datasheet. [Online]. 2007. Available from: [http://www.solar-id.nl/kyocera\\_bestanden/KC175GHT-2.pdf](http://www.solar-id.nl/kyocera_bestanden/KC175GHT-2.pdf) [2012, July]
- [39] Ruhi, B., Joseph, K., and Govindasamy, T. Nominal Operating Cell Temperature (NOCT): Effects of module size, power, load and solar spectrum. [Online]. 2010. Available from: <http://www.tuvptl.com/doc/abstract-NOCT.pdf> [2012, July]
- [40] Christiana, H., and Stuart, B. Photovoltaic Education Network. [Online]. 2010. Available from: <http://pvcdrum.pveducation.org/MODULE/NOCT.htm> [2012, January]
- [41] โคทม อารียา. อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 1-2. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2544.
- [42] Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo G., and Vitelli, M. Optimization of perturb and perturb and observe maximum power point tracking method. IEEE Transactions on Power Electronics 20, 4 (July 2005) : 963–973.
- [43] Alepuz, S., Busquets-Monge, S., Bordonau, J., Gago, J., Gonzalez, D., and Balcells, J. Interfacing renewable energy sources to the utility grid using a three-level inverter. IEEE Transactions on Industry Applications 41, 5 (October 2006): 1504-1511.
- [44] Yazdani, A., and Iravani, R. An accurate model for the dc-side voltage control of the neutral point diode clamped converter. IEEE Transactions on Power Delivery 21, 1 (January 2006) : 185–193.
- [45] Dash, P. P. Design methodology and stability analysis for a photovoltaic (PV) plant interfaced with a distribution network. Master's Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, School of Graduate Studies and Postdoctoral Studies, The University of Western Ontario, 2008
- [46] กรพินธ์ เหลืองสมบุรณ์. คอปปลาของตัวแปรสุ่มที่ขึ้นต่อกัน. โครงการปริญญาบัณฑิต,

ภาควิชา คณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553

- [47] Wilson, A., and Ghahramani, Z. Copula Process. [Online] 2010. Available from: <http://arxiv.org/pdf/1006.1350.pdf> [2012, May]
- [48] Embrecht, P. Copulas: A personal view. [Online]. 2009. Available from: [www.math.ethz.ch/~baltes/ftp/copulas\\_personalview.pdf](http://www.math.ethz.ch/~baltes/ftp/copulas_personalview.pdf) [2012, May]
- [49] Cherubini, U., Luciano, E., and Vecchiato, W. Copula Methods in Finance. West Sussex: John Wiley & Sons, 2004
- [50] Chirapongsananurak, P. and Hoonchareon, N. Design of a Controller for DFIG-Based Wind Power Generation Using Model Predictive Control. Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) (May 2010) : 833–837.
- [51] Ni, B., and Sourkounis, C. Control Strategies for Energy Storage to Smooth Power Fluctuations of Wind Parks. MELECON, IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (April 2010) : 973–978.
- [52] Bi, D., Wang, S., Ge, B., and Yang, X. Control Strategy of Grid-connected Photovoltaic System with Energy Storage. Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International (August 2011).
- [53] สรญา ยงประยูร. ระบบสะสมพลังงาน (Energy Storage) บัญชีออมทรัพย์ทางพลังงาน. [ออนไลน์]. 2549. แหล่งที่มา: [www.eppo.go.th/tank/sauraya-storage.doc](http://www.eppo.go.th/tank/sauraya-storage.doc) [2556, มกราคม]
- [54] Battery University. Lern about batteries. [Online]. 2010. Available from: <http://www.batteryuniversity.com> [2012, August].
- [55] Tremblay, O., and Dessaint, L. A. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications. World Electric Vehicle Journal 3 (May 2009).
- [56] วิจัยพลังงาน, สถาบัน. โครงการงานประเมินมาตรฐานคุณภาพบริการไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยพลังงาน, 2553. (อัดสำเนา)
- [57] Kundur, P. Power System Stability and Control. Singapore : McGraw-Hill, 1994.
- [58] Rolls UK & Europe is a division of Barden UK Ltd. S12-290AGM datasheet. [Online]. Available from: <http://www.rolls-battery.com/pdf/S12-290AGM.pdf> [2011, February]
- [59] HindlePower. AT30 SERIES 130Vdc datasheet. [Online]. Available from: <http://www/hindlepowerinc.com> [2012, August]

