

การออกแบบและสร้างชุดต้นแบบของเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
สำหรับระบบผลิตไฟฟ้า โดยใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบซิงค์ด้วยวิธีการควบคุมจุดกำลังสูงสุด
แบบโมติฟายอะแดปทีฟการรบกวนและการสังเกต



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Design and Construction of a Prototype DC Power Optimizer for Photovoltaic
Generation Systems Using a Zeta Converter with Modified Adaptive
P&O Algorithm of MPPT



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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบและสร้างชุดต้นแบบของเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้า โดยใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบซิด้า ด้วยวิธีการควบคุมจุดกำลังสูงสุดแบบโมติฟายอะแดปทีฟการรบกวนและการสังเกต

โดย

นางสาวดวงพร เล็กอุทัย

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย เตชัสอนันต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย เตชัสอนันต์)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ภาณุวัฒน์ จันทร์ภักดี)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัชวาลย์ เจริญบุตร)

ดวงพร เล็กอุทัย : การออกแบบและสร้างชุดต้นแบบของเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับระบบผลิตไฟฟ้า โดยใช้วงจรถอกรวมตัวแบบซีต้า ด้วยวิธีการควบคุมจุดกำลังสูงสุดแบบโมติฟายอะแดปทีฟการรบกวนและการสังเกต (Design and Construction of a Prototype DC Power Optimizer for Photovoltaic Generation Systems Using a Zeta Converter with Modified Adaptive P&O Algorithm of MPPT) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ธวัชชัย เตชสุนันต์, 139 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แนะนำเสนอเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยประกอบด้วยวงจรถอกรวมตัวแบบซีต้าและกระบวนการหาจุดกำลังสูงสุดแบบโมติฟายอะแดปทีฟการรบกวนและการสังเกต เนื่องจากการต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับโหลดคงที่ จะทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด หากความเข้มแสงที่ฉายส่องให้กับแผงไม่เหมาะสมกับค่าความต้านทานโหลด เครื่องปรับจูนการทำงานนี้จะประพฤติตัวเสมือนโหลดที่สามารถปรับค่าความต้านทานได้อัตโนมัติ ช่วยให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับโหลดคงที่แม้จะถูกบังแสงแดด และเป็นกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ ความเข้มแสงขณะนั้น

วิทยานิพนธ์นี้ได้จำลองแบบโดยใช้โปรแกรม PSIM และสร้างชุดต้นแบบของเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสมเพื่อนำมาทดลองกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง ขนาด 20 วัตต์ และ 2 แผง อนุกรม รวม 40 วัตต์ ที่ความเข้มแสงเต็มที่ 100% หรือเท่ากับ 900 วัตต์/ตารางเมตร และที่ความเข้มแสงลดลงเหลือ 80% 50% และ 20% ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสมสามารถช่วยให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุดทุกค่าความเข้มแสง แต่เนื่องจากการสูญเสียภายในเครื่องปรับจูนทำงานจึงทำให้มีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับ กล่าวคือ ที่ความเข้มแสง 100% และ 80% แผงเซลล์ฯ ให้กำลังไฟฟ้ามมากกว่ากรณีที่ไม่มีเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามโหลดได้รับกำลังไฟฟ้ามมากกว่า สำหรับกรณีที่มีการใช้เครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ณ ความเข้มแสงในการทดลองเท่ากับ 50% และ 20%

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

5770179221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: DC POWER OPTIMIZER, ZETA CONVERTER, MODIFIED ADAPTIVE P&O, PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEM, SHADING, VARIABLE LIGHT INTENSITY, PSIM PROGRAM

DUANGPORN LEK-UTHAI: Design and Construction of a Prototype DC Power Optimizer for Photovoltaic Generation Systems Using a Zeta Converter with Modified Adaptive P&O Algorithm of MPPT. ADVISOR: ASSOC. PROF. THAVATCHAI TAYJASANANT, Ph.D., 139 pp.

This thesis presented a model and prototype of DC power optimizer which consists of a Zeta converter and MPPT control, Modified Adaptive Perturbation and Observation (MAP&O) algorithm. Due to the fact that Photovoltaic generation system connected with a constant load cannot generate maximum power if light intensity is varied and tune the output voltage and current which are not matched with load resistance. This optimizer function behaves like an automatic variable load. It helps the photovoltaic panel generates more power even if shading occurs on the panel. This power is the maximum power under that intensity.

This thesis used PSIM program to design the optimizer model and developed the prototype to test with a single 20 W solar panel and a set of 2X20 W series panel at 100%, 80%, 50%, and 20% solar irradiance (900 W/m^2 , 720 W/m^2 , 450 W/m^2 , 180 W/m^2), respectively. Test results showed that the panel with DC power optimizer can generate the maximum power at every intensity. However, the optimizer has power loss, therefore, the power of a constant load is not the maximum power of the panel. In other words, the load obtained higher power by using the panel without the optimizer at 100% and 80% irradiance. For 50% and 20% irradiance, the load received higher power by using the panel with DC power optimizer.

Department: Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชสุนันต์ สำหรับความอนุเคราะห์ในการให้คำแนะนำ คำปรึกษา และชี้แนะแนวทางที่เป็นประโยชน์ตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ อาจารย์ถาวร สุวรรณกิจ และอาจารย์ชนะ ผิวล่อง ที่ปรึกษาสำคัญทางด้านการออกแบบวงจร อิเล็กทรอนิกส์ และถ่ายทอดความรู้ต่าง ๆ มากมาย ที่จำเป็นต้องใช้ในการสร้างอุปกรณ์ทางด้าน ฮาร์ดแวร์ นอกจากนี้ ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์ (ประธานกรรมการ) อาจารย์ ดร.ภาณุวัฒน์ จันทร์ภักดี (กรรมการ) และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชวาลย์ เจริญบุตร (กรรมการ ภายนอกมหาวิทยาลัย) ที่ได้สละเวลาตรวจสอบและให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนสำเร็จ

ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ขอขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้อง ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบ ไฟฟ้ากำลัง และห้องปฏิบัติการพื้นฐานอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยให้คำแนะนำ และข้อมูลที่เป็นสำหรับการจัดทำวิทยานิพนธ์ตลอดระยะเวลาที่ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ได้ศึกษาอยู่ในมหาวิทยาลัย รวมถึงขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยดำเนินการความสะดวกในการติดต่อประสานงานและการดำเนินการต่าง ๆ เกี่ยวกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วย

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการอนุเคราะห์โคมไฟฮาโลเจนจากบริษัท L&E Lighting and Equipment Public Company Limited. รวมถึงข้อมูลอ้างอิงความเข้มรังสีแสงอาทิตย์จากศูนย์ตรวจวิเคราะห์ไอโซนและรังสี กรมอุตุนิยมวิทยา และข้อมูลสภาพภูมิอากาศจากศูนย์ภูมิอากาศ สำนักพัฒนาอุตุนิยมวิทยา ทางผู้เขียนวิทยานิพนธ์จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

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

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
สารบัญตาราง.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์.....	4
1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม.....	7
2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	7
2.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์.....	7
2.1.1.1 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	7
2.1.1.2 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	8
2.1.1.3 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	11
2.1.2 แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์.....	12
2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	16

2.1.3.1 ผลกระทบจากอุณหภูมิ	17
2.1.3.2 ผลกระทบจากความเข้มของแสงอาทิตย์.....	18
2.1.4 ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์.....	19
2.1.5 การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	20
2.1.5.1 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกตัวอิสระ	20
2.1.5.2 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน	21
2.1.5.3 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าโครงข่ายไฟฟ้า	22
2.2 ผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดการบังแสงแดด	26
2.2.1 สาเหตุของการบังแสงแดด	26
2.2.2 ผลกระทบของการบังแสงแดด	27
2.2.2.1 ผลของการบังแสงแดดต่อจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	27
2.2.2.2 ผลของการบังแสงแดดต่อการผลิตกำลังไฟฟ้า	28
2.2.3 การแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดการบังแสงแดดโดยการใช้ไดโอด	30
2.2.3.1 บล็อกกิ้งไดโอด.....	31
2.2.3.2 บายพาสไดโอด.....	31
2.3 เทคโนโลยีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	32
2.3.1 แบบรวมศูนย์.....	33
2.3.2 แบบสตริง.....	34
2.3.3 ไมโครอินเวอร์เตอร์.....	34
2.3.4 แบบใช้เครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	35
2.4 เครื่องปรับจุดการทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	37
2.4.1 คอนเวอร์เตอร์.....	37
2.4.2 กระบวนการหาจุดกำลังสูงสุด.....	46

บทที่ 3 การออกแบบเครื่องปรับการทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	57
3.1 การออกแบบวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์	57
3.1.1 การเลือกตัวเหนี่ยวนำ	60
3.1.2 การเลือกตัวเก็บประจุคู่ควบ	61
3.1.3 การเลือกตัวเก็บประจุขาออก	61
3.1.4 การเลือกมอสเฟต	61
3.1.5 การเลือกไดโอด	62
3.2 การออกแบบวงจรขับมอสเฟต	63
3.3 การออกแบบวงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า	64
3.4 การออกแบบวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า	64
3.5 การออกแบบวงจรวัดกระแสไฟฟ้า	65
3.6 การออกแบบระบบควบคุมการทำงานของกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุด	66
3.6.1 วิธีไมดิฟายอะแดปทีฟการรบกวนและการสังเกต	66
3.6.2 การออกแบบวงจรควบคุม	67
3.6.3 การเขียนโปรแกรมควบคุม	69
3.6.2.1 การกำหนดและตั้งค่าเริ่มต้น	70
3.6.2.2 การคำนวณและประมวลผล	70
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	72
4.1 การทดลองเครื่องปรับการทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	74
4.2 การทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง	82
4.2.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผงกับโหลด	82
4.2.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีเครื่องปรับการทำงาน 1 แผงกับโหลด	86
4.3 การทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรม 2 แผง	94

4.3.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรม 2 แผงกับโพลด	95
4.3.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีเครื่องปรับจุดทำงานอนุกรม 2 แผงกับโพลด.....	100
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	115
รายการอ้างอิง	119
ภาคผนวก.....	124
ภาคผนวก ก โปรแกรมการกำหนดและตั้งค่าเริ่มต้น	125
ภาคผนวก ข โปรแกรมการคำนวณและประมวลผล	131
ข.1 โปรแกรมกระบวนการสังเกต	132
ข.2 โปรแกรมกระบวนการติดตามจุดทำงาน กำหนดขนาดและทิศทางของการ เปลี่ยนแปลงค่าตัวชี้เซลล์.....	134
ข.3 โปรแกรมกระบวนการรวบรวม.....	136
ภาคผนวก ค โปรแกรมคำสั่งแสดงผล	137
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	139

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 แบบจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์และทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า ที่ผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์	8
รูปที่ 2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน	9
รูปที่ 2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกหลายรูปซิลิคอน.....	9
รูปที่ 2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน	10
รูปที่ 2.5 วงจรการทดสอบลักษณะเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	11
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V curve)	11
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของกำลังที่ได้กับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (P-V curve).....	12
รูปที่ 2.8 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์	12
รูปที่ 2.9 เซลล์ โมดูล และอาร์เรย์ ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	15
รูปที่ 2.10 ผลของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเมื่อต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม.....	16
รูปที่ 2.11 ผลของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเมื่อต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน	16
รูปที่ 2.12 ผลของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์	17
รูปที่ 2.13 ผลของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์ ...	19
รูปที่ 2.14 แผนภาพระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกตัวอิสระ.....	21
รูปที่ 2.15 แผนภาพระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน.....	22
รูปที่ 2.16 แผนภาพระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าระบบโครงข่ายไฟฟ้า	22
รูปที่ 2.17 แผนภาพระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าระบบโครงข่ายไฟฟ้า ประเภทฟาร์ม	24
รูปที่ 2.18 แผนภาพระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าระบบโครงข่ายไฟฟ้า	26
รูปที่ 2.19 ตัวอย่างการเกิดการบังแสงแดด	27

รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ถูกบังแสงแดดและไม่ถูกบังแสงแดด.....	28
รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและแรงดันไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ถูกบังแสงแดดและไม่ถูกบังแสงแดด.....	28
รูปที่ 2.22 แบบจำลองการทำงานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่เกิดการบังแสงแดด.....	29
รูปที่ 2.23 การใช้ไดโอดในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์.....	30
รูปที่ 2.24 ลักษณะของกราฟ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อนุกรมกัน โดยมีหนึ่งเซลล์ ที่ถูกบังจากแสงแดด	31
รูปที่ 2.25 แผนภาพโครงสร้างของระบบการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ กับโครงข่ายไฟฟ้า.....	32
รูปที่ 2.26 แผนภาพโครงสร้างอินเวอร์เตอร์แบบรวมศูนย์.....	33
รูปที่ 2.27 พลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้รับผลกระทบ จากการบังแสงแดด	33
รูปที่ 2.28 แผนภาพโครงสร้างอินเวอร์เตอร์แบบสตริง	34
รูปที่ 2.29 แผนภาพระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการใช้ไมโครอินเวอร์เตอร์	35
รูปที่ 2.30 แผนภาพระบบแบบใช้เครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	36
รูปที่ 2.31 แผนภาพองค์ประกอบของสำคัญของระบบแบบใช้เครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสม	37
รูปที่ 2.32 แผนภาพการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย	38
รูปที่ 2.33 แผนภาพการเปลี่ยนจุดการทำงานที่ได้กำลังสูงสุด.....	38
รูปที่ 2.34 วงจรทอนระดับ.....	39
รูปที่ 2.35 แผนภาพขอบเขตความต้านทาน R_{in} ของวงจรทอนระดับ	40
รูปที่ 2.36 ลักษณะการเข้าใกล้จุดกำลังสูงสุดของวงจรทอนระดับ	40
รูปที่ 2.37 วงจรทอนระดับ.....	41
รูปที่ 2.38 แผนภาพขอบเขตความต้านทาน R_{in} ของวงจรทอนระดับ	41
รูปที่ 2.39 ลักษณะการเข้าใกล้จุดกำลังสูงสุดของวงจรทอนระดับ	42

รูปที่ 2.40 วงจรทอนทบระดับ.....	42
รูปที่ 2.41 แผนภาพขอบเขตความต้านทาน R_{in} ของวงจรทอนทบระดับ	43
รูปที่ 2.42 ลักษณะการเข้าใกล้จุดกำลังสูงสุดของวงจรทอนทบระดับ	43
รูปที่ 2.43 วงจรสมมูลของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเพิ่มและลดแรงดัน.....	44
รูปที่ 2.44 ตัวอย่างแผนภาพรังสีอาทิตย์ในหนึ่งวันด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ	46
รูปที่ 2.45 แผนภาพ P&O block diagram	47
รูปที่ 2.46 แผนผังลำดับขั้นตอนการทำงานของวิธี P&Oa	48
รูปที่ 2.47 แผนผังลำดับขั้นตอนการทำงานของวิธี P&Ob.....	49
รูปที่ 2.48 ลักษณะที่เป็นไปได้ของตำแหน่งการรบกวนทั้งสามจุด	50
รูปที่ 2.49 แผนผังลำดับขั้นตอนการทำงานของวิธี P&Oc	51
รูปที่ 2.50 แผนผังลำดับขั้นตอนการทำงานของวิธี INCa.....	52
รูปที่ 2.51 แผนผังลำดับขั้นตอนการทำงานของวิธี INCb.....	53
รูปที่ 2.52 แผนผังลำดับขั้นตอนการทำงานของวิธีตรรกศาสตร์คลุมเครือ.....	54
รูปที่ 3.1 แผนภาพวงจรภายในของเครื่องปรับจุดการทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ..	57
รูปที่ 3.2 แผนภาพจำลองการทำงานของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์.....	58
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างรูปคลื่นในอุดมคติของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์	59
รูปที่ 3.4 แผนภาพวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์จากการออกแบบ.....	62
รูปที่ 3.5 วงจรขับมอสเฟต	63
รูปที่ 3.6 วงจรรักษาระดับแรงดัน.....	64
รูปที่ 3.7 วงจรแบ่งแรงดัน	65
รูปที่ 3.8 วงจรวัดกระแสไฟฟ้า	66
รูปที่ 3.9 แผนผังลำดับขั้นตอนกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบโมติฟายอะแดปทีฟ การรบกวนและการสังเกต	67
รูปที่ 3.10 วงจรควบคุมการทำงาน.....	68

รูปที่ 3.11 โปรแกรม Arduino IDE.....	69
รูปที่ 3.12 แผนผังขั้นตอนลำดับการทำงานของโปรแกรม	69
รูปที่ 4.1 ภาพรวมการทดลอง	72
รูปที่ 4.2 แบบจำลองวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์	74
รูปที่ 4.3 ชุดต้นแบบวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์	74
รูปที่ 4.4 สัญญาณรูปคลื่นของแบบจำลองวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์	75
รูปที่ 4.5 สัญญาณรูปคลื่นของชุดต้นแบบวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์	77
รูปที่ 4.6 แบบจำลองกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุดในโปรแกรม PSIM.....	80
รูปที่ 4.7 ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแบบจำลองเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสม ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	80
รูปที่ 4.8 ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดของชุดต้นแบบเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสม ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	81
รูปที่ 4.9 การทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง	82
รูปที่ 4.10 แบบจำลองการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผงกับโหลด.....	83
รูปที่ 4.11 ชุดต้นแบบการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับโหลดขนาด 17 โอห์ม.....	83
รูปที่ 4.12 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่โหลด เมื่อทดสอบที่ความเข้มแสง 100%	84
รูปที่ 4.13 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่โหลด เมื่อทดสอบที่ 80% ของความเข้มแสง	84
รูปที่ 4.14 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่โหลด เมื่อทดสอบที่ 50% ของความเข้มแสง	85
รูปที่ 4.15 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่โหลด เมื่อทดสอบที่ 20% ของความเข้มแสง	85
รูปที่ 4.16 แบบจำลองการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง ที่มีเครื่องปรับจูนทำงาน และโหลด	86
รูปที่ 4.17 ชุดต้นแบบการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง ที่มีเครื่องปรับจูนทำงานและโหลด .	86
รูปที่ 4.18 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์และโหลด เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความเข้มแสง 100%	88

รูปที่ 4.19 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์และโหลด เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความเข้มแสง 80%	89
รูปที่ 4.20 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์และโหลด เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความเข้มแสง 50%	89
รูปที่ 4.21 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์และโหลด เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความเข้มแสง 20%	89
รูปที่ 4.22 ประสิทธิภาพเครื่องปรับจุกทำงานที่เหมาะสมของชุดต้นแบบที่ความเข้มแสงต่าง ๆ.....	90
รูปที่ 4.23 กราฟการเปรียบเทียบผลการทดลองชุดต้นแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง ที่มีและไม่มีเครื่องปรับจุกทำงานที่เหมาะสม ที่ความเข้มแสง 100%	91
รูปที่ 4.24 กราฟการเปรียบเทียบผลการทดลองชุดต้นแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง ที่มีและไม่มีเครื่องปรับจุกทำงานที่เหมาะสม ที่ความเข้มแสง 80%	92
รูปที่ 4.25 กราฟการเปรียบเทียบผลการทดลองชุดต้นแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง ที่มีและไม่มีเครื่องปรับจุกทำงานที่เหมาะสม ที่ความเข้มแสง 50%	92
รูปที่ 4.26 กราฟการเปรียบเทียบผลการทดลองชุดต้นแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง ที่มีและไม่มีเครื่องปรับจุกทำงานที่เหมาะสม ที่ความเข้มแสง 20%	93
รูปที่ 4.27 แผนภาพวงจรการทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรม 2 แผง	94
รูปที่ 4.28 แบบจำลองการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 แผงกับโหลด.....	95
รูปที่ 4.29 ชุดต้นแบบการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 แผงกับโหลดขนาด 35 โอห์ม.....	95
รูปที่ 4.30 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่โหลด เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสอง ได้รับความเข้มแสง 100%.....	97
รูปที่ 4.31 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่โหลด เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 ได้รับความเข้มแสง 100% และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ได้รับความเข้มแสง 80%	98
รูปที่ 4.32 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่โหลด เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 ได้รับความเข้มแสง 100% และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ได้รับความเข้มแสง 50%	98
รูปที่ 4.33 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่โหลด เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 ได้รับความเข้มแสง 100% และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ได้รับความเข้มแสง 20%	98

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบระบบเชื่อมต่อแบบรวมศูนย์ แบบสตรีง ไมโครอินเวอร์เตอร์ และเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสม	36
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบความแตกต่างของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเพิ่มลดแรงดันแต่ละรูปแบบ	45
ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบกระบวนการหาจุดกำลังสูงสุดรูปแบบต่าง ๆ สำหรับใช้กับคอนเวอร์เตอร์	56
ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ที่ต้องการออกแบบ	60
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลทางเทคนิคของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอนขนาด 20 วัตต์.....	73
ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง	73
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผงกับโหลด ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ.....	84
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง ที่มีเครื่องปรับจุดทำงานและโหลด ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ	88
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบผลการทดลองชุดต้นแบบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง ที่มีและไม่มีเครื่องปรับจุดการทำงานที่เหมาะสม	91
ตารางที่ 4.6 ผลการจำลองจากโปรแกรมสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรม 2 แผงกับโหลด ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ	96
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบจากชุดต้นแบบสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรม 2 แผงกับโหลด ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ	97
ตารางที่ 4.8 ผลการจำลองจากโปรแกรมสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีเครื่องปรับจุดทำงานอนุกรม 2 แผงกับโหลด ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ	102
ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบจากชุดต้นแบบสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีเครื่องปรับจุดทำงานอนุกรม 2 แผงกับโหลด ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ	103
ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบผลการทดลองชุดต้นแบบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 แผง ที่มีและไม่มีเครื่องปรับจุดการทำงานที่เหมาะสม	108
ตารางที่ 4.11 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยจากผลการทดลองทั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 และ 2 แผง	114

บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์บทนี้ประกอบด้วยที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษา วิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ จากวิทยานิพนธ์ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ และโครงสร้างของวิทยานิพนธ์

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันพลังงานทดแทนเป็นที่นิยมในการนำมาผลิตไฟฟ้ามากขึ้น ทั้งพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานชีวมวล พลังงานจากก๊าซชีวภาพ พลังงานจากขยะ ฯลฯ จากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579 (Alternative Energy Development Plan: AEDP 2015) ได้กำหนดเป้าหมายในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ สูงที่สุดถึง 6,000 เมกะวัตต์ [1] และจากการศึกษาปริมาณรังสีอาทิตย์ในประเทศไทยพบว่า 50.2% ของพื้นที่ทั้งหมดได้รับรังสีอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี 4.99 ถึง 5.26 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตร-วัน ค่ามวลรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศมีค่า 5.04 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตาราง เมตร-วัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง [2] ทำให้การนำ พลังงานแสงอาทิตย์มาผลิตไฟฟ้าจึงมีความนิยมเพิ่มมากขึ้น

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Generation System: PVGS) แบ่งออกเป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทลานกว้าง หรือโซลาร์ฟาร์ม (Solar farm) ซึ่งมีลักษณะเป็นการติดตั้งบนพื้นที่โล่งขนาดใหญ่ และระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภท ติดตั้งบนหลังคา หรือโซลาร์รูฟท็อป (Solar rooftop) ไม่ว่าจะเป็นการติดตั้งบนหลังคาบ้านเรือน ที่อยู่อาศัย อาคารสำนักงาน โรงงานอุตสาหกรรม หรือบนหลังคาของอาคารภาครัฐและเอกชนต่าง ๆ โดยไม่ต้องใช้พื้นที่มาก สามารถติดตั้งในชุมชนที่ห่างไกลจากสายส่งของการไฟฟ้า เหมาะสำหรับการผลิตไฟฟ้าไว้ใช้ภายใน หรือใช้เป็นระบบไฟฟ้าสำรอง และสามารถขายไฟที่ผลิตได้ให้กับการไฟฟ้า ได้อีกด้วย แต่เนื่องจากประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับความสามารถ ในการแปลงพลังงานของแผง และสภาพอากาศในช่วงเวลาต่าง ๆ ทำให้การผลิตไฟฟ้าค่อนข้างไม่คงที่ และไม่สม่ำเสมอ ฉะนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพ และความน่าเชื่อถือให้ระบบผลิตไฟฟ้าจาก เซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรพิจารณา

การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น การเลือกวัสดุในการนำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์อย่างเหมาะสม การออกแบบโครงสร้างหรือรูปแบบการจัดวางตัวของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้สามารถรับพลังงานแสงอาทิตย์ได้สูงที่สุด การเชื่อมต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น บายพาสไดโอด (Bypass Diode) หรือเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (DC power optimizer) เพื่อลดผลกระทบจากการโดนบังแสงแดด (Shading) โดยมีกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracker, MPPT) ในแต่ละเงื่อนไขความเข้มแสงที่จะสามารถนำพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ ณ ขณะนั้นมาใช้งาน ซึ่งวิธีการลดผลกระทบจากการถูกบังแสงแดดโดยการเชื่อมต่อบายพาสไดโอดและการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าโดยการใช้เครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมนั้นสามารถกระทำได้กับระบบผลิตไฟฟ้าเดิมที่มีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่แล้ว และสามารถทำได้ง่ายกว่าการลงทุนติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใหม่

จากที่กล่าวมาข้างต้น การเพิ่มประสิทธิภาพ และความแน่นอนของการผลิตไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงที่ถูกบังจากแสงแดดจึงมีความจำเป็น งานวิจัยนี้จึงเสนอการออกแบบเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งทำให้แต่ละแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายกำลังได้สูงสุด เพื่อประสิทธิภาพที่ดีขึ้นของระบบในช่วงที่ถูกบังจากแสงแดด และเป็นแนวทางให้กับผู้ที่สนใจจะติดตั้งระบบการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ให้เกิดความรู้ความเข้าใจในระบบ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) สร้างแบบจำลองระบบการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ระบบการเชื่อมต่อกับเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพรวมของระบบ ขณะไม่มีการบังแสงแดดและขณะเกิดการบังแสงแดด โดยใช้โปรแกรม PSIM
- 2) สร้างชุดต้นแบบเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้กับระบบผลิตไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

- 1) พิจารณาเฉพาะระบบการเชื่อมต่อเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้คอนเวอร์เตอร์แบบซิด้า

- 2) พิจารณาเฉพาะระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทติดตั้งบนหลังคาซึ่งมีขนาด 20 วัตต์ จำนวน 2 แผง ที่ต่ออนุกรมกัน
- 3) พิจารณาเฉพาะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (Monocrystalline silicon cells)
- 4) พิจารณาการติดตั้งเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับทุกแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- 5) พิจารณาการบังแสงแดดที่ 1 แผง และ 2 แผง ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- 6) พิจารณาการบังแสงแดดที่ 20% 50% และ 80% ของความเข้มแสงขณะทำการทดลอง

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาบทความทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ดังนี้
 - 1.1) ศึกษาหลักการพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์
 - 1.2) ศึกษาการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
 - 1.3) ศึกษาผลกระทบที่มีต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
 - 1.4) ศึกษาประเภทการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์
 - 1.5) ศึกษาชนิดวงจรของคอนเวอร์เตอร์ (DC-DC converter)
 - 1.6) ศึกษากระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- 2) วิเคราะห์และระบุปัญหาที่จะศึกษา
- 3) กำหนดขอบเขตของงานวิจัย
- 4) กำหนดรูปแบบที่ใช้สำหรับเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- 5) ออกแบบและจำลองระบบผลิตไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม PSIM
- 6) เก็บผลการทดลองที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม PSIM
- 7) สร้างชุดต้นแบบเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
- 8) ทดสอบเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และเก็บผลการทดสอบ
- 9) วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบจากการจำลองและชุดต้นแบบ
- 10) สรุปผลการทดลอง

11) จัดทำรายงานวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) แบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อกับเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสมด้วยโปรแกรม PSIM
- 2) ชุดต้นแบบการใช้งานจริงของเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสมสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็ก
- 3) สามารถวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพรวมของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อกับเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสม

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

งานวิจัย บทความ และเอกสารที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อดังนี้

- 1) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ การทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และผลกระทบที่มีต่อระบบ ได้แก่

บทความ [1] กล่าวถึงแผนการพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกของประเทศไทยในอนาคต เพื่อนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้า ทั้งพลังงานทดแทนจากแสงอาทิตย์ ลม น้ำ ชีวมวล ก๊าซชีวภาพ ชยะ ฯลฯ โดยมีเป้าหมายในการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ผลิตไฟฟ้าสูงที่สุดถึง 6,000 เมกกะวัตต์ (MW) ในปี พ.ศ. 2579

บทความ [2-4] กล่าวถึงความรู้เกี่ยวกับรังสีแสงอาทิตย์ ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ในประเทศไทย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพทางด้านพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง กล่าวถึงความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ แบบจำลองการทำงานและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังกล่าวถึงการเชื่อมต่อระบบการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งแบบแยกตัวอิสระ แบบผสมผสาน และแบบเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า

บทความ [5, 6] กล่าวถึงแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ การทำงานและผลกระทบที่มีต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ คล้ายกับบทความ [2, 4] นอกจากนี้ยังกล่าวถึงผลกระทบจากการถูกบังแสงแดดของระบบ และการนำบายพาสไดโอดมาใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

บทความ [7, 8] กล่าวถึงการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ เซลล์แสงอาทิตย์ การหาจุดกำลังสูงสุดของแผง การหาประสิทธิภาพของแผง กล่าวถึงแบบจำลอง การทำงาน และผลกระทบของเซลล์แสงอาทิตย์ และการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันเมื่อนำ เซลล์แสงอาทิตย์มาต่อกันแบบอนุกรมหรือแบบขนาน

บทความ [9] กล่าวถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองเมื่อมีการต่อบายพาส ไดโอดคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์ที่จำนวนต่าง ๆ กันขณะเกิดการบังแสงแดด ผลที่ได้คือ การต่อดีโอด คร่อมเซลล์แสงอาทิตย์ทุกเซลล์ ที่ทำให้มีประสิทธิภาพในการผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด และกล่าวถึง การเปรียบเทียบกระบวนการหาจุดกำลังสูงสุดโดยวิธีการต่าง ๆ

2) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่

บทความ [10-12] กล่าวถึงลักษณะการเชื่อมต่อของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในระบบผลิตไฟฟ้า ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ แบบรวมศูนย์ แบบสตริง แบบไมโครอินเวอร์เตอร์ และแบบ เครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ บทความ [10, 11] มีการเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียของการเชื่อมต่อในลักษณะต่าง ๆ

บทความ [13, 14] แสดงข้อมูลเปรียบเทียบลักษณะการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้า ทั้งสี่ประเภท เช่น ประสิทธิภาพ ต้นทุน จำนวนอุปกรณ์ที่ต้องใช้ ฯลฯ

3) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหาจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่

บทความ [15-27] กล่าวถึงข้อดีข้อเสียของลักษณะการเชื่อมต่อของระบบผลิตไฟฟ้า และ กระบวนการหาจุดกำลังสูงสุดโดยวิธีการที่แตกต่างกัน เช่น วิธีการรบกวนและการสังเกต (Perturbation and Observation, P&O) วิธีเพิ่มค่าความนำไฟฟ้า (Incremental conductance) ฯลฯ

บทความ [28] กล่าวถึงกระบวนการในการหาจุดกำลังสูงสุดของวงจรทอนระดับ วงจร ทบระดับ และวงจรทอนทบระดับ เสนอช่วงการทำงานของทั้งสามวงจรในการเข้าใกล้จุดกำลังสูงสุด และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการหาจุดกำลังสูงสุดของวงจรทั้งสามเมื่อเชื่อมต่อกับโหลดที่มี ค่าความต้านทานต่างกัน

4) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรคอนเวอร์เตอร์ ได้แก่

บทความ [29-34] กล่าวถึงชนิดของวงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิดเพิ่มลดแรงดัน หลักการทำงานของ แต่ละวงจรรวมถึงการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่าง ๆ และข้อดีข้อเสียของวงจรแต่ละชนิด

บทความ [35-41] กล่าวถึงโครงสร้างพื้นฐานของวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบซีต้า (Zeta converter) หลักการทำงาน และการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจร

1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 5 ส่วน ประกอบด้วย

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงที่มาและความสำคัญ วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ รวมถึงบทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และโครงสร้างเนื้อหาของงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง รวมถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ วิธีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้า และการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้เครื่องปรับจุดการทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 3 การออกแบบเครื่องปรับจุดการทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ กล่าวถึงหลักการออกแบบวงจรซีต้า การออกแบบวงจรขับมอสเฟต การออกแบบวงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า การออกแบบวงจรวัดแรงดันและวัดกระแสไฟฟ้า และการปรับปรุงกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุดโดยวิธีโมดิฟายอะแดปทีฟการรบกวนและการสังเกต (Modified Adaptive P&O, MAP&O)

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง แสดงวิธีการทดลองและผลการทดลองการทำงานของเครื่องปรับจุดการทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้โปรแกรม PSIM จำลอง และชุดต้นแบบที่สร้างขึ้น วิเคราะห์ผลการทดลอง และเปรียบเทียบผลการทดลองจากโปรแกรมและชุดต้นแบบ

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ นำเสนอผลของการวิจัย ปัญหาที่เกิดขึ้น และแนวทางในการปรับปรุงพัฒนาต่อไป

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

เนื้อหาวิทยานิพนธ์บทนี้กล่าวถึงระบบการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าเมื่อเกิดการบังแสงแดด และกล่าวถึงระบบการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ วงจรคอนเวอร์เตอร์และกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุดที่ใช้ในการแก้ไขผลกระทบที่เกิดขึ้น

2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่ใหญ่ที่สุด เป็นแหล่งพลังงานสะอาดที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าได้ไม่มีวันหมด จากข้อมูลของสำนักงานพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) พบว่า ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตใกล้เส้นศูนย์สูตรทำให้ได้รับศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง และมีโอกาสผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ได้มาก ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ และการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน เพื่อเพิ่มความเข้าใจมากยิ่งขึ้น

2.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์

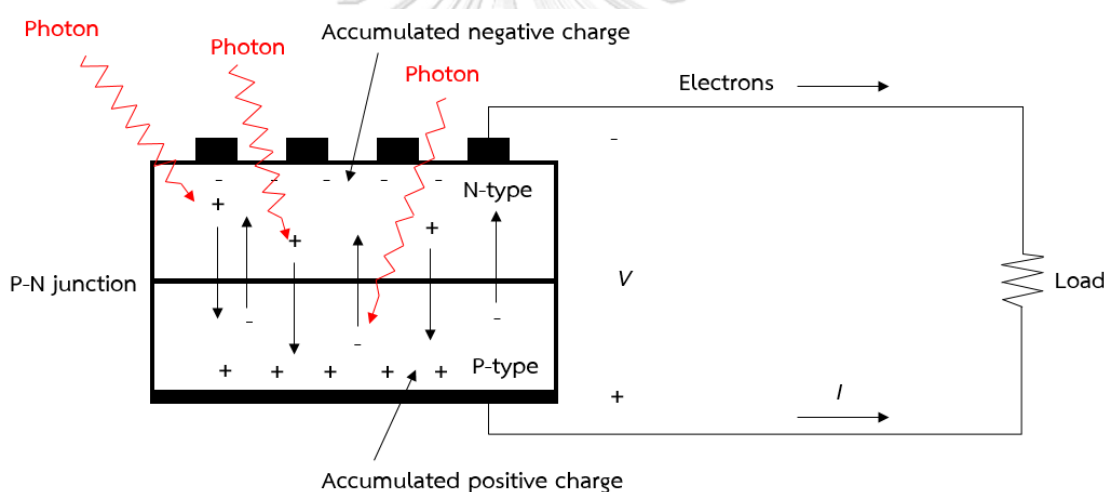
เซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นเพื่อเปลี่ยนรูปพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งปัจจุบันเริ่มมีการนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการสนับสนุนของรัฐบาล ราคาต้นทุนที่ถูกลง และความคงทนในการใช้งาน

2.1.1.1 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ หรือโซลาร์เซลล์ (Solar cell) เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าในการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงให้เป็นไฟฟ้าโดยตรง ด้วยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic effect) โดยการนำสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) มาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ผลิตให้เป็นแผ่นบางซ้อนกัน และมีโครงสร้างที่เหมาะสม เมื่อมีแสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์ อนุภาคโฟตอน (Photon) หรือแสง

ถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน (Electron) ในสารกึ่งตัวนำ จนอิเล็กตรอนว่องออกสุดของสารกึ่งตัวนำได้รับพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงโคจร และสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ซึ่งหากอิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่ครบวงจร ก็จะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current, DC) ขึ้น

องค์ประกอบหลักของเซลล์แสงอาทิตย์ คือการนำสารกึ่งตัวนำที่ต่างกัน 2 ชนิดมาต่อกัน บริเวณจุดเชื่อมต่อจะเรียกว่า รอยต่อพี-เอ็น (P-N junction) เป็นบริเวณที่เกิดสนามไฟฟ้า มีลักษณะเหมือนสนามไฟฟ้าสถิต เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ พลังงานจากโฟตอนถูกถ่ายเทให้อะตอมของสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดอิเล็กตรอน (-) และโฮล (Hole, +) อิสระไปรออยู่ที่ขั้วทั้งสอง เมื่อต่อขั้วไฟฟ้าให้ครบวงจรผ่านโหลดหรืออุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น หลอดไฟ จึงทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอน หรือเรียกว่าเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของกระแสอิเล็กตรอน ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งตราบไต้ยังมีแสงตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ กระแสไฟฟ้าถูกผลิตขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 2.1 แบบจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์และทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์ [42]

2.1.1.2 ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์

ในปัจจุบันแผงเซลล์แสงอาทิตย์นิยมใช้งานอยู่ 2 ประเภท ดังนี้

1) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอน (Silicon) มีการแบ่งประเภทตามลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้น คือแบบที่เป็นรูปผลึก (Crystalline) และแบบที่ไม่เป็นรูปผลึกหรืออสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1.1) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (Single -Crystalline Silicon Solar Cell หรือ Mono-Crystalline Silicon) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแรก ๆ ที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ผลิตจากแผ่นเวเฟอร์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน มีความหนา ประมาณ 200-300 ไมครอน มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าประมาณ ร้อยละ 15-20 มีราคาค่อนข้างสูง ดังรูปที่ 2.2



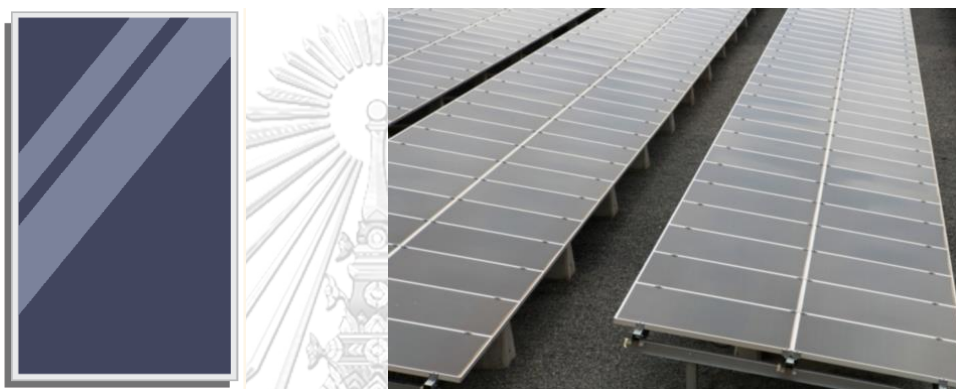
รูปที่ 2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน [43, 44]

1.2) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกหลายรูปซิลิคอน (Multi-Crystalline Silicon Solar Cell หรือ Poly-Crystalline Silicon Solar Cell) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีการใช้งานมากรองจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อลดต้นทุนของโซลาร์เซลล์แบบผลึกเดี่ยว ผลิตจากแผ่นเวเฟอร์ชนิดผลึกหลายรูปซิลิคอน มีความหนาประมาณ 180-220 ไมครอน มีราคาถูกกว่าชนิดผลึกเดี่ยว และประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 12-15 ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกหลายรูปซิลิคอน [43, 44]

1.3) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous Silicon Solar Cell) ดังรูปที่ 2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ มีลักษณะเป็นฟิล์มบางประมาณ 0.5-1.0 ไมครอน เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ได้รับการคิดค้นและพัฒนาขึ้นเพื่อประหยัดต้นทุนและเวลาในการผลิต มีความไวแสงมาก สามารถรับแสงที่อ่อน ๆ ได้ รวมทั้งแสงจากหลอดไฟฟ้าต่าง ๆ จึงทำงานได้ในพื้นที่ที่มีเมฆหมอก ฝุ่นละออง หรือฝนตกชุก รวมถึงภายในอาคาร มีน้ำหนักเบา และมีความยืดหยุ่นกว่าแบบผลึก ราคาถูก มีการผลิตเป็นพื้นที่เล็กไปจนถึงใหญ่หลายตารางเมตร แต่ประสิทธิภาพค่อนข้างน้อย อยู่ที่ประมาณร้อยละ 6-8 นิยมนำมาใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กำลังไฟฟ้าต่ำหรือไม่สูงมากนัก เช่น เครื่องคิดเลข



รูปที่ 2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน [43, 44]

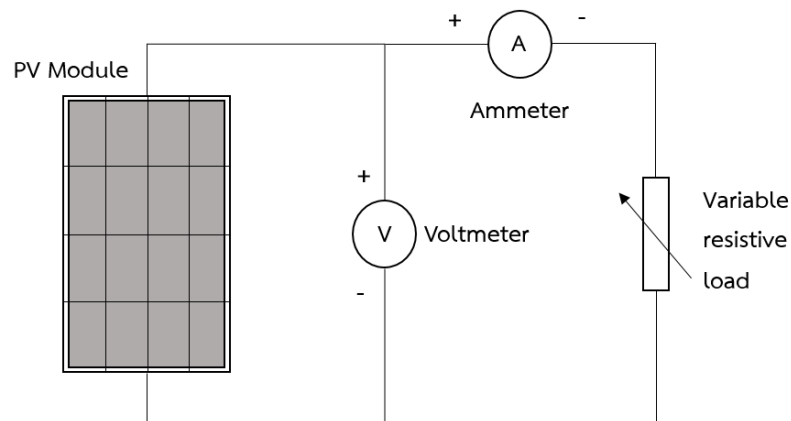
2) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารประกอบที่ไม่ใช่ซิลิคอน

2.1) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกแกลเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide Solar Cell) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงระดับร้อยละ 25 ขึ้นไป แต่ไม่นิยมนำมาใช้งานบนพื้นโลก เนื่องจากมีราคาสูงมาก ปัจจุบันมีการใช้งานสำหรับดาวเทียม สถานีวิจัยในอวกาศ และระบบรวมแสงเป็นส่วนใหญ่

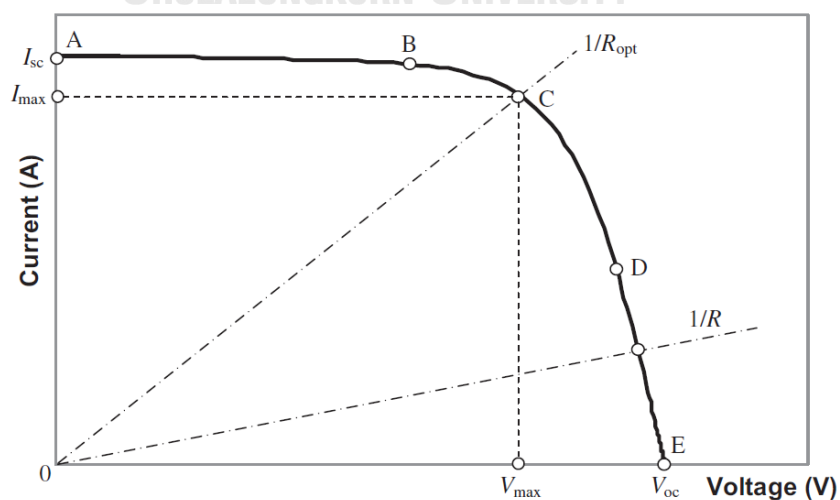
2.2) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของสารประกอบตระกูลทองแดง อินเดียม แกลเลียมอาร์เซไนด์ (Copper Indium Gallium Selenide: CIGS) และตระกูลแคดเมียมเทลลูไรด์ (Cadmium Telluride: CdTe) เป็นเทคโนโลยีใหม่ของชนิดฟิล์มบาง ปัจจุบันยังมีการใช้งานน้อยอยู่ แต่เซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน

2.1.1.3 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

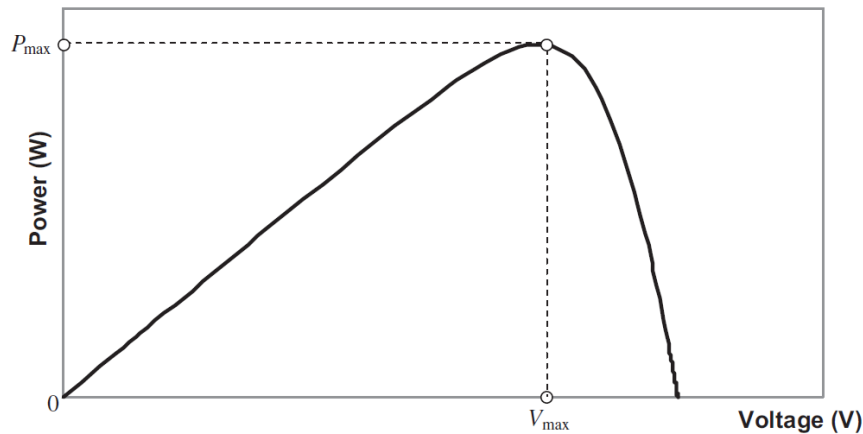
ในการหาลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทดลอง โดยการต่อวงจรตามรูปที่ 2.5 เมื่อกำหนดการทดสอบที่ความเข้มแสงอาทิตย์ค่าหนึ่ง และทำการวัด กระแสกับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความต้านทานค่าต่าง ๆ (Variable resistive load, R) จะได้กราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V curve) ดังรูปที่ 2.6 จากรูปเมื่อต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบลัดวงจร (Short circuit) หรือแรงดันของแผงเซลล์เท่ากับ 0 โวลต์ กระแสไฟฟ้าที่ได้จึงมีค่าสูงสุดเรียกว่า กระแสลัดวงจร (Short-circuit current, I_{sc}) เมื่อเปิดวงจร (Open circuit) ทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงสุด เรียกว่า แรงดันเปิดวงจร (Open-circuit voltage, V_{oc}) และลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ได้กับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (P-V curve) ได้ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งกำลังที่ได้ระหว่างช่วงลัดวงจร และเปิดวงจร มีค่ามากกว่าศูนย์เสมอ หากเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความเข้มแสงเพียงพอ



รูปที่ 2.5 วงจรการทดสอบลักษณะเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [7]



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V curve) [8]

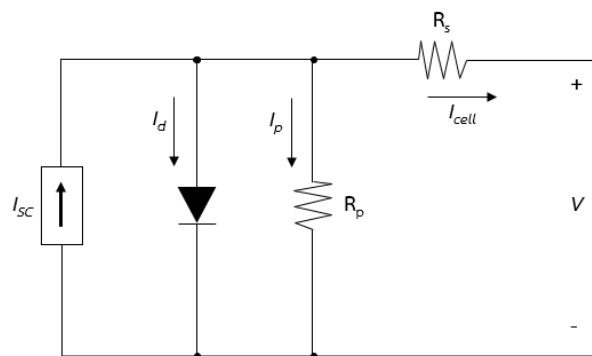


รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของกำลังที่ได้กับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (P-V curve) [8]

จากรูปที่ 2.6 ช่วงที่ค่าความต้านทานต่ำ ๆ การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในช่วง AB เซลล์ทำงานเป็นเหมือนแหล่งจ่ายกระแสคงที่ที่มีค่าใกล้เคียงกับกระแสลัดวงจร ในทางตรงกันข้าม ถ้าความต้านทานมีค่ามาก ๆ เซลล์ทำงานอยู่ในช่วง DE ซึ่งเสมือนแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ที่มีค่าใกล้เคียงกับแรงดันเปิดวงจร และกำลังงานที่ได้สามารถคำนวณได้จากกระแสและแรงดัน เมื่อนำมาสร้างเป็นกราฟความสัมพันธ์ P-V ได้ดังรูปที่ 2.7 โดยค่ากำลังสูงสุดที่ได้ (P_{max}) คือจุดเดียวกับจุด C ในรูปที่ 2.6 และเรียกจุด C นี้ว่า จุดกำลังสูงสุด (Maximum Power Point, MPP) ซึ่งมีค่าความต้านทานที่เหมาะสมเพียงค่าเดียว คือ R_{opt}

