

การพัฒนาระบบติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์
ด้วยระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตที่ถูกรับแต่ง



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 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Development of a Maximum Power Point Tracking System for a PV Module
using a Modified Perturb and Observe Algorithm

Mr. Krissadin Kamolpattana



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 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาระบบติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์
แสงอาทิตย์ด้วยระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตที่ถูก
ปรับแต่ง

โดย

นายกฤษดิษฐ์ กมลพัฒนะ

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันเฉลิม โปรา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรีย์ พุ่มรินทร์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันเฉลิม โปรา)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลารัมย์)

กฤษดินท์ กมลพัฒนะ : การพัฒนาระบบติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตที่ถูกปรับแต่ง (Development of a Maximum Power Point Tracking System for a PV Module using a Modified Perturb and Observe Algorithm) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. วันเฉลิม โปรา , 114 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการพัฒนาระบบติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 120 วัตต์ ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตถูกนำมาปรับแต่งเพื่อเพิ่มสมรรถนะให้ระบบสามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วขึ้น และมีความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวน้อยลง แนวคิดหลักของการปรับแต่งคือการนำคุณสมบัติของเส้นโค้งวัฏจักรงานและแรงดันไฟฟ้า และเส้นโค้งคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาผสมผสานกันเพื่อใช้กำหนดขนาดการเปลี่ยนแปลงจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการจำลองเบื้องต้นบนโปรแกรมแมทแลบ่งชี้ว่าระเบียบวิธีที่นำเสนอสามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วขึ้นประมาณ 15 วินาทีเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นจาก 400 วัตต์/ตารางเมตรเป็น 1,000 วัตต์/ตารางเมตร และลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้ประมาณ 2 วัตต์เมื่อเทียบกับระเบียบวิธีดั้งเดิมที่ความเข้มแสง 1,000 วัตต์/ตารางเมตร

ระเบียบวิธีที่ถูกปรับแต่งสามารถนำมาใช้แทนระเบียบวิธีแบบดั้งเดิมได้โดยไม่จำเป็นต้องดัดแปลงฮาร์ดแวร์ของเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่มีอยู่เดิม ในงานวิจัยนี้ได้นำระเบียบวิธีมาประยุกต์ใช้กับวงจรทอนระดับแบบซิงโครนัสซึ่งมีไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33FJ06GS001 เป็นตัวควบคุม โปรแกรมทั้งหมดถูกพัฒนาขึ้นด้วยภาษาซี ในการทดลองเชิงเปรียบเทียบ ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตที่ต่างกัน 3 แบบถูกนำมาทดสอบภายใต้สภาวะความเข้มแสง และโหลดต่าง ๆ ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตที่ถูกปรับแต่งตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงได้เร็วที่สุดโดยเฉพาะกรณีความเข้มแสงเพิ่มขึ้น และสามารถลดการแกว่งในสภาวะอยู่ตัวได้ ในกรณีที่อิมพีแดนซ์ของโหลดมีขนาดมากเกินไปไม่มีระเบียบวิธีใดสามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

5770110921 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: MAXIMUM POWER POINT TRACKING / PERTURB AND OBSERVE

KRISSADIN KAMOLPATTANA: Development of a Maximum Power Point Tracking System for a PV Module using a Modified Perturb and Observe Algorithm.

ADVISOR: ASST. PROF. WANCHALERM PORA, Ph.D., 114 pp.

This thesis presents development of a maximum power point tracking (MPPT) system for a 120-Watt PV module. The perturb and observe (P&O) algorithm is modified to enhance tracking speed and minimize steady-state error. The characteristics of voltage and duty cycle (V-D) curve and those of the PV module are used as the key strategy to determine the step size. Simulation results on MATLAB/Simulink show that the proposed algorithm tracks the MPP 15 seconds faster than the conventional algorithm when irradiance increases from 400 W/m² to 1,000 W/m². It also diminishes power oscillation 2 Watts approximately when irradiance reaches 1,000 W/m².

The modified P&O algorithm may replace the conventional one without the need of hardware modification. In this work, the algorithm is realized by a synchronous buck converter, controlled by the dsPIC33FJ06GS001 microcontroller. All programs are developed in C language. Performance of three P&O algorithms are compared under various irradiance and load conditions. The results suggest that the modified P&O algorithm responses faster than the other reference algorithms especially when irradiance increases abruptly and power oscillation in steady state is reduced. In the event that impedance of load is too large, none of the algorithms can track the MPP.

Department: Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันเฉลิม โปรา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ท่านให้คำแนะนำ และให้คำปรึกษาร่วมกับผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงศ์ สุวรรณกวิน อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยมาโดยตลอด อีกทั้งยังให้ทุนการศึกษา และให้โอกาสข้าพเจ้าได้ทำงานเป็นผู้ช่วยสอนเพื่อหารายได้เสริมระหว่างทำวิจัย

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากบริษัท Texas Instruments และบริษัท Würth Electronics รวมถึงได้อ้างอิงข้อมูลสภาพภูมิอากาศจากโครงการ CUBEMS ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา และมารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ที่เลี้ยงดูอบรมสั่งสอน สนับสนุนให้มีการศึกษาที่ดี และเป็นกำลังใจที่ดีให้แก่ข้าพเจ้าตลอดมา

ขอขอบคุณ พี่สราวุฒิ เดชจรัสโยธิน และพี่กุลชาติ อนุสนธิ์อดิษฐ์ ผู้ให้ความช่วยเหลือ และชี้แนะแนวทางการออกแบบวงจรไฟฟ้าเป็นอย่างดี อีกทั้งเพื่อน ๆ ในสังกัดห้องปฏิบัติการวิจัย การออกแบบวงจรฝังตัวและวงจรรวมที่เป็นกำลังใจให้ฝ่าฟันอุปสรรคไปด้วยกัน

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทรัพยากรต่าง ๆ ในการศึกษา ค้นคว้าและวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป	ญ
สารบัญตาราง.....	ต
บทที่ 1 บทนำ	15
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	15
1.2 ทบทวนวรรณกรรม.....	16
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	18
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	18
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย	18
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	19
1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	19
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	20
2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ.....	20
2.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	21
2.3 แบบจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	22
2.4 เส้นโค้งคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	25
2.5 เครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด	29
2.5.1 วงจรทอนระดับ.....	30
2.5.2 วงจรวัดกระแสไฟฟ้า.....	32

2.5.3	วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า	32
2.5.4	วงจรควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด	33
2.6	แนวความคิดการปรับจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	35
2.7	ระเบียบวิธีรับกวนและสังเกตแบบดั้งเดิม	36
2.8	คุณลักษณะของเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงาน	38
2.9	ระเบียบวิธีรับกวนและสังเกตที่ถูกปรับแต่ง.....	41
บทที่ 3 หลักการออกแบบฮาร์ดแวร์		46
3.1	การออกแบบวงจรทอนระดับแบบซิงโครนัส	46
3.1.1	การเลือกตัวเหนี่ยวนำ	48
3.1.2	การเลือกตัวเก็บประจุขาออก	49
3.1.3	การเลือกมอสเฟต.....	50
3.1.4	การเลือกไดโอด	52
3.1.5	การเลือกตัวเก็บประจุขาเข้า.....	52
3.2	การออกแบบวงจรมอเตอร์ขับเคลื่อน	54
3.3	การออกแบบวงจรรักษาแรงดันไฟฟ้า 3.3 โวลต์	56
3.4	การออกแบบวงจรวัดกระแสไฟฟ้า.....	57
3.5	การออกแบบวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า.....	58
3.6	การออกแบบวงจรควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด	58
3.7	การออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์	59
บทที่ 4 หลักการออกแบบซอฟต์แวร์		62
4.1	การออกแบบโปรแกรมหลัก	62
4.2	การออกแบบโปรแกรมตั้งค่าระบบสัญญาณนาฬิกา	63
4.3	การออกแบบโปรแกรมแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล	65

4.4 การออกแบบโปรแกรมสร้างสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชัน	66
4.5 การออกแบบโปรแกรมตัวจับเวลา 1	67
4.6 การออกแบบโปรแกรมติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด	68
4.6.1 กระบวนการสังเกต.....	68
4.6.2 กระบวนการตรวจสอบจุดทำงาน	68
4.6.3 กระบวนการกำหนดขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน.....	69
4.6.4 กระบวนการรบกวน	69
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	70
5.1 การทดสอบวงจรรักษาแรงดันไฟฟ้า 3.3 โวลต์.....	70
5.1.1 เสถียรภาพต่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้า	70
5.1.2 เสถียรภาพต่ออุณหภูมิทำงาน	71
5.2 การตรวจสอบรูปสัญญาณขับมอสเฟต	71
5.2.1 กรณีที่ 1: แรงดันไฟฟ้าขาเข้ามีขนาด 0 โวลต์.....	73
5.2.2 กรณีที่ 2: แรงดันไฟฟ้าขาเข้ามีขนาด 10 โวลต์	74
5.2.3 กรณีที่ 3: แรงดันไฟฟ้าขาเข้ามีขนาด 20 โวลต์	75
5.3 การทดสอบวัดกระแสไฟฟ้าขาเข้า	76
5.4 การทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้าขาเข้า.....	78
5.5 การทดลองปรับจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	79
5.6 การทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด	81
5.6.1 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอย่างฉับพลัน	82
5.6.1.1 ความเข้มแสงลดลงที่โหลด 1.13 โอห์ม.....	82
5.6.1.2 ความเข้มแสงเพิ่มขึ้นที่โหลด 1.13 โอห์ม	84
5.6.1.3 ความเข้มแสงลดลงที่โหลด 2.6 โอห์ม	85

5.6.1.4 ความเข้มแสงเพิ่มขึ้นที่โหลด 2.6 โอห์ม.....	87
5.6.2 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของโหลด.....	89
5.6.2.1 โหลดเปลี่ยนจาก 2.6 โอห์มเป็น 1.13 โอห์มที่ความเข้มแสงมาก	89
5.6.2.2 โหลดเปลี่ยนจาก 1.13 โอห์มเป็น 2.6 โอห์มที่ความเข้มแสงมาก	91
5.6.2.3 โหลดเปลี่ยนจาก 2.6 โอห์มเป็น 1.13 โอห์มที่ความเข้มแสงน้อย	92
5.6.2.4 โหลดเปลี่ยนจาก 1.13 โอห์มเป็น 2.6 โอห์มที่ความเข้มแสงน้อย	94
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	96
6.1 บทสรุป.....	96
6.2 ข้อเสนอแนะ	96
รายการอ้างอิง	97
ภาคผนวก.....	101
ภาคผนวก ก ลายทองแดงของแผ่นวงจรพิมพ์.....	102
ภาคผนวก ข รายการวัสดุของเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	104
ภาคผนวก ค โปรแกรมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33FJ06GS001	105
ค.1 โปรแกรมหลัก (main.c).....	105
ค.2 โปรแกรมกำหนดคุณสมบัติเริ่มต้นของไมโครคอนโทรลเลอร์ (config.h).....	106
ค.3 โปรแกรมตั้งค่าระบบสัญญาณนาฬิกา และทิศทางของพอร์ต (setup.c).....	106
ค.4 เฮดเดอร์ไฟล์ setup.h.....	106
ค.5 โปรแกรมตั้งค่าโมดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (adc.c).....	107
ค.6 เฮดเดอร์ไฟล์ adc.h	107
ค.7 โปรแกรมตั้งค่าโมดูลสร้างสัญญาณพัลส์วิตช์มอดูเลชันความถี่สูง (pwm.c)	108
ค.8 เฮดเดอร์ไฟล์ pwm.h.....	108
ค.9 โปรแกรมตั้งค่าโมดูลตัวจับเวลา 1 (timer 1.c).....	109

ค.10 เฮดเดอร์ไฟล์ timer 1.h.....	109
ค.11 โปรแกรมติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (PandO.c).....	109
ค.12 เฮดเดอร์ไฟล์ PandO.h.....	111
ภาคผนวก ง ข้อมูลภูมิอากาศที่อ่านได้จากตัวรับรู้บนตาดฟ้าอาคารบูรณรอด	112
ง.1 วันที่ 9 มิถุนายน พ.ศ. 2559.....	112
ง.2 วันที่ 6 กันยายน พ.ศ. 2559.....	113
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	114



สารบัญรูป

รูปที่ 1	แผนผังระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ	20
รูปที่ 2	องค์ประกอบและการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	21
รูปที่ 3	วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....	22
รูปที่ 4	โครงสร้างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ STP6-120/36	23
รูปที่ 5	แบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในโปรแกรมแมทแลป.....	24
รูปที่ 6	เส้นโค้งคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	25
รูปที่ 7	ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเส้นโค้งคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	26
รูปที่ 8	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเส้นโค้งคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	27
รูปที่ 9	คุณสมบัติของเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า	28
รูปที่ 10	โครงสร้างภายในของเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด	29
รูปที่ 11	วงจรทอนระดับแบบทั่วไป.....	30
รูปที่ 12	การทำงานของวงจรทอนระดับ	31
รูปที่ 13	วงจรวัดกระแสไฟฟ้าโดยใช้ตัวต้านทานชันท์.....	32
รูปที่ 14	วงจรแบ่งแรงดันอย่างง่าย.....	33
รูปที่ 15	แผนผังตำแหน่งขาของ dsPIC33FJ06GS001	34
รูปที่ 16	การวิเคราะห์ห้วงจรทอนระดับกับโหลดความต้านทาน	35
รูปที่ 17	การปรับจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	36
รูปที่ 18	แผนผังการทำงานของวิธีรบกวนและสังเกต.....	37
รูปที่ 19	ผลการจำลองสมรรถนะของระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิม	38
รูปที่ 20	ผลของความเข้มแสงที่มีต่อคุณลักษณะของเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงาน	39
รูปที่ 21	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณลักษณะของเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงาน	40
รูปที่ 22	ผลของโหลดความต้านทานที่มีต่อคุณลักษณะของเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงาน	41

รูปที่ 23	ระเบียบวิธีรับกวนและสังเกตที่ถูกปรับแต่ง.....	42
รูปที่ 24	แผนผังการทำงานของระเบียบวิธีที่นำเสนอ	43
รูปที่ 25	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความชันของเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงาน.....	43
รูปที่ 26	ผลการจำลองเปรียบเทียบสมรรถนะของระเบียบวิธีเมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง.....	45
รูปที่ 27	ผลการจำลองเปรียบเทียบสมรรถนะของระเบียบวิธีเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง	45
รูปที่ 28	แผนภาพวงจรภายในเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	46
รูปที่ 29	วงจรทอนระดับแบบซิงโครนัส.....	47
รูปที่ 30	เครื่องมือช่วยเลือกตัวเหนี่ยวนำของบริษัท Würth Electronics	48
รูปที่ 31	เครื่องมือช่วยเลือกมอสเฟตของบริษัท Texas Instruments	50
รูปที่ 32	เส้นโค้งกำลังไฟฟ้าสูญเสียบนมอสเฟตแต่ละตัวที่โหลดต่าง ๆ	51
รูปที่ 33	แผนผังวงจรทอนระดับแบบซิงโครนัส	53
รูปที่ 34	แผนผังวงจรมอนิเตอร์ขั้วมอสเฟต.....	55
รูปที่ 35	ผังวงจรรักษาแรงดันไฟฟ้า 3.3 โวลต์.....	56
รูปที่ 36	ผังวงจรวัดกระแสไฟฟ้า	57
รูปที่ 37	ผังวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า	58
รูปที่ 38	ผังวงจรควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด	59
รูปที่ 39	เครื่องมือคำนวณขนาดความกว้างของลายทองแดง.....	60
รูปที่ 40	แผนผังวงจรพิมพ์เครื่องควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	61
รูปที่ 41	เครื่องควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	61
รูปที่ 42	แผนผังอย่างง่ายของเครื่องควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด.....	61
รูปที่ 43	ผังการทำงานของโปรแกรมหลัก.....	62
รูปที่ 44	ระบบสัญญาณนาฬิกาของ dsPIC33FJ06GS001.....	64
รูปที่ 45	แผนภาพกล่องของวงจรหาค่าความถี่.....	64
รูปที่ 46	ผังการตั้งค่าไมโครแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล	65

รูปที่ 47	ผังการทำงานในอินเทอร์รัพท์เซอร์วิสรูทีนของการแปลงสัญญาณคู่ที่ 0	66
รูปที่ 48	ผังการตั้งค่าโมดูลสร้างสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันความเร็วสูง	66
รูปที่ 49	ผังการตั้งค่าโมดูลตัวจับเวลา 1	67
รูปที่ 50	การทดสอบเสถียรภาพต่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้า.....	70
รูปที่ 51	การทดสอบเสถียรภาพต่ออุณหภูมิทำงาน	71
รูปที่ 52	วงจรสำหรับทดสอบขับมอสเฟต.....	72
รูปที่ 53	รูปสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันที่ขา PWM1H และ PWM1L	72
รูปที่ 54	รูปสัญญาณที่ขา HO และ LO ของตัวนำขับมอสเฟตในกรณีที่ 1	73
รูปที่ 55	ช่วงเวลาเว้นว่างของสัญญาณ HO และ LO ในกรณีที่ 1.....	73
รูปที่ 56	รูปสัญญาณที่ขา HO และ LO ของตัวนำขับมอสเฟตในกรณีที่ 2	74
รูปที่ 57	รูปสัญญาณที่ขา HO และ HS ของตัวนำขับมอสเฟตในกรณีที่ 2.....	74
รูปที่ 58	ช่วงเวลาเว้นว่างของสัญญาณ HO และ LO ในกรณีที่ 2.....	74
รูปที่ 59	รูปสัญญาณที่ขา HO และ LO ของตัวนำขับมอสเฟตในกรณีที่ 3	75
รูปที่ 60	รูปสัญญาณที่ขา HO และ HS ของตัวนำขับมอสเฟตในกรณีที่ 3.....	75
รูปที่ 61	ช่วงเวลาเว้นว่างของสัญญาณ HO และ LO ในกรณีที่ 3.....	75
รูปที่ 62	การทดสอบวัดกระแสไฟฟ้าขาเข้าของเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด	76
รูปที่ 63	กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าเข้าที่วัดได้จากแอมมิเตอร์ และไมโครคอนโทรลเลอร์	76
รูปที่ 64	กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ และค่าที่ได้หลังจากการปรับเทียบ	77
รูปที่ 65	การทดสอบวัดแรงดันไฟฟ้าขาเข้าของเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด	78
รูปที่ 66	กราฟเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเข้าที่วัดได้จากโวลต์มิเตอร์ และไมโครคอนโทรลเลอร์	78
รูปที่ 67	วงจรสำหรับการทดลองปรับจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	79
รูปที่ 68	เส้นโค้งกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะต่าง ๆ	80
รูปที่ 69	เส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะต่าง ๆ.....	80
รูปที่ 70	เส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงานที่สภาวะต่าง ๆ.....	81

รูปที่ 71 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะ	81
รูปที่ 72 ผลตอบสนองเมื่อความเข้มแสงลดลงที่โหลด 1.13 โอห์ม	83
รูปที่ 73 ผลตอบสนองเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นที่โหลด 1.13 โอห์ม	84
รูปที่ 74 ผลตอบสนองเมื่อความเข้มแสงลดลงที่โหลด 2.6 โอห์ม.....	86
รูปที่ 75 ผลตอบสนองเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นที่โหลด 2.6 โอห์ม	88
รูปที่ 76 ผลตอบสนองเมื่ออิมพีแดนซ์ลดลงที่ความเข้มแสงน้อย	90
รูปที่ 77 ผลตอบสนองเมื่ออิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นที่ความเข้มแสงมาก	91
รูปที่ 78 ผลตอบสนองเมื่ออิมพีแดนซ์ลดลงที่ความเข้มแสงน้อย	93
รูปที่ 79 ผลตอบสนองเมื่ออิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นที่ความเข้มแสงมาก	95



สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ STP6-120/36.....	24
ตารางที่ 2 คุณลักษณะของวงจรทอนระดับแบบซิงโครนัสที่ต้องการออกแบบ.....	47
ตารางที่ 3 การออกแบบอุปกรณ์ในวงจรทอนระดับที่ความเข้มแสงต่าง ๆ.....	54
ตารางที่ 4 พารามิเตอร์สำหรับออกแบบวงจรนำขับมอสเฟต.....	55
ตารางที่ 5 ผลเปรียบเทียบกรณีความเข้มแสงลดลงที่โหลด 1.13 โอห์ม.....	82
ตารางที่ 6 ผลเปรียบเทียบกรณีความเข้มแสงเพิ่มขึ้นที่โหลด 1.13 โอห์ม.....	85
ตารางที่ 7 ผลเปรียบเทียบกรณีความเข้มแสงลดลงที่โหลด 2.6 โอห์ม.....	85
ตารางที่ 8 ผลเปรียบเทียบกรณีความเข้มแสงเพิ่มขึ้นที่โหลด 2.6 โอห์ม.....	87
ตารางที่ 9 ผลเปรียบเทียบกรณีโหลดเปลี่ยนจาก 2.6 โอห์มเป็น 1.13 โอห์มที่ความเข้มแสงมาก....	89
ตารางที่ 10 ผลเปรียบเทียบกรณีโหลดเปลี่ยนจาก 1.13 โอห์มเป็น 2.6 โอห์มที่ความเข้มแสงมาก..	92
ตารางที่ 11 ผลเปรียบเทียบกรณีโหลดเปลี่ยนจาก 2.6 โอห์มเป็น 1.13 โอห์มที่ความเข้มแสงน้อย .	92
ตารางที่ 12 ผลเปรียบเทียบกรณีโหลดเปลี่ยนจาก 1.13 โอห์มเป็น 2.6 โอห์มที่ความเข้มแสงน้อย .	94

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

พลังงานเป็นปัจจัยที่จำเป็นต่อการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ และเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ใช้ขับเคลื่อนเศรษฐกิจของโลก เช่น อุตสาหกรรม การคมนาคมขนส่ง และการผลิตของภาคการเกษตร เป็นต้น แหล่งทรัพยากรพลังงานหลักของโลกในปัจจุบันนี้คือเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ ได้แก่ ถ่านหิน น้ำมันดิบ และก๊าซธรรมชาติ จากข้อมูลทางสถิติพบว่า การอุปโภคพลังงานโดยรวมมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ทุกปี [1] เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์มีอยู่อย่างจำกัด การหาแหล่งทรัพยากรพลังงานทดแทนจึงมีความจำเป็นเพื่อที่จะรองรับความต้องการพลังงานของโลกในอนาคต แหล่งพลังงานทดแทนที่น่าสนใจคือพลังงานจากแสงอาทิตย์เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนสะอาดที่สามารถนำมาผลิตพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนี้กระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แทบจะไม่มีมลพิษเมื่อเทียบกับการใช้เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ ซึ่งมีการปล่อยมลพิษอันเนื่องมาจากการเผาไหม้ ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นนี้จึงทำให้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกที่ได้รับความนิยมอย่างมาก

สำหรับประเทศไทยในปี พ.ศ. 2558 ภาครัฐมีนโยบายส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนโดยให้ความสำคัญกับพลังงานจากขยะ ชีวมวล และก๊าซชีวภาพเป็นอันดับแรก กำลังผลิตที่ได้จากพลังงานในกลุ่มนี้คิดเป็นร้อยละ 39 ของพลังงานหมุนเวียนทั้งหมด (7,490.4 เมกะวัตต์) แต่ในอนาคตสัดส่วนดังกล่าวอาจปรับลดเหลือร้อยละ 34 จากกำลังผลิตทั้งหมด (19,634.4 เมกะวัตต์) ในส่วนของพลังงานแสงอาทิตย์มีเป้าหมายที่จะเพิ่มสัดส่วนกำลังผลิตจาก 17.5% เป็น 30.5% คิดเป็น 6,000 เมกะวัตต์ภายในปี พ.ศ. 2579 [2] โรงงานผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ตามหลังคา/ตาดฟ้าของอาคารจึงได้รับความนิยมจากผู้ลงทุนมากขึ้นในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา

เซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความเข้มแสง อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ และค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของโหลดที่ต่ออยู่กับเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น [3, 4] ปัญหาหลักของการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์คือ ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าต่ำเนื่องจากปริมาณแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้อาจไม่ใช่ปริมาณที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาลักษณะนี้จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ซึ่งทำหน้าที่แปลงระดับแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมซึ่งทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด นอกจากนี้ความเข้มแสง และอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้

เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาเช่นเดียวกัน ดังนั้นอุปกรณ์ดังกล่าวนอกจากจะต้องสามารถแปลงระดับแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าได้แล้ว ยังต้องสามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้วย เพื่อที่จะผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ตลอดเวลาทำงาน และทำให้ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

ระเบียบวิธีติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีหลายวิธีเช่น วิธีเพิ่มค่าความนำไฟฟ้า (Incremental conductance) วิธีเศษส่วนของแรงดันไฟฟ้าขณะวงจรเปิด (Fractional open-circuit) วิธีไล่ระดับกระแสไฟฟ้า (Current sweep) และวิธีอื่น ๆ ที่ถูกรวบรวมไว้ใน [5] แต่ระเบียบวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือระเบียบวิธีรบกวนและสังเกต (Perturb and Observe algorithm) เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้ง่าย อย่างไรก็ตามระเบียบวิธีนี้ไม่สามารถให้ผลตอบสนองที่ดีทั้งในสภาวะชั่วคราว (Transient state) และสภาวะอยู่ตัว (Steady state) ได้พร้อมกันเนื่องจากจุดทำงาน (Operating point) ของเซลล์แสงอาทิตย์ถูกปรับในอัตราคงที่ หรือมีขนาดของระดับที่คงตัว [6]

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะพัฒนาระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตให้มีสมรรถนะในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ดียิ่งขึ้นทั้งในแง่ของความเร็วการตอบสนองในสภาวะชั่วคราว และความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัว และนำระเบียบวิธีที่พัฒนาขึ้นมาทดสอบใช้งานกับระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

1.2 ทบทวนวรรณกรรม

ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยปรับค่าวัฏจักรงาน (Duty cycle) ของสัญญาณพัลส์วidthที่มอดูเลชัน (Pulse width modulation) ที่ใช้ช่วงวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงในอัตราคงที่ (Fixed step size) หากค่าวัฏจักรงานมีการเปลี่ยนแปลงมาก ระบบจะติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็ว แต่เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวจุดทำงานจะแกว่งอย่างมากรอบ ๆ จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ในทางตรงข้ามหากค่าวัฏจักรงานมีการเปลี่ยนแปลงค่าน้อย การแกว่งในสภาวะอยู่ตัวจะน้อยแต่ก็ทำให้ติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ช้าไปด้วย การปรับจุดทำงานในอัตราคงที่จึงไม่สามารถให้ผลตอบสนองที่ดีทั้งในแง่ของความเร็ว และความคลาดเคลื่อนพร้อม ๆ กัน ในปัจจุบันมีหลายงานวิจัยที่นำระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตมาปรับปรุงแก้ไขให้สามารถแปรเปลี่ยนอัตราการปรับจุดทำงานได้ (Variable step size)

ในปี ค.ศ. 2004 [7] เสนอให้ใช้ความชันของเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและวัฏจักรงานคำนวณหาขนาดการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรงาน โดยนำความชันมาคูณกับค่าคงที่ปรับขนาด (Scale factor) เมื่อจุดทำงานอยู่ห่างจากจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเส้นโค้งจะมีความชันมาก ขนาดการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรงานก็จะมีค่ามากส่งผลให้ติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็ว และเมื่อจุดทำงานอยู่ใกล้จุด

กำลังไฟฟ้าสูงสุดเส้นโค้งจะมีความชันน้อย ขนาดการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรงานก็จะมีค่าน้อย และทำให้จุดทำงานเคลื่อนที่ช้าลง ค่าคงที่ปรับขนาดมีผลโดยตรงต่อสมรรถนะ และเสถียรภาพของระบบ ดังนั้นจึงต้องออกแบบอย่างเหมาะสม ระเบียบวิธีนี้ถูกนำไปจำลองในโปรแกรมแมทแล็บ และทดสอบใช้กับวงจรทอนระดับ (Buck converter) ผลการจำลอง และผลการทดลองสรุปได้ว่าระเบียบวิธีที่พัฒนาขึ้นช่วยลดความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัวได้ และสามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วกว่าระเบียบวิธีแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน 0.012 ประมาณ 34% นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าจุดทำงานอาจเบี่ยงออกจากจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง และต้องใช้เวลาในการเคลื่อนมาอยู่ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดอีกครั้ง

ต่อมาในปี ค.ศ. 2008 [8] แนะนำให้ใช้ความชันของเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า คำนวณหาขนาดการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรงานแทน โดยให้เหตุผลว่าเส้นโค้งความชันกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ามีลักษณะเรียบมากกว่า นอกจากนี้ยังกล่าวถึงการออกแบบค่าคงที่ปรับขนาดว่าทำได้ยาก หากเลือกใช้ค่าที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ และค่าคงที่ปรับขนาดที่ออกแบบไว้จะใช้ได้กับระบบ และสภาวะที่เจาะจงเท่านั้น หากมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ก็จะต้องหาค่าคงที่ปรับขนาดใหม่ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอระเบียบวิธีสำหรับคำนวณหาค่าคงที่ปรับขนาดแบบอัตโนมัติ โดยใช้ขนาดความชันของเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ระเบียบวิธีนี้ถูกนำไปใช้กับวงจรทอนระดับขนาด 40 วัตต์ และเครื่องจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Agilent SAS E4351B ขนาด 36 วัตต์ ผลการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระเบียบวิธีที่นำเสนอมากที่สุด 94.6% มากกว่าระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตดั้งเดิม 7.5%

ในปี ค.ศ. 2014 [9] ได้ประยุกต์ใช้ระบบควบคุมฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic control) กับระเบียบวิธีรบกวนและสังเกต เพื่อติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 220 วัตต์ซึ่งถูกจำลองขึ้นจากเครื่องจำลอง TerraSAS DCS80-15 ของบริษัท AMETEK และต่อเข้ากับวงจรทอนระดับ (Boost converter) ขนาด 300 วัตต์ ระบบควบคุมฟัซซีลอจิกคำนวณหาขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน โดยใช้การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นอินพุต ขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงานคำนวณได้จากกระบวนการอนุมานฟัซซี (Fuzzy inference) กฎที่ใช้ในการอนุมานอิงมาจากความชันของเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ถ้าความชันมีค่าเป็นบวกหมายความว่าจุดทำงานอยู่ทางด้านซ้ายของจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่าวัฏจักรงานจะถูกปรับลดลง แต่ถ้าความชันมีค่าเป็นลบหมายความว่าจุดทำงานอยู่ทางด้านขวาของจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด และจะต้องปรับเพิ่มค่าวัฏจักรงาน กฎข้างต้นกำหนดทิศทางของการปรับจุดทำงาน ส่วนขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงานนั้นจะแปรผันตามขนาดของความชัน ถ้าขนาดความชันมีค่ามากจุดทำงานจะอยู่ห่างจากจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด การเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงานจึงควรมีค่ามากเพื่อเพิ่มความเร็วในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด แต่ถ้าขนาดความชันมีค่าน้อยจุดทำงานจะอยู่ใกล้กับจุด

กำลังไฟฟ้าสูงสุด การเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงานจึงควรมีค่าน้อยเพื่อลดการแกว่งในสถานะอยู่ตัว ขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงานถูกจำกัดให้มีค่าไม่เกิน 0.05 จากผลการทดลองสรุปได้ว่าวิธีที่นำเสนอติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ช้ากว่าระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมในบางกรณี และมีการแกว่งของจุดทำงานเกิดขึ้นในสถานะชั่วคราว แต่โดยรวมแล้ววิธีที่นำเสนอมีความแม่นยำ 99.90% มากกว่าระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมประมาณ 7% บางงานวิจัยเช่น [10, 11] เสนอให้ใช้ความชันเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าร่วมกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความชันเป็น อินพุตในการคำนวณขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงานด้วย เพราะว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความชันสามารถบ่งบอกถึงทิศทาง และความเร็วในการเคลื่อนที่ของจุดทำงาน

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) พัฒนาระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตให้มีสมรรถนะในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ดีขึ้นทั้งในแง่ของความเร็ว และความคลาดเคลื่อน
- 2) พัฒนาเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) ปรับปรุงระเบียบวิธีติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแบบรบกวนและสังเกต ให้สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงได้เร็วขึ้น เมื่อเทียบกับระเบียบวิธีแบบดั้งเดิม ในกรณีความเข้มแสงที่ตกกระทบทุกเซลล์เท่ากัน
- 2) เครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีกำลังพิกัดรวมไม่ต่ำกว่า 150 วัตต์ ความถี่ของสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันที่ใช้ขั้ววงจรทอนระดับอยู่ในช่วง 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 100 กิโลเฮิร์ตซ์
- 3) ทดลองติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 120 วัตต์
- 4) ใช้ตัวต้านทานคงที่แบบไวร์วาวด์เป็นโหลดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อความเข้มแสงทำให้กำลังไฟฟ้าขาออกมีขนาด 20 วัตต์ถึง 120 วัตต์

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

- 1) ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ
- 2) ศึกษาแนวคิด และระเบียบวิธีติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด
- 3) สร้างแบบจำลองของระบบเซลล์แสงอาทิตย์อย่างง่ายบนโปรแกรมแมทแลป
- 4) ออกแบบและพัฒนาระเบียบวิธีรบกวนและสังเกต
- 5) ทดสอบระเบียบวิธีติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่พัฒนาขึ้นบนโปรแกรมแมทแลป

- 6) ออกแบบเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด
- 7) เขียนโปรแกรมควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด
- 8) ทดสอบสมรรถนะของเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่พัฒนาขึ้น
- 9) สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้พัฒนาเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีระเบียบวิธีรับกวนและสังเกตแบบใหม่ซึ่งให้ผลตอบสนองต่อความเข้มแสงที่เร็วขึ้น และมีความคลาดเคลื่อนสถานะอยู่ตัวลดลง
- 2) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังโหลด

1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาที่จะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 6 บทประกอบด้วย

บทที่ 1 บทนำ กล่าวนำถึงที่มาและความสำคัญ ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง วัตถุประสงค์ของเขตงานวิจัย วิธีการดำเนินการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ พร้อมทั้งโครงสร้างของวิทยานิพนธ์ในแต่ละบท

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ หลักการทำงาน คุณลักษณะของอุปกรณ์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้อง รวมถึงแนวคิดและการพัฒนาระเบียบวิธีติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 3 หลักการออกแบบฮาร์ดแวร์ กล่าวถึงการออกแบบวงจรไฟฟ้าภายในเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดซึ่งได้แก่ วงจรทอนระดับ วงจรนำขั้วมอสเฟต วงจรวัดกระแสไฟฟ้า วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า และวงจรควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด รวมถึงการออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์

บทที่ 4 หลักการออกแบบซอฟต์แวร์ อธิบายขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมที่ฝังตัวอยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่การตั้งค่าเริ่มต้น และการใช้งานโมดูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง แสดงถึงผลการทดสอบใช้งานเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในส่วนต่าง ๆ การทดลองปรับจุดทำงาน และผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างระเบียบวิธีดั้งเดิมกับระเบียบวิธีที่พัฒนาขึ้น

บทที่ 6 บทวิจารณ์และสรุป นำเสนอบทสรุปการดำเนินการวิจัย ปัญหาที่เกิดขึ้น และแนวทางในการปรับปรุงพัฒนาต่อไป

บทที่ 2

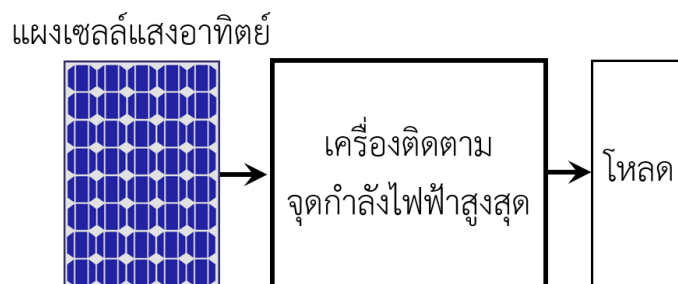
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาระบบติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นต้องมีความเข้าใจทฤษฎีในสาขาวิชาต่าง ๆ ทั้งอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และระบบฝังตัว ในบทนี้ได้รวบรวมหลักการพื้นฐานของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในระบบได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ และเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งประกอบไปด้วยวงจรถอนระดับ วงจรวัดกระแสไฟฟ้า วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า และวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด อีกทั้งในงานวิจัยนี้ได้ทบทวนแนวคิดการปรับจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และวิเคราะห์สมรรถนะการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิม สุดท้ายในบทได้นำเสนอแนวคิดที่จะนำคุณลักษณะของเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงาน และเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าซึ่งได้จากการจำลองในโปรแกรมเมทแลปมาปรับแต่งระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตให้มีสมรรถนะที่ดีขึ้น

2.1 ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระเป็นระบบที่นำเซลล์แสงอาทิตย์มาผลิตไฟฟ้าโดยไม่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าจากระบบจำหน่าย (Utility grid) โดยทั่วไประบบถูกออกแบบให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้เพียงพอต่อความต้องการในระบบโดยไม่จำเป็นต้องพึ่งไฟฟ้าจากแหล่งอื่น และระบบส่วนมากมักจะมีแบตเตอรี่สำหรับเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ใช้เมื่อระบบไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะพัฒนาระบบติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่านั้น ในส่วนของแบตเตอรี่ และเครื่องควบคุมการอัด/จ่ายประจุจะไม่นำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้ ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระเขียนเป็นแผนผังได้ดังรูปที่ 1 ระบบประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญ 3 ชิ้นได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ เครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด และโหลดไฟฟ้า กระแสตรง

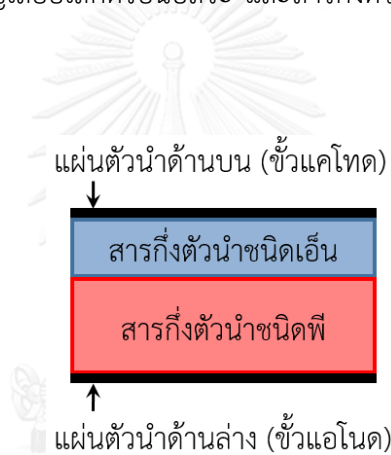


รูปที่ 1 แผนผังระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

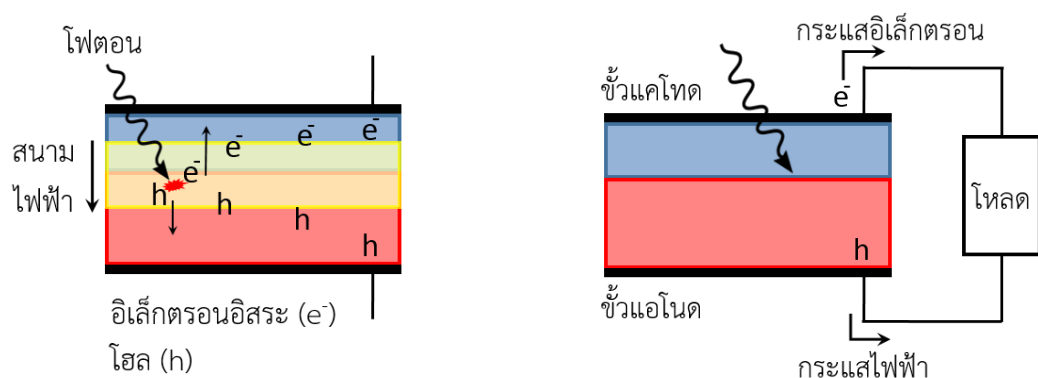
แผงเซลล์แสงอาทิตย์แปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า พลังงานที่ผลิตได้จะถูกส่งผ่านเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดไปยังโหลดปลายทาง เครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทำหน้าที่ปรับจุดทำงาน (แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุด

2.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ถูกผลิตขึ้นจากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) และชนิดพี (P-type) ประกอบกันดังรูปที่ 2 (ก) ที่บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด อิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) จากฝั่งสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะเคลื่อนที่ไปรวมตัวกับโฮล (Hole) ที่อยู่ฝั่งสารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นสูญเสียอิเล็กตรอนอิสระ และสารกึ่งตัวนำชนิดพีได้รับอิเล็กตรอนอิสระจะเกิดสนามไฟฟ้าขึ้น



(ก) องค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์



(ข) ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก

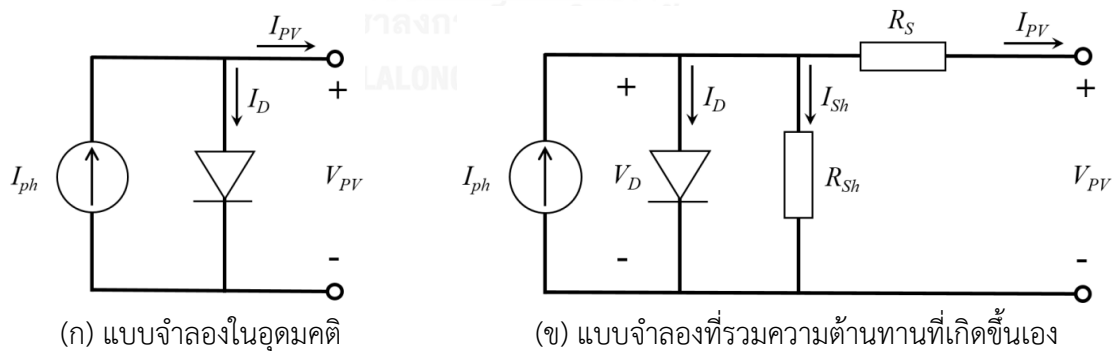
(ค) การไหลของอิเล็กตรอนอิสระ

รูปที่ 2 องค์ประกอบและการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

ต่อมาเมื่อมีแสงตกกระทบลงมายังบริเวณรอยต่อจะเกิดปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic effect) คือพลังงานแสง หรือโฟตอนจะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนอิสระ และโฮลแยกออกจากกัน สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อจะผลักให้อิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ไปยังฝั่งสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ในขณะที่โฮลจะไปอยู่ที่ฝั่งสารกึ่งตัวนำชนิดพี ปรากฏการณ์ข้างต้นแสดงดังรูปที่ 2 (ข) สุดท้ายเมื่อต่อโหลดเข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์แล้วแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านบนจะนำอิเล็กตรอนอิสระให้ไหลผ่านโหลดและไหลกลับมายังแผ่นตัวนำไฟฟ้าด้านล่าง อิเล็กตรอนอิสระจะกลับมารวมตัวกับโฮลอีกครั้งที่ฝั่งสารกึ่งตัวนำชนิดพีดังรูปที่ 2 (ค) กระบวนการผลิตไฟฟ้านี้จะยังคงเกิดขึ้นต่อไปเรื่อย ๆ トラบเท่าที่ยังมีแสงมาตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ [12]

2.3 แบบจำลองของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

พฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถอธิบายได้จากวงจรสมมูลในรูปที่ 3 แบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติแสดงด้วยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่แปรผันตามความเข้มแสง ต่อขนานกับไดโอด ซึ่งแสดงถึงรอยต่อพีเอ็นที่มีแรงดันไฟฟ้าดังรูปที่ 3 (ก) ในทางปฏิบัติเซลล์แสงอาทิตย์มักมีความต้านทานแฝงอันเกิดจากการเชื่อมต่อแผ่นตัวนำ นอกจากนี้ภายในเซลล์แสงอาทิตย์มีกระแสไฟฟ้าวรัวไหล (Leakage current) เกิดขึ้นในทิศตรงข้ามกับกระแสที่กำเนิดโดยแสง (Solar-induced current) ดังนั้นความต้านทานอนุกรม (R_S) และความต้านทานขนาน (R_{Sh}) จึงถูกรวมไว้ในแบบจำลองด้วย สุดท้ายจึงได้แบบจำลองที่รวมความต้านทานที่เกิดขึ้นเองดังรูปที่ 3 (ข)