ภาคผนวก



**ภาคผนวก ก**  
**ข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์**  
**ระบบแบตเตอรี่ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า**

ในภาคผนวกนี้นำเสนอข้อมูลในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบแบตเตอรี่ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังต่อไปนี้

**ก.1 ข้อมูลระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์**

ข้อมูลทางเทคนิคของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าตามตารางที่ ก.1 สำหรับตัวแปรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 5 ตัวแปรที่คำนวณได้จากวิธีการที่นำเสนอในบทที่ 2 ได้แสดงในตารางที่ ก.2 และข้อมูลทางเทคนิคในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ได้แสดงในตารางที่ ก.3 ซึ่งอ้างอิงตามข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์รุ่น Leonics GTP-537 สำหรับค่าตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองอินเวอร์เตอร์แบบ Double Stage ได้แสดงในตารางที่ ก.4 ถึง ก.5 โดยค่าตัวแปรของคอนเวอร์เตอร์ทบแรงดันมีค่าตามตารางที่ ก.4 ส่วนค่าตัวแปรของอินเวอร์เตอร์แบบ NPC มีค่าตามตารางที่ ก.5 ในส่วนของค่าเริ่มต้นของจุดทำงานและค่าสัญญาณอ้างอิงของการควบคุมในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าตามตาราง ก.6 และ ก.7 ตามลำดับ สุดท้ายคือค่าตัวแปรควบคุมต่างๆ ได้แก่ ตัวควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ตัวแปรที่ใช้ควบคุมกระแสฟลักซ์ไฟฟ้ากระแสสลับ และแรงดันไฟตรง จะแสดงในตารางที่ ก.8 ถึง ก.9

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลทางเทคนิคของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC175GHT-2

ข้อมูลทางเทคนิคของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	ค่าของตัวแปร	หน่วย
กระแสไฟฟ้าที่กัลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะมาตรฐาน ( $I_{mpp,n}$ )	7.42	A
แรงดันไฟฟ้าที่กัลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะมาตรฐาน ( $V_{mpp,n}$ )	23.6	V
กำลังไฟฟ้าที่สภาวะมาตรฐาน ( $P_{mpp,n}$ )	175	W
กระแสลัดวงจรที่สภาวะมาตรฐาน ( $I_{sc,n}$ )	8.09	A
แรงดันเปิดวงจรที่สภาวะมาตรฐาน ( $V_{oc,n}$ )	29.2	V
สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงดันเปิดวงจร ( $K_V$ )	-0.0109	$V/^\circ C$
สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจร ( $K_I$ )	0.00318	$A/^\circ C$
ค่า Nominal Operating Cell Temperature ( $NOCT$ )	47	$^\circ C$
จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรม ( $n_s$ )	48	เซลล์

ตารางที่ ก.2 ค่าตัวแปรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KC175GHT-2 ตามแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 5 พารามิเตอร์

ตัวแปรในแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์	ค่าของตัวแปร	หน่วย
$I_{ph,n}$	8.0926	A
$I_{o,n}$	$1.1693 \times 10^{-6}$	A
$R_{s,n}$	0.106	$\Omega$
$R_{sh,n}$	325.5401	$\Omega$
$V_{T,n}$	0.0387	V

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลทางเทคนิคของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

ข้อมูลทางเทคนิคของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์	ค่าของตัวแปร	หน่วย
แรงดันโครงข่ายไฟฟ้า	22	$kV_{L-L}$
แรงดันขาออกจากรีเวอร์เตอร์	416	$V_{L-L}$
ความถี่	50	Hz
กำลังไฟฟ้าพิกัด/อินเวอร์เตอร์	120	kW
จำนวนอินเวอร์เตอร์	67	ตัว
กำลังการผลิตติดตั้ง (Install Capacity)	8	MW
จำนวนระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด/อินเวอร์เตอร์	12	ระบบ
กำลังไฟฟ้าพิกัด/ระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด	10	kW
ตัวประกอบกำลังพิกัด	0.98	-
แรงดันสูงสุดของแรงดัน ณ กำลังไฟฟ้าสูงสุด	480	V
แรงดันต่ำสุดของแรงดัน ณ กำลังไฟฟ้าสูงสุด	125	V
จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาต่ออนุกรม/ชุดการต่อแบบอนุกรม ( $N_s$ )	10	แผง
จำนวนการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน/ระบบติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $N_p$ )	6	ชุด
จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์	48,240	แผง

ตารางที่ ก.4 ค่าตัวแปรของคอนเวอร์เตอร์ทบแรงดันในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

ตัวแปรของ คอนเวอร์เตอร์ทบแรงดัน	ค่าของตัวแปร	หน่วย
$C_{pv}$	2	mF
$L_{boost}$	10	mH

ตารางที่ ก.5 ค่าตัวแปรของอินเวอร์เตอร์ NPC ในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

ตัวแปรของ อินเวอร์เตอร์ NPC	ค่าของตัวแปร	หน่วย
$C_{DC}$	25	mF
$R_p$	25	k $\Omega$
$R$	3.5	m $\Omega$
$L$	3	mH

ตารางที่ ก.6 ค่าเริ่มต้นของจุดทำงานในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

จุดทำงาน	ค่าของตัวแปร	หน่วย
$V_{PV,0}$	$0.9V_{oc,array}$	V
$P_{PV,0}$	0	W
$D_0$	0.4 – 0.6	-
$V_{DC,0}$	600	V
$i_{d,0}$	0	pu
$i_{q,0}$	0	pu
$x_{1,0}$	0	-
$x_{2,0}$	0	-

ตารางที่ ก.7 ค่าสัญญาณอ้างอิงของการควบคุมอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

ค่าสัญญาณอ้างอิง	ค่าของตัวแปร	หน่วย
$i_{sq,ref}$	0	pu

ตารางที่ ก.8 ตัวแปรที่ใช้ควบคุมการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ตัวแปรควบคุม	ค่าการควบคุม	หน่วย
$\Delta d$	0.01	-
$T_a$	0.1	s

ตารางที่ ก.9 ตัวแปรที่ใช้ควบคุมกระแสฝั่งไฟฟ้ากระแสสลับ และแรงดันไฟตรงในอินเวอร์เตอร์

ตัวแปรควบคุม	ค่าการควบคุม	หน่วย
$\tau_i$	5	ms
$\alpha_1$	-1	-
$\alpha_2$	-5	-
$\alpha_3$	1000	-

## ก.2 ข้อมูลระบบแบตเตอรี่

ข้อมูลทางเทคนิคของแบตเตอรี่และข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์มีค่าตามตารางที่ ก.10 และ ก.11 ตามลำดับ โดยข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์จะอ้างอิงตามเครื่องควบคุมการประจรรุ่น HindlePower AT30 series 130Vdc เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ ใช้แบบจำลองอินเวอร์เตอร์ในระบบแบตเตอรี่ เดียวกันกับแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ในระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นค่าตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองอินเวอร์เตอร์ NPC ในระบบแบตเตอรี่จึงแสดงตามตารางที่ ก.12 ในการคำนวณหาขนาดแบตเตอรี่แต่ละช่วงเวลาใน 1 วันของแต่ละฤดูกาลให้ใช้ค่าเริ่มต้นของจุดทำงานของแบบจำลองแบตเตอรี่และอินเวอร์เตอร์ตามตารางที่ ก.13 และ ก.14 ตามลำดับ

