รหัสโครงการ SUT7-711-61-12-13

รายงานการวิจัย

การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบอิสระ ด้วยวิธีอ้างอิงกระแสร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือ

Maximum Power Point Tracking for Stand Alone Photovoltaic Systems by using Current Based Method Cooperated with Fuzzy Logic

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-711-61-12-13

รายงานการวิจัย

การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบอิสระ ด้วยวิธีอ้างอิงกระแสร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือ

Maximum Power Point Tracking for Stand Alone Photovoltaic Systems by using Current Based Method Cooperated with Fuzzy Logic

หัวหน้าโครงการวิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร.กองพัน อารีรักษ์

กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มีนาคม 2562

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย การตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีอ้างอิงกระแสร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือ สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทั้งนี้ต้องขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณนางสาวชวรีย์ เถื่อนพังเทียม ที่เป็นผู้ช่วยวิจัย ที่มีความทุ่มเท และการเอาใจใส่อย่างยิ่งในการทำงานวิจัย สุดท้ายผู้วิจัยขอขอบคุณพนักงานศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาคารเครื่องมือ 11 ทุกท่านที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

กองพัน อารีรักษ์

มีนาคม 2562

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

ปัจจุบันพลังงานแสงอาทิตย์ถูกนำมาใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีพลังงานไฟฟ้าอย่างแพร่หลาย และโดยส่วนมากเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นอุปกรณ์ทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ทำให้ได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากการศึกษาพบว่าระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ ณ สภาวะความเข้มแสงขณะนั้น ซึ่งพฤติกรรมของระบบควบคุมดังกล่าวจะส่งผลให้สามารถใช้ประโยชน์จากเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างคุ้มค่ามากที่สุด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีอิงกระแสร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ วิธีดังกล่าวจะมุ่งเน้นไปที่การเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรงทำให้สามารถปรับปรุงสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังสูงสุด อีกทั้งยังสามารถทำให้ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นซึ่งได้มีการนำเอาตรรกศาสตร์คลุมเครือเข้ามาประยุกต์ใช้งานร่วมกับวิธีอิงกระแส การยืนยันผลการตอบสนองทางพลวัตรของวิธีอิงกระแสร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือในงานวิจัยอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลการทดสอบจากชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาพบว่าวิธีอิงกระแสร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือสามารถตามรอยจุดกำลังสูงสุดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงโดยใช้เวลาตอบสนองภาวะชั่วครู่ได้อย่างรวดเร็ว ตลอดจนสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็นอย่างดี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Abstract

Presently, solar energy is widely used for electric energy technology. Solar cell is very useful because it is an electronic device which directly converts solar energy into electrical energy. Normally, the control system with maximum power point tracking can provide the maximum power from the solar cell at each irradiance. Therefore, this research proposes current-based method cooperated with Fuzzy Logic for the maximum power point tracking of stand-alone system. The proposed method directly focuses on the change of photovoltaic current that can improve the tracking performance. In order to increase the efficiency of the maximum power point tracking, the proposed control system using the fuzzy logic controller with current-based method is also described in the research. To confirm the advantage of the proposed method, the simulation and the experimental results from the hardware implementation are used. The results show that the current-based approach cooperated with fuzzy logic can quickly track the maximum power from solar cell when the irradiance is changing. Moreover, the proposed method can provide the better performance in the transient and steady-state power responses.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ค
สารบัญ ..... ง
สารบัญตาราง ..... ซ
สารบัญรูป ..... ฌ

บทที่

1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น 3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย 3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
1.6 การจัดรูปเล่มรายงานวิจัย 4

2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6
2.1 บทนำ 6
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 6
2.3 สรุป 11

3 ทฤษฎีพื้นฐาน 12
3.1 บทนำ 12
3.2 ความรู้พื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ 12
3.2.1 คุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ 14
3.2.2 ผลกระทบของความเข้มแสง 15
3.2.3 ผลกระทบของอุณหภูมิ 16