2.1.2 แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์สามารถแทนด้วยวงจรสมมูล (Equivalent circuit) หรือที่เรียกว่าแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ได้ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณและวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 2.8 วงจรสมมูลประกอบด้วย แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (I_{sc}) ที่ถูกใช้เป็นแบบจำลองกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อได้รับพลังงานแสงอาทิตย์หรือโฟตอน ซึ่งต่อขนานกับไดโอดที่เป็นแบบจำลองแทนรอยต่อพี-เอ็น ที่บังคับให้กระแสไฟฟ้าไหลไปในทิศทางเดียว ในทางปฏิบัตินี้มีความต้านทานของตัวนำไฟฟ้า ความต้านทานภายในของสารกึ่งตัวนำ และความต้านทานจากจุดเชื่อมต่อต่าง ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ จึงมีการเพิ่มความต้านทานแบบอนุกรม (Series resistance, R_s) เข้าไปในแบบจำลอง และเพิ่มความต้านทานแบบขนาน (Parallel resistance, R_p) เพื่อแก้ไขการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า ทำให้แบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์มีพฤติกรรมใกล้เคียงเซลล์แสงอาทิตย์ในทางปฏิบัติมากขึ้น

จากการอธิบายข้างต้น เราสามารถหากระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ตามกฎของเคอร์ชอฟ (Kirchhoff's Current Law, KCL) ได้ดังสมการที่ (2.1)

$$I_{cell} = I_{sc} - I_d - I_p \quad (2.1)$$

โดย I_{cell} คือ กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ (A)

I_{sc} คือ กระแสไฟฟ้่าลัดวงจรหรือกระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ (Photoelectric current) ที่เกิดจากความเข้มแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ (A)

I_d คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ (A)

I_p คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทานที่เชื่อมต่อแบบขนาน (R_p) ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ (A)

จากสมการที่ (2.1) สามารถเปลี่ยนรูปสมการให้อยู่ในรูปของแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์ได้ โดยพิจารณาจากไดโอดและตัวต้านทานที่เชื่อมต่อแบบขนานจะมีแรงดันตกคร่อมเท่ากับแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถเขียนสมการสำหรับคำนวณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอดและสมการคำนวณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานที่เชื่อมต่อแบบขนาน ได้ดังสมการที่ (2.2) และ (2.3) ตามลำดับ สมการที่ (2.4) เป็นสมการที่นำมาใช้ในการคำนวณค่าความต่างศักย์ซีดีเริ่ม

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_d}{aV_{th}}\right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

$$I_p = \frac{V_d}{R_p} \quad (2.3)$$

$$V_{th} = \frac{kT}{q} \quad (2.4)$$

โดย	I_0	คือ กระแสไฟฟ้าอิ่มตัว (Saturation current) ของไดโอด (A)
	V_d	คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอด (V)
	V_{th}	คือ ค่าความต่างศักย์ขีดเริ่ม (Threshold voltage) ของไดโอด (V)
	a	คือ แฟกเตอร์อุดมคติ (Ideality factor) ที่บอกถึงความใกล้เคียงกับความเป็นอุดมคติ ขึ้นอยู่กับสารกึ่งตัวนำที่ใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์
	k	คือ ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann constant) มีค่า 1.38×10^{-23} (J/K)
	T	คือ อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ (K)
	q	คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน มีค่า 1.6×10^{-19} (C)
	R_p	คือ ความต้านทานที่เชื่อมต่อแบบขนานของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ (Ω)

เมื่อนำสมการที่ (2.2) (2.3) และ (2.4) มาแทนค่าในสมการที่ (2.1) เราสามารถเขียนสมการกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ในรูปของแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังสมการที่ (2.5)

$$I_{cell} = I_{sc} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V_d)}{akT}\right) - 1 \right] - \frac{V_d}{R_p} \quad (2.5)$$

และจากผลกระทบของความต้านทานที่เชื่อมต่อแบบอนุกรมจะทำให้มีแรงดันตกคร่อมความต้านทาน จึงสามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมไดโอดได้ ดังสมการที่ (2.6)

$$V_d = V_{cell} + I_{cell} \cdot R_s \quad (2.6)$$

โดย V_{cell} คือ แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ (V)

R_s คือ ความต้านทานที่เชื่อมต่อแบบอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ (Ω)

ดังนั้นเมื่อนำสมการที่ (2.6) แทนในสมการที่ (2.5) ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ ดังสมการที่ (2.7)

$$I_{cell} = I_{sc} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + I_{cell} \cdot R_s)}{akT}\right) - 1 \right] - \frac{V + I_{cell} \cdot R_s}{R_p} \quad (2.7)$$

จากที่กล่าวมาข้างต้น ได้แสดงถึงแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์เพียงหนึ่งเซลล์เท่านั้น ซึ่งปกติแล้วเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ไม่สามารถนำไปใช้งานได้จริง เนื่องจากสามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้เพียง 0.5 โวลต์ ดังนั้นผู้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จึงต้องมีการนำเซลล์แสงอาทิตย์หลายเซลล์มาเชื่อมต่อแบบอนุกรมกันเป็นแผง เรียกว่า โมดูล (Module) และอยู่ในโครงสร้าง

ที่สามารถทนต่อสภาพแวดล้อมได้ โดยแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบของโมดูลนั้นมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ ซึ่งการเชื่อมต่อแบบอนุกรมนี้ จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากโมดูลมีค่าเพิ่มขึ้น ดังสมการที่ (2.8) แต่กระแสไฟฟ้าของโมดูลยังเท่ากับกระแสไฟฟ้าของแต่ละเซลล์ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (2.9) นอกจากนี้หากนำเซลล์แสงอาทิตย์หลายโมดูลมาเชื่อมต่อกันทั้งแบบอนุกรมและแบบขนาน จะสามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งเรียกว่า อาร์เรย์ (Array) ดังแสดงในรูปที่ 2.9

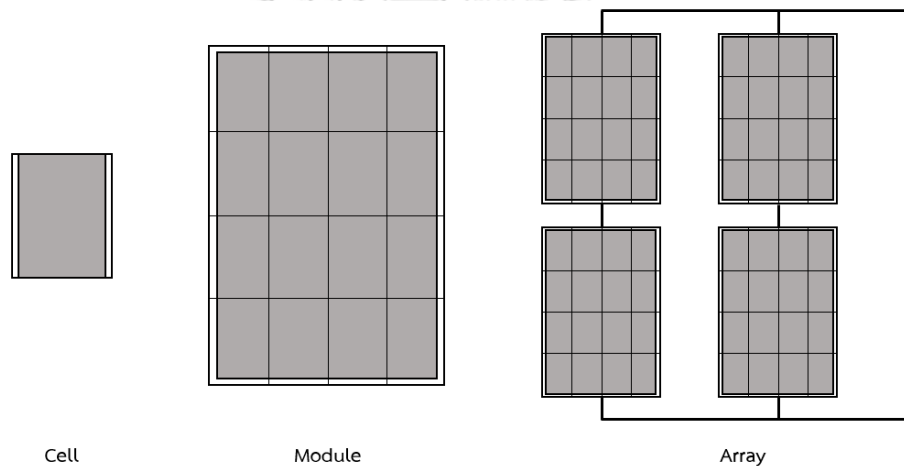
$$V_{module} = N_s \cdot (V_d - I_{module} \cdot R_s) \quad (2.8)$$

$$I_{module} = I_{sc} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V_{module} + I_{module} \cdot R_s)}{akT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{module} + I_{module} \cdot R_s}{R_p} \quad (2.9)$$

โดย N_s คือ จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่อนุกรมกันใน 1 โมดูล

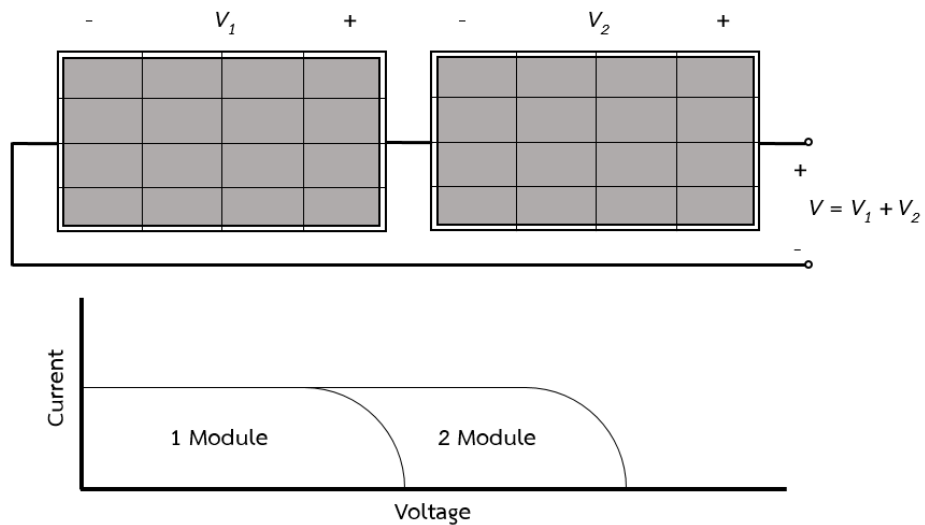
V_{module} คือ แรงดันที่ผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล (V)

I_{module} คือ กระแสที่ผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูล (A)

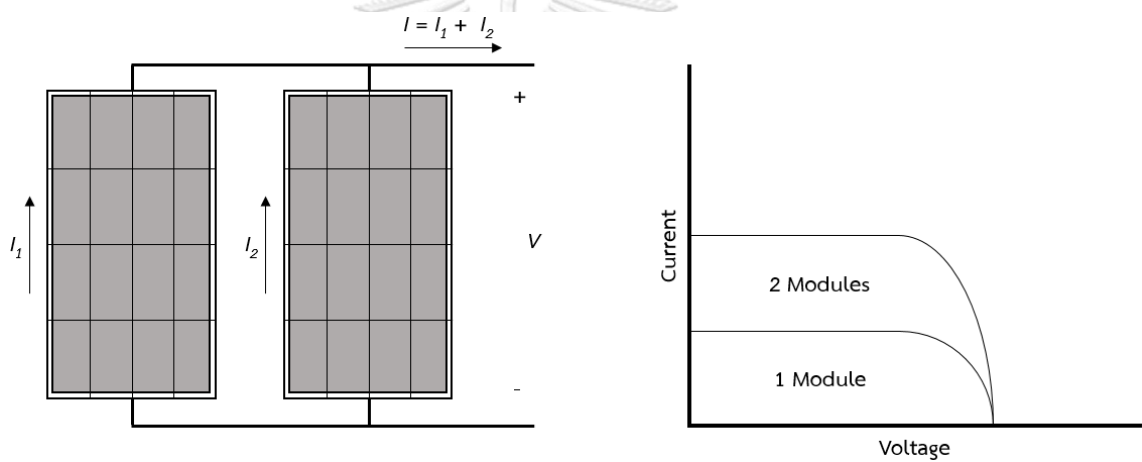


รูปที่ 2.9 เซลล์ โมดูล และอาร์เรย์ ของเซลล์แสงอาทิตย์ [6]

การนำโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มาเชื่อมต่อกันเป็นอาร์เรย์ ต้องคำนึงถึงการต่อแบบอนุกรมก่อน เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าเท่ากับแรงดันในระบบไฟฟ้าหรือโครงข่ายไฟฟ้า (Utility Grid) หรือเท่ากับแรงดันที่ต้องการ จากนั้นค่อยคำนึงถึงการต่อแบบขนาน เพื่อให้อาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการ ซึ่งผลของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเมื่อต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมและแบบขนานดังรูปที่ 2.10 และ 2.11 ตามลำดับ



รูปที่ 2.10 ผลของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเมื่อต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรม



รูปที่ 2.11 ผลของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเมื่อต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนาน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

ประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว ยังมีปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อมภายนอกที่สามารถส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานได้ คือ อุณหภูมิ และความเข้มของแสงอาทิตย์ ที่อาจเกิดจากการบังแสงแดด (Shading) หรือการบังเงา (Shadowing) ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

2.1.3.1 ผลกระทบจากอุณหภูมิ

ในการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องติดตั้งกลางแจ้งทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) และกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) โดยเมื่ออุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมีค่าลดลง ในขณะที่กระแสไฟฟ้าลัดวงจรมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยดังรูปที่ 2.12 และสามารถหาค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ดังสมการที่ (2.10) และ (2.11) ตามลำดับ

$$V_{oc,T} = V_{oc,T_{ref}} + K_v(T - T_{ref}) \quad (2.10)$$

$$I_{sc,T} = I_{sc,T_{ref}} + K_i(T - T_{ref}) \quad (2.11)$$

โดย $V_{oc,T}$ คือ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ที่อุณหภูมิ T (V)

$I_{sc,T}$ คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ที่อุณหภูมิ T (A)

$V_{oc,T_{ref}}$ คือ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ที่อุณหภูมิ T_{ref} (V)

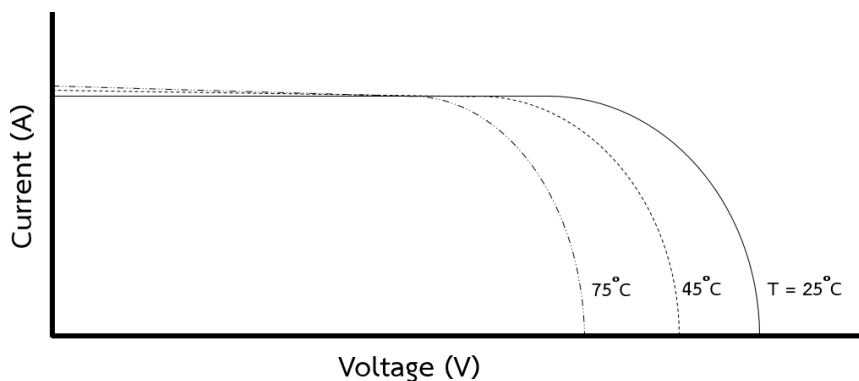
$I_{sc,T_{ref}}$ คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ที่อุณหภูมิ T_{ref} (A)

T คือ อุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ขณะที่พิจารณา ($^{\circ}\text{C}$ หรือ K)

T_{ref} คือ อุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 25°C หรือ 298.15 K

K_v คือ ค่าคงตัวการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ 1 องศาเซลเซียส หรือ 1 เคลวิน ($\text{V}/^{\circ}\text{C}$ หรือ V/K)

K_i คือ ค่าคงตัวการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ 1 องศาเซลเซียส หรือ 1 เคลวิน ($\text{A}/^{\circ}\text{C}$ หรือ A/K)



รูปที่ 2.12 ผลของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ [6]

2.1.3.2 ผลกระทบจากความเข้มของแสงอาทิตย์

ความเข้มแสงอาทิตย์ คือ ความเข้มของรังสีที่ได้จากแสงอาทิตย์ในช่วงเวลานั้น ๆ มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) หรือจูลต่อตารางเมตร (J/m^2) ซึ่งความเข้มแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นมาตรฐานนั้น วัดบนพื้นโลกในสภาพอากาศปลอดโปร่ง ไม่มีเมฆบัง และวัดที่ระดับน้ำทะเลในขณะที่แสงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลก โดยความเข้มแสงที่วัดได้เท่ากับ $1,000 W/m^2$ เท่ากับ 1 sun ที่ AM (Air Mass Ratio) เท่ากับ 1.5 ความเข้มแสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงตลอดวัน และขึ้นอยู่กับตำแหน่งพื้นที่รวมถึงสภาพภูมิอากาศ

ความเข้มแสงอาทิตย์ส่งผลกระทบต่อกระแสไฟฟ้าลัดวงจร และค่าความต้านทานที่เชื่อมต่อแบบขนาน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์ มีผลทำให้กระแสไฟฟ้าลัดวงจรมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเป็นสัดส่วนโดยตรง ในขณะที่ค่าความต้านทานแบบขนานมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนผกผัน แต่แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรและความต้านทานแบบขนานที่ขึ้นกับความเข้มของแสงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.12) และ (2.13) ตามลำดับ และผลของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์ดังรูปที่ 2.13

$$I_{sc,G} = I_{sc,G_{ref}} \cdot \frac{G}{G_{ref}} \quad (2.12)$$

$$R_{p,G} = R_{p,G_{ref}} \cdot \frac{G_{ref}}{G} \quad (2.13)$$

โดย $I_{sc,G}$ คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ที่ความเข้ม G (A)

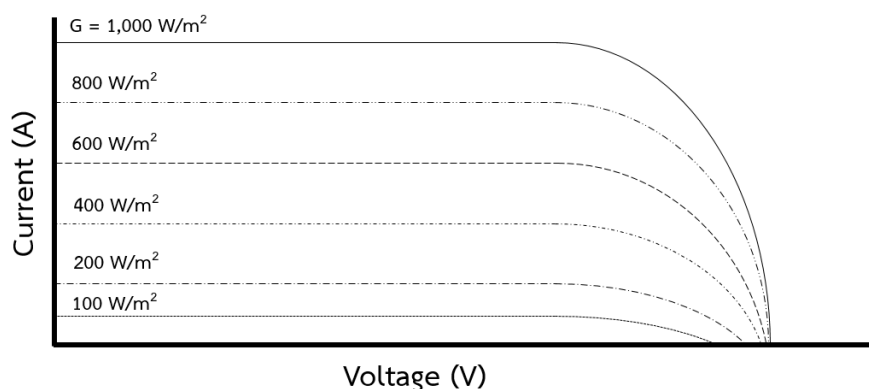
$R_{p,G}$ คือ ค่าความต้านทานแบบขนานของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ที่ความเข้ม G (Ω)

$I_{sc,G_{ref}}$ คือ กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ที่ความเข้ม G_{ref} (A)

$R_{p,G_{ref}}$ คือ ค่าความต้านทานแบบขนานของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งเซลล์ที่ความเข้ม G_{ref} (Ω)

G คือ ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ขณะที่พิจารณา (W/m^2)

G_{ref} คือ ค่าความเข้มแสงอาทิตย์อ้างอิงเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ $1,000$ (W/m^2)



รูปที่ 2.13 ผลของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์ [6]

2.1.4 ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์

ข้อมูลทางเทคนิคของเซลล์แสงอาทิตย์ (Commercial data sheet) คือ ค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิดหรือแต่ละยี่ห้อ ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการหรือห้องทดลองของผู้ผลิตแต่ละรายโดยมีการกำหนดมาตรฐานในการทดลอง (Standard Test Condition, STC) ที่สภาวะอุณหภูมิ 25°C และค่าความเข้มแสงที่ 1,000 W/m² ที่ AM 1.5 ซึ่งทางผู้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นต้องให้ข้อมูลพารามิเตอร์เหล่านี้ให้ผู้ซื้อพิจารณาเพื่อนำไปใช้งานที่เหมาะสม โดยข้อมูลพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่

- 1) กำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดที่ผลิตได้ (Maximum Power, P_{max} หรือ P_{mp}) (W)
- 2) แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Open-circuit Voltage, V_{oc}) (V)
- 3) กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short-circuit Current, I_{sc}) (A)
- 4) แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุด (Maximum Power Voltage, V_{mpp}) (V)
- 5) กระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุด (Maximum Power Current, I_{mpp}) (A)
- 6) ค่าคงตัวการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ 1 องศาเซลเซียส หรือ 1 เคลวิน (Temperature Coefficient Open Circuit, K_v) (A/K)
- 7) ค่าคงตัวการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ 1 องศาเซลเซียส หรือ 1 เคลวิน (Temperature Coefficient Open Circuit, K_i) (V/K)
- 8) จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1 โมดูล (Number of cell per module, N_s)

9) กราฟความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V curve) ดังรูปที่ 2.13

ในการประเมินคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถคำนวณได้ด้วยค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill Factor, FF) ของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นค่าอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดต่อผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรกับกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ดังสมการที่ (2.14) โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีคุณภาพดี ควรมีค่าฟิลล์แฟคเตอร์เข้าใกล้ 1 ซึ่งแสดงว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานใกล้เคียงจุดทำงานสูงสุดหรือจุดที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด

$$FF = \frac{\text{Power at MPP}}{V_{oc}I_{sc}} = \frac{V_{mpp}I_{mpp}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (2.14)$$

ประสิทธิภาพสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นค่าอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อค่ากำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.15)

$$\eta = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (2.15)$$

โดย P_{in} คือ กำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (W/m^2)

2.1.5 การเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

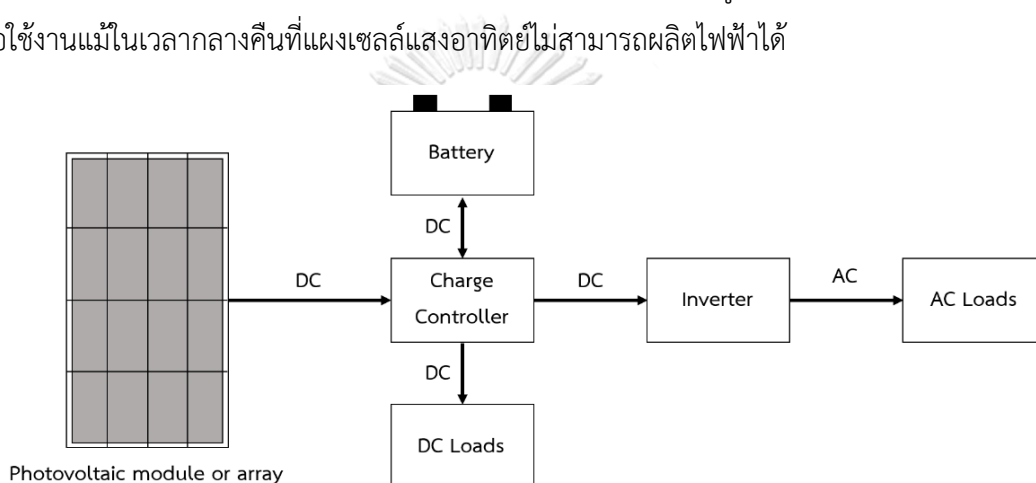
ในการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ผลผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับรูปของกำลังไฟฟ้าจริง และแรงดันไฟฟ้าที่อยู่ในรูปของไฟฟ้ากระแสตรง แต่โดยทั่วไปความต้องการใช้ไฟฟ้าหรือโหลดส่วนใหญ่ใช้ไฟฟ้าในรูปไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current, AC) ฉะนั้นการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรงไม่สามารถทำได้ จึงต้องมีอุปกรณ์เพิ่มเติมที่จะใช้ในการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์กับโหลด และเรียกระบบการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่โหลดว่า ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ระบบ คือ (1) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกตัวอิสระ (Stand-alone system) (2) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (Hybrid system) และ (3) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าระบบโครงข่ายไฟฟ้า (Grid connected system) ซึ่งสามารถอธิบายลักษณะของแต่ละระบบได้ ดังนี้

2.1.5.1 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกตัวอิสระ

เป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีการเชื่อมต่อเข้าระบบโครงข่ายไฟฟ้า โดยจ่ายไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าหรือโหลดโดยตรง ระบบแบบนี้เหมาะสำหรับบริเวณพื้นที่ห่างไกล ไม่มีโครงข่ายไฟฟ้าที่สามารถจ่ายไฟฟ้าให้ได้ การเชื่อมต่อประเภทนี้ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ คือ

1) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2) อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ (Charge Controller) 3) แบตเตอรี่ (Battery) และ 4) อินเวอร์เตอร์

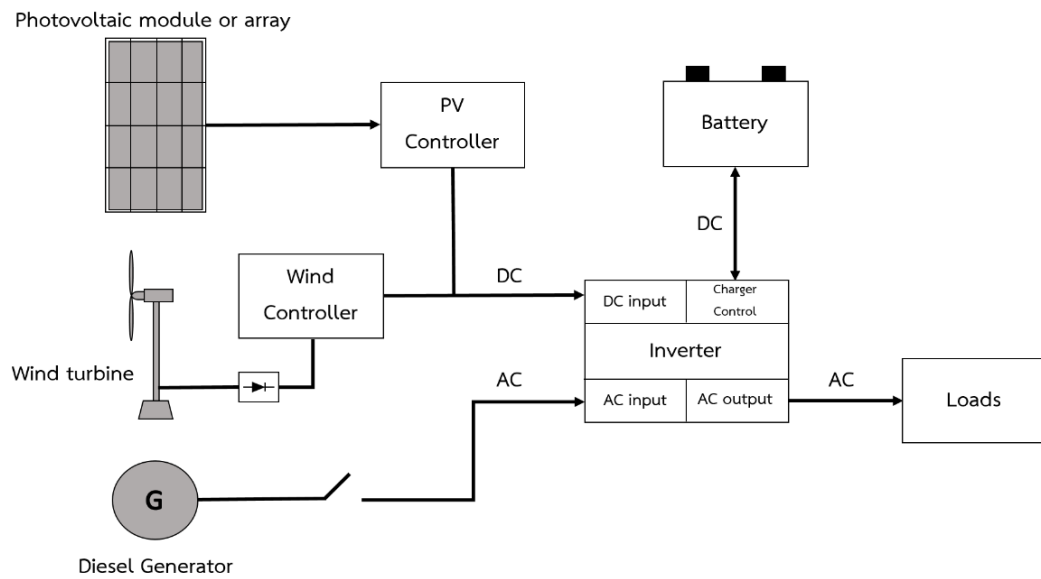
ตัวอย่างการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกตัวอิสระ ดังรูปที่ 2.14 การเชื่อมต่อลักษณะนี้ แบตเตอรี่ถือเป็นอุปกรณ์สำคัญอย่างยิ่ง โดยในช่วงเวลากลางวันพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินที่ผลิตได้จากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ถูกเก็บไว้ในแบตเตอรี่ เมื่อถึงช่วงเวลากลางคืนที่ระบบไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้นั้น พลังงานไฟฟ้าที่เก็บอยู่ในแบตเตอรี่ถูกดึงนำมาใช้งาน ฉะนั้นในการออกแบบจึงต้องเลือกเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาดของแบตเตอรี่ และขนาดของอินเวอร์เตอร์ ให้เหมาะสมต่อการใช้งานโดยคำนวณจากการประมาณโหลดที่ต่ออยู่ทั้งหมด เพื่อให้มีไฟฟ้าเพียงพอต่อใช้งานแม้ในเวลากลางคืนที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้



รูปที่ 2.14 แผนภาพระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบแยกตัวอิสระ

2.1.5.2 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน

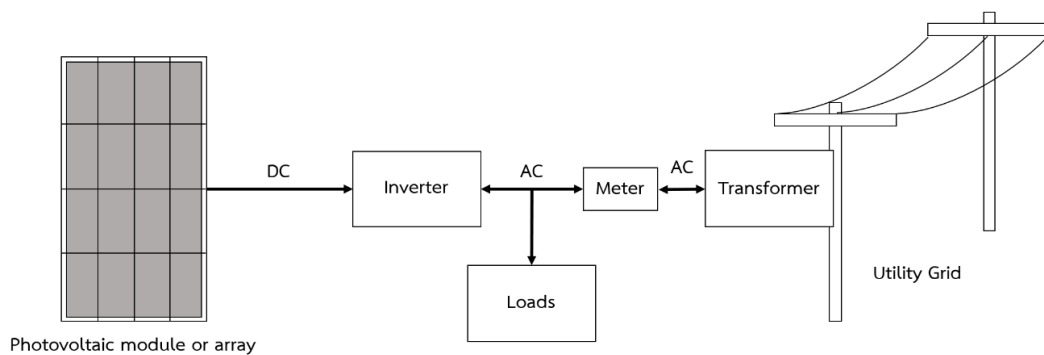
เป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกรออกแบบให้ทำงานร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าประเภทอื่น ๆ เช่น ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล และระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ เป็นต้น ซึ่งรูปแบบการเชื่อมต่อขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งานในแต่ละกรณี ตัวอย่างการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แผนภาพระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน [6]

2.1.5.3 ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าโครงข่ายไฟฟ้า

เป็นระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกออกแบบไว้สำหรับเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบของการไฟฟ้า หรือพื้นที่ที่มีระบบของการไฟฟ้าเข้าถึง ระบบผลิตไฟฟ้านี้สามารถผลิตไฟฟ้าและจ่ายให้การไฟฟ้าได้ในเวลากลางวัน ในเวลากลางคืนเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถทำงานได้จึงต้องรับพลังงานไฟฟ้าจากระบบของการไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับโหลดที่เชื่อมต่ออยู่ การเชื่อมต่อประเภทนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ คือ 1) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2) อินเวอร์เตอร์ 3) มาตรวัดไฟฟ้า (Meter) 4) หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า (Voltage Transformer) และเชื่อมต่อเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า (Power Grid หรือ Utility Grid) ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แผนภาพระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าระบบโครงข่ายไฟฟ้า

ปัจจุบันระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าระบบโครงข่ายไฟฟ้าแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทฟาร์ม และระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทติดตั้งบนหลังคา

1) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทฟาร์ม

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทฟาร์ม หรือโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (PV Power Plant) ต้องมีพื้นที่ขนาดใหญ่ในการติดตั้ง เป็นพื้นที่โล่งกว้าง ไม่มีต้นไม้หรือสิ่งปลูกสร้างที่จะทำให้เกิดการบังแสงแดดโดยรอบ ไม่เป็นพื้นที่ที่เกิดน้ำท่วมบ่อยครั้ง (Flood way) และควรอยู่ใกล้กับสายส่งหรือสายจำหน่ายของโครงข่ายไฟฟ้าเพื่อความสะดวกในการเชื่อมต่อเข้ากับระบบ อุปกรณ์ที่สำคัญประกอบด้วย

1.1) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทฟาร์มนี้ มีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำนวนมากรวมกันเป็นระบบผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ในปริมาณมาก

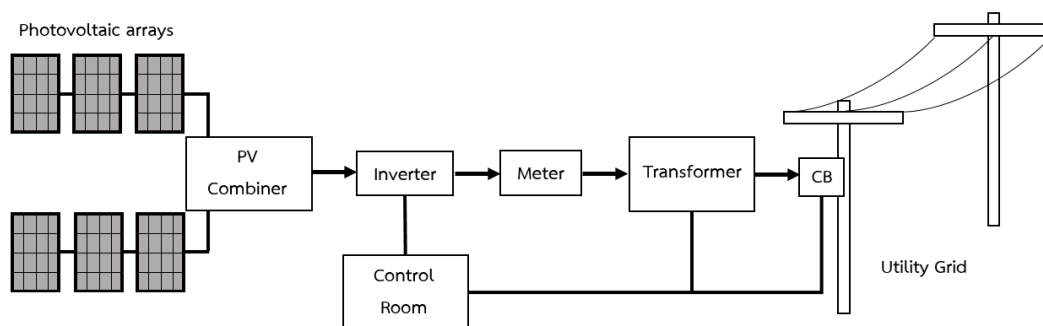
1.2) อินเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงจากระบบผลิตไฟฟ้าให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับก่อนส่งเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า

1.3) มาตรวัดไฟฟ้า ทำหน้าที่บันทึกข้อมูลปริมาณไฟฟ้าที่ส่งออกไปยังโครงข่ายไฟฟ้า

1.4) หม้อแปลงจำหน่าย ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้เท่ากับระบบโครงข่ายไฟฟ้าเพื่อให้เชื่อมต่อเข้าโครงข่ายไฟฟ้าได้

1.5) อุปกรณ์ป้องกัน เช่น ติดตั้งเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker, CB) เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดกับอุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้า

1.6) ตู้ MDB (Main Distribution Board) เป็นตู้หลักที่ใช้ควบคุมระบบไฟฟ้าในพื้นที่



รูปที่ 2.17 แผนภาพระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าระบบโครงข่ายไฟฟ้า
ประเภทฟาร์ม

2) ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทติดตั้งบนหลังคา

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทติดตั้งบนหลังคา คือ ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถติดตั้งบนหลังคาที่อยู่อาศัย อาคาร หรือสถานประกอบการต่าง ๆ เพื่อใช้ภายในอาคารที่อยู่อาศัยหรือเพื่อขายไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้แก่การไฟฟ้า ซึ่งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทติดตั้งบนหลังคาสามารถแบ่งลักษณะการใช้งานคร่าว ๆ ได้ ดังนี้

1. การใช้ไฟฟ้าภายในอาคารหรือที่อยู่อาศัยมากกว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์น้อยกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้า ไฟฟ้าส่วนที่ผลิตได้ถูกนำไปจ่ายให้กับอุปกรณ์ภายในบ้านพร้อมกับรับไฟฟ้าจากโครงข่ายของการไฟฟ้าด้วย ทำให้สามารถลดปริมาณไฟฟ้าที่ต้องซื้อจากการไฟฟ้างได้

2. การใช้ไฟฟ้าภายในอาคารที่อยู่อาศัยน้อยกว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ หากปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มากกว่าความต้องการใช้ไฟฟ้า ไฟฟ้าส่วนที่เหลือถูกจ่ายเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้าเพื่อขายให้การไฟฟ้า

3. ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อขายให้การไฟฟ้าโดยเฉพาะ ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมดถูกจ่ายเข้าโครงข่ายไฟฟ้าเพื่อขายให้การไฟฟ้า ฉะนั้นความต้องการใช้ไฟฟ้าภายในอาคารที่อยู่อาศัยจึงต้องรับไฟฟ้าจากโครงข่ายไฟฟ้าเพียงทางเดียว

ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ คือ

2.1) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า

2.2) อินเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับก่อนส่งเข้าโครงข่ายไฟฟ้า

2.3) มาตรวัดไฟฟ้า ซึ่งแบ่งออกเป็นมาตรวัดไฟฟ้าที่ทำหน้าที่บันทึกข้อมูลไฟฟ้าที่ผลิตได้และเข้าสู่โครงข่ายไฟฟ้า เรียกว่า มาตรผลิตไฟฟ้า (Export Meter) และมาตรวัดไฟฟ้าที่ทำหน้าที่บันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าที่รับเข้ามาจากโครงข่ายไฟฟ้า เรียกว่า มาตรซื้อไฟฟ้า (Conventional Meter)

2.4) ตัวเก็บข้อมูล (Data Recorder) ทำหน้าที่เก็บข้อมูลทุกประเภท เช่น ค่ากำลังไฟฟ้าจริง (Real Power หรือ Active Power, P) ค่ากำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power, Q) ระดับแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ตัวประกอบกำลัง ความถี่ไฟฟ้า รวมถึงค่าความเข้มแสงอาทิตย์ และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยข้อมูลเหล่านี้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบฯ เพื่อนำไปใช้ตรวจสอบแก้ไข ปรับปรุงระบบฯ ต่อไป

สำหรับการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทติดตั้งบนหลังคา ควรติดตั้งในสถานที่ที่เหมาะสม ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

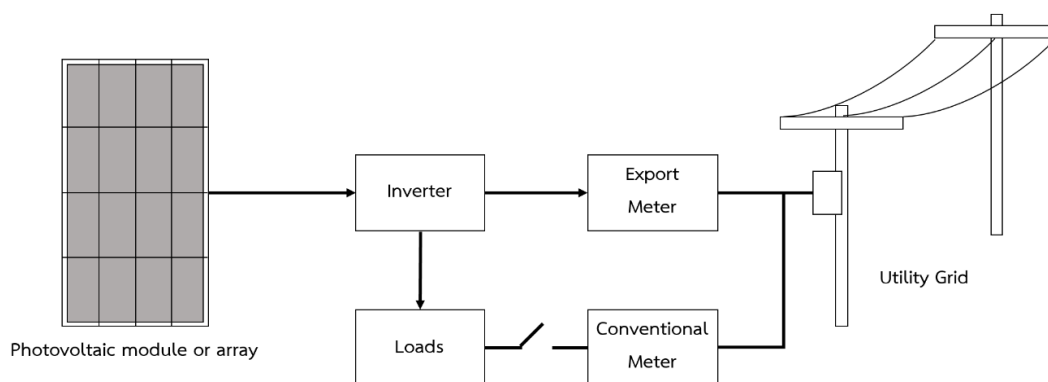
1. ทิศทางของหลังคา หลังคาของอาคารที่อยู่อาศัยที่จะติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ควรอยู่ในแนวที่สามารถรับแสงอาทิตย์ได้สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ จากแผนที่ตั้งของประเทศไทยควรติดตั้งให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ ซึ่งจะสามารถรับแสงอาทิตย์ได้ตลอดทั้งวันตั้งแต่ดวงอาทิตย์ขึ้นทางทิศตะวันออกในตอนเช้า ไปจนถึงขอบฟ้าทางทิศตะวันตกในตอนเย็น

2. มุมเอียง หลังคาของอาคารที่อยู่อาศัย หรือโครงสร้างที่จะติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ ควรทำมุมเอียง 15 องศาถึง 45 องศาตามแนวระดับตามความเหมาะสม เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความเข้มแสงจากดวงอาทิตย์มากที่สุดโดยเฉลี่ยจากช่วงเวลาทั้งปี และลดการสะสมของคราบฝุ่นผง รวมถึงหยดน้ำที่อาจทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงลดลง

3. ลักษณะการบังแสงแดด ไม่ควรมีอาคาร ต้นไม้ หรือสิ่งปลูกสร้างที่สูงกว่าอาคารที่ทำการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์อยู่บริเวณโดยรอบในทิศทางการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ คือ ทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตก

4. โครงสร้างของหลังคา หลังคาของอาคารที่จะติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ต้องสามารถรับน้ำหนักของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมดได้ รวมถึงน้ำหนักของโครงสร้างที่ยึดเซลล์แสงอาทิตย์จากแรงปะทะของลมด้วย โดยพื้นที่หลังคาประมาณ 1 ตารางเมตร ควรรับน้ำหนักได้ประมาณ 15-20 กิโลกรัม

5. ตำแหน่งที่ตั้งของอาคารที่อยู่อาศัย อาคารที่ต้องการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ควรอยู่ไกลจากสายป้อนของโครงข่ายไฟฟ้า เนื่องจากหากระยะทางไกลเกินไปทำให้เกิดปัญหาในการควบคุมแรงดันไฟฟ้า และเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้นได้



รูปที่ 2.18 แผนภาพระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อเข้าระบบโครงข่ายไฟฟ้า
ประเภทติดตั้งบนหลังคา

2.2 ผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดการบังแสงแดด

เนื่องจากปัจจัยสำคัญของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์คือการนำพลังงานจากแสงอาทิตย์มาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า ฉะนั้นหากมีการบังแสงแดดเกิดขึ้นย่อมส่งผลกระทบต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าของระบบเป็นอย่างมาก ในหัวข้อนี้จึงกล่าวถึงผลกระทบของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเกิดการบังแสงแดด และการแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดการบังแสงแดดโดยการใช้บายพาสไดโอด

2.2.1 สาเหตุของการบังแสงแดด

การบังแสงแดด หรือ การบังเงา ส่วนใหญ่เกิดจากหลายสาเหตุ เช่น ต้นไม้ อาคาร สิ่งปลูกสร้าง ซึ่งการออกแบบระบบให้เลี่ยงจากการถูกบังแสงแดดมากที่สุด จะทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าได้ เช่น การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar rooftop) หรือ การติดตั้งระบบขนาดใหญ่ในพื้นที่โล่งกว้าง สำหรับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar farm) แต่บางครั้งการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็มีอาจหลีกเลี่ยงจากสภาวะแวดล้อมอื่น ๆ ได้ เช่น ฝุ่นละออง มูลนก หรือเมฆที่เคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูป 2.19 ทำให้เกิด

การบังแสงแดดบนเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้น ซึ่งส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความเข้มแสงอาทิตย์ลดลง กำลังไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้จึงลดลงด้วย



(a) คราบมูลนก



(b) ฝุ่นละออง



(c) เงาจากหลังคาอาคาร



(d) เงาจากเมฆ

รูปที่ 2.19 ตัวอย่างการเกิดการบังแสงแดด

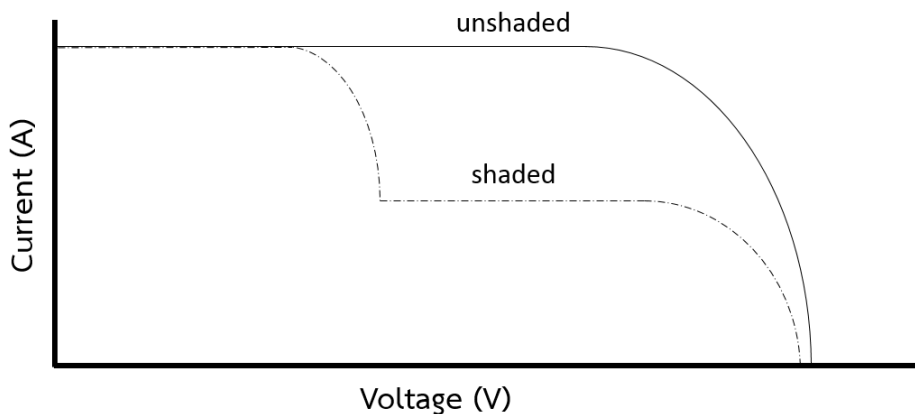
2.2.2 ผลกระทบของการบังแสงแดด

จากที่กล่าวมา เมื่อเกิดการบังแสงแดดขึ้น ทำให้ความเข้มแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง ฉะนั้นจึงมีผลกับพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ตัว คือ 1) กระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ หรือกระแสโฟโตอิเล็กทริกส์ (Photoelectric current, I_{sc}) และ 2) ค่าความต้านทานแบบขนาน (Shunt resistance, R_p) ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.1.3.2

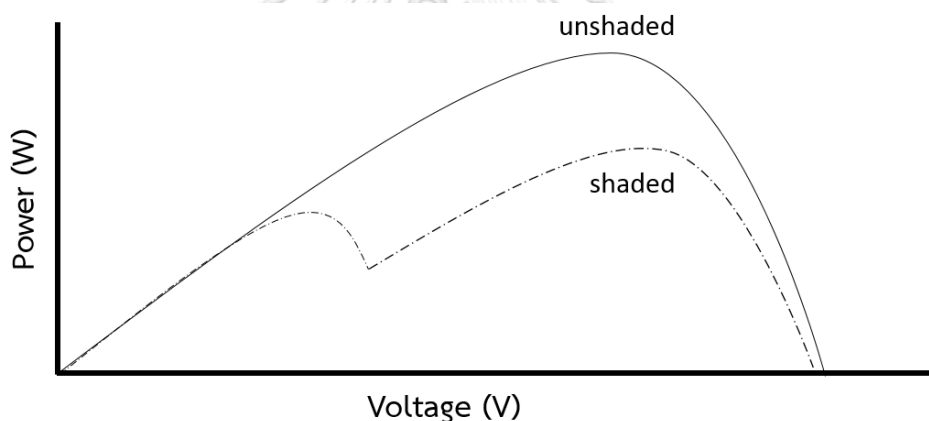
2.2.2.1 ผลของการบังแสงแดดต่อจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

ปัญหาอีกประการหนึ่งของการเกิดการบังแสงแดด คือ ส่งผลให้จุดที่เกิดกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีได้หลายค่า ผลที่ตามมาคือไม่สามารถหาจุดที่เกิดกำลังไฟฟ้าจริงสูงสุดได้ตลอดช่วงเวลาทำงาน หากไม่มีกระบวนการหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบที่เหมาะสมที่สุด อันเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ซึ่งตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกบังแสงแดดและ

ไม่ถูกบังแสงแดด ดังรูปที่ 2.20 และตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและแรงดันไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกบังแสงแดดและไม่ถูกบังแสงแดด ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกบังแสงแดดและไม่ถูกบังแสงแดด [11]



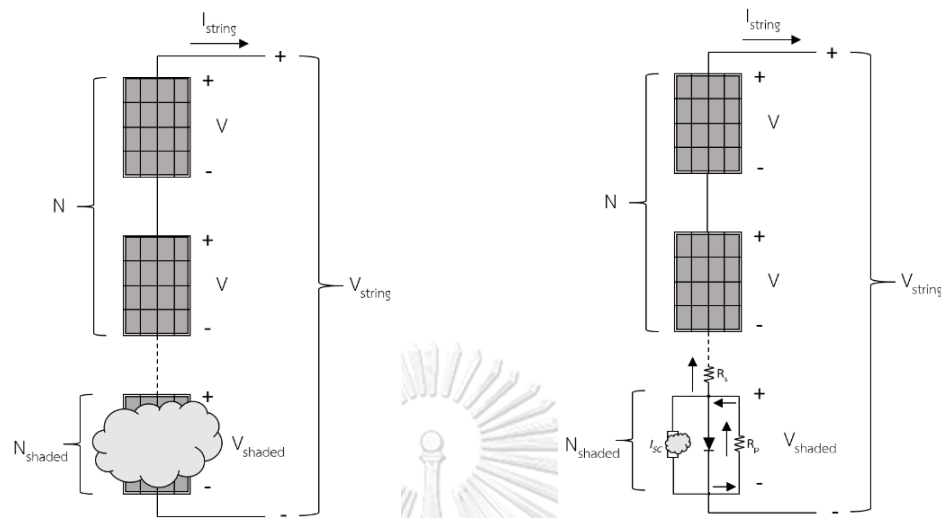
รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริงและแรงดันไฟฟ้าของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกบังแสงแดดและไม่ถูกบังแสงแดด [11]

จากรูปที่ 2.21 จะเห็นว่าหากเกิดการบังแสงแดด จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดนั้นจะมีมากกว่าหนึ่งจุด (Multiple peaks) การหาจุดทำงานกำลังไฟฟ้าสูงสุดจึงต้องสามารถหาจุดการทำงานได้ตลอดช่วงการทำงาน และทำงานที่จุดกำลังสูงสุดที่มากกว่า เพื่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีกว่า

2.2.2.2 ผลของการบังแสงแดดต่อการผลิตกำลังไฟฟ้า

เมื่อเกิดการบังแสงแดดกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นส่งผลให้เกิดค่าความร้อนที่ตัวเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้น เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกบังทำตัวเสมือนโหลดแทนที่จะเป็น

แหล่งจ่ายไฟ [11] ทำให้กำลังการผลิตไฟฟ้าลดลง แบบจำลองเพื่อศึกษาผลของการบังแสงแดดต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าอย่างง่าย ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แบบจำลองการทำงานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่เกิดการบังแสงแดด

จากรูปที่ 2.22 เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์หรือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อกันแบบอนุกรม เมื่อเกิดการบังแสงแดดขึ้น เซลล์แสงอาทิตย์ถูกแบ่งได้สองส่วน คือ ส่วนของเซลล์หรือแผงที่ไม่ถูกบังแสงแดด ซึ่งมีจำนวน N โมดูล และส่วนของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกบังแสงแดดจำนวน N_{shaded} โมดูล ซึ่งการบังแสงแดดแบบสมบูรณ์ส่งผลให้ความเข้มแสงอาทิตย์บนเซลล์นั้นเป็นศูนย์ ซึ่งทำให้กระแสลัดวงจร (I_{sc}) ของเซลล์ที่ถูกบังแสงแดดมีค่าเป็นศูนย์ด้วย ทำให้ไดโอดในเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานแบบย้อนกลับ (Reverse bias) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมดจึงไหลผ่านไปยังตัวต้านทานแบบขนาน (R_p) ฉะนั้นจะสามารถหาค่าแรงดันของของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกันแบบอนุกรมกันหนึ่งแถว (V_{string}) ได้ดังสมการที่ (2.16)

$$\left. \begin{aligned} V_{string} &= (N \cdot V) + (N_{shaded} \cdot V_{shaded}) \\ V_{string} &= (N \cdot V) - I_{string} \cdot (R_s + R_p) \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

เมื่อ V_{string} คือ แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในหนึ่งแถวที่รวมส่วนที่ถูกบังแสงแดดและไม่ถูกบังแสงแดด (V)

N คือ จำนวนของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้รับความเข้มแสงปกติหรือไม่ถูกบังแสงแดด (โมดูล)

V คือ แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลที่ได้รับความเข้มแสงปกติ หรือไม่ถูกบังจากแสงแดด (V)

N_{shaded} คือ จำนวนของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้รับความเข้มแสง หรือถูกบังจากแสงแดด (โมดูล)