ตารางที่ ก.10 ข้อมูลทางเทคนิคของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่วรุ่น S12-290AGM

ข้อมูลทางเทคนิคของแบตเตอรี่ชนิดกรดตะกั่ว	ค่าของตัวแปร	หน่วย
แรงดันส่วนที่คงที่ของแบตเตอรี่ ( $E_0$ )	12.4526	V
ความต้านทานภายในแบตเตอรี่ ( $R$ )	0.0018	$\Omega$
ความต้านทานโพลาไรเซชัน หรือค่าคงที่โพลาไรเซชัน ( $K$ )	0.0016	$\Omega$
ความจุของแบตเตอรี่ขนาดมาตรฐาน 1 ลูก ( $Q$ )	260	Ah
แอมพลิจูดของย่านเอกซ์โพเนนเชียล ( $A$ )	0.1408	V
ค่าคงที่ทางเวลาผกผันของย่านเอกซ์โพเนนเชียล ( $B$ )	0.3297	A/h

ตารางที่ ก.11 ข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์ในระบบแบตเตอรี่

ข้อมูลทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์	ค่าของตัวแปร	หน่วย
แรงดันไฟสลับ	416	$V_{L-L}$
แรงดันไฟตรง	130	V
กระแสพิสัย	50	A
ค่าคงที่ทางเวลาผกผันของย่านเอกซ์โพเนน ( $B$ )	0.3297	A/h

ตารางที่ ก.12 ค่าตัวแปรของอินเวอร์เตอร์ NPC ในระบบแบตเตอรี่

ตัวแปรของอินเวอร์เตอร์ NPC	ค่าของตัวแปร	หน่วย
$C_{DC}$	25	mF
$R_P$	25	k $\Omega$
$R$	3.5	m $\Omega$
$L$	3	mH

ตารางที่ ก.13 ค่าเริ่มต้นของจุดทำงานในระบบแบตเตอรี่

จุดทำงาน	ค่าของตัวแปร	หน่วย
$Q_0$	$Q$	Ah
$Exp_0$	0	V
$V_{DC,0}$	130	V
$i_{d,0}$	0	A
$i_{q,0}$	0	A
$x_{1,0}$	0	-
$x_{2,0}$	0	-

ตารางที่ ก.14 ค่าสัญญาณอ้างอิงของการควบคุมอินเวอร์เตอร์ในระบบแบตเตอรี่

ค่าสัญญาณอ้างอิง	ค่าของตัวแปร	หน่วย
$i_{sq,ref}$	0	pu

### ก.3 ข้อมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

สุดท้ายนี้ ภาคผนวกได้แสดงแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้เป็นตัวแทนของโครงข่ายไฟฟ้าที่มีระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้งอยู่ดังแสดงในสมการที่ ก.1 ถึง ก.4 และค่าตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้แสดงตามตารางที่ ก.15

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้แบบจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสแบบ 4 สถานะ (4-State Model) [33] ซึ่งแสดงในสมการสถานะดังต่อไปนี้

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}}(-E'_q - (X_d - X'_d)i_d + E_{fd}) \quad (ก.1)$$

$$\frac{dE'_d}{dt} = \frac{1}{T'_{qo}}(-E'_d - (X_q - X'_q)i_q) \quad (ก.2)$$

$$\frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H}(P_{mech} - P_{em}) \quad (ก.3)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_{base}\Delta\omega_r \quad (ก.4)$$