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.4 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 17
3.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ 17
3.3.1 ฟัซซีเซต 18
3.3.2 การดำเนินการทางฟัซซี 19
3.3.3 คุณสมบัติของฟัซซีเซต 21
3.3.4 ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษา 22
3.3.5 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิก 22
3.3.6 กฎของฟัซซี 26
3.3.7 การอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno 27
3.4 สรุป 28
4 การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส 30
4.1 บทนำ 30
4.2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา 30
4.3 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ 37
4.4 การสร้างชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ 40
4.4.1 ภาพรวมอุปกรณ์ของระบบ 40
4.4.2 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า 43
4.4.3 วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า 45
4.4.4 การเขียนโปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR 53
4.4.5 การเขียนโปรแกรมตัวควบคุมพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR 57
4.4.6 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก 60
4.4.7 วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย 62
4.4.8 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ 65
4.4.9 วงจรแยกโดดสัญญาณ 68
4.4.10 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ 70

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.11 แหล่งจ่ายของวงจรภายในชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ 73
4.5 การทดสอบหากราฟคุณลักษณะเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 74
4.6 การทดสอบหาค่าความผิดพลาดและค่าการเปลี่ยนแปลงกระแส 76
4.7 ผลการทดสอบชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ 78
4.8 สรุป 83
5 การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือ 84
5.1 บทนำ 84
5.2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา 84
5.3 การออกแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ 88
5.3.1 การทดสอบรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกสำหรับระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุด 88
5.3.2 การออกแบบตัวแปรภาษา และค่าเชิงภาษา 91
5.3.3 การออกแบบกฎของตรรกศาสตร์คลุมเครือ 94
5.3.4 การอนุมานและการทำดีฟัซซีของตรรกศาสตร์คลุมเครือสำหรับโปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุด 95
5.4 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ 97
5.5 การสร้างชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ 101
5.6 การทดสอบชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ 102
5.7 สรุป 110
6 สรุปและข้อเสนอแนะ 111
6.1 สรุป 111
6.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต 113
รายการอ้างอิง 114
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ของการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส 117

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ข. โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR 121
ภาคผนวก ค. ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ของการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือ..... 126
ภาคผนวก ง. โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR..... 130
ภาคผนวก จ. คู่มือการใช้งานชุดชาร์จเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด 139
ภาคผนวก ฉ. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ 142
ประวัติผู้วิจัย 163

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์.....6

4.1 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1..... 37

4.2 ผลการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดัน 44

4.3 ผลการทดสอบวงจรตรวจจับกระแส 51

4.4 พิกัดอุปกรณ์ต่าง ๆ ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์..... 72

4.5 ผลการทดสอบหาค่าความผิดพลาด เมื่อคงค่า $\Delta I_{step} = 0.03$ 76

4.6 ผลการทดสอบหาค่าการเปลี่ยนแปลงกระแส เมื่อคงค่า $\varepsilon_s = 50$ 77

4.7 ผลการทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส..... 82

5.1 ผลการทดสอบลักษณะรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของตรรกศาสตร์คลุมเครือสำหรับ .....
การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอ้างอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือ..... 90

5.2 ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของตรรกศาสตร์คลุมเครือสำหรับระบบ .....
การตามรอยจุดกำลังสูงสุด..... 91

5.3 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.1..... 98

5.4 ค่าตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุตที่ใช้ในการทดสอบ.....
ชุดทดสอบ..... 103

5.5 ผลการทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มี.....
ตรรกศาสตร์คลุมเครือ..... 109

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

3.1 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ 12
3.2 คุณลักษณะของกระแส แรงดัน และกำลังของเซลล์แสงอาทิตย์ 14
3.3 ลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มแสง 15
3.4 ลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 16
3.5 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของเซตชัดเจน $\mathbf{A}$ 19
3.6 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต $\mathbf{A}$ 19
3.7 ยูเนียนของฟัซซีเซต $\mathbf{A}$ และ $\mathbf{B}$ 20
3.8 อินเตอร์เซกชันของฟัซซีเซต $\mathbf{A}$ และ $\mathbf{B}$ 20
3.9 คอมพลีเมนต์ของฟัซซีเซต $\mathbf{A}$ 21
3.10 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกรูปสามเหลี่ยมหรือฟังก์ชันรูปตัว Λ 22
3.11 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมูหรือฟังก์ชันรูปตัว Π 23
3.12 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกรูปเกาส์เซียน 23
3.13 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกรูประฆังคว่ำ 24
3.14 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกรูปตัว Γ 24
3.15 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกรูปตัวเอส 25
3.16 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกรูปตัว L 25
3.17 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกรูปตัวแซด 26
3.18 ระบบการอนุมานฟัซซี 27
4.1 ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส 31
4.2 คุณลักษณะเฉพาะกำลังและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับวิธีอิงกระแส 32
4.3 คุณลักษณะเฉพาะกำลังและกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ .....
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง 33
4.4 คุณลักษณะเฉพาะกำลังและกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 34
4.5 แผนภาพลำดับการทำงานของวิธีอิงกระแส 35
4.6 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของวิธีอิงกระแส 38