รูปที่ 3 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (V_{PV}) และกระแสไฟฟ้า (I_{PV}) เขียนได้ดังสมการที่ 2.1

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left\{ \frac{V_{PV} + I_{PV} R_S}{nV_T} \right\} - 1 \right) - \frac{V_{PV} + I_{PV} R_S}{R_{Sh}} \quad (2.1)$$

โดยที่

I_{ph} คือ กระแสที่เกิดโดยแสง ซึ่งมีค่าแปรผันตรงกับความเข้มแสง

I_0 คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด (Reverse saturation current)

n คือ ค่าคุณภาพ (Quality factor) มีค่าอยู่ในช่วง $[1, 2]$ และมีค่าเป็น 1 เมื่อพิจารณาไดโอดในอุดมคติ

V_T คือ แรงดันความร้อน (Thermal voltage) ซึ่งมีนิยามดังสมการที่ 2.2

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (2.2)$$

เมื่อ

k คือค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann's constant)

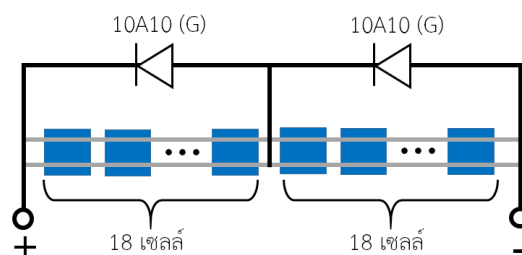
T คืออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ในหน่วยเคลวิน

q คือค่าสัมบูรณ์ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

เมื่อกำหนดให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งหมด $N_P \times N_S$ เซลล์ โดยมีสตริงของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อขนานอยู่ N_P แถว และในแต่ละสตริงมีเซลล์แสงอาทิตย์ต่ออนุกรมกันอยู่ N_S เซลล์ จึงเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าได้ใหม่ได้ดังสมการที่ 2.3

$$I_{PV} = N_P I_{ph} - N_P I_0 \left(\exp \left\{ \frac{V_{PV} + (N_S/N_P) I_{PV} R_S}{N_S n V_T} \right\} - 1 \right) - \frac{V_{PV} + (N_S/N_P) I_{PV} R_S}{(N_S/N_P) R_{Sh}} \quad (2.3)$$

งานวิจัยนี้เลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกรวม (Polycrystalline) รุ่น STP6-120/36 ของบริษัท Schutten solar แผงเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 36 เซลล์โดยแบ่งเป็น 2 ชุดต่ออนุกรมกัน ใน 1 ชุดมีเซลล์แสงอาทิตย์ 18 เซลล์ต่ออนุกรมกัน และมีบายพาสไดโอด 10A10 (G) 1 ตัวต่อขนานไว้ โครงสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ STP6-120/36 แสดงดังรูปที่ 4



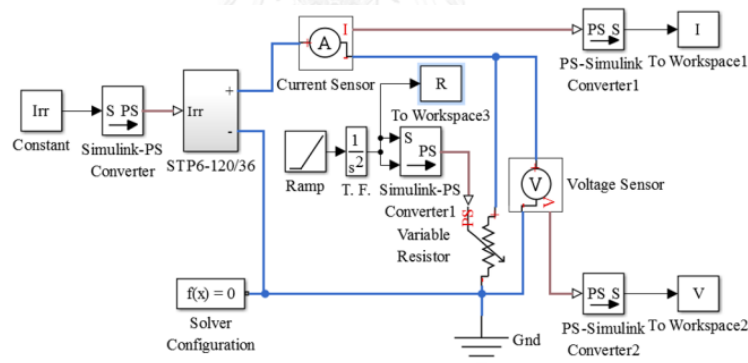
รูปที่ 4 โครงสร้างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ STP6-120/36

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ STP6-120/36 แสดงดังตารางที่ 1

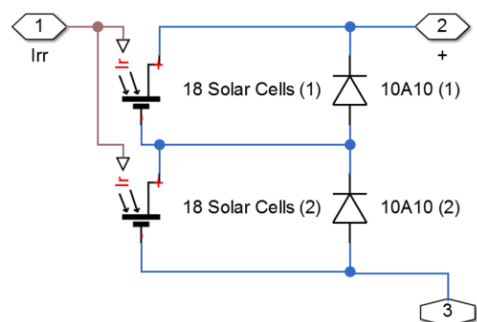
ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ STP6-120/36

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าที่ระบุ
แรงดันไฟฟ้าขณะวงจรเปิด	V_{oc}	21.24 โวลต์
กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร	I_{sc}	7.33 แอมแปร์
แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด	V_{mp}	18 โวลต์
กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด	I_{mp}	6.67 แอมแปร์
กำลังผลิตสูงสุด	P_{max}	120 วัตต์

ค่าต่าง ๆ ถูกวัดภายใต้สภาวะทดสอบมาตรฐาน (Standard test condition) คือที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความเข้มแสง 1,000 วัตต์/ตารางเมตร และมีสัมประสิทธิ์มวลอากาศ (Air mass) เท่ากับ 1.5 จากข้อมูลข้างต้นสามารถสร้างแบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในโปรแกรมแมทแลปได้ ดังรูปที่ 5 (ก) และรูปที่ 5 (ข)



(ก) แบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับโหลดความต้านทานปรับค่าได้

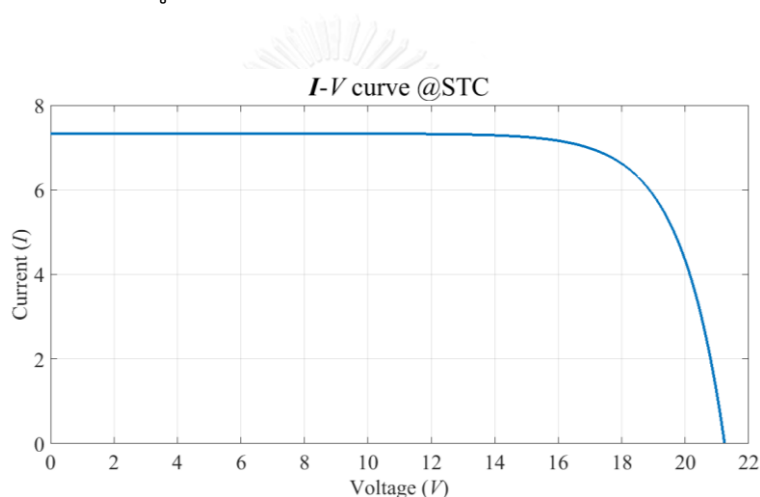


(ข) โครงสร้างภายในของ STP6-120/36

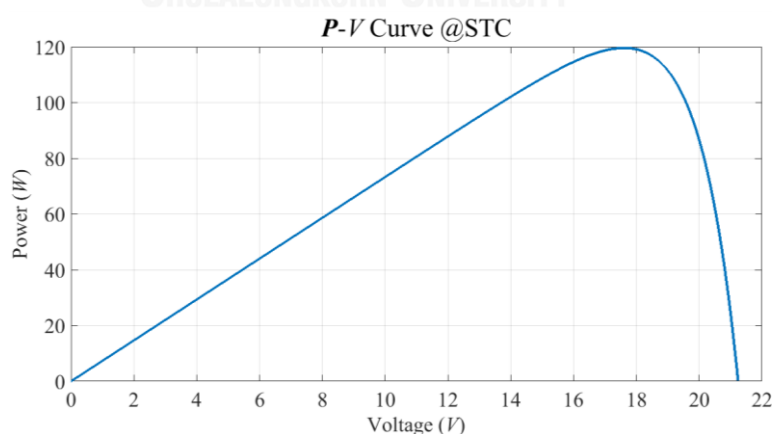
รูปที่ 5 แบบจำลองแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในโปรแกรมแมทแลป

2.4 เส้นโค้งคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เส้นโค้งคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แสดงถึงจุดทำงานที่แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าใด ๆ ซึ่งสามารถนำมาพล็อตได้โดยใช้แบบจำลองในรูปที่ 5 (ก) กำหนดให้แบบจำลองอยู่ภายใต้สภาวะทดสอบมาตรฐาน และความต้านทานของโหลดถูกแปรค่าจาก 0 โอห์มถึง 33 กิโลโอห์ม เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองมาพล็อตจะได้เส้นโค้งกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ดังรูปที่ 6 (ก) เมื่อแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ กระแสไฟฟ้าที่วัดได้คือกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจร และเมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้คือแรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร หากนำเส้นโค้งดังกล่าวคูณด้วยแรงดันไฟฟ้าอีกจะได้เส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (P-V curve) ดังรูปที่ 6 (ข)



(ก) เส้นโค้งกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

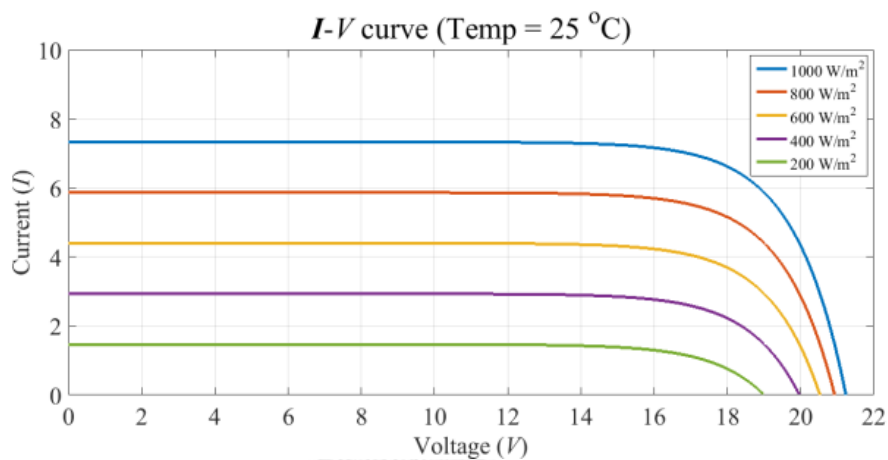


(ข) เส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

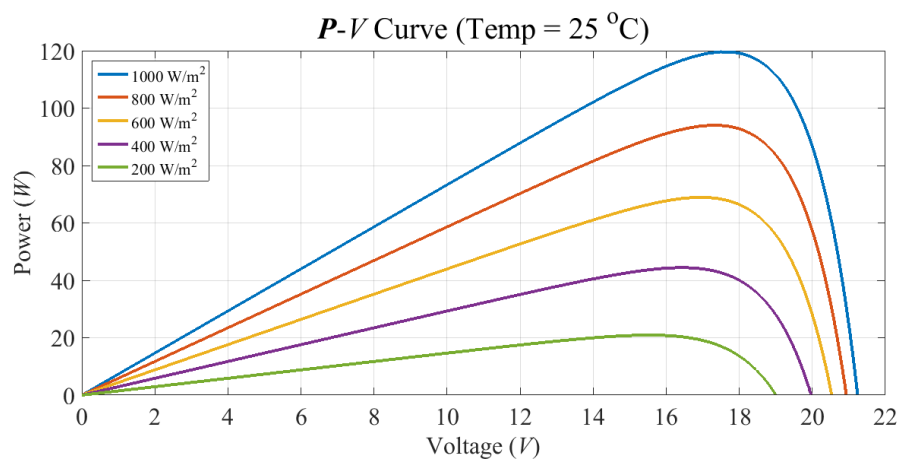
รูปที่ 6 เส้นโค้งคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ผลของความเข้มแสง

นำแบบจำลองในรูปที่ 5 (ก) มาจำลองเส้นโค้งคุณลักษณะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และที่ความเข้มแสงต่าง ๆ ได้แก่ 1,000, 800, 600, 400 และ 200 วัตต์/ตารางเมตร ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 7 จากรูปที่ 7 (ก) เมื่อความเข้มแสงลดลงส่งผลให้กระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรลดลงอย่างมาก ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรมีค่าลดลงเล็กน้อย ส่วนรูปที่ 7 (ข) แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มแสงลดลง กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ก็ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เคลื่อนที่ต่ำลงมาจะเยื้องมาทางด้านซ้ายเล็กน้อยอีกด้วย



(ก) เส้นโค้งกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

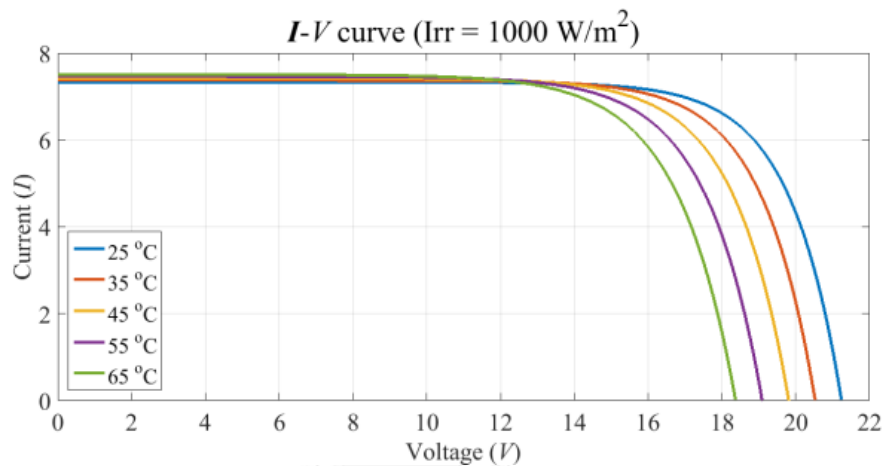


(ข) เส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

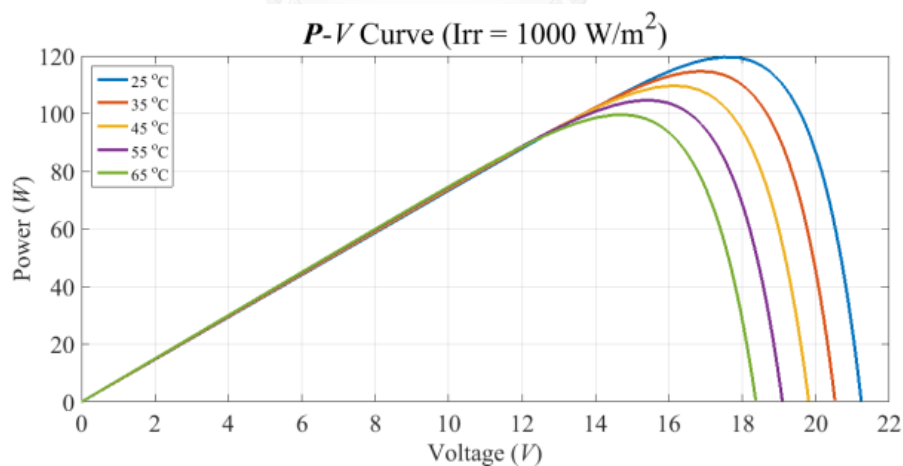
รูปที่ 7 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเส้นโค้งคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ผลของอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ทำการจำลองเส้นโค้งคุณลักษณะเช่นเดียวกัน ที่ความเข้มแสง 1,000 วัตต์/ตารางเมตร และที่อุณหภูมิต่างกันได้แก่ 25, 35, 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 8 จากรูปที่ 8 (ก) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจรมีค่าลดลง ส่วนกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรเพิ่มขึ้นเล็กน้อย รูปที่ 8 (ข) แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ก็ลดลง และจุดกำลังไฟฟ้าสูงเคลื่อนที่มาทางด้านซ้าย



(ก) เส้นโค้งกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

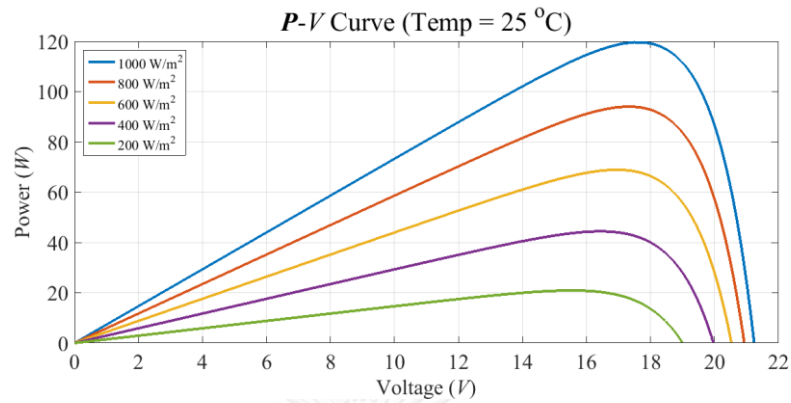


(ข) เส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

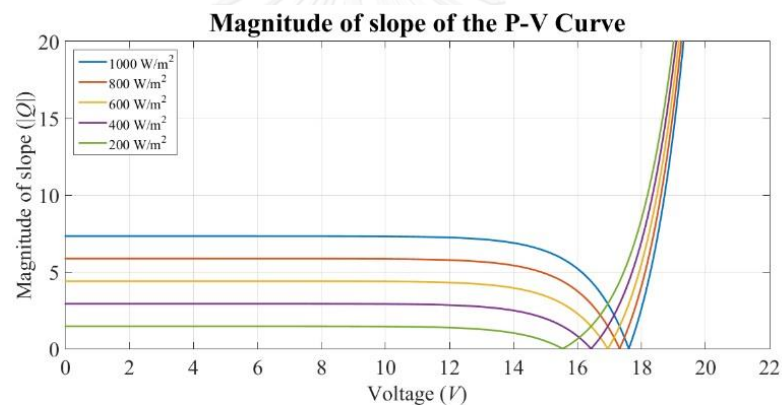
รูปที่ 8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเส้นโค้งคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 7 (ข) และรูปที่ 8 (ข) เราสามารถระบุตำแหน่งของจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างชัดเจนจากเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า และความเข้มแสงส่งผลต่อ

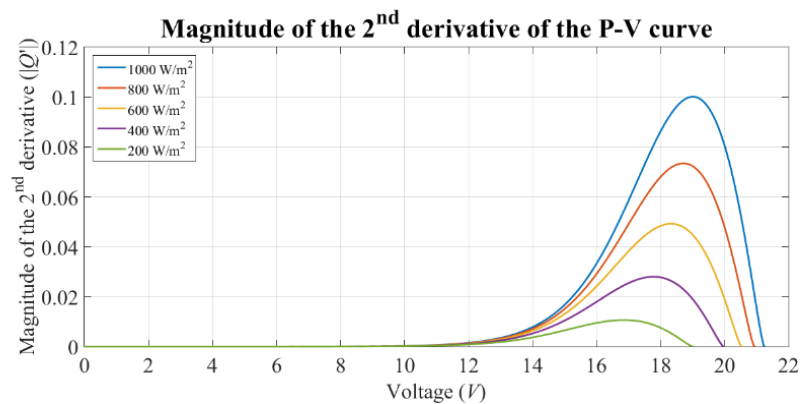
รูปร่างของเส้นโค้งมากกว่าอุณหภูมิ เมื่อนำรูปที่ 6 (ข) มาวิเคราะห์เพิ่มเติมโดยการหาขนาดของอนุพันธ์อันดับหนึ่ง และอนุพันธ์อันดับสองจะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 9



(ก) เส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ความเข้มแสงต่าง ๆ



(ข) ขนาดของความชันของเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ความเข้มแสงต่าง ๆ



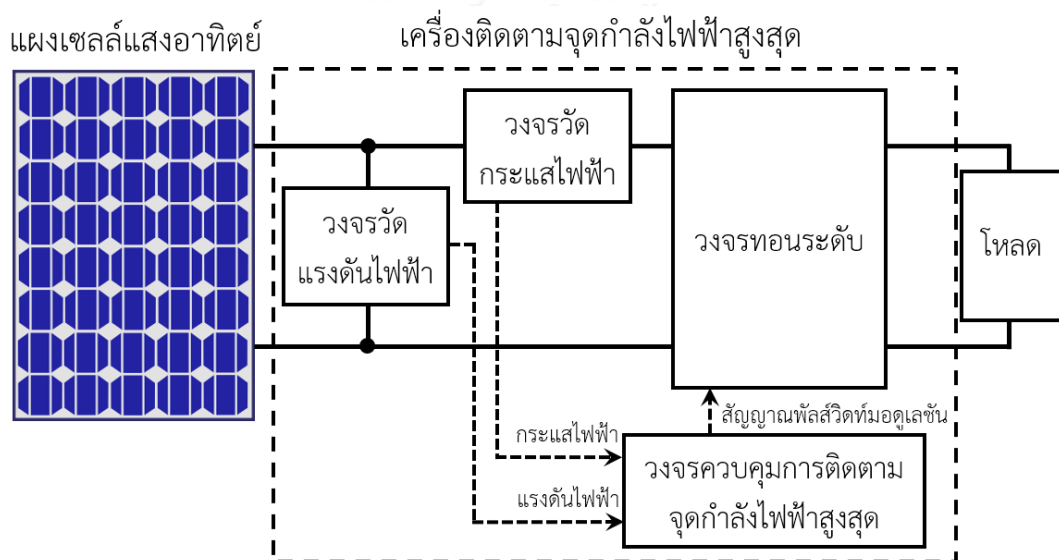
(ค) ขนาดของอนุพันธ์อันดับสองของเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ความเข้มแสงต่าง ๆ

รูปที่ 9 คุณสมบัติของเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 9 (ก) จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะอยู่ที่จุดยอดของเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า ซึ่งที่จุดยอดดังกล่าวจะมีความชันเป็นศูนย์เสมือนดังแสดงในรูปที่ 9 (ข) ข้อสังเกตที่น่าสนใจอีกอย่างของเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าคือ ค่าความชันทางด้านซ้ายของเส้นโค้งไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก หรือมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความชันน้อยมาก รูปที่ 9 (ค) แสดงให้เห็นว่าทางด้านซ้ายของเส้นโค้งมีขนาดของอนุพันธ์อันดับสองน้อยมาก ไม่ว่าจะความเข้มแสงจะมากหรือน้อยก็ตาม

2.5 เครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

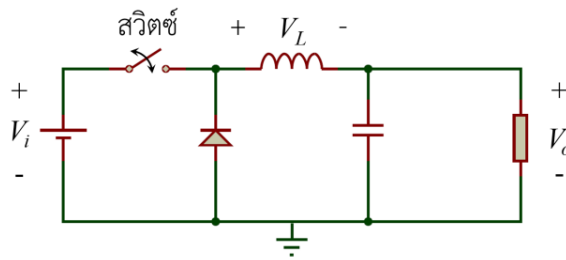
เครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทำหน้าที่ปรับจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้อยู่ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด การปรับจุดทำงานทำได้โดยการปรับค่าวัฏจักรงานของสัญญาณพัลส์วิตช์มอดูเลชันที่ขั้ววงจรภาคกำลังเพื่อทำให้เกิดการแมชชิงของอิมพีแดนซ์ (Impedance matching) อันทำให้เกิดการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุด เครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดประกอบด้วยวงจรที่สำคัญ 4 วงจร ได้แก่ วงจรทอนระดับ วงจรวัดกระแสไฟฟ้า วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า และวงจรควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด แต่ละวงจรเชื่อมต่อกันดังรูปที่ 10 วงจรควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะอ่านแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และคำนวณค่าวัฏจักรงาน หลังจากนั้นจึงสร้างสัญญาณเพื่อควบคุมวงจรทอนระดับ โหลดในงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะโหลดความต้านทานเท่านั้น



รูปที่ 10 โครงสร้างภายในของเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

2.5.1 วงจรทอนระดับ

วงจรทอนระดับเป็นวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งทำหน้าที่ลดระดับแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุต (V_o) ให้ต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต (V_i) วงจรทอนระดับแบบทั่วไปประกอบไปด้วย สวิตช์ ไดโอด ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ [13] เชื่อมต่อกันดังรูปที่ 11 ส่วนตัวต้านทานคือโหลด



รูปที่ 11 วงจรทอนระดับแบบทั่วไป

การทำงานของวงจรทอนระดับมีอยู่ 2 แบบคือ แบบกระแสไฟฟ้าต่อเนื่อง และแบบกระแสไฟฟ้าไม่ต่อเนื่อง ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทำงานของวงจรทอนระดับแบบกระแสไฟฟ้าต่อเนื่องเท่านั้น โดยสมมติให้วงจรทอนระดับประกอบจากอุปกรณ์ในอุดมคติ มีประสิทธิภาพ 100% และจะวิเคราะห์วงจรในสภาวะอยู่ตัวเท่านั้น การทำงานของวงจรทอนระดับสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง ตามการทำงานของสวิตช์ เช่นมอสเฟต (MOSFET) หรือไอจีบีที (IGBT) กำหนดให้คาบการทำงานของวงจรทอนระดับหนึ่งรอบใช้เวลาเท่ากับ T และค่าวิญจักรงาน (D) คือสัดส่วนเวลาที่สวิตช์ต่อวงจรด้วยคาบการทำงาน (T) ค่าวิญจักรงานมีค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 1 เท่านั้น

ช่วงที่สวิตช์ต่อวงจร ($0 < t < DT$)

วงจรสมมูลขณะที่สวิตช์ต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 12 (ก) ไดโอดจะถูกไบอัสย้อนกลับและไม่นำกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไดโอดจะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุต แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าด้านอินพุตลบด้วยแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตซึ่งเป็นค่าบวกเสมอ ดังสมการที่ 2.4 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ในช่วงนี้ การประมาณเชิงเส้นแสดงดังสมการที่ 2.5

$$V_L = V_i - V_o = L \frac{dI_L}{dt} \quad (2.4)$$

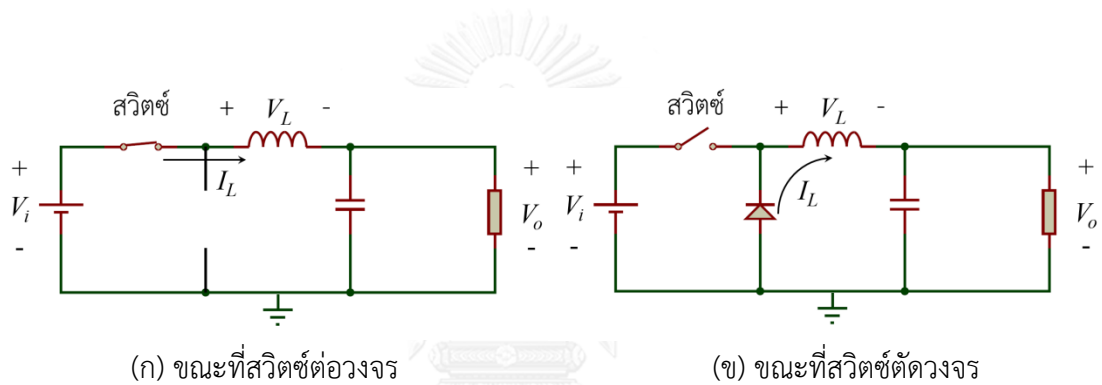
$$(\Delta I_L)_{\text{closed}} = \left(\frac{V_i - V_o}{L} \right) DT \quad (2.5)$$

ช่วงที่สวิตช์ตัดวงจร ($DT < t < T$)

วงจรสมมูลขณะที่สวิตช์ตัดวงจรแสดงดังรูปที่ 12 (ข) ไดโอดจะถูกไบอัสตรง และนำกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำจะเท่ากับค่าลบของแรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุตดังสมการที่ 2.6 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะลดลงอย่างคงที่ในช่วงนี้ การประมาณเชิงเส้นแสดงดังสมการที่ 2.7

$$V_L = -V_o = L \frac{dI_L}{dt} \quad (2.6)$$

$$(\Delta I_L)_{\text{open}} = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T \quad (2.7)$$



รูปที่ 12 การทำงานของวงจรทอนระดับ

เมื่อวงจรทำงานในสภาวะอยู่ตัว กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นและลดลงในปริมาณที่เท่ากัน นำสมการที่ 2.5 เท่ากับสมการที่ 2.7 จะได้ดังสมการที่ 2.8 และเมื่อจัดรูปสมการจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าขาเข้า และแรงดันไฟฟ้าขาออกดังสมการที่ 2.9 และหากพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าขาเข้า [14] และกระแสไฟฟ้าขาออกจะได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ 2.10

$$\left(\frac{V_i - V_o}{L}\right)DT = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T \quad (2.8)$$

$$V_o = V_i D \quad (2.9)$$

$$I_i = I_o D \quad (2.10)$$

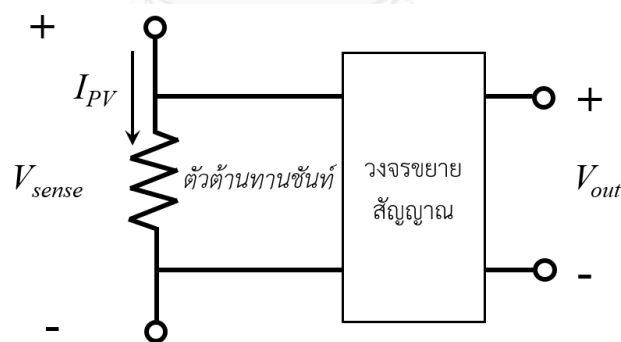
สมการที่ 2.9 แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าขาออกจะมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเสมอเนื่องจากค่าวัฏจักรงานมีค่าอยู่ในช่วง $[0, 1]$ ส่วนค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรทอนระดับคำนวณได้จากสมการที่ 2.11

$$Z_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{V_o}{I_o D^2} = \frac{R_{Load}}{D^2} \quad (2.11)$$

ในกรณีนี้เอาต์พุตอิมพีแดนซ์คือค่าความต้านทานของโหลด สังเกตว่าขนาดของอินพุตอิมพีแดนซ์จะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับเอาต์พุตอิมพีแดนซ์เสมอ การปรับค่าวัฏจักรงานตั้งแต่ 1 ลงมาถึง 0 สามารถทำให้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรทอนระดับมีค่าอยู่ในช่วง $[R_{Load}, \infty)$

2.5.2 วงจรวัดกระแสไฟฟ้า

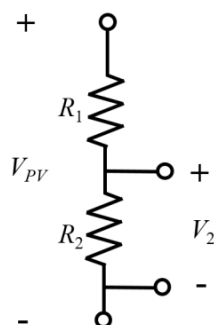
ในงานวิจัยนี้เลือกที่จะวัดกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วิธีการวัดทางตรง คือใช้ตัวต้านทานชัณฑ์ (Shunt resistor) ที่มีค่าน้อยมากต่ออนุกรมกับเส้นทางที่ต้องการวัด และวัดความต่างศักย์ตกคร่อมตัวต้านทานชัณฑ์นั้น ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าน้อยมากจึงจำเป็นต้องมีวงจรขยายสัญญาณ หลังจากนั้นจึงเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ที่ได้เป็นปริมาณกระแสไฟฟ้า วงจรวัดกระแสไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 วงจรวัดกระแสไฟฟ้าโดยใช้ตัวต้านทานชัณฑ์

2.5.3 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า

การวัดแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำได้โดยใช้วงจรแบ่งแรงดัน (Voltage divider) ลดแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการวัด วงจรแบ่งแรงดันอย่างง่ายประกอบด้วยตัวต้านทานสองตัวต่อกันดังรูปที่ 14 จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เขียนได้ดังสมการที่ 2.12



รูปที่ 14 วงจรแบ่งแรงดันอย่างง่าย

$$V_2 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{PV} \quad (2.12)$$

2.5.4 วงจรควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

เพื่อที่จะส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังโหลดให้ได้มากที่สุด จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องอยู่ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสามารถเปลี่ยนตำแหน่งได้ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความเข้มแสง อุณหภูมิ และอิมพีแดนซ์ของโหลด เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้ไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีระบบซึ่งทำหน้าที่ตรวจวัดและปรับจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้อยู่ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33FJ06GS001 ของบริษัทไมโครชิป เทคโนโลยี จำกัด เป็นตัวควบคุมหลักในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ไมโครคอนโทรลเลอร์นี้ถูกออกแบบเพื่อใช้งานร่วมกับแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตช์โหมด รวมไปถึงวงจรแปลงผันไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33FJ06GS001 มีคุณสมบัติที่สำคัญดังต่อไปนี้

คุณสมบัติทั่วไป

- หน่วยประมวลผล dsPIC33F ขนาด 16 บิต ประมวลผลได้เร็วสูงสุด 40 ล้านคำสั่งต่อวินาที
- ทำงานที่แรงดันไฟฟ้า 3.0 ถึง 3.6 โวลต์ ที่อุณหภูมิ -40 ถึง 125 องศาเซลเซียส
- มีหน่วยความจำโปรแกรม 6 กิโลไบต์ และมีหน่วยความจำแรม 256 ไบต์
- มีโหมดบริหารจัดการพลังงานต่ำ 3 โหมด (Sleep, Idle, Doze)
- รับสัญญาณนาฬิกาจากคริสตอล (Crystal) ที่มีความถี่ในช่วง 3 ถึง 32 เมกะเฮิร์ตซ์
- มีวงจรทวิคูณความถี่สัญญาณนาฬิกา (Phase-Locked Loop) สร้างสัญญาณนาฬิกาความถี่สูงสุดได้ถึง 200 เมกะเฮิร์ตซ์

- มีขาอินพุต/เอาต์พุต 13 ขา แบ่งเป็น 2 พอร์ต (Port) คือพอร์ต A จำนวน 5 ขา และพอร์ต B จำนวน 8 ขา
- รับสัญญาณอินเทอร์รัพท์จากภายนอกได้ 3 ช่อง

โมดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

- ใช้วิธีการแปลงแบบ SAR (Successive approximation register)
- มีความละเอียดสูงสุด 10 บิต
- มีวงจรชั๊กตัวอย่าง 2 ชุด
- รับสัญญาณแอนะล็อกได้ 6 ช่อง
- สามารถกระตุ้นการแปลงสัญญาณได้จากโมดูลสัญญาณพัลส์วิตช์มอดูเลชันความเร็วสูง

โมดูลสร้างสัญญาณพัลส์วิตช์มอดูเลชันความเร็วสูง

- สร้างสัญญาณได้ 2 ช่อง รองรับการขับแบบครึ่งบริดจ์
- ความละเอียดสูงสุด 8.33 นาโนวินาที
- สามารถควบคุมช่วงเวลาเว้นว่าง (Dead time) ได้ทั้งฝั่งขอบขาขึ้น และขอบขาลง

โมดูลตัวจับเวลา

- มีตัวจับเวลาขนาด 16 บิตจำนวน 2 โมดูล

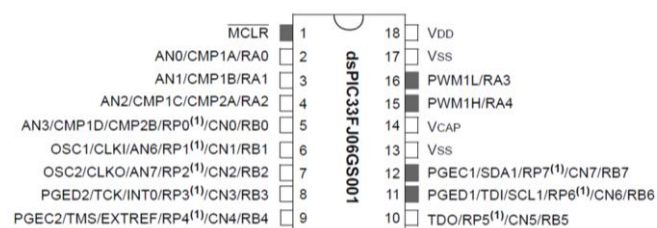
โมดูลสื่อสารแบบอนุกรม

- มีโมดูลสื่อสารแบบ I²C (Inter-integrated circuit) 1 ชุด

แผนผังตำแหน่งขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33FJ06GS001 แสดงดังรูปที่ 15 โดยขาที่อยู่ในพอร์ต B ผู้ใช้สามารถจัดเรียงตำแหน่งขาได้ใหม่

18-Pin SOIC, PDIP

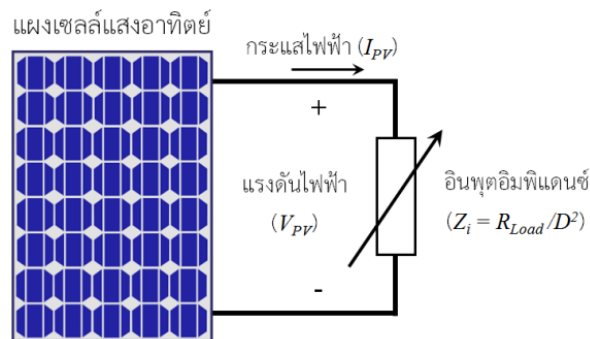
■ = Pins are up to 5V tolerant



รูปที่ 15 แผนผังตำแหน่งขาของ dsPIC33FJ06GS001

2.6 แนวคิดการปรับจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

วงจรถอนระดับที่เชื่อมต่อกับโหลดความต้านทานอาจพิจารณาเป็นตัวต้านทานปรับค่าได้ [15] ดังรูปที่ 16 ซึ่งมีค่าความต้านทานเท่ากับค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.11 จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะอยู่บนจุดตัดระหว่างเส้นโค้งกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า และเส้นโค้งของอินพุตอิมพีแดนซ์ ซึ่งหาจากกฎของโอห์มดังสมการที่ 2.13 เมื่อนำเส้นโค้งของอินพุตอิมพีแดนซ์มาพล็อตลงบนแกนกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า จะได้เส้นตรงที่ทำมุม θ กับแกนแรงดันไฟฟ้าซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.14

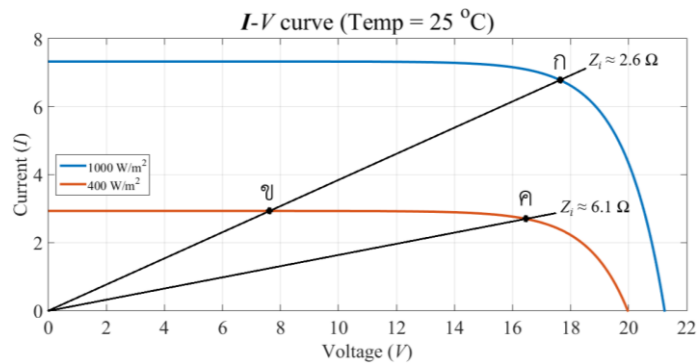


รูปที่ 16 การวิเคราะห์ห้วงจรถอนระดับกับโหลดความต้านทาน

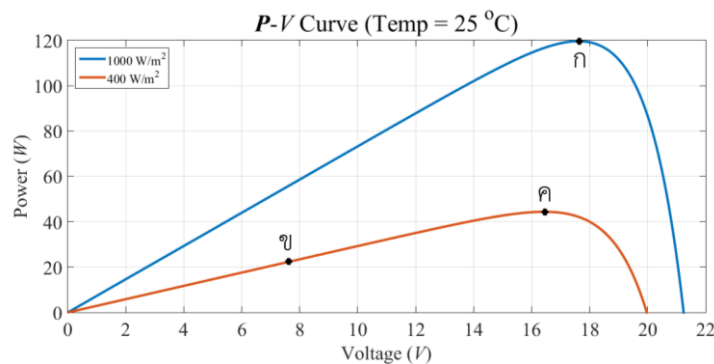
$$V_{PV} = \left(\frac{R_{Load}}{D^2} \right) I_{PV} \quad (2.13)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{D^2}{R_{Load}} \right) \quad (2.14)$$

รูปที่ 17 แสดงให้เห็นถึงการปรับจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ STP6-120/36 เมื่อกำหนดให้โหลด R_{Load} มีค่า 1 โอห์ม และค่าวัฏจักรงานเท่ากับ 0.62 คำนวณค่าอินพุตอิมพีแดนซ์จากสมการที่ 2.11 ได้ประมาณ 2.6 โอห์ม จากรูปที่ 17 (ก) เส้นตรงอินพุตอิมพีแดนซ์ทำมุมกับแกนแรงดันไฟฟ้าประมาณ 21 องศา ที่ความเข้มแสง 1,000 วัตต์/ตารางเมตร จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะอยู่ที่จุด ก ซึ่งเป็นจุดเดียวกันกับจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดดังแสดงบนรูปที่ 17 (ข) ต่อมาเมื่อความเข้มแสงลดลงเหลือ 400 วัตต์/ตารางเมตร จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะย้ายไปอยู่ที่จุด ข จากรูปที่ 17 (ข) จะเห็นว่าจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เบี่ยงออกมาทางด้านซ้ายของจุด ค ซึ่งเป็นจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด เพื่อที่จะปรับจุดทำงานไปยังจุด ค ค่าวัฏจักรงานถูกปรับลดลงเป็น 0.4050 ส่งผลให้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นเป็น 6.1 โอห์ม จากรูปที่ 17 (ก) เส้นตรงทำมุมกับแกนแรงดันไฟฟ้าประมาณ 9.31 องศา และตัดกับเส้นโค้งกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าที่จุด ค



(ก) เส้นโค้งกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า



(ข) เส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

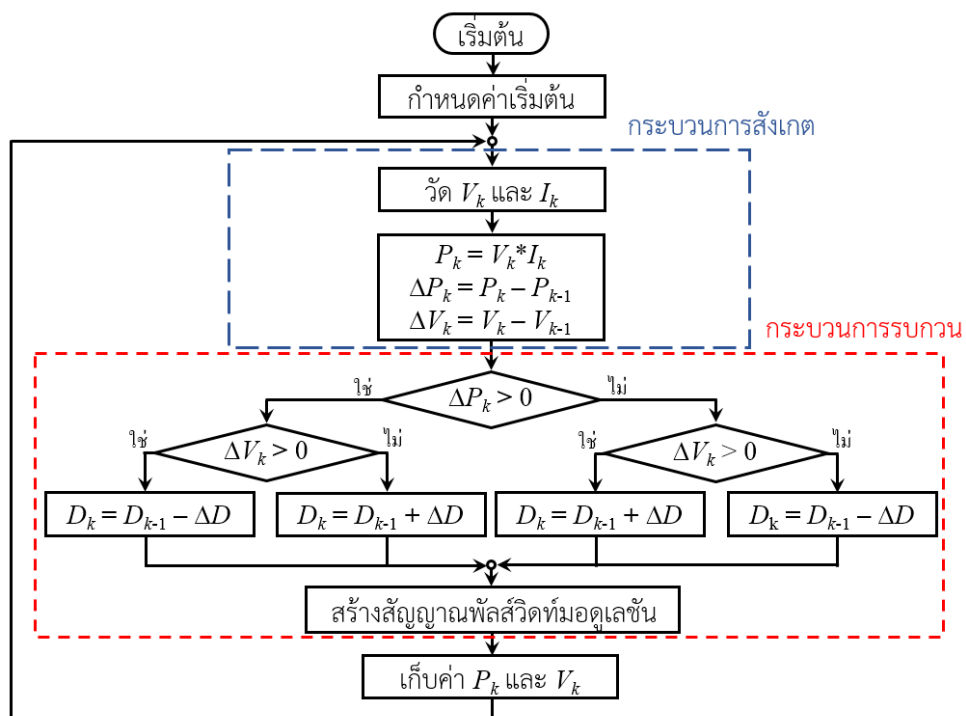
รูปที่ 17 การปรับจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากการการปรับจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แสดงให้เห็นว่าการลดค่าวัฏจักรงานส่งผลให้จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เคลื่อนที่ไปทางด้านขวาของจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด หรือทำให้มุม θ ลดลง หากพิจารณารูปที่ 17 (ก) ที่ความเข้มแสง 1,000 วัตต์/ตารางเมตร ถ้าโหลด R_{Load} มีค่ามากกว่า 2.6 โอห์ม มุม θ จะมีค่าต่ำกว่า 21 องศา และจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะอยู่ทางด้านขวาของจุด ก เสมอ ถึงแม้ว่าจะปรับค่าวัฏจักรงานเป็น 1 ก็ไม่สามารถปรับจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังจุด ก ได้ ดังนั้นข้อจำกัดของการใช้วงจรทอนระดับคือการไม่สามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ในกรณีที่โหลดมีค่าความต้านทานสูง (มีความต้องการใช้ไฟฟ้าน้อย)