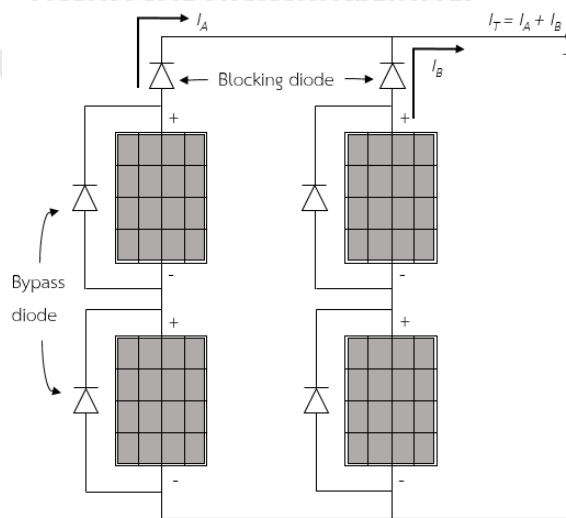
V_{shaded} คือ แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งโมดูลที่ได้รับความเข้มแสงน้อยกว่าปกติ หรือถูกบังจากแสงแดด (V)

I_{string} คือ กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ในหนึ่งแถวอนุกรม (A)

จากสมการที่ (2.16) หากเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งแถวอนุกรมถูกบังจากแสงแดด อันเป็นผล ทำให้กำลังการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แถวนั้นลดลง เนื่องจากเซลล์ที่ถูกบังจากแสงแดด ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้

2.2.3 การแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดการบังแสงแดดโดยการใช้ไดโอด

ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ การโดนบังแสงแดดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้เกิดผลกระทบอย่างยิ่งต่อพลังงานที่ระบบผลิตได้ ซึ่งไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับบริเวณที่ถูกบังแสงแดด กล่าวคือ หากระบบถูกบังแสงแดดเพียงครึ่งเดียว แต่พลังงานรวมที่ถูกส่งออกมามีโอกาสลดลงมากกว่าครึ่ง จากผลกระทบของการบังแสงแดดต่อการผลิตกำลังไฟฟ้าในหัวข้อที่ 2.2.2 นั้น ทางผู้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จึงแก้ปัญหาโดยการนำไดโอดมาใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อแก้ปัญหา ซึ่งการนำไดโอดมาใช้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทที่สำคัญ คือ บล็อกกิ้งไดโอด (Blocking diode) และบายพาสไดโอด (Bypass diode) ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การใช้ไดโอดในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ [45]

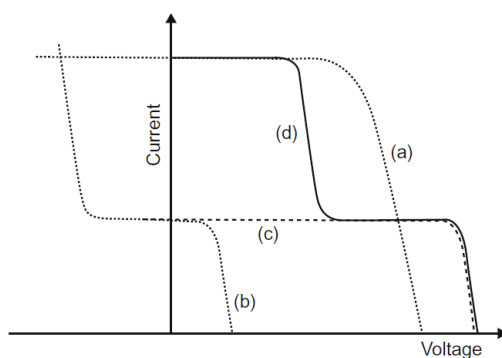
2.2.3.1 บล็อกกึ่งไดโอด

บล็อกกึ่งไดโอด ทำหน้าที่ในการป้องกันกระแสไหลเข้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในกรณีที่มีการต่อกันแบบขนานของเซลล์แสงอาทิตย์หลาย ๆ แลว กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแลวอื่น ๆ อาจไหลเข้าไปยังแลวที่ถูกบดบังจากแสงแดดได้ หรือระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อกับแบตเตอรี่ ในช่วงเวลากลางคืนขณะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่มีการผลิตไฟฟ้า ความต่างศักย์ของระบบมีค่าต่ำกว่าภายนอกหรือส่วนอื่น ๆ ในวงจรไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่ เป็นต้น ทำให้กระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่มีโอกาสไหลเข้าสู่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ฉะนั้นการต่อไดโอดในลักษณะนี้ให้กระแสไฟฟ้าไหลออกจากแผงไปยังโหลด แบตเตอรี่ หรือโครงข่ายไฟฟ้าเพียงทางเดียว

2.2.3.2 บายพาสไดโอด

เมื่อมีการอนุกรมกันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ หากมีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนหนึ่งส่วนใดถูกบดบังจากแสงแดด นอกจากแผงนั้นไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้แล้ว ยังทำให้เกิดความต้านทานในแผงที่สูงมาก ทำให้กระแสที่ผลิตได้จากแผงอื่น ๆ ไม่สามารถไหลผ่านได้ ฉะนั้นการต่อไดโอดขนานกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในลักษณะต่อขั้วตรงข้ามกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่เป็นบายพาสไดโอด ซึ่งมีความต้านทานต่ำ ๆ ในกรณีปกติกระแสไม่ไหลผ่านบายพาสไดโอด แต่เมื่อมีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใดส่วนหนึ่งถูกบดบังจากแสงแดดจนมีความต้านทานสูงมากเสมือนการเปิดวงจรเมื่อเทียบกับความต้านทานของไดโอด ทำให้กระแสไหลผ่านบายพาสไดโอดแทน

รูปที่ 2.24 แสดงตัวอย่างลักษณะกราฟ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อนุกรมกัน 5 เซลล์ โดยที่มีหนึ่งเซลล์ถูกบังแสงแดด เปรียบเทียบกันระหว่างการมีบายพาสไดโอด และไม่มีบายพาสไดโอด โดย (a) คือลักษณะกราฟของสี่เซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ถูกบัง (b) เป็นลักษณะของเซลล์ที่ถูกบังที่มีบายพาสไดโอด (c) คือลักษณะของเซลล์ที่อนุกรมกันทั้งห้าเซลล์ โดยไม่มีบายพาสไดโอด และ (d) เป็นลักษณะของเซลล์ที่อนุกรมกันทั้งห้าเซลล์ และมีบายพาสไดโอดต่อขนานกับเซลล์ที่โดนบังแสงแดด



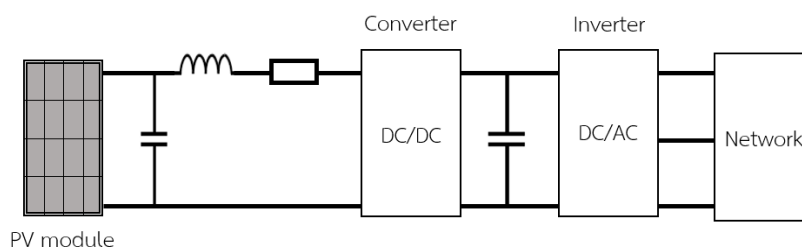
รูปที่ 2.24 ลักษณะของกราฟ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อนุกรมกัน โดยมีหนึ่งเซลล์ที่ถูกบังจากแสงแดด [45]

จากรูปที่ 2.24 เมื่อติดตั้งบายพาสไดโอดกับเซลล์ที่ถูกบังแสงแดด เกิดจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสองจุด ซึ่งดีกว่าการไม่ติดตั้งบายพาสไดโอด ที่ทำให้เกิดจุดทำงานสูงสุดแค่จุดเดียวและมีค่าต่ำกว่า

โดยปกติแล้วบายพาสไดโอดสามารถติดตั้งได้ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผง หรือติดตั้งได้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการอนุกรมกันสองแผงขึ้นไป จากการศึกษาเรื่องบายพาสไดโอดใน [9] หากจำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมกันต่อบายพาสไดโอดหนึ่งตัวน้อย แรงดันกลับขั้วของเซลล์ที่ถูกบังแสงแดดมีค่าน้อยกว่า เช่นเดียวกับกำลังที่สูญเสียไปให้กับเซลล์ที่ถูกบังแสงแดด ทำให้กราฟมีจุดกำลังสูงสุดเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งจุด ซึ่งถ้าอุปกรณ์ในการหาจุดทำงานไม่สามารถหาตำแหน่งที่มีค่าสูงสุดได้อันเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นี้ลดลงอย่างมาก ฉะนั้นการติดตั้งบายพาสไดโอดกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกแผงหรือติดกับทุกเซลล์แสงอาทิตย์สามารถช่วยลดผลกระทบจากการบังแสงแดดได้

2.3 เทคโนโลยีการเชื่อมต่อบรรบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

ในการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นต้องมีระบบการเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และอุปกรณ์ที่ช่วยส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าหรืออินเวอร์เตอร์ (Inverter) เพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตไฟฟ้าได้ตามที่ต้องการ ตัวอย่างโครงสร้างของระบบการเชื่อมต่อดังรูปที่ 2.25 โดยประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่แปลงไฟกระแสตรงเป็นไฟกระแสตรงที่มีแรงดันเหมาะสมกับการทำงานของอินเวอร์เตอร์ และอินเวอร์เตอร์ (DC-AC inverter) ทำหน้าที่แปลงไฟกระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อนำไปใช้งานหรือขายให้การไฟฟ้า ซึ่งประสิทธิภาพ และความน่าเชื่อถือของระบบสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ในส่วนนี้ และปัจจุบันเทคโนโลยีการเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับโครงข่ายไฟฟ้ามี 4 ประเภท ได้แก่ แบบรวมศูนย์ (Central inverter) แบบสตริง (String inverter) แบบไมโครอินเวอร์เตอร์ (Micro-inverter) และแบบใช้เครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์



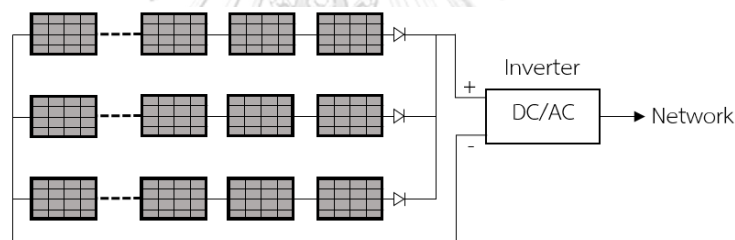
รูปที่ 2.25 แผนภาพโครงสร้างของระบบการเชื่อมต่อบรรบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับโครงข่ายไฟฟ้า [11]

2.3.1 แบบรวมศูนย์

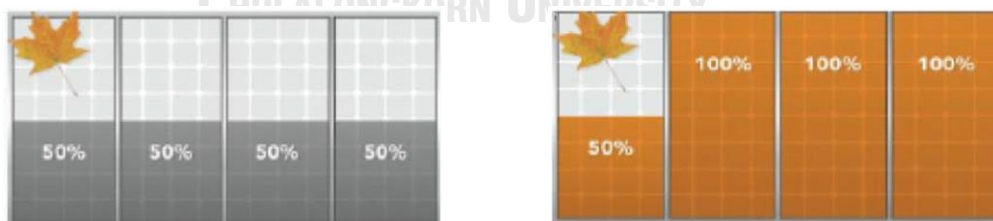
ระบบการเชื่อมต่อแบบรวมศูนย์จะมีอินเวอร์เตอร์ 1 ตัว เชื่อมต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมดที่มีการต่อกันแบบอนุกรม ดังรูปที่ 2.26

ข้อดีของระบบแบบรวมศูนย์ คือ บำรุงรักษาง่าย และต้นทุนในการติดตั้งน้อย เนื่องจากมีอินเวอร์เตอร์เพียงตัวเดียว ประสิทธิภาพค่อนข้างสูงเมื่ออยู่ในพื้นที่ที่ไม่ถูกบังจากแสงแดด

ข้อเสียของระบบนี้คือ หากเกิดการบังแสงแดด ประสิทธิภาพทั้งระบบจะลดลง ดังรูปที่ 2.27(a) หากอินเวอร์เตอร์ไม่สามารถทำงานได้ ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งระบบก็ไม่สามารถจ่ายไฟให้ระบบที่ต่ออยู่ได้เช่นกัน และยังมีข้อจำกัดในการออกแบบและพื้นที่ในการติดตั้ง ซึ่งต้องเป็นบริเวณที่ไม่ทำให้เกิดการบังแสงแดด และจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถติดตั้งได้ ถูกจำกัดด้วยขนาดของอินเวอร์เตอร์ และยากต่อการตรวจเช็คสภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ทั้งหมด



รูปที่ 2.26 แผนภาพโครงสร้างอินเวอร์เตอร์แบบรวมศูนย์



(a) เมื่อใช้ระบบเชื่อมต่อแบบรวมศูนย์
หรือแบบสตริง

(b) เมื่อใช้ระบบเชื่อมต่อแบบ
ไมโครอินเวอร์เตอร์หรือใช้เครื่องปรับจุดทำงาน
ที่เหมาะสม

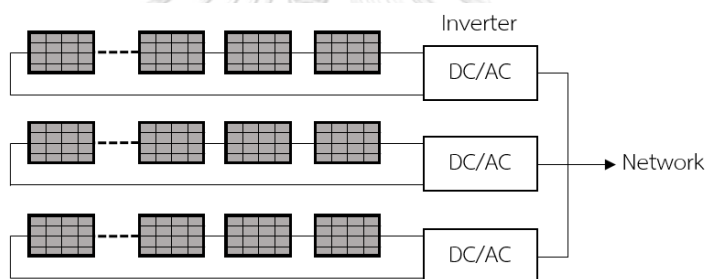
รูปที่ 2.27 พลังงานของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้รับผลกระทบจากการบังแสงแดด [10]

2.3.2 แบบสตรึง

ระบบการเชื่อมต่อแบบสตรึง พัฒนามาจากระบบแบบรวมศูนย์เล็กน้อย โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมกันหนึ่งแถว โดยเชื่อมต่อกับอินเวอร์เตอร์หนึ่งตัว และอินเวอร์เตอร์แต่ละตัวต่อขนานกันเพื่อจ่ายไฟ ดังรูปที่ 2.28

ข้อดีของระบบแบบสตรึง คือ ต้นทุนในการติดตั้งน้อยกว่า และการบำรุงรักษาต่ำกว่าระบบแบบไมโครอินเวอร์เตอร์ และแบบใช้เครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสม ประสิทธิภาพค่อนข้างสูงเมื่อไม่มีผลกระทบจากการบังแสงแดด

ข้อเสียของระบบนี้ คือ หากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แถวใดถูกบังแสงแดด แรงดันของแถวนั้นมีค่าลดลง และหากน้อยกว่าแรงดันที่อินเวอร์เตอร์สามารถทำงานได้ แผงเซลล์แสงอาทิตย์แถวนั้น ๆ ไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกได้ ไม่สามารถเพิ่มแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้เนื่องจากข้อจำกัดของอินเวอร์เตอร์ และยากต่อการตรวจหาแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำงานผิดปกติ



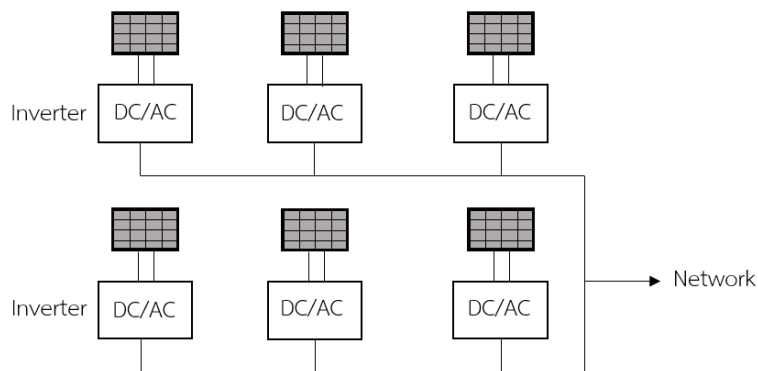
รูปที่ 2.28 แผนภาพโครงสร้างอินเวอร์เตอร์แบบสตรึง

2.3.3 ไมโครอินเวอร์เตอร์

ระบบการเชื่อมต่อแบบไมโครอินเวอร์เตอร์ มีการเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์ขนาดเล็กกับทุกแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้อินเวอร์เตอร์สามารถส่งออกพลังงานไฟฟ้าที่จุดการทำงานสูงสุดของแต่ละแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ และมีการเชื่อมต่อกันแบบขนานเพื่อจ่ายไฟฟ้าออกไปยังระบบ ดังรูปที่ 2.29

ข้อดีของระบบแบบไมโครอินเวอร์เตอร์ คือ ช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากการถูกบังแสงแดดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ถูกบังแสงแดดไม่ได้รับผลกระทบจากแผงที่ไม่ได้รับแสง และยังคงทำงานได้ดี ดังรูปที่ 2.27(b) เนื่องจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผงในระบบแบบไมโครอินเวอร์เตอร์มีความเป็นอิสระต่อกัน และทำให้ง่ายต่อการหาแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำงานผิดปกติ ประสิทธิภาพค่อนข้างสูง

ข้อเสียของระบบนี้ คือ ต้นทุนการติดตั้งสูงเมื่อเทียบกับระบบอื่น ๆ การดูแลบำรุงรักษา ค่อนข้างยาก และปัญหาเรื่องฮาร์มอนิก



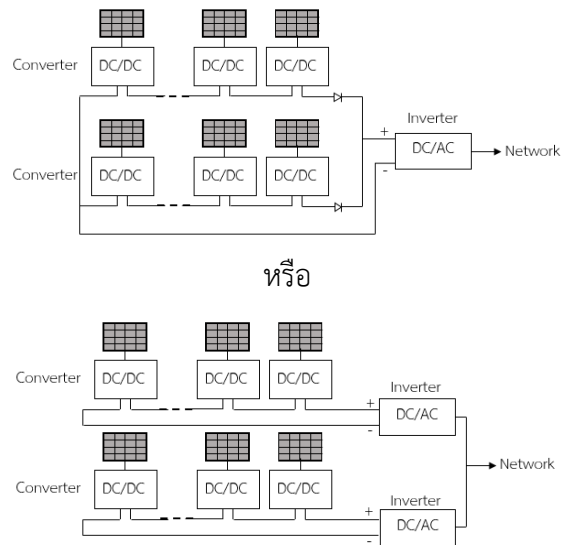
รูปที่ 2.29 แผนภาพระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการใช้ไมโครอินเวอร์เตอร์

2.3.4 แบบใช้เครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ระบบการเชื่อมต่อนี้ พัฒนามาจากระบบการเชื่อมต่อแบบรวมศูนย์ โดยจะมีการติดตั้งเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับแต่ละแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้สามารถทำงานที่จุดทำงานสูงสุดของแต่ละแผงได้เช่นเดียวกับระบบแบบไมโครอินเวอร์เตอร์ ตัวเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมจะทำหน้าที่ปรับจุดการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออยู่ให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด ณ ขณะนั้น และส่งออกไปยังอินเวอร์เตอร์ส่วนกลางเพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายออกสู่ระบบ ดังรูปที่ 2.30

ข้อดีของระบบแบบใช้เครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสม คือ ช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากการถูกบังแสงแดดของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และสามารถรับรู้การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผงได้เช่นเดียวกับระบบไมโครอินเวอร์เตอร์ ในราคาต้นทุนที่ต่ำกว่าประสิทธิภาพสูงแม้ว่าถูกบังจากแสงแดด

ข้อเสียของระบบนี้ คือ จำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถติดตั้งได้ถูกจำกัดด้วยขนาดของอินเวอร์เตอร์ ฉะนั้นหากทำการขยายระบบจะต้องเพิ่มจำนวนอินเวอร์เตอร์หรือเพิ่มขนาดของอินเวอร์เตอร์ด้วย



รูปที่ 2.30 แผนภาพระบบแบบใช้เครื่องปรับจุกทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากที่กล่าวข้างต้นสามารถนำมาเขียนตารางเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของเทคโนโลยีการเชื่อมต่อแต่ละรูปแบบได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบระบบเชื่อมต่อแบบรวมศูนย์ แบบสตริง ไมโครอินเวอร์เตอร์ และเครื่องปรับจุกทำงานที่เหมาะสม [13, 14]

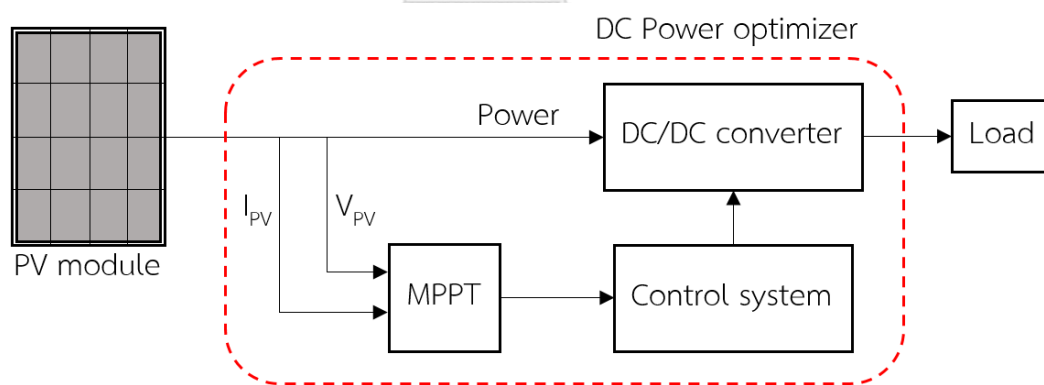
ข้อมูล	แบบรวมศูนย์	แบบสตริง	ไมโครอินเวอร์เตอร์	เครื่องปรับจุกทำงานที่เหมาะสม
ต้นทุน	น้อยสุด*	น้อย	มากที่สุด	ปานกลาง
ประสิทธิภาพ	98.5%*	98%*	90-95%	98.8%*
ประสิทธิภาพเมื่อเกิดการบังแสงแดด	ต่ำ	ต่ำ	ดี*	ดี*
การติดตามจุดกำลังสูงสุด	ทั้งระบบ	แต่ละแถว	แต่ละแผง*	แต่ละแผง*
จำนวนส่วนประกอบ	น้อยมาก*	น้อย	มาก	ปานกลาง
การนำไปใช้	ฟาร์ม	ฟาร์ม/หลังคา*	หลังคา*	ฟาร์ม/หลังคา*

* แสดงสิ่งที่พิจารณาในการเลือกระบบที่ดีที่สุด

จากที่กล่าวถึงเทคโนโลยีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้น หากไม่มีระบบเชื่อมต่อดังกล่าว พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถนำมาใช้งานได้ตามที่ต้องการ เช่น ใช้ภายในบ้าน อาคาร ที่อยู่อาศัย หรือแม้แต่ขายให้การไฟฟ้า ฉะนั้นเทคโนโลยีการเชื่อมต่อถือว่ามีความสำคัญในระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มาก ซึ่งงานวิจัยนี้จึงได้เน้นถึงเทคโนโลยีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบใช้เครื่องปรับจุกทำงานที่เหมาะสม หรือเรียกอีกอย่างว่า DC power optimizer เนื่องจากข้อดีในเรื่องประสิทธิภาพ และราคาต้นทุน

2.4 เครื่องปรับจุกการทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากหัวข้อที่ 2.3 ข้างต้น เครื่องปรับจุกทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นเทคโนโลยีการเชื่อมต่อระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ประเภทหนึ่งที่สามารถลดผลกระทบในเรื่องการบังแสงแดดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และช่วยให้เซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผงสามารถผลิตไฟฟ้าได้ที่จุดทำงานสูงสุด ส่งผลให้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีองค์ประกอบสำคัญที่ทำหน้าที่ดังกล่าว คือ คอนเวอร์เตอร์ (DC-DC converter) และกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุด (Maximum Power Point Tracking, MPPT) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผง ดังรูปที่ 2.31

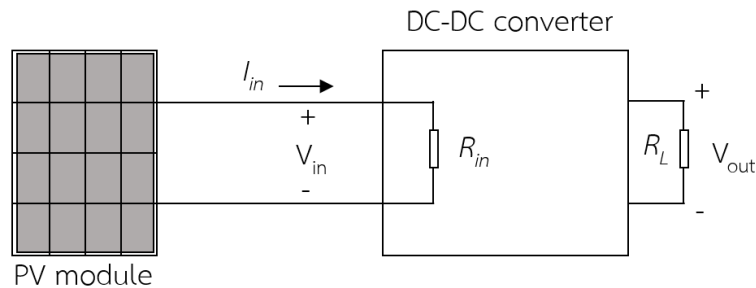


รูปที่ 2.31 แผนภาพองค์ประกอบของสำคัญของระบบแบบใช้เครื่องปรับจุกทำงานที่เหมาะสม

2.4.1 คอนเวอร์เตอร์

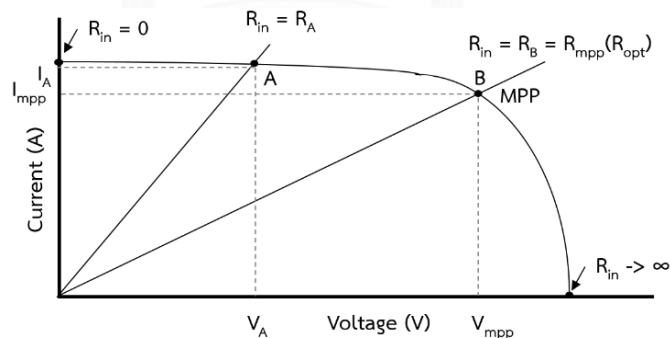
ส่วนที่สำคัญในระบบการจัดการพลังงานพื้นฐานของการผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ คือ คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่ช่วยเปลี่ยนแรงดันไฟตรงขาเข้าที่ได้รับ เป็นแรงดันไฟตรงขาออกที่มีขนาดตามต้องการ ซึ่งวงจรพื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์สามารถจำแนกอย่างกว้าง ๆ ได้ 3 ประเภท คือ (1) ใช้ตัวต้านทาน (linear regulators) (2) ใช้ตัวเหนี่ยวนำ (Inductive converter) และ (3) ใช้ตัว

เก็บประจุ (Capacitive converter) โดยในบทนี้ขอก้าวถึงคอนเวอร์เตอร์ประเภทใช้ตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งระบบการเชื่อมต่อระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์และคอนเวอร์เตอร์สามารถเขียนได้ดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 แผนภาพการเชื่อมต่อคอนเวอร์เตอร์กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่าย

เมื่อ V_{in} และ I_{in} คือ แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ และเป็นค่าเดียวกับแรงดันและกระแสขาเข้าของคอนเวอร์เตอร์ และ R_{in} คือ ค่าความต้านทานขาเข้าของคอนเวอร์เตอร์ โดยเป็นค่าเดียวกับค่าความต้านทานปรับค่าได้ ในหัวข้อที่ 2.1.1.3 เรื่องการหาความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งค่า R_{in} ควรมีค่าเท่ากับความต้านทานที่เหมาะสม (R_{opt}) ณ ความเข้มแสงและอุณหภูมิขณะนั้น ยกตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันในรูปที่ 2.33 ถ้าค่า $R_{in} = R_A$ แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะทำงานที่จุด A คือ มีกระแส $I_{in} = I_A$ และแรงดัน $V_{in} = V_A$ แต่ถ้าต้องการให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่จุดกำลังสูงสุดที่จุด B ต้องทำการปรับให้ค่า $R_{in} = R_B = R_{mpp}(R_{opt})$



รูปที่ 2.33 แผนภาพการเปลี่ยนจุดการทำงานที่ได้กำลังสูงสุด [28]

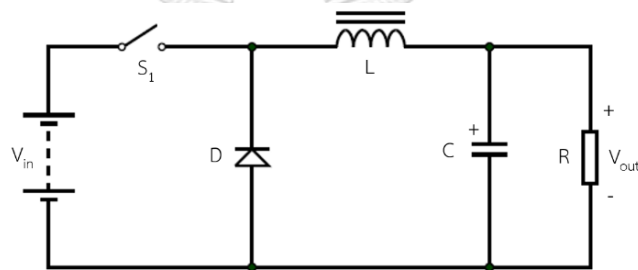
2.4.1.1 คอนเวอร์เตอร์ประเภทตัวเหนี่ยวนำ

คอนเวอร์เตอร์ประเภทนี้มีองค์ประกอบสำคัญ คือ ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) ช่วยในการเก็บสะสมพลังงานชั่วคราว ซึ่งการแปลงระดับแรงดันไฟตรงให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงนั้น ขึ้นอยู่กับระยะเวลา

ในการสะสมพลังงานและการปล่อยพลังงานของตัวเหนี่ยวนำ ที่ถูกควบคุมโดยการทำงานของสวิตช์ (Switch) และคอนเวอร์เตอร์พื้นฐานสามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 3 แบบ คือ ชนิดลดแรงดัน (Step-down converter) ชนิดเพิ่มแรงดัน (Step-up converter) และชนิดที่สามารถทำได้ทั้งเพิ่มและลดแรงดัน (Step-up/Step-down converter)

1) วงจรทอนระดับแรงดัน (Buck converter)

วงจรทอนระดับ เป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิดลดระดับแรงดัน กล่าวคือ แรงดันทางฝั่งขาออกจะต่ำกว่าแรงดันทางฝั่งขาเข้า และกระแสทางฝั่งขาออกจะมีค่าสูงกว่ากระแสขาเข้า วงจรพื้นฐานของวงจรทอนระดับดังรูปที่ 2.34 และสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาเข้ากับแรงดันขาออกและความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขาเข้ากับกระแสขาออกได้ดังสมการที่ (2.17)



รูปที่ 2.34 วงจรทอนระดับ

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_{in}}{I_{out}} = D \quad (2.17)$$

เมื่อ D คือ ค่าดีวตี้ไซเคิล (Duty cycle) หรือค่าวัฏจักรงาน และเมื่อเขียนสมการแรงดันขาเข้าและสมการกระแสขาเข้าให้อยู่ในรูปแรงดันขาออกและกระแสขาออก จะได้ดังสมการที่ (2.18) และ (2.19) ตามลำดับ เพราะฉะนั้นจะสามารถหาค่าความต้านทาน R_{in} ได้ในรูปความต้านทานขาออกหรือโหลด (R_L) ดังสมการที่ (2.20)

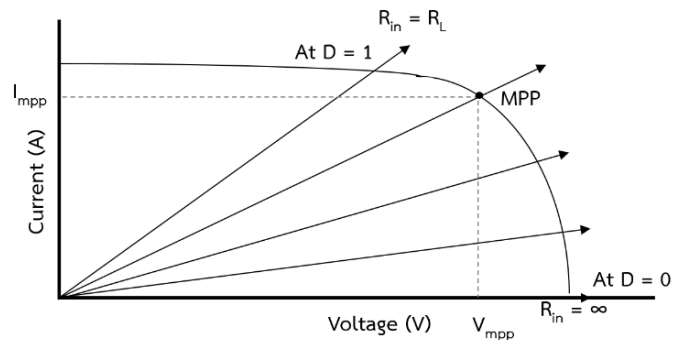
$$V_{in} = \frac{V_{out}}{D} \quad (2.18)$$

$$I_{in} = I_{out} \cdot D \quad (2.19)$$

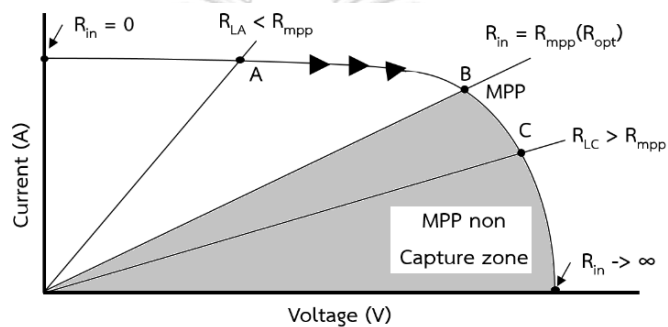
$$R_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{V_{out}/D}{I_{out} \cdot D} = \frac{V_{out}/I_{out}}{D^2} = \frac{R_L}{D^2} \quad (2.20)$$

เนื่องจากค่า D มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 และจากสมการที่ (2.20) ค่าความต้านทาน R_{in} จึงมีค่าได้ตั้งแต่ R_L ถึง ∞ ดังรูปที่ 2.35 และจากรูปที่ 2.36 แสดงให้เห็นว่า ถ้าค่าความต้านทานโหลด (R_L) มีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทานที่จุดกำลังสูงสุด (R_{mpp}) จะสามารถปรับค่า D เพื่อให้ค่า R_{in} เข้าใกล้ค่า R_{mpp} ได้ ในทางตรงกันข้ามถ้า $R_L > R_{mpp}$ จะไม่สามารถปรับให้ R_{in} เข้าใกล้ R_{mpp} ได้เลย

และช่วงที่ไม่สามารถปรับให้เข้าใกล้จุดกำลังสูงสุดนี้ว่า MPP non capture zone สำหรับวงจร
ทอนระดับนี้คือช่วงที่ $R_L > R_{mpp}$



รูปที่ 2.35 แผนภาพขอบเขตความต้านทาน R_{in} ของวงจรทอนระดับ [28]

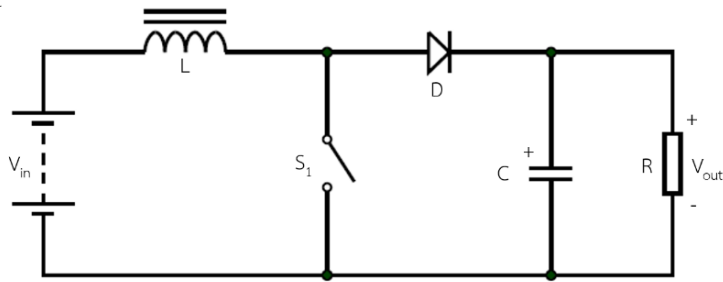


รูปที่ 2.36 ลักษณะการเข้าใกล้จุดกำลังสูงสุดของวงจรทอนระดับ [28]

จากที่กล่าวมาข้างต้น วงจรทอนระดับนั้นสามารถทำงานที่จุดกำลังสูงสุดได้ก็ต่อเมื่อมีการต่อกับโหลดที่มีค่าน้อยกว่าค่า R_{mpp} ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกช่วงความเข้มแสงที่ได้รับ หรือสรุปได้ว่า วงจรชนิดนี้สามารถทำงานได้ที่จุดกำลังสูงสุดที่ค่าความเข้มแสงไม่สูงมาก นั่นคือ เมื่อค่า R_{mpp} มีค่าสูง และในขณะที่ความเข้มแสงอาทิตย์สูงสุด ค่า R_{mpp} จะมีค่าต่ำ ซึ่งทำให้ระบบนี้ไม่สามารถทำงานที่จุดกำลังสูงสุดได้

2) วงจรทอนระดับแรงดัน (Boost converter)

วงจรทอนระดับ เป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์ชนิดเพิ่มระดับแรงดัน กล่าวคือ แรงดันทางฝั่งขาออกจะสูงกว่าแรงดันทางฝั่งขาเข้า และกระแสทางฝั่งขาออกมีค่าต่ำกว่ากระแสขาเข้า วงจรพื้นฐานของวงจรทอนระดับ ดังรูปที่ 2.37 และสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาเข้ากับแรงดันขาออกและความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขาเข้ากับกระแสขาออกได้ดังสมการที่ (2.21)



รูปที่ 2.37 วงจรทอนระดับ

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_{in}}{I_{out}} = \frac{1}{1-D} \quad (2.21)$$

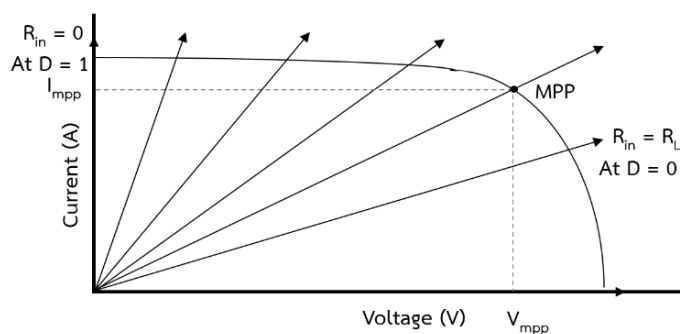
และเมื่อเขียนสมการแรงดันเข้าและสมการกระแสขาเข้าให้อยู่ในรูปแรงดันขาออกและกระแสขาออก จะได้ดังสมการที่ (2.22) และ (2.23) ตามลำดับ เพราะฉะนั้นสามารถหาค่าความต้านทาน R_{in} ได้ ในรูปความต้านทานขาออกหรือโหลด (R_L) ดังสมการที่ (2.24)

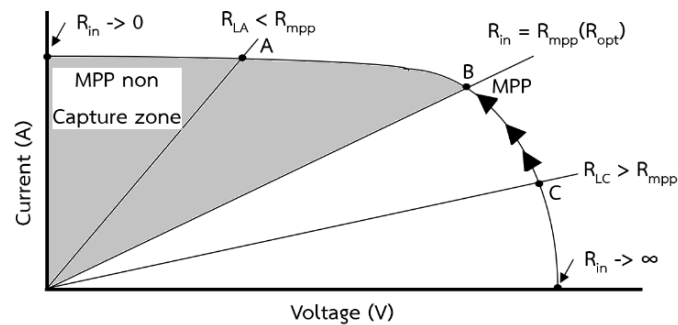
$$V_{in} = V_{out} \cdot (1 - D) \quad (2.22)$$

$$I_{in} = \frac{I_{out}}{1 - D} \quad (2.23)$$

$$R_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{V_{out}(1-D)}{I_{out}/(1-D)} = \frac{V_{out}}{I_{out}} (1-D)^2 = R_L(1-D)^2 \quad (2.24)$$

เนื่องจากค่า D มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 และจากสมการที่ (2.24) จะเห็นว่าค่าความต้านทาน R_{in} จึงมีค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง R_L ดังรูปที่ 2.38 และจากรูปที่ 2.39 หากค่าความต้านทานโหลด ($R_{L\Delta}$) มีค่าน้อยกว่าค่าความต้านทานที่จุดกำลังสูงสุด (R_{mpp}) วงจรทอนระดับไม่สามารถปรับให้ R_{in} เข้าใกล้ R_{mpp} ได้ ทำให้ช่วง MPP non capture zone สำหรับวงจรทอนระดับนี้อยู่ในช่วง $R_L < R_{mpp}$ และในทางตรงกันข้ามหาก $R_{L\Delta} > R_{mpp}$ จึงสามารถปรับค่า D เพื่อให้ค่า R_{in} เข้าใกล้ค่า R_{mpp} ได้

รูปที่ 2.38 แผนภาพขอบเขตความต้านทาน R_{in} ของวงจรทอนระดับ [28]

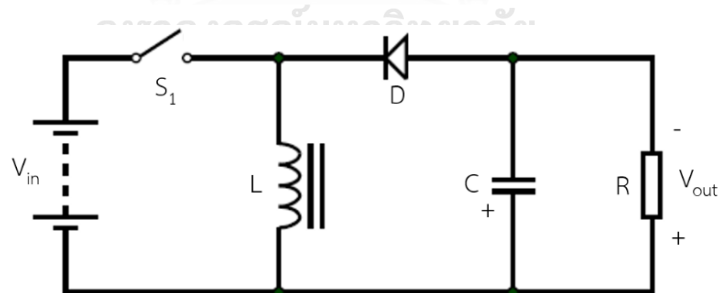


รูปที่ 2.39 ลักษณะการเข้าใกล้จุดกำลังสูงสุดของวงจรระดับ [28]

จากที่กล่าวมาข้างต้น วงจรระดับนั้นสามารถทำงานที่จุดกำลังสูงสุดได้ก็ต่อเมื่อมีการต่อกับโหลดที่มีค่ามากกว่าค่า R_{mpp} ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุกช่วงความเข้มแสงที่ได้รับ หรือสรุปได้ว่าระบบนี้สามารถทำงานที่จุดกำลังสูงสุดได้เฉพาะช่วงที่มีค่าความเข้มแสงอาทิตย์สูงสุด (R_{mpp} ต่ำ) ทำให้เกิดการสูญเสียประสิทธิภาพอย่างมากในช่วงเช้าและเย็นของวัน

3) วงจรทอนทระดับแรงดัน (Buck-Boost converter)

วงจรทอนทระดับ เป็นวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่รวมวงจรทอนระดับและวงจรระดับเข้าด้วยกันจึงสามารถลดและเพิ่มระดับแรงดันขาออกได้ตามต้องการ โดยขึ้นอยู่กับแรงดันขาเข้าที่เป็นผลเนื่องมาจากการปรับดิโอดี (D) วงจรพื้นฐานของวงจรทอนทระดับ ดังรูปที่ 2.40 และสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาเข้ากับแรงดันขาออกและความสัมพันธ์ระหว่างกระแสขาเข้ากับกระแสขาออกได้ดังสมการที่ (2.25)



รูปที่ 2.40 วงจรทอนทระดับ

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_{in}}{I_{out}} = \frac{D}{1-D} \quad (2.25)$$

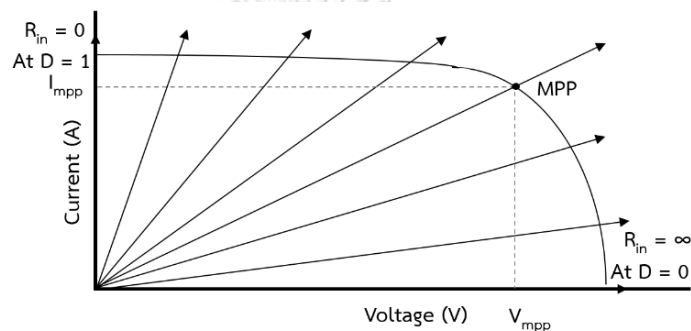
และเมื่อเขียนสมการแรงดันเข้าและสมการกระแสขาเข้าให้อยู่ในรูปแรงดันขาออกและกระแสขาออกจะได้ดังสมการที่ (2.26) และ (2.27) ตามลำดับ เพราะฉะนั้นเราสามารถหาค่าความต้านทาน R_{in} ได้ในรูปความต้านทานขาออกหรือโหลด (R_L) ดังสมการที่ (2.28)

$$V_{in} = V_{out} \cdot \left(\frac{1-D}{D}\right) \quad (2.26)$$

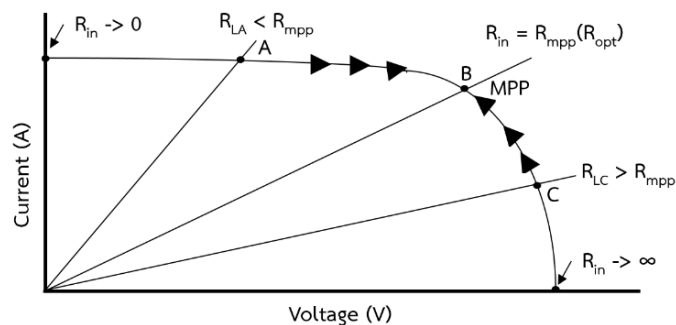
$$I_{in} = I_{out} \cdot \left(\frac{D}{1-D}\right) \quad (2.27)$$

$$R_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \left(\frac{V_{out}}{I_{out}}\right) \left(\frac{1-D}{D}\right)^2 = R_L \left(\frac{1-D}{D}\right)^2 \quad (2.28)$$

เนื่องจากค่า D มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 และจากสมการที่ (2.28) ค่าความต้านทาน R_{in} จึงมีค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง ∞ ดังรูปที่ 2.41 และจากรูปที่ 2.42 ทุกค่าความต้านทานโหลด (R_L) สามารถปรับค่า D เพื่อให้ค่า R_{in} เข้าใกล้ค่า R_{mpp} ได้ หรือเรียกได้ว่าวงจรทอนทระดับไม่มีช่วง MPP non capture zone ในการทำงาน



รูปที่ 2.41 แผนภาพขอบเขตความต้านทาน R_{in} ของวงจรทอนทระดับ [28]



รูปที่ 2.42 ลักษณะการเข้าใกล้จุดกำลังสูงสุดของวงจรทอนทระดับ [28]

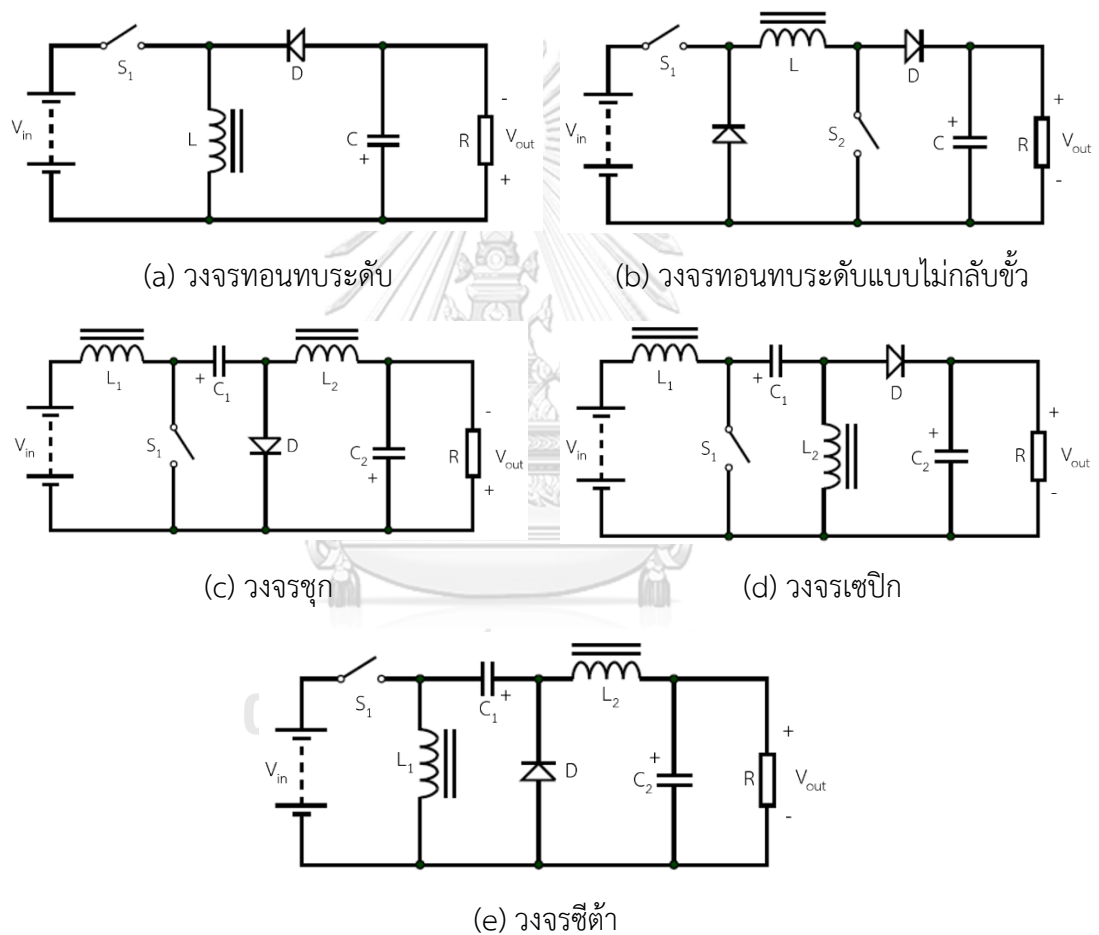
จากข้อมูลข้างต้น แสดงให้เห็นว่าวงจรทอนทระดับนี้สามารถทำงานที่จุดกำลังสูงสุดได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงค่าความต้านทานของโหลด และความเข้มแสงอาทิตย์ ทำให้มีประสิทธิภาพในการติดตามจุดสูงสุดทุกช่วงที่มีแสงอาทิตย์

ฉะนั้นในการนำคอนเวอร์เตอร์มาใช้เพื่อเชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับอินเวอร์เตอร์หรือโหลด จำเป็นต้องรักษาระดับแรงดันขาออกให้คงที่ที่จุดกำลังสูงสุด ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ที่เหมาะสม

กับสถานการณ์ดังกล่าว คือ คอนเวอร์เตอร์ชนิดทอนทบระดับ หรือคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถเพิ่มและลดแรงดันได้ (Step-up/Step-down converter)

2.4.1.2 คอนเวอร์เตอร์ชนิดเพิ่มลดแรงดัน

คอนเวอร์เตอร์ชนิดที่เพิ่มและลดแรงดัน มีรูปแบบของโครงสร้างที่แตกต่างกัน 5 ชนิด คือ (1) วงจรทอนทบระดับ (2) วงจรทอนทบระดับแบบไม่กลับขั้ว (Non-inverting buck-boost converter) (3) วงจรชุก (Cuk converter) (4) วงจรเซปิก (Single ended primary inductor converter, SEPIC converter) และ (5) วงจรซีต้า (Zeta converter) ดังรูปที่ 2.43



รูปที่ 2.43 วงจรสมมูลของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเพิ่มและลดแรงดัน [31]

จากการศึกษา [30-34] เพื่อเปรียบเทียบข้อดีข้อเสีย และความแตกต่างของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเพิ่มลดแรงดันสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบความแตกต่างของคอนเวอร์เตอร์ชนิดเพิ่มลดแรงดันแต่ละรูปแบบ