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.7 โครงสร้างชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ของระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุด 41
4.8 ระบบฮาร์ดแวร์ชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส 42
4.9 ชุดควบคุมในชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุด 42
4.10 โครงสร้างของตัวตรวจจับแรงดัน 43
4.11 โครงสร้างของวงจรตรวจจับแรงดัน 43
4.12 วงจรตรวจจับแรงดันที่ใช้งานจริง 44
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจับแรงดันและ ..... แรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 45
4.14 โครงสร้างตัวตรวจจับกระแส 46
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{out} และ V_{in} 47
4.16 การออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณ 47
4.17 วงจรปรับแต่งสัญญาณที่ได้จากการออกแบบ 50
4.18 โครงสร้างวงจรตรวจจับกระแส 51
4.19 วงจรตรวจจับกระแสที่ใช้งานจริง 51
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจับกระแสและกระแสไฟฟ้าของแผง..... เซลล์แสงอาทิตย์ 53
4.21 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น ET - EASY MEGA 2560 54
4.22 ลูปควบคุมกระแสไฟฟ้า 57
4.23 ไอซีเบอร์ MCP4922 61
4.24 โมดูล ET-MINI MCP4922 DAC 61
4.25 ไอซีเบอร์ NE555 63
4.26 วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย 63
4.27 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย 64
4.28 วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยที่ใช้งานจริง 64
4.29 ไอซีเบอร์ LF351 65
4.30 โครงสร้างของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ 65
4.31 การทำงานของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ 66

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.32 ผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณกรณีที่ 1 แรงดันอ้างอิง 1.5 V 67
4.33 ผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณกรณีที่ 2 แรงดันอ้างอิง 2.5 V 67
4.34 ผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณกรณีที่ 3 แรงดันอ้างอิง 4 V 67
4.35 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่ใช้งานจริง 68
4.36 วงจรแยกโดดสัญญาณที่ใช้ไอซี PC923 68
4.37 ผลการทดสอบวงจรแยกโดดสัญญาณกรณีที่ 1 ค่าวัฏจักรหน้าที่ 30% 69
4.38 ผลการทดสอบวงจรแยกโดดสัญญาณกรณีที่ 2 ค่าวัฏจักรหน้าที่ 50% 69
4.39 ผลการทดสอบวงจรแยกโดดสัญญาณกรณีที่ 3 ค่าวัฏจักรหน้าที่ 80% 70
4.40 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ 70
4.41 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ที่นำมาใช้งานจริง 72
4.42 ไอซีรักษาระดับแรงดัน 73
4.43 ตัวแยกกราวด์แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้งานจริง 74
4.44 การทดสอบหากราฟคุณลักษณะเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 74
4.45 เครื่องมือวัดความเข้มแสง 75
4.46 คุณลักษณะเฉพาะของกระแสและกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริง 75
4.47 ผลการทดสอบชุดทดสอบที่ความเข้มแสง 200 W/m^2 79
4.48 ผลการทดสอบชุดทดสอบที่ความเข้มแสง 400 W/m^2 79
4.49 ผลการทดสอบชุดทดสอบที่ความเข้มแสง 600 W/m^2 80
4.50 ผลการทดสอบชุดทดสอบที่ความเข้มแสง 800 W/m^2 80
4.51 ผลการทดสอบชุดทดสอบที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 81
4.52 คุณลักษณะเฉพาะของกระแสและกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 W 82
5.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับงานวิจัย 85
5.2 ลักษณะเฉพาะของกำลัง และกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ 86
5.3 แผนผังไดอะแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือ 87
5.4 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกรูปสามเหลี่ยม 89
5.5 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู 89
5.6 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกรูปเกาส์เซียน 89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.7 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกรูประฆังคว่ำ 90
5.8 ระบบควบคุมการหาค่า ΔI_{step} สำหรับอัลกอริธึมในวิธีอิงกระแสโดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือ 91
5.9 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของอินพุต 92
5.10 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต 92
5.11 ลักษณะเฉพาะของกำลังและกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 วัตต์ 93
5.12 การทำฟัซซีของระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือ 95
5.13 การอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno 96
5.14 ค่าเอาต์พุตชัดเจนที่ได้จากการทำดีฟัซซีด้วยวิธีค่าน้ำหนักเฉลี่ย 97
5.15 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือ 99
5.16 โครงสร้างชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ของระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุด 101
5.17 ผลการทดสอบหาค่าตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกเอาต์พุตของตรรกศาสตร์คลุมเครือ 104
5.18 ผลการทดสอบชุดทดสอบที่ความเข้มแสง 200 W/m^2 106
5.19 ผลการทดสอบชุดทดสอบที่ความเข้มแสง 400 W/m^2 106
5.20 ผลการทดสอบชุดทดสอบที่ความเข้มแสง 600 W/m^2 107
5.21 ผลการทดสอบชุดทดสอบที่ความเข้มแสง 800 W/m^2 107
5.22 ผลการทดสอบชุดทดสอบที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 108
5.23 คุณลักษณะเฉพาะของกระแสและกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 วัตต์ 109
ก.1 การจำลองสถานการณ์อัลกอรึทึมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส 118
ก.2 บล็อกจำลองสถานการณ์อัลกอรึทึมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส 119
ค.1 การจำลองสถานการณ์อัลกอรึทึมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือ 127
ค.2 บล็อกจำลองสถานการณ์อัลกอรึทึมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือ 128
จ.1 กล่องชุดชาร์จเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด 140