2.7 ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิม

ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตเป็นระเบียบวิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ระเบียบวิธีนี้ต้องการทราบค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกทิศทางในการปรับจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แผนผังการทำงานของวิธีรบกวนและสังเกตแสดงดังรูปที่ 18 การทำงานจะแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ คือการสังเกต และการ

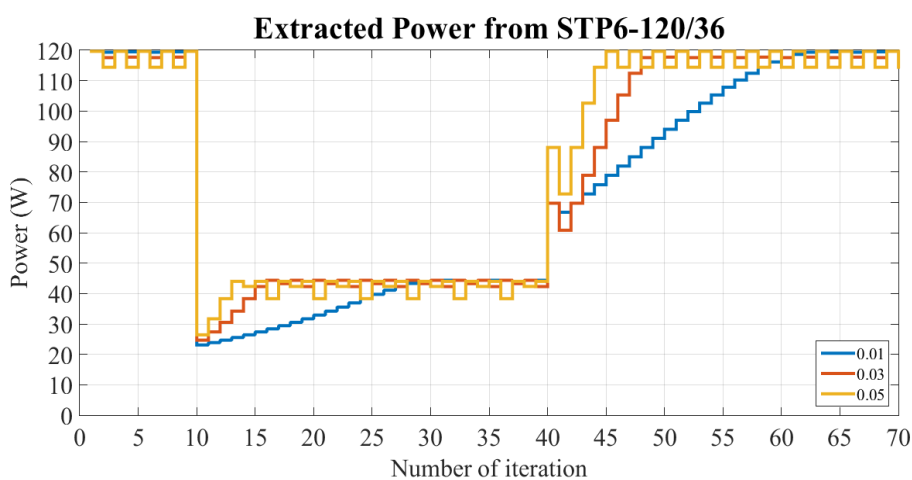
รบกวน เมื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าแล้วจึงคำนวณการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า (ΔP) และการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า (ΔV) หลังจากนั้นค่าที่คำนวณได้ทั้งสองจะถูกนำไปใช้ในการตัดสินใจปรับจุดทำงานโดย หากกำลังไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน แล้วจะปรับลดค่าวัฏจักรงานของสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชัน ส่งผลให้จุดทำงานเคลื่อนที่ไปด้านขวา แต่หากกำลังไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงในทิศตรงข้ามกันแล้วจะเพิ่มค่าวัฏจักรงาน ส่งผลให้จุดทำงานเคลื่อนที่ไปด้านซ้าย [16]



รูปที่ 18 แผนผังการทำงานของวิธีรบกวนและสังเกต

ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตมีหลักการการทำงานที่ง่าย ไม่ซับซ้อน แต่เนื่องจากขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน (ΔD) เป็นเพียงแค่ว่าค่าคงที่จึงทำให้ระบบตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ไม่ดีเท่าที่ควร การจำลองทดสอบสมรรถนะของระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตทำได้โดย กำหนดให้ความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงจาก 1,000 วัตต์/ตารางเมตร เป็น 400 วัตต์/ตารางเมตร ในการคำนวณรอบที่ 10 และเปลี่ยนแปลงจาก 400 วัตต์/ตารางเมตร กลับมาที่ 1,000 วัตต์/ตารางเมตร อีกครั้งในการคำนวณรอบที่ 40 อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และความต้านทานของโหลดตั้งค่าไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส และ 1 โอห์มตลอดการจำลอง ค่าวัฏจักรงานมีค่าเริ่มต้นเป็น 0.62 สำหรับขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงานในการจำลองนี้เลือกใช้สามค่าได้แก่ 0.01 0.03 และ 0.05 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงที่นิยมนำไปใช้กันทั่วไป [17, 18]

ผลลัพธ์จากการจำลองในรูปที่ 19 แสดงให้เห็นว่าหากขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงานมีค่าน้อย (กราฟสีน้ำเงิน) กำลังไฟฟ้าที่ได้ในสถานะอยู่ตัวจะแกว่ง และมีความคลาดเคลื่อนน้อย แต่จะติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ช้าในสถานะชั่วคราวที่ความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน ในทางกลับกันหากขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงานมีค่ามาก (กราฟสีส้ม) ระบบจะติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็ว แต่กำลังไฟฟ้าที่ได้ในสถานะอยู่ตัวจะแกว่งมาก จากการจำลองสรุปได้ว่าระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตไม่สามารถให้ผลตอบสนองที่ดีทั้งในสถานะชั่วคราว และสถานะอยู่ตัวได้พร้อม ๆ กัน



รูปที่ 19 ผลการจำลองสมรรถนะของระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิม

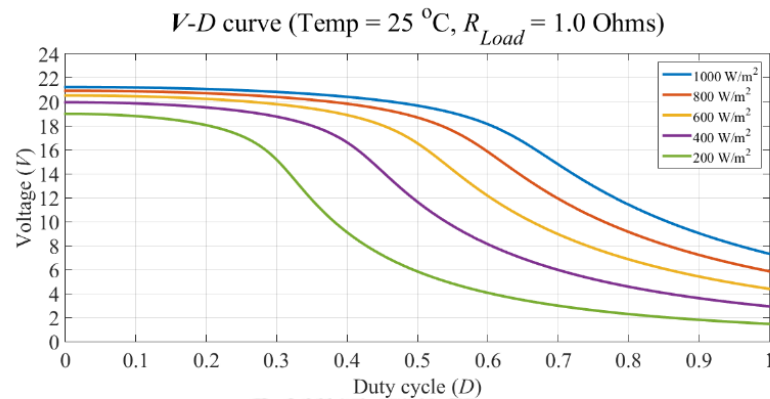
2.8 คุณลักษณะของเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงาน

เส้นโค้งที่กล่าวถึงในหัวข้อ 2.4 บ่งบอกถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวเท่านั้น ในหัวข้อนี้กล่าวถึงเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงาน ซึ่งสามารถอธิบายถึงคุณลักษณะของระบบเซลล์แสงอาทิตย์โดยรวม เส้นโค้งได้มาจากการจำลองในโปรแกรมแมทแลป ค่าวัฏจักรงานของสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันที่ใช้ช่วงจรรถอนระดับถูกปรับตั้งตั้งแต่ 0 จนถึง 1 และทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อย่างต่อเนื่อง

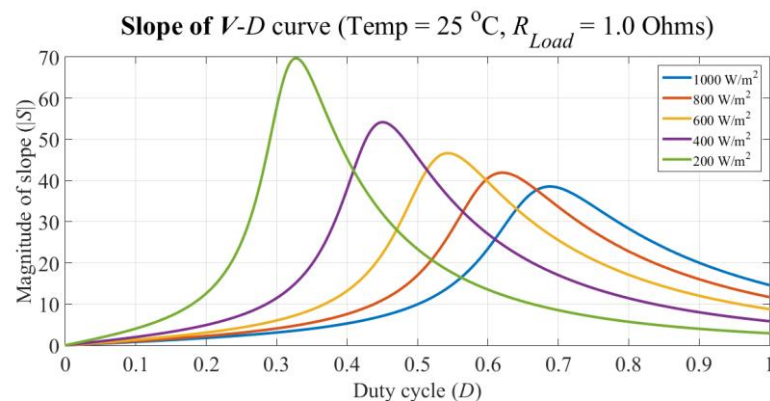
ผลของความเข้มแสง

จากรูปที่ 20 (ก) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และโหลดมีความต้านทาน 1 โอห์ม เมื่อความเข้มแสงลดลง เส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงานที่มีรูปทรงคล้ายตัวอักษรแซด (Z) จะเลื่อนมาทางด้านซ้าย สังเกตว่าถึงแม้ความเข้มแสงจะเปลี่ยนไปแต่รูปทรงของเส้นโค้งไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากนัก

เมื่อพิจารณาขนาดของความชันในรูปที่ 20 (ข) จะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อวัฏจักรงานมีค่าน้อย ความชันของเส้นโค้งทั้งหมดจะมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถประมาณได้ว่าขนาดความชันของเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงานเป็นอิสระจากความเข้มแสงเมื่อวัฏจักรงานมีค่าน้อย หรือเมื่อแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากจนเกือบเท่ากับแรงดันไฟฟ้าขณะวงจรเปิด



(ก) เส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงาน

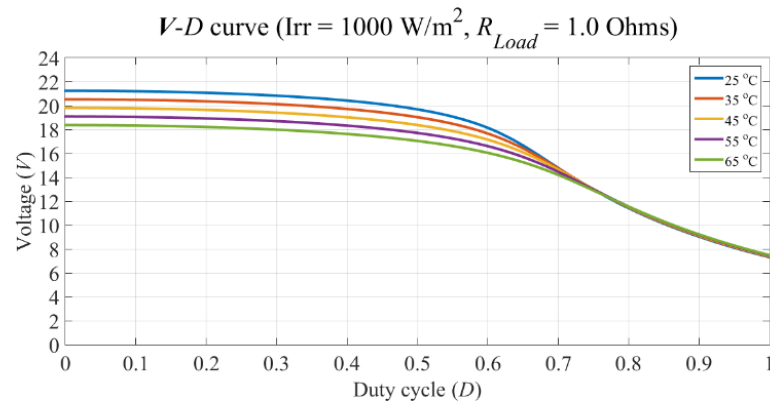


(ข) ขนาดของความชันของเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงาน

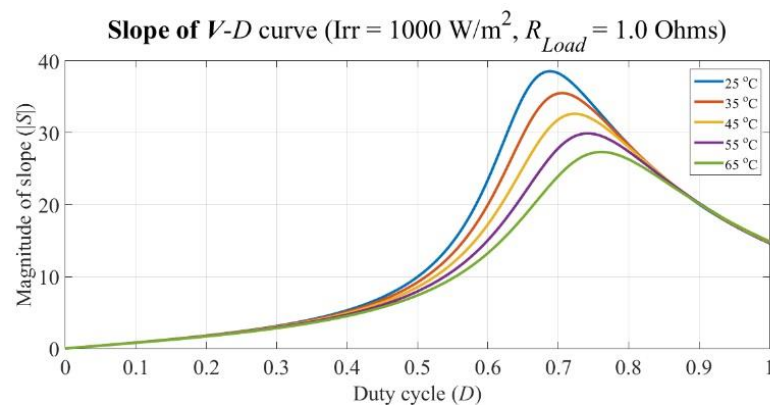
รูปที่ 20 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อคุณลักษณะของเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงาน

ผลของอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อกำหนดให้ความเข้มแสงเท่ากับ 1,000 วัตต์/ตารางเมตร และโหลดมีความต้านทานเท่ากับ 1 โอห์ม อุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้เส้นโค้งในรูปที่ 21 (ก) ถูกบีบอัดลงในแนวตั้งเล็กน้อย รูปทรงของเส้นโค้งแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ขนาดของความชันในรูปที่ 21 (ข) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อวัฏจักรงานมีค่าน้อยจึงสรุปได้ว่าขนาดของความชันเป็นอิสระจากอุณหภูมิ



(ก) เส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงาน



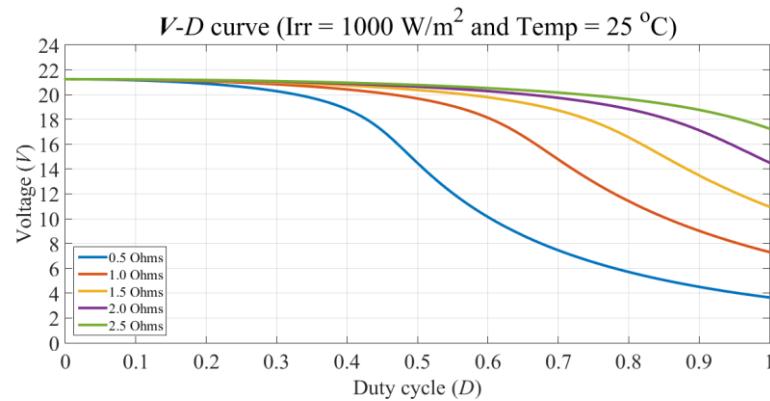
(ข) ขนาดของความชันของเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงาน

รูปที่ 21 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณลักษณะของเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงาน

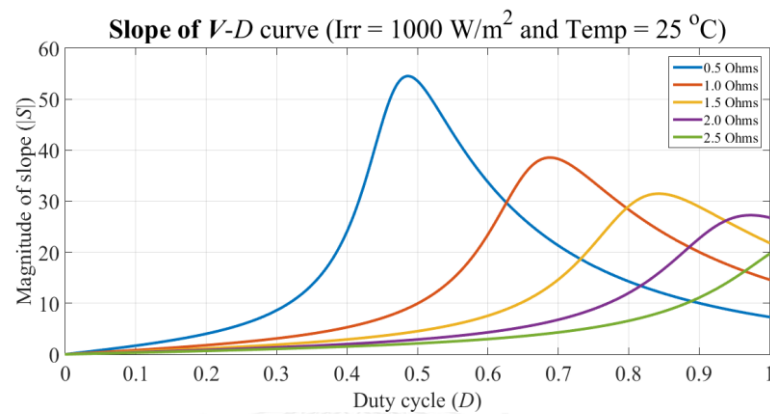
ผลของโหนดความต้านทาน

ที่ความเข้มแสงเป็น 1,000 วัตต์/ตารางเมตร และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงานที่โหนดความต้านทานต่างกัน 5 ค่าได้แก่ 0.5, 1.0 (เส้นสีแดง), 1.5, 2.0 และ 2.5 โอห์มแสดงดังรูปที่ 22 (ก) ถึงแม้ความต้านทานของโหนดเปลี่ยนไปเส้นโค้งยังคงมีรูปร่างรูปทรงคล้ายตัวอักษรแซดเช่นเดิม แต่ความต้านทานนั้นส่งผลให้เส้นโค้งเลื่อนได้ หากความต้านทานน้อยลงเส้นโค้งมีแนวโน้มจะเลื่อนมาทางซ้ายและมีความชันมากขึ้น แต่หากความต้านทานมากขึ้นเส้นโค้งจะเลื่อนไปทางด้านขวา และหากความต้านทานมีค่ามากเกินไปเส้นโค้งจะเลื่อนไปจนเหลือแต่ส่วนบนของเส้นโค้งเท่านั้น ส่วนที่เหลือของเส้นโค้งนั้นไม่สามารถแสดงได้เนื่องจากส่วนดังกล่าวอยู่ในบริเวณที่ไม่สามารถปรับจุดทำงานไปได้ดังที่ได้อธิบายไว้ในตอนท้ายของหัวข้อที่ 2.6

อย่างไรก็ตามหากพิจารณารูปที่ 22 (ข) ก็ยังสามารถประมาณได้ว่าขนาดของความชันเป็นอิสระจากความต้านทานของโหนดเมื่อวัฏจักรงานมีค่าน้อยเช่นเดียวกับกรณีผลของความเข้มแสง



(ก) เส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงาน



(ข) ขนาดของความชันของเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงาน

รูปที่ 22 ผลของโหลดความต้านทานที่มีต่อคุณลักษณะของเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงาน

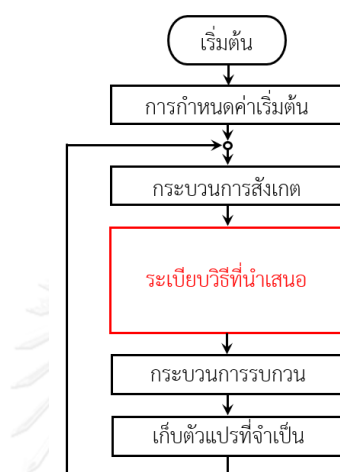
จากการจำลองข้างต้นแสดงถึงความเป็นไปได้ที่จะนำขนาดของความชันของเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงานมาใช้บ่งชี้ว่าจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ห่างจากจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดทางด้านขวาหรือไม่ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เป็นอิสระจากปัจจัยต่าง ๆ เมื่อวัฏจักรงานมีค่าน้อย

2.9 ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตที่ถูกรับปรับแต่ง

เนื่องจากระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมมีขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงานคงที่ทำให้การติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดไม่สามารถทำได้อย่างรวดเร็วในสภาวะชั่วคราว และมีความคลาดเคลื่อนน้อยในสภาวะอยู่ตัวไปพร้อม ๆ กันได้ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.7 ดังนั้นขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงานควรที่จะปรับได้เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด หากจุดทำงานอยู่ห่างจากจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงานควรมีค่ามาก

ในทางกลับกันหากจุดทำงานอยู่ใกล้กับจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงานควรมีค่าน้อย

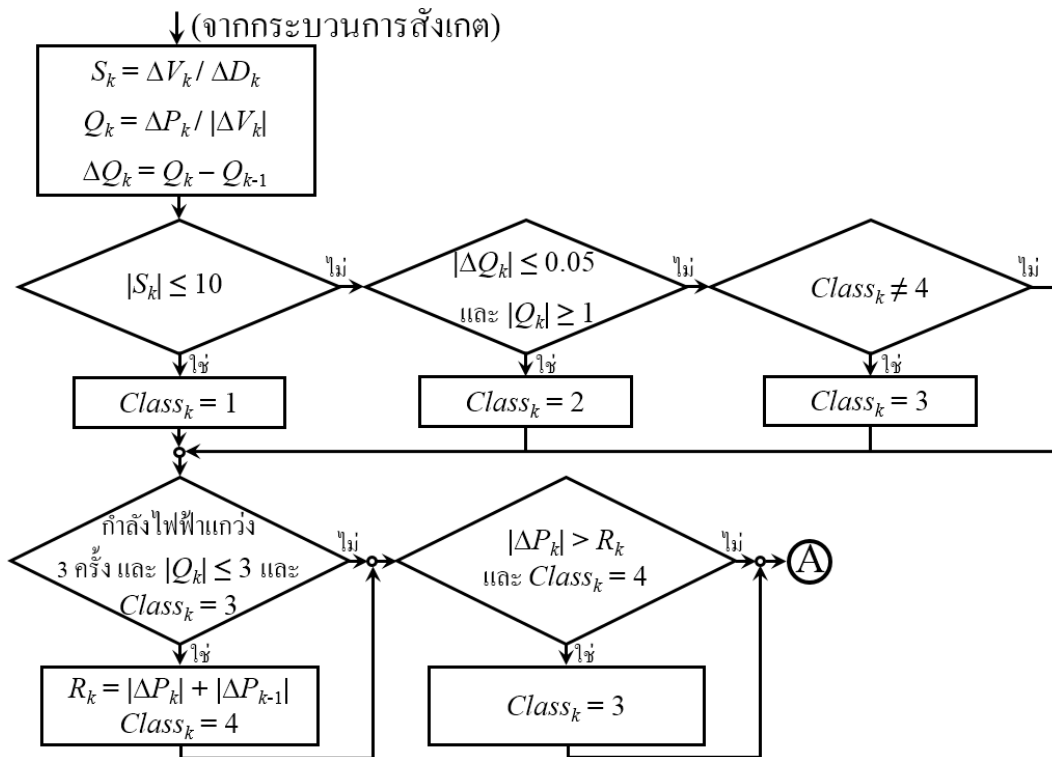
เพื่อแก้ปัญหาข้างต้นงานวิจัยนี้จึงเสนอระเบียบวิธีที่ทำหน้าที่เลือกขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน โดยนำระเบียบวิธีที่นำเสนอเข้าไปใส่อยู่ระหว่างกระบวนการสังเกต และกระบวนการรวบรวมของระเบียบวิธีดั้งเดิม ได้เป็นระเบียบวิธีรวบรวมและสังเกตที่ถูกปรับแต่งดังรูปที่ 23



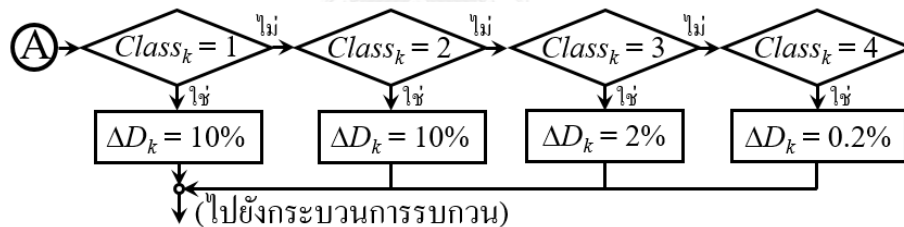
รูปที่ 23 ระเบียบวิธีรวบรวมและสังเกตที่ถูกปรับแต่ง

ระเบียบวิธีที่นำเสนอประกอบด้วยสองกระบวนการ คือกระบวนการตรวจสอบจุดทำงาน และกระบวนการกำหนดขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน ฟังก์ชันการทำงานของระเบียบวิธีที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 24 หลักการทำงานของกระบวนการตรวจสอบจุดทำงานในรูปที่ 24 (ก) โดยรวมแล้วคือการประมาณคุณลักษณะของเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า และเส้นโค้งแรงไฟฟ้าและวัฏจักรงานเพื่อใช้จำแนกบริเวณที่จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตั้งอยู่ โดยแบ่งออกได้เป็นสี่บริเวณ หรือสี่คลาส

ถ้าหากขนาดความชันของเส้นโค้งแรงไฟฟ้าและวัฏจักรงาน ($|S|$) มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 อาจตีความได้ว่าจุดทำงานอยู่ห่างจากจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดไปทางด้านขวา ในกรณีนี้จำแนกได้เป็นคลาส 1 การเลือกค่าคงที่ในเงื่อนไขทำได้โดยพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นโค้งของความชันของเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงาน (รูปที่ 20 (ข)) เทียบกับค่าวัฏจักรงานดังรูปที่ 25 สังเกตทางด้านซ้ายของกราฟพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่าน้อยกว่า 3 ซึ่งบ่งบอกว่าความชันของเส้นโค้งที่ความเข้มแสงต่าง ๆ ทั้ง 5 เส้นมีขนาดใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงได้ว่าช่วงที่ค่าวัฏจักรงานมีค่าน้อยกว่า 0.18 หรือช่วงที่ $|S|$ มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 คือบริเวณคลาส 1

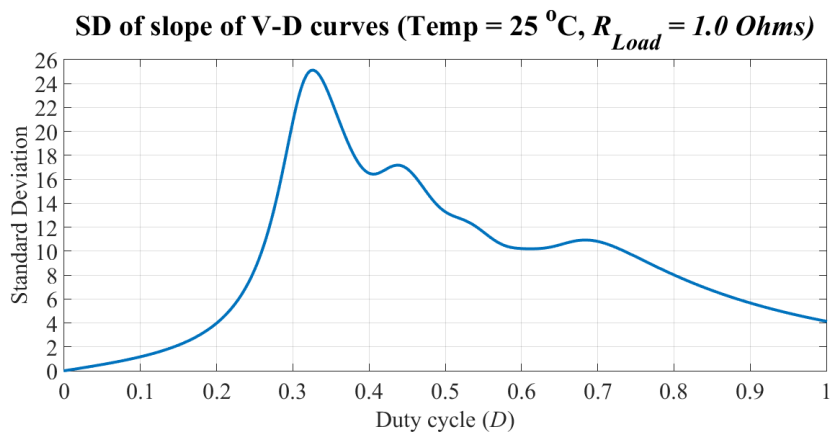


(ก) กระบวนการตรวจสอบจุดทำงาน



(ข) กระบวนการกำหนดขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าวิญจักรงาน

รูปที่ 24 แผนผังการทำงานของระเบียบวิธีที่นำเสนอ



รูปที่ 25 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความชันของเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวิญจักรงาน

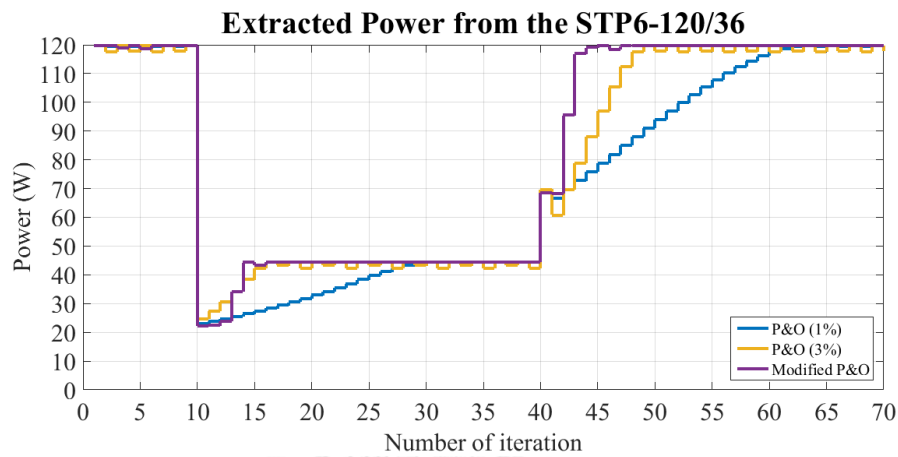
ต่อมาถ้าจุดทำงานไม่ได้ถูกจำแนกให้อยู่ในคลาส 1 ก็จะตรวจสอบเงื่อนไขของคลาส 2 ต่อไป โดยหากผลต่างความชันของเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (ΔQ) มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05 (เลือกจากรูปที่ 9 (ค)) อาจตีความได้ว่าจุดทำงานจะอยู่ห่างจากจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดไปทาง ด้านซ้าย อย่างไรก็ตามเมื่อความเข้มแสงน้อยกว่า 400 วัตต์/ตารางเมตร ค่า ΔQ จะน้อยกว่า 0.05 เสมอทำให้การจำแนกไม่ถูกต้องดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มเงื่อนไขว่าขนาดความชันของเส้นโค้ง กำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (Q) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 ด้วย (เลือกจากรูปที่ 9 (ข)) หลังจากนั้น ถ้าจุดทำงานไม่ถูกจำแนกให้อยู่ทั้งในคลาส 1 และคลาส 2 อีกทั้งจุดทำงานยังไม่เข้าใกล้จุดกำลังไฟฟ้า สูงสุด (ไม่อยู่ในคลาส 4) จะจำแนกกรณีนี้ให้เป็นคลาส 3

สุดท้ายจะเป็นเงื่อนไขเพื่อใช้ในการเข้าสู่/ออกจากสถานะอยู่ตัว หรือคลาส 4 เพื่อที่จะเข้าสู่ สถานะอยู่ตัวเครื่องหมายของการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า (ΔP) ต้องเปลี่ยนไปสามครั้ง และขนาด ความชันของเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่า 3 (เลือกจากรูปที่ 9 (ข)) นั้น หมายความว่าจุดทำงานกำลังแกว่งไปมาอยู่รอบ ๆ จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด และทันทีที่จำแนกให้เป็น คลาส 4 จะคำนวณค่าขีดเริ่มเปลี่ยนของการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้า (R) หรือผลบวกของขนาด การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในรอบปัจจุบัน และรอบก่อนหน้า หากระบบยังคงอยู่ในสถานะอยู่ตัว ขนาดการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าในรอบปัจจุบันจะมีค่าน้อยกว่า R เสมอ และจะทำให้อยู่ใน คลาส 4 ต่อไปเรื่อย ๆ หากมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจนทำให้ขนาด การเปลี่ยนแปลงของ กำลังไฟฟ้ามากกว่า R จุดทำงานจะไม่อยู่ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ในกรณีนี้จะจำแนกให้กลับมาอยู่ใน คลาส 3 หรือถ้าหากมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงมาก ระเบียบวิธีที่นำเสนอสามารถจำแนกให้จุด ทำงานกลับมาอยู่ในคลาส 1 หรือคลาส 2 ได้ทันทีตามเงื่อนไขของแต่ละคลาสที่อธิบายไว้ข้างต้น

กระบวนการต่อมาคือการกำหนดขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงานในรูปที่ 24 (ข) ใน คลาสที่ 1 และ 2 จะกำหนดให้ขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงานมีค่ามากเนื่องจากต้องการให้ จุดทำงานที่อยู่ห่างไกลจากจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเคลื่อนที่เร็วขึ้น ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ใช้ขนาด 10% ซึ่งมีขนาดมากกว่าระเบียบวิธีแบบดั้งเดิม (1% ถึง 5%) ส่วนคลาสที่ 3 จะกำหนดให้ขนาดของการ เปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงานมีค่าน้อยตามระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิม (ขนาด 2%) และ สำหรับคลาสที่ 4 จุดทำงานอยู่ใกล้จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด จึงกำหนดให้ขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏ จักรงานมีค่าน้อยมากเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัว โดยเลือกใช้ขนาด 0.2% ซึ่งไม่น้อย เกินไปจนอยู่ในย่านสัญญาณรบกวน

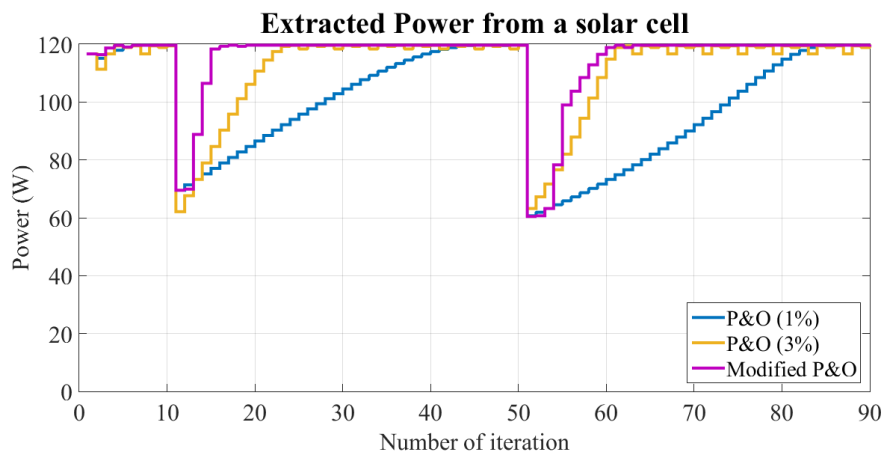
ทำการจำลองในลักษณะเดียวกันกับการจำลองในหัวข้อที่ 2.7 คือกำหนดอุณหภูมิของแผง เซลล์แสงอาทิตย์ 25 องศาเซลเซียส และความต้านทานของโหลด 1 โอห์ม ผลเปรียบเทียบสมรรถนะ การติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดระหว่างระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิม และระเบียบวิธีที่ถูก

ปรับแต่งแสดงดังรูปที่ 26 ระเบียบวิธีที่ถูกปรับแต่ง (กราฟสีม่วง) สามารถปรับจุดทำงานให้ไปอยู่ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วกว่าระเบียบวิธีแบบดั้งเดิมโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น และเมื่อเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าไปได้ประมาณ 2 วัตต์ (เทียบกับกราฟสีส้ม)



รูปที่ 26 ผลการจำลองเปรียบเทียบสมรรถนะของระเบียบวิธีเมื่อความเข้มแสงเปลี่ยนแปลง

ทำการจำลองเพิ่มเติมโดยกำหนดให้ความเข้มแสง และอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่ 1000 วัตต์/ตารางเมตร และ 25 องศาเซลเซียส ช่วงเวลา 10 วินาทีแรกความต้านทานของโหลดเท่ากับ 1.13 โอห์ม ต่อมาจึงปรับความต้านทานของโหลดเพิ่มขึ้นเป็น 2.6 โอห์ม จนถึงวินาทีที่ 50 สูดท้ายปรับความต้านทานของโหลดกลับมาเป็น 1.13 โอห์ม อีกครั้ง ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 27 ระเบียบวิธีที่ถูกปรับแต่งติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วที่สุดโดยมีนัยสำคัญเมื่อความต้านทานของโหลดเพิ่มขึ้น และมีการแกว่งในสภาวะอยู่ตัวน้อยที่สุด ผลการจำลองทั้งหมดบ่งชี้ว่าระเบียบวิธีที่ถูกปรับแต่งมีแนวโน้มที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ และมีสมรรถนะที่ดีกว่าระเบียบวิธีดั้งเดิม



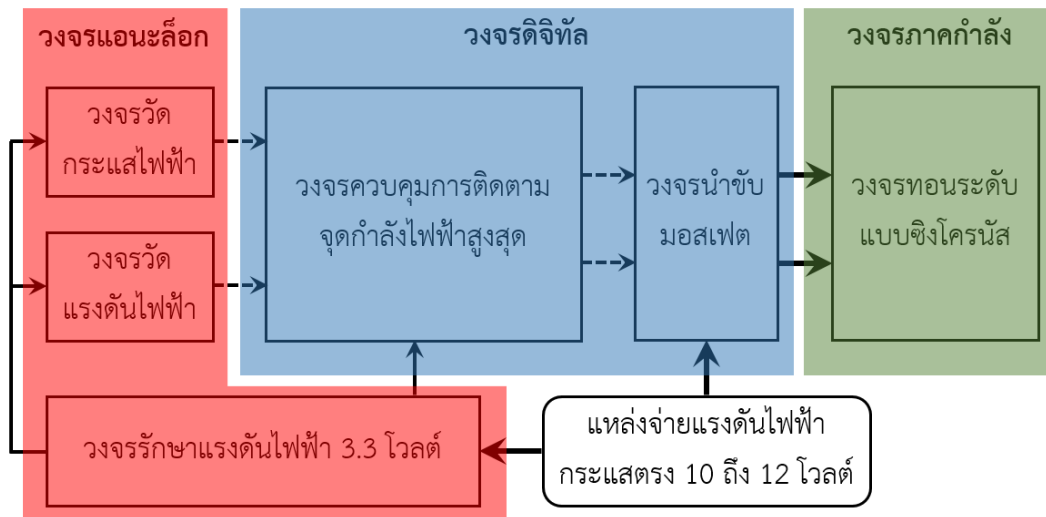
รูปที่ 27 ผลการจำลองเปรียบเทียบสมรรถนะของระเบียบวิธีเมื่อโอห์มเปลี่ยนแปลง

บทที่ 3

หลักการออกแบบฮาร์ดแวร์

ในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดการออกแบบตัวเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดซึ่งประกอบด้วยวงจรทอนระดับแบบซิงโครนัส (Synchronous buck converter) วงจรนำขั้วมอสเฟต วงจรรักษาแรงดันไฟฟ้า วงจรวัดกระแสไฟฟ้า วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า และวงจรควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด รวมไปถึงหลักการที่ใช้ออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์ (Print circuit board)

ภาพรวมของวงจรภายในเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแสดงดังรูปที่ 28 วงจรแบ่งออกเป็นสามกลุ่มหลัก ๆ ได้แก่ วงจรแอนะล็อก วงจรดิจิทัล และวงจรภาคกำลัง วงจรทั้งสามกลุ่มนี้ควรจัดวางแยกกัน รวมถึงแยกกราวด์ (Ground) เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนกันและกัน [19] เครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 10 ถึง 12 โวลต์เพื่อเริ่มทำงาน โดยวงจรนำขั้วมอสเฟตจะรับไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายโดยตรง ส่วนวงจรวัดกระแสไฟฟ้า วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า และวงจรควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดต้องการแรงดันไฟฟ้า 3.3 โวลต์ จึงต้องมีวงจรรักษาแรงดันไฟฟ้าทำหน้าที่ลดแรงดันไฟฟ้าจาก 12 โวลต์ ให้เหลือ 3.3 โวลต์

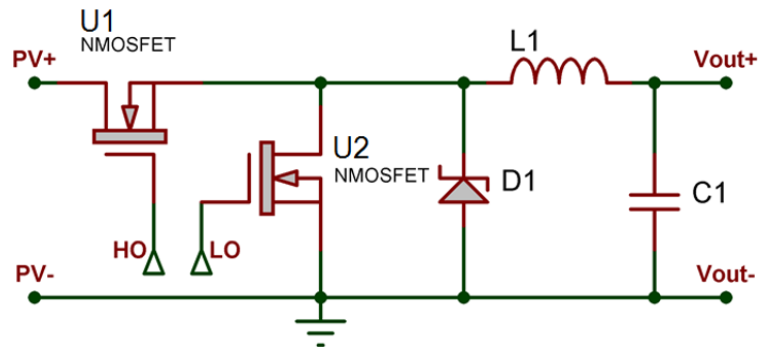


รูปที่ 28 แผนภาพวงจรภายในเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

3.1 การออกแบบวงจรทอนระดับแบบซิงโครนัส

วงจรทอนระดับสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าต่ำ แต่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านสูง วงจรทอนระดับแบบซิงโครนัสดังรูปที่ 29 เป็นที่นิยมมากกว่าวงจรทอนระดับแบบทั่วไปเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้ามกกว่า จากรูปที่ 11 ไดโอดถูกแทนที่

ด้วยมอสเฟต (U2) ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม และความต้านทานขณะนำกระแส ($R_{DS(ON)}$) น้อยกว่า ไดโอดมาก กำลังไฟฟ้าสูญเสียจึงลดลง [14]



รูปที่ 29 วงจรทอนระดับแบบซิงโครนัส

ในงานวิจัยนี้ออกแบบวงจรทอนระดับให้ทำงานในโหมดกระแสไฟฟ้าต่อเนื่อง ความถี่การสวิตช์ทั่วไปมักมีค่าตั้งแต่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ขึ้นไปจนถึงระดับเมกะเฮิร์ตซ์เพื่อหลีกเลี่ยงเสียง ยิ่งความถี่สูงขนาดของตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุก็จะเล็กลง แต่จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะสวิตช์มากขึ้นเช่นกัน การออกแบบในเบื้องต้นได้กำหนดคุณลักษณะของวงจรทอนระดับดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณลักษณะของวงจรทอนระดับแบบซิงโครนัสที่ต้องการออกแบบ

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	เป้าหมาย
แรงดันไฟฟ้าขาเข้า	V_{IN}	18 โวลต์
แรงดันไฟฟ้าขาออก	V_{OUT}	12 โวลต์
ความถี่การสวิตช์	F_{SW}	100 กิโลเฮิร์ตซ์
กระแสกระแสเพิ่มที่ตัวเหนี่ยวนำ	LIR	30%
แรงดันไฟฟ้ากระแสเพิ่มที่ตัวเก็บประจุขาออก	CVR	2%
แรงดันไฟฟ้าขาออกพุ่งเกิน	V_{OV}	1%
กระแสไฟฟ้าขาออกสูงสุด	$I_{OUT,MAX}$	10 แอมแปร์

จากสมการที่ 2.9 สามารถประมาณค่าวัฏจักรงานได้ดังสมการที่ 3.1

$$D = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{12}{18} = 66.67\% \quad (3.1)$$

3.1.1 การเลือกตัวเหนี่ยวนำ

ขนาดของตัวเหนี่ยวนำ และกระแสไฟฟ้ายอดที่ไหลผ่านสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 และสมการที่ 3.3 ตามลำดับ [20-22]

$$L = \frac{(V_{IN} - V_{OUT}) \cdot D}{LIR \cdot I_{OUT,MAX} \cdot F_{SW}} = \frac{(18 - 12) \cdot 66.67\%}{30\% \cdot 10 \cdot 100000} = 13.33 \text{ ไมโครเฮนรี} \quad (3.2)$$

$$I_{L,Peak} = I_{OUT,MAX} + \frac{LIR \cdot I_{OUT,MAX}}{2} = 10 + \frac{30\% \cdot 10}{2} = 11.5 \text{ แอมแปร์} \quad (3.3)$$

ในทางปฏิบัติขนาดของตัวเหนี่ยวนำควรมีขนาดใหญ่กว่าที่คำนวณไว้ 25% ขึ้นไป และกระแสอิ่มตัว (Saturation current) ของตัวเหนี่ยวนำก็ควรมีค่ามากกว่ากระแสไฟฟ้ายอดที่คำนวณได้ 20% ขึ้นไป งานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำ WE-HCF-7443642200 ของบริษัท Würth Electronics มีขนาด $22 \pm 15\%$ ไมโครเฮนรี (ที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์) และมีกระแสอิ่มตัว 18 แอมแปร์ แกนเฟอร์ไรต์ผสมแมงกานีสสังกะสี ซึ่งเหมาะกับงานที่ใช้ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ขึ้นไป [23]

บนเว็บไซต์ของบริษัท (<http://www.we-online.com/redexpert-web>) มีเครื่องมือช่วยเลือกตัวเหนี่ยวนำดังรูปที่ 30 เมื่อป้อนพารามิเตอร์ที่ต้องการทางด้านซ้ายมือแล้ว ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับที่คำนวณไว้ในสมการที่ 3.1 ถึงสมการที่ 3.3 กำลังไฟฟ้าสูญเสียในตัวเหนี่ยวนำมีสาเหตุมาจากขดลวด (Copper loss) แกน (Core losses) และกระแสเอ็ดดี้ (Eddy current losses) ซึ่งขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ อีกเช่น คุณสมบัติของวัสดุแกน ลักษณะการพันขดลวด เป็นต้น การคำนวณจึงทำได้ยาก บนเว็บไซต์ได้ประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดไว้ 0.364 วัตต์ และมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 11.5 เคลวิน

The screenshot shows the Würth Electronics RedExpert website interface. The main content is a configuration tool for a Buck Converter. The tool displays the following parameters:

PARAMETERS	EDIT
Input: 18.0 V (12.0-22.0 V)	
Output: 12.0 V (10.0 A)	
Switch: 100 kHz	
Inductor: 30% (Single)	
Diode: 0.30 V	

DETAILS for WE-HCF-7443642200:

Parameter	Value
I_{rms}	≥ 10.0 A
I_{max}	≥ 11.5 A
L_{opt}	13.4 μ H
t_{on}	6.72 μ s
DC	0.67
ΔI_L	1.83 A
I_{peak}	10.9 A
AC Losses	124 mW
DC Losses	240 mW
Total Losses	364 mW
Temp. Rise	11.5 K

The tool also includes filters for Type (Single), Inductor current ($I_L \geq 10.0$ A), and Saturation current ($I_{sat} \geq 11.5$ A). It features graphs for Inductance / Current and Temperature Rise / DC Current.