ข้อมูล	วงจรทอน ทบระดับ	วงจรทอนทบ ระดับแบบ ไม่กลับขั้ว	วงจรชุก	วงจรเซปิก	วงจรซีต้า
แรงดันออก (V_{out})	กลับเฟส (negative)	ไม่กลับเฟส* (positive)	กลับเฟส (negative)	ไม่กลับเฟส* (positive)	ไม่กลับเฟส* (positive)
จำนวนตัวเหนี่ยวนำ	1	1	2	2	2
จำนวนตัวเก็บประจุ	1	1	2	2	2
จำนวนสวิตช์	1	2	1	1	1
จำนวนไดโอด	1	2	1	1	1
ความสัมพันธ์ของ แรงดันเข้าและ แรงดันออก (V_{out}/V_{in})	$-\frac{D}{1-D}$	$\frac{D}{1-D}$	$-\frac{D}{1-D}$	$\frac{D}{1-D}$	
การกระเพื่อมด้าน เข้า (Input ripple)	สูง	ไม่ระบุ	ต่ำกว่า*	ต่ำมาก*	ต่ำ*
การกระเพื่อมด้าน ออก (Output ripple)	สูงกว่า วงจรชุก	ไม่ระบุ	สูง	สูงสุด	ต่ำ*
เวลาสู่สมดุล (Settling time)	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	0.2s	0.9s	0.15s*
ช่วงเวลาเพิ่มระดับ (Rise time)	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	0.06s	0.4s	0.03s*
ภาวะชั่วครู่ (Transients in output)	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	น้อย*	มาก	น้อย*

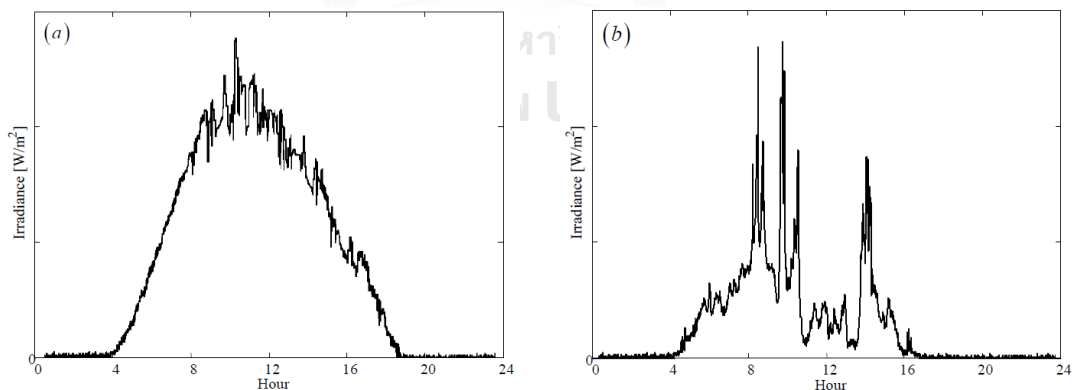
* แสดงสิ่งที่พิจารณาในการเลือกคอนเวอร์เตอร์ที่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานในวิทยานิพนธ์นี้

คอนเวอร์เตอร์ที่ไม่มีการกลับเฟสของแรงดันขาออกสามารถนำมาใช้งานได้ง่าย นอกจากนี้ การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ที่มีประสิทธิภาพควรมีการตอบสนองได้รวดเร็ว และแรงดันกระแสเพิ่ม ที่ออกจากคอนเวอร์เตอร์ไม่ควรมีค่าสูงเกินไป เนื่องจากมีผลเสียต่ออุปกรณ์หรือโหลดใด ๆ คืออุปกรณ์ หรือโหลดที่ได้รับแรงดันกระแสเพิ่มที่สูงไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ หรือไม่สามารถทำงาน ได้อย่างที่ต้องการ ฉะนั้นเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 2.2 วงจรซีต้ามีความเหมาะสม ในการนำมาใช้งานมากที่สุด

เมื่อคอนเวอร์เตอร์ช่วยในการส่งผ่านพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังโหลดหรือ อินเวอร์เตอร์แล้ว กระบวนการสำคัญที่ทำให้คอนเวอร์เตอร์สามารถส่งผ่านพลังงานที่จุดกำลังสูงสุด ไปยังโหลดได้นั้น คือการควบคุมระบบการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ซึ่งเรียกว่า กระบวนการหา จุดกำลังสูงสุด

2.4.2 กระบวนการหาจุดกำลังสูงสุด

เนื่องจากพลังงานที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับความเข้มรังสีของดวงอาทิตย์ และ อุณหภูมิ ซึ่งปกติมีค่าไม่คงที่ ดังตัวอย่างรูปที่ 2.44 พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าไม่คงที่เช่นกัน ฉะนั้น การศึกษาเรื่องกระบวนการหาจุดกำลังสูงสุด หรือกระบวนการติดตามจุดการทำงานสูงสุดจึงมี ความสำคัญ เพื่อให้ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด ณ ขณะนั้น



(a) วันที่ท้องฟ้าแจ่มใส

(b) วันที่มีเมฆมาก

รูปที่ 2.44 ตัวอย่างแผนภาพรังสีอาทิตย์ในหนึ่งวันด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ [20]

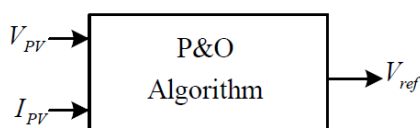
2.4.2.1 หลักการทำงานของกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุด

กระบวนการหาจุดกำลังสูงสุด คือ ขั้นตอนวิธี (Algorithm) ในการดึงกำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด โดยการทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำงานที่แรงดันและกระแสที่ทำให้กำลังสูงสุด ซึ่งจะถูกกำหนดจุดทำงานที่เหมาะสมโดยเครื่องปรับจุดทำงาน กล่าวคือกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยการตรวจหาค่าจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขณะนั้น และส่งสัญญาณไปควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นตัวกลางในการส่งพลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังโหลด โดยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวตั้งไซเคิลที่เหมาะสมเพื่อให้ค่าความต้านทานที่เห็นโดยแผงเป็นค่าที่จุดกำลังสูงสุด ทำให้คอนเวอร์เตอร์สามารถส่งพลังงานสูงสุดออกไปยังโหลดหรืออินเวอร์เตอร์ที่เชื่อมต่ออยู่ได้ โดยวิธีการติดตามจุดกำลังสูงสุดสามารถทำได้หลายวิธี

1) วิธีการรบกวนและการสังเกต (Perturb and Observe method, P&O)

วิธีการรบกวนและการสังเกตเป็นวิธีที่ง่ายต่อการนำไปใช้ และมีการใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มากที่สุด โดยแรงดันหรือกระแสที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกรบกวนหรือเปลี่ยนแปลงและวัดค่ากำลังที่ได้ใหม่ตลอดเวลา กำลังที่วัดได้ในขณะนั้น (P_k) ถูกลำดับไปเปรียบเทียบกับค่ากำลังที่วัดได้ก่อนหน้านี้ (P_{k-1}) เพื่อประกอบการตัดสินใจเรื่องทิศทางการเปลี่ยนแปลงของแรงดันหรือกระแสว่าควรเพิ่มขึ้นหรือลดลง ในกรณีที่การรบกวนหรือการเปลี่ยนแปลงยังทำให้กำลังเพิ่มสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงจะยังคงเป็นทิศทางเดิมจนกระทั่งกำลังที่วัดได้เริ่มตกลง

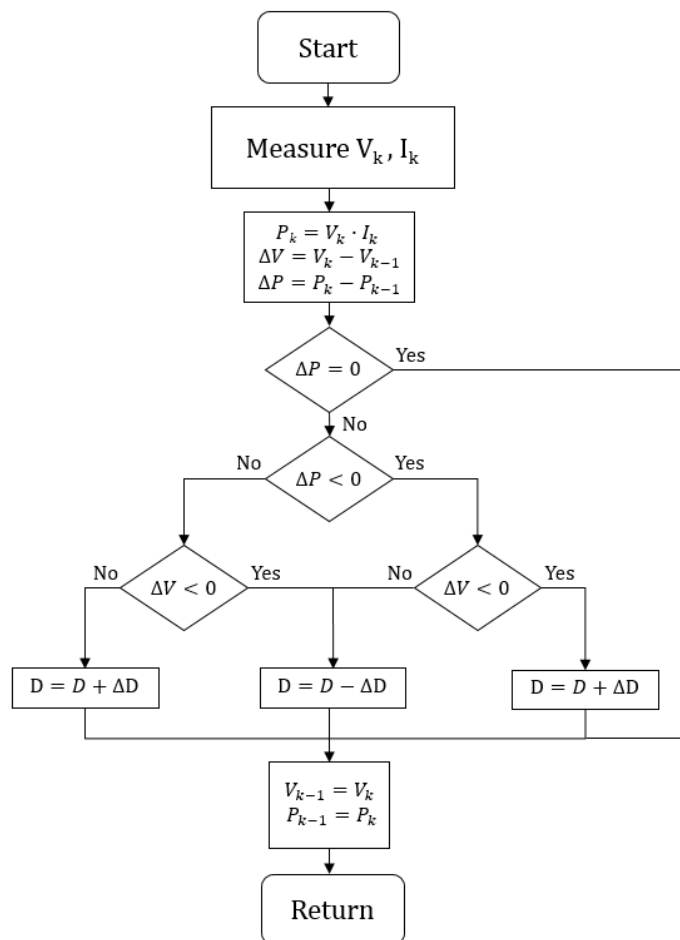
วิธีการรบกวนและการสังเกตนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี ขึ้นอยู่กับขั้นตอนในการรบกวนหรือเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันหรือกระแส คือ (1) วิธีการกำหนดการรบกวนและการสังเกต (Classic P&O) (2) วิธีการปรับเปลี่ยนการรบกวนและการสังเกต (Adaptive P&O) และ (3) วิธีเปรียบเทียบสามจุด (Three-point weight comparison) โดยสามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.45



รูปที่ 2.45 แผนภาพ P&O block diagram [20]

1.1) วิธีกำหนดการรบกวนและการสังเกต (Classic P&O, P&Oa)

ประกอบด้วยขั้นตอนของการรบกวนหรือการเปลี่ยนแปลงที่คงที่ ทำให้ความเร็วในการเปลี่ยนแปลงไปถึงจุดกำลังสูงสุดเป็นไปตามขั้นที่กำหนด กล่าวคือ ถ้ากำหนดขั้นของการเปลี่ยนแปลงไว้สูง การเข้าใกล้จุดสูงสุดสามารถกระทำได้เร็ว แต่เกิดการแกว่งของจุดการทำงานรอบ ๆ จุดกำลังสูงสุด และในทางตรงกันข้ามหากกำหนดไว้ที่ค่าน้อย ๆ ทำให้ใช้เวลานานในการเข้าใกล้จุดสูงสุด ซึ่งสามารถแสดงแผนผังการทำงานของวิธี P&O ได้ดังรูปที่ 2.46



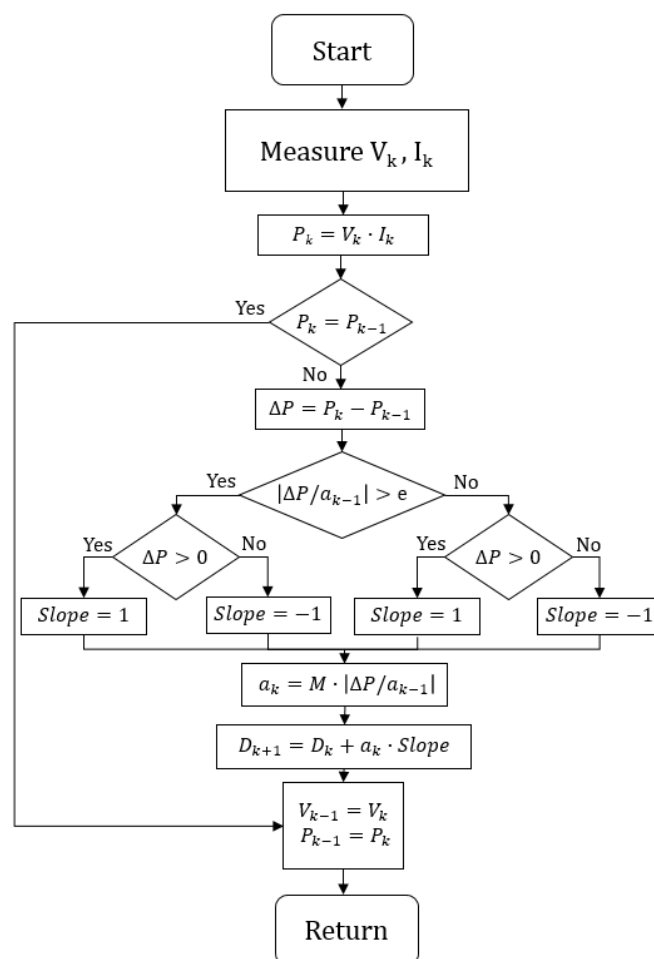
รูปที่ 2.46 แผนผังลำดับขั้นตอนการทำงานของวิธี P&Oa

1.2) วิธีการปรับเปลี่ยนการรบกวนและการสังเกต (Adaptive P&O, P&Ob)

ปรับปรุงมาจากวิธี P&Oa คือ ขนาดของการรบกวนหรือการเปลี่ยนแปลง (a) สามารถปรับเปลี่ยนได้ เพื่อตอบสนองในช่วงการทำงานทั้งในสภาวะชั่วคราวและในสภาวะคงตัว คือ ในช่วงที่สภาพอากาศมีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงมีค่ามาก ในทางกลับกันช่วงที่

จุดทำงานเข้าใกล้จุดกำลังสูงสุดในช่วงสภาวะอยู่ตัว ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงจะมีค่าน้อย ตามสมการ a_k ดังรูปที่ 2.47 ทำให้วิธีการนี้สามารถตอบสนองได้เร็วและไม่เกิดการแกว่งรอบจุดกำลังสูงสุด

ในบางกรณีวิธี P&Oa เกิดปัญหาจากการเบี่ยงเบนออกจากจุดสูงสุดในช่วงการเปลี่ยนแปลง ความเข้มอย่างรวดเร็ว ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการกำหนดเกณฑ์การสลับ (Switching criterion, $\Delta P/a_{k-1}$) ซึ่งถ้าค่า $\Delta P/a_{k-1}$ มีค่ามากกว่าค่าตั้งต้น “e” ในกรณีนี้กำลังที่เปลี่ยนแปลงมีสาเหตุมาจากความเข้มแสง ดังนั้นจึงมีการเพิ่มตัวดีไซเคิลต่อไปในทิศทางเดียวกับ ΔP ถ้าค่า $\Delta P/a_{k-1}$ มีค่าน้อยกว่า สำหรับกรณีนี้อยู่ในช่วงคงตัว

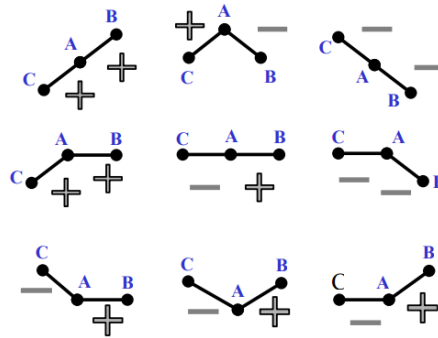


รูปที่ 2.47 แผนผังลำดับขั้นตอนการทำงานของวิธี P&Ob [23]

จากรูปที่ 2.47 เมื่อ M คือค่าตัวประกอบสเกล (Scaling factor) ซึ่งจำเป็นต้องหาค่าที่เหมาะสมกับแต่ละระบบ อาจเป็นค่าคงที่ [23] หรือเปลี่ยนแปลงตามค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ [25]

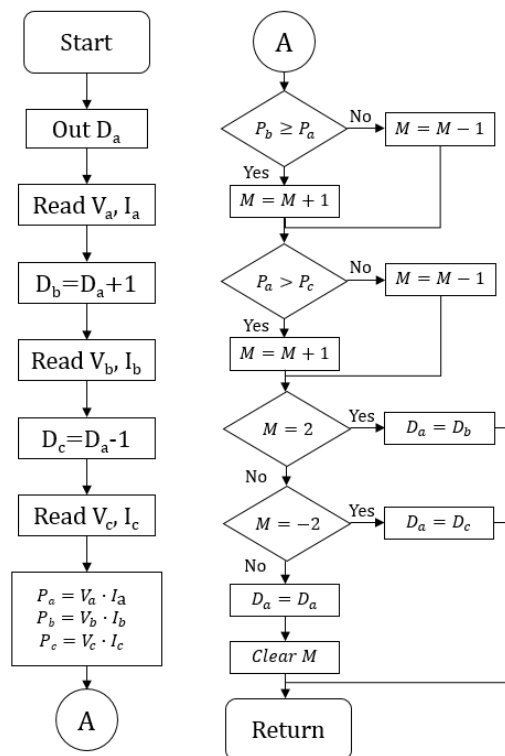
1.3) วิธีเปรียบเทียบสามจุด (Three-point weight comparison, P&Oc)

วิธีนี้การเลือกทิศทางของการรบกวนตามผลของกำลังขาออกที่ต่างกันสามจุดบนกราฟ P-V คือ จุดการทำงาน A จุดการทำงาน B ที่ถูกรบกวนจากจุด A และจุด C ที่ถูกรบกวนในทิศทางตรงข้ามจากจุด B ดังรูปที่ 2.48



รูปที่ 2.48 ลักษณะที่เป็นไปได้ของตำแหน่งการรบกวนทั้งสามจุด [27]

จากวิธีนี้เมื่อเปรียบเทียบจุด A กับ B ถ้ากำลังที่จุด B มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับกำลังที่จุด A มีสถานะเป็นบวก แต่มีสถานะเป็นลบหากมีค่าน้อยกว่า และเมื่อเปรียบเทียบจุด A กับ C ถ้ากำลังที่จุด C มีค่าน้อยกว่ากำลังที่จุด A มีสถานะเป็นบวก ถ้ามีค่ามากกว่าหรือเท่ากับมีสถานะเป็นลบ จากการวัดจุดทั้งสามถ้ามีสถานะเป็นบวกทั้งคู่ค่าตัวตั้งไขเคลถูกปรับให้เพิ่มขึ้น หากมีสถานะเป็นลบทั้งคู่ค่าตัวตั้งไขเคลถูกปรับให้มามีค่าลดลง และในกรณีอื่น ๆ ที่มีทั้งบวกและลบ แสดงว่าถึงจุดกำลังสูงสุดหรือความเข้มรังสีเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วทำให้ค่าตัวตั้งไขเคลไม่เปลี่ยนแปลง วิธีการทำงานของ P&Oc ดังรูปที่ 2.49



รูปที่ 2.49 แผนผังลำดับขั้นตอนการทำงานของวิธี P&O [27]

2) วิธีเพิ่มค่าความนำ (Incremental conductance method, INC)

ความคิดพื้นฐานของวิธีการนี้คือความชันของกราฟ P-V ซึ่งถ้าความชันมีค่าเท่ากับศูนย์กรณีนี้เป็นจุดกำลังสูงสุด ทำให้เป็นที่มาของการนำอนุพันธ์ของค่าความนำไฟฟ้ามาใช้ในการหาค่าจุดกำลังสูงสุด ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2.29)

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \\ \frac{dI}{dV} \cong \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I_{MPP}}{V_{MPP}} \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

ดังนั้นหากค่าความชันที่สามารถวัดได้มีค่าบวก แสดงว่า จุดการทำงานขณะนั้นอยู่ทางฝั่งซ้ายของจุดกำลังสูงสุด และหากค่าความชันมีค่าเป็นลบ แสดงว่าจุดทำงานขณะนั้นอยู่ทางฝั่งขวาของจุดกำลังสูงสุด ดังสมการที่ (2.30) ถึง (2.32)

$$\frac{dP}{dV} = 0 \rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \quad \text{at MPP} \quad (2.30)$$

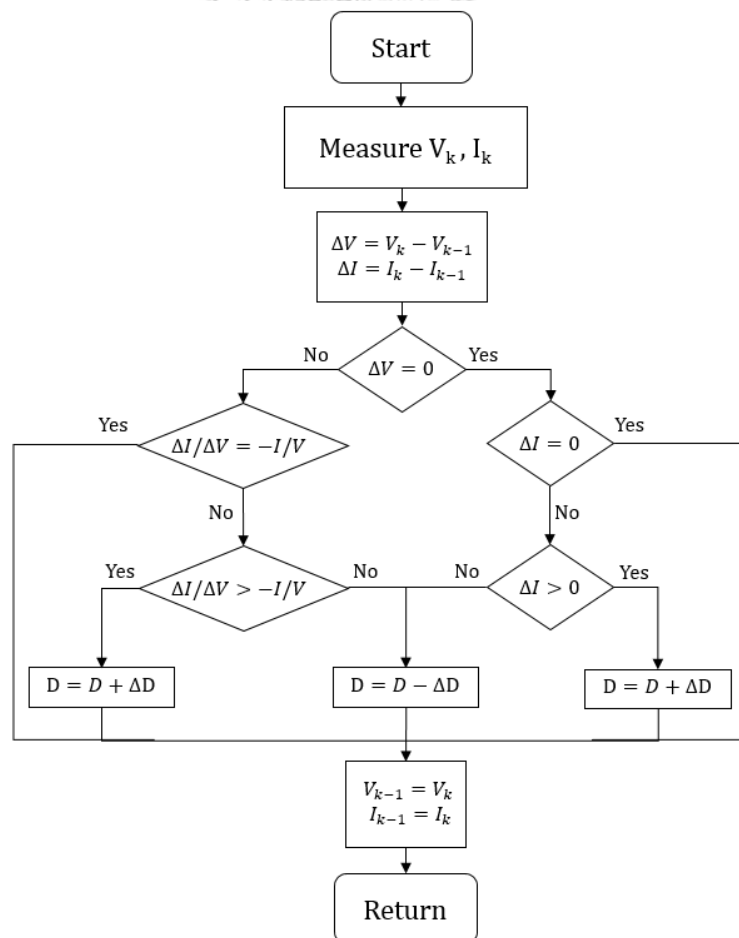
$$\frac{dP}{dV} > 0 \rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \quad \text{left of MPP} \quad (2.31)$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \quad \text{right of MPP} \quad (2.32)$$

โดยจุดการทำงานสูงสุดสามารถถูกติดตามได้ด้วยการเปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าขณะหนึ่ง (Instantaneous conductance, I_{PV}/V_{PV}) กับค่าความนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น (Incremental conductance, dI_{PV}/dV_{PV}) ในช่วงที่ค่าความแตกต่างของแรงดันไม่เท่ากับศูนย์ ($\Delta V \neq 0$) ไม่เช่นนั้นค่าความชันในกรณีนี้มีค่าเป็นอนันต์ (Infinity) ดังนั้นหาก $\Delta V = 0$ จุดกำลังสูงสุดถูกกำหนดโดยค่าความแตกต่างของกระแส (ΔI)

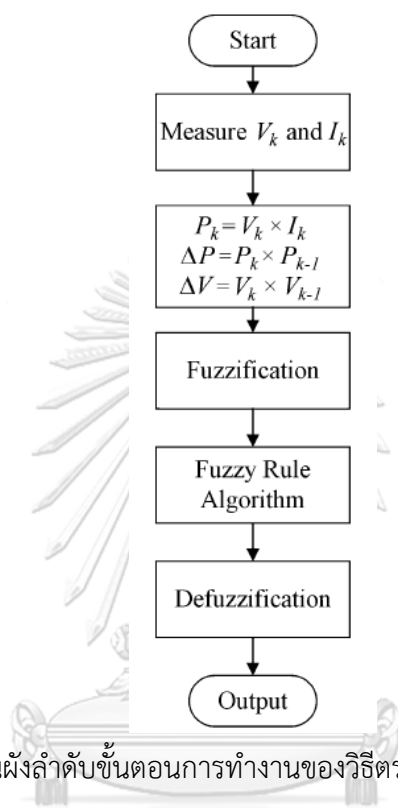
2.1) วิธีเพิ่มค่าความนำแบบกำหนดขั้น (INC method with fixed step size, INCa)

วิธีการทำงานดังแผนผังขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 2.50 วิธีการแบบ INC นั้น ดีกว่าวิธี P&Oa ในช่วงที่สภาพอากาศหรือความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งขนาดของการเปลี่ยนแปลงจะถูกกำหนดไว้เป็นค่าคงที่ โดยกำหนดจากความถูกต้องและความเร็วในการติดตาม ดังนั้นควรออกแบบความเร็วในช่วงการติดตามและช่วงการแกว่งให้เหมาะสม



รูปที่ 2.50 แผนผังลำดับขั้นตอนการทำงานของวิธี INCa [17]

สูงสุดมีประสิทธิภาพและง่ายต่อการใช้ ซึ่งวิธีการนี้มีข้อเสียคือไม่สามารถติดตามจุดกำลังสูงสุดได้ในบางช่วงของการถูกบังแสงแดดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ วิธีการควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือประกอบด้วยบล็อกการทำงานสามหน้าที่ได้แก่ การทำฟัซซี (Fuzzification) ขั้นตอนวิธีของกฎฟัซซี (Fuzzy-rule algorithm) และการทำดีฟัซซี (Defuzzification) ดังรูปที่ 2.52



รูปที่ 2.52 แผนผังลำดับขั้นตอนการทำงานของวิธีตรรกศาสตร์คลุมเครือ [23]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1) การทำฟัซซี (Fuzzification)

การควบคุมแบบฟัซซีต้องการตัวแปรที่ใช้ในการอธิบายกฎการควบคุมและต้องแสดงในรูปแบบของสัญลักษณ์พร้อมคำอธิบาย คือ ΔP_k และ ΔV_k ที่มาจากการสุ่มตัวอย่าง เป็นตัวแปรขาเข้าของวิธีควบคุมแบบฟัซซี ตัวแปรขาออก คือ ΔV_{k+1} ซึ่งเป็นแรงดันที่เปลี่ยนแปลงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในการสุ่มตัวอย่างรอบต่อไป

ฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรขาเข้า ΔP_k จะถูกกำหนดเป็นชุดฟัซซี 5 ชุด (Fuzzy sets) ได้แก่ บวกมาก (positive big, PB) บวกน้อย (positive small, PS) ศูนย์ (zero, ZE) ลบน้อย (negative small, NS) และลบมาก (negative big, NB) เพื่อให้มีความไวมากขึ้นในการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ฟังก์ชันสมาชิกควรมีความหนาแน่นมากที่สุดที่ศูนย์ ฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรขาเข้า ΔV_k ได้แก่ บวก (positive, P) ศูนย์ (zero, ZE) และลบ (negative, N) เป็นชุดฟัซซี 3 ชุด

และฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรขาออก ΔV_{k+1} ได้แก่ บวกมาก (positive big, PB) บวกปานกลาง (positive middle, PM) บวกน้อย (positive small, PS) ศูนย์ (zero, ZE) ลบน้อย (negative small, NS) ลบปานกลาง (negative middle, NM) และลบมาก (negative big, NB) ซึ่งเป็นชุดฟัซซี 7 ชุด

3.2) ขั้นตอนวิธีของกฎฟัซซี (Fuzzy-rule algorithm)

ขาออกฟัซซี (Fuzzy output) ขึ้นอยู่กับขาเข้าฟัซซี (Fuzzy input) โดยใช้กฎพื้นฐานที่ได้มาจากความเข้าใจพฤติกรรมของระบบ โดยพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

3.2.1) ถ้ากำลังเพิ่มขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดัน ΔV_k ฉะนั้นแรงดัน ΔV_{k+1} มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในทิศทางเดียวกัน และมีการเปลี่ยนทิศทางถ้ากำลังลดลง

3.2.2) ระบบสามารถจำแนกช่วงกำลังสูงสุดโดยใช้เงื่อนไข $\Delta P/\Delta V=0$

3.2.3) กฎนี้รักษาจุดการทำงานให้คงที่ที่จุดกำลังสูงสุด

3.3) การทำดีฟัซซี (Defuzzification)

ในกระบวนการของการคำนวณการทำดีฟัซซี เป็นการเปลี่ยนค่าตัวแปรขาออกจากตัวแปรทางสัญลักษณ์เป็นค่าที่แท้จริง (crisp value) ของระบบควบคุมฟัซซี

จากการศึกษา [16-24] เพื่อเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุดที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบกระบวนการหาจุดกำลังสูงสุดรูปแบบต่าง ๆ สำหรับใช้กับคอนเวอร์เตอร์

ข้อมูล	P&Oa	P&Ob	P&Oc	INCa	INCb	FLC
แอนะล็อก (A)/ดิจิทัล (D)	ทั้งคู่	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	ดิจิทัล	ไม่ระบุ	ดิจิทัล
การปรับพารามิเตอร์ (Parameter tuning)	ไม่มี	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	ไม่มี	ไม่ระบุ	มี
ตัวแปรควบคุม (Control variable)	V, I	V, I	V, I	V, I	V, I	V/I
การปรับจุดทำงานได้ถูกต้อง	ใช่	ใช่	ใช่	ใช่	ใช่	ใช่
ความเร็วในการเข้าสู่จุดทำงาน (Convergence speed)	ขึ้นกับการตั้งค่า	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	ขึ้นกับการตั้งค่า	ไม่ระบุ	เร็ว
ความยุ่งยากซับซ้อน (Complexity)	น้อย	ปานกลาง	มาก	ปานกลาง	มาก	มาก
ต้นทุน (Cost)	น้อยถึงปานกลาง	น้อยถึงปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	มาก	มาก
การตอบสนองชั่วคราว (Transient response)	ต่ำ	ดีกว่า P&Oa	ไม่ระบุ	ปานกลาง	ไม่ระบุ	ปานกลาง
ประสิทธิภาพ (Efficiency)	ปานกลาง	สูง	ต่ำ	สูง	สูง	สูง
ความเชื่อถือได้ (Reliability)	ปานกลาง	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	ปานกลาง	ไม่ระบุ	ปานกลาง

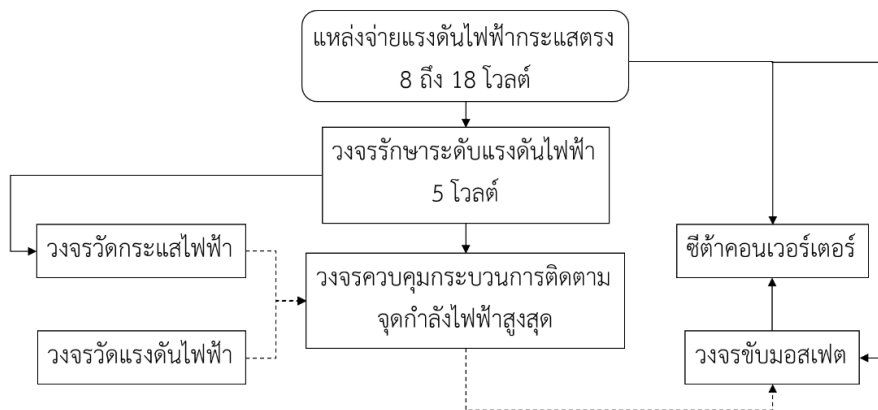
ในการออกแบบการทำงานของเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การทำงานของกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุดควรมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงได้อย่างรวดเร็ว และทำงานที่จุดกำลังสูงสุดได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ความซับซ้อนของระบบและต้นทุนของอุปกรณ์ก็ควรนำมาพิจารณาด้วยเช่นกัน ฉะนั้นจากตารางที่ 2.3 เมื่อพิจารณากระบวนการหาจุดสูงสุดในหลาย ๆ รูปแบบ พบว่า กระบวนการติดตามจุดสูงสุดด้วยวิธีการปรับเปลี่ยนการรบกวนและการสังเกต มีความเหมาะสมทั้งในด้านการตอบสนอง ความซับซ้อน และราคา

บทที่ 3

การออกแบบเครื่องปรับการทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เนื้อหาวิทยานิพนธ์บทนี้กล่าวถึงการออกแบบเครื่องปรับการทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ วงจรขับมอสเฟต วงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า (Voltage regulator) วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า วงจรวัดกระแสไฟฟ้า และระบบควบคุมการทำงานของกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุด

ภาพรวมภายในทั้งหมดของเครื่องปรับการทำงาน ดังรูปที่ 3.1 โดยวงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าได้รับไฟจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง หรือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีแรงดันตั้งแต่ 8 ถึง 18 โวลต์ จากนั้นจ่ายแรงดันคงที่ 5 โวลต์ให้กับวงจรควบคุมและวงจรวัดกระแสไฟฟ้า สำหรับวงจรวัดกระแสและแรงดัน ส่งค่าที่วัดได้ให้กับวงจรควบคุม วงจรควบคุมทำการประมวลผลและส่งสัญญาณไปยังวงจรขับมอสเฟต เพื่อให้วงจรขับมอสเฟตเป็นตัวควบคุมสวิตช์ในวงจรคอนเวอร์เตอร์ให้ทำงานหรือไม่ทำงาน

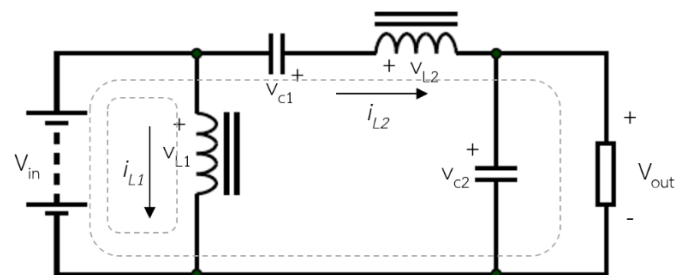


รูปที่ 3.1 แผนภาพวงจรภายในของเครื่องปรับการทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

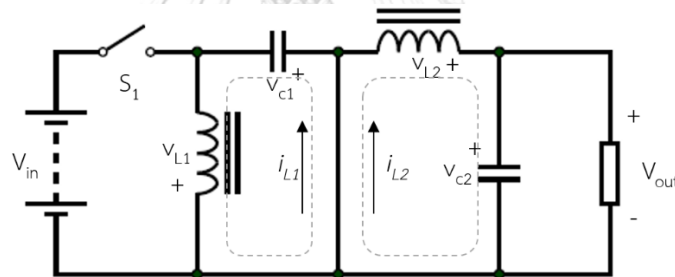
3.1 การออกแบบวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์

ซีต้าคอนเวอร์เตอร์ในอุดมคติ เป็นวงจรที่สามารถแปลงแรงดันขาเข้า (V_{in}) ไปเป็นแรงดันขาออก (V_{out}) ที่มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าแรงดันขาเข้าได้โดยไม่มีการกลับขั้ว วงจรพื้นฐานของซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ประกอบไปด้วย ตัวเหนี่ยวนำ 2 ตัว คือ L_1 และ L_2 ตัวเก็บประจุ 2 ตัว คือ C_1 และ C_2 สวิตช์ S_1 และไดโอด D ดังรูปที่ 2.43(e) (ในบทที่ 2)

การทำงานของวงจรขึ้นอยู่กับควบคุมสวิตช์ S_1 ดังรูปที่ 3.2 โดยเมื่อสวิตช์ S_1 ทำงาน (on state) แหล่งจ่ายแรงดันจ่ายกระแสให้กับตัวเหนี่ยวนำ L_1 และตัวเหนี่ยวนำ L_2 ทำให้เกิดพลังงานสะสมในตัวเหนี่ยวนำทั้งสอง กระแสตัวเหนี่ยวนำ i_{L1} และ i_{L2} มีการเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น และเมื่อสวิตช์ S_1 ไม่ทำงาน (off state) แหล่งจ่ายเสมือนถูกตัดออกจากระบบ พลังงานที่สะสมอยู่ในตัวเหนี่ยวนำ L_2 ถูกจ่ายให้โหลด พลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำ L_1 ถูกจ่ายให้ตัวเก็บประจุ C_1 กระแสเหนี่ยวนำทั้งสองจึงลดลง ดังรูปที่ 3.3 รูปคลื่นในอุดมคติของกระแสที่ผ่านตัวเหนี่ยวนำทั้งสองตัวเก็บประจุ C_1 และสวิตช์ เมื่ออยู่ในช่วง on state และ off state



(a) สวิตช์ทำงาน (on state)



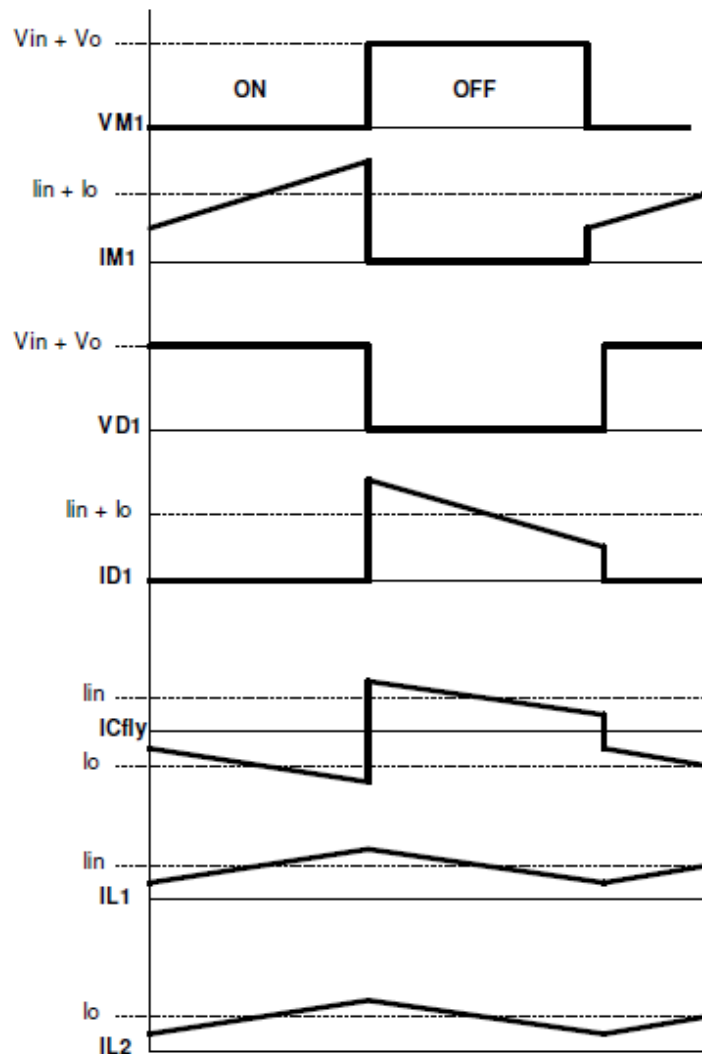
(b) สวิตช์ไม่ทำงาน (off state)

รูปที่ 3.2 แผนภาพจำลองการทำงานของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์

จากรูปข้างต้น วงจรช่วงที่สวิตช์ทำงานในสภาวะคงตัว (Steady state) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของแรงดันขาเข้าและแรงดันขาออกได้ดังสมการ (3.1)

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{1-D} \quad (3.1)$$

เมื่อ D คือค่าดิวตี้ไซเคิล ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะเวลาที่สวิตช์ทำงานต่อระยะเวลาทั้งหมดในการทำงานหนึ่งรอบ (T_{ON}/T_s) มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างรูปคลื่นในอุดมคติของวงจรชัตตัคอนเวอร์เตอร์ [38]

เมื่อ I_{Cfly} คือ กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_1 และ I_{M1} คือ กระแสที่ไหลผ่านสวิตช์ S_1 วงจรชัตตัคอนเวอร์เตอร์จะสามารถทำงานได้ดีเมื่อมีการใช้สวิตช์มอสเฟต (MOSFET) แบบ P-channel ซึ่งหมายถึงสวิตช์ทำงานในช่วงที่ขาเกต (Gate) ได้รับแรงดันเป็นศูนย์

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ออกแบบวงจรชัตตัคอนเวอร์เตอร์ในโหมดต่อเนื่อง (Continuous Conduction Mode, CCM) และการออกแบบเบื้องต้นได้กำหนดคุณลักษณะของวงจรดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ที่ต้องการออกแบบ

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	กำหนดค่า
แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (โวลต์)	V_{in}	8-18
แรงดันไฟฟ้าขาออก (โวลต์)	V_{out}	15
กระแสไฟฟ้าขาออก (แอมแปร์)	I_{out}	1.34
ความถี่การสวิตช์ (กิโลเฮิร์ตซ์)	f	26
กระแสกระแสเพี้ยนสูงสุดที่ยอมรับได้	I_{ripple}	$0.5I_{out}$
กระแสกระแสเพี้ยนของตัวเหนี่ยวนำ	I_{rip}	$0.3I_{out}$
แรงดันกระแสเพี้ยนที่ยอมรับได้	V_{rip}	$0.01V_{out}$

เพื่อให้วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ทำงานได้ตามที่ต้องการ จำเป็นต้องมีการกำหนดค่าหรือเลือกอุปกรณ์อย่างเหมาะสม ดังต่อไปนี้

3.1.1 การเลือกตัวเหนี่ยวนำ

ขนาดของตัวเหนี่ยวนำ และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.2) ถึง (3.4) ตามลำดับ [38]

$$L_1 = \frac{V_{in,max} \times V_{out}}{I_{ripple} \times f \times (V_{in,max} + V_{out})} = \frac{18 \times 15}{0.5 \times 1.34 \times 26 \times 10^3 \times (18 + 15)} = 469.68 \text{ ไมโครเฮนรี} \quad (3.2)$$

$$L_2 = L_1 = 469.68 \text{ ไมโครเฮนรี} \quad (3.3)$$

$$I_{DC} = \frac{I_{out} \times V_{out}}{V_{in,min} \times Eff} = \frac{1.34 \times 15}{8 \times 0.85} = 2.95 \text{ แอมแปร์} \quad (3.4)$$

เมื่อ Eff คือประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์ โดยทั่วไปมีค่า 85% และการให้ค่าตัวเหนี่ยวนำ L_2 เท่ากับ L_1 เพื่อความมั่นใจว่าตัวเหนี่ยวนำทั้งสองจะมีกระแสไหลเวียนกัน และสามารถพันแกนเดียวกันได้

ในทางปฏิบัติขนาดของตัวเหนี่ยวนำควรมีขนาดใหญ่กว่าที่คำนวณไว้ 25% ขึ้นไป และกระแสอิ่มตัว (Saturation current) ของตัวเหนี่ยวนำควรมีค่ามากกว่า 1.15 เท่าของค่ากระแสไฟฟ้าที่คำนวณได้ [39] งานวิจัยนี้จึงเลือกขนาดตัวเหนี่ยวนำอยู่ที่ 1,000 ไมโครเฮนรี พันอยู่บนแกนเฟอร์ไรต์

3.1.2 การเลือกตัวเก็บประจุคู่ควบ

ขนาดของตัวเก็บประจุคู่ควบ (C_1) สามารถคำนวณหาค่าได้ดังสมการที่ (3.5) [38]

$$C_1 = \frac{I_{out} \times V_{out}}{V_{rip} \times f \times (V_{in, min} + V_{out})} = \frac{1.34 \times 15}{0.01 \times 15 \times 26 \times 10^3 \times (8 + 15)} = 224.08 \text{ ไมโครฟารัด} \quad (3.5)$$

การคำนวณตัวเก็บประจุ C_1 ในทางปฏิบัติต้องมีขนาดใหญ่กว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งตัวเก็บประจุที่มีจำหน่ายโดยทั่วไปขนาดใหญ่ถัดขึ้นมาจากที่คำนวณได้ คือ 330 ไมโครฟารัด

3.1.3 การเลือกตัวเก็บประจุขาออก

ขนาดของตัวเก็บประจุขาออก (C_2) สามารถคำนวณหาค่าได้ดังสมการที่ (3.6) [38]

$$C_2 = \frac{I_{rip}}{8 \times V_{rip} \times f} = \frac{0.3 \times 1.34}{8 \times 0.01 \times 15 \times 26 \times 10^3} = 12.88 \text{ ไมโครฟารัด} \quad (3.6)$$

การคำนวณข้างต้นคำนึงถึงแรงดันกระเพื่อมขาออกเท่านั้น แต่สำหรับในการใช้งานจริง โหลดมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลง ซึ่งส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้มีค่าสูงเกิน และเพื่อรักษาไม่ให้แรงดันมีค่ามากเกินไป พลังงานทั้งก่อนและหลังเปลี่ยนแปลงโหลดจะต้องเท่ากัน ค่าตัวเก็บประจุน้อยสุดจึงหาค่าจากสมการที่ (3.7) [39]

$$C_2 = \frac{L \times I_{DC}^2}{(V_{rip} + V_{out})^2 - V_{out}^2} = \frac{1000 \times 2.95^2}{(0.15 + 15)^2 - 15^2} = 1,924.27 \text{ ไมโครฟารัด} \quad (3.7)$$

จากการคำนวณตัวเก็บประจุ C_2 เพื่อลดการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้า งานวิจัยนี้เลือกตัวเก็บประจุแบบอิเล็กโทรไลติก ขนาด 2,200 ไมโครฟารัด

3.1.4 การเลือกมอสเฟต

ควรเลือกมอสเฟตที่สามารถทนแรงดันที่มากกว่าผลบวกของแรงดันเข้าและแรงดันออก เลือกมอสเฟตที่มีค่าประจุเกต (Gate charge, Q_g) ต่ำ ซึ่งช่วยให้การสวิตช์ทำได้เร็วขึ้น และเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย มอสเฟตที่ใช้ควรมีค่าความต้านทานขณะนำกระแสไฟฟ้า ($R_{DS(ON)}$) ต่ำ จากการใช้วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ทำให้สวิตช์มอสเฟตที่ใช้ไม่ได้ต่อลงกราวด์ มอสเฟตที่เลือกใช้จึงต้องเป็นชนิดพี [40]

งานวิจัยนี้เลือกใช้มอสเฟต IRF9640 ซึ่งสามารถทนแรงดันเดรนซอร์สหรือแรงดันย้อนกลับ (Drain-Source Breakdown Voltage, V_{DS}) ได้ 200 โวลต์ ทนแรงดันไฟฟ้าเกตซอร์ส (V_{GS}) ได้ 20 โวลต์ มีค่าประจุเกต 44 นานคูลอมบ์ และมีความต้านทานขณะนำไฟฟ้า 0.5 โอห์ม

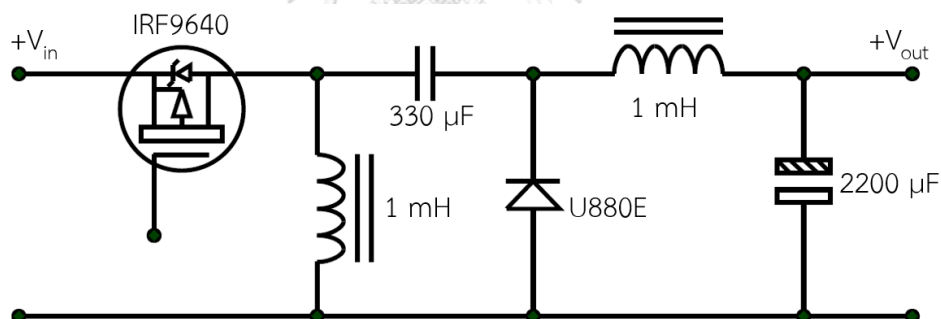
อย่างไรก็ตามมอสเฟตด้วยเงื่อนไขข้างต้นมีความร้อนสูงขึ้นหากนำกระแสที่มีค่าสูง ส่งผลให้เกิดการสูญเสียไปในรูปความร้อนเพิ่มขึ้น ฉะนั้นจึงต้องมีการติดตั้งระบายความร้อน (Heat sink) สำหรับกรณีนี้

3.1.5 การเลือกไดโอด

ไดโอดที่ใช้ต้องทนแรงดันย้อนกลับสูงสุด (DC blocking voltage, V_R) ได้ ซึ่งมีความมากกว่าผลบวกของแรงดันเข้าและแรงดันออก และต้องสามารถทนกระแสที่ไหลผ่าน (Forward current, I_F) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลบวกของกระแสขาเข้าและกระแสขาออกได้ [38]

งานวิจัยนี้เลือกไดโอด U880E ซึ่งทนแรงดันย้อนกลับได้ 800 โวลต์ สามารถนำกระแสได้ 8 แอมแปร์ และติดตั้งระบายความร้อนเพื่อช่วยลดอุณหภูมิขณะทำงาน

จากผลการออกแบบและคำนวณดังที่กล่าวไว้ข้างต้น สามารถแสดงวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ที่จะนำไปใช้ทดลองนี้ได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนภาพวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์จากการออกแบบ

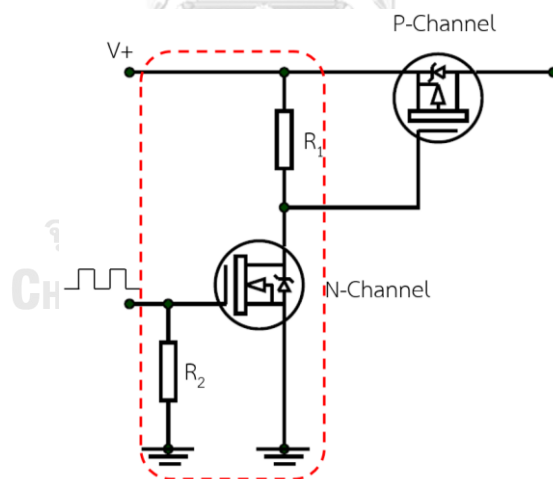
นอกจากการออกแบบซีต้าคอนเวอร์เตอร์ที่เป็นวงจรหลักเพื่อใช้ในการทำงานของเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมแล้ว สำหรับชุดต้นแบบต้องมีวงจรอื่น ๆ ประกอบด้วย เพื่อช่วยในการทำงานที่สอดคล้องกันระหว่างวงจรทางด้านกำลังและวงจรควบคุม ดังได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