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

จ.2 การเชื่อมต่อสายของระบบโซล่าเซลล์เข้ากับ MPPT Charger 141

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีพลังงานไฟฟ้ามีความเจริญก้าวหน้ามากขึ้นเป็นอย่างมากทั้งในภาคธุรกิจและภาคอุตสาหกรรมจึงมีความต้องการใช้พลังงานกับเทคโนโลยีดังกล่าวในอัตราที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะประเทศที่พัฒนาแล้วและกำลังพัฒนา ซึ่งสัดส่วนการใช้เชื้อเพลิงสำหรับผลิตไฟฟ้าในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นพลังงานสิ้นเปลืองหรือพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป (nonrenewable energy) เช่น ถ่านหิน น้ำมันเตา น้ำมันดีเซล และก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น จึงทำให้เชื้อเพลิงเหล่านี้มีปริมาณลดน้อยลงและสามารถหมดไปได้ในอนาคต อีกทั้งกระบวนการผลิตไฟฟ้าและใช้เชื้อเพลิงนั้นก่อให้เกิดมลพิษต่อสภาพแวดล้อมอีกด้วย พลังงานทดแทนหรือพลังงานหมุนเวียน (renewable energy) เช่น พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม ชีวมวล และพลังงานจากคลื่น จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงานในอนาคตเนื่องจากเป็นพลังงานที่มีอยู่ตามธรรมชาติสามารถนำมาใช้ทดแทนพลังงานสิ้นเปลืองได้อย่างไม่จำกัด อีกทั้งยังช่วยลดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อีกด้วย โดยพลังงานแสงอาทิตย์ถูกนำมาใช้กับเทคโนโลยีพลังงานไฟฟ้าอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานทดแทนทางธรรมชาติที่สำคัญและเป็นพลังงานสะอาดที่ไม่ทำให้สิ่งแวดล้อมเกิดมลภาวะขณะใช้งาน รวมถึงยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell หรือ photovoltaic cell, PV) จึงเป็นอุปกรณ์ทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ผลิตไฟฟ้าเนื่องจากสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์นั้นยังอยู่ระหว่างการพัฒนาทำให้ต้นทุนการผลิตและติดตั้งมีราคาที่สูงและประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้านั้นค่อนข้างต่ำ พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมและโหลดที่เป็นเอาต์พุตเท่านั้น ทำให้กระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่คงที่ ส่งผลให้ไม่สามารถดึงพลังงานสูงสุดที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด (maximum power point, MPP) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถผลิตได้ในขณะนั้นมาใช้งานได้อย่างเต็มที่ โดยการดึงพลังงานสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถแบ่งได้เป็นระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ (solar tracking system) และระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุด (maximum power point tracking, MPPT) ในระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์นั้นมีการใช้มอเตอร์ร่วมกับฟันเฟือง