รูปที่ 30 เครื่องมือช่วยเลือกตัวเหนี่ยวนำของบริษัท Würth Electronics

3.1.2 การเลือกตัวเก็บประจุขาออก

เมื่อพิจารณาจากแรงดันไฟฟ้ากระแสเฟืองที่ตัวเก็บประจุขาออกที่กำหนดไว้ 2% สามารถคำนวณขนาดของตัวเก็บประจุขาออกที่น้อยที่สุดได้จากสมการที่ 3.4 [20, 21]

$$C_{OUT,MIN} = \frac{LIR \cdot I_{OUT,MAX}}{8 \cdot F_{SW} \cdot CVR \cdot V_{OUT}} = \frac{30\% \cdot 10}{8 \cdot 100000 \cdot 2\% \cdot 12} = 15.625 \text{ ไมโครฟารัด} \quad (3.4)$$

การคำนวณข้างต้นคำนึงถึงแรงดันกระแสเฟืองขาออกเท่านั้น ในการประยุกต์ใช้งานจริงโหลดอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ (ดึงกระแสไฟฟ้าไปใช้มากขึ้น หรือน้อยลง) ซึ่งจะส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขาออกพุ่งเกิน ในกรณีที่แย่ที่สุดคือเมื่อโหลดเปลี่ยนสถานะจากดึงกระแสไฟฟ้าสูงสุดมาเป็นสถานะไม่มีโหลด พลังงานรวมที่อยู่ใน ตัวเก็บประจุขาออก และตัวเหนี่ยวนำหาได้จากสมการที่ 3.5 [20]

$$E_{TOTAL} = E_C + E_L = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_C^2 + \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_L^2 \quad (3.5)$$

เพื่อที่จะรักษาแรงดันไม่ให้พุ่งมากเกินไป พลังงานทั้งหมดในทั้งสองสถานะ (ก่อนโหลดมีการเปลี่ยนแปลง และหลังโหลดเปลี่ยนแปลงไปแล้ว) จะต้องเท่ากัน โดยหลังจากที่โหลดเปลี่ยนแปลง พลังงานที่สะสมในตัวเหนี่ยวนำจะถูกถ่ายเทมายังตัวเก็บประจุ จึงเขียนได้เป็นสมการที่ 3.6 และแก้สมการหาขนาดตัวเก็บประจุที่น้อยที่สุดได้ดังสมการที่ 3.7

$$\frac{1}{2} \cdot C \cdot V_C^2 + \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{L,Peak}^2 = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (V_{OV} + V_{OUT})^2 \quad (3.6)$$

$$C_{OUT,MIN} = \frac{L \cdot I_{L,Peak}^2}{(V_{OV} + V_{OUT})^2 - V_{OUT}^2} = \frac{22 \times 10^{-6} \cdot 11.5^2}{(0.12 + 12)^2 - 12^2} = 1005.22 \text{ ไมโครฟารัด} \quad (3.7)$$

ขนาดตัวเก็บประจุที่ใช้จริงควรมากกว่าค่าที่คำนวณได้อย่างน้อย 20% และควรมีค่าความต้านทานอนุกรมแฝง (ESR) ต่ำเพื่อลดแรงดันไฟฟ้ากระแสเฟือง หากใช้ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิกควรเลือกใช้ในกลุ่มคลาส 2 ที่มีวัสดุไดอิเล็กตริกที่ทนต่ออุณหภูมิดีกว่า X5R งานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวเก็บประจุอิเล็กทรอนิกส์โพลีโพลีเมอร์ EEU-FC1H152L ขนาด 1500 ไมโครฟารัด ต่อขนานกับตัวเก็บประจุเซรามิก C5750X7R1H106M ขนาด 10 ไมโครฟารัด 2 ตัว เพื่อลดค่าความต้านทานอนุกรมแฝง และแบ่งกระแสไฟฟ้ากระแสเฟือง

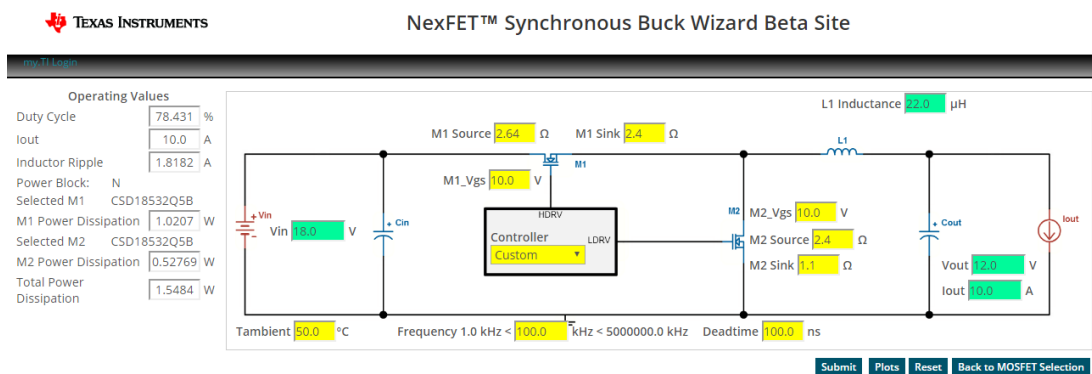
3.1.3 การเลือกมอสเฟต

การเลือกมอสเฟตจำเป็นต้องพิจารณาถึงคุณลักษณะด้านต่าง ๆ รวมกัน ในเบื้องต้นควรเลือกมอสเฟตที่สามารถทนแรงดันได้มากกว่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้า ซึ่งโดยส่วนใหญ่มอสเฟตชนิดเอ็นจะทนแรงดันได้มากกว่ามอสเฟตชนิดพี ต่อมาจึงเลือกมอสเฟตที่มีค่าประจุเกต (Gate charge, Q_g) ต่ำซึ่งหมายถึงปริมาณประจุที่ต้องอัดเข้า หรือคายออกจากขาเกตเพื่อให้มอสเฟตนำกระแสไฟฟ้า หรือหยุดนำกระแส ยิ่งประจุเกตมีค่าน้อยพลังงานที่ใช้ในการขับก็จะน้อยลงด้วย และช่วยให้การสวิตช์ได้เร็วขึ้นด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ตัวนำขับสามารถจ่ายได้ [24]

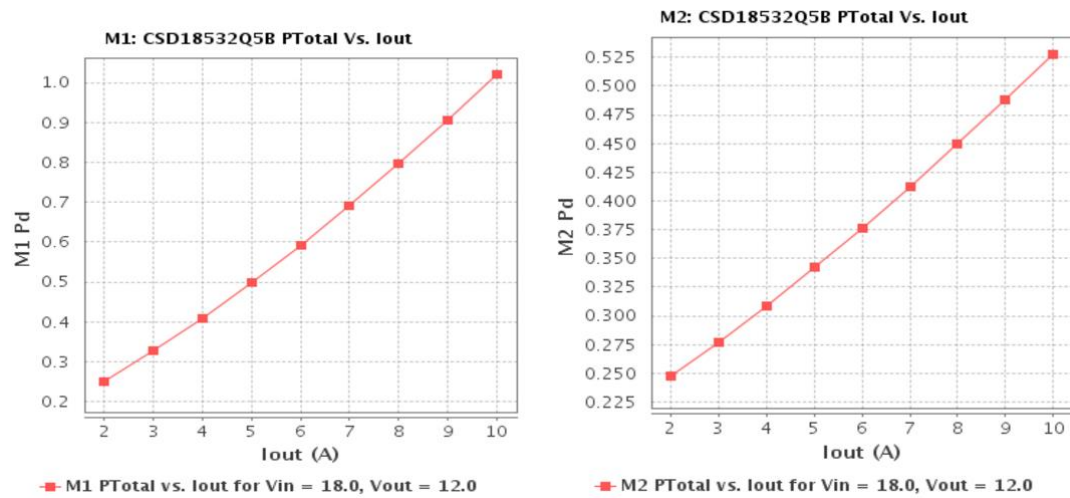
พิจารณาเลือกมอสเฟตที่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า สังเกตจากสัดส่วนของประจุเกตเดรน และประจุเกตซอร์ส (Q_{gd}/Q_{gs}) ควรมีค่าน้อยกว่า 1 เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดที่ปรสิติก (Parasitic BJT) นำกระแสไฟฟ้าโดยบังเอิญในช่วงที่ต้องการให้มอสเฟตหยุดนำกระแสไฟฟ้า จากรูปที่ 29 มอสเฟต (U1 และ U2) จะสลับกันนำกระแสไฟฟ้า หากมอสเฟตนำกระแสไฟฟ้าพร้อมกันจะเกิดการลัดวงจร และทำให้กระแสไฟฟ้าพุ่งสูงฉับพลัน (Shoot-through current) ซึ่งก่อให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียอย่างมาก และอาจทำให้มอสเฟตเสียหายได้ [25]

กระแสไฟฟ้าไหลผ่านมอสเฟตมีปริมาณมาก เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย มอสเฟตที่ใช้ควรมีความต้านทานขณะนำกระแสไฟฟ้า ($R_{DS(ON)}$) ต่ำ สุดท้ายจึงพิจารณากำลังไฟฟ้าสูญเสีย และความสามารถในการระบายความร้อน ในงานวิจัยนี้เลือกมอสเฟตกำลัง CSD18532Q5B ของบริษัท Texas Instruments เป็นมอสเฟตชนิดเอ็น ทนแรงดันไฟฟ้าเกตซอร์สได้ 60 โวลต์ มีค่าประจุเกต 44 นาโนคูลอมบ์ สัดส่วนของประจุเกตเดรน และประจุเกตซอร์สเท่ากับ 0.69 และมีความต้านทานขณะนำกระแสไฟฟ้า 2.5 มิลลิโอม (ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)

บนเว็บไซต์ (http://webench.ti.com/wb5/FETs_Selection/FETPBWizard.jsp?run=Y) มีเครื่องมือช่วยเลือกมอสเฟตสำหรับวงจรทอนระดับแบบซิงโครนัสตั้งรูปที่ 31 หลังจากป้อนพารามิเตอร์ที่ต้องการลงไป ระบบจะประมาณกำลังไฟฟ้าสูญเสียบนมอสเฟตแต่ละตัวตั้งรูปที่ 32



รูปที่ 31 เครื่องมือช่วยเลือกมอสเฟตของบริษัท Texas Instruments



รูปที่ 32 เส้นโค้งกำลังไฟฟ้าสูญเสียบนมอสเฟตแต่ละตัวที่โหลดต่าง ๆ

กำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงสุดที่ CSD18532Q5B ทนได้ ที่อุณหภูมิแวดล้อม 50 องศาเซลเซียส คำนวณได้จากสมการที่ 3.8

$$P_{D,MAX} = \frac{T_{J,MAX} - T_{A,MAX}}{R_{\theta JA}} = \frac{150 - 50}{50} = 2 \text{ วัตต์} \quad (3.8)$$

จากรูปที่ 32 ที่กระแสไฟฟ้าขาออก 10 แอมแปร์ มอสเฟตตัวบน (U1) และตัวล่าง (U2) มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียเกิดขึ้น 1.0207 วัตต์ และ 0.5277 วัตต์ตามลำดับ สามารถนำกำลังสูญเสียมาแทนค่ากลับลงในสมการที่ 3.8 เพื่อคำนวณหาอุณหภูมิที่รอยต่อได้สมการที่ 3.9 และ 3.10

$$T_{J,U1} = (P_D \cdot R_{\theta JA}) + T_{A,MAX} = (1.0207 \cdot 50) + 50 = 101.035 \text{ องศาเซลเซียส} \quad (3.9)$$

$$T_{J,U2} = (P_D \cdot R_{\theta JA}) + T_{A,MAX} = (0.5277 \cdot 50) + 50 = 76.385 \text{ องศาเซลเซียส} \quad (3.10)$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงสุดประมาณ 2 เท่า และอุณหภูมิที่รอยต่อสูงสุดที่ทนได้อยู่ที่ 150 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องติดตั้งระบายความร้อน (Heat sink) ใดๆก็ตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอาจส่งผลต่ออุปกรณ์ข้างเคียง ดังนั้นจึงต้องทดสอบเมื่อโหลดถึงกระแสไฟฟ้าสูงสุด

3.1.4 การเลือกไดโอด

การขับมอสเฟตในวงจรทอนระดับแบบซิงโครนัสจะต้องใช้เวลาให้มอสเฟตหยุดนำกระแสไฟฟ้าทั้งสองตัวก่อนที่จะขับให้ตัวใดตัวหนึ่งนำกระแสไฟฟ้าเพื่อลดโอกาสการเกิดกระแสไฟฟ้าพุ่งสูงฉับพลัน ช่วงเวลาดังกล่าวเรียกว่า “ช่วงเวลาเว้นว่าง” ในช่วงเวลานี้ถึงแม้มอสเฟตหยุดนำกระแสไฟฟ้าทั้งสองตัว แต่กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำไม่สามารถหยุดไหลได้ทันทีทันใด กระแสไฟฟ้าจึงไหลผ่านบอดีไดโอด (Body diode) ที่แฝงอยู่ในมอสเฟตซึ่งทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งช่วงที่บอดีไดโอดนำกระแสไฟฟ้า และช่วงฟื้นตัว (Reverse recovery time)

งานวิจัยนี้เลือกไดโอดชนิดดีทีดี MBR40250TG ต่อขนานกับมอสเฟตตัวล่าง (U2) เนื่องจากมีแรงดันไฟฟ้าทางตรง (Forward voltage, V_F) และช่วงเวลาฟื้นตัวน้อยกว่าบอดีไดโอดของมอสเฟต CSD18532Q5B กำลังไฟฟ้าสูญเสียในไดโอดคำนวณได้จากสมการที่ 3.11 และ 3.12 [26-28]

$$P_{D1,Conduction} = V_F \cdot I_{OUT} \cdot t_{rr} \cdot F_{SW} = 0.86 \cdot 10 \cdot 35 \times 10^{-9} \cdot 100 \times 10^3 = 30 \text{ มิลลิวัตต์} \quad (3.11)$$

$$P_{D1,Reverse Recovery} = V_{IN} \cdot Q_{rr} \cdot F_{SW} = 18 \cdot 9 \times 10^{-9} \cdot 100 \times 10^3 = 16 \text{ มิลลิวัตต์} \quad (3.12)$$

3.1.5 การเลือกตัวเก็บประจุขาเข้า

โดยปกติกระแสไฟฟ้าขาเข้าของวงจรทอนระดับจะไหลไม่ต่อเนื่องเพราะมอสเฟต (U1) หยุดนำกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าขาเข้าสูงขึ้น ในกรณีนี้แหล่งจ่ายขาเข้าคือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แรงดันไฟฟ้าขาเข้าจะสูงขึ้นจนเท่ากับแรงไฟฟ้าขณะเปิดวงจร (V_{oc}) และเมื่อมอสเฟต (U1) นำกระแสไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าขาเข้าจะเพิ่มขึ้น และไหลต่อไปยังตัวเหนี่ยวนำกับโหลด ส่วนแรงดันไฟฟ้าจะลดต่ำลงมาเป็นแบบนี้ไปเรื่อย ๆ การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าอย่างรวดเร็วอาจก่อให้เกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference) [29, 30] ตัวเก็บประจุขาเข้าจึงถูกนำมาใช้เพื่อลดการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าขาเข้า และสะสมพลังงานไว้ช่วยจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับตัวเหนี่ยวนำกับโหลด

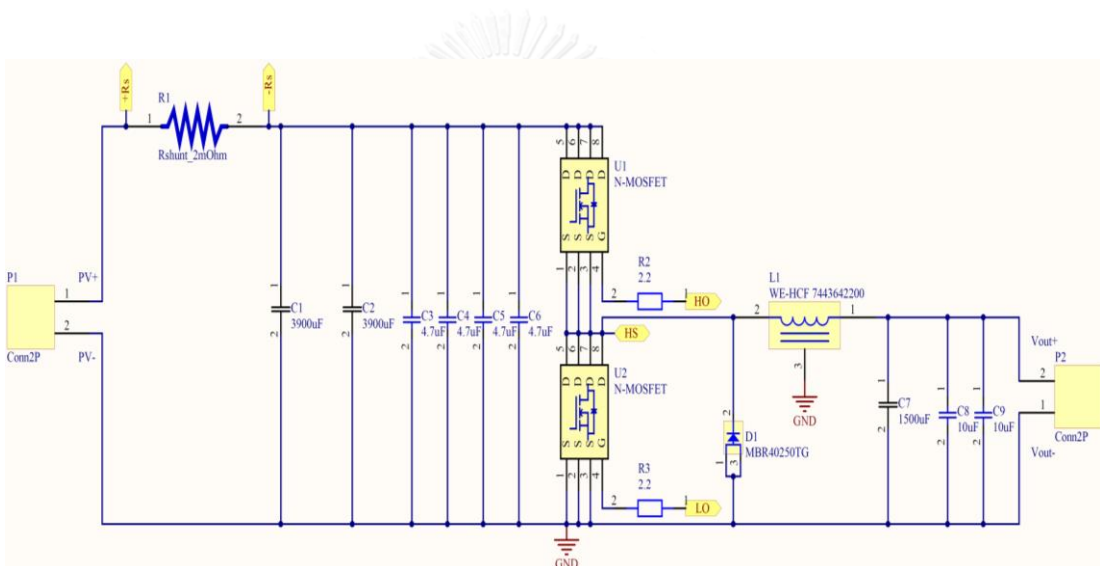
ตัวเก็บประจุต้องมีขนาดใหญ่มากพอ และมีความต้านทานอนุกรมแฝงต่ำ แนะนำให้ใช้ตัวเก็บประจุแบบเซรามิกซึ่งมีค่าความต้านทานอนุกรมแฝงต่ำ ผสมกับเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลติกอลูมิเนียมซึ่งมีความจุมาก คำนวณขนาดตัวเก็บประจุทั้งสองชนิดได้จากสมการที่ 3.13 และสมการที่ 3.14 [31]

$$C_{Ceramic} = \frac{I_{OUT} \cdot D \cdot (1-D)}{V_{peak-peak,MAX} \cdot F_{SW}} = \frac{10 \cdot 0.6667 \cdot (1-0.6667)}{0.24 \cdot 100 \times 10^3} = 92.59 \text{ ไมโครฟารัด} \quad (3.13)$$

$$C_{Electrolytic} = \frac{1.21 \cdot I_{N, tr}^2 \cdot L}{V_{peak-peak, MAX}^2} = \frac{1.21 \cdot 4^2 \cdot 22 \times 10^{-6}}{0.24^2} = 7394.44 \text{ ไมโครฟารัด} \quad (3.14)$$

งานวิจัยนี้เลือกตัวเก็บประจุอิเล็กโทรไลติกอลูมิเนียม EEU-FC1V392 ขนาด 3900 ไมโครฟารัด 2 ตัว และตัวเก็บประจุเซรามิก C5750X7R1H475MKA ขนาด 4.7 ไมโครฟารัด 4 ตัวต่อขนานกัน

หลังจากออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดแล้ว จึงวาดแผนผังวงจรทอนระดับแบบซิงโครนัสได้ใหม่ดังรูปที่ 33 ตัวต้านทาน (R1) คือตัวต้านทานชั้ตต่ออนุกรมไว้เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าขาเข้า ส่วนตัวต้านทาน (R2 และ R3) ขนาด 2.2 โอห์ม ต่อที่ขาเกตของมอสเฟตแต่ละตัวเพื่อไม่ให้มอสเฟตนำกระแสไฟฟ้าเร็วเกินไป



รูปที่ 33 แผนผังวงจรทอนระดับแบบซิงโครนัส

การออกแบบข้างต้นเป็นการออกแบบสำหรับกรณีที่ระบบผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเข้มแสง 1,000 วัตต์/ตารางเมตร ในทางปฏิบัติความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงได้ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์อาทิตย์เปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงแรงดันไฟฟ้าในกรณีที่ความเข้มแสงน้อยกว่า (800, 600, 400 และ 200 วัตต์/ตารางเมตร) ขนาดของอุปกรณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงได้แก่ ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุขาออก และตัวเก็บประจุขาเข้า จากรูปที่ 9 (ข) เมื่อความเข้มแสงลดลง แรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีแนวโน้มลดลง กำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ออกแบบเช่นเดิม ยกเว้นแรงดันไฟฟ้าขาเข้า ขนาดของอุปกรณ์ที่คำนวณได้ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ และค่าที่เลือกใช้เปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 3

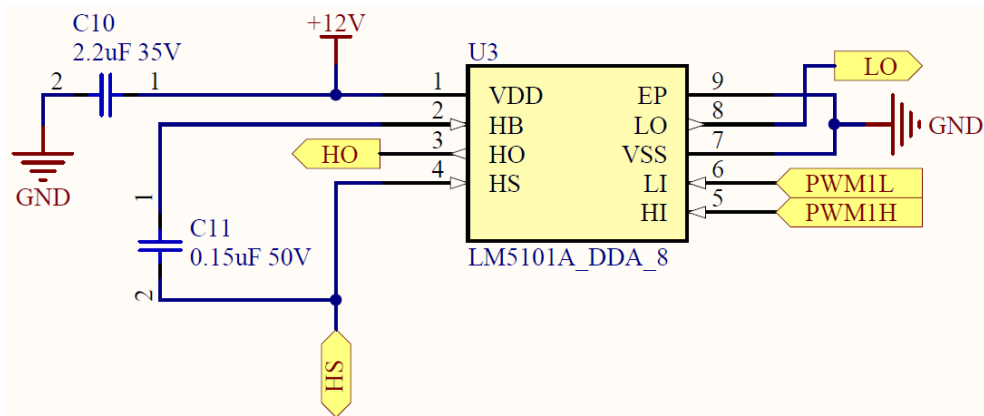
ตารางที่ 3 การออกแบบอุปกรณ์ในวงจรทอนระดับที่ความเข้มแสงต่าง ๆ

พารามิเตอร์ \ ความเข้มแสง	1,000 W/m ²	800 W/m ²	600 W/m ²	400 W/m ²	200 W/m ²	ค่าที่ เลือกใช้
แรงดันไฟฟ้าขาเข้าที่ จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (โวลต์)	18	17.5	17	16.5	15.5	-
ค่าวัฏจักรงาน	0.67	0.69	0.71	0.73	0.77	-
ค่าความเหนียวนำ (ไมโครเฮนรี)	13.33	12.57	11.76	10.91	9.03	22
ค่าตัวเก็บประจุขาออก (ไมโครฟารัด)	609.22	574.41	537.55	498.45	412.70	1520
ค่าตัวเก็บประจุขาเข้า (ไมโครฟารัด)	4574.07	4315.18	4040.76	3749.31	3108.68	7818.8

จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าลดลง ขนาดตัวเหนียวนำ และตัวเก็บประจุที่คำนวณได้จะมีค่าน้อยลง ดังนั้นการออกแบบที่ความเข้มแสง 1000 วัตต์/ตารางเมตร จึงครอบคลุมกรณีที่มีความเข้มแสงน้อยกว่า ขนาดตัวเหนียวนำที่เลือกใช้มีขนาดมากกว่าค่าที่คำนวณไว้ 65% ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้จึงต้องมีขนาดใหญ่กว่าค่าที่คำนวณได้ตามไปด้วยโดยค่าตัวเก็บประจุขาออก และค่าตัวเก็บประจุขาเข้ามีขนาดมากกว่าค่าที่คำนวณไว้ 149% และ 70% ตามลำดับ

3.2 การออกแบบวงจรนำขับมอสเฟต

การขับมอสเฟตด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เพียงลำพังไม่สามารถทำให้มอสเฟตนำกระแสไฟฟ้าได้อย่างเต็มที่ และใช้เวลาในการเปลี่ยนสถานะ (เปิด-ปิด หรือปิด-เปิด) นานเนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์สร้างแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุดแค่ 3.3 โวลต์ และมีกระแสซอร์ส (Source current) เพียง 15 มิลลิแอมแปร์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจรนำขับแบบครึ่งบริดจ์ (Half-bridge driver) เพื่อควบคุมมอสเฟตทั้งสองตัวให้สลับกันทำงาน ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไอซี LM5101AMR/NOPB ซึ่งสามารถให้กระแสไฟฟ้ายอดได้สูงสุด 3 แอมแปร์ ภายในไอซีมีไดโอดสำหรับต่อกับตัวเก็บประจุภายนอกสร้างเป็นวงจรบูทสตรัป (Bootstrap circuit) เพื่อขับมอสเฟตตัวบน แผนผังวงจรนำขับมอสเฟตแสดงดังรูปที่ 34



รูปที่ 34 แผนผังวงจรนำขับมอสเฟต

ตารางที่ 4 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบวงจรนำขับมอสเฟต การคำนวณหาขนาดของตัวเก็บประจุบูทสเตร็ปแสดงดังสมการที่ 3.15 ถึงสมการที่ 3.17 [32]

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์สำหรับออกแบบวงจรนำขับมอสเฟต

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	เป้าหมาย
ตัวนำขับ	U3	LM5101A
มอสเฟต	U1/U2	CSD18532Q5B
แรงดันไฟฟ้าทำงาน	V_{DD}	10 โวลต์
ประจุเกตสูงสุด	$Q_{G,MAX}$	44 นาโนคูลอมบ์
ความถี่การสวิตช์	F_{SW}	100 กิโลเฮิรตซ์
ค่าวัฏจักรงานสูงสุด	D_{MAX}	95%
กระแสไฟฟ้าจาก HB ไปยัง VSS	I_{HBS}	10 ไมโครแอมแปร์
แรงดันไฟฟ้าไปข้างหน้าของไดโอด (กระแสไฟฟ้าสูง)	V_{DH}	1.0 โวลต์
แรงดันไฟฟ้าขีดเริ่มเปลี่ยนของ HB (ขาขึ้น)	V_{HBR}	7.1 โวลต์
แรงดันไฟฟ้าขีดเริ่มเปลี่ยนของ HB (ฮีสเตอร์ซิส)	V_{HBH}	0.4 โวลต์

$$\Delta V_{HB} = V_{DD} - V_{DH} - (V_{HBR} - V_{HBH}) = 10 - 1 - (7.1 - 0.4) = 2.3 \text{ โวลต์} \quad (3.15)$$

$$Q_{Total} = Q_{G,MAX} + I_{HBS} \frac{D_{MAX}}{F_{SW}} = 44 \times 10^{-9} + 10 \times 10^{-6} \frac{0.95}{100 \times 10^3} = 44.1 \text{ นาโนคูลอมบ์} \quad (3.16)$$

$$C_{Bootstrap} = \frac{Q_{Total}}{\Delta V_{HB}} = \frac{44.1 \times 10^{-9}}{2.3} = 19.17 \text{ นาโนฟารัด} \quad (3.17)$$

ในทางปฏิบัติตัวเก็บประจุพาสซีฟควรมีขนาดใหญ่กว่าที่คำนวณไว้ จึงเลือกขนาด 0.15 ไมโครฟารัด ส่วนตัวเก็บประจุสำหรับกรองแรงดันไฟฟ้าทำงานควรมีขนาดใหญ่กว่าตัวเก็บประจุพาสซีฟ 10 เท่าขึ้นไป จึงเลือกขนาด 2.2 ไมโครฟารัด กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และอุณหภูมิที่รอยต่อสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.18 และสมการที่ 3.19 ตามลำดับ [32]

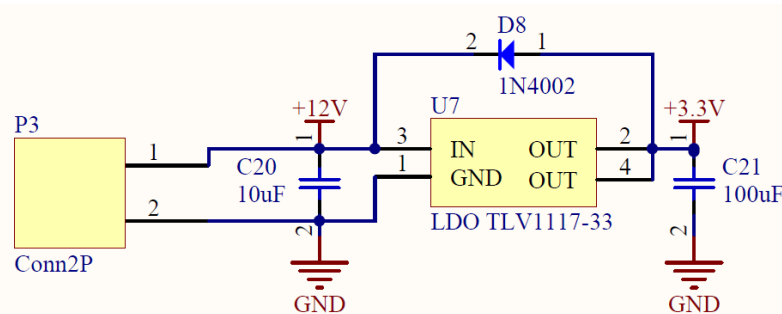
$$P_{D,Driver} = 2 \cdot V_{DD}^2 \cdot C_{Load} \cdot F_{SW} = 2 \cdot 10^2 \cdot 10.14 \times 10^{-9} \cdot 100 \times 10^3 = 0.2028 \text{ วัตต์} \quad (3.18)$$

$$T_{J,U3} = (P_{D,Driver} \cdot R_{\theta JA}) + T_{A,MAX} = (0.2028 \cdot 40) + 50 = 58.11 \text{ องศาเซลเซียส} \quad (3.19)$$

3.3 การออกแบบวงจรรักษาแรงดันไฟฟ้า 3.3 โวลต์

วงจรวัดกระแสไฟฟ้า วงจรวัดแรงดันไฟฟ้า และวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ประมาณ 3.3 โวลต์ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไอซี TLV1117-33IDCY เนื่องจากเป็นไอซีรักษาแรงดันประเภท LDO (Low-dropout voltage regulator) ซึ่งสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกให้คงที่ได้ถึงแม้ว่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าจะมีการเปลี่ยนแปลงมาก ความสามารถในการคงแรงดันไฟฟ้าขาออกมีสำคัญอย่างมากต่อระบบการวัดทั้งหมด เพราะการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลอ้างอิงกับแรงดันขาออกดังกล่าวซึ่งส่งผลโดยตรงกับความแม่นยำ วงจรรักษาระดับแรงดันประกอบด้วยไอซี ไดโอดป้องกันเมื่อเกิดการลัดวงจรที่ฝั่งขาเข้า และตัวเก็บประจุสำหรับกรองแรงดันไฟฟ้าให้เรียบ วงจรจะรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าในช่วง 10 โวลต์ถึง 12 โวลต์ และลดแรงดันไฟฟ้าให้เหลือ 3.3 โวลต์ ผังวงจรรักษาแรงดันไฟฟ้า 3.3 โวลต์แสดงดังรูปที่ 35

วงจรวัดจุดทำงาน และวงจรควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดใช้กระแสไฟฟ้าประมาณ 40 มิลลิแอมแปร์ กำลังไฟฟ้าสูญเสีย และอุณหภูมิรอยต่อคำนวณได้จากสมการที่ 3.20 และสมการที่ 3.21 [33] อุณหภูมิของไอซีเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อแรงดันไฟฟ้าขาออก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแรงดันไฟฟ้าขาออกจะลดต่ำลงดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงการระบายความร้อนด้วย



รูปที่ 35 ผังวงจรรักษาแรงดันไฟฟ้า 3.3 โวลต์

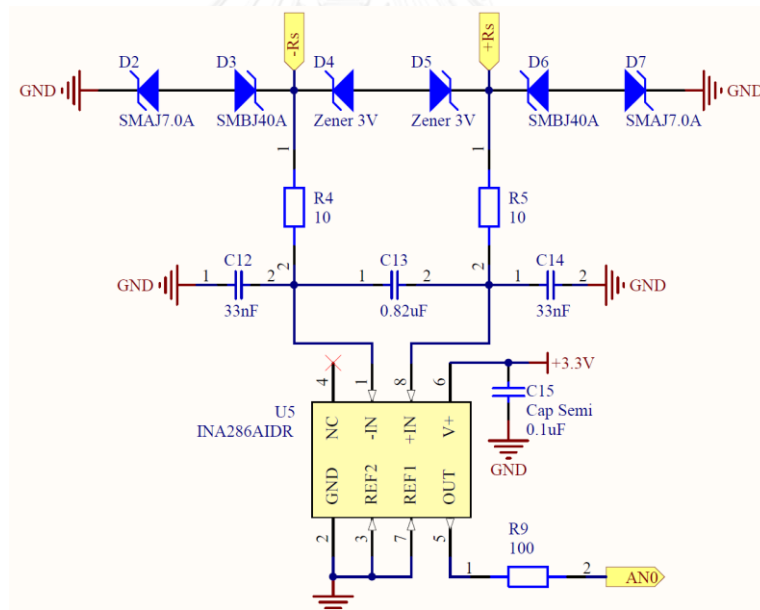
$$P_{D,LDO} = (V_{IN} - V_{OUT}) \cdot I_{OUT} = (10 - 3.3) \cdot 40 \times 10^{-3} = 0.268 \text{ วัตต์} \quad (3.20)$$

$$T_{J,LDO} = (P_{D,LDO} \cdot R_{\theta JA}) + T_{A,MAX} = (0.335 \cdot 104.3) + 50 = 77.95 \text{ องศาเซลเซียส} \quad (3.21)$$

3.4 การออกแบบวงจรวัดกระแสไฟฟ้า

ผังวงจรวัดกระแสไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 36 วงจรถูกออกแบบให้สามารถวัดกระแสไฟฟ้าได้ทิศทางเดียวโดยวัดได้สูงสุดถึง 16.5 แอมแปร์ งานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวต้านทานชั้นที่ขนาด 2 มิลลิโอม์ กำลังพิกัด 3 วัตต์ ร่วมกับไอซี INA286AIDR ซึ่งมีอัตราขยายแรงดันไฟฟ้า 100 เท่า และให้แรงดันไฟฟ้าขาออกอยู่ในช่วง 0 ถึง 3.3 โวลต์ กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ตัวต้านทานชั้นที่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.22 ซึ่งคาดว่าจะเกิดกำลังสูญเสียไม่เกิน 0.1 วัตต์ตลอดช่วงการทำงาน

$$P_{shunt} = I_{shunt}^2 \cdot (R_{shunt}) = 6.67^2 \cdot 2 \times 10^{-3} = 0.089 \text{ วัตต์} \quad (3.22)$$

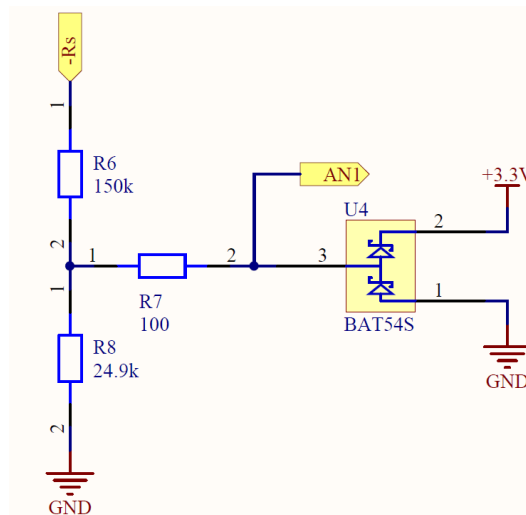


รูปที่ 36 ผังวงจรวัดกระแสไฟฟ้า

นอกจากนี้วงจรวัดกระแสไฟฟ้ายังประกอบด้วยไดโอดซึ่งทำหน้าที่ป้องกันแรงดันไฟฟ้าสูงเกินชั่วขณะ (Transient voltage suppression) อันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างกะทันหัน และมีตัวกรองความถี่สูง 9.6 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ขา IN+ และ IN- เพื่อลดสัญญาณรบกวน และกระแสไฟฟ้ากระชาก (Current spike) การออกแบบอ้างอิงจากคู่มือแนะนำของบริษัท Texas Instrument [34] ซึ่งรองรับมาตรฐานทดสอบภูมิคุ้มกันการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วครู่แบบรวดเร็ว (IEC61000-4-4)

3.5 การออกแบบวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า

ผังวงจรวัดแรงดันไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 37 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าถูกออกแบบให้มีย่านการวัดตั้งแต่ 0 ถึง 23 โวลต์ ซึ่งครอบคลุมแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เลือกตัวต้านทาน (R6 และ R8) ขนาด 150 กิโลโอห์ม และ 24.9 กิโลโอห์มต่ออนุกรมกันเพื่อแบ่งแรงดันให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 3.3 โวลต์ และใช้ไดโอดซีดตัทกี BAT54S และต่อไว้ที่ฝั่งขาออกของวงจรแบ่งแรงดันเพื่อป้องกันไม่ใ้แรงดันไฟฟ้าขาออกไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์สูงเกิน 3.6 โวลต์ ตัวต้านทาน (R7) ต่อไว้เพื่อทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจรมีขนาด 100 โอห์ม



รูปที่ 37 ผังวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า

3.6 การออกแบบวงจรควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

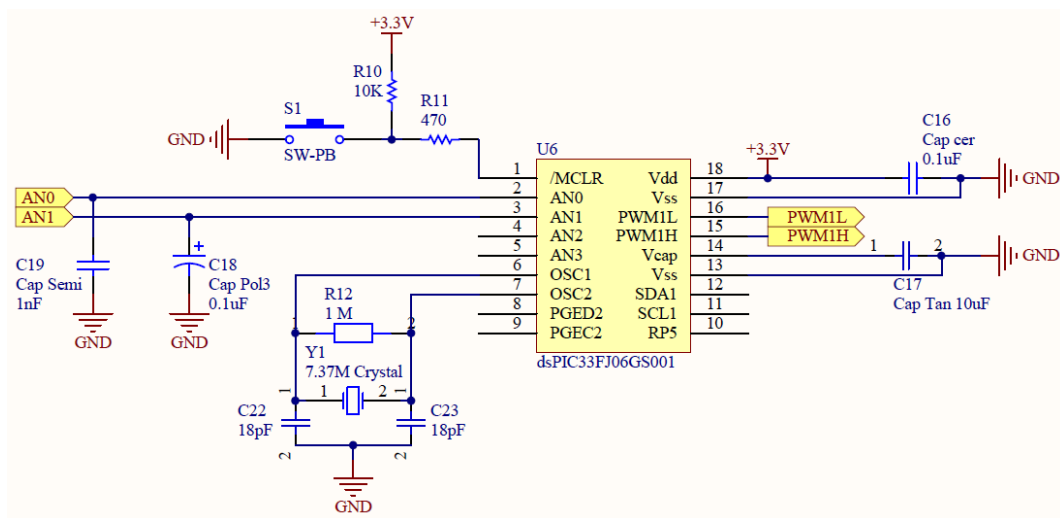
ผังวงจรควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแสดงดังรูปที่ 38 วงจรประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33FJ06GS001 และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ การออกแบบอ้างอิงจากคู่มือการใช้งาน [35] ที่ขา MCLR มีตัวต้านทาน (R10) และสวิตช์โดยต่อสวิตช์ให้อยู่ฝั่งกราวด์ (Low-side switch) เมื่อกดสวิตช์แรงดันไฟฟ้าที่ขา MCLR จะเท่ากับศูนย์ทำให้เกิดการรีเซ็ต (Reset) ส่วนตัวต้านทาน (R11) ขนาด 470 โอห์มต่อไว้เพื่อจำกัดปริมาณกระแสไฟฟ้าไม่ให้มากเกินไปที่กำหนด

ไมโครคอนโทรลเลอร์ต้องสามารถทำงานได้โดยมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิแวดล้อม จึงเลือกสร้างสัญญาณนาฬิกาจากคริสตอล (Crystal) ภายนอกความถี่ 7.3728 เมกะเฮิรตซ์ เนื่องจากทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากกว่าสร้างสัญญาณนาฬิกาที่ได้จากวงจรภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ขา OSC1 และ OSC2 จำเป็นต้องมีตัวต้านทานขนาด 1 เมกะโอห์ม (R12) ต่อขานานไว้ และมีตัวเก็บประจุเซรามิกคลาส 1 (NP0) ขนาด 18 พิโกฟารัดต่อไว้อีก 2 ตัว (C22 และ C23)

ที่ขา V_{DD} และ V_{CAP} มีตัวเก็บประจุ (C16 และ C17) ขนาด 0.1 ไมโครฟารัดและ 10 ไมโครฟารัดต่อไว้ตามลำดับเพื่อกรองสัญญาณ เลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีความต้านทานอนุกรมแฝงต่ำ

ช่องรับสัญญาณแอนะล็อก AN0 และ AN1 จะรับสัญญาณจากวงจรวัดกระแสไฟฟ้า และ วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าตามลำดับ มีตัวเก็บประจุเซรามิก 0.1 ไมโครฟารัดต่อไว้แต่ละช่องเพื่อกรองสัญญาณให้เรียบขึ้น อิมพีแดนซ์ฝั่งวงจรวัดแนะนำให้มีค่า 100 โอห์ม เพื่อให้การแปลงมีเสถียรภาพ

สัญญาณพัลส์วิตช์มอดูเลชันถูกขับออกจากขา PWM1L และ PWM1H ไปยังวงจรมอเตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งขาทั้งสองอยู่ฝั่งตรงข้ามกับช่องรับสัญญาณแอนะล็อกทำให้ลดโอกาสเกิดการรบกวน



รูปที่ 38 ฝั่งวงจรควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

3.7 การออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์

เริ่มต้นออกแบบการจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ และลายทองแดงของวงจรรากกำลังซึ่งเป็นส่วนที่วิกฤติที่สุดก่อน แล้วจึงจัดวางตำแหน่ง และวาดลายทองแดงของวงจรแอนะล็อก และวงจรดิจิทัล

บริเวณที่สำคัญที่สุดของวงจรถนระดับแบบซิงโครนัสอยู่ที่สวิตช์ซิงโครน (จุด HS ในรูปที่ 33) ลายทองแดงต้องสั้นที่สุดเพื่อลดความเหนียวน่าแฝง ซึ่งจะช่วยลดการแกว่งของแรงดันไฟฟ้า (Ringing) [36, 37] ตำแหน่งการวางตัวเก็บประจุเข้าควรอยู่ใกล้กับขาเดรนของมอเตอร์ตัวบน และขาซอร์สของมอเตอร์ตัวล่างมากที่สุดเพื่อลดขนาดการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่วงปิดขณะสวิตช์ ซึ่งจะช่วยลดการเกิดการตั้งของกราวด์ (Ground bounce) [38, 39] ถึงแม้จุดสวิตช์ซิงโครนัสต้องสั้นที่สุดเท่าที่เป็นไปได้แต่ปริมาณทองแดงที่จุดนี้ก็ต้องมีปริมาณมากพอที่จะระบายความร้อนออกจากมอเตอร์ทั้งสองตัว เราสามารถใช้รูระบายความร้อน (Thermal via) ช่วยกระจายความร้อนไปยัง

ลายทองแดงฝั่งตรงข้าม [40] ออกแบบรูเสี้ยนผ่านศูนย์กลาง 28 มิล (mil) จำนวน 9 รูวางไว้ได้มอสเฟตทั้งสอง

ในส่วนของวงจรวัดกระแสไฟฟ้า ลายทองแดงที่ตัวต้านทานชั้นที่ใช้การเชื่อมต่อแบบสี่เส้น (4-wire connection) จึงยืนยันได้ว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้เกิดจากแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานชั้นที่เท่านั้น [41] ลายทองแดง 2 เส้นที่ลากจากตัวต้านทานชั้นที่มายังไอซี INA286 ควรอยู่ชิดกันและมีระยะทางสั้นที่สุด เนื่องจากลายทองแดงที่ยาวจะประพฤติตัวเป็นเสาอากาศ (Antenna) และรับสัญญาณรบกวนเข้ามาได้

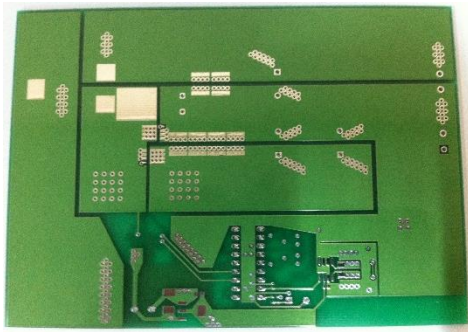
ไมโครคอนโทรลเลอร์ควรอยู่ห่างจากตัวเหนี่ยวนำ เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า วงจรคริสตอลภายนอกควรมีระนาบกราวด์ล้อมรอบไว้เป็นวง (Guard ring) และไม่ควรมีลายทองแดงอื่น ๆ มาทับในบริเวณนี้ [35] วงจรนำขั้วมอสเฟตไม่ควรอยู่ห่างจากไมโครคอนโทรลเลอร์มากนัก การวางตัวเก็บประจุกรองสัญญาณสำหรับไอซีทุกตัว ควรวางใกล้กับขาไอซีมากที่สุด หากอยู่ห่างกันลายทองแดงจะเหนี่ยวนำสัญญาณรบกวนเข้ามายังไอซีได้

ความกว้างของลายทองแดงขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ซึ่งสามารถประมาณหาได้บนเว็บไซต์ (<http://www.desmith.net/NMDS/Electronics/TraceWidth.html>) สมการที่ใช้คำนวณอิงมาจากสถาบันมาตรฐานแห่งชาติของสหรัฐอเมริกา (American National Standards Institute) ตัวอย่างการคำนวณที่แสดงดังรูปที่ 39 ที่กระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ ลายทองแดงควรกว้างอย่างน้อย 587.39 มิล (ประมาณ 15 มิลลิเมตร) คูลายทองแดงทั้งหมดเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ก

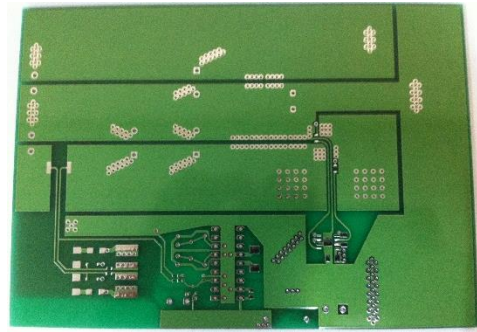
ANSI PCB TRACE WIDTH CALCULATOR							
Input Data			Results Data				
Field	Value	Units	Trace Data	Internal Traces		External Traces	
				Value	Units	Value	Units
Current (max. 35A)	10	Amps	Required Trace Width	1528.05	mil	587.39	mil
Temperature Rise (max. 100°C)	1	°C	Cross-section Area	4106.78	mil ²	1578.66	mil ²
Cu thickness	2	oz/ft ²	Resistance	0	Ω Ohms	0	Ω Ohms
Ambient Temperature	50	°C	Voltage Drop	0.01	Volts	0.02	Volts
Conductor Length	10	cm	Loss	0.07	Watts	0.19	Watts
Peak Voltage	22	Volts	Required Track Clearance	27.4	mil		