เมื่อ

$E'_q$	คือ	ตัวแปรสถานะแทนฟลักซ์ของแรงดันสนามบนแกน $d$ (pu)
$E'_d$	คือ	ตัวแปรสถานะแทนฟลักซ์ของแรงดันสนามบนแกน $q$ (pu)
$\Delta\omega_r$	คือ	ความเบี่ยงเบนของความถี่ (Frequency Deviation) (pu)
$\delta$	คือ	มุมโรเตอร์
$i_d, i_q$	คือ	กระแสไฟฟ้าบนแกน $d$ และแกน $q$ ตามลำดับ (pu)
$E_{fd}$	คือ	แรงเคลื่อนไฟฟ้าสนาม (pu)
$P_{mech}$	คือ	กำลังทางกลที่ขับเคลื่อนแกนโรเตอร์ (pu)
$P_{em}$	คือ	กำลังทางไฟฟ้า (pu) โดยที่ $P_{em} = E'_q i_q + E'_d i_d + (X'_q - X'_d) i_d i_q$
$X_d, X'_d$	คือ	รีแอกแตนซ์สถานะชั่วคราว (Transient Reactance) และรีแอกแตนซ์สถานะชั่วคราวย่อย (Sub-transient Reactance) บนแกน $d$ ตามลำดับ (pu)
$X_q, X'_q$	คือ	รีแอกแตนซ์สถานะชั่วคราว (Transient Reactance) และรีแอกแตนซ์สถานะชั่วคราวย่อย (Sub-transient Reactance) บนแกน $q$ ตามลำดับ (pu)
$T'_{do}, T'_{qo}$	คือ	ค่าคงตัวเวลาเปิดวงจรในสถานะชั่วคราว (s) (Transient Open-circuit Time Constant)
$H$	คือ	ค่าคงที่ความเฉื่อยของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (s)
$\omega_{base}$	คือ	ความถี่ฐานของระบบไฟฟ้า เท่ากับ 50 Hz

ตารางที่ ก.15 ค่าตัวแปรของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบทดสอบ

ตัวแปรของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	ค่าของตัวแปร	หน่วย
$H$	0.5	s
$X_d$	1.1	pu
$X_q$	0.65	pu
$X'_d$	0.26	pu
$X'_q$	0.13	pu
$T'_{do}$	7	s
$T'_{qo}$	1	s
$X_l$	0.19	pu
$R$	0	pu

ตารางที่ ก.16 ค่าตัวแปรในระบบกระตุ้น (Excitation System)

ตัวแปร	ค่าของตัวแปร	หน่วย
$K_a$	200	-
$T_r$	0.015	s
$E_{fd,max}$	7.0	pu
$E_{fd,min}$	-6.4	pu

ตารางที่ ก.17 ค่าตัวแปรในระบบเสถียรภาพไฟฟ้ากำลัง (Power System Stabilizer; PSS)

ตัวแปร	ค่าของตัวแปร	หน่วย
$K_s$	0.75	-
$T_w$	1.41	-
$T_1$	0.154	-
$T_2$	0.033	-
$V_{s,max}$	0.2	-
$V_{s,min}$	-0.2	-

## ภาคผนวก ข

### ข้อมูลของระบบทดสอบไฟฟ้ากำลัง

ในภาคผนวกนี้นำเสนอข้อมูลระบบทดสอบไฟฟ้ากำลังที่มีระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่ออยู่ ซึ่งระบบทดสอบนี้ใช้ค่าฐาน 50 MVA และ 22 kV

#### ข.1 ข้อมูลบัสของระบบ

ข้อมูลบัสซึ่งเป็นจุดทำงานเริ่มต้นของการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ ข.1 ดังนี้

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลบัสของระบบ

บัส	ประเภท	ความต้องการกำลังไฟฟ้า		อุปกรณ์ตัวต่อแบบขนาน		แรงดันสูงสุด (pu)	แรงดันต่ำสุด (pu)
		$P$ (MW)	$Q$ (MVA <sub>r</sub> )	$G_s$ (MW)	$B_s$ (MVA <sub>r</sub> )		
1	บัสควบคุมแรงดัน	X	0	0	0	1.05	0.95
2	โหลดบัส	Y	0	0	0	1.05	0.95
3	บัสควบคุมแรงดัน	0	0	0	0	1.05	0.95