3.2 การออกแบบวงจรขับมอเตอร์

การนำสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller, MCU) มาขับมอเตอร์โดยตรงไม่สามารถทำได้กับวงจรที่ต้องการขับกำลังสูง เนื่องจากไม่สามารถทำให้มอเตอร์นำกระแสได้อย่างเต็มที่ และอาจเกิดการไหลย้อนกลับของกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำให้เกิดความเสียหายได้เนื่องจากแรงดันจากวงจรภายนอกสูงกว่า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจรขับมอเตอร์เพื่อแยกส่วนควบคุมและส่วนกำลังออกจากกัน และทำให้สวิตช์มอเตอร์ในวงจรทำงานได้ดีขึ้น

งานวิจัยนี้เสนอวงจรขับมอเตอร์ชนิดพี ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งประกอบด้วย ตัวต้านทาน R_1 และ R_2 และมอเตอร์ชนิดเอ็น โดยมีหลักการทำงานดังต่อไปนี้

- 1) ไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งสัญญาณเป็นพัลส์วิดท์มอดูเลชัน (Pulse Width Modulation, PWM) มายังมอเตอร์ชนิดเอ็น หากสัญญาณเป็น 1 มอเตอร์ชนิดเอ็นทำงาน สัญญาณเป็น 0 มอเตอร์ชนิดเอ็นต้องไม่ทำงาน
- 2) ถ้ามอเตอร์ชนิดเอ็นทำงานแรงดันที่ขาเกตของมอเตอร์ชนิดพีต้องมีค่าเป็นศูนย์ทำให้มอเตอร์ชนิดพีทำงาน ในทางกลับกันมอเตอร์ชนิดพีต้องไม่ทำงานเมื่อมีแรงดันที่ขาเกตเนื่องจากมอเตอร์ชนิดเอ็นไม่ทำงาน



รูปที่ 3.5 วงจรขับมอเตอร์

จากรูปที่ 3.5 ตัวต้านทาน R_1 มีหน้าที่จำกัดกระแสที่ไหลผ่านมอเตอร์ชนิดเอ็นไม่ให้มากเกินไป คำนวณได้จากสมการที่ (3.8) ทั้งนี้ยังต้องคำนึงถึงกำลังวัตต์ที่ R_1 จะต้องรับได้ด้วย เมื่อกำหนดให้ความต้านทาน R_1 มีค่าเท่ากับ 330 โอห์ม ตัวต้านทานต้องสามารถทนกำลังได้มากกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.9)

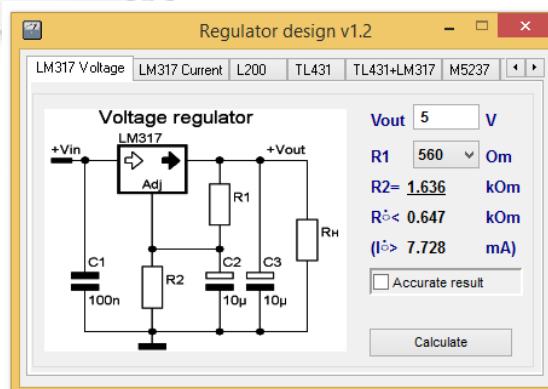
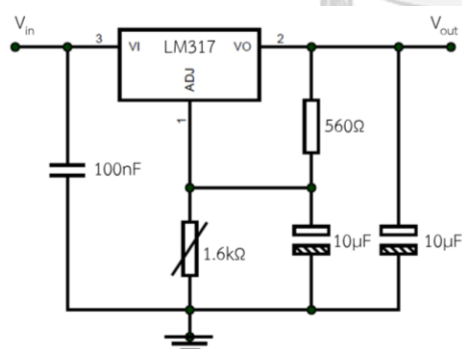
$$I = \frac{V}{R_1} = \frac{18}{330} = 54 \text{ มิลลิแอมแปร์} \quad (3.8)$$

$$P = I^2 R = 0.054^2 \times 330 = 0.962 \text{ วัตต์} \quad (3.9)$$

ในช่วงที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์ไม่จ่ายแรงดันให้กับขาเกต อาจมีแรงดันที่ขาเกตค้างเนื่องจากประจุที่เกิดขึ้นยังไม่สามารถคายออกได้หมด เป็นสาเหตุให้มอสเฟตชนิดเอ็นยังคงทำงาน ตัวต้านทาน R_2 จึงมีหน้าที่ช่วยขาเกตดึงประจุดังกล่าวลงกราวด์ ทำให้มอสเฟตชนิดเอ็นทำงานหรือไม่ทำงานได้อย่างถูกต้อง ทั้งนี้ทั้งนั้นค่าตัวต้านทาน R_2 ต้องมีค่าสูงมากพอที่จะไม่ทำให้กระแสที่จ่ายเข้าขาเกตถูกลดทอนลงไป งานวิจัยนี้จึงใช้ R_2 เท่ากับ 10 กิโลโอห์ม

3.3 การออกแบบวงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า

วงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage Regulator) เป็นวงจรที่ช่วยรักษาระดับแรงดันให้คงที่ตามที่ต้องการ โดยมีข้อแม้ว่าแรงดันไฟที่จ่ายเข้าวงจรรักษาระดับแรงดันนี้ต้องมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าแรงดันที่ต้องการเท่านั้น อุปกรณ์ที่ต้องการแรงดันคงที่ในงานวิจัยนี้ได้แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์ และวงจรวัดกระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถทำงานที่ระดับแรงดันประมาณ 5 โวลต์ งานวิจัยนี้ใช้ LM317 ในการช่วยคงระดับแรงดันตามที่ต้องการ โดยมีวงจรดังรูปที่ 3.6 และใช้โปรแกรม Regulator design v1.2 ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในวงจร ซึ่งสามารถหาโหลดได้ที่เว็บไซต์ (<http://www.electronics-lab.com/downloads/calculators/?page=2>)

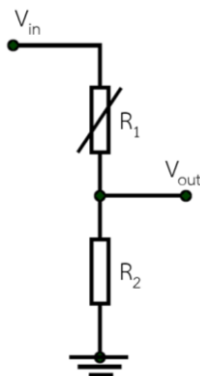


รูปที่ 3.6 วงจรรักษาระดับแรงดัน

3.4 การออกแบบวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า

งานวิจัยนี้ใช้วงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Dividers) มาใช้เป็นวงจรวัดระดับแรงดันไฟฟ้า โดยใช้หลักการของวงจรไฟฟ้าแบบตัวต้านทาน 2 ตัวอนุกรมกัน ดังรูปที่ 3.7 คือ แรงดัน V_{in} ถูกลดทอน

ตามสัดส่วนของตัวต้านทาน R_1 และ R_2 แรงดัน V_{out} เป็นแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน R_2 ซึ่งหาได้จากสมการที่ (3.10) [41]



รูปที่ 3.7 วงจรแบ่งแรงดัน

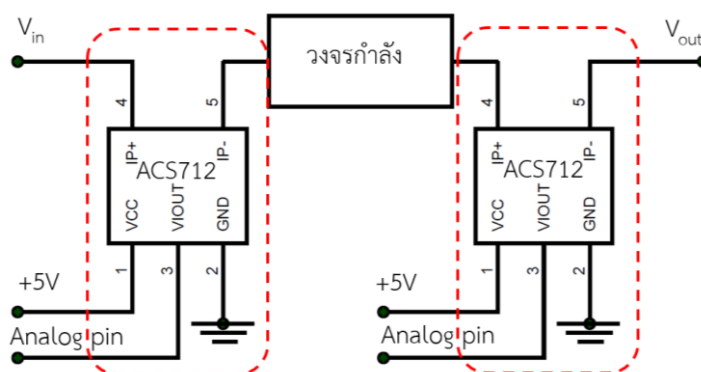
$$V_{out} = V_{in} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.10)$$

วงจรวัดระดับแรงดันนี้ต่อกับ V_{in} ซึ่งเป็นแรงดันที่ต้องการวัด ค่า V_{out} ถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อแปลงเป็นค่าจริงที่วัดได้ (ขนาดเท่า V_{in}) จากนั้นจึงสามารถนำไปใช้ต่อได้ เหตุที่ต้องแบ่งระดับแรงดันก่อน เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถรับแรงดันได้ไม่เกิน 5 โวลต์ ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงกำหนดแรงดัน V_{out} ไม่เกิน 5 โวลต์ จากแรงดัน V_{in} สูงสุด 50 โวลต์ กำหนดค่าความต้านทาน R_2 ที่ 1,000 โอห์ม จากสมการที่ (3.10) จะสามารถคำนวณหาค่าความต้านทาน R_1 ได้ 9,000 โอห์ม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5 การออกแบบวงจรวัดกระแสไฟฟ้า

งานวิจัยนี้ใช้วงจรรวมหรือวงจรรวมไอซี (Integrated circuit, IC) ACS712 เป็นเซ็นเซอร์วัดกระแสในวงจร ดังรูปที่ 3.8 ไอซี ACS712 ต้องการไฟเลี้ยง 5 โวลต์ สามารถวัดกระแสได้ไม่เกิน 30 แอมแปร์ ทำงานโดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) ค่าที่ออกมาเป็นค่าความต่างศักย์ นำไปต่อเข้ากับขาแอนะล็อก (Analog) ของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยขณะที่ไม่มีกระแสจะมีค่าความต่างศักย์ (Offset voltage) ประมาณ 2.5 โวลต์ และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีกระแสไหลผ่านเป็นสัดส่วนตรงประมาณ 66 mV/A ฉะนั้นค่าที่ไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านได้นั้นต้องนำไปแปลงเป็นค่ากระแสไฟฟ้าจริงก่อนนำไปใช้



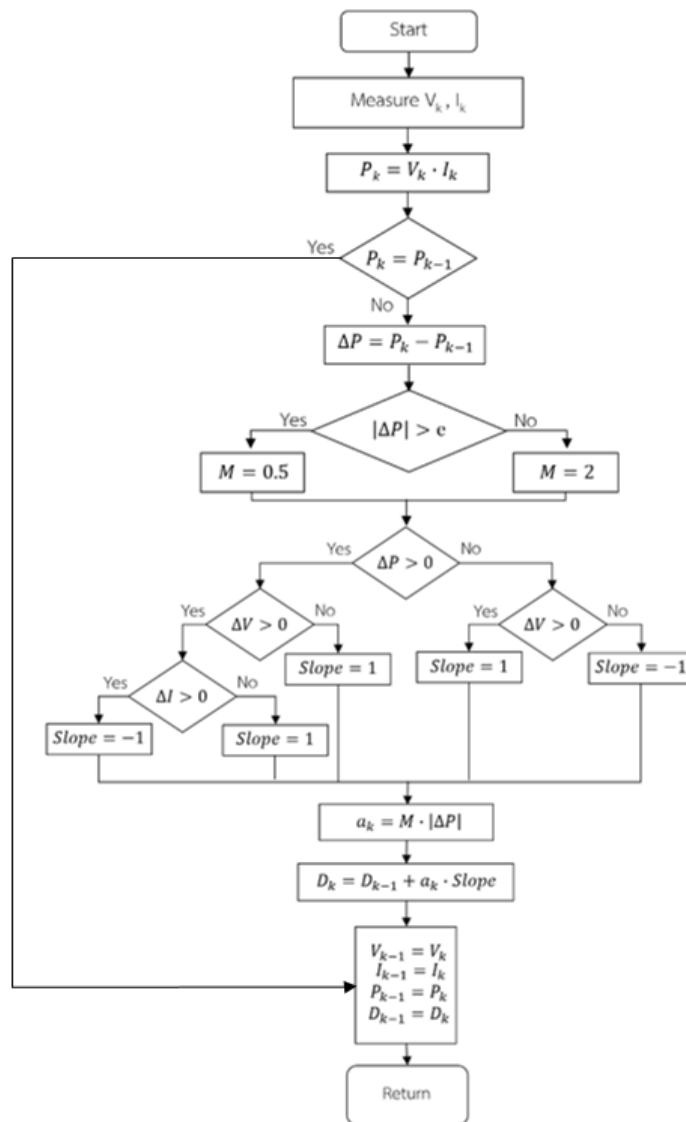
รูปที่ 3.8 วงจรวัดกระแสไฟฟ้า

3.6 การออกแบบระบบควบคุมการทำงานของกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุด

งานวิจัยนี้ใช้กระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบโมดิฟายอะแดปทีฟการรบกวนและการสังเกต (Modified Adaptive P&O, MAP&O) ซึ่งการออกแบบระบบควบคุมการทำงานของกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุดนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การออกแบบวงจรควบคุมสำหรับส่วนของฮาร์ดแวร์ และการเขียนโปรแกรมควบคุม สำหรับส่วนของซอฟต์แวร์

3.6.1 วิธีโมดิฟายอะแดปทีฟการรบกวนและการสังเกต

กระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีโมดิฟายอะแดปทีฟการรบกวนและการสังเกตนี้เป็นวิธีที่ปรับปรุงมาจากวิธีการปรับเปลี่ยนการรบกวนและการสังเกต ในหัวข้อที่ 2.4.2 โดยเพิ่มการเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้า เพื่อการหาจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่แม่นยำขึ้น และค่าตัวประกอบสเกล (M) ที่ใช้ในวิธีนี้จะมีการกำหนดค่าให้ระบบสามารถเข้าสู่การทำงานที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างรวดเร็ว และกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงลดลง เมื่อระบบเข้าสู่จุดการทำงานที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด ทำให้การแกว่งรอบจุดกำลังสูงสุดมีค่าน้อยลง ซึ่งผังการทำงานของกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบโมดิฟายอะแดปทีฟแสดงได้ดังรูปที่ 3.9 สำหรับกระบวนการทำงานจะแสดงอย่างละเอียดในหัวข้อการเขียนโปรแกรมควบคุม



รูปที่ 3.9 แผนผังลำดับขั้นตอนกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบโมดิฟายอะแดปทีฟ การรบกวนและการสังเกต

3.6.2 การออกแบบวงจรควบคุม

วงจรถวลคุมการทำงานของกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุด ดังรูปที่ 3.10 ประกอบด้วยบอร์ด Arduino UNO ตัวเชื่อมต่อ (Connector) โมดูลนาฬิกา (Real-time Clock Module) DS3231 ซึ่งใช้ขาในการเชื่อมต่อกับ Arduino เพียง 4 ขา สำหรับเป็นตัวอ่านค่าเวลาตามจริงเพื่อที่จะสามารถกำหนดเวลาให้บอร์ด Arduino เริ่มทำงานตามเวลาที่ต้องการ และตัวเก็บประจุ C ที่มีขนาด 10 ไมโครฟารัด เพื่อกรองสัญญาณ

Arduino UNO เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ประเภทหนึ่งที่น่ามาใช้เป็นเครื่องมือในการรับค่าจากวงจรวัดภายนอกมาคำนวณและประมวลผล เพื่อส่งการตอบสนองออกไปยังอุปกรณ์เชื่อมต่ออื่น ๆ ภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมมีหลักการเช่นเดียวกับภาษา C และ C++ มีคุณสมบัติทั่วไปดังต่อไปนี้

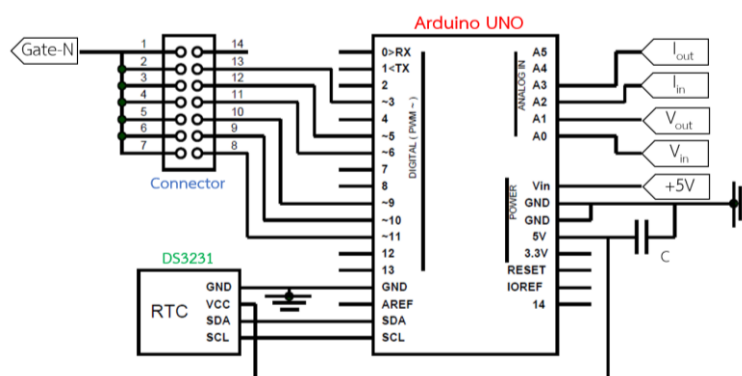
- หน่วยประมวลผล ATmega328P ขนาด 8 บิต
- ทำงานที่แรงดันไฟฟ้า 1.8 ถึง 5.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิ -40 ถึง 85 องศาเซลเซียส
- หน่วยความจำโปรแกรม 32 กิโลไบต์ และหน่วยความจำแรม 2 กิโลไบต์
- ความเร็วของสัญญาณนาฬิกาอยู่ที่ 16 เมกะเฮิร์ตซ์
- ขาดิจิทัล (Digital) อินพุต/เอาต์พุต 14 ขา ซึ่งมี 6 ขาที่สามารถส่งสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันได้
- ขาแอนะล็อกอินพุต (Analog in) จำนวน 6 ขา

และรายละเอียดการเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกกับ Arduino UNO สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

ขาแอนะล็อก A0 และ A1 ของ Arduino ใช้รับสัญญาณจากวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า ขา A2 และ A3 ใช้รับสัญญาณจากวงจรวัดกระแสไฟฟ้าขาเข้าและขาออกตามลำดับ

ขา V_{in} รับไฟจากวงจรรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ เพื่อเป็นไฟเลี้ยงสำหรับการทำงานของ Arduino ขา 5V เป็นไฟเลี้ยงโวลต์ให้กับอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ต้องการ เช่น ไมโครนาฬิกา หรือวงจรวัดกระแสไฟฟ้า

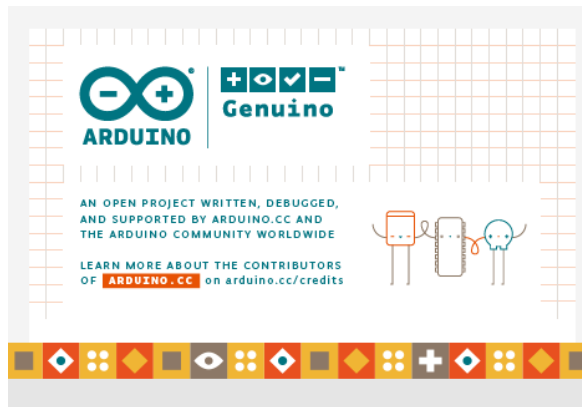
ขาดิจิทัล 3 5 6 9 10 และ 11 ให้สัญญาณออกในลักษณะเป็นพัลส์วิดท์มอดูเลชัน เพื่อส่งการทำงานที่ขาเกตของมอสเฟตชนิดเอ็น จากรูปที่ 3.9 ขาดิจิทัลดังกล่าวมีการต่อกับตัวเชื่อมต่อ ทั้งนี้เพื่อให้มีช่องสัญญาณสำรองที่เราสามารถเลือกใช้ได้



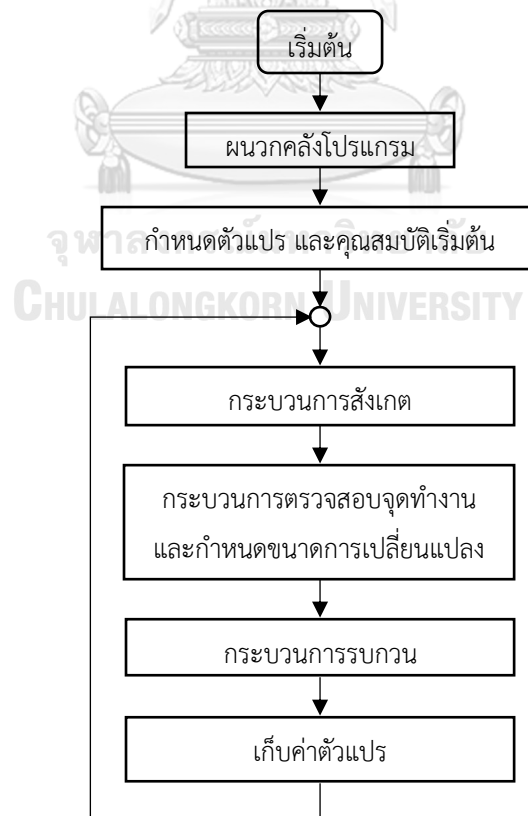
รูปที่ 3.10 วงจรควบคุมการทำงาน

3.6.3 การเขียนโปรแกรมควบคุม

วิธีการควบคุมการทำงานของเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ผ่านโปรแกรม Arduino IDE (IDE ย่อมาจาก Integrated Development Environment) ดังรูปที่ 3.11 ในการเขียนคำสั่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO ทำงานตามที่ต้องการ ในโปรแกรมแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ การกำหนดและตั้งค่าเริ่มต้น การคำนวณและประมวลผล และการสั่งการและแสดงผล โดยสามารถเขียนเป็นผังการทำงานได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 โปรแกรม Arduino IDE



รูปที่ 3.12 แพนผังขั้นตอนลำดับการทำงานของโปรแกรม

3.6.2.1 การกำหนดและตั้งค่าเริ่มต้น

การเขียนโปรแกรมควบคุมเริ่มจากการกำหนดและตั้งค่าเริ่มต้น คือการผนวกคลังโปรแกรม (Library) ที่จำเป็นต้องใช้ ได้แก่ ไฟล์ TimerOne.h เพื่อเรียกใช้งานสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันที่สามารถกำหนดคาบเวลาหรือความถี่ได้ ไฟล์ RtcDS3231.h และ Wire.h เพื่อเรียกใช้งานคำสั่งสำหรับโมดูลนาฬิกา มีการกำหนดหน้าที่ของขา Arduino ในการรับหรือส่งออกข้อมูล สร้างตัวแปร และกำหนดคุณสมบัติเริ่มต้นของตัวแปรที่ใช้ในโปรแกรม (ดูภาคผนวก ก)

เริ่มต้นกำหนดขาแอนะล็อก 4 ขา ของ Arduino ให้รับค่าจากวงจรวัดแรงดันและวัดกระแสไฟฟ้า กำหนดขาดิจิทัลสำหรับส่งสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชัน 1 ขา และสำรองไว้อีก 5 ขา กำหนดการใช้โมดูลนาฬิกาและตั้งค่าเวลาเพื่อเริ่มต้นทำงาน กำหนดค่าตัวคูณในการนำไปใช้คำนวณ กำหนดความถี่ของสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชัน และค่าอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

จากนั้นสร้างตัวแปรสำหรับเก็บค่าที่อ่านได้จากการวัด และสำหรับเก็บผลที่ได้จากการคำนวณ ตั้งค่าเริ่มต้น (Initial value) ของตัวแปร และตั้งค่าการทำงานเริ่มต้นสำหรับสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชัน และโมดูลนาฬิกา

3.6.2.2 การคำนวณและประมวลผล

การคำนวณและประมวลผลจะกล่าวถึงการทำงานในวงวน (Loop) ของโปรแกรม ซึ่งเป็นส่วนหลักของกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบโมดิฟายอะแดปทีฟ จากผังการทำงานรูปที่ 3.9 สามารถแบ่งกระบวนการทำงานได้เป็น 3 ส่วน คือ กระบวนการสังเกต กระบวนการตรวจสอบจุดทำงาน และกระบวนการรบกวน สำหรับการเขียนโปรแกรม (ดูภาคผนวก ข)

กระบวนการสังเกต ประกอบด้วยชุดคำสั่งในการอ่านค่าที่วัดได้จากวงจรวัดแรงดันและวงจรวัดกระแส เพื่อนำมาใช้คำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า ในกระบวนการรบกวนจะนำค่าที่คำนวณได้จากกระบวนการสังเกตมาใช้ในการตัดสินใจทิศทางและกำหนดขนาดของดิฟฟิเคิลตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ และสร้างสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันเพื่อขับมอเตอร์ จากนั้นโปรแกรมจะเก็บข้อมูลใหม่สำหรับการคำนวณรอบต่อไป และทำการวนซ้ำตั้งแต่ต้น เช่นเดิมไปเรื่อย ๆ โดยงานวิจัยนี้ออกแบบให้ระบบปรับจุดการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุก ๆ 1 วินาที กระบวนการทำงานดังกล่าวแสดงอย่างละเอียดในหัวข้อถัดไป

1) กระบวนการสังเกต

เริ่มจากรับค่าแอนะล็อกสัญญาณแรงดันและกระแสที่ได้จากวงจรวัด ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลมี 10 บิต ทำให้ค่าที่ไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านได้นั้นอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1023 จึง

มีความจำเป็นที่จะต้องแปลงค่าที่อ่านได้เป็นค่าจริงเสียก่อน โดยออกแบบให้โปรแกรมอ่านค่าทั้งหมด 8 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย จากนั้นจึงนำค่าแรงดันและกระแสมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้า หาขนาดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า ขนาดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า และขนาดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า (ดูภาคผนวก ข.1)

2) กระบวนการติดตามจุดทำงาน กำหนดขนาดและทิศทางของการเปลี่ยนแปลงค่าดิวิตีไซเคิล

ประมาณความชันของจุดการทำงานบนกราฟกำลังไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (P-V curve) และกราฟกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) โดยใช้ขนาดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า (ΔP) ขนาดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า (ΔV) และขนาดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า (ΔI) เพื่อกำหนดทิศทางในการเปลี่ยนแปลงค่าดิวิตีไซเคิล เช่น หากขนาดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าเป็นบวก ขนาดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเป็นบวก และขนาดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเป็นบวก จะต้องลดค่าดิวิตีไซเคิล เพื่อให้จุดทำงานมีแรงดันเพิ่มสูงขึ้น (ทิศทางไปทางด้านขวาของกราฟ) ในทางตรงกันข้ามหากมีขนาดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเป็นลบ ต้องเพิ่มค่าดิวิตีไซเคิล และขนาดในการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของดิวิตีไซเคิลนั้น ขึ้นอยู่กับขนาดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า หากขนาดการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ามาก คาดคะเนได้ว่าความเข้มแสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลง ขนาดของการเปลี่ยนแปลงดิวิตีไซเคิลให้สูงเพื่อให้เข้าใกล้จุดกำลังสูงสุดใหม่ได้รวดเร็ว อย่างไรก็ตามหากขนาดการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าน้อย ต้องให้ขนาดการเปลี่ยนแปลงดิวิตีไซเคิลน้อย เพื่อลดขนาดการแกว่ง (Oscillation) รอบจุดกำลังสูงสุด (ดูภาคผนวก ข.2)

3) กระบวนการรบกวน

การปรับค่าดิวิตีไซเคิลเพิ่มขึ้นหรือลดลงอาจทำให้มีค่าต่ำกว่า 0% หรือเกิน 100% ได้ ในทางปฏิบัติจึงต้องมีฟังก์ชันในการกำหนดค่าของดิวิตีไซเคิลไว้ให้อยู่ในช่วง $[0,1]$ โดยใช้ช่วงจำนวนเต็มคือ $[0,100]$ จากนั้นจึงนำไปสร้างสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันต่อไป (ดูภาคผนวก ข.3)

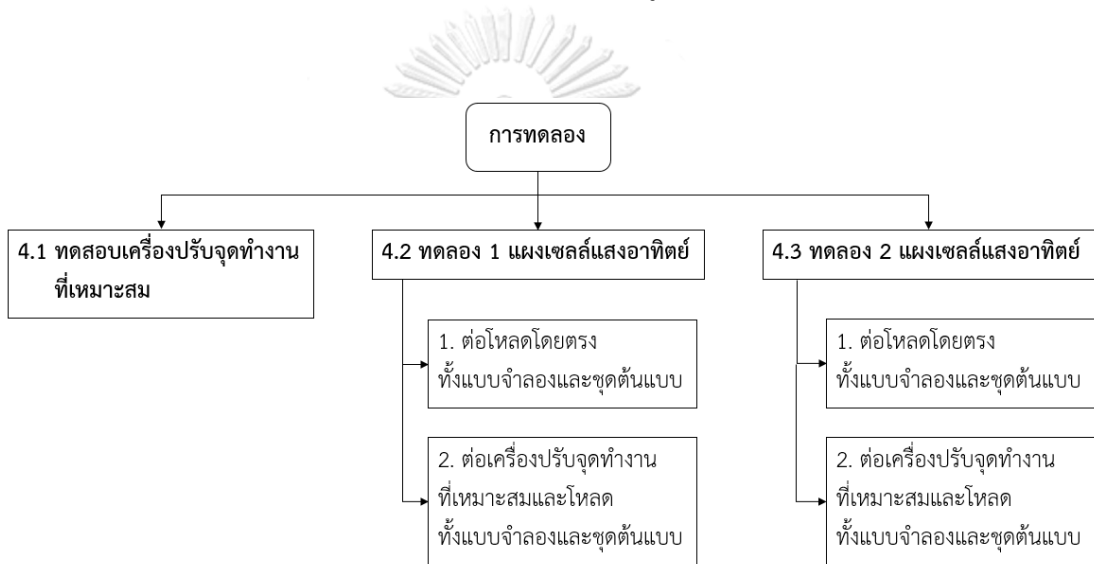
เมื่อกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุดแบบโมติฟายอะแดปทีฟทำงานครบหนึ่งรอบ โปรแกรมจะบันทึกค่าตัวแปร 4 ตัว เพื่อใช้ในการคำนวณรอบต่อไป ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า (V_{k-1}) กระแสไฟฟ้า (I_{k-1}) กำลังไฟฟ้า (P_{k-1}) และดิวิตีไซเคิล (D_{k-1})

จากการออกแบบดังที่กล่าวมาแล้ว ผลที่ได้คือเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 20 วัตต์ และในบทถัดไปกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองเมื่อนำเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ออกแบบไว้มาใช้จริงกับแบบจำลองระบบผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม PSIM ในการจำลองและทดสอบ และสร้างชุดต้นแบบเพื่อทดลอง สำหรับการนำไปใช้งานจริง ซึ่งการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ 1) การทดลองเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2) การทดลองต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับโหลดโดยตรง และ 3) การทดลองต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมแล้วจึงต่อเข้ากับโหลด โดยภาพรวมทั้งหมดของการทดลองในบทนี้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพรวมการทดลอง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ทั้งนี้การทดลองดังกล่าวใช้โคมไฟฮาโลเจนขนาด 1,000 วัตต์ เป็นแหล่งจ่ายความเข้มแสงแทนแสงจากดวงอาทิตย์ ความเข้มแสง (G) ที่ใช้ในการทดลองที่ 100% 80% 50% และ 20% เท่ากับ 900 W/m^2 720 W/m^2 450 W/m^2 และ 180 W/m^2 ตามลำดับ มีอุณหภูมิ (T) ในขณะทำการทดลองประมาณ 40°C แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลองนี้ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอนของ Schutten Solar ขนาด 20 วัตต์ สำหรับข้อมูลทางเทคนิคของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองนี้ดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลทางเทคนิคของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอนขนาด 20 วัตต์

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าทั่วไป
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (วัตต์)	P_{max}	20
ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้า (%)	-	0-3
แรงดันเปิดวงจร (โวลต์)	V_{oc}	21.6
กระแสลัดวงจร (แอมแปร์)	I_{sc}	1.22
แรงดันสูงสุด (โวลต์)	V_{mpp}	18
กระแสสูงสุด (แอมแปร์)	I_{mpp}	1.12
ค่าคงตัวการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุด (%/°C)	K_p	-0.41
ค่าคงตัวการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (%/°C)	K_v	-0.33
ค่าคงตัวการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (%/°C)	K_i	+0.03
จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ใน 1 โมดูล (เซลล์)	N_s	36

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลอง

เงื่อนไข	ขนาด
ความเข้มแสง (W/m^2)	900, 720, 450, 180
อุณหภูมิแวดล้อม (°C)	40 ¹
โหลดคงที่ (Ω)	17 ² , 35 ³

หมายเหตุ: ¹อุณหภูมิสูงสุดโดยประมาณในช่วงฤดูร้อนของประเทศไทยบริเวณกรุงเทพมหานครระหว่างปี พ.ศ. 2494 ถึง พ.ศ. 2558 โดยข้อมูลจากศูนย์ภูมิอากาศ สำนักพัฒนาอุตุนิยมวิทยา

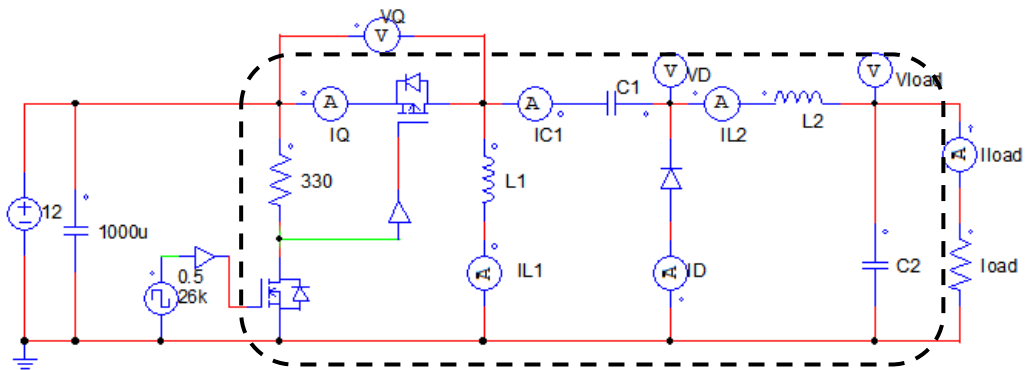
²โหลดคงที่ขนาด 17 โอห์ม หาจากการจำลองโดยใช้โปรแกรม PSIM ที่ความเข้มแสงขนาด $858 W/m^2$ ซึ่งเป็นค่าความเข้มแสงสูงสุดเฉลี่ยบริเวณกรุงเทพมหานครในปี พ.ศ. 2555 ถึง พ.ศ. 2557 โดยข้อมูลจากศูนย์ตรวจวิเคราะห์ไอโซนและรังสี กรมอุตุนิยมวิทยา

³โหลดคงที่ขนาด 35 โอห์ม หาจากความเข้มแสงสูงสุดเฉลี่ย สำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 แผง โดยโปรแกรม PSIM เช่นเดียวกัน

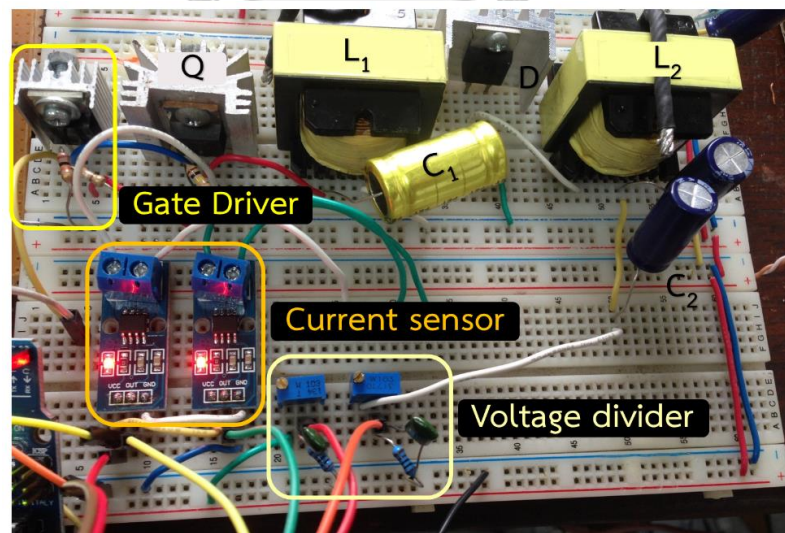
4.1 การทดลองเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแมงเซลล์แสงอาทิตย์

การทดลองนี้เป็นการทดสอบการทำงานของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ที่ได้ออกแบบไว้ โดยการวัดสัญญาณรูปคลื่นต่าง ๆ สำหรับแบบจำลองและชุดต้นแบบของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

ในการทดลองนี้กำหนดให้วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันขนาด 12 โวลต์ และโหลดขนาด 35 โอห์ม กำหนดให้ใช้ความถี่ 26 กิโลเฮิรตซ์ ค่าตัวดีไซเคิลเท่ากับ 0.5 จากนั้นทำการวัดสัญญาณรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมสวิทช์ (V_Q) กระแสที่ไหลผ่านสวิทช์ (I_Q) แรงดันตกคร่อมไดโอด (V_D) กระแสที่ไหลผ่านไดโอด (I_D) กระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ C_1 (I_{C1}) และกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ L_1 และ L_2 (I_{L1} , I_{L2}) ตามลำดับ

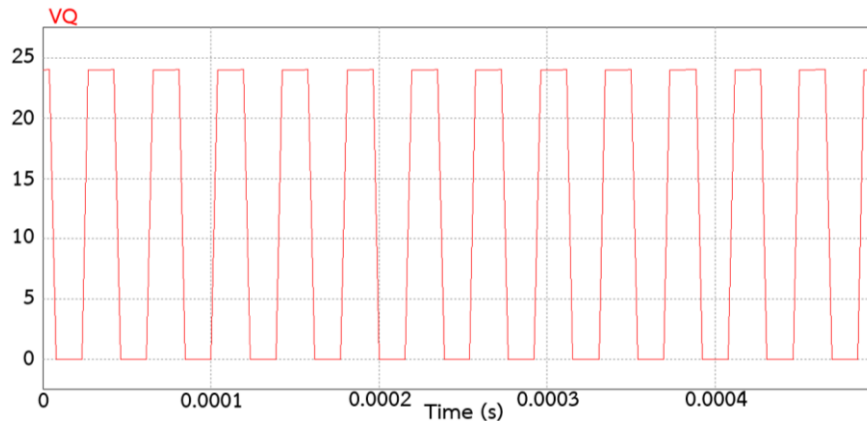


รูปที่ 4.2 แบบจำลองวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์

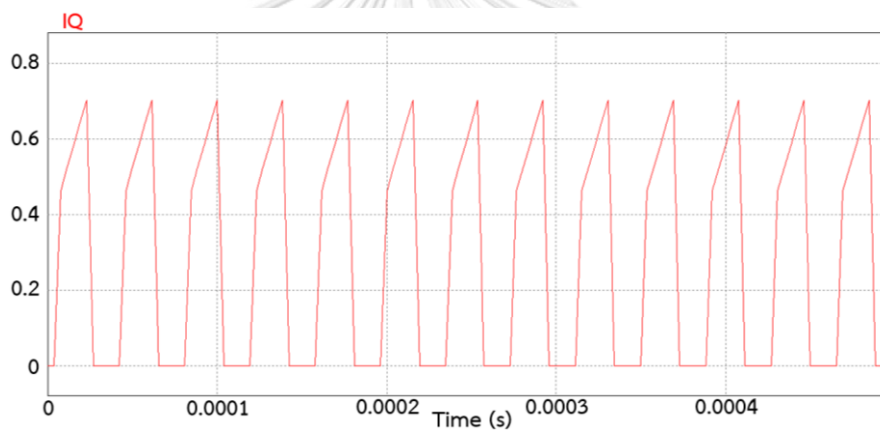


รูปที่ 4.3 ชุดต้นแบบวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์

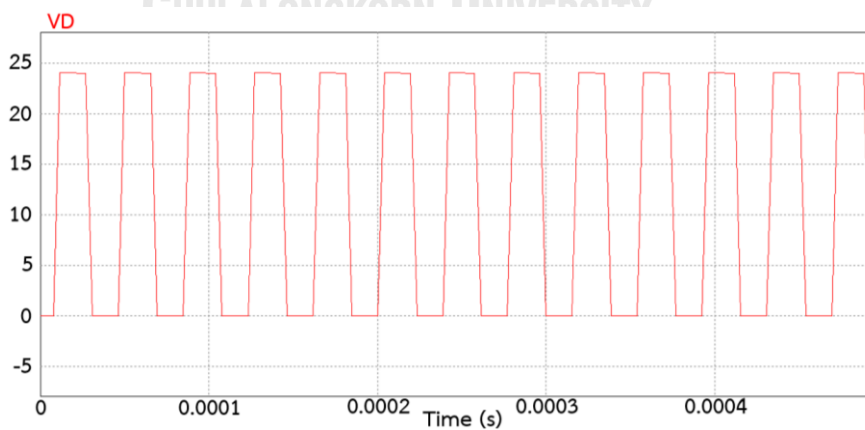
ผลการวัดรูปคลื่นสัญญาณของวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ระหว่างแบบจำลองและชุดต้นแบบ
 ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



(a) สัญญาณ V_Q

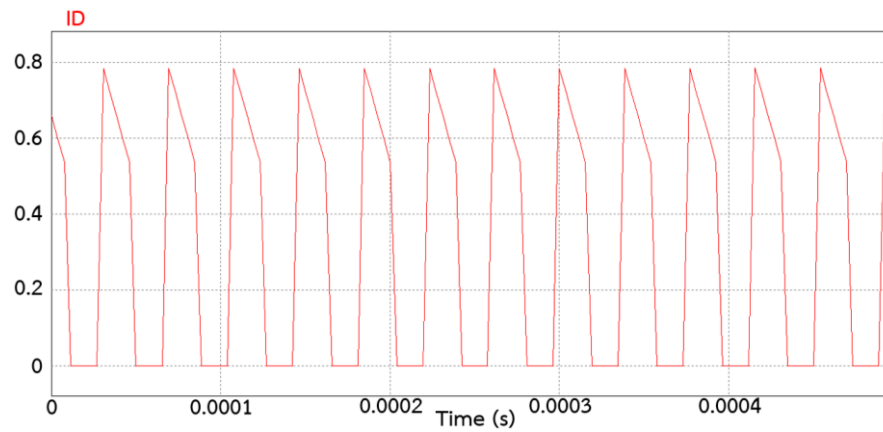
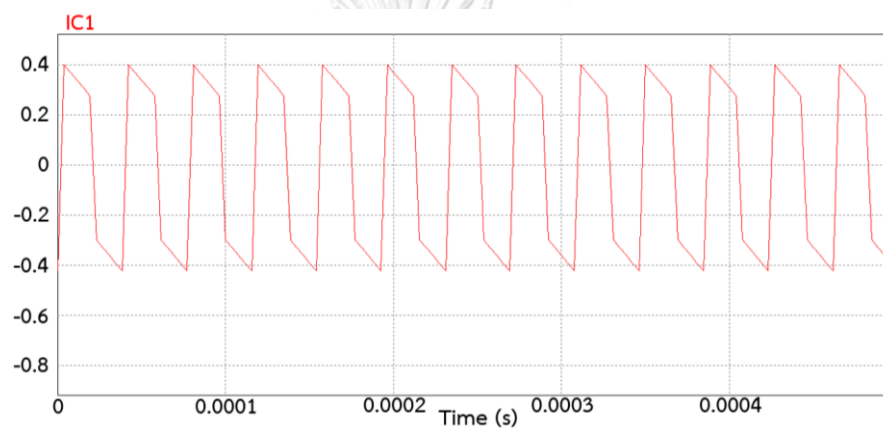
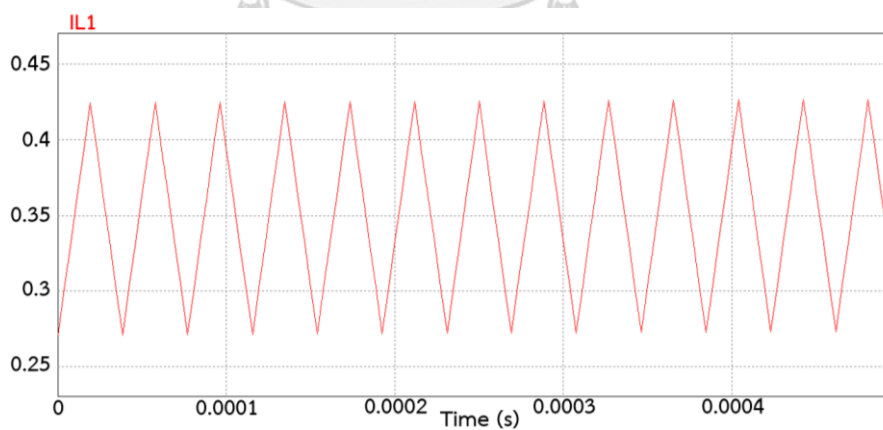


(b) สัญญาณ I_Q

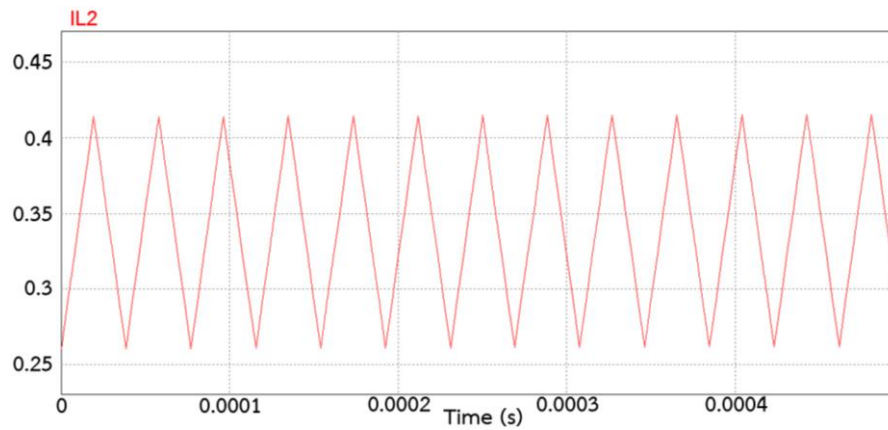


(c) สัญญาณ V_D

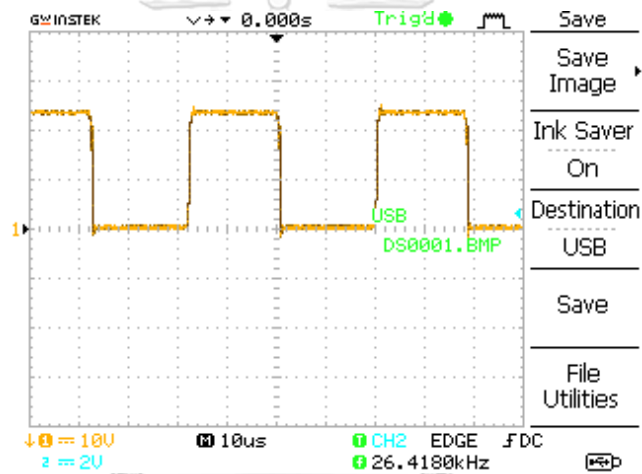
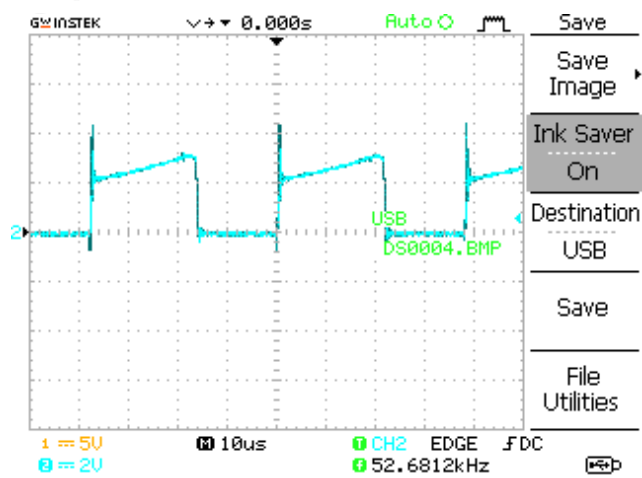
รูปที่ 4.4 สัญญาณรูปคลื่นของแบบจำลองวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์