รูปที่ 39 เครื่องมือคำนวณขนาดความกว้างของลายทองแดง

งานวิจัยนี้ออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยโปรแกรมออเทียมดีไซเนอร์ (Altium Designer) แผ่นวงจรพิมพ์ทำจากวัสดุอีพ็อกซี (FR4) ขนาด 100x140 ตารางมิลลิเมตร ความหนา 1.6 มิลลิเมตร ความหนาลายทองแดง 2 ออนซ์ต่อตารางฟุต ด้านหน้า และด้านหลังของแผ่นวงจรพิมพ์แสดงดังรูปที่ 40 (ก) และรูปที่ 40 (ข) ตามลำดับ บัดกรีอุปกรณ์ต่าง ๆ (ดูภาคผนวก ข) ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์แล้วจึงได้เครื่องควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสูงสุดดังรูปที่ 41 (ก) และรูปที่ 41 (ข)

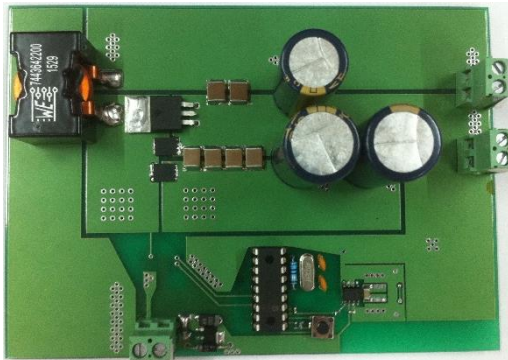


(ก) ด้านหน้า

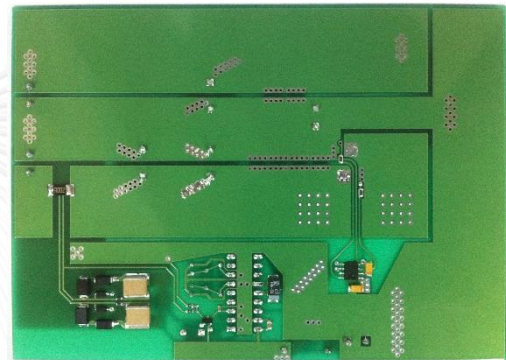


(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 40 แผงวงจรพิมพ์เครื่องควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด



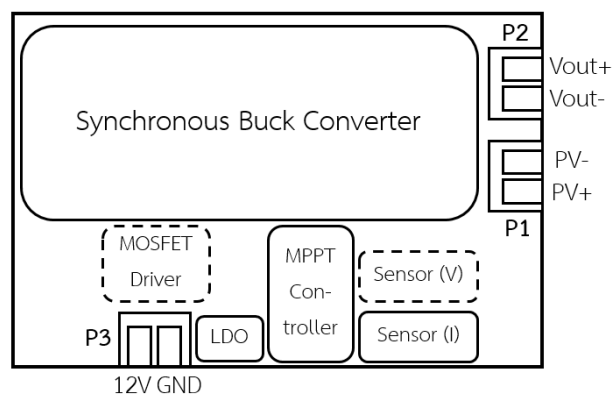
(ก) ด้านหน้า



(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 41 เครื่องควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

เครื่องควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสามารถเขียนเป็นแผนผังอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 42 (มองจากด้านหน้า) มีเทอร์มินอลบล็อก (Terminal block) 3 ตัวได้แก่ P1 P2 และ P3 เป็นขั้วสกรู สำหรับเชื่อมต่อกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โหลด และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ตามลำดับ



รูปที่ 42 แผนผังอย่างง่ายของเครื่องควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

บทที่ 4

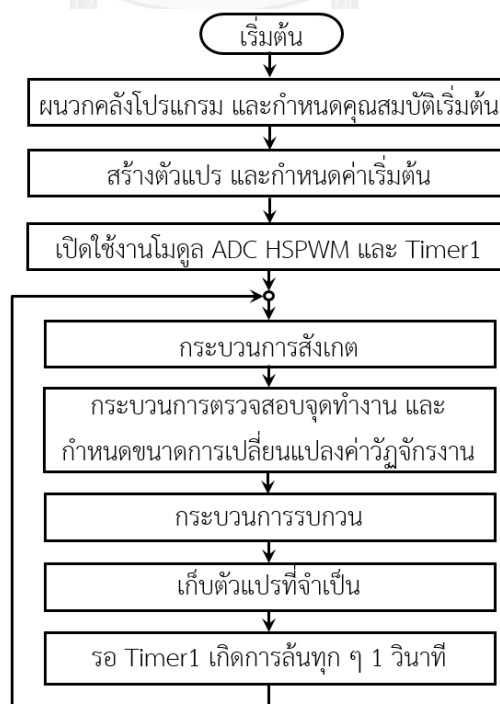
หลักการออกแบบซอฟต์แวร์

โปรแกรมของเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดถูกพัฒนาขึ้นบน MPLAB X IDE (รุ่น 3.30) ร่วมกับคอมไพเลอร์ (Compiler) XC16 (รุ่น 1.26) ของบริษัทไมโครชิป เทคโนโลยี จำกัด โปรแกรมทั้งหมดเขียนด้วยภาษาซี และฝังตัวอยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33FJ06GS001 ตัวเดียวเท่านั้น

โปรแกรมแบ่งออกเป็นส่วนต่าง ๆ ได้แก่ โปรแกรมหลัก โปรแกรมตั้งค่าระบบสัญญาณนาฬิกา โปรแกรมแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล โปรแกรมสร้างสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชัน โปรแกรมตัวจับเวลา 1 และโปรแกรมติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

4.1 การออกแบบโปรแกรมหลัก

โปรแกรมหลัก main.c (ดูภาคผนวก ค.1) เขียนเป็นผังการทำงานได้ดังรูปที่ 43 โปรแกรมเริ่มทำงานโดยผนวกคลังโปรแกรม (Library) ที่เกี่ยวข้องได้แก่ไฟล์ p33FJ06GS001.h ซึ่งประกอบไปด้วยนิยามเรจิสเตอร์ (Register) ต่าง ๆ ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ไฟล์ libpic30.h เพื่อเรียกใช้งานฟังก์ชันหน่วงเวลา และไฟล์อื่น ๆ ที่เขียนขึ้นเองเพื่อเรียกใช้งานฟังก์ชันที่เขียนขึ้น และกำหนดคุณสมบัติเริ่มต้นของไมโครคอนโทรลเลอร์ (ดูภาคผนวก ค.2)



รูปที่ 43 ผังการทำงานของโปรแกรมหลัก

ในเบื้องต้นได้กำหนดช่องสัญญาณสำหรับโปรแกรมที่ขา PGEC2 และ ขา PGED2 ปิดตัวจับเวลาวอตช์ด็อก (Watchdog timer) เลือกใช้แหล่งสัญญาณนาฬิกาหลักจากคริสตอลภายนอก ย่านความถี่ของคริสตอลตั้งแต่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 10 เมกะเฮิร์ตซ์ และเปิดใช้งานวงจรทวีคูณความถี่สัญญาณนาฬิกา (โหมด XTPLL)

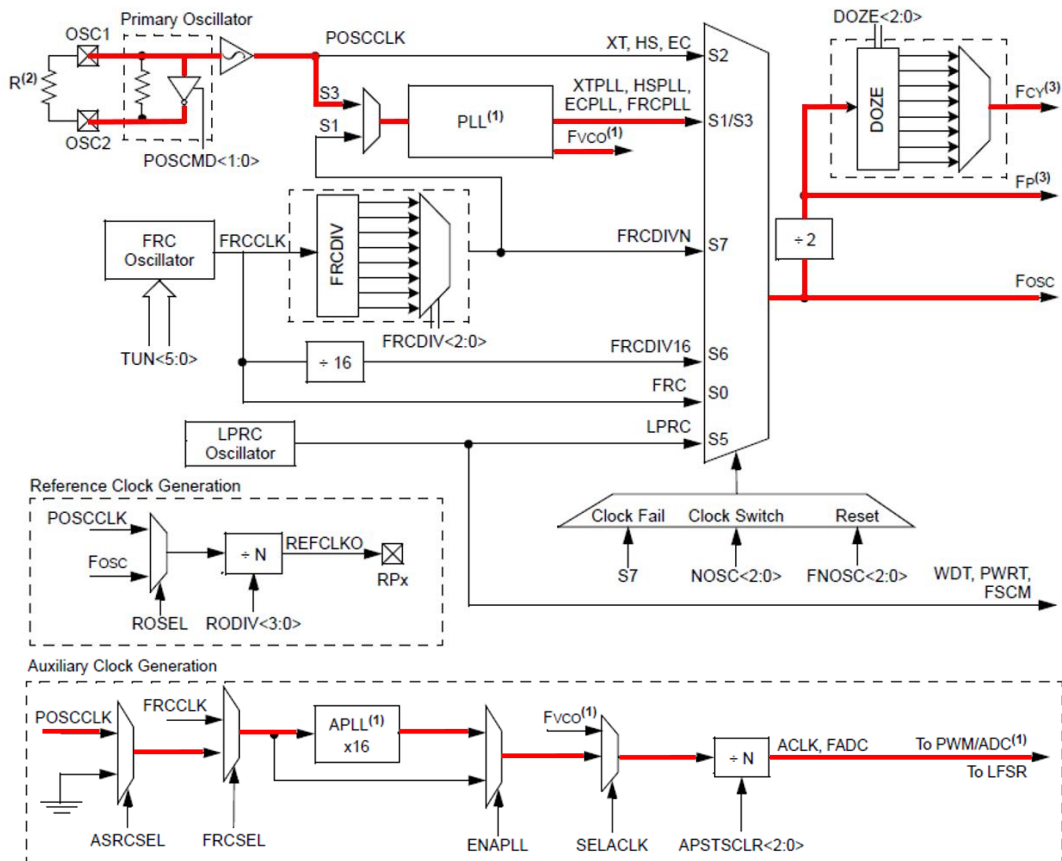
ต่อมาจึงสร้างตัวแปรสำหรับเก็บค่าที่อ่านได้จากการวัด และเก็บผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณต่าง ๆ เมื่อโปรแกรมเข้ามาทำงานในฟังก์ชันหลัก (Main function) จะเริ่มตั้งค่าในเรจิสเตอร์ต่าง ๆ เพื่อตั้งค่า และเปิดใช้งานโมดูลที่ต้องการได้แก่ กำหนดขนาดตัวคูณในวงจรคูณความถี่สัญญาณนาฬิกา กำหนดทิศทางของพอร์ต เปิดใช้งานโมดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล โมดูลสร้างสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันความเร็วสูง โมดูลตัวจับเวลา 1

สุดท้ายโปรแกรมจะเข้ามาทำงานในวงวน (Loop) อนันต์ซึ่งมีระเบียบวิธีติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ ในกระบวนการสังเกตประกอบด้วยชุดคำสั่งให้อ่านค่าที่วัดได้จากวงจรวัดกระแสไฟฟ้า และวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า คำนวณการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า กระบวนการต่อมาจะประมาณหาค่าคุณลักษณะของเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า และเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงาน และเลือกขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงานตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ในกระบวนการรบกวนโปรแกรมจะตัดสินใจทิศทางการเปลี่ยนแปลงของค่าวัฏจักรงานโดยอาศัยข้อมูลที่คำนวณได้ในกระบวนการสังเกต และสร้างสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันเพื่อขับมอเตอร์ หลังจากนั้นโปรแกรมจะเก็บข้อมูลที่ต้องใช้สำหรับการคำนวณในรอบต่อไป และรอเวลาจนกว่าตัวจับเวลา 1 เกิดการล้น (Overflow) จึงจะกลับมาเริ่มกระบวนการทั้งสองอีกครั้ง โดยงานวิจัยนี้ออกแบบให้ระบบปรับจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทุก ๆ 1 วินาที

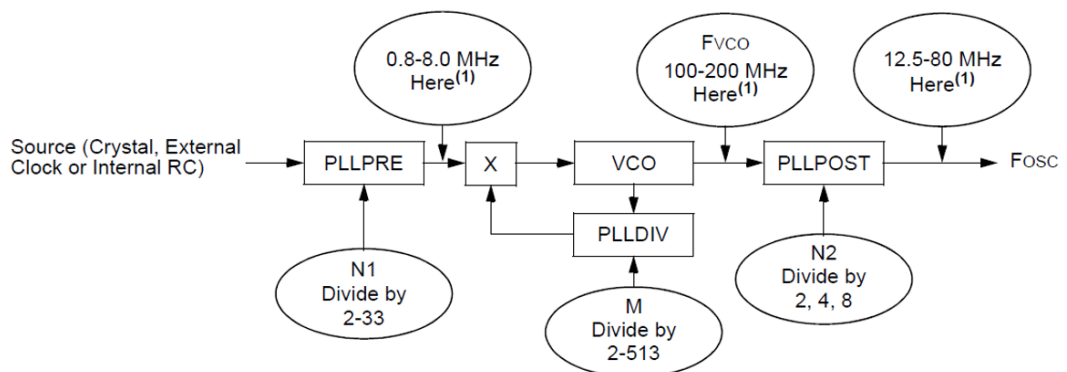
4.2 การออกแบบโปรแกรมตั้งค่าระบบสัญญาณนาฬิกา

หลังจากที่กำหนดคุณสมบัติเริ่มต้นในส่วนของแหล่งสัญญาณนาฬิกาแล้ว สัญญาณที่ได้จะไปยังปลายทางต่าง ๆ ตามเส้นทึบสีแดงดังรูปที่ 44 ในส่วนต่อมาก็คือการตั้งค่าเพื่อกำหนดขนาดตัวคูณในวงจรทวีคูณความถี่ สัญญาณนาฬิกาจากคริสตอล (POSCCLK) มีความถี่ 7.3728 เมกะเฮิร์ตซ์ แผนภาพกล่องของวงจรทวีคูณความถี่แสดงดังรูปที่ 45 เลือกค่า N1, M และ N2 เท่ากับ 2, 4 และ 2 ตามลำดับ จะได้ความถี่ F_{VCO} และ F_{OSC} เท่ากับ 14.7456 เมกะเฮิร์ตซ์และ 7.3728 เมกะเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ สัญญาณความถี่ F_{VCO} จะถูกนำไปใช้เป็นแหล่งสัญญาณนาฬิกาของโมดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ส่วนสัญญาณความถี่ F_{OSC} จะถูกนำไปหาร 2 ได้เป็นสัญญาณความถี่สำหรับหน่วยประมวลผลกลาง (F_{CY}) ส่วน F_P คือสัญญาณความถี่ที่นำไปใช้กับโมดูลต่อพ่วงอื่น ๆ เช่น โมดูลตัวจับเวลา ความถี่ของ F_{CY} และ F_P มีค่าเท่ากันคือ 3.6864 เมกะเฮิร์ตซ์ แหล่งสัญญาณนาฬิกา

ของโมดูลสร้างสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันได้มาจากสัญญาณนาฬิกาเสริม (A_{CLK}) เลือกสัญญาณนาฬิกาจากคริสตอลมาผ่านวงจรทวีคูณความถี่เสริม 16 เท่า และเลือกตัวหารความถี่ N เป็น 1 เพื่อให้โมดูลสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง สุดท้ายจึงได้สัญญาณนาฬิกาเสริมความถี่ 117.9648 เมกะเฮิร์ตซ์
 คู่มือโปรแกรมตั้งค่าระบบสัญญาณนาฬิกาได้จากภาคผนวก ค.3 และ ค.4



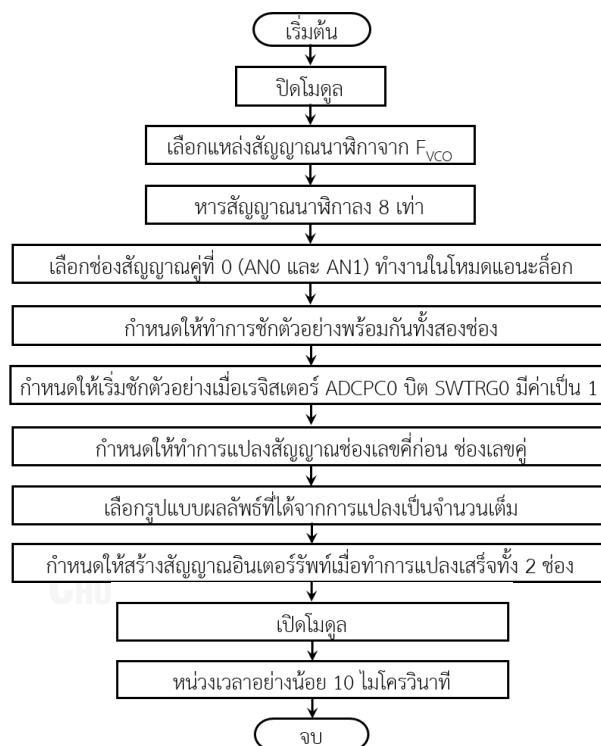
รูปที่ 44 ระบบสัญญาณนาฬิกาของ dsPIC33FJ06GS001



รูปที่ 45 แผนภาพกล่องของวงจรทวีคูณความถี่

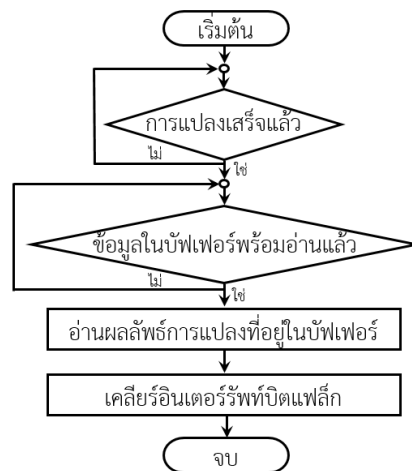
4.3 การออกแบบโปรแกรมแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

ก่อนจะใช้งานโมดูลต้องตั้งค่าก่อน ขั้นตอนการตั้งค่าแสดงดังผังในรูปที่ 46 เมื่อเริ่มตั้งค่า จำเป็นต้องปิดโมดูลก่อนมิเช่นนั้นจะไม่สามารถเขียนข้อมูลลงในบางเรจิสเตอร์ได้ ลำดับขั้นตอนการตั้งค่าไม่ได้กำหนดแน่นอน อาจสลับขั้นตอนกันได้ ความถี่ของสัญญาณ F_{VCO} ยังคงสูงเกินกว่าค่าที่โมดูลรับได้จึงต้องหารความถี่ลง จากการทดลองพบว่าเมื่อหารความถี่ลง 8 เท่า เหลือความถี่ 1.8432 เมกะเฮิรตซ์ ทำให้การแปลงมีเสถียรภาพดีที่สุด dsPIC33FJ06GS001 มีวงจรชั๊กตัวอย่าง 2 ชุด ทำให้สามารถชั๊กตัวอย่างได้พร้อมกัน 2 ช่อง หลังจากตั้งค่าเสร็จจึงเปิดโมดูล และต้องหน่วงเวลาอย่างน้อย 10 ไมโครวินาที เพื่อรอให้โมดูลเสถียรก่อนจะเริ่มใช้งาน (ดูภาคผนวก ค.5 และ ค.6)



รูปที่ 46 ผังการตั้งค่าโมดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

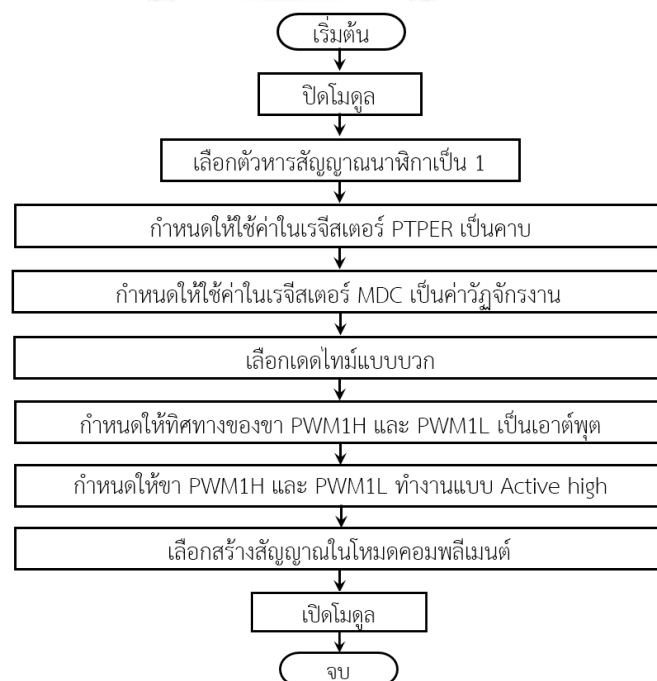
เมื่อเซตบิต SWTRG0 ในเรจิสเตอร์ ADCPC0 ให้มีค่าเป็น 1 แล้วโมดูลจะเริ่มชั๊กตัวอย่าง และทำการแปลงโดยใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 2.24 ไมโครวินาที เมื่อการแปลงเสร็จสิ้นจะเกิดสัญญาณอินเตอร์รัพท์ ทำให้โปรแกรมหลักหยุดทำงาน และโปรแกรมเริ่มทำงานในอินเตอร์รัพท์เซอร์วิสรูทีน (Interrupt service routine) ซึ่งมีผังการทำงานแสดงดังรูปที่ 47 โปรแกรมส่วนนี้เขียนไว้ด้านล่างสุดของไฟล์ main.c หลังจากทีจบการทำงานแล้วจะกลับไปทำงานในโปรแกรมหลักอีกครั้ง



รูปที่ 47 ผังการทำงานในอินเทอร์รัพท์เซอร์วิสรูทีนของการแปลงสัญญาณคู่ที่ 0

4.4 การออกแบบโปรแกรมสร้างสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชัน

การตั้งค่าโมดูลแสดงดังรูปที่ 48 เริ่มจากปิดโมดูลก่อนตั้งค่า เลือกตัวหารสัญญาณนาฬิกาเป็น 1 เพื่อที่จะสร้างสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันได้ละเอียดสูงสุด 12 บิต เลือกเวลาเว้นว่างแบบบวกเพื่อป้องกันไม่ให้ออสเฟตทำงานพร้อมกัน สุดท้ายเลือกสร้างสัญญาณในโหมดคอมพลิเมนต์ โดยสัญญาณที่ขา PWM1L เป็นคอมพลิเมนต์ของสัญญาณที่ขา PWM1H หลังจากนั้นจึงเปิดโมดูลเพื่อเริ่มสร้างสัญญาณ การเขียนโปรแกรมการตั้งค่าอ้างอิงจาก [42, 43] เพื่อป้องกันความผิดพลาดทางซอฟต์แวร์



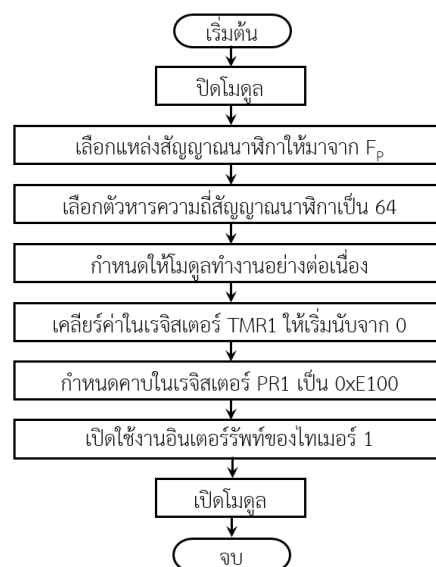
รูปที่ 48 ผังการตั้งค่าโมดูลสร้างสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันความเร็วสูง

เราสามารถกำหนดคาบ ค่าวัฏจักรงาน เวลาเว้นว่างขอบขาขึ้น และเวลาเว้นว่างขอบขาลงได้ โดยเขียนข้อมูลลงในเรจิสเตอร์ PTPER, MDC , DTR1 และ ALTDTR1 ตามลำดับ ค่าที่ต้องการเขียนลงในเรจิสเตอร์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.23 [44] ค่าที่ได้จากการคำนวณอาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากสัญญาณนาฬิกาของโมดูลเกิดจากการคูณจนได้ความถี่สูง ดังนั้นจึงต้องปรับค่าอย่างละเอียดอีกครั้ง จากการทดสอบพบว่าค่าในเรจิสเตอร์ PTPER ที่ทำให้ได้สัญญาณมีคาบใกล้เคียง 10 ไมโครวินาทีที่สุดคือ 9430 ดังนั้นค่าในเรจิสเตอร์ MDC จึงมีค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 9430 ส่วนเวลาเวลาเว้นว่างออกแบบไว้ 100 นาโนวินาที ค่าในเรจิสเตอร์ DTR1 และ ALTDTR1 จึงควรมีค่าเป็น 94 โปรแกรมตั้งค่าโมดูลสร้างสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันความเร็วสูงแสดงในภาคผนวก ค.7 และ ค.8

$$PTPER = \frac{REFCLK}{7.37MHz} \cdot \frac{Desired\ PWM\ Period}{1.04\ ns \cdot PWM\ input\ clock\ prescaler} = \frac{7.3728 \times 10^6}{7.37 \times 10^6} \cdot \frac{10 \times 10^{-6}}{1.04 \times 10^{-9} \cdot 1} = 9619 \quad (3.23)$$

4.5 การออกแบบโปรแกรมตัวจับเวลา 1

ตัวจับเวลาทำงานโดยนับสัญญาณนาฬิกาและเก็บค่าที่นับได้ไว้ในเรจิสเตอร์ TMR1 ตัวจับเวลาจะนับไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะนับถึงค่าที่กำหนด ในงานวิจัยนี้ต้องการให้ตัวจับเวลา 1 เกิดการล้นทุก ๆ 1 วินาที การนับหนึ่งครั้งในเรจิสเตอร์ TMR1 ใช้เวลา 1 คาบสัญญาณนาฬิกา เมื่อสัญญาณ F_p ถูกหารด้วย 64 จึงได้สัญญาณนาฬิกา 57.6 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งมีคาบ 17.3611 ไมโครวินาที ดังนั้นหากต้องการให้การนับใช้เวลา 1 วินาทีจะต้องนับทั้งหมด 57600 ครั้ง เมื่อแปลงเป็นเลขฐาน 16 จึงได้ค่า 0xE100 สำหรับเขียนลงในเรจิสเตอร์ PR1 โปรแกรมตั้งค่าโมดูลตัวจับเวลา 1 แสดงในภาคผนวก ค.9 และ ค.10 ผังการตั้งค่าโมดูลสรุปได้ดังผังในรูปที่ 49



รูปที่ 49 ผังการตั้งค่าโมดูลตัวจับเวลา 1

ทุกครั้งที่ค่าในเรจิสเตอร์ TMR1 เพิ่มขึ้นจนเท่ากับค่าในเรจิสเตอร์ PR1 จะเกิดสัญญาณอินเทอร์รัพท์ โปรแกรมหลักจะหยุดทำงาน และไปเริ่มทำงานในอินเทอร์รัพท์เซอร์วิสรูทีนของตัวจับเวลา 1 ซึ่งภายในได้เขียนคำสั่งไว้ 2 คำสั่ง คือกำหนดค่าให้ตัวแปร p มีค่าเท่ากับ 0 และคำสั่งเคลียร์บิตบ่งชี้อินเทอร์รัพท์ (Interrupt flag bit) ตัวแปร p ถูกนำไปใช้เป็นเงื่อนไขของวงวนอนันต์ในโปรแกรมหลักเพื่อรอให้ตัวจับเวลานับเวลา 1 วินาที เมื่อค่าใน p เปลี่ยนเป็น 0 จึงจะออกจากวงวนได้

4.6 การออกแบบโปรแกรมติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ขั้นตอนการทำงานของระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตที่ถูกปรับแต่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.9 จากรูปที่ 23 ระเบียบวิธีมีกระบวนการสังเกต และกระบวนการรบกวนเหมือนกับระเบียบวิธีแบบดั้งเดิมทุกประการ เพียงแต่มีกระบวนการตรวจสอบจุดทำงาน และกระบวนการกำหนดขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน (ดูรูปที่ 24) เข้ามาแทรกอยู่ระหว่างกระบวนการทั้งสอง ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงการออกแบบโปรแกรม (ดูได้จากภาคผนวก ค.11 และ ค.12)

4.6.1 กระบวนการสังเกต

การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลมีความคลาดเคลื่อนอยู่ ± 2 LSB ออกแบบให้โปรแกรมชกตัวอย่าง 64 ครั้งที่มีความถี่ 446.43 กิโลเฮิร์ตซ์ และหาค่าเฉลี่ย หลังจากนั้นจึงคำนวณกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า และขนาดการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าซึ่งจะนำไปใช้ในการตัดสินใจต่อในกระบวนการตรวจสอบจุดทำงาน และกระบวนการรบกวน กระบวนการการสังเกตใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 0.15 มิลิวินาที

4.6.2 กระบวนการตรวจสอบจุดทำงาน

ทำการประมาณความชันของเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงาน (S) ความชันของเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (Q) และผลต่างของเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (ΔQ) หลังจากนั้นจึงแบ่งคลาสทั้งสี่ตามเงื่อนไขดังรูปที่ 24 (ก) ฟังก์ชันหาค่าสัมบูรณ์ (fabs) เรียกใช้งานจากโปรแกรม math.h ส่วนฟังก์ชันปัดเศษ (rounding) ถูกเขียนขึ้นมาใหม่เนื่องจากฟังก์ชันในคลังโปรแกรมใช้ทรัพยากรหน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรมมากเกินไป

4.6.3 กระบวนการกำหนดขนาดของการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน

หลังจากที่แบ่งคลาสในกระบวนการตรวจสอบจุดทำงานแล้วจึงกำหนดขนาดการเปลี่ยนแปลงวัฏจักรงานตามผังในรูปที่ 24 (ข) โปรแกรมใช้คำสั่ง switch-case โดยตรวจสอบค่าในตัวแปร Class เป็น 1, 2, 3 หรือ 4 ในกรณีที่ Class มีค่าอื่นนอกเหนือจากนี้จะกำหนดให้ขนาดการเปลี่ยนแปลงวัฏจักรงานเท่ากับ 2 (เหมือนกับคลาส 3)

4.6.4 กระบวนการรบกวน

การปรับค่าวัฏจักรงานด้วยการบวก และลบอาจทำให้มีค่าเกิน 100% หรือต่ำกว่า 0% ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงจำเป็นต้องมีฟังก์ชันอิมิต์เพื่อจำกัดให้ค่าวัฏจักรงานอยู่ในช่วง $[0, 100]$ (ใช้เลขจำนวนเต็มแทนทศนิยม) สุดท้ายค่าวัฏจักรงานช่วง $[0, 100]$ จะถูกนำไปแปลงเป็นค่าที่อยู่ในช่วง $[0, 9430]$ ซึ่งจะถูกนำไปเขียนลงในเรจิสเตอร์ MDC ของไมโครคอนโทรลเลอร์พัลส์วิดท์มอดูเลชันต่อไป

หลังจากทำงานตามระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตที่ถูกปรับแต่งแล้ว โปรแกรมจะบันทึกค่าตัวแปรไว้สำหรับคำนวณในรอบถัดไปทั้งหมด 5 ตัวได้แก่ แรงดันไฟฟ้า (V_k) กำลังไฟฟ้า (P_k) การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในรอบก่อนหน้า (ΔP_{k-1}) ขนาดการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าในรอบปัจจุบัน (ΔP_k) และความชันของเส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (Q_k)

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

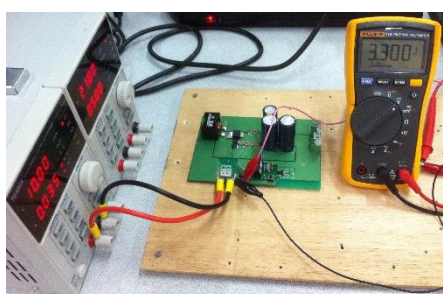
หลังจากที่ประกอบเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือทดสอบการทำงานต่าง ๆ ได้แก่ เสถียรภาพของวงจรรักษาแรงดันไฟฟ้า รูปสัญญาณที่ใช้ขับมอสเฟต ความแม่นยำของการวัดกระแสไฟฟ้าขาเข้า และแรงดันไฟฟ้าขาเข้า ต่อจากนั้นจึงทดลองปรับจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ สร้างเส้นโค้งคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงานเพื่อยืนยันแนวความคิดการปรับจุดทำงาน รวมถึงยืนยันการมีอยู่ของเส้นโค้งเหล่านั้น สุดท้ายจึงทำการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิม และระเบียบวิธีที่พัฒนาขึ้น

5.1 การทดสอบวงจรรักษาแรงดันไฟฟ้า 3.3 โวลต์

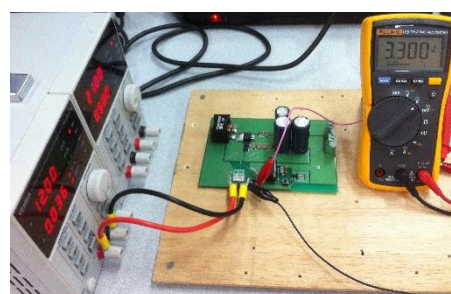
เพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของแรงดันไฟฟ้าขาออก วงจรรักษาแรงดันไฟฟ้า 3.3 โวลต์ถูกนำไปทดสอบภายใต้สภาวะต่าง ๆ การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ เสถียรภาพต่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้า และเสถียรภาพต่ออุณหภูมิทำงาน การทดสอบทั้งสองกรณีทำในลักษณะเดียวกันคือต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 10 ถึง 12 โวลต์เข้ากับเทอร์มินอลบล็อก P3 และวัดแรงดันไฟฟ้าขาออก ด้วยโวลต์มิเตอร์ การทดสอบทำในขณะที่วงจรอื่น ๆ ทำงานที่โหลดพิกัด (ยกเว้นวงจรทอนระดับ)

5.1.1 เสถียรภาพต่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้า

ทำการทดสอบภายในห้อง อุณหภูมิทำงานประมาณ 27 องศาเซลเซียส ปรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.1 โวลต์ โดยปรับค่าตั้งแต่ 10 โวลต์ถึง 12 โวลต์ พบว่าแรงดันไฟฟ้าขาออกวัดได้ 3.3 โวลต์ตลอดการทดสอบ รูปที่ 50 (ก) และรูปที่ 50 (ข) แสดงผลการทดสอบ



(ก) แรงดันไฟฟ้าขาเข้า 10 โวลต์



(ข) แรงดันไฟฟ้าขาเข้า 12 โวลต์

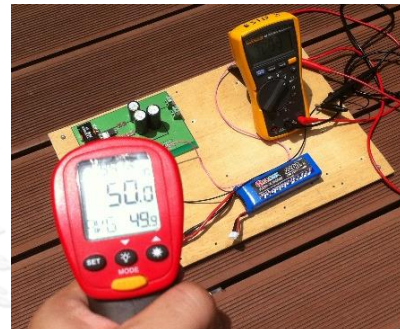
รูปที่ 50 การทดสอบเสถียรภาพต่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้า

5.1.2 เสถียรภาพต่ออุณหภูมิทำงาน

ในการทดสอบนี้ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมพอลิเมอร์ (Li-Po) 12 โวลต์ เป็นแหล่งจ่าย นำวงจรไปทดสอบกลางแจ้งที่อุณหภูมิแวดล้อมประมาณ 37 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 51 (ก) ปล่อยวงจรทดสอบไว้กลางแดดให้อุณหภูมิทำงานเพิ่มขึ้นจนถึง 50 องศาเซลเซียส และคอยวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรด ดังรูปที่ 51 (ข) จากการสังเกตพบว่าแรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าคงที่ 3.3 โวลต์ จนกระทั่งอุณหภูมิสูงกว่า 47 องศาเซลเซียส แรงดันไฟฟ้าขาออกเริ่มลดลงเหลือ 3.299 โวลต์



(ก) วงจรสำหรับทดสอบเสถียรภาพต่ออุณหภูมิ

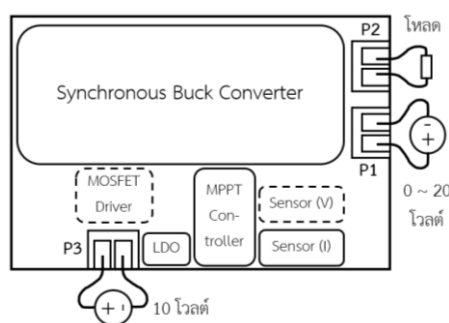


(ข) วัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์

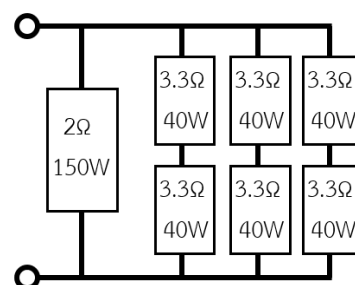
รูปที่ 51 การทดสอบเสถียรภาพต่ออุณหภูมิทำงาน

5.2 การตรวจสอบรูปสัญญาณขั้วมอสเฟต

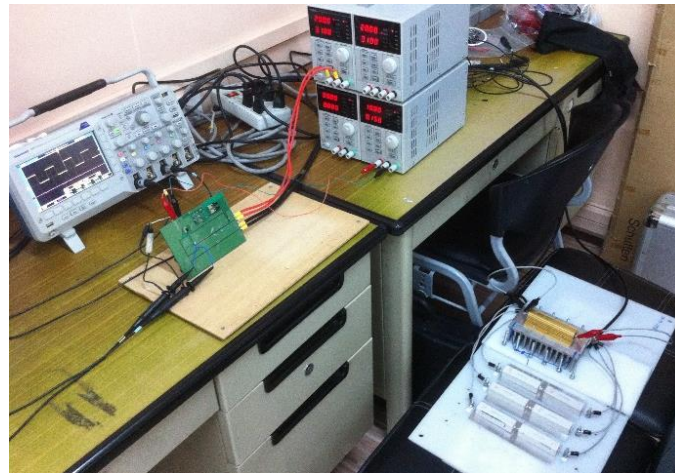
ทำการตรวจสอบโดยต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าที่เทอร์มินอลบล็อก P1 จ่ายแรงดันไฟฟ้าขาเข้าต่างกัน 3 ค่าได้แก่ 0 โวลต์ 10 โวลต์ และ 20 โวลต์ (จำลองแทนแผงเซลล์แสงอาทิตย์) ต่อแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า 10 โวลต์ ที่เทอร์มินอลบล็อก P3 ตามลำดับ สูดท้ายต่อโหลดความต้านทานเข้าที่เทอร์มินอลบล็อก P2 ดังรูปที่ 52 (ก) โหลดประกอบด้วยตัวต้านทานคงที่แบบไวร์วาวด์ 7 ตัวต่อกันดังรูปที่ 52 (ข) (จากการทดสอบหาเส้นตรงโหลดพบที่มีความต้านทาน 1.13 โอห์ม) และการวัดสัญญาณด้วยดิจิทัลดอสซิลโลสโคป Tektronix DPO 2024 แสดงดังรูปที่ 52 (ค)



(ก) ผังการเชื่อมต่อวงจร

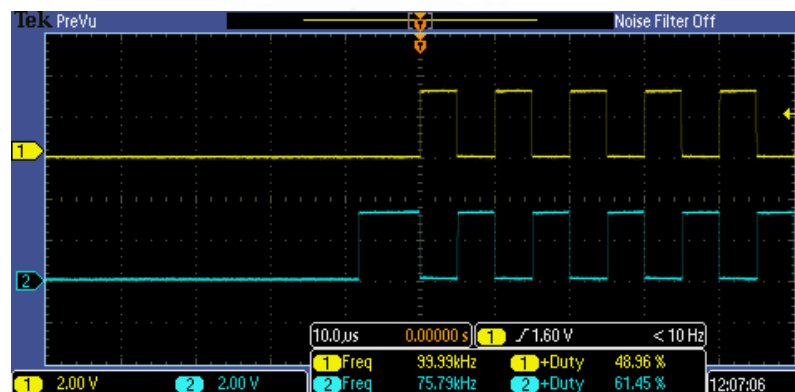


(ข) โครงสร้างของโหลดความต้านทาน



(ค) การวัดรูปสัญญาณด้วยดิจิทัลออสซิลโลสโคป
รูปที่ 52 วงจรสำหรับทดสอบขับมอสเฟต

ไมโครคอนโทรลเลอร์สร้างสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ วัฏจักรงาน 50% และมีเวลาเว้นว่างแบบบวก 100 นาโนวินาที เมื่อเปิดแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่เทอร์มินอลบล็อก P3 สามารถวัดสัญญาณที่ขา PWM1H และ PWM1L ของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ดังรูปที่ 53 กราฟสี่เหลี่ยมด้านบน และกราฟสี่เหลี่ยมด้านล่างคือสัญญาณที่วัดได้จากขา PWM1H และ PWM1L ตามลำดับ แกนตั้ง และแกนนอนปรับให้มีขนาด 2 โวลต์ต่อช่อง และ 10 ไมโครวินาทีต่อช่อง สัญญาณทั้งสองเป็นคอมพลิเมนต์ของกันและกันเพื่อทำให้มอสเฟตทั้งสองตัวสลับกันทำงาน

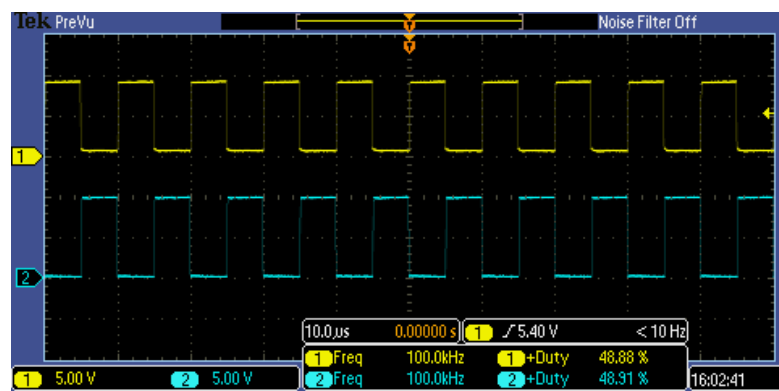


รูปที่ 53 รูปสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันที่ขา PWM1H และ PWM1L

สังเกตว่าไมโครคอนโทรลเลอร์สร้างสัญญาณที่ขา PMW1L ก่อน ทำให้มอสเฟตตัวล่างทำงาน และส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่สวิตช์ซิงโหนด (จุด HS) เท่ากับศูนย์ ตัวเก็บประจุบูทสแตร์ปจะสะสมพลังงานจนมีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับแหล่งจ่าย (10 โวลต์) ในช่วงนี้ เพื่อใช้ขับมอสเฟตตัวบนต่อไป รูปสัญญาณที่ขา HO และ LO ของตัวนำขับมอสเฟตทั้ง 3 กรณีมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

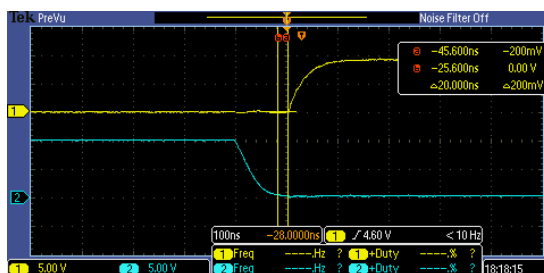
5.2.1 กรณีที่ 1: แรงดันไฟฟ้าขาเข้ามีขนาด 0 โวลต์