หรือโซ่เป็นตัวขับเคลื่อนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีข้อเสียในเรื่องการใช้ต้นทุนสูงและใช้พลังงานไฟฟ้าในการหมุนตามดวงอาทิตย์อย่างสิ้นเปลือง ดังนั้นจึงได้หันมาศึกษาระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดที่สามารถสร้างพลังงานไฟฟ้าได้โดยไม่มีการเคลื่อนไหว ไม่สร้างเสียงรบกวนและไม่สร้างมลภาวะ สำหรับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดนั้นจะทำการปรับจุดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ได้พลังงานสูงที่สุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายได้ในสภาวะแวดล้อมขณะนั้น ซึ่งสามารถทำได้หลากหลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธีแรงดันเปิดวงจร (fractional open circuit voltage, V_{OC}) [1] – [3] วิธีกระแสลัดวงจร (fractional short circuit current, I_{SC}) [4] – [5] วิธีรบกวนและสังเกต (conventional perturb and observe method, P&O) [6] – [7] วิธีอิงกระแส (current-based method) [8] - [10] วิธีเพิ่มค่าความนำ (incremental conductance method, IncCond) [11] และวิธีตรรกศาสตร์คลุมเครือ (fuzzy logic method) หรือตัวควบคุมฟัซซี (fuzzy controller) [12] – [14] เป็นต้น จากที่กล่าวมาข้างต้นจะสังเกตได้ว่าวิธีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดมีหลากหลายวิธี ซึ่งในแต่ละวิธีจะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป โดยวิธีรบกวนและสังเกตนั้นถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและมีขั้นตอนในการคำนวณน้อย แต่มีข้อเสียคือเกิดปัญหาการกวัดแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะอยู่ตัวและทำให้ไม่สามารถหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างถูกต้อง ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีอิงกระแสในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV stand-alone system) เพื่อแก้ปัญหาข้อเสียที่เกิดขึ้นในวิธีรบกวนและสังเกตและเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของวิธีอิงกระแสให้ดียิ่งขึ้นอีก จึงได้มีการนำเอาวิธีตรรกศาสตร์คลุมเครือมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับวิธีอิงกระแสเพื่อแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่ได้นำเสนอนี้สามารถดึงพลังงานสูงสุดที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดได้อย่างถูกต้อง รวมถึงลดการกวัดแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะอยู่ตัวและมีการตอบสนองในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการตรวจสอบความถูกต้องและยืนยันผลศึกษาด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์บนโปรแกรม MATLAB และทดสอบชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและค้นคว้าองค์ความรู้เกี่ยวกับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

1.2.2 เพื่อดำเนินการแก้ปัญหาและพัฒนาการออกแบบตัวควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุด

1.2.3 เพื่อสร้างองค์ความรู้ในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระที่มีความแม่นยำและถูกต้องมากยิ่งขึ้น

1.2.4 เพื่อศึกษาและดำเนินการสร้างชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ในการยืนยันผลการตามรอยจุดกำลังสูงสุด สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ระบบที่พิจารณาในงานวิจัยนี้เป็นระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดที่ประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ โดยอินพุตของระบบคือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 W และเอาต์พุตของระบบคือโหลดทางไฟฟ้าหรือแบตเตอรี่ขนาด 12 V

1.3.2 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์จะอาศัยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลัง (Power System Blocksets) ร่วมกับ SIMULINK ของโปรแกรม MATLAB

1.3.3 ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ในการสร้างชุดทดสอบสำหรับวิธีอิงกระแสและวิธีอิงกระแสร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือ

1.3.4 การออกแบบตัวควบคุมพีไอในระบบ จะใช้วิธีการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะต้องมีค่ามากกว่าแรงดันของแบตเตอรี่ เนื่องจากระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์