(d) สัญญาณ I_D (e) สัญญาณ I_{C1} (f) สัญญาณ I_{L1}

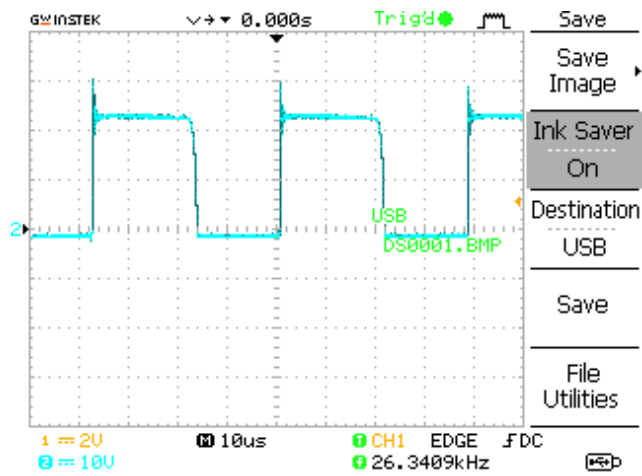
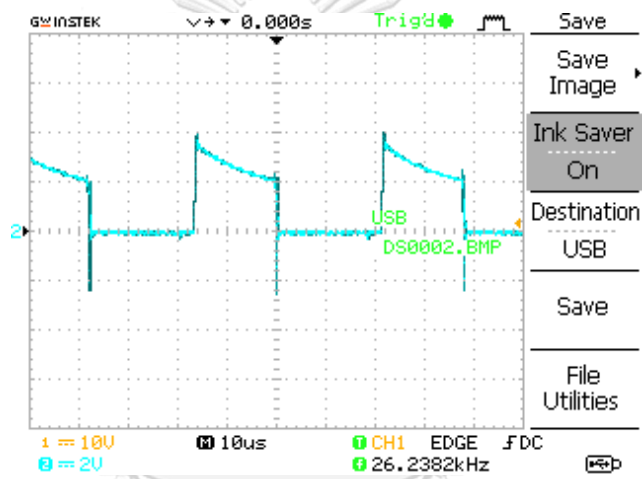
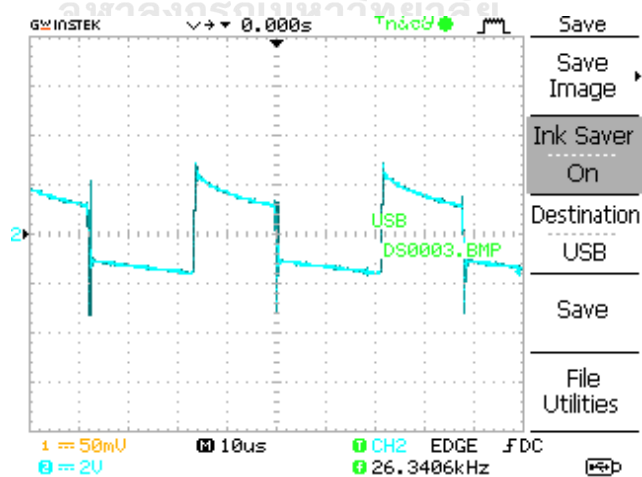
รูปที่ 4.4 สัญญาณรูปคลื่นของแบบจำลองวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ (ต่อ)

(g) สัญญาณ I_{L2}

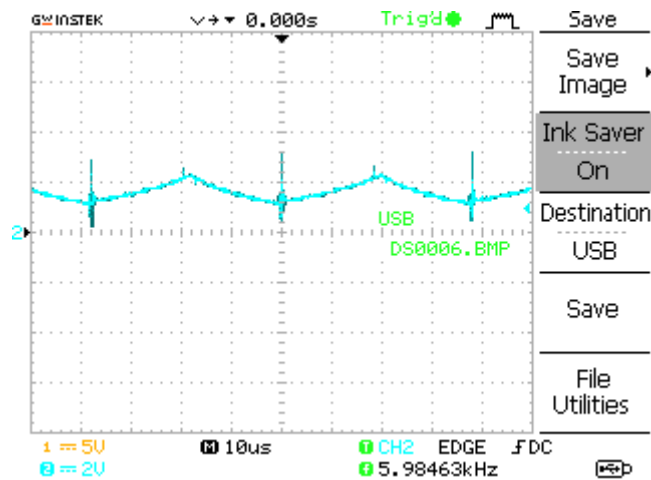
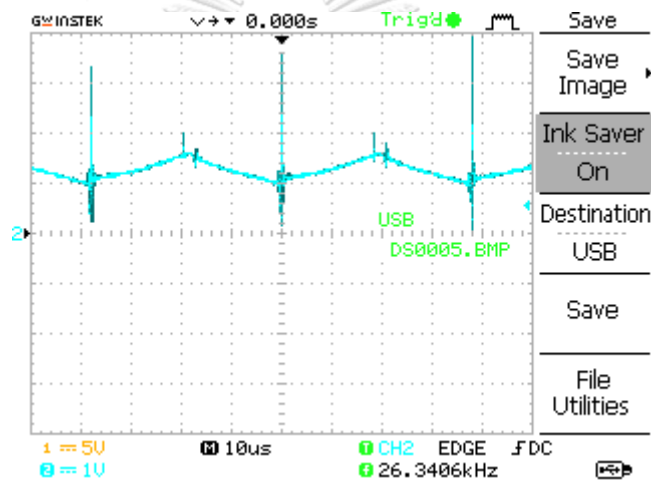
รูปที่ 4.4 สัญญาณรูปคลื่นของแบบจำลองวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ (ต่อ)

(a) สัญญาณ V_O (b) สัญญาณ I_O

รูปที่ 4.5 สัญญาณรูปคลื่นของชุดต้นแบบวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์

(c) สัญญาณ V_D (d) สัญญาณ I_D (e) สัญญาณ I_{C1}

รูปที่ 4.5 สัญญาณรูปคลื่นของชุดต้นแบบวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ (ต่อ)

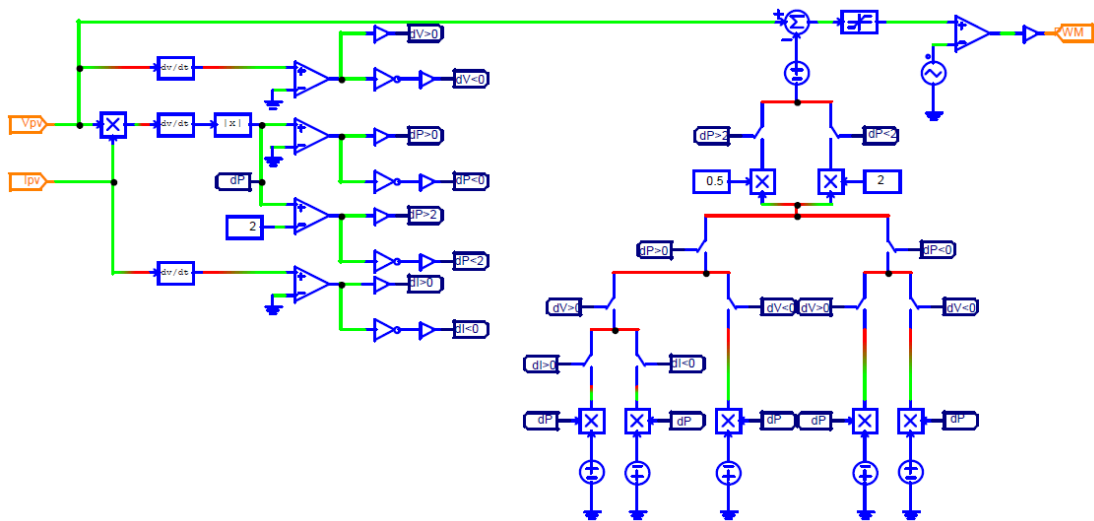
(f) สัญญาณ I_{L1} (g) สัญญาณ I_{L2}

รูปที่ 4.5 สัญญาณรูปคลื่นของชุดต้นแบบวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ (ต่อ)

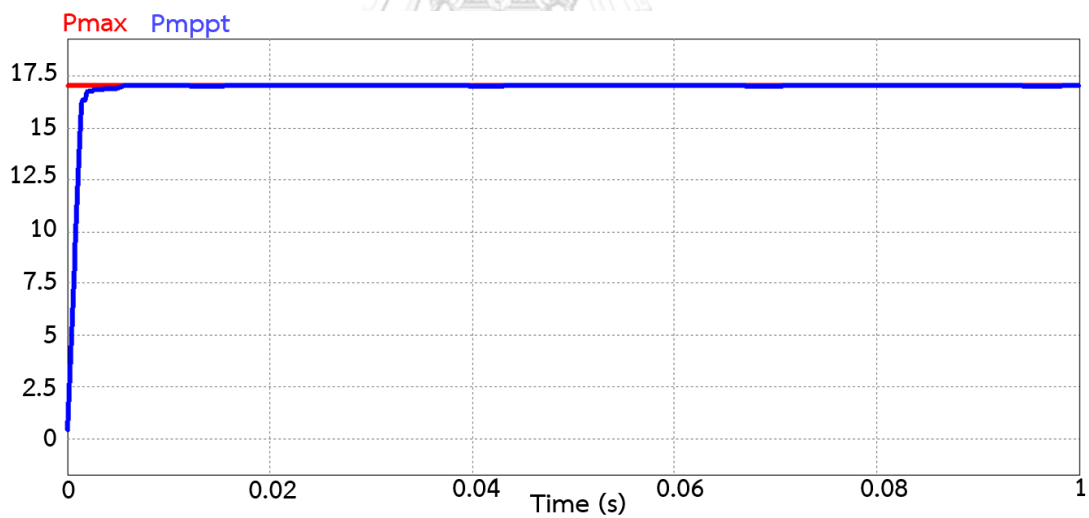
จากรูปที่ 4.4 แบบจำลองซีต้าคอนเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม PSIM สามารถทำงานได้ตามทฤษฎี ดังที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 หัวข้อ 3.1 และเมื่อนำมาสร้างชุดต้นแบบซีต้าคอนเวอร์เตอร์เพื่อนำมาใช้งานจริง ผลการทดลองการทำงานของซีต้าคอนเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 4.5 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์เป็นไปในทำนองเดียวกับแบบจำลอง

อย่างไรก็ตาม เครื่องปรับชุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ คือการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์และกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุด ฉะนั้นเมื่อนำกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุด สำหรับแบบจำลองในโปรแกรม PSIM ดังรูปที่ 4.6 มาใช้งานร่วมกับแบบจำลองซีต้าคอนเวอร์เตอร์ และผลการทดลองที่ได้ดังรูปที่ 4.7 เมื่อ P_{max} คือ กำลังสูงสุด

ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ควรจะได้ ที่ความเข้มแสง 900 W/m^2 อุณหภูมิ 40°C และ P_{mppt} คือ กำลังที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้จริง หรือกำลังไฟฟ้าที่เข้าวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.6 แบบจำลองกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุดในโปรแกรม PSIM

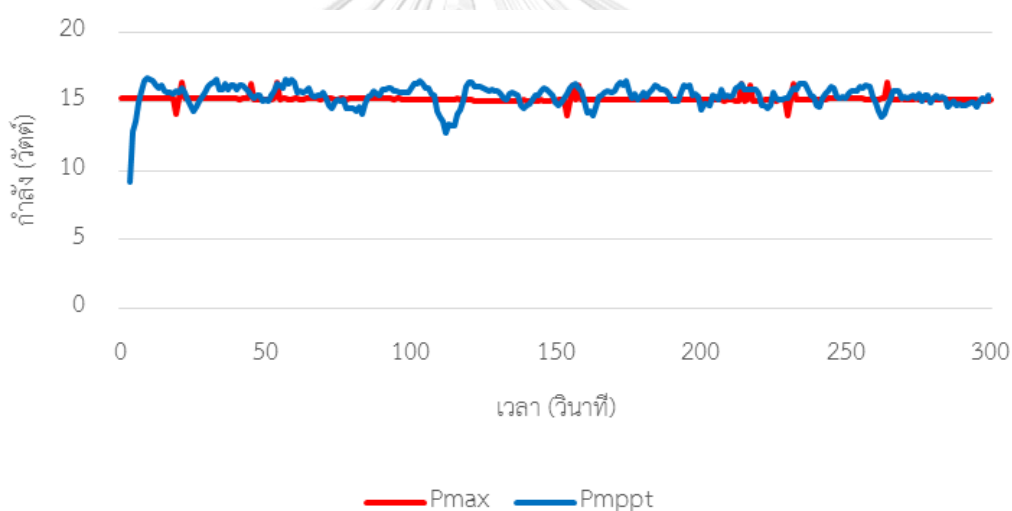


รูปที่ 4.7 ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดของแบบจำลองเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 4.6 กระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุด รับค่ากระแสและแรงดันจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ในกระบวนการทำงาน หลังเสร็จสิ้นกระบวนการมีการส่งสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันออกไปยังสวิตซ์ในวงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ และจากรูปที่ 4.7 ผลการทำงานร่วมกันระหว่าง

ซีต้าคอนเวอร์เตอร์และกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุด จากกราฟ Pmppt สามารถรู้เข้าจนวนมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับกราฟ Pmax ในช่วงสภาวะคงตัว แสดงว่าเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้

สำหรับกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุดของชุดต้นแบบ เป็นการเขียนคำสั่งในไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.6.2 และผลการทดสอบชุดต้นแบบเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมดังรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงให้เห็นความสามารถติดตามจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้เช่นเดียวกับแบบจำลอง แต่มีการแกว่งของค่ากำลังที่วัดได้ เนื่องจากความแม่นยำของการวัดกระแสและแรงดัน หรืออาจเกิดจากการแปลงค่าที่วัดได้มาเป็นค่าจริงในโปรแกรมการคำนวณที่ไม่ละเอียดพอ นอกจากนี้ค่ากำลังที่วัดได้จากชุดต้นแบบยังมีค่าน้อยกว่าการทดสอบในแบบจำลองอีกด้วย

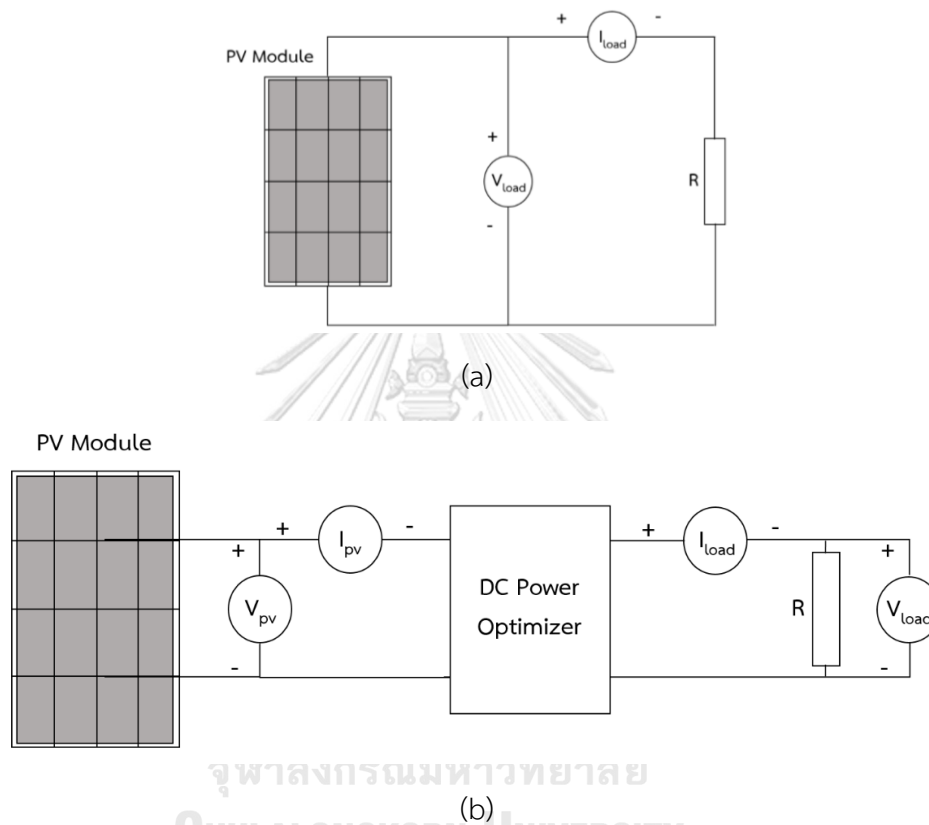


รูปที่ 4.8 ผลการติดตามจุดกำลังสูงสุดของชุดต้นแบบเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

หลังจากทดสอบการทำงานของเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับการทดลองและผลการทดลองเมื่อนำเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมไปใช้งานกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขณะที่มีการถูกบังจากแสงแดด และขณะไม่มีการบังแสงแดด ได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

4.2 การทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง

การทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง ในหัวข้อนี้แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ การต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผงกับโหลดคงที่ และการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสมแล้วจึงต่อเข้ากับโหลด ดังรูปที่ 4.9(a) และ 4.9(b) ตามลำดับ



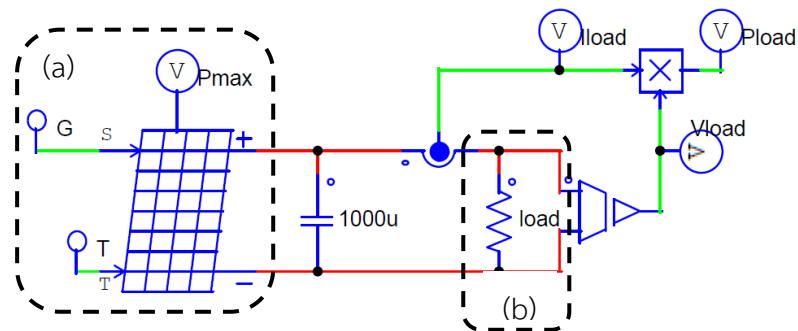
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.9 การทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง

4.2.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผงกับโหลด

การทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผงกับโหลดคงที่ขนาด 17 โอห์ม ซึ่งลักษณะการทดลองสามารถจำลองจากโปรแกรม PSIM ได้ดังรูปที่ 4.10 และชุดต้นแบบดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 แบบจำลองการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แฉงกับโหลด



(a) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แฉง



(b) โหลดขนาด 17 โอห์ม

รูปที่ 4.11 ชุดต้นแบบการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับโหลดขนาด 17 โอห์ม

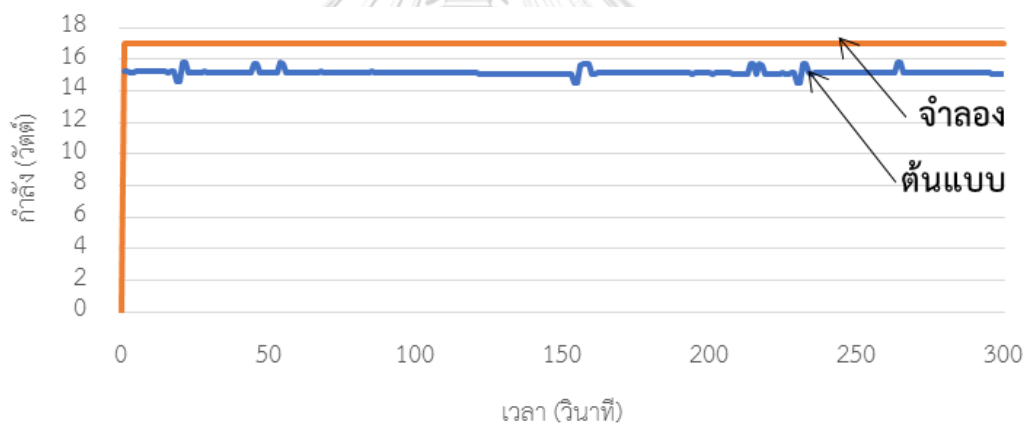
การดำเนินการทดลองสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แฉงกับโหลด แสดงดังต่อไปนี้

- 1) ต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับโหลดโดยตรง ให้ความเข้มแสง (G) 100% หรือ 900 W/m^2 กับแผง ทำการวัดและเก็บผลแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่โหลด และคำนวณกำลังที่โหลด
- 2) เปลี่ยนค่าความเข้มแสงจาก 100% เป็น 80% 50% และ 20% ทำการวัดค่า เก็บผล และคำนวณผลการทดลองดังข้อ 1)

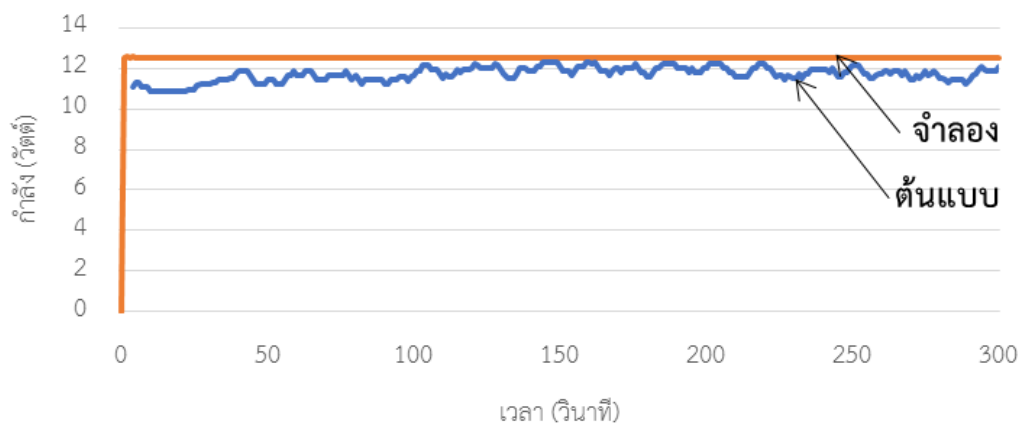
จากการทดลองดังกล่าวจะใช้กับทั้งการจำลองในโปรแกรมและชุดต้นแบบ ผลการวัดและคำนวณหาค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่โหลด ที่ความเข้มแสงค่าต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.12 ถึง 4.15 เป็นผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่โหลดสำหรับการทดลองจากโปรแกรมและชุดต้นแบบที่ความเข้มแสง 100% 80% 50% และ 20% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผงกับโหลด ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ

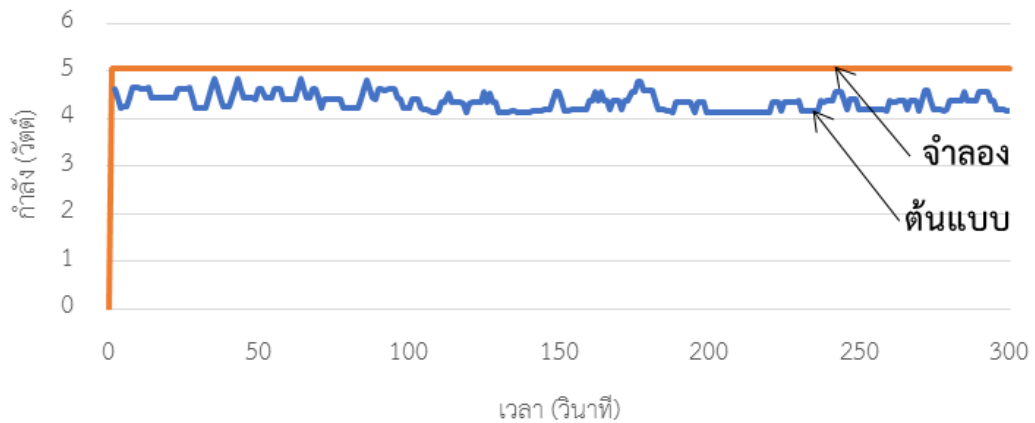
พารามิเตอร์	ความเข้มแสง							
	100%		80%		50%		20%	
	จำลอง	ต้นแบบ	จำลอง	ต้นแบบ	จำลอง	ต้นแบบ	จำลอง	ต้นแบบ
แรงดัน V_{load} (โวลต์)	16.95	15.69	14.55	13.61	9.24	8.09	3.75	3.24
กระแส I_{load} (แอมแปร์)	1.00	0.96	0.86	0.86	0.54	0.54	0.22	0.23
กำลัง P_{load} (วัตต์)	16.96	15.16	12.50	11.71	5.04	4.35	0.83	0.75



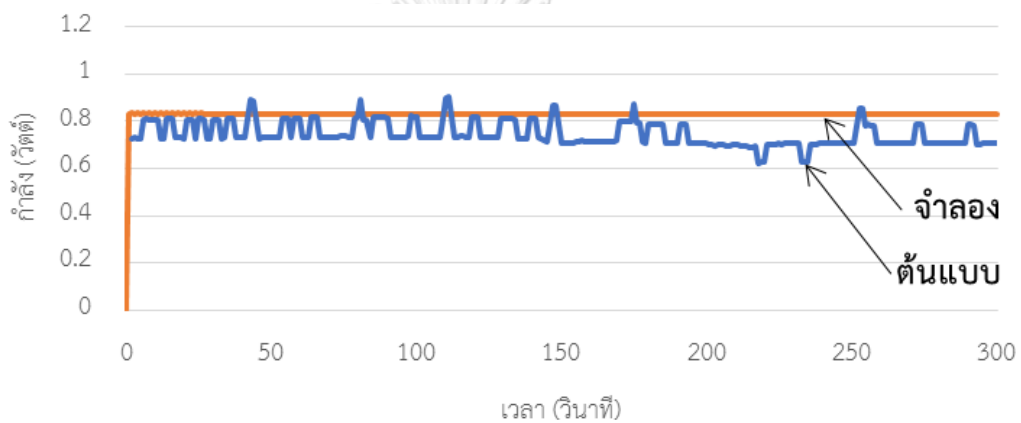
รูปที่ 4.12 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่โหลด เมื่อทดสอบที่ความเข้มแสง 100%



รูปที่ 4.13 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่โหลด เมื่อทดสอบที่ 80% ของความเข้มแสง



รูปที่ 4.14 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ไหลด เมื่อทดสอบที่ 50% ของความเข้มแสง



รูปที่ 4.15 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ไหลด เมื่อทดสอบที่ 20% ของความเข้มแสง

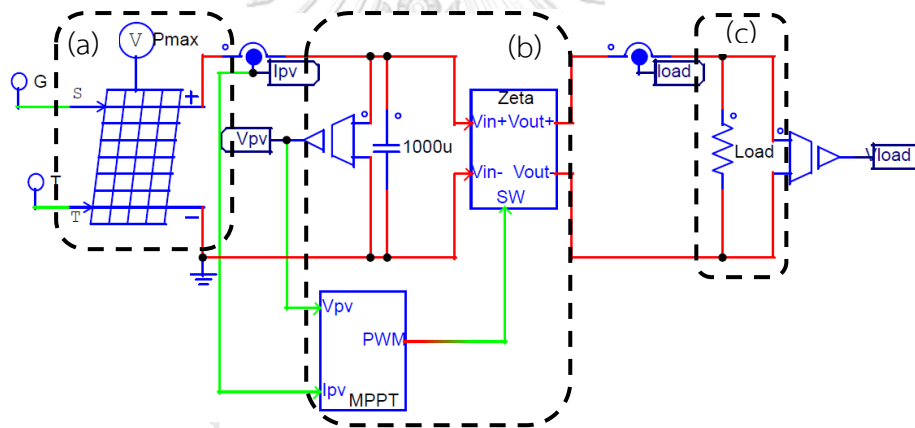
จากตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยจากผลการทดลองของแบบจําลองและชุดต้นแบบมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เมื่อหาความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าที่ไหลดของชุดต้นแบบเทียบกับแบบจําลอง ที่ความเข้มแสง 100% มีค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังที่ไหลดประมาณ 10% ที่ความเข้มแสง 80% มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 6% ที่ความเข้มแสง 50% คำนวนค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าที่ไหลดได้ 13% และที่ความเข้มแสง 20% คำนวนค่าความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าที่ไหลดได้เท่ากับ 9% ผลจากการทดลองกับชุดต้นแบบค่อนข้างมีความไม่แน่นอน เมื่อเทียบกับผลที่ได้จากแบบจําลอง

จากรูปที่ 4.12 ถึง 4.15 ผลการทดลองระหว่างแบบจําลองและชุดต้นแบบเป็นไปในแนวทางเดียวกันคือ เมื่อความเข้มแสงที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับมีค่าลดลง กำลังไฟฟ้าที่ไหลดก็มีค่าลดลง และกำลังที่ไหลดของชุดต้นแบบมีการแกว่งที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มแสงน้อยอีกด้วย

กำลังที่โหลดนั่นเองคือค่าเดียวกับกำลังที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ ($P_{load} = P_{pv}$) ซึ่งควรมีค่าที่แปรผันอย่างเป็นเชิงเส้นกับความเข้มแสง แต่จากผลการทดลองกับโหลดคงที่ดังกล่าวกลับมีการแปรผันอย่างไม่เป็นเชิงเส้น จากผลที่ได้ข้างต้นชี้ให้เห็นว่าค่ากำลังที่โหลดได้รับไม่ใช่กำลังสูงสุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ควรผลิตได้

4.2.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีเครื่องปรับจุดทำงาน 1 แผงกับโหลด

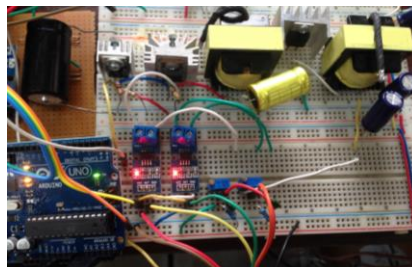
การทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีเครื่องปรับจุดทำงาน 1 แผงกับโหลด คือ การต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผงเข้ากับเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 ตัว และต่อกับโหลดคงที่ขนาด 17 โอห์ม ซึ่งลักษณะการทดลองสามารถจำลองจากโปรแกรม PSIM ดังรูปที่ 4.16 และชุดต้นแบบดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.16 แบบจำลองการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง ที่มีเครื่องปรับจุดทำงานและโหลด



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.17 ชุดต้นแบบการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง ที่มีเครื่องปรับจุดทำงานและโหลด

การดำเนินการทดลองสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง ที่มีเครื่องปรับจุดทำงานและโหลด ดังต่อไปนี้

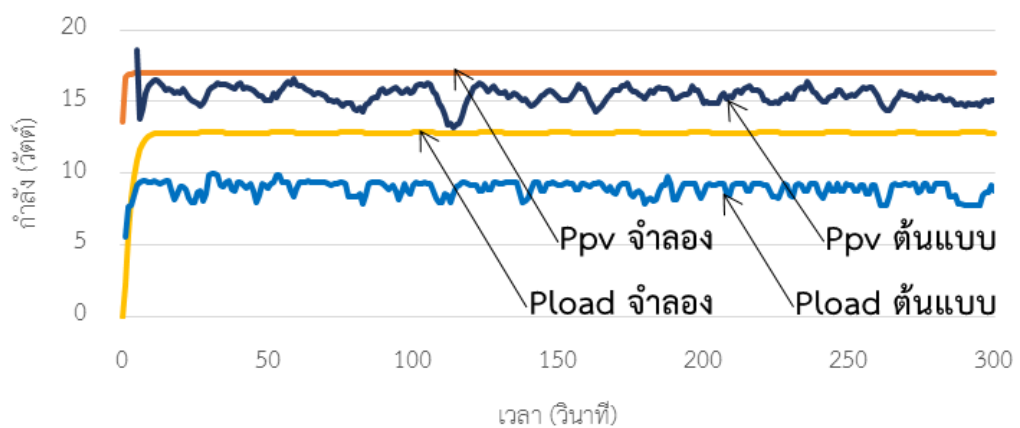
- 1) ที่ความเข้มแสง (G) 100% หรือ 900 W/m^2 วัดและเก็บผลแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ก่อนเข้าและหลังจากออกจากเครื่องปรับจุดทำงาน หรือที่โหลด เพื่อนำมาคำนวณกำลังไฟฟ้า
- 2) เปลี่ยนค่าความเข้มแสงจาก 100% เป็น 80% 50% และ 20% ทำการวัดค่า เก็บผล และคำนวณผลการทดลองดังข้อ 1)

จากการทดลองดังกล่าวจะนำไปใช้กับการจำลองในโปรแกรมและชุดต้นแบบ ผลการวัด และคำนวณหาค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และโหลด ที่ความเข้มแสงค่าต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.18 ถึง 4.21 เป็นผลการเปรียบเทียบ กำลังไฟฟ้าที่เข้าเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสม (กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์) และโหลด สำหรับการทดลองจากโปรแกรมและชุดต้นแบบที่ความเข้มแสง 100% 80% 50% และ 20% ตามลำดับ

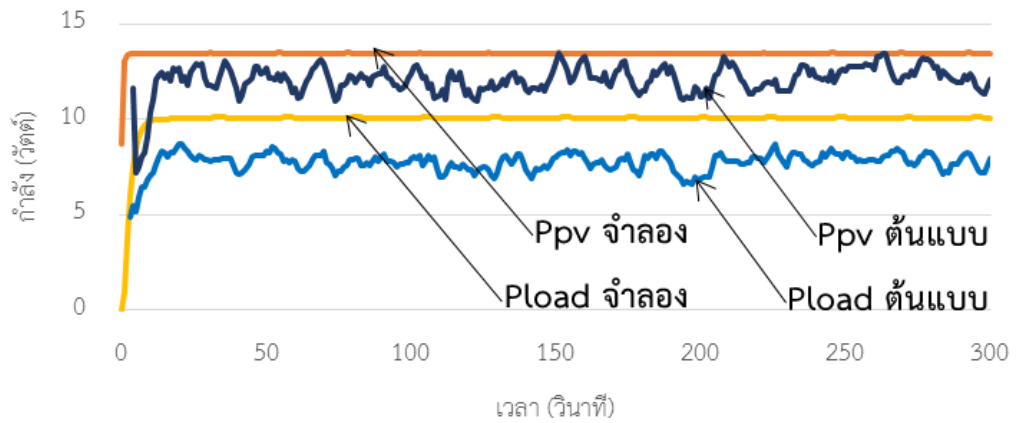


ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง ที่มีเครื่องปรับจุดทำงานและโหลด ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ

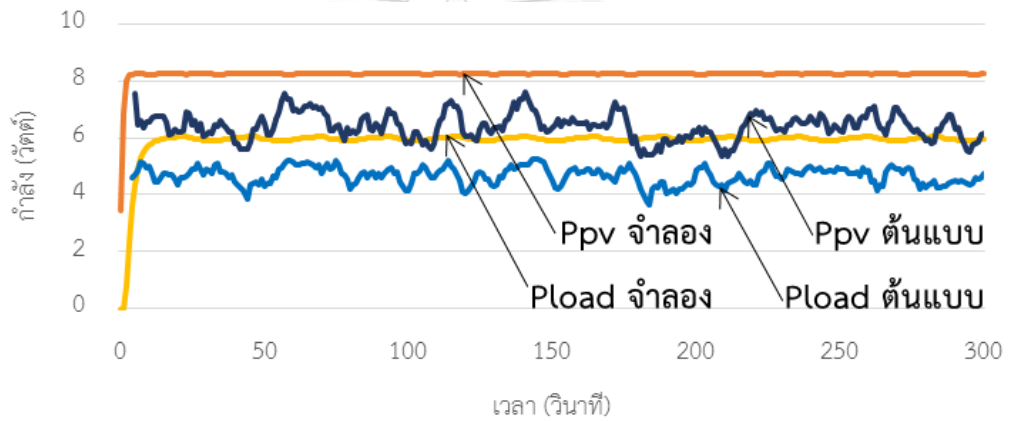
พารามิเตอร์	ความเข้มแสง							
	100%		80%		50%		20%	
	จำลอง	ต้นแบบ	จำลอง	ต้นแบบ	จำลอง	ต้นแบบ	จำลอง	ต้นแบบ
แรงดันเข้า V_{pv} (โวลต์)	16.72	15.52	16.54	16.87	16.19	17.61	15.58	17.17
กระแสเข้า I_{pv} (แอมแปร์)	1.02	1.00	0.81	0.72	0.51	0.37	0.20	0.18
กำลังขาเข้า P_{pv} (วัตต์)	17.01	15.51	13.47	12.12	8.21	6.42	3.10	3.02
แรงดันขาออก V_{load} (โวลต์)	14.67	12.40	12.99	11.40	9.97	8.95	5.63	5.71
กระแสขาออก I_{load} (แอมแปร์)	0.86	0.72	0.76	0.68	0.59	0.52	0.33	0.29
กำลังออก P_{load} (วัตต์)	12.71	8.93	9.98	7.75	5.89	4.67	1.90	1.69
ประสิทธิภาพ ของเครื่องปรับ จุดทำงาน (%)	74.67	58.09	73.98	64.57	71.54	73.96	60.93	58.11



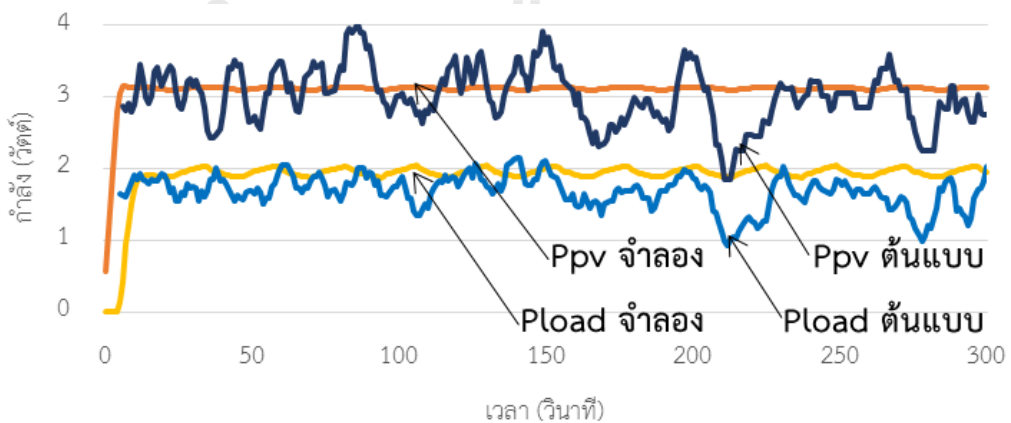
รูปที่ 4.18 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์และโหลด เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความเข้มแสง 100%



รูปที่ 4.19 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์และโหลด
เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความเข้มแสง 80%



รูปที่ 4.20 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์และโหลด
เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความเข้มแสง 50%



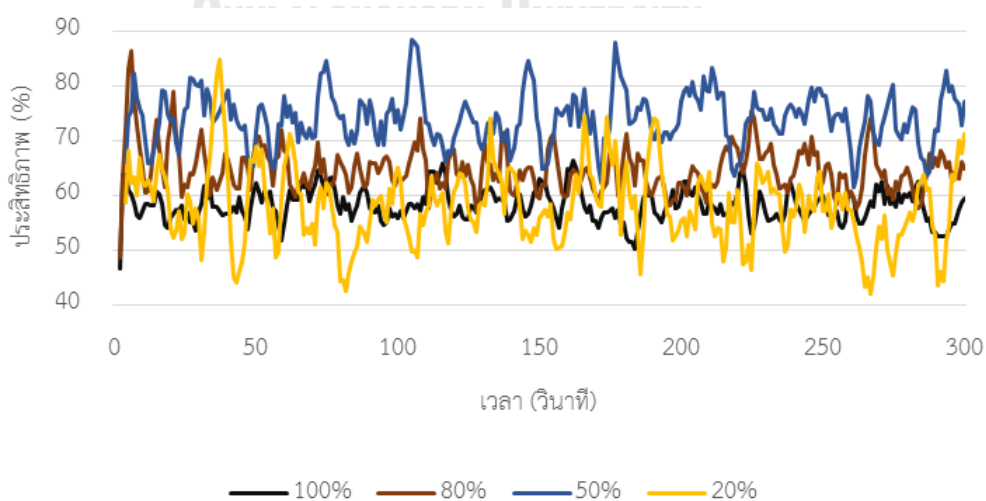
รูปที่ 4.21 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์และโหลด
เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความเข้มแสง 20%

ค่าประสิทธิภาพของเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสม (η) สามารถคำนวณหาได้จากกำลังที่เข้าและกำลังที่ออกจากเครื่องปรับจูนทำงาน ซึ่งหมายถึงกำลังที่แผงเซลล์อาทิตย์ผลิตได้ (P_{pv}) และกำลังที่โหลด (P_{load}) ดังสมการที่ (4.1)

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{P_{load}}{P_{pv}} \times 100\% \quad (4.1)$$

จากตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยของการทดลองสำหรับแบบจำลองและชุดต้นแบบมีค่าไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งผลการทดลองของแบบจำลองมีค่ามากกว่าชุดต้นแบบเสมอ เมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยพบว่าแบบจำลองมีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสมสูงสุด 74.13% และมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อความเข้มแสงอาทิตย์ลดลง สำหรับประสิทธิภาพเฉลี่ยของชุดต้นแบบมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 73.96% ที่ความเข้มแสง 50% รูปที่ 4.22 แสดงค่าประสิทธิภาพของชุดต้นแบบเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสมเมื่อได้รับความเข้มแสงต่างกัน และจากรูปดังกล่าวค่าประสิทธิภาพของเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสมของชุดต้นแบบมีค่าไม่คงที่ หรือมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา แสดงว่าเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสมมีความไม่แน่นอนในการทำงาน และในเรื่องกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้น

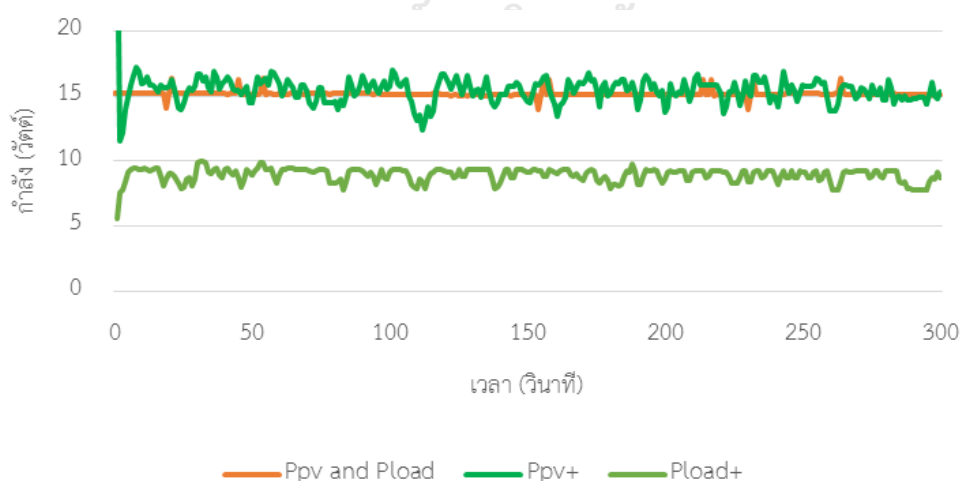
จากรูปที่ 4.18 ถึง 4.21 การทำงานของชุดต้นแบบมีแนวโน้มการทำงานที่เหมือนกับแบบจำลอง แสดงให้เห็นว่าชุดต้นแบบสามารถทำงานได้จริง เมื่อพิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นพบว่าแบบจำลองมีค่ากำลังคงที่และสม่ำเสมอ ต่างจากชุดต้นแบบที่ค่ากำลังไฟฟ้ามีค่าแกว่งไปมาอยู่ระหว่างค่ากำลังสูงสุด และการแกว่งของกำลังไฟฟ้านี้สูงขึ้นเมื่อค่าความเข้มแสงลดลง



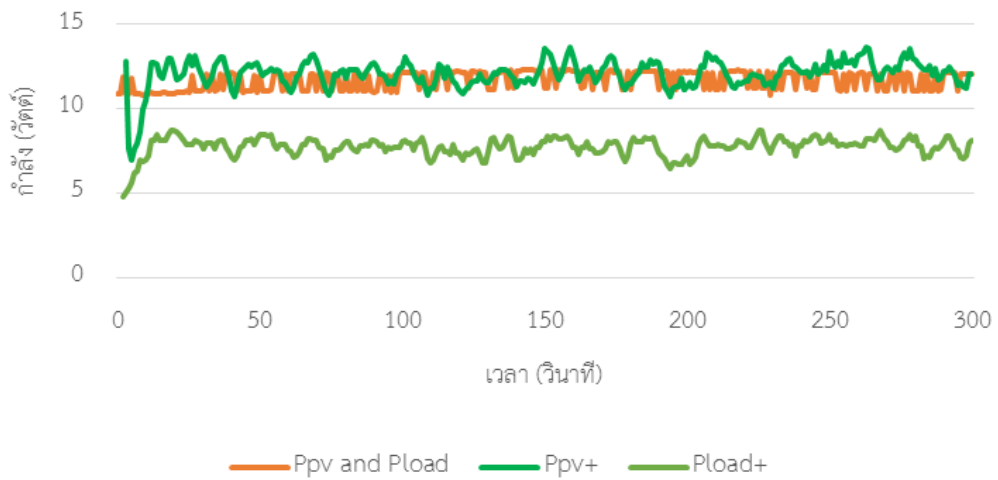
รูปที่ 4.22 ประสิทธิภาพเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสมของชุดต้นแบบที่ความเข้มแสงต่าง ๆ

จากการทดลองชุดต้นแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ ทั้งแบบมีและไม่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถแสดงผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ กำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับ และกำลังสูญเสียที่เครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.23 ถึง 4.26 เมื่อ Ppv and Pload คือ กำลังที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์และที่โหลดของการทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผงที่ไม่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสม Ppv+ และ Pload+ คือ กำลังที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ และกำลังที่โหลดของการทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผงที่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสม ตามลำดับ ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบผลการทดลองชุดต้นแบบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง ที่มีและไม่มีเครื่องปรับจุดการทำงานที่เหมาะสม

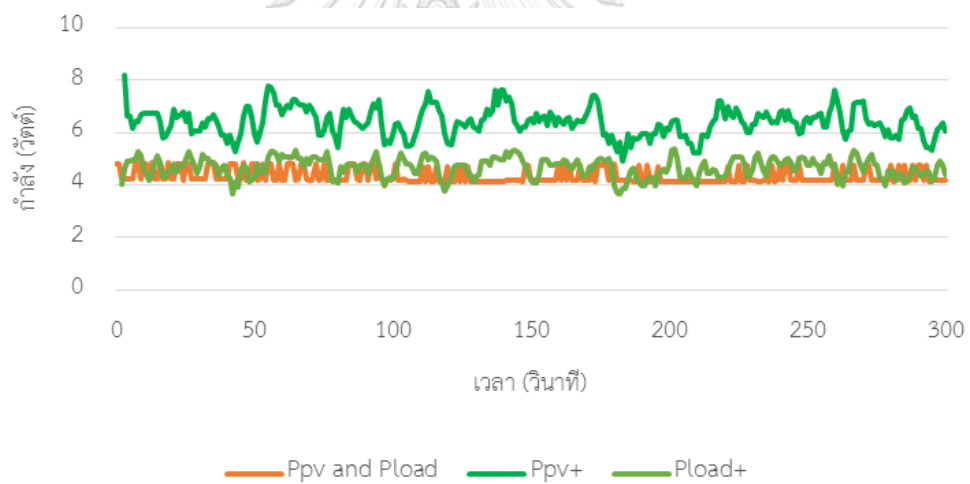
ความเข้มแสง	กำลัง P _{pv} (วัตต์)		กำลัง P _{load} (วัตต์)		กำลังสูญเสีย P _{loss} ที่เครื่องปรับจุดทำงาน (วัตต์)
	ไม่มีเครื่องปรับจุดทำงาน	มีเครื่องปรับจุดทำงาน	ไม่มีเครื่องปรับจุดทำงาน	มีเครื่องปรับจุดทำงาน	
100%	15.16	15.51	15.16	8.93	6.58
80%	11.71	12.12	11.71	7.75	4.37
50%	4.35	6.42	4.35	4.67	1.75
20%	0.75	3.02	0.75	1.69	1.33



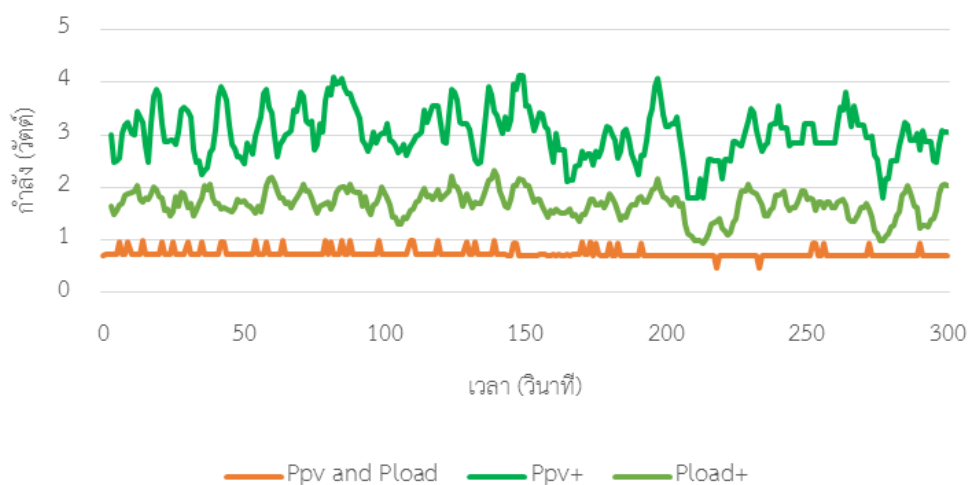
รูปที่ 4.23 กราฟการเปรียบเทียบผลการทดลองชุดต้นแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง ที่มีและไม่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสม ที่ความเข้มแสง 100%



รูปที่ 4.24 กราฟการเปรียบเทียบผลการทดลองชุดต้นแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง ที่มีและไม่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสม ที่ความเข้มแสง 80%



รูปที่ 4.25 กราฟการเปรียบเทียบผลการทดลองชุดต้นแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง ที่มีและไม่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสม ที่ความเข้มแสง 50%