หมายเหตุ : X คือ กำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่บัส 1 ซึ่งขึ้นกับสภาวะการทดสอบ

: Y คือ ความต้องการไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามกระบวนการสุ่ม

#### ข.2 ข้อมูลหม้อแปลง

หม้อแปลงแรงดันขึ้นที่ต่อระหว่างบัส 1 และ 2 มีค่ารีแอกแตนซ์ 0.10 pu มีค่าพิกัดกำลัง 10 MVA และพิกัดแรงดัน 22kV/416 V

#### ข.3 ข้อมูลสายส่ง

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ

สายส่ง	ไปบัส	จากบัส	ความต้านทาน (pu)	รีแอกแตนซ์ (pu)
1	1	2	0	0.10
2	2	3	0	0.15



### ภาคผนวก ค

#### ข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และความต้องการไฟฟ้า

ในภาคผนวกนี้ นำเสนอข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ความต้องการไฟฟ้าที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ดังแสดงต่อไปนี้

#### ค.1 ข้อมูลความเข้มแสงและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยรายชั่วโมงในแต่ละฤดูกาล

วิทยานิพนธ์นี้ นำข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยรายชั่วโมงของจังหวัดเชียงใหม่ที่วัดได้ในปี 2007 โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงฤดูร้อน คือ วันที่ 15 กุมภาพันธ์-15 พฤษภาคม ช่วงฤดูฝน คือ วันที่ 16 พฤษภาคม-15 ตุลาคม และช่วงฤดูหนาว คือ 16 ตุลาคม-14 กุมภาพันธ์ มาสร้างข้อมูลความเข้มแสงและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยรายชั่วโมงในแต่ละฤดูกาล ดังแสดงต่อไปนี้

ตาราง ค.1 ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยรายชั่วโมงในฤดูร้อน

ชั่วโมง	$G_{avg}$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_{avg}$ (°C)
07:00-08:00	81.35	22.13
08:00-09:00	240.66	24.59
09:00-10:00	441.68	26.99
10:00-11:00	610.79	29.11
11:00-12:00	740.97	20.98
12:00-13:00	779.50	32.43
13:00-14:00	731.92	33.53
14:00-15:00	632.51	34.15
15:00-16:00	494.78	34.28
16:00-17:00	308.52	34.04
17:00-18:00	134.64	32.93

ตาราง ค.2 ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยรายชั่วโมงในฤดูฝน

ชั่วโมง	$G_{avg}$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_{avg}$ (°C)
07:00-08:00	131.62	25.14
08:00-09:00	288.10	26.29
09:00-10:00	473.29	27.38
10:00-11:00	613.53	28.55
11:00-12:00	732.30	29.62
12:00-13:00	722.82	30.33
13:00-14:00	656.90	30.71
14:00-15:00	595.83	30.87
15:00-16:00	494.55	30.91
16:00-17:00	366.11	30.73
17:00-18:00	192.90	30.08

ตาราง ค.3 ความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยรายชั่วโมงในฤดูหนาว

ชั่วโมง	$G_{avg}$ (W/m <sup>2</sup> )	$T_{avg}$ (°C)
07:00-08:00	35.32	17.87
08:00-09:00	152.91	19.61
09:00-10:00	358.89	21.88
10:00-11:00	549.29	24.24
11:00-12:00	667.65	26.28
12:00-13:00	703.96	27.55
13:00-14:00	673.86	28.42
14:00-15:00	583.48	28.99
15:00-16:00	433.77	29.19
16:00-17:00	231.75	28.79
17:00-18:00	61.69	26.91

## ค.2 ข้อมูลค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มแสงและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