รูปสัญญาณที่วัดได้ที่ขา HO (ด้านบน สีเหลือง) และ LO (ด้านล่าง สีฟ้า) ของตัวนำขับมอสเฟตแสดงดังรูปที่ 54 รูปสัญญาณมีลักษณะคล้ายกับสัญญาณที่ขับออกมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ คือเป็นสัญญาณพัลส์สี่เหลี่ยม มีคาบ 10 ไมโครวินาที มีค่าวัฏจักรงานประมาณ 49% และมีแอมพลิจูด 10 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าเกตซอร์สของมอสเฟตมากกว่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่มเปลี่ยน ($V_{GS(th)} = 1.8$ โวลต์) มอสเฟตทั้งสองตัวจึงสลับกันทำงานได้ ส่วนค่าวัฏจักรงานที่วัดได้จากออสซิลโลสโคปมีค่าน้อยกว่าค่าที่คาดหวังไว้ 1% เป็นผลสืบเนื่องมาจากช่วงเวลาเว้นว่าง

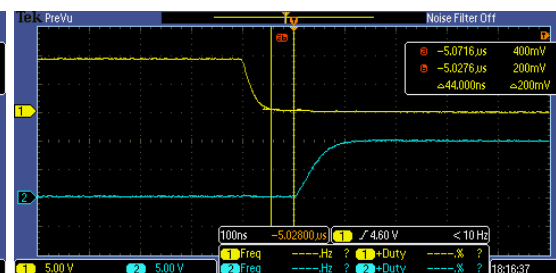


รูปที่ 54 รูปสัญญาณที่ขา HO และ LO ของตัวนำขับมอสเฟตในกรณีที่ 1

เมื่อขยายเข้าไปดูบริเวณขอบขาขึ้น และขอบขาลงของสัญญาณ HO และ LO ดังรูปที่ 55 (ก) และรูปที่ 55 (ข) พบว่าขอบสัญญาณทั้งสองห่างกัน 100 นาโนวินาที แต่ช่วงเวลาเว้นว่าง (ช่วงเวลาที่สัญญาณ HO และ LO เป็นศูนย์ทั้งคู่) น้อยกว่าที่คาดการณ์ไว้ แต่ก็เพียงพอที่จะป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไฟฟ้าพุ่งสูงฉับพลันได้ จากรูปที่ 55 (ก) และรูปที่ 55 (ข) ช่วงเวลาเว้นว่างวัดจากออสซิลโลสโคปได้ประมาณ 20 นาโนวินาที และ 44 นาโนวินาทีตามลำดับ



(ก) ช่วงขอบขาลงของสัญญาณ LO

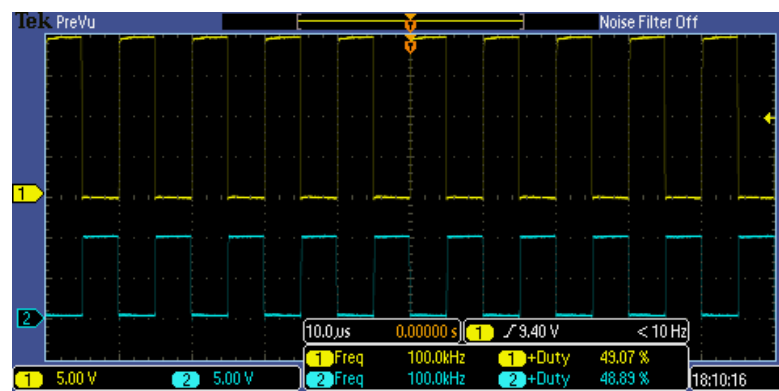


(ข) ช่วงขอบขาลงของสัญญาณ HO

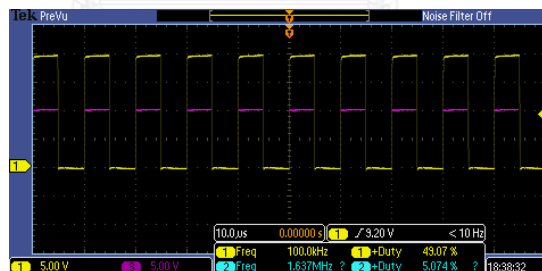
รูปที่ 55 ช่วงเวลาเว้นว่างของสัญญาณ HO และ LO ในกรณีที่ 1

5.2.2 กรณีที่ 2: แรงดันไฟฟ้าขาเข้ามีขนาด 10 โวลต์

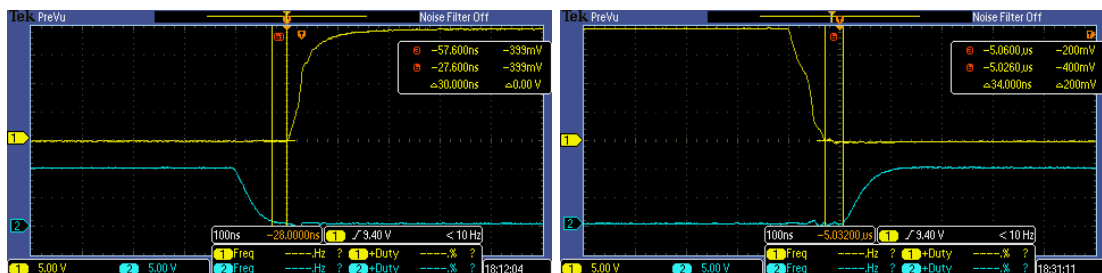
เมื่อแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเพิ่มขึ้นเป็น 10 โวลต์ แอมพลิจูดของสัญญาณ HO สูงขึ้นเป็น 20 โวลต์ ดังรูปที่ 56 เมื่อมอสเฟตตัวบนนำกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่สวิตชิ่งโหนด (จุดเดียวกับขาซอร์สของมอสเฟตตัวบน) จะมีค่าประมาณแรงดันไฟฟ้าขาเข้า 10 โวลต์ วงจรบุทสแตร์ปซึ่งสะสมแรงดันไฟฟ้าไว้ 10 โวลต์จากสถานะก่อนหน้าจะยกแรงดันไฟฟ้า HO ให้สูงกว่าแรงดันไฟฟ้าที่สวิตชิ่งโหนด (กราฟสีชมพู) 10 โวลต์ดังแสดงในรูปที่ 57 แรงดันไฟฟ้าที่ขาเกตมากกว่าแรงดันที่ขาซอร์สมอสเฟตตัวบนจึงสามารถทำงานได้ ส่วนช่วงเวลาเว้นว่างแสดงดังรูปที่ 58 (ก) และรูปที่ 58 (ข)



รูปที่ 56 รูปสัญญาณที่ขา HO และ LO ของตัวนำขั้วมอสเฟตในกรณีที่ 2



รูปที่ 57 รูปสัญญาณที่ขา HO และ HS ของตัวนำขั้วมอสเฟตในกรณีที่ 2



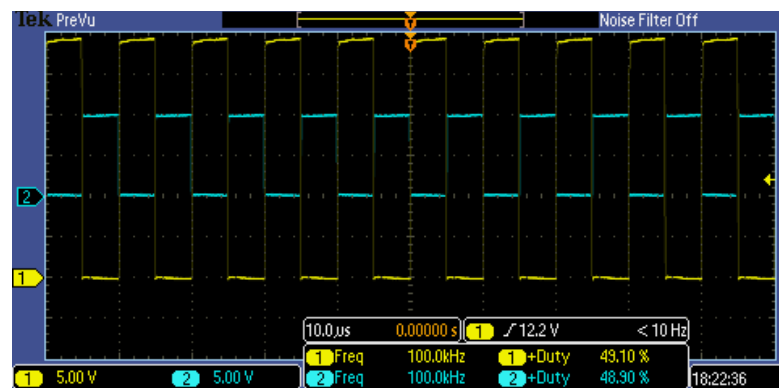
(ก) ช่วงขอบขาลงของสัญญาณ LO

(ข) ช่วงขอบขาลงของสัญญาณ HO

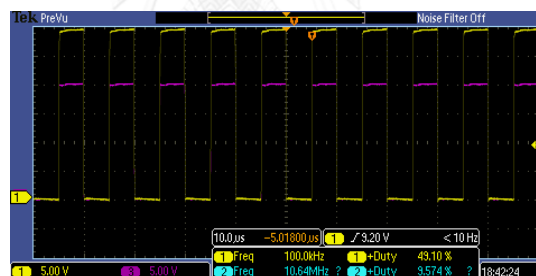
รูปที่ 58 ช่วงเวลาเว้นว่างของสัญญาณ HO และ LO ในกรณีที่ 2

5.2.3 กรณีที่ 3: แรงดันไฟฟ้าขาเข้ามีขนาด 20 โวลต์

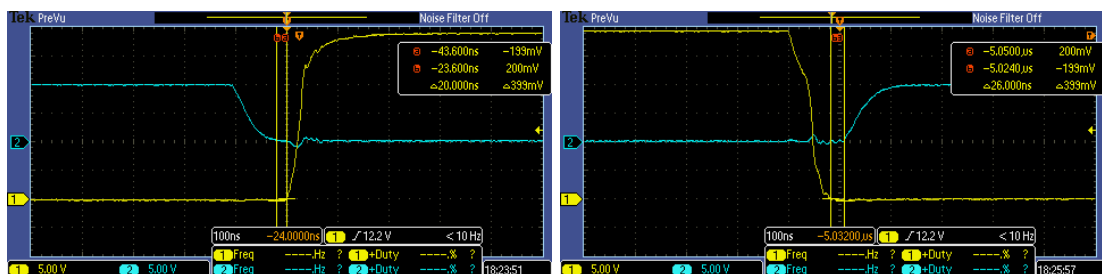
ผลการทดสอบเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการทดสอบในกรณีที่ 2 คือสัญญาณที่ขา HO มีแอมพลิจูด 30 โวลต์ ดังรูปที่ 59 และมีขนาดสูงกว่าแรงดันไฟฟ้าที่สวิตช์ชิ่งโหนดอยู่ 10 โวลต์เพื่อขับมอสเฟตตัวบนดังรูปที่ 60 ช่วงเวลาเว้นว่างในรูปที่ 61 (ก) และรูปที่ 61 (ข) วัดได้ประมาณ 20 นาโนวินาที และ 26 นาโนวินาที



รูปที่ 59 รูปสัญญาณที่ขา HO และ LO ของตัวนำขับมอสเฟตในกรณีที่ 3



รูปที่ 60 รูปสัญญาณที่ขา HO และ HS ของตัวนำขับมอสเฟตในกรณีที่ 3



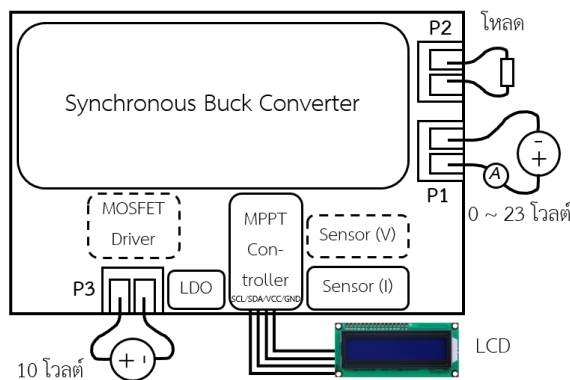
(ก) ช่วงขอบขาลงของสัญญาณ LO

(ข) ช่วงขอบขาลงของสัญญาณ HO

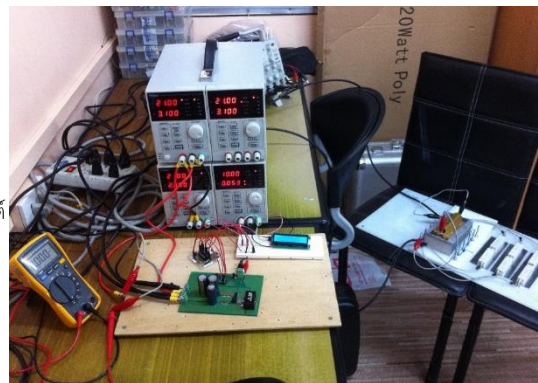
รูปที่ 61 ช่วงเวลาเว้นว่างของสัญญาณ HO และ LO ในกรณีที่ 3

5.3 การทดสอบวัดกระแสไฟฟ้าขาเข้า

ทดสอบวัดกระแสไฟฟ้าขาเข้าโดยต่อวงจรดังรูปที่ 62 (ก) ต่อจอภาพผลึกเหลว (Liquid crystal display) เพื่อใช้แสดงค่ากระแสไฟฟ้าขาเข้าที่อ่านได้ดังรูปที่ 62 (ข) จอภาพสื่อสารด้วยโปรโตคอล I²C ซึ่งใช้สายสัญญาณ 2 เส้นต่อเข้าที่ขา SCL และ SDA ของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยสายสัญญาณแต่ละเส้นจะมีตัวต้านทาน 1 กิโลโอห์มต่ออยู่ระหว่างไฟเลี้ยง 3.3 โวลต์กับสายสัญญาณ (ต่อแบบ Pull-up)



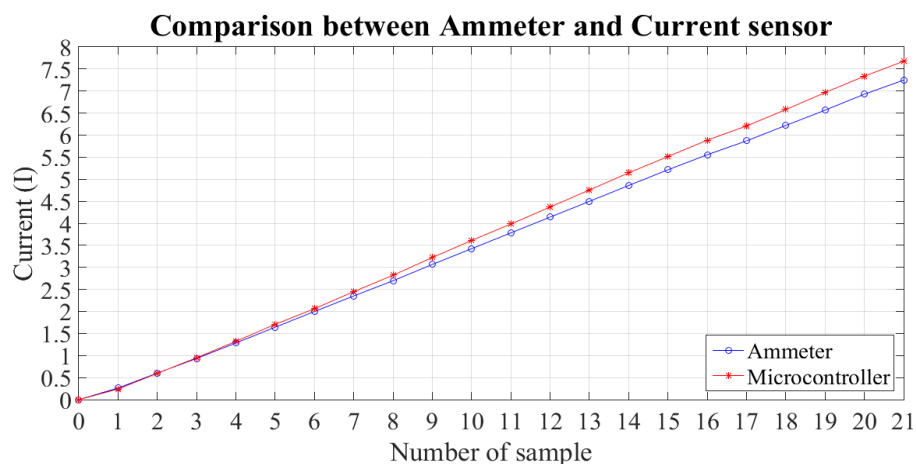
(ก) ผังการเชื่อมต่อวงจร



(ข) การทดสอบวัดกระแสไฟฟ้าขาเข้า

รูปที่ 62 การทดสอบวัดกระแสไฟฟ้าขาเข้าของเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

เนื่องจากโหลดเป็นตัวต้านทานแบบค่าคงที่ จึงต้องปรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าเพื่อให้กระแสไฟฟ้าขาเข้าแปรค่าตามไปด้วย การทดสอบนี้จะปรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าตั้งแต่ 0 โวลต์จนถึง 21 โวลต์



รูปที่ 63 กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าเข้าที่วัดได้จากแอมมิเตอร์ และไมโครคอนโทรลเลอร์

มอสเฟตถูกขับที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ค่าวัฏจักรงาน 65% กระแสไฟฟ้าขาเข้าจึงแปรค่าจาก 0 แอมแปร์ ถึง 7.25 แอมแปร์ กราฟกระแสไฟฟ้าขาเข้าที่วัดได้จากแอมมิเตอร์ (สีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ (สีแดง) แสดงดังรูปที่ 63

จากรูปที่ 63 ชี้ให้เห็นว่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์มีแนวโน้มสูงชันมากเกินไปกว่าที่ควรจะเป็น เนื่องจากมีตัวต้านทาน 10 โอห์ม 2 ตัวเพิ่มเข้ามาระหว่าง ตัวต้านทานชั๊นท์ และ ไอซี INA286 ทำให้อัตราขยายคลาดเคลื่อน (Gain error) [34] ดังนั้นจึงต้องทำการปรับเทียบโดยการคูณค่าคงที่ ใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) หาค่าคงที่ได้จากสมการที่ 4.1

$$[A]_{1 \times 1} = [[X^T]_{1 \times n} \cdot [X]_{n \times 1}]^{-1} \cdot [X^T]_{1 \times n} \cdot [Y]_{n \times 1} \quad (4.1)$$

โดยที่

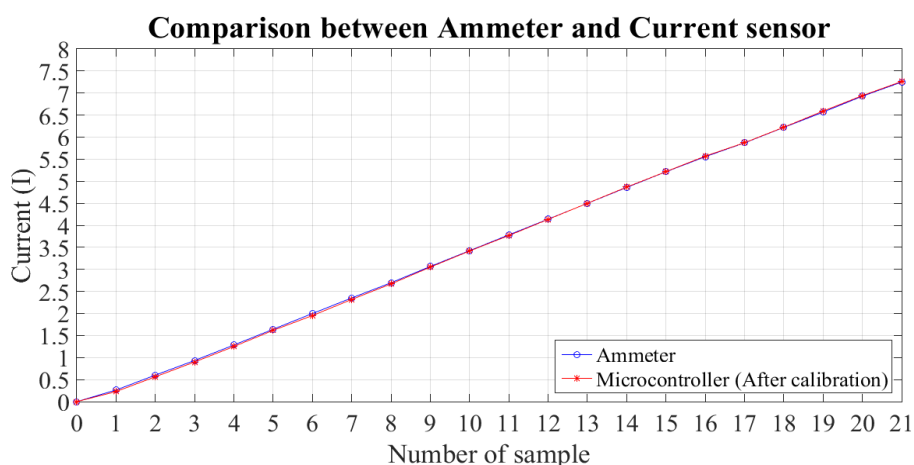
A คือ ค่าคงที่สำหรับคูณเพื่อชดเชย

X คือ ชุดข้อมูลที่อ่านได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์

Y คือ ชุดข้อมูลที่วัดได้จากแอมมิเตอร์

n คือ จำนวนข้อมูล (ในการทดสอบนี้ n มีค่าเท่ากับ 22)

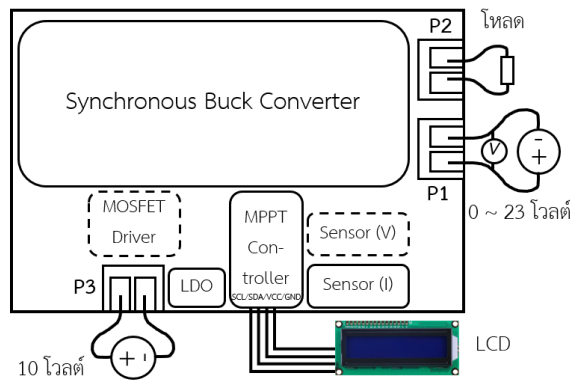
คำนวณค่าคงที่ได้ประมาณ 0.9461 และนำไปคูณกับค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ พร้อมเปรียบเทียบกับค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากแอมมิเตอร์ได้ดังรูปที่ 64 หลังจากปรับเทียบแล้วขนาดของผลต่างมากที่สุดลดลงจาก 427 มิลลิแอมแปร์ เหลือเพียง 47 มิลลิแอมแปร์



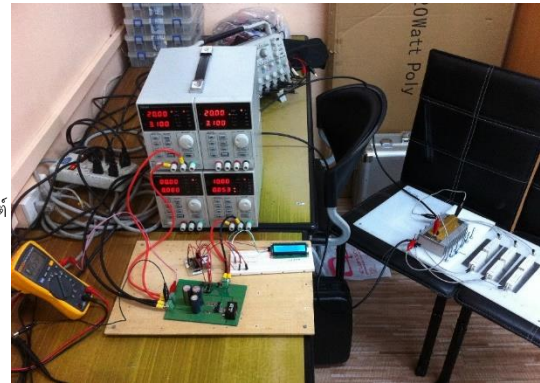
รูปที่ 64 กราฟเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ และค่าที่ได้หลังจากการปรับเทียบ

5.4 การทดสอบวัตต์แรงดันไฟฟ้าขาเข้า

ทดสอบวงจรวัตต์แรงดันไฟฟ้าโดยประกอบวงจรดังรูปที่ 65 (ก) วัดแรงดันไฟฟ้าขาเข้าด้วยโวลต์มิเตอร์ และต่อจอภาพผลึกเหลวแยกออกมาเพื่อใช้แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าที่อ่านได้ดังรูปที่ 65 (ข)



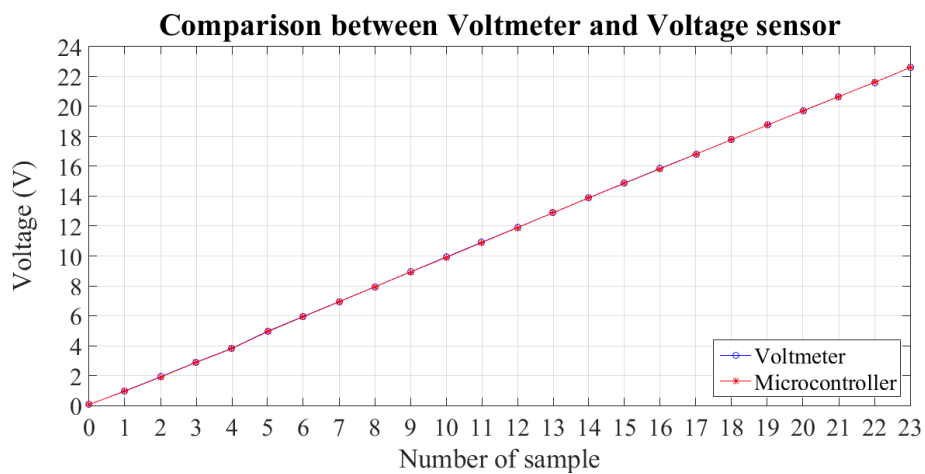
(ก) ผังการเชื่อมต่อวงจร



(ข) การทดสอบวัตต์แรงดันไฟฟ้าขาเข้า

รูปที่ 65 การทดสอบวัตต์แรงดันไฟฟ้าขาเข้าของเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

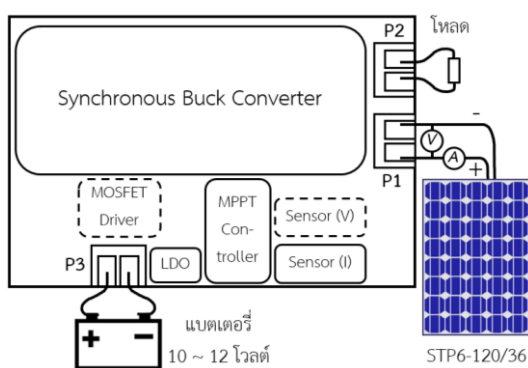
ไมโครคอนโทรลเลอร์ขับเคลื่อนที่ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ค่าวัฏจักรงาน 50% ปรับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าจาก 0 โวลต์ ถึง 23 โวลต์ โดยปรับเพิ่มขึ้นทีละ 1 โวลต์ กราฟแรงดันไฟฟ้าขาเข้าที่วัดได้จากโวลต์มิเตอร์ (สีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ (สีแดง) แสดงดังรูปที่ 66 ขนาดของผลต่างสูงสุดมีค่าไม่เกิน 30 มิลลิโวลต์ จึงไม่จำเป็นต้องปรับเทียบ



รูปที่ 66 กราฟเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าขาเข้าที่วัดได้จากโวลต์มิเตอร์ และไมโครคอนโทรลเลอร์

5.5 การทดลองปรับจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เพื่อยืนยันแนวคิดการปรับจุดทำงาน และยืนยันการมีอยู่ของเส้นโค้งคุณลักษณะที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ทำการทดลองโดยต่อวงจรดังรูปที่ 67 (ก) นำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โหลด และแบตเตอรี่ 12 โวลต์ต่อเข้ากับเทอร์มินอลบล็อก P1 P2 และ P3 ตามลำดับ ใช้โวลต์มิเตอร์ และแอมมิเตอร์วัดจุดทำงานงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ STP6-120/36 ดังรูปที่ 67 (ข)



(ก) ผังการเชื่อมต่อวงจร



(ข) การวัดจุดทำงาน

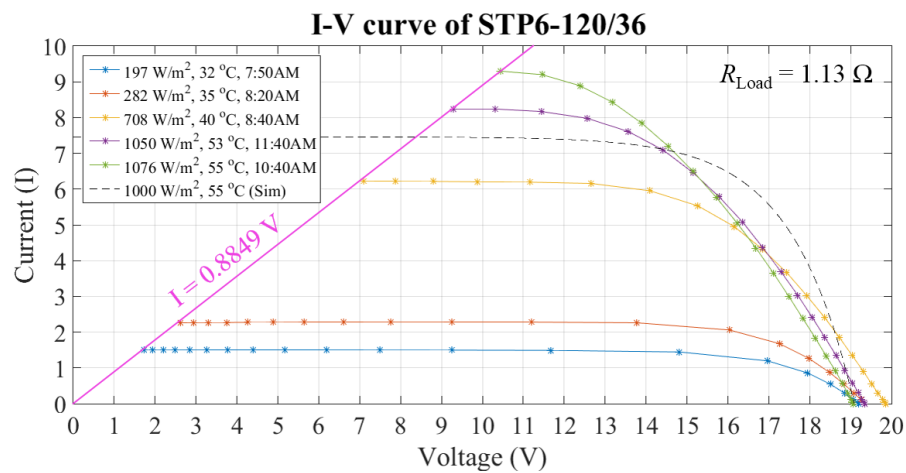
รูปที่ 67 วงจรสำหรับการทดลองปรับจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การปรับจุดทำงานทำได้โดยปรับค่าวัฏจักรงานเพิ่มขึ้นครั้งละ 5% จาก 0% จนถึง 100% อินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรทอนระดับจะมีค่าเริ่มต้นเป็นอนันต์ และจะค่อย ๆ ลดลงจนมีค่าเท่ากับ โหลดความต้านทานที่ต่อไว้ จุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เริ่มเคลื่อนที่จากด้านขวามายังด้านซ้าย จุดทำงานถูกวัดที่เวลาต่าง ๆ ของวันที่ 9 มิถุนายน พ.ศ. 2559 ค่าความเข้มแสงได้มาจากตัวรับรู้แสงบนดาดฟ้าของอาคารบุญรอด บิณฑสันต์ (ตึกภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า) ดูข้อมูลสภาพภูมิอากาศเพิ่มเติมได้จากภาคผนวก ง.1 แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่วัดได้สามารถนำมาพล็อตได้เป็นเส้นโค้งกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้างดรูปที่ 68

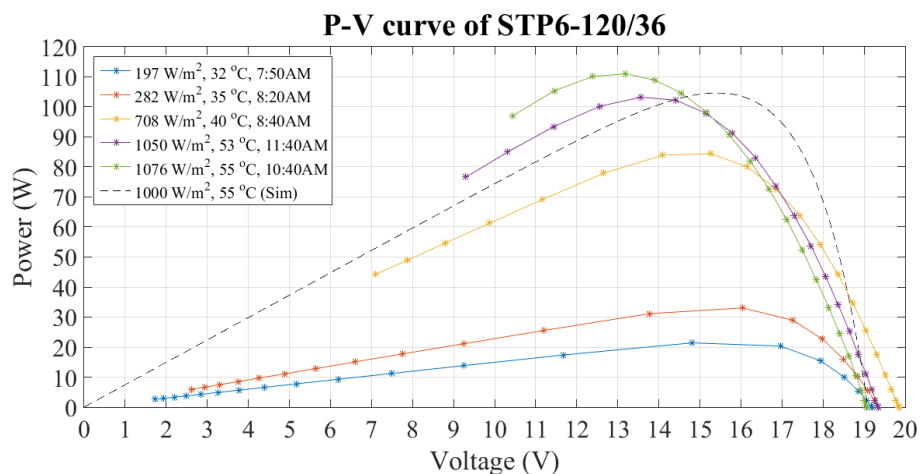
จากรูปที่ 68 เส้นโค้งที่ได้จากการทดลองนี้ไม่สมบูรณ์เนื่องจากโหลดตัวต้านทานมีขนาดประมาณ 1.13 โอห์ม ถึงแม้วัฏจักรงานมีค่ามากที่สุดแล้วก็ไม่สามารถทำให้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรทอนระดับต่ำไปกว่านี้ เส้นโค้งจึงถูกจำกัดบริเวณให้อยู่ทางด้านขวามือของเส้นตรงโหลด (สีชมพู) ที่มีความชันประมาณ 0.8849 เส้นโค้งสีน้ำเงิน สีแดง สีส้ม สีม่วง และสีเขียว เรียงตามปริมาณความเข้มแสงจากน้อยไปหามาก ส่วนเส้นประสีดำคือเส้นโค้งที่ได้จากการจำลองบนโปรแกรมแมทแล็บ เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นกระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้น จากเส้นโค้งสีเขียวแสดงให้เห็นว่ากระแสไฟฟ้าขณะลัดวงจรอาจสูงได้ถึง 9.3 แอมแปร์ ซึ่งมากกว่าที่ระบุไว้ที่แผ่นป้ายด้านหลัง ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มแสง และอุณหภูมิสูงกว่าสภาวะทดสอบมาตรฐาน ในทางตรงกันข้ามแรงดันไฟฟ้า

ขณะเปิดวงจรมีค่าน้อยกว่าค่าที่ระบุไว้เนื่องจากอุณหภูมิสูง ค่าสูงสุดที่วัดได้คือ 19.85 โวลต์ นอกจากนี้สังเกตว่าขนาดของความชันบริเวณด้านขวาของเส้นโค้งน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเส้นโค้งที่ได้จากการจำลอง เป็นผลมาจากความต้านทานอนุกรมในเซลล์แสงอาทิตย์ ยังมีความต้านทานมากขนาดของความชันก็จะน้อยลง และส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง [45]

เมื่อนำกระแสไฟฟ้าจากเส้นโค้งในรูปที่ 68 คูณกับแรงดันไฟฟ้าจะได้เส้นโค้งกำลังและแรงดันไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 69 จากกราฟเห็นได้อย่างชัดเจนว่าจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเคลื่อนที่สูงขึ้น และเบี่ยงออกมาทางซ้าย เมื่อความเข้มแสง และอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ณ เวลา 10:40 น. วัดกำลังผลิตได้สูงที่สุดประมาณ 111 วัตต์ ที่แรงดันไฟฟ้า 13.19 โวลต์ และกระแสไฟฟ้า 8.42 แอมแปร์

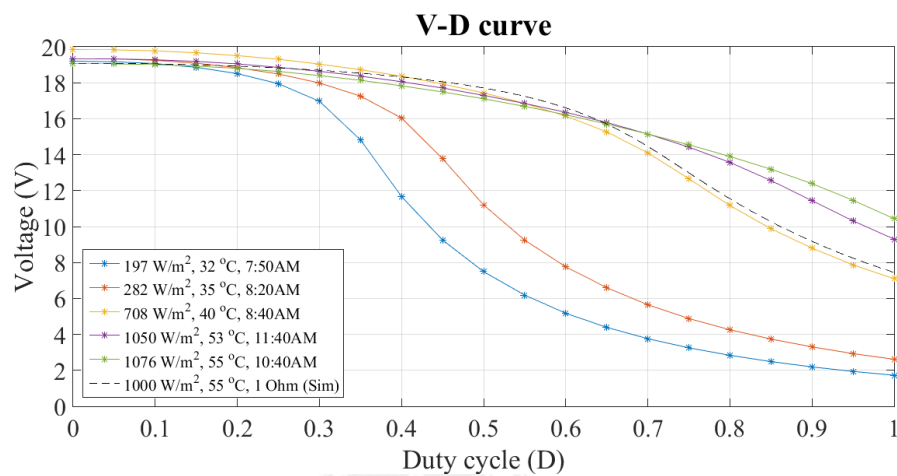


รูปที่ 68 เส้นโค้งกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะต่าง ๆ



รูปที่ 69 เส้นโค้งกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่สภาวะต่าง ๆ

เส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงานสามารถพล็อตได้ดังรูปที่ 70 เส้นโค้งนี้ได้มาพร้อมกันกับเส้นโค้งอื่น ๆ โดยไม่จำเป็นต้องวัดจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใหม่ เส้นโค้งมีลักษณะคล้ายตัวอักษรแซด ตามที่ได้ทำการจำลองไว้ เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นจะเห็นว่าเส้นโค้งจะเลื่อนไปทางขวาอย่างชัดเจน จุดสังเกตที่สำคัญคือถึงแม้ว่าความเข้มแสง และอุณหภูมิจะเปลี่ยนไป ความชันของเส้นโค้งในบริเวณที่วัฏจักรงานมีค่าน้อยจะไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงมากนัก จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำคุณสมบัตินี้ไปใช้พัฒนาระเบียบวิธีติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดตามที่คาดหวังไว้



รูปที่ 70 เส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงานที่สภาวะต่าง ๆ

5.6 การทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

การทดสอบนี้เปรียบเทียบสมรรถนะของระเบียบวิธีติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 3 ระเบียบวิธี ได้แก่ ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน 1% และ 3% และระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตที่ถูกปรับแต่ง โดยจะทำการเปรียบเทียบใน 2 ด้านคือ ความเร็วตอบสนองในสภาวะชั่วคราว และความคลาดเคลื่อนในสภาวะอยู่ตัว รูปที่ 71 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 71 อุปกรณ์สำหรับการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะ

ตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์หันหน้าไปทางทิศใต้ และวางนอนลงทำมุม 14 องศา กับพื้น ใช้ ออสซิลโลสโคปวัดจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยวัดแรงดันไฟฟ้าเข้าเข้าที่เทอร์มินอลบล็อก P1 และวัดกระแสไฟฟ้าเข้าโดยวัดแรงดันไฟฟ้าที่ขา ANO ของไมโครคอนโทรลเลอร์ แรงดันไฟฟ้าที่ วัดได้ต้องคูณด้วยค่าคงที่ 4.7305 (5 คูณกับ 0.9461) เพื่อปรับเทียบให้อยู่ในหน่วยแอมแปร์

สภาวะควบคุมในการทดสอบจำแนกได้เป็น 2 สภาวะคือ การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง อย่างฉับพลัน และการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของโหลด การทดสอบทั้งหมดทำได้โดยรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวก่อนแล้วจึงเริ่มบันทึกจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ หลังจากนั้นจึงทำการรบกวน ระบบโดยปรับสภาวะควบคุม และรอให้ระบบกลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวอีกครั้ง การทดสอบนี้ทำในวันที่ 6 กันยายน พ.ศ. 2559 บนดาวฟ้าอาคารเช่นเดิม ข้อมูลสภาพภูมิอากาศระหว่างทำการทดสอบดูได้ที่ ภาคผนวก ง.2

5.6.1 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอย่างฉับพลัน

ควบคุมการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงโดยใช้พลาสมาสติกใสกันกระแทกหนา 5 ชั้น มาคลุม หรือ เอาออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อจำลองการบังแสง ผลการทดสอบแบ่งเป็น 4 กรณีย่อยดังนี้

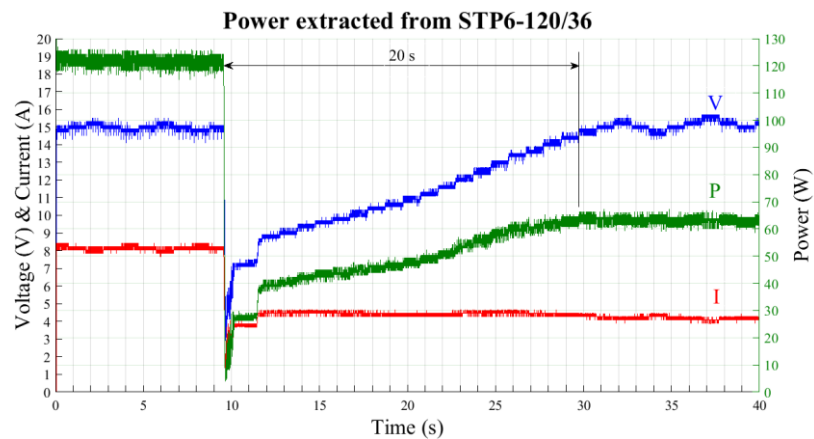
5.6.1.1 ความเข้มแสงลดลงที่โหลด 1.13 โอห์ม

ความเข้มแสงขณะทดสอบ (11:10 น. – 11:20 น.) วัดได้ในช่วง 1,029 – 1,140 วัตต์/ตาราง เมตร อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ประมาณ 50 องศาเซลเซียส รูปที่ 72 (ก) ถึง (ค) แสดงผลการ ทดสอบเมื่อบังแสงประมาณวินาทีที่ 10 แรงดันไฟฟ้า (กราฟสีฟ้า) และกระแสไฟฟ้า (กราฟสีแดง) ลดลงอย่างฉับพลันส่งผลให้กำลังไฟฟ้า (กราฟสีเขียว) ลดลงเช่นกัน ความเร็วในการติดตามวัดจาก เวลาทั้งหมดหลังจากสภาวะเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งจุดทำงานอยู่ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเป็นครั้งแรก (ช่วงเวลาขาขึ้น 100%) ส่วนการแกว่งในสภาวะอยู่ตัววัดจากผลต่างของกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วงที่มีค่า มากที่สุด และน้อยที่สุด ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 5

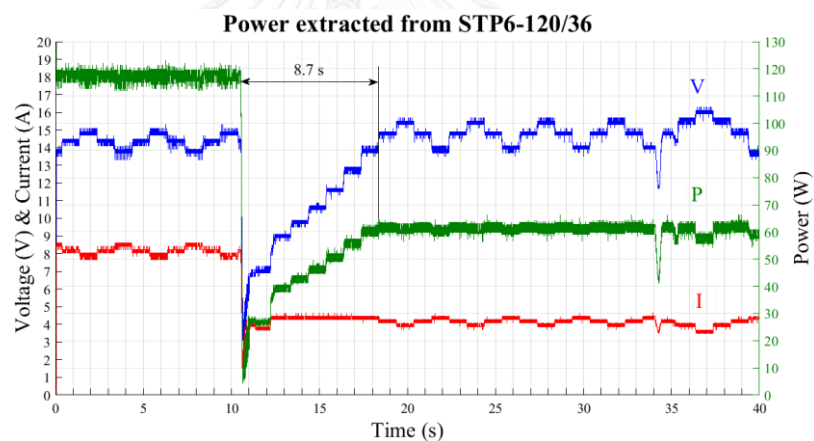
ตารางที่ 5 ผลเปรียบเทียบกรณีความเข้มแสงลดลงที่โหลด 1.13 โอห์ม

ระเบียบวิธี รบกวนและสังเกต	ช่วงเวลาขึ้น 100% (วินาที)	การแกว่งในสภาวะอยู่ตัว (วัตต์)
แบบดั้งเดิม ($\Delta D = 1\%$)	20	1.2
แบบดั้งเดิม ($\Delta D = 3\%$)	8.7	2.46
ที่ถูกปรับแต่ง	7.2	1.01

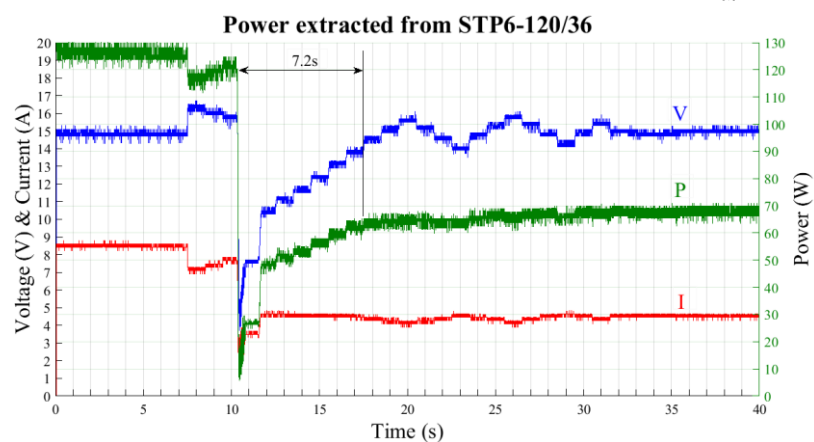
ระเบียบวิธีรบกวนและสิ่งเกดที่ถูกปรับแต่งสามารถตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วที่สุดด้วยเวลา 7.2 วินาที และมีการแกว่งในสภาวะอยู่ตัวน้อยที่สุด 1.01 วัตต์ ในขณะที่ระเบียบวิธีแบบดั้งเดิมที่ $\Delta D = 1\%$ ตอบสนองช้ากว่าประมาณ 3 เท่า และที่ $\Delta D = 3\%$ มีขนาดการแกว่งมากกว่า 2.4 เท่า



(ก) ระเบียบวิธีรบกวนและสิ่งเกดแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน 1%



(ข) ระเบียบวิธีรบกวนและสิ่งเกดแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน 3%

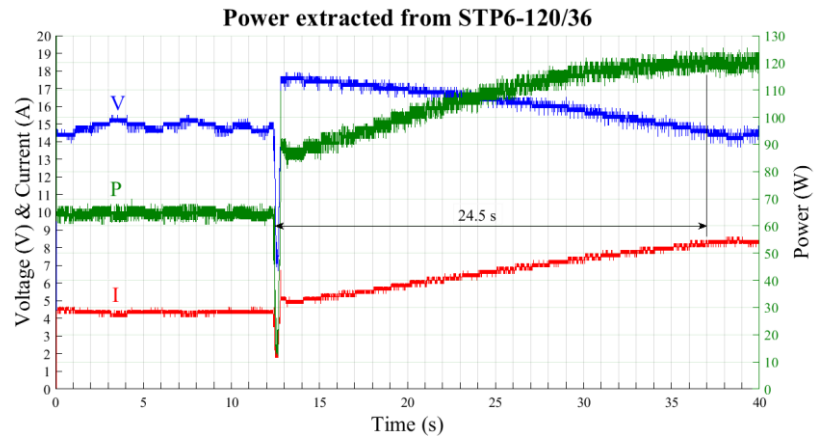


(ค) ระเบียบวิธีรบกวนและสิ่งเกดที่ถูกปรับแต่ง

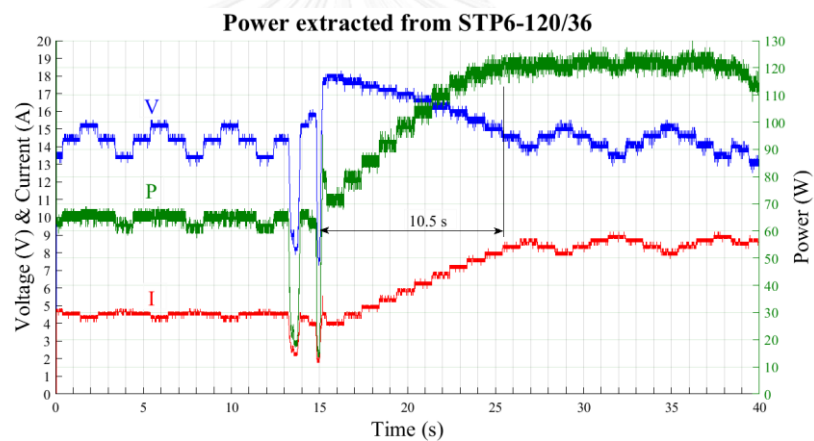
รูปที่ 72 ผลตอบสนองเมื่อความเข้มแสงลดลงที่โหลด 1.13 โอห์ม