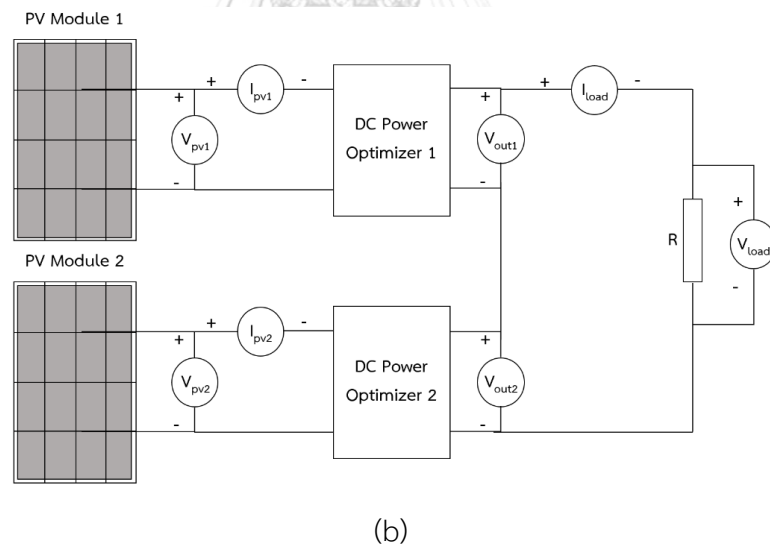
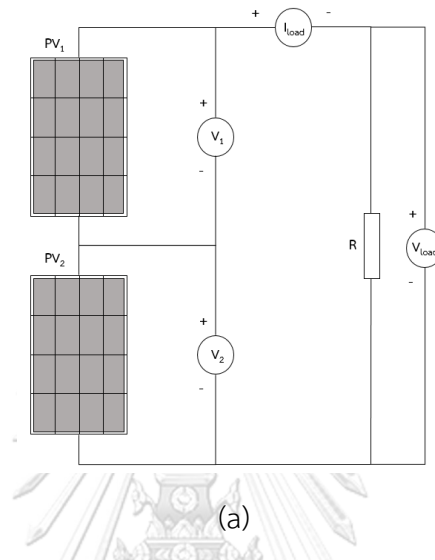
รูปที่ 4.26 กราฟการเปรียบเทียบผลการทดลองชุดต้นแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง ที่มีและไม่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสม ที่ความเข้มแสง 20%

เนื่องจากในการทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสม กำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ ค่ากำลัง P_{pv} จึงเท่ากับกำลัง P_{load} ดังนั้นจากตารางที่ 4.5 เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผงที่มีและไม่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมพบว่า ค่ากำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ในการทดลองแบบที่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมมีค่าสูงกว่าเสมอแม้ว่าความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง แต่สำหรับกำลังไฟฟ้าที่โหลด การทดลองแบบมีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าเมื่อความเข้มแสงอยู่ที่ 100% และ 80% และมีค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้าที่โหลดสูงกว่าเมื่อความเข้มแสงอยู่ที่ 50% และ 20% นอกจากนี้กำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นยังมีค่ามากที่สุดที่ความเข้มแสง 100% และกำลังสูญเสียที่เครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมมีค่าลดลงเมื่อความเข้มแสงที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับลดลง

จากรูปที่ 4.23 ถึง 4.26 ผลการทดลองแบบไม่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมมีการแกว่งของค่ากำลังไฟฟ้าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการทดลองแบบมีเครื่องปรับจุดทำงาน และกราฟกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มไปทางเดียวกับค่าเฉลี่ยที่ได้ในตาราง ฉะนั้นเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถช่วยให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นได้

4.3 การทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรม 2 แผง

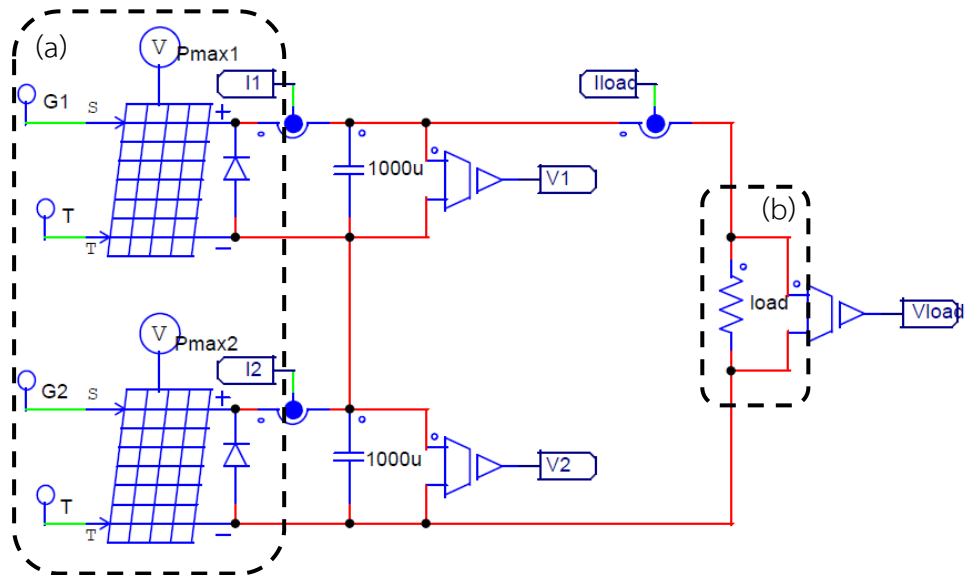
การทดลองต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 แผง แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ การต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรมกัน 2 แผงกับโหนดคงที่ และการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีเครื่องปรับจุดทำงานอนุกรมกัน 2 แผงกับโหนดคงที่ ดังรูปที่ 4.27(a) และ 4.27(b) ตามลำดับ



รูปที่ 4.27 แผนภาพวงจรการทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรม 2 แผง

4.3.1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรม 2 แผงกับโหลด

การทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรม 2 แผง และต่อโหลดคงที่ขนาด 35 โอห์ม ซึ่งลักษณะการทดลองสามารถจำลองจากโปรแกรม PSIM ได้ดังรูปที่ 4.28 และชุดต้นแบบสามารถแสดงดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.28 แบบจำลองการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 แผงกับโหลด



(a) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 แผง



(b) โหลดขนาด 35 โอห์ม

รูปที่ 4.29 ชุดต้นแบบการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 แผงกับโหลดขนาด 35 โอห์ม

การดำเนินการทดลองสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 แผงกับโหลด ดังต่อไปนี้

- 1.) ต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมกัน 2 แผง และต่อเข้ากับโหลด วัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และคำนวณกำลังไฟฟ้า ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 และ

โหลด โดยทั้งสองแผงไม่โดนบัง หรือให้ความเข้มแสงที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสอง (G_1 และ G_2) เท่ากับ 100% หรือ 900 W/m^2

- 2.) ทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผงโดนบัง หมายความว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 (G_1) จะได้รับความเข้มแสงคงที่ที่ 100% และความเข้มแสงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 (G_2) เปลี่ยนจาก 100% เป็น 80% 50% และ 20% ตามลำดับ วัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และคำนวณกำลังไฟฟ้า ดังเช่นข้อ 1)
- 3.) ทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 แผงโดนบัง หมายความว่า ความเข้มแสงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 และ 2 จะได้รับความเข้มแสงเท่ากันที่ 80% 50% และ 20% ตามลำดับ วัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และคำนวณกำลังไฟฟ้า ดังเช่นข้อ 1)

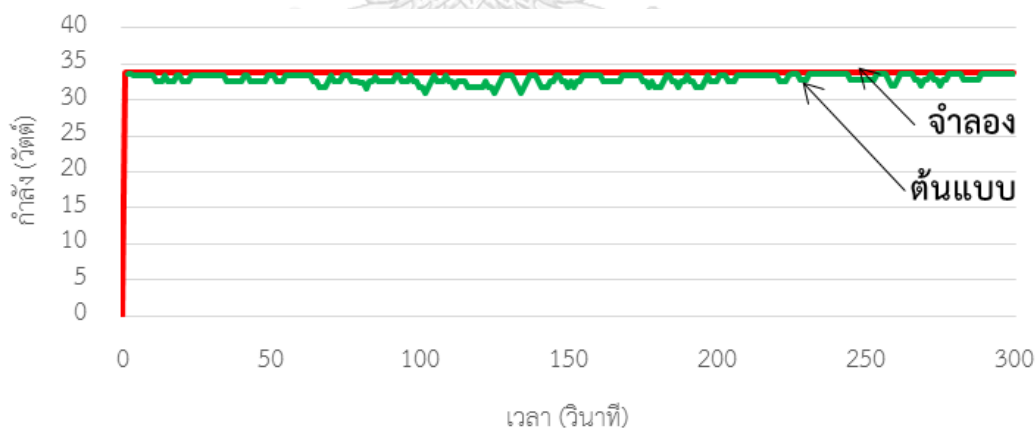
จากการทดลองดังกล่าวจะนำไปใช้กับทั้งการจำลองในโปรแกรมและชุดต้นแบบ ผลการวัดและคำนวณหาค่าเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสอง และโหลดจากการจำลองในโปรแกรมและชุดต้นแบบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.6 และ 4.7 และรูปที่ 4.30 ถึง 4.36 เป็นผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่โหลดสำหรับการทดลองจากโปรแกรมและชุดต้นแบบที่เงื่อนไขต่าง ๆ

ตารางที่ 4.6 ผลการจำลองจากโปรแกรมสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรม 2 แผงกับโหลดที่ความเข้มแสงต่าง ๆ

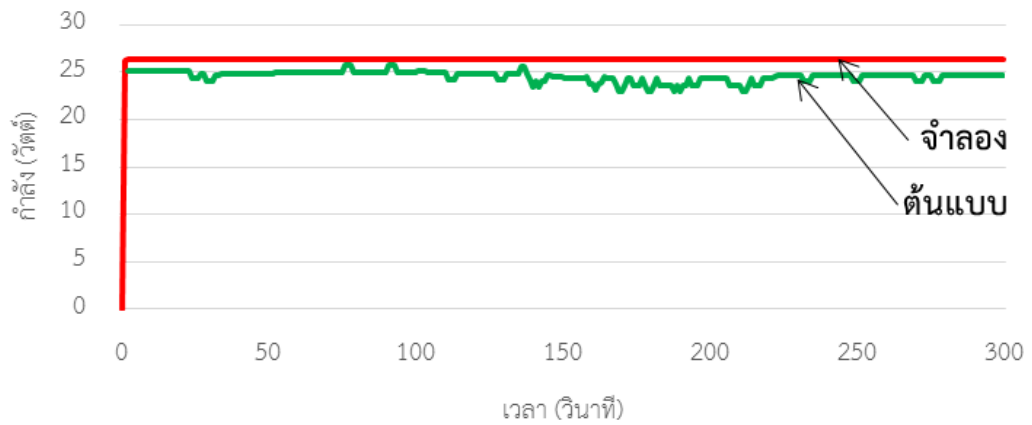
พารามิเตอร์	ทั้ง 2 แผง ไม่โดนบัง	ความเข้มแสง ที่ 1 แผงโดนบัง			ความเข้มแสง ที่ 2 แผงโดนบัง		
		80%	50%	20%	80%	50%	20%
แรงดัน V_1 (โวลต์)	17.16	18.10	19.26	19.26	14.91	9.51	3.86
แรงดัน V_2 (โวลต์)	17.16	12.17	0	0	14.91	9.51	3.86
กำลัง P_1 (วัตต์)	16.89	15.71	10.63	10.63	12.75	5.18	0.85
กำลัง P_2 (วัตต์)	16.89	10.56	0	0	12.75	5.18	0.85
แรงดัน V_{load} (โวลต์)	34.33	30.27	19.26	19.26	29.83	19.01	7.72
กระแส I_{load} (แอมแปร์)	0.98	0.86	0.55	0.55	0.85	0.54	0.22
กำลัง P_{load} (วัตต์)	33.78	26.27	10.63	10.63	25.50	10.36	1.71

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบจากชุดต้นแบบสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรม 2 แผงกับโหลดที่ความเข้มแสงต่าง ๆ

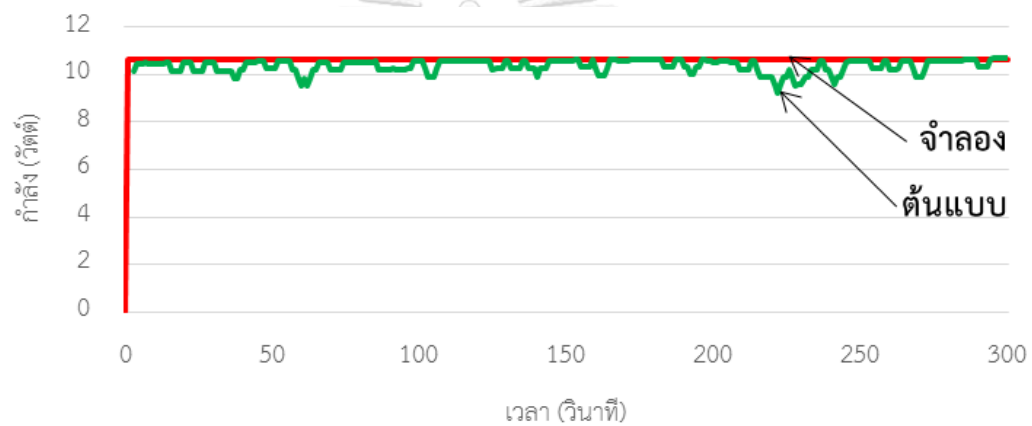
พารามิเตอร์	ทั้ง 2 แผง ไม่โดนบัง	ความเข้มแสง ที่ 1 แผงโดนบัง			ความเข้มแสง ที่ 2 แผงโดนบัง		
		80%	50%	20%	80%	50%	20%
แรงดัน V_1 (โวลต์)	16.07	17.18	17.64	17.35	14.77	12.91	4.20
แรงดัน V_2 (โวลต์)	16.21	10.66	0.2	0	12.19	4.17	2.57
กำลัง P_1 (วัตต์)	16.39	15.17	10.25	9.93	12.55	6.99	6.77
กำลัง P_2 (วัตต์)	16.53	9.41	0.11	0	10.36	2.27	0.93
แรงดัน V_{load} (โวลต์)	32.28	27.85	17.83	17.35	26.96	17.08	0.57
กระแส I_{load} (แอมแปร์)	1.02	0.88	0.58	0.57	0.85	0.54	0.22
กำลัง P_{load} (วัตต์)	32.92	24.58	10.36	9.93	22.91	9.26	1.50



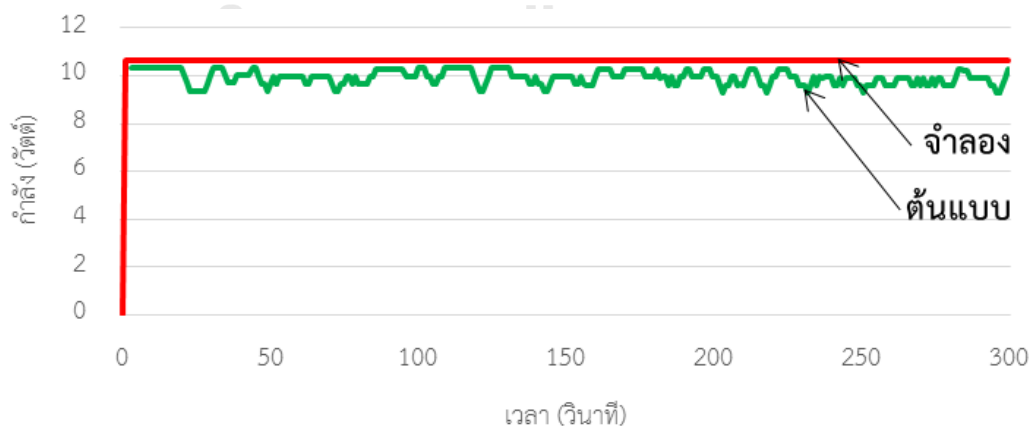
รูปที่ 4.30 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่โหลด เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสอง
ได้รับความเข้มแสง 100%



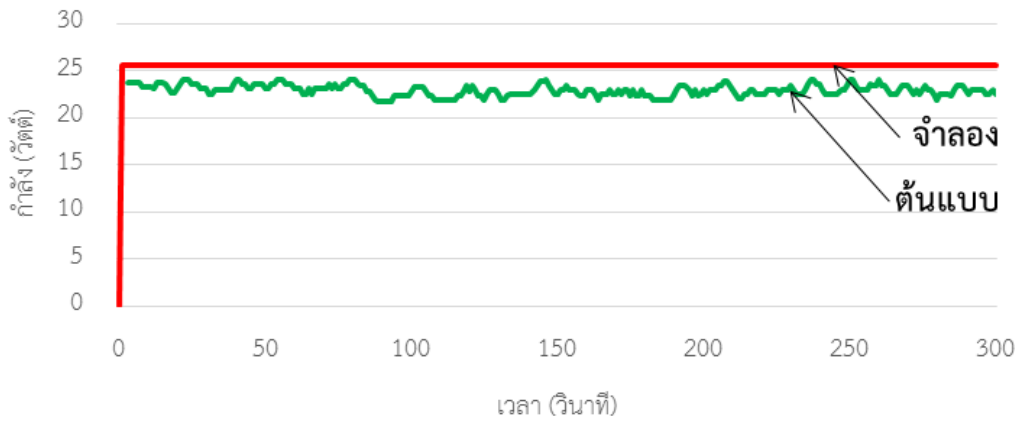
รูปที่ 4.31 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่โหลด เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 ได้รับความเข้มแสง 100% และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ได้รับความเข้มแสง 80%



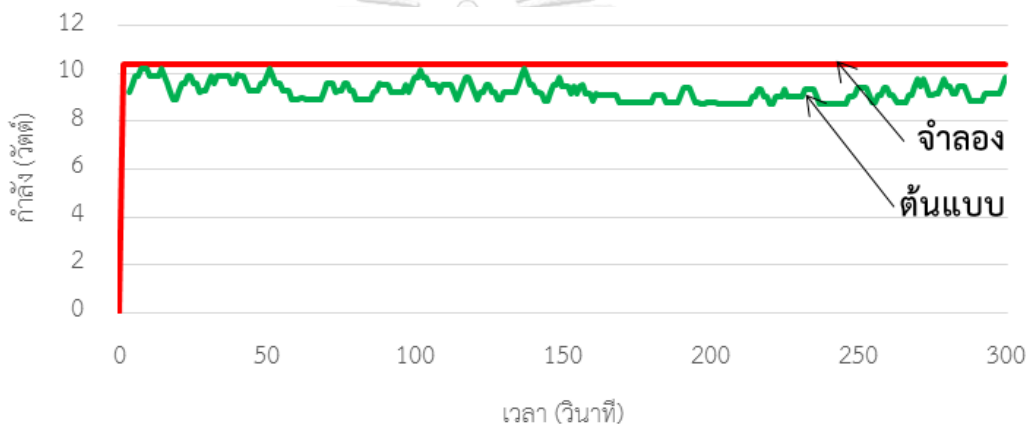
รูปที่ 4.32 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่โหลด เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 ได้รับความเข้มแสง 100% และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ได้รับความเข้มแสง 50%



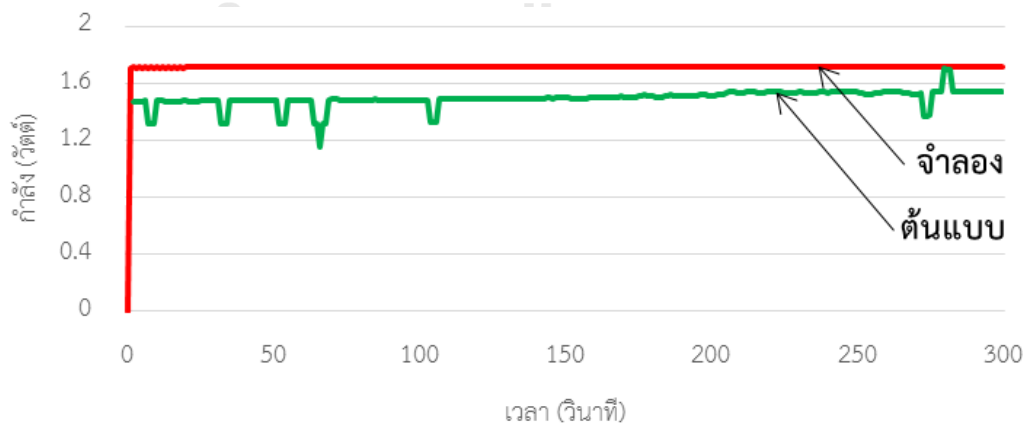
รูปที่ 4.33 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่โหลด เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 ได้รับความเข้มแสง 100% และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ได้รับความเข้มแสง 20%



รูปที่ 4.34 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่โหลด เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสอง
 ได้รับความเข้มแสง 80%



รูปที่ 4.35 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่โหลด เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสอง
 ได้รับความเข้มแสง 50%



รูปที่ 4.36 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่โหลด เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสอง
 ได้รับความเข้มแสง 20%

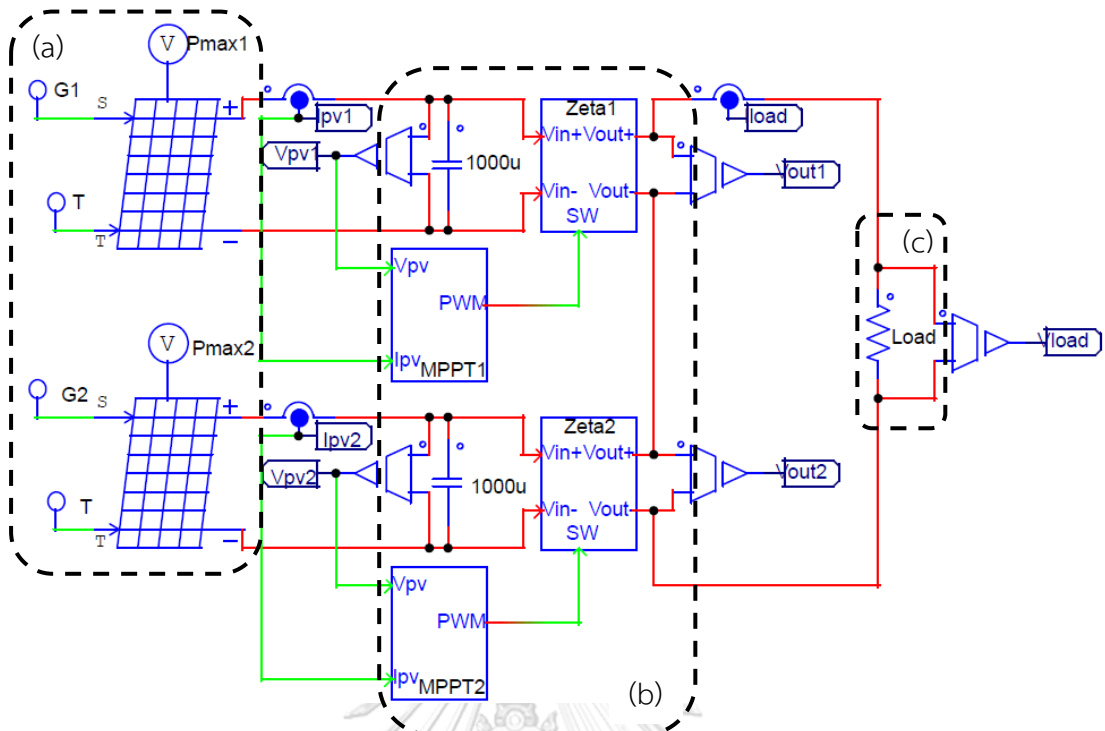
จากตารางที่ 4.6 ผลการทดลองในแบบจำลองแสดงให้เห็นว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองให้กำลังไฟฟ้าที่เท่ากัน เมื่อความเข้มแสงเท่ากัน และกำลังไฟฟ้าที่โหลดมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าของแผงที่ 1 และ 2 รวมกัน แต่สำหรับการทดลองที่ความเข้มแสงต่างกัน เซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผงให้กำลังไฟฟ้าไม่เท่ากัน และที่ความเข้มแสงต่างกันในระดับหนึ่ง ยกตัวอย่างเช่น แผงที่ 1 ได้รับความเข้มแสง 100% และแผงที่ 2 ได้รับความเข้มแสง 50% หรือ 20% โดยแผงที่ 2 ไม่ผลิตกำลังไฟฟ้าเลย กำลังไฟฟ้าที่โหลดจึงได้รับจากเซลล์แสงอาทิตย์แผงที่ 1 เพียงแหล่งเดียว

จากผลการทดลองกับชุดต้นแบบ ดังตารางที่ 4.7 เมื่อดูเฉพาะกำลังไฟฟ้าที่โหลด ผลของค่าเฉลี่ยกำลังไฟฟ้าที่คำนวณได้จะมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลอง แต่เมื่อพิจารณาดูกำลังไฟฟ้าที่แต่ละแผงผลิตได้จะเห็นว่าไม่เท่ากัน เนื่องจากการปัจจัยหลาย ๆ อย่างในการทดลองไม่สามารถควบคุมให้มีค่าคงที่เหมือนในโปรแกรมได้ และการทดลองที่ความเข้มแสงต่างกัน เช่น เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แผงที่ 1 และ 2 ได้รับความเข้มแสงที่ 100% และ 20% ตามลำดับ แผงเซลล์แสงอาทิตย์แผงที่ 2 ไม่ผลิตกำลังไฟฟ้า และโหลดได้รับกำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แผงที่ 1 เพียงแหล่งเดียว ซึ่งหมายความว่าผลการทดลองชุดต้นแบบยังคงมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับแบบจำลอง

จากรูปที่ 4.30 ถึง 4.36 ผลการวัดกำลังไฟฟ้าที่โหลดสำหรับแบบจำลองและชุดต้นแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่มีความแตกต่างกันที่ชุดต้นแบบมีการแกว่งของค่ากำลังไฟฟ้าเล็กน้อย และความคลาดเคลื่อนมากที่สุดของกำลังไฟฟ้าที่โหลดระหว่างแบบจำลองและชุดต้นแบบเท่ากับ 12% ซึ่งเป็นการทดลองที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองได้รับความเข้มแสง 20%

4.3.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีเครื่องปรับจูนทำงานอนุกรม 2 แผงกับโหลด

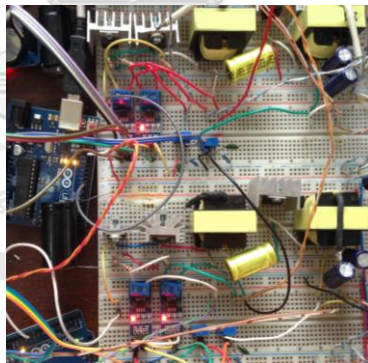
เป็นการทดลองโดยนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 แผง ซึ่งแต่ละแผงมีเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่ออยู่ นำมาอนุกรมกัน และต่อเข้ากับโหลดขนาด 35 โอห์มสามารถแสดงแบบจำลองจากโปรแกรมได้ดังรูปที่ 4.37 และลักษณะการทดลองนี้มีชุดต้นแบบดังรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.37 แบบจำลองการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีเครื่องปรับจูนทำงานอนุกรม 2 แผง กับโหลด



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.38 ชุดต้นแบบการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีเครื่องปรับจูนทำงานอนุกรม 2 แผง กับโหลด

การดำเนินการทดลองสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีเครื่องปรับจูนทำงานอนุกรมกัน 2 แผงกับโหลด แสดงดังต่อไปนี้

- 1.) วัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และคำนวณกำลังไฟฟ้า ที่เข้า-ออกจากเครื่องปรับจูนทำงาน 1 และ 2 และที่โหลด โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองไม่โดนบัง หรือความเข้มแสงที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสอง (G_1 และ G_2) เท่ากับ 100% หรือ 900 W/m^2
- 2.) ทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีเครื่องปรับจูนทำงาน 1 แผงโดนบัง หมายความว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 (G_1) จะได้รับความเข้มแสงคงที่ที่ 100% และความเข้มแสงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 (G_2) เปลี่ยนจาก 100% เป็น 80% 50% และ 20% ตามลำดับ วัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และคำนวณกำลังไฟฟ้า ดังเช่นข้อ 1)
- 3.) ทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีเครื่องปรับจูนทำงาน 2 แผงโดนบัง หมายความว่า ความเข้มแสงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 และ 2 จะได้รับความเข้มแสงเท่ากันที่ 80% 50% และ 20% ตามลำดับ วัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และคำนวณกำลังไฟฟ้า ดังเช่นข้อ 1)

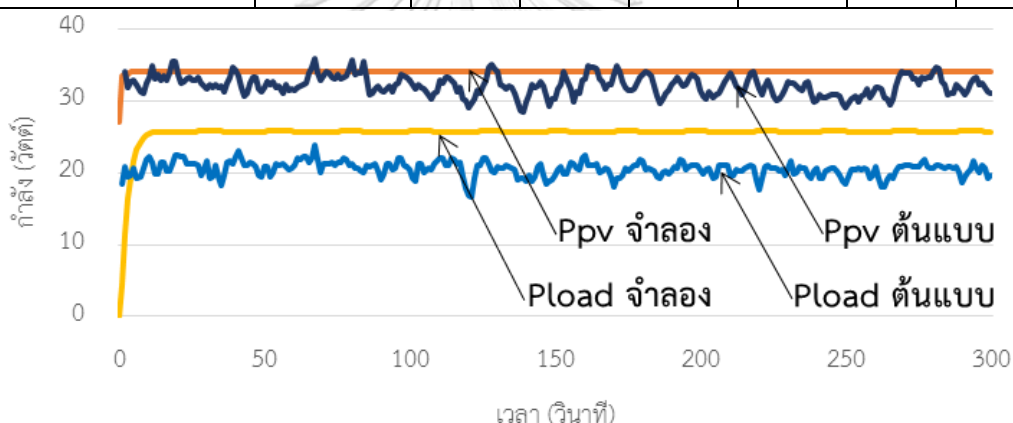
จากการทดลองดังกล่าวจะใช้กับทั้งการจำลองในโปรแกรมและชุดต้นแบบ ผลการวัดและคำนวณหาค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าที่เข้า-ออกจากเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสมและที่โหลด จากการจำลองในโปรแกรมและชุดต้นแบบสามารถแสดงผลการทดลองได้ดังตารางที่ 4.8 และ 4.9 และรูปที่ 4.39 ถึง 4.45 เป็นผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้ารวมที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองผลิตได้ และกำลังไฟฟ้าที่โหลดสำหรับการทดลองจากโปรแกรมและชุดต้นแบบที่เงื่อนไขต่าง ๆ

ตารางที่ 4.8 ผลการจำลองจากโปรแกรมสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีเครื่องปรับจูนทำงานอนุกรม 2 แผงกับโหลด ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ

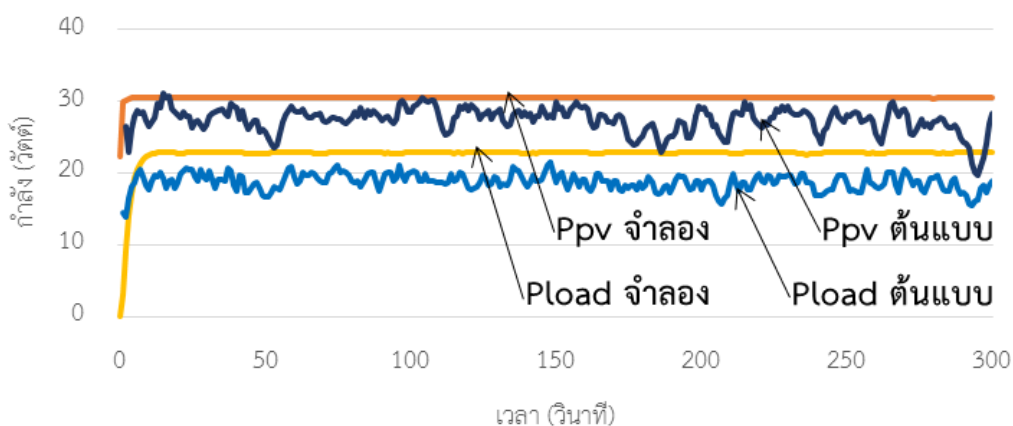
พารามิเตอร์	ทั้ง 2 แผง ไม่โดนบัง	ความเข้มแสง ที่ 1 แผงโดนบัง			ความเข้มแสง ที่ 2 แผงโดนบัง		
		80%	50%	20%	80%	50%	20%
กำลังเข้า P_{pv1} (วัตต์)	17.01	17.01	16.98	17.00	13.47	8.21	3.13
กำลังเข้า P_{pv2} (วัตต์)	17.01	13.45	8.21	3.12	13.47	8.21	3.13
กำลังออก P_{out1} (วัตต์)	12.71	12.84	13.04	13.20	9.97	5.89	1.94
กำลังออก P_{out2} (วัตต์)	12.71	9.80	5.49	1.16	9.97	5.89	1.94
กำลัง P_{load} (วัตต์)	25.41	22.63	18.54	14.35	19.95	11.79	3.89
ประสิทธิภาพ (%)	74.64	74.23	73.50	71.21	73.95	71.57	61.17

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบจากชุดต้นแบบสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีเครื่องปรับจุดทำงานอนุกรม 2 แผงกับโหลด ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ

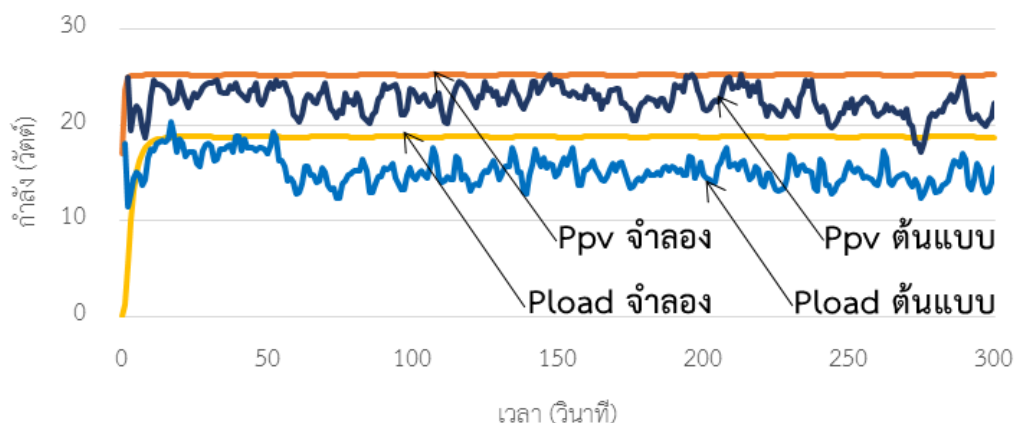
พารามิเตอร์	ทั้ง 2 แผง ไม่โดนบัง	ความเข้มแสง ที่ 1 แผงโดนบัง			ความเข้มแสง ที่ 2 แผงโดนบัง		
		80%	50%	20%	80%	50%	20%
กำลังเข้า P_{pv1} (วัตต์)	16.03	15.54	15.60	14.97	11.76	7.58	2.98
กำลังเข้า P_{pv2} (วัตต์)	16.19	11.93	7.05	2.21	11.81	7.61	2.84
กำลังออก P_{out1} (วัตต์)	9.97	10.14	10.17	9.77	7.57	5.20	1.93
กำลังออก P_{out2} (วัตต์)	10.55	8.63	5.11	1.20	7.92	5.33	1.93
กำลัง P_{load} (วัตต์)	20.52	18.80	15.30	10.96	15.50	10.53	3.86
ประสิทธิภาพ (%)	63.82	68.73	67.76	64.18	66.02	69.71	67.85



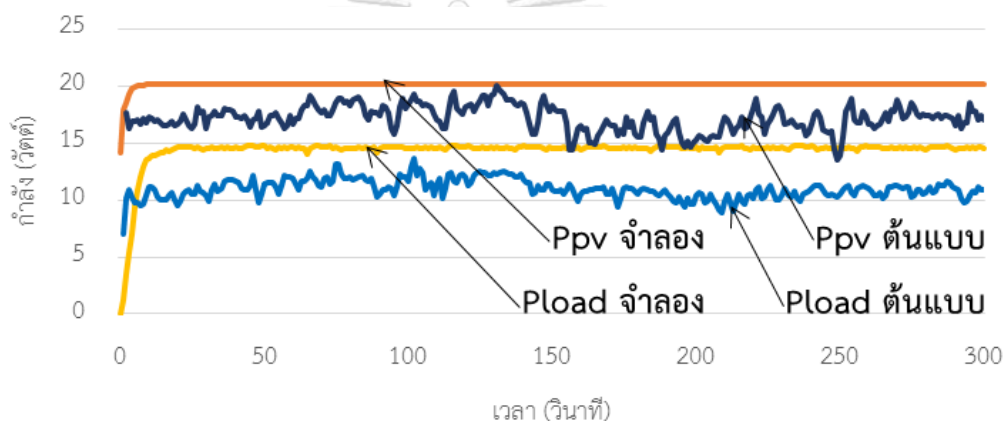
รูปที่ 4.39 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์รวม 2 แผงและโหลด เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองได้รับความเข้มแสง 100%



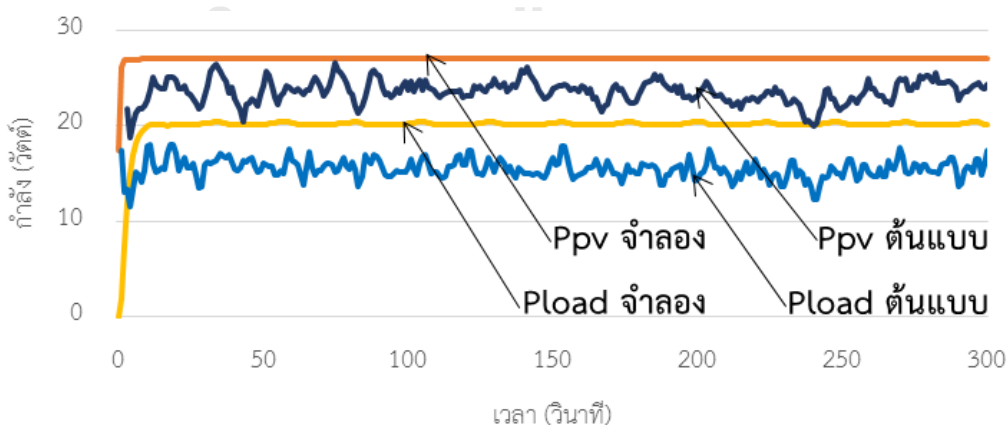
รูปที่ 4.40 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์รวม 2 แผงและโหลด เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 ได้รับความเข้มแสง 100% และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ได้รับความเข้มแสง 80%



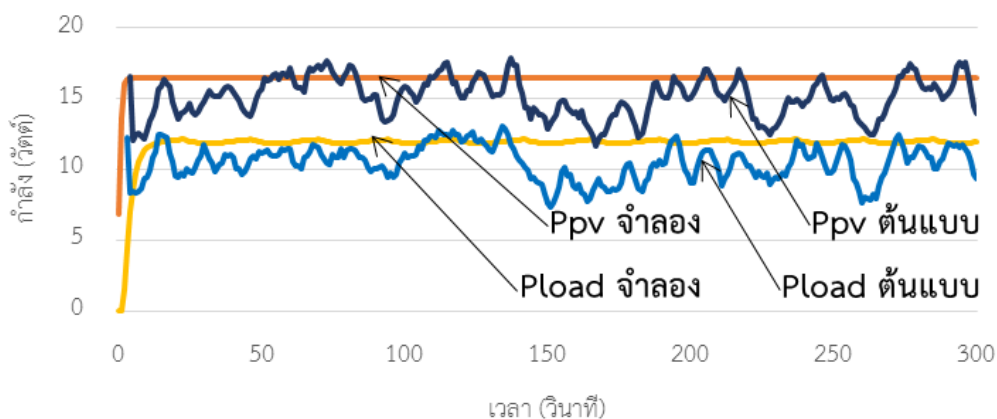
รูปที่ 4.41 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์รวม 2 แผงและโหลด เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 ได้รับความเข้มแสง 100% และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ได้รับความเข้มแสง 50%



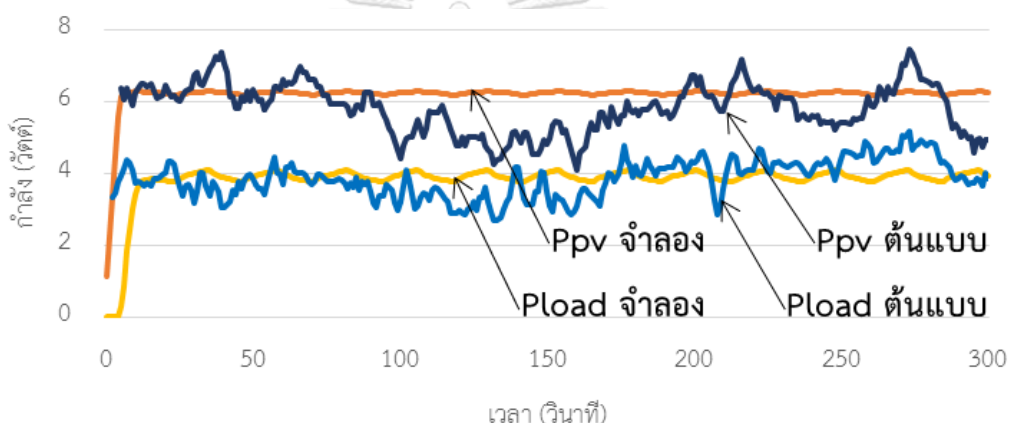
รูปที่ 4.42 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์รวม 2 แผงและโหลด เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 ได้รับความเข้มแสง 100% และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ได้รับความเข้มแสง 20%



รูปที่ 4.43 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์รวม 2 แผงและโหลด เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองได้รับความเข้มแสง 80%



รูปที่ 4.44 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์รวม 2 แผงและโหลด
เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองได้รับความเข้มแสง 50%



รูปที่ 4.45 ผลการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์รวม 2 แผงและโหลด
เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองได้รับความเข้มแสง 20%

CHULALONGKORN UNIVERSITY

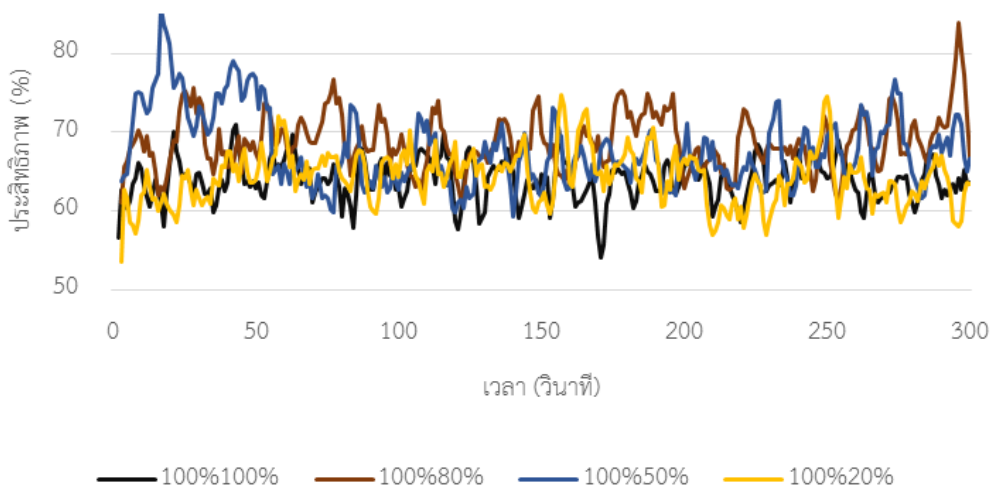
ค่าประสิทธิภาพ (η_{sys}) ของการทดลองนี้สามารถหาได้จากกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์
ทั้งสองรวมกันและกำลังไฟฟ้าที่โหลดดังสมการที่ (4.2)

$$\eta_{sys} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{P_{load}}{P_{pv1} + P_{pv2}} \times 100\% \quad (4.2)$$

จากตารางที่ 4.8 และ 4.9 ค่ากำลังไฟฟ้าต่าง ๆ ของการทดลองชุดต้นแบบ มีค่าใกล้เคียงกับ
การทดลองจากแบบจำลอง นอกจากนี้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองยังสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลด
ได้แม้ได้รับความเข้มแสงที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของการทดลอง แบบจำลอง
จะมีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 74.69% ที่การทดลองแบบสองแผงได้รับความเข้มแสงเท่ากัน
ที่ 100% และมีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 62.14% ที่การทดลองแบบสองแผงได้รับความเข้ม

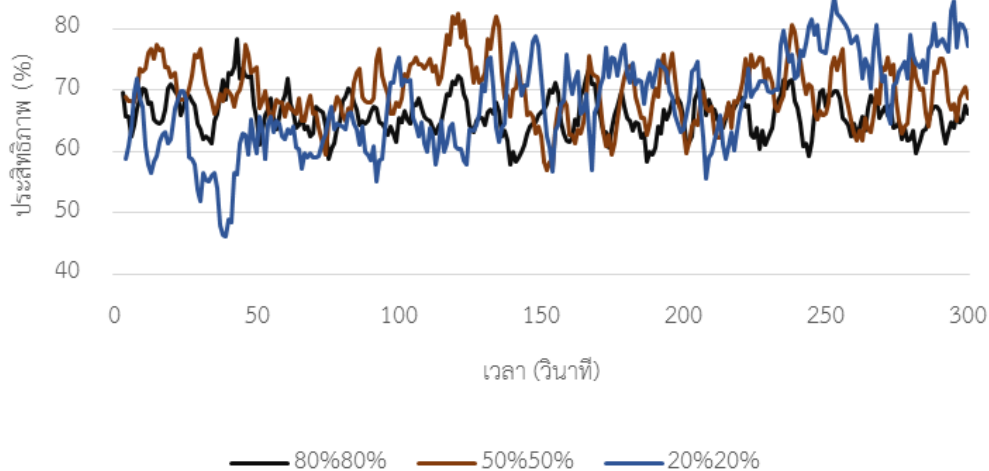
แสงเท่ากันที่ 20% สำหรับชุดต้นแบบมีประสิทธิภาพเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 69.32% ที่การทดลองแบบสองแผงได้รับความเข้มแสงเท่ากันที่ 50% และมีประสิทธิภาพเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 63.69% ที่การทดลองแบบสองแผงได้รับความเข้มแสงเท่ากันที่ 100% รูปที่ 4.46(a) และ 4.46(b) แสดงค่าประสิทธิภาพระบบของชุดต้นแบบเมื่อได้รับความเข้มแสงต่างกัน โดย X%Y% หมายถึง แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 ได้รับความเข้มแสง X% และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ได้รับความเข้มแสง Y% จากรูปดังกล่าวแสดง ค่าประสิทธิภาพระบบของชุดต้นแบบมีค่าไม่คงที่ หรือมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา แสดงว่าการทดลองชุดต้นแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมอนุกรมกัน 2 แผง มีความไม่แน่นอนในการทำงาน และกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าไม่คงที่

จากรูปที่ 4.39 ถึง 4.45 ผลการทดลองระหว่างแบบจำลองและชุดต้นแบบสามารถทำงานได้ใกล้เคียงกัน เพียงแต่ผลของชุดต้นแบบจะมีการแกว่งของค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้มากกว่าแบบจำลอง แต่อย่างไรก็ตามค่ากำลังไฟฟ้านี้ยังแกว่งอยู่ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าค่าหนึ่งซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมในการทดลองที่ความเข้มแสงน้อย หรือรูปที่ 4.44 และ 4.45 มีการแกว่งของกำลังไฟฟ้าค่อนข้างมาก นอกจากนี้ยังมีช่วงที่ค่ากำลังไฟฟ้าตกลงและค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป แต่ยังคงสามารถแกว่งอยู่ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมได้



(a)

รูปที่ 4.46 กราฟประสิทธิภาพของระบบที่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของชุดต้นแบบที่ความเข้มแสงต่าง ๆ

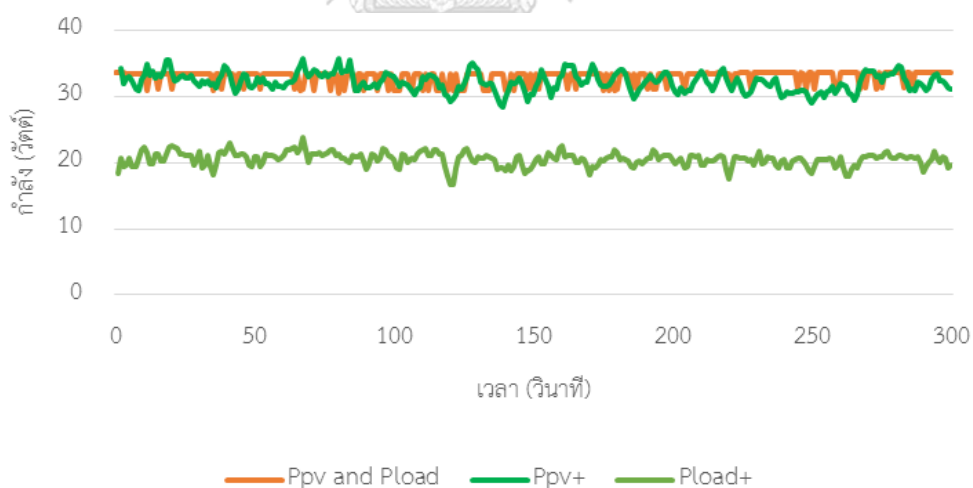


รูปที่ 4.46 กราฟประสิทธิภาพของระบบที่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของชุดต้นแบบ
ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ (ต่อ)