วิทยานิพนธ์นี้ นำข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยรายชั่วโมงในแต่ละฤดูกาลมาคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในแต่ละชั่วโมงด้วยวิธีการคำนวณที่กล่าวถึงในบทที่ 4 ซึ่งแสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ค.4 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเข้มแสงอาทิตย์ในแต่ละชั่วโมง

ชั่วโมง	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ( $\sigma_G$ )		
	ฤดูร้อน	ฤดูฝน	ฤดูหนาว
07:00-08:00	0.6784	0.4257	0.4774
08:00-09:00	0.4132	0.4305	0.3773
09:00-10:00	0.2857	0.3587	0.2874
10:00-11:00	0.2446	0.3019	0.2266
11:00-12:00	0.2208	0.3007	0.1816
12:00-13:00	0.2170	0.3214	0.2061
13:00-14:00	0.2494	0.3490	0.2144
14:00-15:00	0.2502	0.3754	0.2293
15:00-16:00	0.2823	0.3814	0.2426
16:00-17:00	0.3153	0.3737	0.2994
17:00-18:00	0.3933	0.5105	0.4676

ตาราง ค.5 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในแต่ละชั่วโมง

ชั่วโมง	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ( $\sigma_T$ )		
	ฤดูร้อน	ฤดูฝน	ฤดูหนาว
07:00-08:00	0.1630	0.0421	0.1789
08:00-09:00	0.1410	0.0504	0.1517
09:00-10:00	0.1146	0.0569	0.1241
10:00-11:00	0.0956	0.0632	0.0983
11:00-12:00	0.0867	0.0658	0.0800
12:00-13:00	0.0835	0.0668	0.0743
13:00-14:00	0.0843	0.0694	0.0714
14:00-15:00	0.0854	0.0739	0.0706
15:00-16:00	0.0903	0.0774	0.0749
16:00-17:00	0.0943	0.0742	0.0812
17:00-18:00	0.0991	0.0745	0.0829

### ค.3 ข้อมูลความต้องการไฟฟ้าเฉลี่ยรายชั่วโมงในแต่ละฤดูกาล

ข้อมูลความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยรายชั่วโมงที่ดัดแปลงจากข้อมูลความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยรายชั่วโมงในปี 2010 ให้มีค่าความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 50 เมกะวัตต์ แสดงดังนี้

ตาราง ค.6 ความต้องการกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยรายชั่วโมง

ชั่วโมง	ความต้องการไฟฟ้า		
	ฤดูร้อน	ฤดูฝน	ฤดูหนาว
00:00-01:00	41.31	39.75	36.63
01:00-02:00	40.22	38.82	35.75
02:00-03:00	39.25	38.01	35.07
03:00-04:00	38.65	37.63	34.79
04:00-05:00	39.04	38.25	35.45
05:00-06:00	40.83	40.45	37.93
06:00-07:00	39.66	39.38	38.20
07:00-08:00	42.27	41.62	38.99
08:00-09:00	46.55	45.78	42.59
09:00-10:00	48.24	47.32	44.04
10:00-11:00	49.11	48.22	44.89
11:00-12:00	46.51	45.57	42.42
12:00-13:00	47.30	46.25	43.14
13:00-14:00	49.91	48.83	45.71
14:00-15:00	49.62	48.49	45.57
15:00-16:00	48.61	47.73	45.05
16:00-17:00	45.78	45.29	42.94
17:00-18:00	44.98	45.67	44.99
18:00-19:00	49.86	49.68	48.43
19:00-20:00	50.00	49.35	46.46
20:00-21:00	48.78	47.60	44.39
21:00-22:00	47.11	45.62	42.20
22:00-23:00	45.53	43.88	40.64
23:00-24:00	42.86	41.23	38.03

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายฉัตรตฤณ ทองแสงเกิดวันที่ 13 มีนาคม พ.ศ. 2531 ที่จังหวัดลพบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2553 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2554