5.6.1.2 ความเข้มแสงเพิ่มขึ้นที่โหลด 1.13 โอห์ม

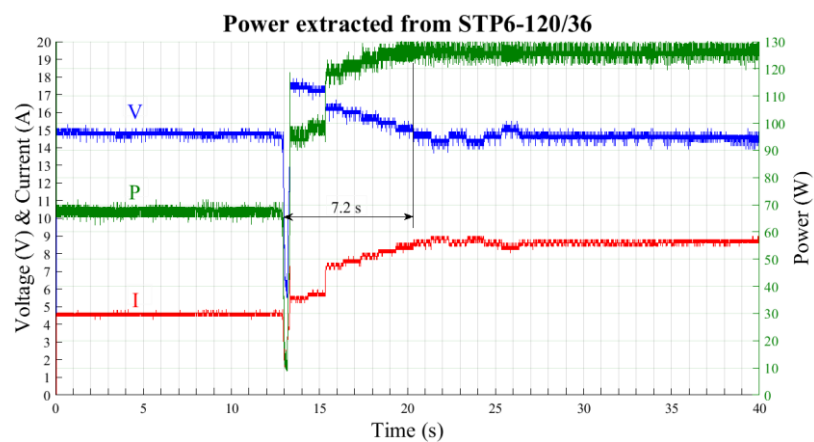
จากรูปที่ 73 (ก) ถึง (ค) แสดงผลการทดสอบเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นประมาณวินาทีที่ 13



(ก) ระเบียบวิธีรับกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน 1%



(ข) ระเบียบวิธีรับกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน 3%



(ค) ระเบียบวิธีรับกวนและสังเกตที่ถูกปรับแต่ง

รูปที่ 73 ผลตอบสนองเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นที่โหลด 1.13 โอห์ม

เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นจุดทำงานจึงเคลื่อนที่ไปยังจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อไป ผลการทดสอบสรุปได้ดังตารางที่ 6 ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตที่ถูกปรับแต่งติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วที่สุด และมีการแกว่งในสภาวะอยู่ตัวน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ โดยตอบสนองได้เร็วกว่าระเบียบวิธีแบบดั้งเดิมที่ $\Delta D = 1\%$ ประมาณ 3 เท่า และมีขนาดการแกว่งน้อยกว่าระเบียบวิธีแบบดั้งเดิมที่ $\Delta D = 3\%$ ประมาณ 4 เท่า

ตารางที่ 6 ผลเปรียบเทียบกรณีความเข้มแสงเพิ่มขึ้นที่โหลด 1.13 โอห์ม

ระเบียบวิธี รบกวนและสังเกต	ช่วงเวลานับ 100% (วินาที)	การแกว่งในสภาวะอยู่ตัว (วัตต์)
แบบดั้งเดิม ($\Delta D = 1\%$)	24.5	1.6
แบบดั้งเดิม ($\Delta D = 3\%$)	10.5	2.3
ที่ถูกปรับแต่ง	7.2	0.5

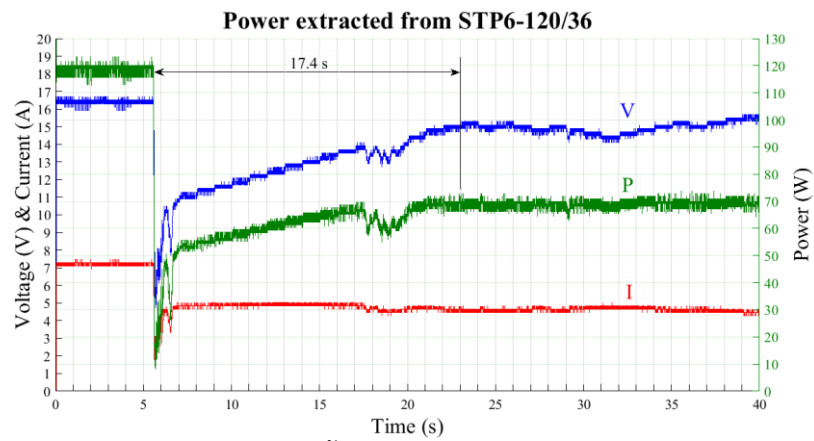
5.6.1.3 ความเข้มแสงลดลงที่โหลด 2.6 โอห์ม

โหลด 2.6 โอห์มมีขนาดมากเกินไปจนทำให้ระบบไม่สามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ในบางกรณี โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความเข้มแสงมาก ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้เมื่อความต้องการใช้ไฟฟ้าน้อยกว่ากำลังผลิตสูงสุด ณ เวลานั้น ๆ ช่วงเวลาที่ทดสอบ (12:30 น. – 12:40 น.) มีความเข้มแสง 1256 – 1148 วัตต์/ตารางเมตร อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ประมาณ 45 องศาเซลเซียส

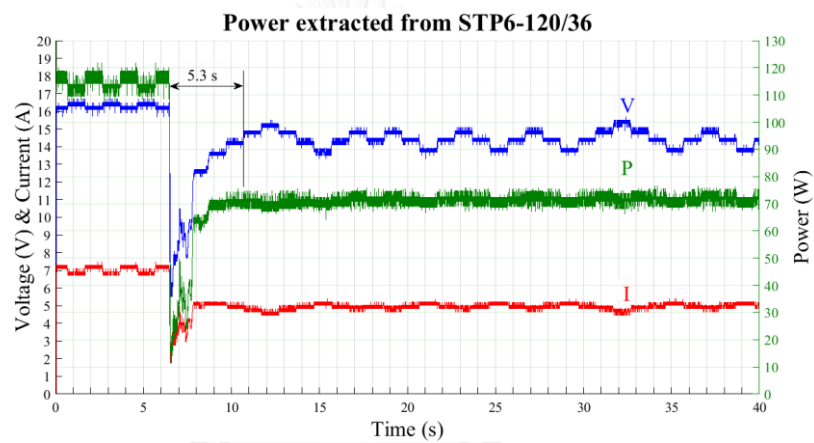
จากรูปที่ 74 (ก) ถึง (ค) ความเข้มแสงลดลงประมาณวินาทีที่ 6 กำลังไฟฟาลดลงอย่างฉับพลันและกลับมาเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 7 ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมที่ $\Delta D = 3\%$ ติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วที่สุด เร็วกว่าระเบียบวิธีที่ถูกปรับแต่ง 1.5 เท่า และมีการแกว่งในสภาวะอยู่ตัวใกล้เคียงกับระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตที่ถูกปรับแต่ง

ตารางที่ 7 ผลเปรียบเทียบกรณีความเข้มแสงลดลงที่โหลด 2.6 โอห์ม

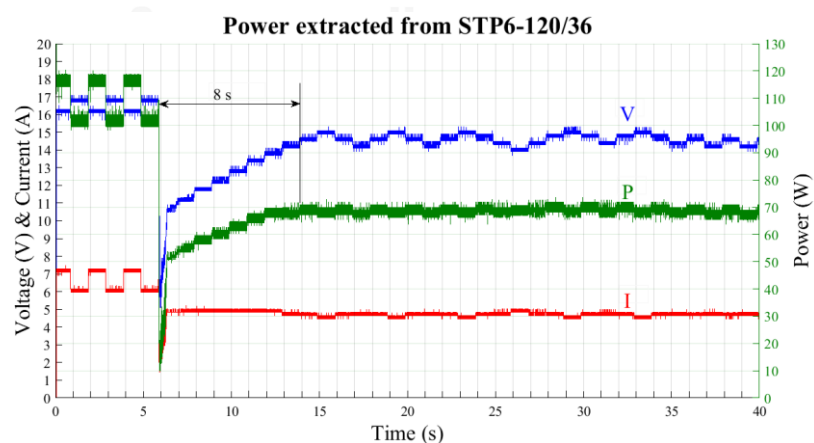
ระเบียบวิธี รบกวนและสังเกต	ช่วงเวลานับ 100% (วินาที)	การแกว่งในสภาวะอยู่ตัว (วัตต์)
แบบดั้งเดิม ($\Delta D = 1\%$)	17.4	1.81
แบบดั้งเดิม ($\Delta D = 3\%$)	5.3	3.01
ที่ถูกปรับแต่ง	8	2.82



(ก) ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน 1%



(ข) ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน 3%



(ค) ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตที่ถูกปรับแต่ง

รูปที่ 74 ผลตอบสนองเมื่อความเข้มแสงลดลงที่โหลด 2.6 โอห์ม

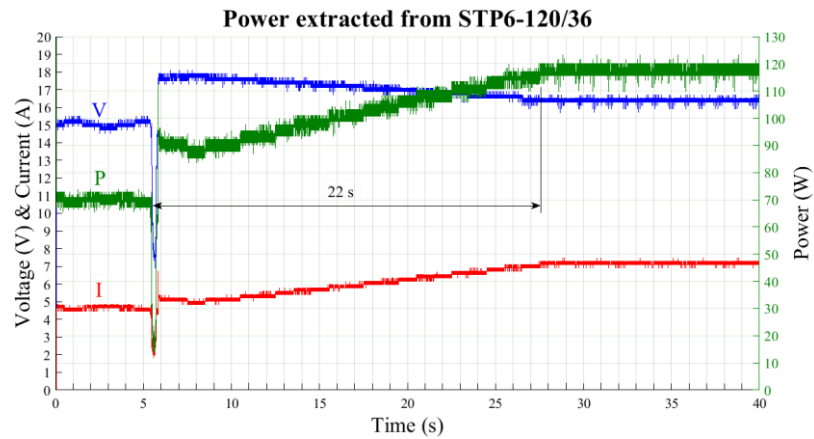
5.6.1.4 ความเข้มแสงเพิ่มขึ้นที่โหลด 2.6 โอห์ม

จากรูปที่ 75 (ก) ถึง (ค) ความเข้มแสงเพิ่มขึ้นประมาณวินาทีที่ 7 กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตที่ถูกรับแต่งสามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วที่สุดโดยใช้เวลาเพียง 3 วินาที อย่างไรก็ตามเมื่อเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวจุดทำงานจะอยู่ทางด้านขวาของเส้นโค้งเสมอ ระบบจำแนกได้ว่าจุดทำงานอยู่ในคลาส 1 ตลอดเวลา ขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงานที่มากทำให้เกิดการแกว่งที่มากตามไปด้วย ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมมีการแกว่งในสภาวะอยู่ตัวน้อยกว่าอย่างชัดเจนเพราะมีขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงานที่น้อยกว่ามาก ผลการทดสอบกรณีนี้แสดงดังตารางที่ 8

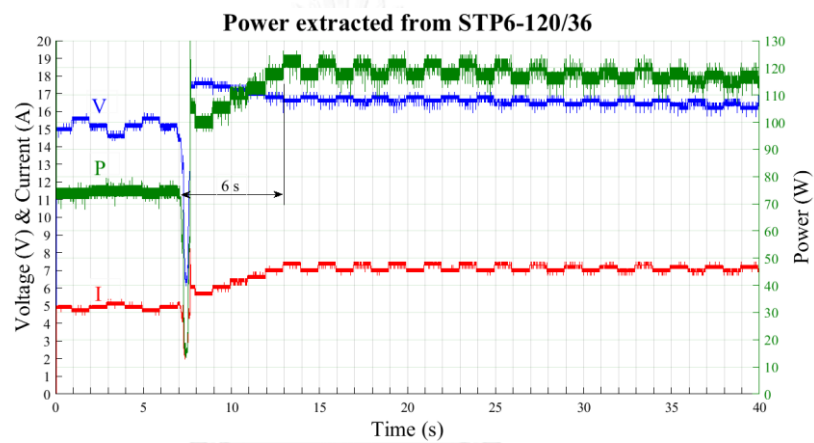
ตารางที่ 8 ผลเปรียบเทียบกรณีความเข้มแสงเพิ่มขึ้นที่โหลด 2.6 โอห์ม

ระเบียบวิธี รบกวนและสังเกต	ช่วงเวลาขึ้น 100% (วินาที)	การแกว่งในสภาวะอยู่ตัว (วัตต์)
แบบดั้งเดิม ($\Delta D = 1\%$)	22	1.6
แบบดั้งเดิม ($\Delta D = 3\%$)	6	3.2
ที่ถูกรับแต่ง	3	11.5

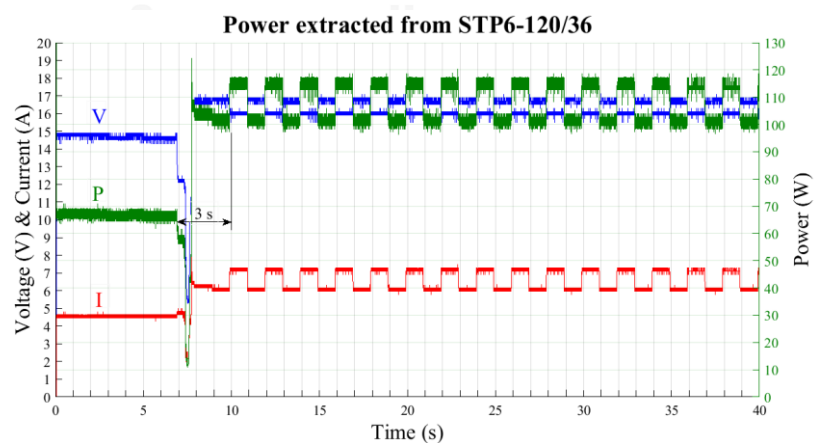
จากผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอย่างฉับพลันทั้ง 4 กรณี สรุปได้ว่าระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตที่ถูกรับแต่งตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงได้เร็วที่สุด โดยเฉพาะกรณีความเข้มแสงเพิ่มขึ้น และสามารถลดการแกว่งในสภาวะอยู่ตัวได้ยกเว้นกรณีที่อิมพีแดนซ์ของโหลดมีขนาดมากเกินไปจนไม่สามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ ขนาดการแกว่งจะมากกว่าระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมทั้งสองที่นำมาเปรียบเทียบ



(ก) ระเบียบวิธีรับกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน 1%



(ข) ระเบียบวิธีรับกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน 3%



(ค) ระเบียบวิธีรับกวนและสังเกตที่ถูกปรับแต่ง

รูปที่ 75 ผลตอบสนองเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นที่โหลด 2.6 โอห์ม

5.6.2 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของโหลด

ลักษณะของโหลดที่เลวร้ายที่สุดคือโหลดแบบชั้นบันไดซึ่งพบได้ทั่วไปในชีวิตประจำวัน โหลดความต้านทานที่ใช้ในการทดสอบสามารถเลือกค่าได้สองค่าคือ 1.13 โอห์มหรือ 2.6 โอห์มเท่านั้น ทำการทดสอบเมื่อมีแสงแดดจ้า และมีเมฆบังแสง (ไม่ได้ใช้พลาสติกกันกระแทกบังแสง) ผลการทดสอบแบ่งออกเป็น 4 กรณีย่อยดังนี้

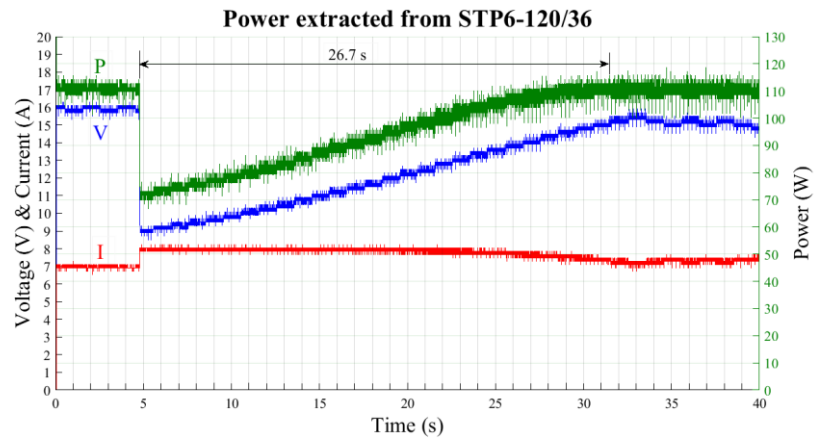
5.6.2.1 โหลดเปลี่ยนจาก 2.6 โอห์มเป็น 1.13 โอห์มที่ความเข้มแสงมาก

การที่อิมพีแดนซ์ของโหลดลดลงหมายถึงมีโหลดเพิ่มขึ้นหรือมีการใช้ไฟฟ้ามากขึ้น ช่วงเวลาที่ทดสอบ (12:50 น. – 13:00 น.) มีความเข้มแสง 1185 – 1308 วัตต์/ตารางเมตร อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์วัดได้ประมาณ 52 องศาเซลเซียส

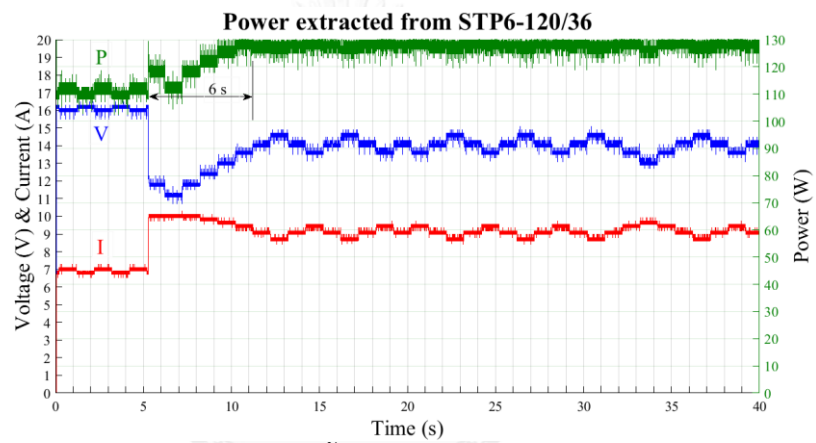
รูปที่ 76 (ก) ถึง (ค) แสดงผลตอบสนองของระเบียบวิธีทั้งสาม อิมพีแดนซ์ของโหลดลดลงประมาณวินาทีที่ 5 ซึ่งส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าลดลงทันที ส่วนกระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากโหลดต้องการใช้ไฟฟ้ามากขึ้น การเปลี่ยนแปลงของโหลดนี้ทำให้กำลังไฟฟ้าลดลงชั่วขณะ ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตที่ถูกรับแต่งติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในเวลา 6.2 วินาที ซึ่งเร็วใกล้เคียงกับระเบียบวิธีแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงวัฏจักรงาน 3% ส่วนขนาดการแกว่งในสภาวะอยู่ตัวของระเบียบวิธีที่ถูกรับแต่งมีน้อยที่สุด ผลเปรียบเทียบของระเบียบวิธีทั้งสามสรุปได้ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลเปรียบเทียบกรณีโหลดเปลี่ยนจาก 2.6 โอห์มเป็น 1.13 โอห์มที่ความเข้มแสงมาก

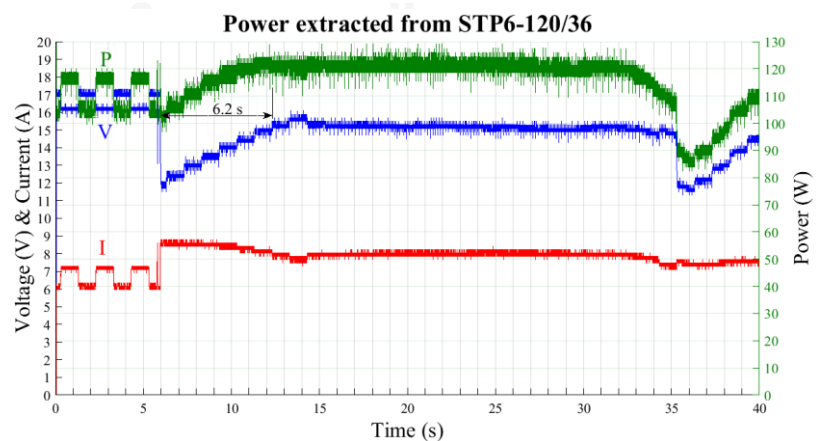
ระเบียบวิธี รบกวนและสังเกต	ช่วงเวลานับ 100% (วินาที)	การแกว่งในสภาวะอยู่ตัว (วัตต์)
แบบดั้งเดิม ($\Delta D = 1\%$)	26.7	1.5
แบบดั้งเดิม ($\Delta D = 3\%$)	6	2.8
ที่ถูกรับแต่ง	6.2	1.3



(ก) ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน 1%



(ข) ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน 3%

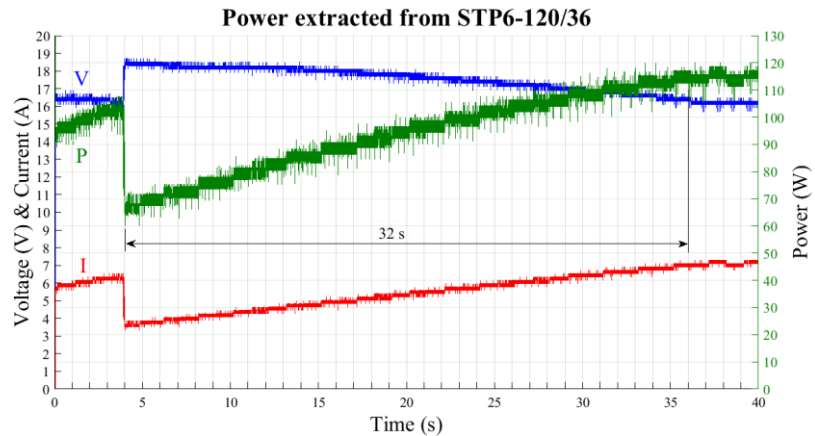


(ค) ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตที่ถูกปรับแต่ง

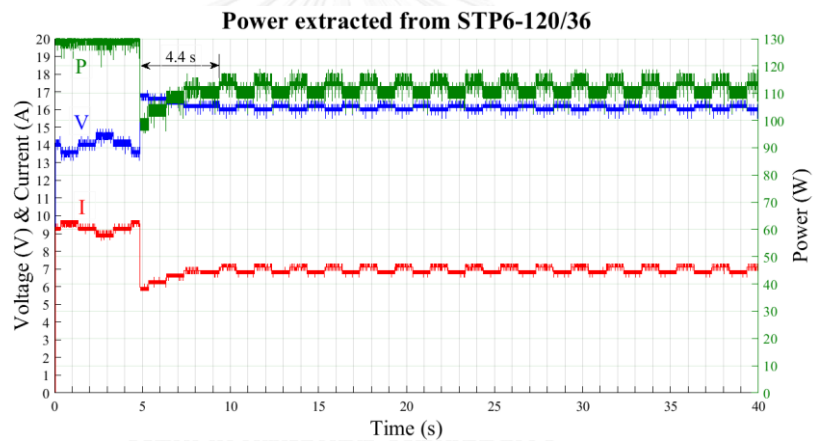
รูปที่ 76 ผลตอบสนองเมื่ออิมพีแดนซ์ลดลงที่ความเข้มแสงน้อย

5.6.2.2 โหลดเปลี่ยนจาก 1.13 โอห์มเป็น 2.6 โอห์มที่ความเข้มแสงมาก

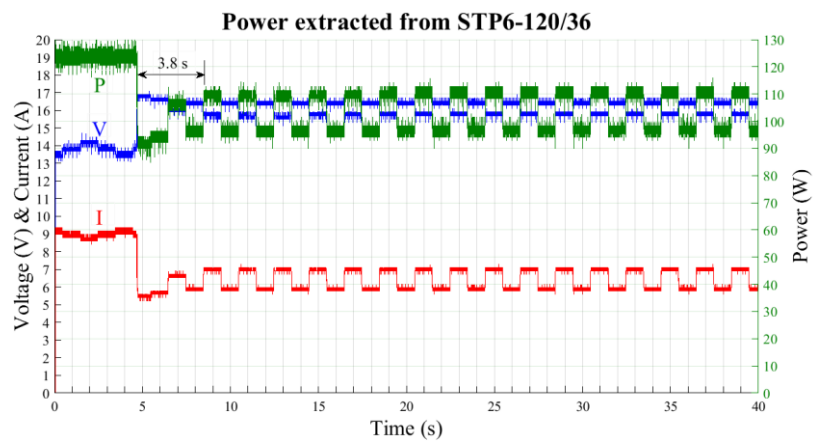
อิมพีแดนซ์ของโหลดเพิ่มขึ้นประมาณวินาทีที่ 5 ผลตอบสนองแสดงดังรูปที่ 77 (ก) ถึง (ค)



(ก) ระเบียบวิธีรับกวนและสิ่งเกดแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน 1%



(ข) ระเบียบวิธีรับกวนและสิ่งเกดแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน 3%



(ค) ระเบียบวิธีรับกวนและสิ่งเกดที่ถูกปรับแต่ง

รูปที่ 77 ผลตอบสนองเมื่ออิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นที่ความเข้มแสงมาก

เมื่อโหลดลดลงหรือความต้องการใช้ไฟฟ้าลดลง แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าลดลง โดยรวมส่งผลให้กำลังไฟฟ้าลดลง ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วที่สุด โดยใช้เวลาเพียง 3.8 วินาที อย่างไรก็ตามเมื่อเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวแล้วมีขนาดการแกว่งมากที่สุด เช่นเดียวกันกับการทดลองในหัวข้อที่ 4.6.1.4 เพราะอิมพีแดนซ์ของโหลดในสภาวะอยู่ตัวมากเกินไป ผลการเปรียบเทียบในการทดสอบนี้แสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ผลเปรียบเทียบกรณีโหลดเปลี่ยนจาก 1.13 โห้หมเป็น 2.6 โห้หมที่ความเข้มแสงมาก

ระเบียบวิธี รบกวนและสังเกต	ช่วงเวลาขึ้น 100% (วินาที)	การแกว่งในสภาวะอยู่ตัว (วัตต์)
แบบดั้งเดิม ($\Delta D = 1\%$)	32	1.7
แบบดั้งเดิม ($\Delta D = 3\%$)	4.4	4.7
ที่ถูกปรับแต่ง	3.8	11.45

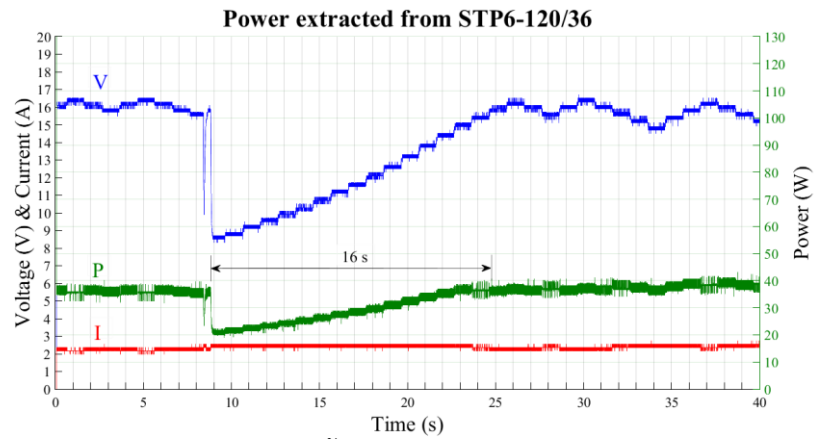
5.6.2.3 โหลดเปลี่ยนจาก 2.6 โห้หมเป็น 1.13 โห้หมที่ความเข้มแสงน้อย

ช่วงเวลาที่ทดสอบ (12:00 น. – 12:10 น.) มีความเข้มแสง 322 – 464 วัตต์/ตารางเมตร อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์วัดได้ประมาณ 38 องศาเซลเซียส

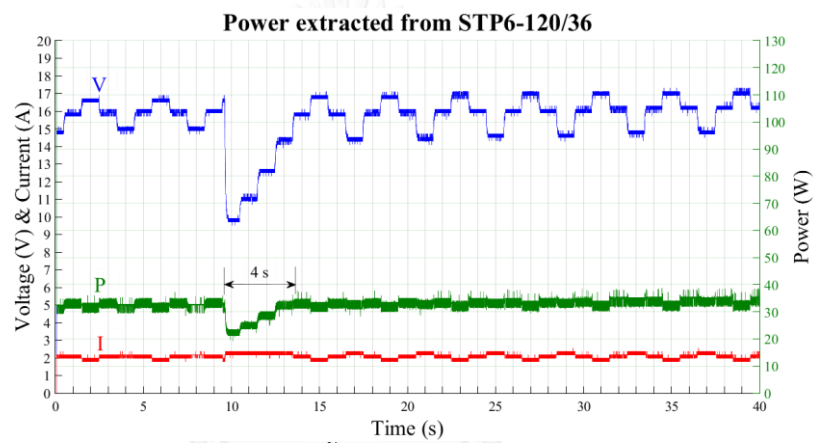
จากรูปที่ 78 (ก) ถึง (ค) อิมพีแดนซ์ของโหลดลดลงประมาณวินาทีที่ 9 ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าลดลง หลังจากนั้นระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตที่ถูกปรับแต่ง และระเบียบวิธีแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน 3% สามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วเท่ากัน และเร็วที่สุดโดยใช้เวลา 4 วินาที นอกจากนี้ระเบียบวิธีที่ถูกปรับแต่งยังสามารถลดขนาดการแกว่งในสภาวะอยู่ตัวให้เหลือน้อยที่สุด ตารางที่ 11 แสดงผลเปรียบเทียบสมรรถนะของระเบียบวิธีทั้งสาม

ตารางที่ 11 ผลเปรียบเทียบกรณีโหลดเปลี่ยนจาก 2.6 โห้หมเป็น 1.13 โห้หมที่ความเข้มแสงน้อย

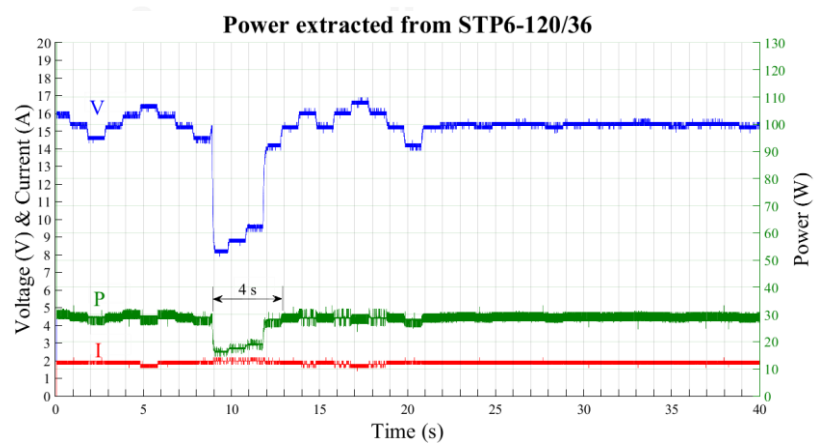
ระเบียบวิธี รบกวนและสังเกต	ช่วงเวลาขึ้น 100% (วินาที)	การแกว่งในสภาวะอยู่ตัว (วัตต์)
แบบดั้งเดิม ($\Delta D = 1\%$)	16	1.42
แบบดั้งเดิม ($\Delta D = 3\%$)	4	3.78
ที่ถูกปรับแต่ง	4	0.4



(ก) ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณรบกวน 1%



(ข) ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณรบกวน 3%



(ค) ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตที่ถูกรับแต่ง

รูปที่ 78 ผลตอบสนองเมื่ออิมพีแดนซ์ลดลงที่ความเข้มแสงน้อย

5.6.2.4 โหลดเปลี่ยนจาก 1.13 โอห์มเป็น 2.6 โอห์มที่ความเข้มแสงน้อย

ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 79 (ก) ถึง (ค) อิมพีแดนซ์ของโหลดเพิ่มขึ้นประมาณวินาทีที่ 8 ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตที่ถูกปรับแต่งติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วที่สุด โดยใช้เวลาเพียง 2.2 วินาที ในสภาวะอยู่ตัวระเบียบวิธีแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน 1% มีการแกว่งน้อยที่สุด ผลเปรียบเทียบสมรรถนะในการทดสอบนี้แสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ผลเปรียบเทียบกรณีโหลดเปลี่ยนจาก 1.13 โอห์มเป็น 2.6 โอห์มที่ความเข้มแสงน้อย

ระเบียบวิธี รบกวนและสังเกต	ช่วงเวลานับ 100% (วินาที)	การแกว่งในสภาวะอยู่ตัว (วัตต์)
แบบดั้งเดิม ($\Delta D = 1\%$)	16	1.19
แบบดั้งเดิม ($\Delta D = 3\%$)	3	2.65
ที่ถูกปรับแต่ง	2.2	2.36

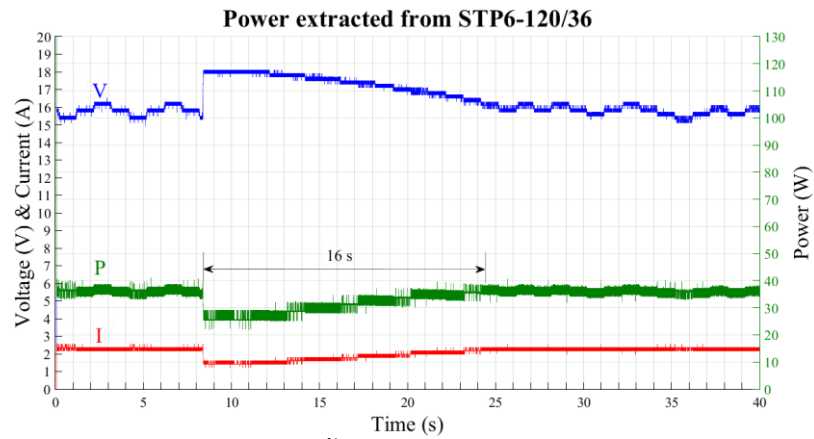
จากผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของโหลดทั้ง 4 กรณี สรุปได้ว่าระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตที่ถูกปรับแต่งติดตามจุดกำลังไฟฟ้าได้เร็วใกล้เคียงกับระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงวัฏจักรงาน 3% เมื่อเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวระเบียบวิธีที่ถูกปรับแต่งสามารถลดการแกว่งในสภาวะอยู่ตัวได้ยกเว้นกรณีที่อิมพีแดนซ์ของโหลดมีขนาดมากเกินไปจนไม่สามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้

สมรรถนะการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระเบียบวิธีทั้งสามสรุปได้ดังนี้

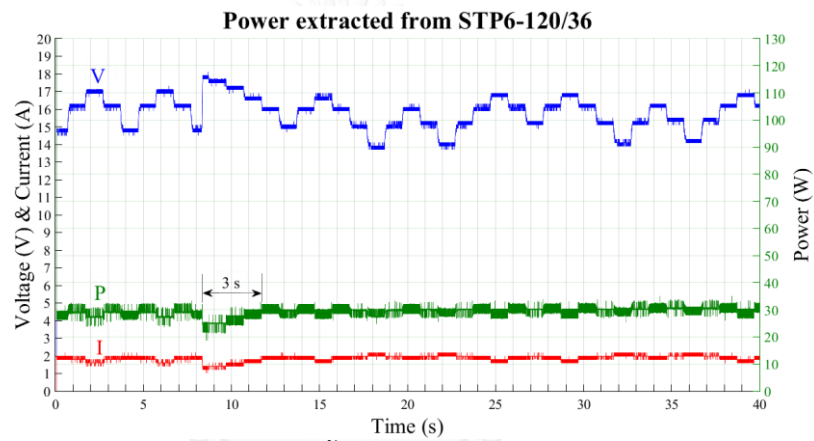
ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงวัฏจักรงาน 1% ติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ช้าที่สุดในทุกกรณี เวลามามากที่สุดที่ใช้ในการติดตามคือ 32 วินาที การแกว่งในสภาวะอยู่ตัวมีขนาดน้อยกว่าอย่างชัดเจนเกือบทุกกรณีเมื่อเทียบกับระเบียบวิธีอื่น

ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงวัฏจักรงาน 3% มีผลตอบสนองที่เร็วกว่าระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงวัฏจักรงาน 1% อย่างน้อย 2 เท่าในทุกกรณี แต่ก็มีการแกว่งในสภาวะอยู่ตัวมากกว่าในทุกกรณีเช่นกัน

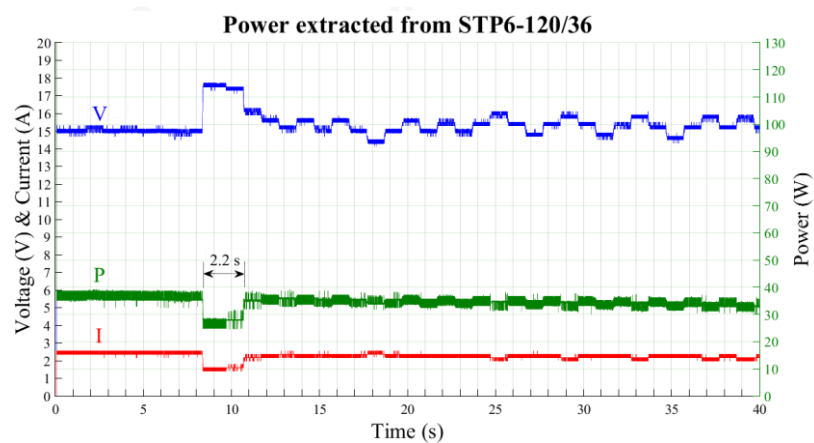
ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตที่ถูกปรับแต่งตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงได้เร็วที่สุดโดยเฉพาะกรณีความเข้มแสงเพิ่มขึ้น ส่วนในกรณีอื่นสามารถตอบสนองได้เร็วใกล้เคียงกับระเบียบวิธีแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงวัฏจักรงาน 3% ขนาดการแกว่งในสภาวะอยู่ตัวน้อยที่สุดยกเว้นกรณีที่อิมพีแดนซ์ของโหลดมีขนาดมากเกินไปจนไม่สามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้



(ก) ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน 1%



(ข) ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมที่มีขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงาน 3%



(ค) ระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตที่ถูกปรับแต่ง

รูปที่ 79 ผลตอบสนองเมื่ออิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นที่ความเข้มแสงมาก

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอระเบียบวิธีรบกวนและสังเกตที่ถูกปรับแต่งเพื่อเพิ่มสมรรถนะในการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 120 วัตต์ เส้นโค้งคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และคุณสมบัติของเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงานถูกนำมาวิเคราะห์อย่างละเอียด และนำไปใช้เป็นกลยุทธ์ในการพัฒนาระเบียบวิธี ผลการจำลองการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเบื้องต้นด้วยโปรแกรมแมทแลบซึ่งใช้ระเบียบวิธีที่ถูกปรับแต่งสามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เร็วกว่า และมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าระเบียบวิธีแบบดั้งเดิม

จากนั้นเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ถูกออกแบบ และสร้างขึ้นโดยมีกำลังไฟฟ้าพิกัด 150 วัตต์ วงจรควบคุมการติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดอ่านกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าขาเข้าจากวงจรวัด ทำการประมวลผล และสร้างสัญญาณพัลส์วิตช์มอดูเลชันผ่านวงจรถูกขับมอสเฟต ไปยังวงจรถอนระดับแบบซิงโครนัสเพื่อปรับจุดทำงานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้อยู่ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด โปรแกรมที่ใช้ควบคุมถูกพัฒนาโดยใช้ภาษาซีสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33F06GS001

จากการทดสอบการทำงานของวงจรต่าง ๆ ในเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด รวมถึงทดลองปรับจุดทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบเส้นโค้งคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และเส้นโค้งแรงดันไฟฟ้าและวัฏจักรงาน พบว่าลักษณะของเส้นโค้งที่ได้จากการทดลองมีรูปร่างใกล้เคียงกับผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรมแมทแลบ

สุดท้ายการทดสอบเชิงเปรียบเทียบระหว่างระเบียบวิธีแบบดั้งเดิม และระเบียบวิธีที่ถูกปรับแต่งชี้ให้เห็นว่าระเบียบวิธีที่ถูกปรับแต่งสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงได้เร็วที่สุดโดยเฉพาะในกรณีความเข้มแสงเพิ่มขึ้น ระเบียบวิธีที่ถูกปรับแต่งยังสามารถลดการแกว่งในสถานะอยู่ตัวได้ ในกรณีที่อิมพีแดนซ์ของโหลดมีขนาดมากเกินไป (ใช้กระแสไฟฟ้าน้อย) ไม่มีระเบียบวิธีใดสามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ประยุกต์ใช้กับวงจรทอนทระดับเพื่อที่จะสามารถปรับอินพุตอิมพีแดนซ์ได้ในช่วง $[0, \infty)$ ทำให้สามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ตลอดเวลา
- 2) เมื่อโหลดน้อยเกินไปจนไม่สามารถติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ค่าวัฏจักรงานจะเข้าใกล้ 1 เสมอ ดังนั้นจึงอาจใช้เป็นเงื่อนไขเพื่อลดขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรงานในสถานะอยู่ตัว

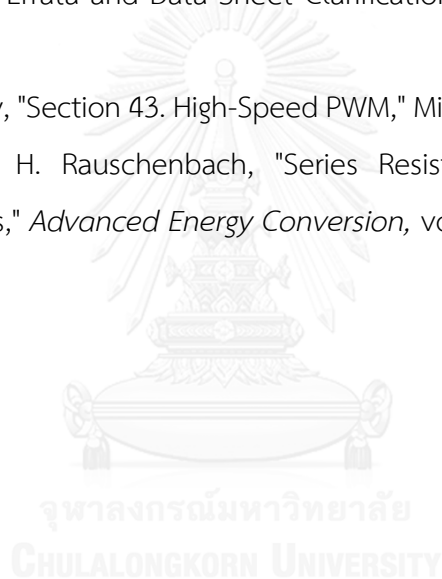
รายการอ้างอิง

- [1] U. S. E. I. Administration, "International Energy Outlook 2014," D. o. Energy, Washington, DC, 2014.
- [2] กระทรวงพลังงาน, "แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2558 - 2579," สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, ประเทศไทย, 30 มิถุนายน 2558.
- [3] M. N. Islam, M. Z. Rahman, and S. M. Mominuzzaman, "The effect of irradiation on different parameters of monocrystalline photovoltaic solar cell," in *Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET), 2014 3rd International Conference on the*, 2014, pp. 1-6.
- [4] P. K. Dash and N. C. Gupta, "Effect of Temperature on Power Output from Different Commercially available Photovoltaic Modules," *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 5, pp. 148-151, 2015.
- [5] T. Eswam and P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, pp. 439-449, 2007.
- [6] T. Chee Wei, T. C. Green, and C. A. Hernandez-Aramburo, "Analysis of perturb and observe maximum power point tracking algorithm for photovoltaic applications," in *Power and Energy Conference, 2008. PECon 2008. IEEE 2nd International*, 2008, pp. 237-242.
- [7] X. Weidong and W. G. Dunford, "A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems," in *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*, 2004, pp. 1957-1963 Vol.3.
- [8] 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.
- [9] C. Yi-Hsun, C. Yu-Shan, L. Yi-Hua, W. Shun-Chung, and Y. Zong-Zhen, "A novel asymmetrical FLC-based MPPT technique for photovoltaic generation system," in *Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE-ASIA), 2014 International*, 2014, pp. 3778-3783.

- [10] M. S. A. Cheikh, C. Larbes, G. F. T. Kebir, and A. Zerguerras, "Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme," *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 10, pp. 387-395, 2007.
- [11] M. A. A. M. Zainuri, M. A. M. Radzi, A. C. Soh, and N. A. Rahim, "Development of adaptive perturb and observe-fuzzy control maximum power point tracking for photovoltaic boost dc-dc converter," *IET Renewable Power Generation*, vol. 8, pp. 183-194, 2014.
- [12] K. Zweibel and P. Hersch, *Basic Photovoltaic Principles and Methods*. New York: Van Nosstrand Reinhold Company, Inc., 1984.
- [13] *เจ็ดกุล โสภานินิตย์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.*
- [14] D. W. Hart, *Power Electronics*. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [15] R. F. Coelho, W. M. d. Santos, and D. C. Martins, "Influence of power converters on PV maximum power point tracking efficiency," in *Industry Applications (INDUSCON), 2012 10th IEEE/IAS International Conference on*, 2012, pp. 1-8.
- [16] S. Alsadi and B. Alsayid, "Maximum Power Point Tracking Simulation for Photovoltaic Systems Using Perturb and Observe Algorithm," *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, vol. 2, 2012.
- [17] M. A. Elgendy, B. Zahawi, and D. J. Atkinson, "Assessment of Perturb and Observe MPPT Algorithm Implementation Techniques for PV Pumping Applications," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, pp. 21-33, 2012.
- [18] Y.-T. Chen, Z.-H. Lai, and R.-H. Liang, "A novel auto-scaling variable step-size MPPT method for a PV system," *Solar Energy*, vol. 102, pp. 247-256, 24 Jan. 2014.
- [19] S. Pithadia and S. More. (2013, 2 June 2016). Grounding in mixed-signal systems demystified, Part 2. 5-8.
- [20] O. S. corporation, "LC Selection Guide for the DC-DC Synchronous Buck Converter," ON Semiconductor Co. Apr. 2013.
- [21] B. Hauke, "Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage," Texas Instruments Incorporation, Aug, 2015.
- [22] D. Schelle and J. Castorena, "Buck-Converter Design Demystified," Maxim Integrated Products Inc., Jun, 2006.