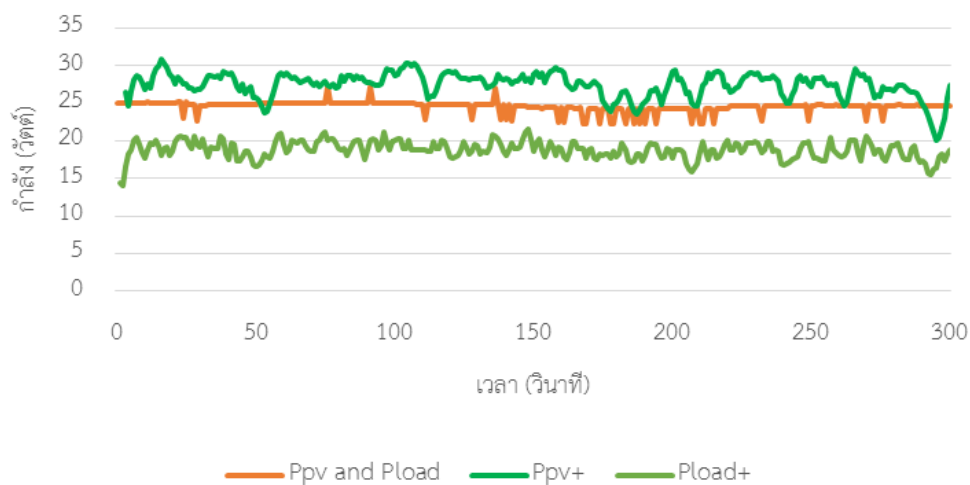
จากการทดลองชุดต้นแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรม 2 แผง ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ แบบมี และไม่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถแสดงผล การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้ารวมที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองผลิตได้ กำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับ และ กำลังสูญเสียที่เครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.47 ถึง 4.53 เมื่อ Ppv and Pload คือ กำลังรวมที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองผลิตได้และที่โหลดของการทดลองแผง เซลล์แสงอาทิตย์อนุกรม 2 แผงที่ไม่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสม Ppv+ และ Pload+ คือ กำลัง รวมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองที่ผลิตได้ และกำลังที่โหลดของการทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อนุกรม 2 แผงที่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสม ตามลำดับ

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบผลการทดลองชุดต้นแบบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 แผง ที่มีและไม่มีเครื่องปรับจุดการทำงานที่เหมาะสม

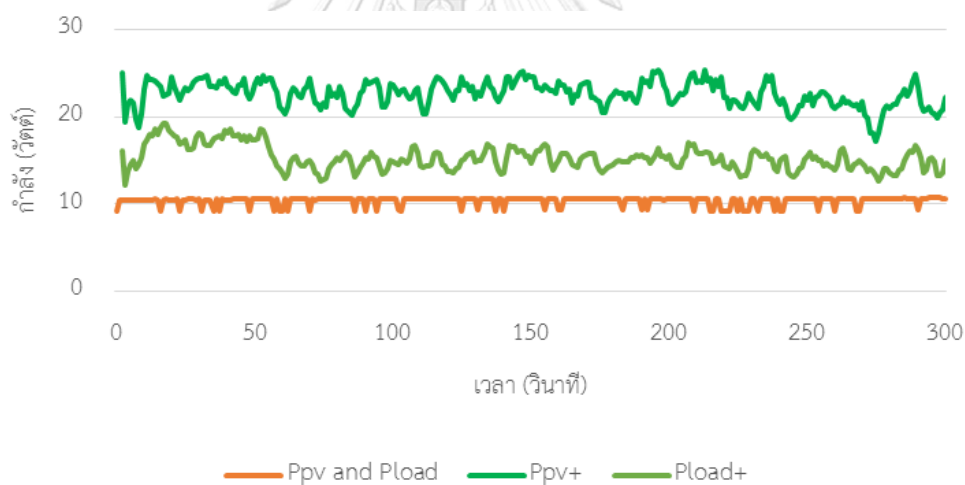
ความเข้มแสง (%)		กำลัง P_{PV} รวม 2 แผง (วัตต์)		กำลัง P_{Load} (วัตต์)		กำลังสูญเสีย P_{loss} ที่เครื่องปรับจุดทำงาน (วัตต์)
#1	#2	ไม่มีเครื่องปรับจุดทำงาน	มีเครื่องปรับจุดทำงาน	ไม่มีเครื่องปรับจุดทำงาน	มีเครื่องปรับจุดทำงาน	
100	100	32.92	32.22	32.92	20.52	11.70
100	80	24.58	27.47	24.58	18.80	8.67
100	50	10.36	22.65	10.36	15.30	7.35
100	20	9.93	17.18	9.93	10.96	6.22
80	80	22.91	23.57	22.91	15.50	8.07
50	50	9.26	15.19	9.26	10.53	4.66
20	20	1.50	5.82	1.50	3.86	1.96



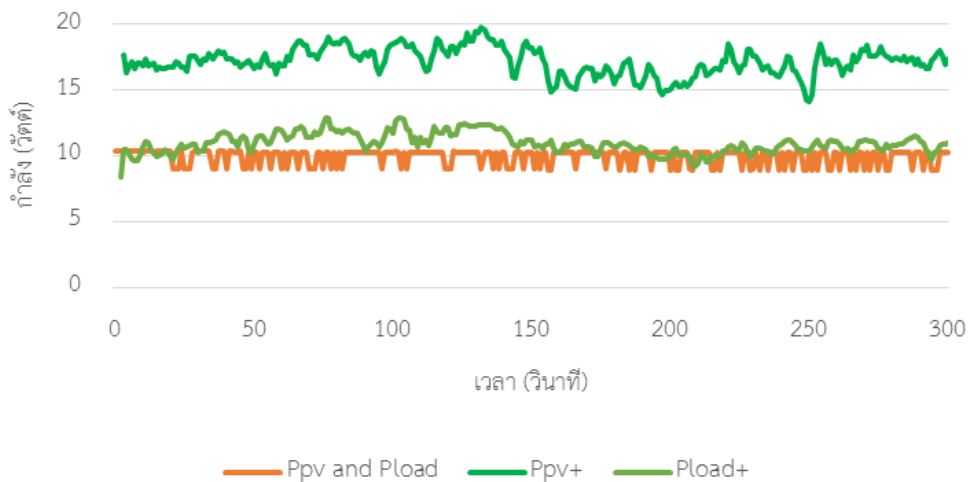
รูปที่ 4.47 กราฟการเปรียบเทียบผลการทดลองชุดต้นแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรม 2 แผง ที่มีและไม่มีเครื่องปรับจุดการทำงานที่เหมาะสม เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองได้รับความเข้มแสง 100%



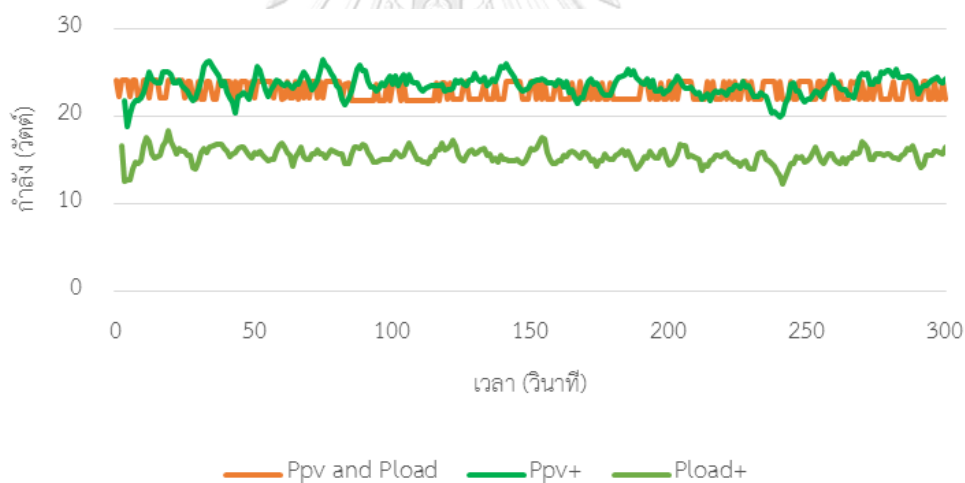
รูปที่ 4.48 กราฟการเปรียบเทียบผลการทดลองชุดต้นแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรม 2 แผง ที่มีและไม่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสม เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 ได้รับความเข้มแสง 100% และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ได้รับความเข้มแสง 80%



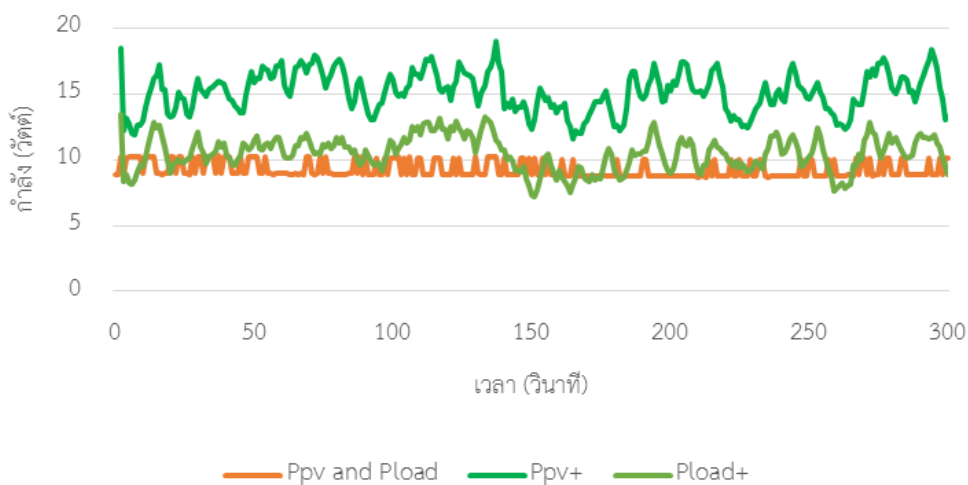
รูปที่ 4.49 กราฟการเปรียบเทียบผลการทดลองชุดต้นแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรม 2 แผง ที่มีและไม่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสม เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 ได้รับความเข้มแสง 100% และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ได้รับความเข้มแสง 50%



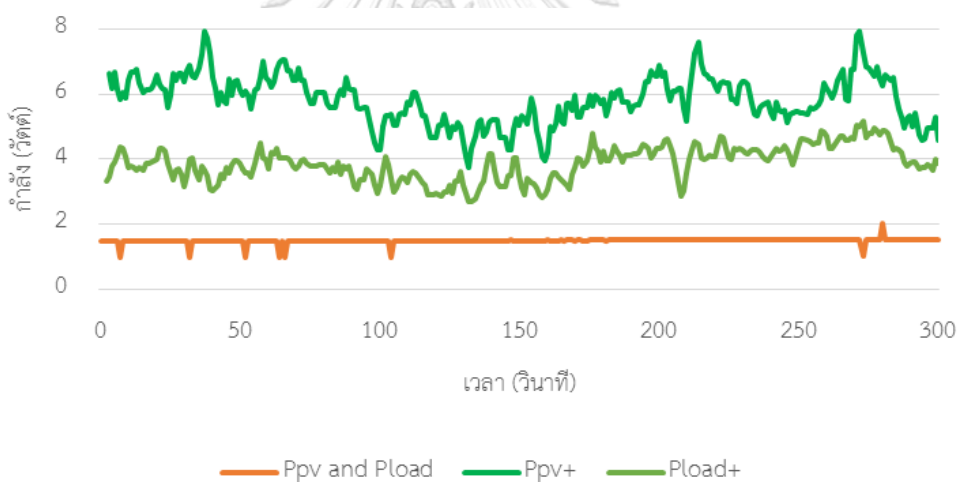
รูปที่ 4.50 กราฟการเปรียบเทียบผลการทดลองชุดต้นแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรม 2 แผง ที่มีและไม่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสม เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 ได้รับความเข้มแสง 100% และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ได้รับความเข้มแสง 20%



รูปที่ 4.51 กราฟการเปรียบเทียบผลการทดลองชุดต้นแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรม 2 แผง ที่มีและไม่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสม เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองได้รับความเข้มแสง 80%



รูปที่ 4.52 กราฟการเปรียบเทียบผลการทดลองชุดต้นแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรม 2 แผง ที่มี และไม่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสม เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองได้รับความเข้มแสง 50%



รูปที่ 4.53 กราฟการเปรียบเทียบผลการทดลองชุดต้นแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรม 2 แผง ที่มี และไม่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสม เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองได้รับความเข้มแสง 20%

จากตารางที่ 4.10 การทดลองแบบมีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมมีกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองมากกว่าการทดลองแบบไม่มีเครื่องปรับจุดทำงานในช่วงที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีความเข้มแสงลดลง หรือถูกบังจากแสงแดด เมื่อพิจารณากำลังไฟฟ้าที่โหลดผลการทดลองแบบมีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมจะมีกำลังไฟฟ้าที่โหลดมากกว่าการทดลองแบบไม่มีเครื่องปรับจุดทำงานใน 4 กรณี คือ 1) เมื่อแผงที่ 1 และ 2 ได้รับความเข้มแสง 100% และ 50% ตามลำดับ 2) เมื่อแผงที่ 1 และ 2 ได้รับความเข้มแสง 100% และ 20% ตามลำดับ 3) เมื่อแผง

เซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองรับความเข้มแสงเท่ากันที่ 50% และ 4) เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองรับความเข้มแสงเท่ากันที่ 20% และเมื่อพิจารณากำลังสูญเสียที่เครื่องปรับจูนทำงานทั้งสองตัว การทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้รับความเข้มแสงสูงเกิดกำลังสูญเสียมากกว่าการทดลองที่ความเข้มแสงน้อยกว่า

จากรูปที่ 4.47 ถึง 4.53 การทดลองแบบไม่มีเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสมมีการแกว่งของค่ากำลังไฟฟ้าน้อยกว่า และค่อนข้างคงที่ ต่างจากการทดลองแบบมีเครื่องปรับจูนทำงานที่มีการแกว่งของค่ากำลังไฟฟ้ามากกว่าและมากขึ้นเมื่อความเข้มแสงลดลง เป็นผลจากความคลาดเคลื่อนในการวัดของวงจรวัดกระแส ส่งผลให้ค่ากำลังที่คำนวณจากแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามักจะไม่คงที่ จากการเปรียบเทียบดังกล่าวพบว่าเมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความเข้มแสงเท่ากันที่ 100% และ 80% แผงเซลล์แสงอาทิตย์จากทั้งสองการทดลองผลิตกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงกัน แต่กำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับจากการทดลองแบบไม่มีเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสมได้ค่าที่สูงกว่า เมื่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความเข้มแสงทั้ง 4 กรณี ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น จะเห็นได้ชัดว่ากำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้และกำลังไฟฟ้าที่โหลดของการทดลองแบบมีเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสมนั้นมีค่ามากกว่าการทดลองแบบไม่มีเครื่องปรับจูนทำงานอย่างชัดเจน

จากการทดลองและผลการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมดกล่าวได้ว่า ผลการทดลองระหว่างชุดต้นแบบและแบบจำลอง สามารถให้ผลการทดลองไปในแนวทางเดียวกัน เพียงแต่เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองกับชุดต้นแบบไม่สามารถควบคุมให้คงที่ได้มากนัก ฉะนั้นค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่วัดได้จากชุดต้นแบบอาจมีการคลาดเคลื่อนได้ เมื่อพิจารณาผลของการทดลองขณะความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อโหลดมีค่าคงที่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด ณ ความเข้มแสงขณะนั้น เมื่อนำเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีผลทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตไฟฟ้าออกมาได้สูงสุด เพียงแต่โหลดไม่ได้รับกำลังสูงสุด เนื่องจากความสูญเสียที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปรับจูนทำงาน

สำหรับประสิทธิภาพโดยรวมของระบบผลิตไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากการทดลองแบบ 1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นค่าประสิทธิภาพของเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสม ส่วนกรณีการทดลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรม 2 แผง เป็นผลของเครื่องปรับจูนทำงานที่เหมาะสมทั้ง 2 ตัว ประสิทธิภาพของแบบจำลองมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อไม่มีการบังแสงแดด และการทดลองแบบ 2 แผงมีค่ามากกว่า จากผลการทดลองของชุดต้นแบบได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่การบังแสงแดด 50% ของความเข้มแสง ค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยที่คำนวณได้มีทั้งมากกว่าและน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบ

ระหว่างการทดลองแบบ 1 แฉง และ 2 แฉง ทำให้ชุดต้นแบบไม่อาจระบุประสิทธิภาพที่แน่นอนได้
เนื่องจากค่าต่าง ๆ ที่วัดได้มีค่าไม่คงที่ ผลการทดลองทั้งหมดดังตารางที่ 4.11



ตารางที่ 4.11 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยจากผลการทดลองทั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 และ 2 แผง

การทดลอง	ความเข้มแสง (%)					ไม่มีเครื่องปรับจุดทำงาน				มีเครื่องปรับจุดทำงาน						
	แผงที่ 1		แผงที่ 2			กำลัง P _{pv} และ P _{load} (วัตต์)				กำลัง P _{pv} (วัตต์)		กำลัง P _{load} (วัตต์)		η _(sys) (%)		
	100	80	50	20	100	80	50	20	จำลอง	ต้นแบบ	จำลอง	ต้นแบบ	จำลอง	ต้นแบบ	จำลอง	ต้นแบบ
แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง	√	-	-	-	-	-	-	-	16.96	15.16	17.01	15.62	12.71	8.99	74.67	58.36
	-	√	-	-	-	-	-	-	12.50	11.71	13.47	11.98	9.98	7.66	73.98	64.96
	-	-	√	-	-	-	-	-	5.04	4.35	8.21	6.54	5.89	4.72	71.54	73.74
	-	-	-	√	-	-	-	-	0.83	0.75	3.10	3.18	1.90	1.79	60.93	58.57
แผงเซลล์แสงอาทิตย์อนุกรม 2 แผง	√	-	-	-	√	-	-	-	33.78	32.92	34.02	32.22	25.41	20.52	74.64	63.82
	√	-	-	-	-	√	-	-	26.27	24.58	30.46	27.47	22.63	18.80	74.23	68.73
	√	-	-	-	-	-	√	-	10.63	10.36	25.19	22.65	18.54	15.30	73.50	67.76
	√	-	-	-	-	-	-	√	10.63	9.93	20.12	17.18	14.35	10.96	71.21	64.18
-	√	-	-	-	√	-	-	25.50	22.91	26.94	23.57	19.95	15.50	73.95	66.02	
-	-	√	-	-	-	√	-	10.36	9.26	16.42	15.19	11.79	10.53	71.51	69.71	
-	-	-	√	-	-	-	√	1.71	1.50	6.26	5.82	3.89	3.86	61.17	67.85	

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการสรุปผลการทดลองทั้งหมดที่นำเสนอในบทที่ 4 และส่วนที่สองเป็นการแนะนำข้อเสนอแนะที่ควรแก้ไข หรือพิจารณาเพิ่มเติมนอกเหนือจากที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

(1) แบบจำลองที่ใช้ในโปรแกรม PSIM สามารถใช้เป็นตัวคาดคะเนแนวโน้มในการทำงานของระบบ และผลที่เกิดขึ้นในการทดลองกับชุดต้นแบบได้ แต่เนื่องจากเงื่อนไขในการทดลองของชุดต้นแบบควบคุมได้ยาก รวมทั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น มอสเฟต ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ ตัวต้านทาน กระทั่งตัววัดกระแส และอื่น ๆ มีความไม่เป็นอุดมคติ ชุดต้นแบบที่นำมาใช้จริงเกิดความคลาดเคลื่อนจากที่ได้จำลองในโปรแกรม

(2) การใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ในการให้พลังงานกับโหลดคงที่โดยตรง มีผลทำให้ระบบผลิตไฟฟ้านั้นไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างเต็มที่ทุกค่าความเข้มแสง สิ่งที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้น คือ เครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยการทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละแผงสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดที่ความเข้มแสง ณ ขณะนั้น

(3) เครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมที่สร้างขึ้นประกอบด้วยซีต้าคอนเวอร์เตอร์ และกระบวนการหาจุดกำลังสูงสุดแบบโมดิฟายอะแดปทีฟการรบกวนและการสังเกต สามารถนำมาใช้งานได้จริง แต่เนื่องจากระบบการทำงานในวงจรของตัวซีต้าคอนเวอร์เตอร์ ทำให้เกิดการสูญเสียไปในรูปของความร้อน ประสิทธิภาพของเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมจึงอยู่ที่ประมาณ 70% สำหรับแบบจำลอง และ 60% สำหรับชุดต้นแบบ

(4) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมสามารถช่วยให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าที่กำลังสูงสุดได้ แต่เนื่องจากความสูญเสียที่เกิดในตัวเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสม ทำให้โหลดที่ต่ออยู่ไม่ได้รับกำลังไฟฟ้าทั้งหมด และสิ่งที่เกิดขึ้นคือ ที่ความเข้มแสงสูงได้แก่ 900 W/m^2 และ 720 W/m^2 การไม่มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมสามารถทำให้โหลดได้กำลังไฟฟ้าที่สูงกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามที่

ความเข้มแสงต่ำลง คือ 450 W/m^2 และ 180 W/m^2 การติดตั้งเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้โหลดได้รับกำลังไฟฟ้าที่สูงกว่า

(5) เมื่อเปรียบเทียบเฉพาะการทดลองแบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสม สำหรับแบบจำลองระบบมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 74% เมื่อไม่มีการถูกบังจากแสงแดด หรือที่ความเข้มแสง 900 W/m^2 และมีประสิทธิภาพต่ำสุดประมาณ 60% ที่ความเข้มแสง 180 W/m^2 ต่างจากชุดต้นแบบซึ่งจะมีประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 70% ที่ความเข้มแสงเท่ากับ 450 W/m^2 และมีประสิทธิภาพต่ำสุดใกล้เคียงกับแบบจำลองที่ความเข้มแสง 900 W/m^2

5.2 ข้อเสนอแนะ

(1) วงจรซีต้าคอนเวอร์เตอร์ มีความสูญเสียพลังงานไปในรูปแบบความร้อนและอื่น ๆ ค่อนข้างสูง อีกทั้งตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ต้องมีการรับและถ่ายเทพลังงานที่สัมพันธ์กัน มิเช่นนั้นพลังงานที่ได้รับจากแหล่งจ่ายจะไม่สามารถถ่ายเทไปยังโหลดได้ทั้งหมด เนื่องจากพลังงานถูกหักล้างกันเองภายในวงจร

(2) วงจรที่ใช้วัตต์กระแสไฟฟ้า ค่อนข้างมีความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวน ทำให้การวัดกระแสในวงจรอาจเกิดการคลาดเคลื่อน ฉะนั้นควรมีวงจรที่ช่วยในการกรองสัญญาณรบกวน เพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดของสัญญาณการวัด นอกจากนี้การเขียนโปรแกรมที่ใช้ในการแปลงค่าที่วัดได้จากวงจรวัดกระแสยังมีส่วนที่สามารถทำให้เกิดค่าความผิดพลาดได้ โดยการเปลี่ยนแปลงของค่าการวัดเพียง 1 หน่วย อาจทำให้ค่าจริงที่แปลงออกมาเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้สูงสุดประมาณ 0.1 แอมแปร์ ซึ่งส่งผลอย่างมากต่อการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้า และทำให้เกิดการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าขึ้น จากเหตุผลดังกล่าวจึงอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การทำงานของกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุดทำงานได้ไม่ดีนัก

(3) จากการเขียนโปรแกรมคำสั่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงค่าต่าง ๆ ที่วัดได้บนหน้าจอดีวีดี ทำให้กระบวนการทำงานสำหรับการติดตามจุดกำลังสูงสุดไม่สามารถทำงานให้เร็วตามที่ต้องการได้ ฉะนั้นเพื่อการทำงานของคำสั่งควบคุมที่รวดเร็วขึ้น ควรมีชุดอ่านและเก็บข้อมูลไว้ในการ์ดหน่วยความจำในขณะทดลองแทนการแสดงบนหน้าจอดีวีดี

(4) การใช้เครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมเพื่อช่วยให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายพลังงานออกมาได้มากที่สุด ณ ขณะนั้น ควรมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมให้มากขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์ หรือปรับปรุงระบบการควบคุมให้ดีขึ้น เพื่อให้เครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมสามารถทำงานได้ดีทุกค่าความเข้มแสง หมายความว่า

พลังงานที่โหลดได้รับ ควรมีค่าใกล้เคียงกับพลังงานที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้มากที่สุดทุก ๆ ความเข้มแสง

(5) เครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะใช้ค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่ได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาเป็นตัวแปรในการควบคุมกระบวนการติดตามจุดกำลังสูงสุด ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้โหลดมีค่าไม่คงที่ตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสง ฉะนั้นควรมีการเพิ่มการควบคุมแบบระบบปิด หรือระบบป้อนกลับ (Feedback Control) เพื่อควบคุมให้แรงดันที่ออกมามีค่าคงที่ และง่ายต่อการนำไปใช้กับโหลดอื่น ๆ

(6) การทดลองโดยใช้โหลดที่มีแต่ค่าความต้านทาน (Resistive load) อาจได้ผลการทดลองที่ไม่ครอบคลุมสำหรับโหลดอื่น ที่เป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน อย่างเช่น แบตเตอรี่ หรือ อินเวอร์เตอร์ ฉะนั้นจึงควรมีการทดลองใช้เครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับโหลดที่หลากหลายมากขึ้น เพื่อสามารถคาดเดาผลที่เกิดขึ้นกับการนำมาใช้งานกับโหลดจริงได้

(7) การทดลองโดยใช้โคมไฟฮาโลเจนเป็นแหล่งจ่ายความเข้มแสงให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีปัญหาอย่างมากเรื่องอุณหภูมิสูง จึงต้องใช้เครื่องเป่าลมช่วยในการระบายความร้อนให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามการใช้เครื่องเป่าลมช่วยไม่สามารถทำให้อุณหภูมิของแต่ละแผงได้รับมีค่าเท่ากัน การควบคุมให้ทั้งสองแผงมีเงื่อนไขในการทดลองที่เท่ากันพอดีจึงเป็นไปได้ ผลการทดลองชุดต้นแบบที่ความเข้มแสงเดียวกันจึงให้ผลออกมาไม่เท่ากันเหมือนอย่างเช่นการทดลองในโปรแกรม ฉะนั้นการเลือกใช้แหล่งจ่ายความเข้มแสงและอุณหภูมิในการทดลองจึงเป็นสิ่งที่ควรพิจารณาเช่นเดียวกัน

(8) การทดลองกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพียง 2 แผง และความเข้มแสงที่ต่างกัน 4 ค่า อาจไม่เพียงพอต่อการคาดคะเนผลที่จะเกิดขึ้นกับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ ฉะนั้นการเพิ่มปริมาณแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพิ่มขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และทดลองที่ความเข้มแสงที่หลากหลายมากขึ้น อาจใช้เป็นชุดต้นแบบในการพิจารณาติดตั้งเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมกับระบบขนาดใหญ่ได้

(9) เนื่องจากเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมสามารถช่วยให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น และจ่ายพลังงานให้โหลดได้มากขึ้นแค่เพียงช่วงความเข้มแสงหนึ่ง สำหรับงานวิจัยนี้คือช่วงที่มีค่าความเข้มแสงต่ำ (450 W/m^2 และ 180 W/m^2) ฉะนั้นจึงควรมีระบบควบคุมการตัดวงจรของเครื่องปรับจุดทำงานออกในช่วงความเข้มแสงที่ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้เครื่องปรับจุดทำงาน ยกตัวอย่างเช่น ขณะความเข้มแสง 900 W/m^2 และ 720 W/m^2 ให้มีการตัดเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมออกจากระบบ เพื่อการทำงานแบบไม่มีเครื่องปรับจุดทำงาน และเมื่อความเข้ม

แสงเปลี่ยนเป็น 450 W/m^2 หรือ 180 W/m^2 ให้มีการต่อเครื่องปรับจุดทำงานที่เหมาะสมเข้าสู่ระบบ
อีกครั้ง



รายการอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, "แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 - 2579 (Alternative Energy Development Plan: AEDP2015)," กระทรวงพลังงาน, Ed., ed, 2558.
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, "การประยุกต์ใช้เซลล์แสงอาทิตย์," กระทรวงพลังงาน, Ed., ed.
- [3] สำนักพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์, "เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้า," กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, Ed., ed.
- [4] บริษัทบางจากปิโตรเลียมจำกัด(มหาชน), "โครงการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ อำเภอบางปะอิน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา," 2555.
- [5] อ. เล็กศรีสุวรรณ, "การจัดเรียงอาร์เรย์เซลล์แสงอาทิตย์แบบปรับตัวได้เพื่อลดผลกระทบของการบังแสงต่อการผลิตไฟฟ้า," ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
- [6] ส. ชัยทัศนีย์, พลังงานหมุนเวียนและการผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว, 2557.
- [7] Z. Salameh, "Chapter 2 - Photovoltaic," in *Renewable Energy System Design*, ed Boston: Academic Press, 2014, pp. 33-113.
- [8] S. A. Kalogirou, "Chapter 9 - Photovoltaic Systems," in *Solar Energy Engineering (Second Edition)*, ed Boston: Academic Press, 2014, pp. 481-540.
- [9] H. ZHENG, "SOLAR PHOTOVOLTAIC ENERGY GENERATION AND CONVERSION—FROM DEVICES TO GRID INTEGRATION," Doctor of Philosophy, Electrical & Computer Engineering, Alabama Tuscaloosa, AL, USA, 2013.
- [10] J. Tao and V. Xue, "Grid-Connected Micro Solar Inverter Implement Using a C2000 MCU," TEXAS INSTRUMENTS January 2013.
- [11] T. Tran-Quoc and S. Bacha, "Photovoltaic Systems Connected to the Network," in *Electrical Distribution Networks*, ed: John Wiley & Sons, Inc., 2013, pp. 203-236.
- [12] F. Semiconductor, *RENEWABLE ENERGY SOLUTIONS Energy Efficient Components for PV Solar Systems*, 2012.

- [13] Wikipedia. (14 March). *Solar inverter*. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_inverter
- [14] energysage. (2016, 14 March). *String Inverters vs. Microinverters vs. Power Optimizers*. Available: <https://www.energysage.com/solar/101/string-inverters-microinverters-power-optimizers>
- [15] S. Kouro, B. Wu, H. Abu-Rub, and F. Blaabjerg, "Photovoltaic Energy Conversion Systems," in *Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications*, ed: John Wiley & Sons, Ltd, 2014, pp. 160-198.
- [16] A. Reza Reisi, M. Hassan Moradi, and S. Jamasb, "Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 433-443, 3// 2013.
- [17] F. L. Tofoli, D. de Castro Pereira, #xea, nis, and W. J. de Paula, "Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Systems," *International Journal of Photoenergy*, vol. 2015, p. 10, 2015.
- [18] Sheetal W. Dubewar and D. D. R. Patil, "Comparative Study of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 4, 2015.
- [19] M. Kumar, D. S.R.Kapoor, R. Nagar, and A. Verma, "Comparison between IC and Fuzzy Logic MPPT Algorithm Based Solar PV System using Boost Converter," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 4, June 2015 2015.
- [20] R. FARANDA and S. LEVA, "Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems," *WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS*, vol. 3, June 2008 2008.
- [21] A. DOLARA, R. FARANDA, and S. LEVA, "Energy Comparison of Seven MPPT Techniques for PV Systems," *J. Electromagnetic Analysis & Applications*, 2009.
- [22] K. K. Kumar, R. Bhaskar, and H. Koti, "Implementation of MPPT Algorithm for Solar Photovoltaic Cell by Comparing Short-circuit Method and Incremental Conductance Method," *Procedia Technology*, vol. 12, pp. 705-715, // 2014.

- [23] R. Rawat and S. S. Chandel, "Review of Maximum-Power-Point Tracking Techniques for Solar-Photovoltaic Systems," *Energy Technology*, August 2013 2013.
- [24] A. Safari and S. Mekhilef, "Simulation and Hardware Implementation of Incremental Conductance MPPT With Direct Control Method Using Cuk Converter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 1154-1161, 2011.
- [25] A. Pandey, N. Dasgupta, and A. K. Mukerjee, "High-Performance Algorithms for Drift Avoidance and Fast Tracking in Solar MPPT System," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, pp. 681-689, 2008.
- [26] L. Joshi, "Incremental Conductance Based Maximum Power Point Tracking for PV Multi-string Power Conditioning System," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 3, April 2013 2013.
- [27] Ying-Tung Hsiao and China-Hong Chen, "Maximum power tracking for photovoltaic power system," in *Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the*, 2002, pp. 1035-1040 vol.2.
- [28] V. C. Kotak and P. Tyagi, "DC To DC Converter in Maximum Power Point Tracker," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 2, 2013.
- [29] S. Maniktala, "Chapter 9 - Discovering New Topologies," in *Switching Power Supplies A - Z (Second Edition)*, ed Oxford: Newnes, 2012, pp. 343-402.
- [30] J.-K. Shiau, M.-Y. Lee, Y.-C. Wei, and B.-C. Chen, "Circuit Simulation for Solar Power Maximum Power Point Tracking with Different Buck-Boost Converter Topologies," presented at the 1st International e-Conference on Energies, 2014.
- [31] E. Durán, M. Sidrach-de-Cardona, J. Galán, and J. M. Andújar, "Comparative Analysis of Buck-Boost Converters used to obtain I-V Characteristic Curves of Photovoltaic Modules," presented at the IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC Record, 2008.
- [32] Soediby, B. Amri, and M. Ashari, "The comparative study of Buck-boost, Cuk, Sepic and Zeta converters for maximum power point tracking photovoltaic

- using P&O method," in *2015 2nd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, 2015, pp. 327-332.
- [33] M. Wens and M. Steyaert, "Inductive DC-DC Converter Topologies," in *Design and Implementation of Fully-Integrated Inductive DC-DC Converters in Standard CMOS*, ed Dordrecht: Springer Netherlands, 2011, pp. 65-122.
- [34] N.Karthick, I.Manoj, and K.V.Kandasamy, "PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF VARIOUS DC-DC CONVERTERS FOR EFFICIENT SOLAR ENERGY CONVERSION FOR AUTOMOBILE APPLICATIONS," *National Conference On Recent Trends And Developments In Sustainable Green Technologies*.
- [35] J. Falin, "Designing DC/DC converters based on ZETA topology," *Analog Applications Journal*, 2010.
- [36] V. Choudhary, A. Engineer, and R. Bell. 06 June 2016). Designing Non-Inverting Buck-Boost (Zeta) Converters with a Buck P-FET Controller. Available: <http://www.ti.com/lit/an/snva608/snva608.pdf>
- [37] M. Rosu-Hamzescu and S. Oprea. (2012, 07 June 2016). High-Power CC/CV Battery Charger Using an Inverse SEPIC (Zeta) Topology. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01467A.pdf>
- [38] Sipex. (2007, 08 June 2016). Zeta Converter Basics based on Sipex's SP6125/6/7 controllers. Available: https://www.exar.com/Files/Documents/sipex/ApplicationNotes/ANP-29_ZetaConverterBasics_071107.pdf
- [39] K. Kamolpattana, "Development of a Maximum Power Point Tracking System for a PV Module using a Modified Perturb and Observe Algorithm " Master, Electrical Engineering, Chulalongkorn University, 2016.
- [40] S. Roberts, *DC/DC Book of Knowledge: Practical Tips for the User*, 2015.
- [41] G. Recktenwald, " Voltage Dividers and Potentiometers," P. S. University, Ed., ed, 2013.
- [42] ชาย ชีวะเกตุ and ช. บัวเขียว. (2543, 24 February). การผลิตไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์. Available: <http://www.eppo.go.th/vrs/VRS49-09-Solar.html>

- [43] powerplant. (24 February). โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์. Available: <https://powerplant2.wordpress.com/%E0%B9%82%E0%B8%A3%E0%B8%87%E0%B9%84%E0%B8%9F%E0%B8%9F%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%9E%E0%B8%A5%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%87%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B9%81%E0%B8%AA%E0%B8%87%E0%B8%AD%E0%B8%B2%E0%B8%97%E0%B8%B4/>
- [44] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, "คู่มือความปลอดภัยในการผลิตและการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา," กระทรวงพลังงาน, Ed., ed, 2557.
- [45] L. Castañer, S. Bermejo, T. Markvart, and K. Fragaki, "Chapter IIA-2 - Energy Production by a PV Array," in *Practical Handbook of Photovoltaics (Second Edition)*, ed Boston: Academic Press, 2012, pp. 645-658.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก โปรแกรมการกำหนดและตั้งค่าเริ่มต้น

```
//-----
// ARDUINO MAP&O MPPT SOLAR CONTROLLER (Version-4)
// This code is for an arduino UNO based Solar MAP&O MPPT controller.
// updated 01/11/2017
//-----

#include <TimerOne.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Wire.h>
#include <RtcDateTime.h>
#include <RtcDS1307.h>
#include <RtcDS3231.h>
#include <RtcTemperature.h>
#include <RtcUtility.h>
RtcDS3231<TwoWire> Rtc(Wire); //for normal hardware wire use above
//-----
////////// Arduino pins Connections//////////////////////////////////////////

// A0 - Voltage divider (solar)
// A1 - Voltage divider (load)
// A2 - ACS 712 10130 (solar)
// A3 - ACS 712 12127 (load)
// 9 - PWM (switch)

// if RTC is used, port A4, A5 cannot used.
```

```

////////// Definitions ////////////////////////////////////////////

#define PV_VOLTS_PIN A0 // Defining the adc channel to read solar voltages

#define LOAD_VOLTS_PIN A1 // Defining the adc channel to read load voltages

#define PV_AMPS_PIN A2 // Defining the adc channel to read solar currents

#define LOAD_AMPS_PIN A3 // Defining the adc channel to read load currents

#define PWM_PIN 9 // the output pin for the PWM (only pin 9 available for
timer 1 at 26 kHz)

#define AMPS_SCALE 0.073982 // the scaling value for raw adc reading
to get solar amps // 5/(1024*0.066)

#define VOLTS_SCALE 0.0293255132 // the scaling value for raw adc reading
to get 30 volts // (5/1023)*(R1+R2)/R2 // R1=5k and R2=1k

#define VOLTS_SCALE2 0.04887585533 // the scaling value for raw adc reading
to get 50 volts // (5/1023)*(R1+R2)/R2 // R1=9k and R2=1k

#define T 38 // time period [uS] for vary frequency

#define PWM_FULL 1023 // the actual value used by the Timer1
routines for 100% PWM duty cycle

#define PWM_MAX 90 // the value for PWM duty cycle max [%]

#define PWM_MIN 10 // the value for PWM duty cycle min [%]
(below this value the current running in the system is = 0)

#define PWM_START 50 // the initial value for PWM duty cycle

#define AVG_NUM 8 // number of iterations of the adc
routine to average the adc readings

#define countof(a) (sizeof(a) / sizeof(a[0]))

//-----

```



```

//-----
// This routine is automatically called at powerup/reset
//-----

void setup() {

  pinMode(PWM_PIN, OUTPUT);           // sets the digital pin as output

  Timer1.initialize(T);               // set frequency

  Timer1.pwm(PWM_PIN,(PWM_FULL*(long)duty/100)); // setup PWM on pin 9,
50% duty cycle

  Serial.begin(9600);

  //-----RTC SETUP -----

  // if you are using ESP-01 then uncomment the line below to reset the pins to
  // the available pins for SDA, SCL

  // Wire.begin(0, 2); // due to limited pins, use pin 0 and 2 for SDA, SCL

  Rtc.Begin();

  RtcDateTime compiled = RtcDateTime(__DATE__, __TIME__);

  printDateTime(compiled);

  if (!Rtc.IsDateTimeValid())
  {

    // Common Causes:

    // 1) first time you ran and the device wasn't running yet

    // 2) the battery on the device is low or even missing

```

```
Serial.println("RTC lost confidence in the DateTime!");
```

```
// following line sets the RTC to the date & time this sketch was compiled
```

```
// it will also reset the valid flag internally unless the Rtc device is
```

```
// having an issue
```

```
Rtc.SetDateTime(compiled);
```

```
}
```

```
if (!Rtc.GetIsRunning())
```

```
{
```

```
Serial.println("RTC was not actively running, starting now");
```

```
Rtc.SetIsRunning(true);
```

```
}
```

```
RtcDateTime now = Rtc.GetDateTime();
```

```
if (now < compiled)
```

```
{
```

```
Serial.println("RTC is older than compile time! (Updating DateTime)");
```

```
Rtc.SetDateTime(compiled);
```

```
}
```

```
else if (now > compiled)
```

```
{
```

```
Serial.println("RTC is newer than compile time. (this is expected)");
```

```
}
```

```
else if (now == compiled)
{
    Serial.println("RTC is the same as compile time! (not expected but all is fine)");
}

// never assume the Rtc was last configured by you, so
// just clear them to your needed state
Rtc.Enable32kHzPin(false);
Rtc.SetSquareWavePin(DS3231SquareWavePin_ModeNone);
}
```



ภาคผนวก ข โปรแกรมการคำนวณและประมวลผล

```
//-----
// Main loop
//-----

void loop() {

    if (!Rtc.IsDateTimeValid()) {

        // Common Causes:

        // 1) the battery on the device is low or even missing and the power line was
disconnected

        Serial.println("RTC lost confidence in the DateTime!");

    }

    RtcDateTime now = Rtc.GetDateTime(); // read date & time datas
    stringOne = printDateTime(now); // convert date & time to string
    if (stringOne >= stringTwo) {

        Serial.print(stringOne); // show date & time on screen
        Serial.print(" ");

        read_data(); // read data from inputs
        print_data(); // show data on screen
        mppt_control(); // MAP&O method control PWM
        set_pwm_duty(); // write the PWM

    }

    delay(1000);

}
```

```
//-----
// This routine shows real date and time.
//-----

String printDateTime(const RtcDateTime& dt) {
    char datestring[20];
    snprintf_P(datestring,
               countof(datestring),
               PSTR("%02u/%02u/%04u %02u:%02u:%02u"),
               dt.Month(),
               dt.Day(),
               dt.Year(),
               dt.Hour(),
               dt.Minute(),
               dt.Second() );
    return datestring;
}

```



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ข.1 โปรแกรมกระบวนการสังเกต

```
//-----
// This routine reads and averages the analog inputs for this system, pv volts, pv
// amps, load volts and load amps.
//-----

int read_adc(int channel) {
    int sum = 0;

```

```

int temp;

int i;

for (i=0; i<AVG_NUM; i++) {          // loop through reading raw adc values
AVG_NUM number of times

    temp = analogRead(channel);      // read the input pin

    sum += temp;                     // store sum for averaging

    delayMicroseconds(100);         // pauses for 100 microseconds

}

return(sum / AVG_NUM);              // divide sum by AVG_NUM to get average and
return it

}

//-----

// This routine reads all the analog input values for the system. Then it multiplies
them by the scale factor to get actual value in volts or amps.

//-----

void read_data(void) {
    pv_volts = read_adc(PV_VOLTS_PIN) * VOLTS_SCALE; //input of pv volts
    load_volts = read_adc(LOAD_VOLTS_PIN) * VOLTS_SCALE; //input of load volts

    pv_amps = abs((read_adc(PV_AMPS_PIN) * AMPS_SCALE - 37.73)); //input of
pv amps panel1

    load_amps = abs((read_adc(LOAD_AMPS_PIN) * AMPS_SCALE - 37.95)); //input of
load amps panel1

    pv_watts = abs(pv_amps) * pv_volts; //calculations of pv watts

    load_watts = abs(load_amps) * load_volts; //calculations of load watts

    eff = (load_watts/pv_watts)*100; //calculations of converter efficiency

```

```
}
```

ข.2 โปรแกรมกระบวนการติดตามจุดทำงาน กำหนดขนาดและทิศทางของการเปลี่ยนแปลง ค่าตัวชี้เซลล์

```
//-----
// This routine uses MAP&O algorithm to vary the PWM duty cycle.
//-----

void mppt_control(void){
  if (abs(pv_watts-old_pv_watts) > 2){
    M = 0.5;
  }
  else{
    M = 2;
  }

  abs_delta_watts = abs((pv_watts - old_pv_watts)); // calculate the switching
  criterion
  a = M*abs_delta_watts; // automatic tuning of duty cycle
  perturb value

  if (abs(pv_watts-old_pv_watts)> 0.01){ // if PV watts change more than 0.01
    if (pv_watts-old_pv_watts > 0 ){ // if new PV watts more than old PV
  watts
    if(pv_volts-old_pv_volts > 0.1 ){ // if PV volts increase more than 0.1
      if (pv_amps-old_pv_amps >= 0){ // if PV currents increase
        duty = duty-a;
      }
    }
  }
}
```



```

else{
    duty = duty+a;
}
}
else { // else if PV volts decrease more than 0.1
    duty = duty+a; // reverse direction of perturb value
}
}
else{ // else if new PV watts less than old PV watts
    if(pv_volts-old_pv_volts > 0.1 ){ // if PV volts increase more than 0.1
        duty = duty+a; // reverse direction of perturb value
    }
    else{ // else if PV volts decrease more than 0.1
        duty = duty-a; // positive direction of perturb value
    }
}
}
}

old_pv_watts = pv_watts; // change new pv power to old pv power
old_pv_volts = pv_volts; // change new pv voltage to old pv voltage
old_pv_amps = pv_amps; // change new pv current to old pv current
}

```

ข.3 โปรแกรมกระบวนกรรบกวน

```
//-----
// This routine uses Timer1.pwm function to set the pwm duty cycle.
//-----

void set_pwm_duty(void) {
    if (duty > PWM_MAX) { // check limits of PWM
        duty cyle and set to PWM_MAX
        duty = PWM_MAX;
    }
    else if (duty < PWM_MIN) { // if pwm is less than
        PWM_MIN then set it to PWM_MIN
        duty = PWM_MIN;
    }
    if (duty < PWM_MAX) {
        Timer1.pwm(PWM_PIN,(PWM_FULL*(long)duty/100),T); // use Timer1 routine to
        set pwm duty cycle
    }
    else if (duty == PWM_MAX) { // if pwm set to 100% it
        will be on full
        Timer1.pwm(PWM_PIN,(PWM_FULL-1),T); // keep switching so set
        duty cycle at 99.9%
    }
}
}
```

ภาคผนวก ค โปรแกรมคำสั่งแสดงผล

```
//-----
// This routine prints all the data out to the serial port.
//-----

void print_data(void) {
    Serial.print("V(pv)= ");
    Serial.print(pv_volts);
    Serial.print(" ");

    Serial.print("I(pv)= ");
    Serial.print(pv_amps);
    Serial.print(" ");

    Serial.print("P(pv)= ");
    Serial.print(pv_watts);
    Serial.print(" ");

    Serial.print("V(load)= ");
    Serial.print(load_volts);
    Serial.print(" ");

    Serial.print("I(load)= ");
    Serial.print(load_amps);
    Serial.print(" ");
```



```
Serial.print("P(load)= ");  
  
Serial.print(load_watts);  
  
Serial.print(" ");  
  
Serial.print("Eff= ");  
  
Serial.print(eff);  
  
Serial.print(" ");  
  
Serial.print("D= ");  
  
Serial.print(duty);  
  
Serial.print(" ");  
  
Serial.print("\n\r");  
}
```



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวดวงพร เล็กอุทัย เกิดเมื่อวันที่ 8 กรกฎาคม พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดอุดรดิตถ์ เป็นบุตรคนแรกของนายนคร เล็กอุทัย และนางจารุณี เล็กอุทัย สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2556 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557

ขณะทำการศึกษา ผู้เขียนวิทยานิพนธ์มีผลงานตีพิมพ์และการนำเสนอบทความ "A Comparative Study of DC Power Optimizer Using Boost and Zeta Converters with Modified Adaptive P&O Method" ในการประชุมทางวิชาการ PEACON & INNOVATION 2017 "Moving Toward The Electric Utility of The Future: The Challenges of 4.0 Era" ระหว่างวันที่ 13-14 ธันวาคม พ.ศ. 2560 ณ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