- [23] W. E. Group, "Power Inductors 8 Design Tips," Würth Electronics Group.
- [24] A. Sattar, "Power MOSFET Basics," IXYS Corporation IXAN0061.
- [25] J. Dodge, "Power MOSFET Tutorial," Advanced Power Technology, Mar, 2006.
- [26] D. Jauregui, B. Wang, and R. Chen, "Power Loss Calculation With Common Source Inductance Consideration for Synchronous Buck Converters," Texas Instruments Inc., Jul, 2009.
- [27] J. Klein, "Synchronous buck MOSFET loss calculations," Fairchild Semiconductor AN-6005, Nov, 2014.
- [28] S. Semiconductor, "Examination of reverse recovery losses in a synchronous buck converter circuit," Silicon Semiconductor Co., 2013.
- [29] M. I. Products, "Input and Output Noise in Buck Converters Explained," Maxim Integrated Products Jul, 2002.
- [30] K. Kam, D. Pommerenke, F. Centola, C. w. Lam, and R. Steinfeld, "EMC guideline for synchronous buck converter design," in *2009 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2009, pp. 47-52.
- [31] J. Arrigo, "Input and Output Capacitor Selection," Texas Instruments Inc. SLTA055, Feb, 2006.
- [32] T. Instruments, "LM5100A/B/C, LM5101A/B/C 3-A, 2-A, and 1-A High-Voltage, High-Side and Low-Side Gate Drivers," Texas Instruments Inc., Nov, 2015.
- [33] B. S. Lee, "Understanding the terms and definitions of LDO voltage regulators," Texas Instrument Inc., Oct, 1999.
- [34] T. Instruments, "EMC Compliant High Side Current Sensing with Overvoltage Protection," Texas Instruments Inc., Feb, 2014.
- [35] M. Technology, "16-Bit Microcontrollers and Digital Signal Controllers with High-Speed PWM, ADC and Comparators," Microchip Technology Inc., Feb, 2012.
- [36] D. Jauregui, "Reducing Ringing Through PCB Layout Techniques," Texas Instrument Inc., Jun, 2009.
- [37] H. J. Zhang, "PCB Layout Considerations for Non-Isolated Switching Power Supplies," Linear Technology Co., Jun, 2012.
- [38] J. Barrow, "Reducing Ground Bounce in DC-to-DC Converters—Some Grounding Essentials," Analog Devices Inc., Jun, 2007.

- [39] R. Semiconductor, "PCB Layout Techniques of Buck Converter," ROHM Co., Ltd., 2012.
- [40] S. Kummerl, B. Lange, and D. Nguyen, "QFN/SON PCB Attachment," Texas Instruments Inc., Sep, 2007.
- [41] T. Instrument, "INA28x High-Accuracy, Wide Common-Mode Range, Bidirectional Current Shunt Monitors, Zero-Drift Series," Texas Instrument Inc., Nov, 2009.
- [42] M. Technology, "Frequently Asked Questions (FAQs) About dsPIC® DSC SMPS Devices," Microchip Technology Inc., 2009.
- [43] M. Technology, "dsPIC33FJ06GS001/101A/102A/202A and dsPIC33FJ09GS302 Family Silicon Errata and Data Sheet Clarification," Microchip Technology Inc., 2014.
- [44] M. Technology, "Section 43. High-Speed PWM," Microchip Technology Inc., 2008.
- [45] M. Wolf and H. Rauschenbach, "Series Resistance Effects on Solar Cell Measurements," *Advanced Energy Conversion*, vol. 3, pp. 455-479, 1963.



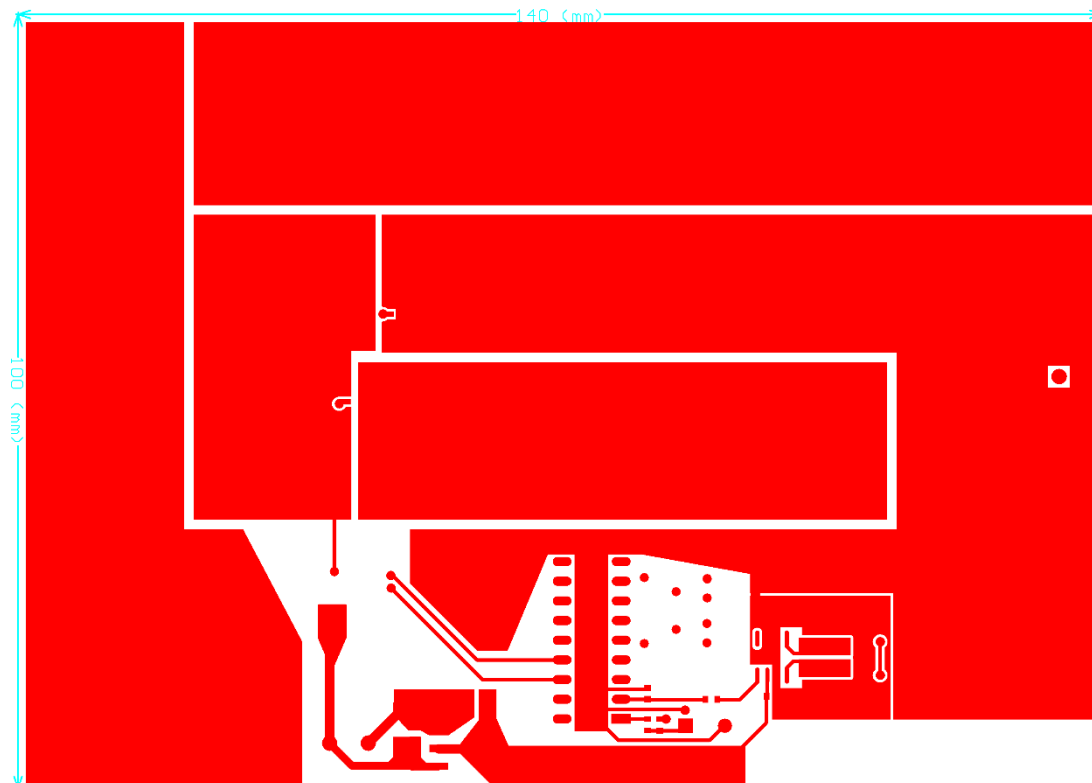


ภาคผนวก

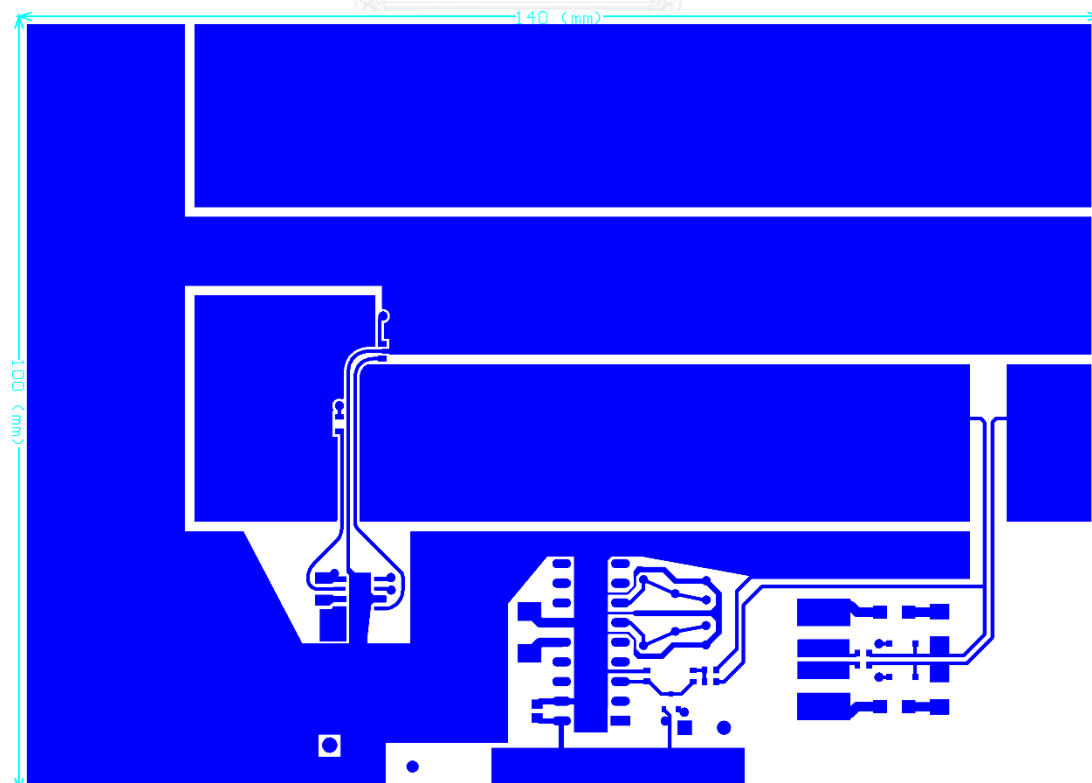
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก ลายทองแดงของแผ่นวงจรพิมพ์

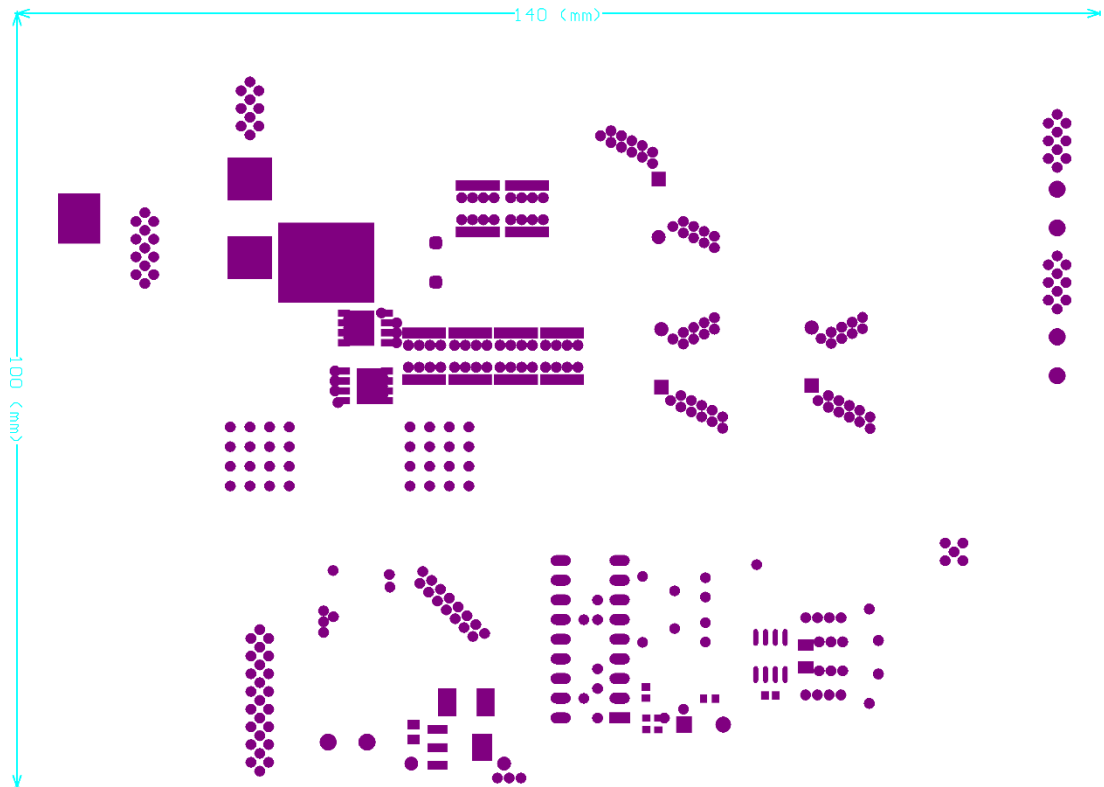
Top layer



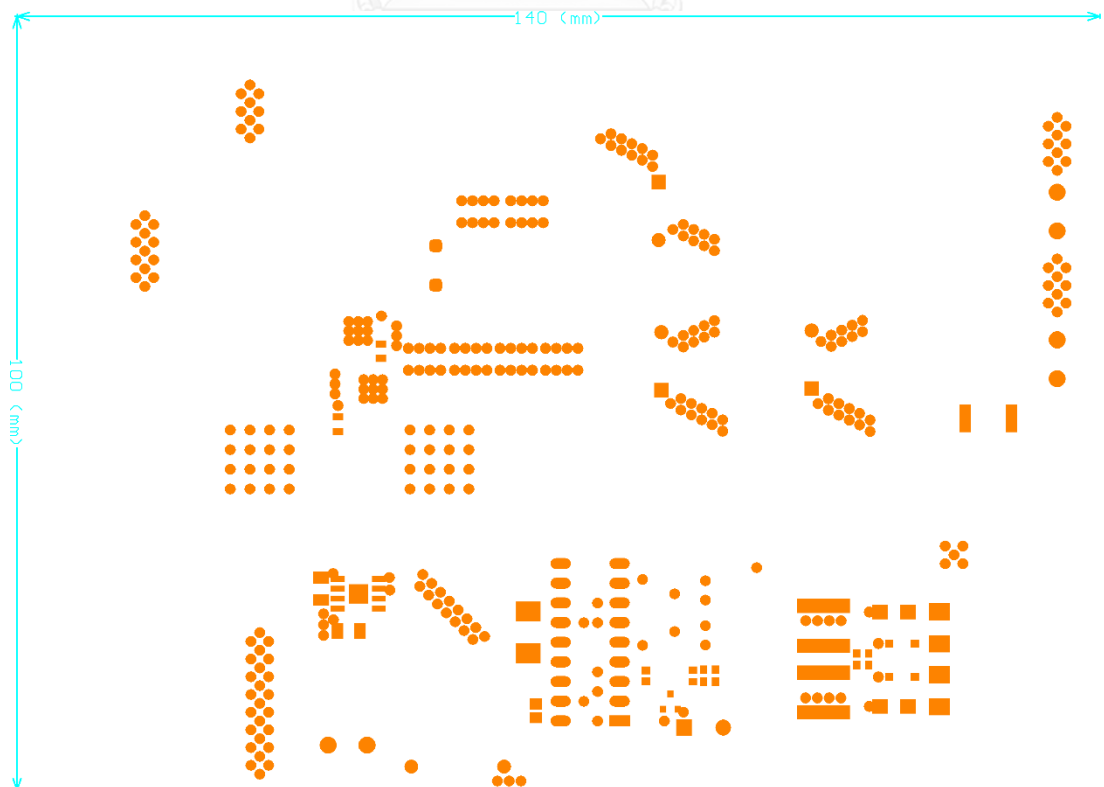
Bottom layer



Top solder



Bottom solder



ภาคผนวก ข รายการวัสดุของเครื่องติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

Bill of Materials							
Item	Qty	Ref	Value	Description	Size/Package	Part Number	Manufacturer
1	2	C1, C2	3900uF	Aluminum Electrolytic, 35V, Low ESR	18x40 mm	EEU-FC1V392	Panasonic
2	4	C3, C4, C5, C6	4.7uF, 50V	MLCC-SMD X7R 20%	2220	C5750X7R1H475M280KA	TDK
3	1	C7	1500uF	Aluminum Electrolytic, 50V, Low ESR	16x35 mm	EEU-FC1H152L	Panasonic
4	2	C8, C9	10uF, 100V	MLCC-SMD X7S 20%	2220	C5750X7S2A106M230KB	TDK
5	1	C10	2.2uF, 35V	Tantalum SMD 10%	1206	TPSA225K035R1500	AVX
6	1	C11	0.15uF, 50V	Tantalum SMD CASE A	1206	TPSA154K050R9000	AVX
7	2	C12, C14	33nF, 2kV	MLCC-SMD X7R 10%	2225	2225GC333KAT1A	AVX
8	1	C13	0.82uF, 16V	MLCC-SMD X7R 10%	1206	VJ1206Y824KXJTW1BC	Vishay
9	2	C15, C18	0.1uF	Capacitor CHIP NP0 5%	0603	041-41180-1	Yageo
10	1	C16	0.1uF	MLCC_SMD X7R 5%	0805	VJ0805Y104JXJCW1BC	Vishay
11	1	C17	10uF, 16V	Tantalum SMD 10% ESR 0.45	2412	TR3C106K016C0450	Vishay
12	1	C19	1nF, 50V	Capacitor CHIP	0603	041-31200-1	Westech Component
13	1	C20	10uF, 6.3V	MLCC-SMD X5R 10%	0805	0805X106K6R3CT	Walsin Technology
14	1	C21	100uF, 6.3V	MLCC-SMD Y5B	1206	GRM31CF50J107ZE01L	Murata
15	2	C22, C23	18pF, 50V	Ceramic Disc Capacitor NP0 5%	2.5x5 mm	140-50N2-180J-RC	Xicon
16	1	D1	250V, 40A	Schottky Power Rectifier	TO-220	MBR40250TG	On Semiconductor
17	2	D2, D7	12V, 33.3A	Transient Voltage Suppressors	DO-214AC	SMAJ7.0A	Vishay
18	2	D3, D6	64.5V, 9.3A	Transient Voltage Suppressors	DO-214AA	SMBJ40A	Vishay
19	2	D4, D5	3V, 0.5W	Zener Diode 5%	SOD-123-2	MMSZ4683-E3-08	Vishay
20	1	D8	100V/1A	Silicon Rectifier Diode	DO-41	1N4002	Taiwan Semiconductor
21	1	L1	22uH	SMD High Current Inductor	2128	7443642200	Wurth Electronics
22	3	P1, P2, P3	300V, 25A	Terminal block 2 Pins	pitch 5.08 mm	N/A	N/A
23	1	R1	2mOhm, 3W	SMD Current Sense Resistor	2512	TLR3A30ER002JTDG	TE Connectivity
24	2	R2, R3	2.2Ohm	Resistor CHIP 5%	0805	250-01550-1	Westech Component
25	2	R4, R5	100Ohm	Resistor CHIP 5%	0603	248-10000-1	Westech Component
26	1	R6	150kOhm	Resistor CHIP 5%	0603	248-42700-1	Westech Component
27	2	R7, R9	1000Ohm	Resistor CHIP 5%	0603	248-13400-1	Westech Component
28	1	R8	24.9kOhm	Resistor CHIP 5%	0603	248-37450-1	Westech Component
29	1	R10	10kOhm	Resistor CHIP 5%	0603	248-35800-1	Westech Component
30	1	R11	4700Ohm	Resistor CHIP 5%	0603	248-19200-1	Westech Component
31	1	R12	1MOhm	Thin Film Resistor - Through Hole 1%	2.5x6.5 mm	MBB02070C1004FCT00	Vishay
32	1	S1	N/A	Push button switch	pitch 5.08 mm	N/A	N/A
33	2	U1, U2	60V, 23A	N-Channel Power MOSFET	SON 5x6 mm	CSD18532Q5B	Texas Instruments
34	1	U3	118V, 3A	Half-Bridge Gate Drivers	PSOP-8	LM5101A	Texas Instruments
35	1	U4	30V, 200mA	Schottky Diodes	SOT-23 3L	BAT54S	Fairchild
36	1	U5	100V/V	Current Shunt Monitors	SOIC-8	INA286	Texas Instruments
37	1	U6	N/A	16-bit Microcontroller and DSC	PDIP-18	dsPIC33FJ06GS001	Microchip
38	1	U7	3.3V	Fixed Low-Dropout Voltage Regulator	SOT-223	TLV1117-33	Texas Instruments
39	1	Y1	7.3728MHz	Crystal +/-20ppm Fundamental	3.5x11.5 mm	ABL-7.3728MHZ-B2	ABRACON

ภาคผนวก ค โปรแกรมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC33FJ06GS001

ค.1 โปรแกรมหลัก (main.c)

```
#define FCY 3686400ULL // Define for using delay function

#include "xc.h" // Define all of dsPIC33FJ06GS001's registers
#include "config.h" // Set up configuration bit
#include "setup.h" // Initialize system clock and port direction
#include "timer1.h" // Make a change on duty cycle every 1 second
#include "pwm.h" // Drive synchronous buck converter
#include "adc.h" // Read data from current sensor and voltage sensor
#include "Pand0.h" // MPPT Algorithm
#include <math.h> // C math library
#include <libpic30.h> // Delay function
#include <p33FJ06GS001.h> // C30 library for calling delay function

char buffer[7]; // Buffer for print string on LCD
unsigned int an0, an1; // Store data read from ADC buffer
unsigned char p = 0; // 'p' refers to "pause", for waiting until timer 1 overflow
unsigned int R = 0; // Threshold to exit from Class 4 to Class 3

int main(void) {

    // Variables for P&O algorithm
    float V, V_old = 0, I, P, P_old = 0, dV = 0, dP = 0, dP_old1 = 0, dP_old2 = 0, D = 50, dD = 1;
    float S, Q, Q_old, dQ;

    // Initialization
    clock_setup(); // Configure clock system
    ADC10_SETUP(); // Configure ADC module
    PWM_SETUP(9428); // Set PWM1H and PWM1L in complementary output mode, @ 100kHz
    SetHSPWMDeadTime(94, 94); // Set Rising/Falling edge dead time (positive) 100 ns
    SetHSPWMMasterDutyCycle(D); // Set Master Duty cycle 50%

    timer1open(0xE100); // Set Timer1, period 1 second

    while (1) {
        p = 1; // set p=1 to be trapped at below while loop

        // Observation (Measure V and I, Calculate P dP and dV)
        observe(&I, &V, &P, &dV, &dP, &V_old, &P_old);

        // Classify position of operating point and Select the step size processes
        step_size_determination(&dV, &dP, &dP_old1, &dP_old2, &dD, &S, &Q, &Q_old, &dQ);

        // Perturbation according to the step size selected in previous process
        perturb(&dV, &dP, &D, &dD);

        // Store priori data for the next iteration
        V_old = V;
        P_old = P;
        dP_old2 = dP_old1;
        dP_old1 = dP;
        Q_old = Q;

        while (p != 0); // Waiting until timer1 overflow (p will be equal to 0)
    }
    return 0;
}

//ADC Pair 0 Interrupt service routine
void __attribute__((__interrupt__, no_auto_psv)) _ADCP0Interrupt(void) {
    busyADCPair0(); // Wait until conversion is completed
    dataADCP0ready(); // Wait until data in buffers ready to be read
    an0 = ADCBUF0; // Read AN0 conversion result (Current sensor)
    an1 = ADCBUF1; // Read AN1 conversion result (Voltage sensor)
    IFS6bits.ADCP0IF = 0; // Clear ADC Pair 0 Interrupt Flag
}

//Timer1 Interrupt service routine
void __attribute__((__interrupt__, no_auto_psv)) _T1Interrupt(void) {
    p = 0; // set p=1 to be unfettered from while loop
    IFS0bits.T1IF = 0; // Clear Timer1 Interrupt Flag
}
```

ค.2 โปรแกรมกำหนดคุณสมบัติเริ่มต้นของไมโครคอนโทรลเลอร์ (config.h)

```
#include <xc.h>

// FICD
#pragma config ICS = PGD2 // ICD Communication Channel Select bits (Communicate on PGEC2 and PGED2)
#pragma config JTAGEN = OFF // JTAG Enable bit (JTAG is disabled)

// FWDT
#pragma config WDTPR = PS32768 // Watchdog Timer Postscaler bits (1:32,768)
#pragma config WDTPOST = PR128 // Watchdog Timer Prescaler bit (1:128)
#pragma config PLLKEN = ON // Clock switch to PLL source will wait until the lock signal is valid.
#pragma config FWDTEN = OFF // Watchdog Timer Enable bit (Watchdog timer enabled/disabled by user software)

// FOSC
#pragma config POSCMD = XT // Primary Oscillator Mode Select bits (XT Crystal Oscillator Mode)
#pragma config OSCIOFNC = OFF // OSC2 Pin Function bit (OSC2 is clock output)
#pragma config IOL1WAY = ON // Peripheral pin select configuration (Allow only one reconfiguration)
#pragma config FCKSM = CSDCMD // Both Clock switching and Fail-safe Clock Monitor are disabled

// FOSCSEL
#pragma config FNOSC = PRIPLL // Oscillator Source Selection (Primary Oscillator with PLL module (XT + PLL)
#pragma config IESO = OFF // Two-speed Oscillator Start-up Enable bit (Start up with user-selected oscillator source)

// FGS
#pragma config GWRP = OFF // General Segment Write-Protect bit (General Segment may be written)
#pragma config GCP = OFF // General Segment Code-Protect bit (General Segment Code protect is Disabled)
```

ค.3 โปรแกรมตั้งค่าระบบสัญญาณนาฬิกา และทิศทางของพอร์ต (setup.c)

```
#include "xc.h"
#include "setup.h"

void clock_setup(void) {
    // Oscillator system configuration
    // Primary clock: POSCCLK = 7.3728 MHz, XTPLL -> Fosc = (POSCCLK*M)/(N1*N2)

    CLKDIVbits.PLLPRE = 0b000000; // PLLPRE = N1 = 2 (POSCCLK/2 = 3.6864 MHz)
    PLLFBD = 0b000000010; // PLLDIV = M = 4 (Fvco = 14.7456 MHz)
    CLKDIVbits.PLLPOST = 0b00; // PLLPOST = N2 = 2 (Fosc = Fvco/2 = 7.3728 MHz so Fp = Fcy = Fosc/2 = 3.6864 MHz)
    while(OSCCONbits.LOCK != 1); // Waiting for PLL to lock

    // Auxiliary clock system configuration
    ACLKCONbits.ASRCSEL = 1; // Primary oscillator is the clock source
    ACLKCONbits.FRCSEL = 0; // Input clock source is determined by ASRCSEL bit setting FOSCCLK
    ACLKCONbits.SELACLK = 1; // Aux. PLL provides the source clock for the Aux. Clock Divider
    ACLKCONbits.APSTSCLR = 0b111; // ACLK = (FOSCCLK*16)/1 = 117.9648 MHz (Must be divided-by-1)
    ACLKCONbits.ENAPLL = 1; // Enable Auxiliary PLL x16
    while(ACLKCONbits.APLLCK != 1); // Waiting for auxiliary PLL lock
}

void port_setup(void) {
    TRISAbits.TRISA3 = 0; // Set RA3 as output
    TRISAbits.TRISA4 = 0; // Set RA4 as output
}
```

ค.4 เฮดเดอร์ไฟล์ setup.h

```
#include <xc.h>

extern void clock_setup(void);
extern void port_setup(void);
```

ค.5 โปรแกรมตั้งค่าโมดูลแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (adc.c)

```
#include "adc.h"

void ADC10_SETUP(void) {

    // ADC configuration
    ADCONbits.ADON = 0;           // Disable ADC module
    ADCONbits.ADSIDL = 0;        // Continues module operation in Idle mode
    ADCONbits.SLOWCLK = 0;       // ADC is clocked by the primary clock PLL (Fadc = Fvco = 14.7456 MHz)
    ADCONbits.GSWTRG = 0;        // Ignore (Don't care: Individual software trigger is selected)
    ADCONbits.FORM = 0;          // Output is Integer Format
    ADCONbits.EIE = 0;           // Interrupt is generated after second conversion is completed
    ADCONbits.ORDER = 1;         // Odd numbered analog input is converted first, followed by even numbered
    ADCONbits.SEQSAMP = 0;       // Shared S&H and dedicated S&H circuit are sampled simultaneously
    ADCONbits.ASYNCSAMP = 1;     // Asynchronous Sampling
    ADCONbits.ADCS = 0b111;      // Fadc = Fvco/8 = 14.9611/8 = 1.8432 MHz (Tad = 542.5347 ns)

    // Select trigger source
    ADCPC0bits.TRGSRC0 = 0b00001; // Individual software trigger is selected (Pair AN1 and AN0)
    ADCPC0bits.TRGSRC1 = 0b00001; // Individual software trigger is selected (Pair AN1 and AN0)

    // Interrupt configuration
    IPC27bits.ADCP0IP = 0x01;      // Set ADC Pair 0 Interrupt Priority (Level 1)
    IFS6bits.ADCP0IF = 0;          // Clear ADC Pair 0 Interrupt Flag
    IEC6bits.ADCP0IE = 1;          // Enable ADC Pair 0 Interrupt

    ADCONbits.ADON = 1;           // Enable ADC module
    __delay_us(100);              // Wait at least 10 us for stabilizing Analog stage
}

void busyADCpair0(void){
    while(ADCPC0bits.PEND0);      // Conversion of channels AN0 and AN1 is pending
}

void convertADCpair0(void){
    ADCPC0bits.SWTRG0 = 1;        // Starts conversion of AN0 and AN1
}

void dataADCP0ready(void){
    while(!ADSTATbits.P0RDY);    // Wait until data is ready in Pair0 buffer
    ADSTATbits.P0RDY = 0;        // Clear data ready status
}

void setChannelPair0(void){
    // Select ADC channels Pair 0
    ADPCFGbits.PCFG0 = 0;         // AN0 is configured as analog input
    ADPCFGbits.PCFG1 = 0;         // AN1 is configured as analog input
}

```

ค.6 เฮดเดอร์ไฟล์ adc.h

```
#define FCY 3686400ULL
#include <xc.h>
#include <libpic30.h>

extern unsigned int an0, an1;

extern void ADC10_SETUP(void);
extern void busyADCpair0(void);
extern void convertADCpair0(void);
extern void dataADCP0ready(void);
extern void setChannelPair0(void);

```

ค.7 โปรแกรมตั้งค่าโมดูลสร้างสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชันความเร็วสูง (pwm.c)

```

#include "xc.h"
#include "pwm.h"

void PWM_SETUP(unsigned int period) {
    /* Setup for the PWM clock to use the primary oscillator as the REFCLK */
    PTCNbits.PTEN = 0; // PWM module must be disable during configuration
    PTCNbits.PTSIDL = 0; // PWM time base keep running in CPU Idle mode
    PTCNbits.EIPU = 0; // Active period register updates occur on PWM cycle boundary
    PTCNbits.SYNCEN = 0; // External synchronization of primary time base is disabled
    PTCNbits.SYNCEN = 0; // Disable SYNC01 output

    PTCN2bits.PCLKDIV = 0b000; // PWM input clock prescaler 1:1 (Fpwm = 117.9648/1 MHz)
    PTPER = period; // PWM Period
    PHASE1 = 0; // Phase shift

    PWMCON1bits.ITB = 0; // Select master time period (Use PTPER)
    PWMCON1bits.MDCS = 1; // Select master duty cycle
    PWMCON1bits.DTC = 0b00; // Select positive dead time
    PWMCON1bits.IUE = 0; // Update synchronize with time base (not immediate))

    // RECOMMENDED PROCEDURE: CONFIGURE PWM MODULE TO PREVENT GLITCHES ON PWM1H AND PWM1L PINS
    TRISAbits.TRISA4 = 1; // Configure PWM1H/RA4 as digital input
    // Ensure output is in safe state using pull-up or pull-down resistors
    TRISAbits.TRISA3 = 1; // Configure PWM1L/RA3 as digital input
    // Ensure output is in safe state using pull-up or pull-down resistors

    IOCON1bits.PENH = 0; // Assign pin ownership of PWM1H/RA4 to GPIO module
    IOCON1bits.PENL = 0; // Assign pin ownership of PWM1L/RA3 to GPIO module
    IOCON1bits.OVRDAT = 0; // Configure PWM outputs override state to the desired safe state
    IOCON1 = IOCON1 | 0x0300; // Set override PWM1H & PWM1L output
    IOCON1bits.POLH = 0; // PWM1H active high
    IOCON1bits.POLL = 0; // PWM1L active high
    IOCON1bits.PMOD = 0b00; // Complementary output mode
    PTCNbits.PTEN = 1; // Enable PWM module

    IOCON1 = IOCON1 & 0xFCFF; // Clear override PWM1H & PWM1L output
    __delay_ms(1); // Introduce a delay greater than one full PWM cycle
    IOCON1bits.PENH = 1; // Assign pin ownership of PWM1H/RA4 to PWM module
    IOCON1bits.PENL = 1; // Assign pin ownership of PWM1L/RA3 to PWM module
}

void CloseHSPWM(void)
{
    IFS3bits.PSEMIF = 0; // Clear PWM Special Event Match interrupt flag
    IFS5bits.PWM1IF = 0; // Clear PWM1 interrupt flag
    IEC3bits.PSEMIE = 0; // Disable interrupt request from PWM Special Event Match
    IEC5bits.PWM1IE = 0; // PWM1 interrupt disable
    PTCN = 0x00; // Disable HSPWM module
    PWMCON1 = 0x00;
}

void SetHSPWMDeadTime(unsigned int deadtime,unsigned int altdeadtime )
{
    DTR1 = deadtime ; // Dead time (Rising edge)
    ALTDTR1 = altdeadtime ; // Dead time (Falling edge)
}

// Parameter: dutycycle (0 to 100)
void SetHSPWMMasterDutyCycle(float dutycycle )
{
    MDC = (unsigned int)((dutycycle*94.3182) + 1.1818); // Master PWM Duty Cycle
}

```

ค.8 เฮดเดอร์ไฟล์ pwm.h

```

#define FCY 3686400ULL

#include <xc.h>
#include "libpic30.h" // For __delay_ms() function

extern void PWM_SETUP(unsigned int period);
extern void CloseHSPWM(void);
extern void SetHSPWMDeadTime(unsigned int deadtime,unsigned int altdeadtime );
extern void SetHSPWMMasterDutyCycle(float dutycycle );

```

ค.9 โปรแกรมตั้งค่าโมดูลตัวจับเวลา 1 (timer 1.c)

```
#include "xc.h"
#include "timer1.h"

void timer1open(unsigned int period){
    // Timer 1 configuration
    T1CONbits.TON = 0;           // Disable Timer1
    T1CONbits.TCS = 0;           // Timer1 clock source from internal clock (Fcy)
    T1CONbits.TGATE = 0;        // Gated time accumulation is disabled
    T1CONbits.TCKPS = 0b10;     // Timer1 input clock prescale 1:64
    T1CONbits.TSIDL = 0;        // Continues module operation in Idle mode
    TMR1 = 0x0000;              // Clear timer register
    set_period_timer1(period);  // Load the period value

    IPC0bits.T1IP = 0x01;       // Set Timer1 Interrupt Priority Level
    IFS0bits.T1IF = 0;          // Clear Timer1 Interrupt Flag
    IEC0bits.T1IE = 1;          // Enable Timer1 interrupt

    T1CONbits.TON = 1;          // Start Timer1
}

void set_period_timer1(unsigned int t){
    PR1 = t;
}
}
```

ค.10 เซตเตอร์ไฟล์ timer 1.h

```
#include <xc.h>

extern void timer1open(unsigned int period);
extern void set_period_timer1(unsigned int t);
```

ค.11 โปรแกรมติดตามจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (PandO.c)

```
#include "xc.h"
#include "adc.h"
#include "pwm.h"
#include "PandO.h"
#include <math.h>

void observe(float *current, float *voltage, float *power, float *D_voltage, float *D_power, float
*voltage_old, float *power_old) {

    unsigned int i = 0;           // use in for loop
    unsigned int n = 64;         // Number of data point
    unsigned int an0_sum = 0, an1_sum = 0; // accumulate variable

    // Sample n data points
    for(i=0;i<n;i++)
    {
        convertADCpair0();       // Trig ADC
        an0_sum = an0_sum + an0;  // Accumulate
        an1_sum = an1_sum + an1;  // Accumulate
    }

    // Average raw data
    an0 = rounding((float)an0_sum/n); // average and round
    an1 = rounding((float)an1_sum/n); // average and round

    // Calculate I, V, P, dV and dP
    *current = (float)an0*KC;        // Convert raw data to current
    *voltage = (float)an1*KV;        // Convert raw data to voltage
    *power = (*current) * (*voltage); // Calculate power
    *D_voltage = *voltage - *voltage_old; // Calculate change in voltage
    *D_power = *power - *power_old;   // Calculate change in power
}
}
```

```

void perturb(float *D_voltage, float *D_power, float *duty, float *D_duty) {
    // Perturbation
    if(*D_power > 0)
    {
        if(*D_voltage > 0)
        {
            *duty = *duty - *D_duty;    // Move the operating point to RHS of P-V curve
        }
        else
        {
            *duty = *duty + *D_duty;    // Move the operating point to LHS of P-V curve
        }
    }
    else
    {
        if(*D_voltage > 0)
        {
            *duty = *duty + *D_duty;    // Move the operating point to LHS of P-V curve
        }
        else
        {
            *duty = *duty - *D_duty;    // Move the operating point to RHS of P-V curve
        }
    }
}

// Duty cycle saturation function
if(*duty > 100)
{
    *duty = 100 - *D_duty;
}
if(*duty < 0)
{
    *duty = 0 + *D_duty;
}

// Generate PWM signals
SetHSPWMMasterDutyCycle(*duty);
}

void step_size_determination(float *D_voltage, float *D_power, float *D_power_old1, float *D_power_old2,
float *D_duty, float *s, float *q, float *q_old, float *Dq){

    static unsigned int Class = 3;

    *s = (float)*D_voltage / ((float)*D_duty/100); // Don't forget to change duty in X% to real number
    *q = (float)*D_power / fabs(*D_voltage);
    *Dq = (float)*q - *q_old;

    if((fabs(*s) < 10) && (fabs(*q) >= 1))
    {
        Class = 1;
    }
    else if((fabs(*Dq) <= 0.05) && (fabs(*q) >= 1) && (Class != 4))
    {
        Class = 2;
    }
    else if(Class != 4)
    {
        Class = 3;
    }
}

if((Class == 3) && (*D_power_old2 > 0) && (*D_power_old1 < 0) && (*D_power > 0) && (fabs(*q) <= 3))
{
    R = fabs(*D_power_old1) + fabs(*D_power_old2);
    Class = 4;
}
if((Class == 4) && (fabs(*D_power_old1) > R))
{
    Class = 3;
}
}

```



```

switch(Class){
  case 1:
    *D_duty = 10;
    break;
  case 2:
    *D_duty = 9;
    break;
  case 3:
    *D_duty = 2;
    break;
  case 4:
    *D_duty = 0.2;
    break;
  default:
    *D_duty = 2;
}
}

// Rounding function (For non-negative input)
unsigned int rounding(float input){
  unsigned int reminder;

  // Keep fraction in reminder and consider only the first digit
  reminder = (unsigned int)((input - (unsigned int)input)*10);
  if(reminder >= 5)
  {
    return (unsigned int)(input+1); // Ceiling up
  }
  else
  {
    return (unsigned int)input; // Flooring down
  }
}

```

ค.12 เซตเดอริฟเฟิล PandO.h

```

#define KC (float)5*((float)0.9461/310.0936979)
#define KV (float)583/((float)83*310.0936979)

#include <xc.h>

extern unsigned int R;

extern void observe(float *current, float *voltage, float *power, float *D_voltage, float *D_power, float
*voltage_old, float *power_old);
extern void perturb(float *D_voltage, float *D_power, float *duty, float *D_duty);
extern void step_size_determination(float *D_voltage, float *D_power, float *D_power_old1, float
*D_power_old2, float *D_duty, float *s, float *q, float *q_old, float *Dq);
extern unsigned int rounding(float input);

```

ภาคผนวก ง ข้อมูลภูมิอากาศที่อ่านได้จากตัวรับรู้นดาวฟ้าอาคารบูรณรอด

ง.1 วันที่ 9 มิถุนายน พ.ศ. 2559

TimeStamp	Solar Irr	Tmp Amb
hh:mm	W/m ²	°C
7:35	197.64	30.61
7:40	193.51	30.45
7:45	192.34	30.7
7:50	197.41	30.65
7:55	216.62	30.41
8:00	274.56	30.88
8:05	281.68	30.68
8:10	270.33	30.71
8:15	271.14	31.3
8:20	282.24	31.14
8:25	258.54	31.44
8:30	265.49	31.69
8:35	418.06	31.69
8:40	708.17	32.91
8:45	623.89	33.12
8:50	598.14	32.83
8:55	615.17	32.58
9:00	531.37	32.69
9:05	591.5	32.92
9:10	697.14	32.43
9:15	711.11	32.77
9:20	789	33.55
9:25	850.66	33.79
9:30	549.17	33.36
9:35	428.28	32.39
9:40	416.03	33.4
9:45	438.41	33.38

TimeStamp	Solar Irr	Tmp Amb
hh:mm	W/m ²	°C
9:50	766.4	33.6
9:55	665.44	34.6
10:00	471.5	33.89
10:05	445.08	33.63
10:10	456.91	33.99
10:15	454.44	33.33
10:20	480.24	33.01
10:25	707.97	34.71
10:30	979.3	33.42
10:35	988.26	34.71
10:40	1075.67	34.73
10:45	1111.58	34.79
10:50	1018.69	35.79
10:55	1038.19	35.69
11:00	1076.6	35.56
11:05	883.86	34.99
11:10	980.2	35.62
11:15	1018.83	35.55
11:20	922.76	34.3
11:25	1082.17	34.17
11:30	1064.57	34.11
11:35	1060.83	35.66
11:40	1050.61	35.45
11:45	1087.11	34.84
11:50	1010.83	35.81
11:55	954.67	36.16
12:00	887.41	36.2

ง.2 วันที่ 6 กันยายน พ.ศ. 2559

TimeStamp	Solar Irr	Tmp Amb
hh:mm	W/m ²	°C
11:00	860.97	35.71
11:05	773.95	34.69
11:10	1140	35.53
11:15	1129.58	34.4
11:20	1029.19	34.76
11:25	893.36	34.72
11:30	641.11	34.78
11:35	538.03	34.31
11:40	946.56	35.15
11:45	456.81	34.26
11:50	525.33	34.46
11:55	606.03	34.43
12:00	321.46	32.75
12:05	335.19	32.77
12:10	464.06	32.94
12:15	727.45	32.71
12:20	602.08	33.34
12:25	800.97	32.61
12:30	1147.72	33.7
12:35	1255.92	35.37
12:40	1294.77	34.73
12:45	892.03	32.97
12:50	1184.95	33.85
12:55	1307.65	35.82

TimeStamp	Solar Irr	Tmp Amb
hh:mm	W/m ²	°C
13:00	1250.76	35.82
13:05	491.41	34.32
13:10	394.36	34.29
13:15	569.32	33.17
13:20	425.54	33.87
13:25	658.28	34.77
13:30	519.08	34.28
13:35	833.2	34.53
13:40	600.25	35.04
13:45	1007.62	34.59
13:50	1009.49	35.52
13:55	993.56	35.83
14:00	943.83	35.69
14:05	611.19	37.37
14:10	916.28	36.29
14:15	455.03	34.52
14:20	918.43	36.45
14:25	927.14	34.53
14:30	893.42	35
14:35	868.11	35.09
14:40	805.56	34.58
14:45	799.54	35.95
14:50	756.89	35.49
14:55	771.75	36.33

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายฤชดิษฐ์ กมลพัฒนะ เกิดเมื่อวันที่ 19 มิถุนายน พ.ศ. 2535 ที่กรุงเทพมหานคร เป็นบุตรคนแรกของนาย เชิดชัย กมลพัฒนะ และนางณัฐยา กมลพัฒนะ นายฤชดิษฐ์สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2557 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สังกัดห้องปฏิบัติการวิจัยการออกแบบวงจรฝังตัวและวงจรรวม