1.4.2 ตรรกศาสตร์คลุมเครือนำมาใช้สำหรับการออกแบบค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์(ΔI_{step}) ที่ใช้ในวิธีอิงกระแสเท่านั้น

1.4.3 ตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกอินพุตและเอาต์พุตในวิธีอิงกระแสร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือจะดำเนินการออกแบบกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 W เท่านั้น

1.4.4 การยืนยันผลการศึกษาและตรวจสอบความถูกต้องของการตามรอยจุดกำลังสูงสุดในงานวิจัย จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลการทดสอบจากชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับวิธีการดึงพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

1.5.2 ได้แนวทางในการแก้ปัญหาและพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดในอดีต

1.5.3 ได้องค์ความรู้ใหม่ในการออกแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ

1.5.4 ได้องค์ความรู้ในการเขียนโปรแกรมสำหรับจำลองสถานการณ์การตามรอยจุดกำลังสูงสุด บนโปรแกรม MATLAB

1.5.5 ได้ประสบการณ์ในการสร้างชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ สำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1.5.6 ได้บทความเผยแพร่ในวารสารหรือการประชุมวิชาการระดับชาติ และ/หรือนานาชาติ

1.6 การจัดรูปเล่มงานวิจัย

รายงานวิจัยเล่มนี้ประกอบด้วย 6 บท แต่ละบทมีรายละเอียดที่นำเสนอดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของ การวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 นำเสนอการปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังสูงสุด สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ พร้อมทั้งการสรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการทำวิจัย

บทที่ 3 นำเสนอทฤษฎีพื้นฐานหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ และความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวิธีตรรกศาสตร์คลุมเครือเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการออกแบบตัวควบคุมในบทถัดไป

บทที่ 4 นำเสนอการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส เนื้อหาในเบื้องต้นของบทนี้จะอธิบายถึงหลักการทำงานของวิธีอิงกระแส การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ จากนั้นจะอธิบายถึงการออกแบบและการสร้างชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ในส่วนต่าง ๆ รวมถึงการทดสอบชุดทดสอบฮาร์ดแวร์และแสดงผลที่ได้จากการทดสอบ

บทที่ 5 นำเสนอการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือ เนื้อหาในเบื้องต้นของบทนี้จะอธิบายถึงหลักการทำงานของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา การออกแบบวิธีตรรกศาสตร์คลุมเครือในส่วนต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับระบบ และการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ จากนั้นจะอธิบายถึงโครงสร้างของชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ในส่วนต่าง ๆ และการเขียนโปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR พร้อมทั้งนำเสนอการทดสอบชุดทดสอบฮาร์ดแวร์และแสดงผลที่ได้จากการทดสอบ

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ กล่าวถึงผลสรุปของการทำวิจัย พร้อมทั้งนำเสนอปัญหาและข้อเสนอแนะ เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ภาคผนวกมี 6 ส่วน คือ ภาคผนวก ก. รายละเอียดชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ของการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส ภาคผนวก ข.โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ภาคผนวก ค.

รายละเอียดชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ของการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือ ภาคผนวก ง. โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ภาคผนวก จ. คู่มือการใช้งานชุดชาร์จเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด และภาคผนวก ฉ. รายการบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดเป็นระบบที่ได้รับความนิยมในการนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มสมรรถนะการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มากยิ่งขึ้น ซึ่งในอดีตที่ผ่านมามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีที่ใช้ในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์อย่างแพร่หลายและมีการค้นคว้าและวิจัยเพื่อพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ในบทนี้จึงได้นำเสนอปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ได้นำเสนอโดยเรียงลำดับตามปีที่ตีพิมพ์จากงานวิจัยในอดีตจนถึงปัจจุบัน รวมถึงอธิบายสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการทำวิจัยสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2007	Trishan Esram and Patrick L. Chapman. [1]	บทความนี้นำเสนอเทคนิควิธีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีการต่าง ๆ สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีลักษณะแตกต่างกันทั้งหมด 19 วิธี รวมทั้งวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธี เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกวิธีการที่เหมาะสมกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคต

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2008	Hanju Cha and Sanghoey Lee. [8]	บทความนี้นำเสนอการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย มีหลักการทำงานเป็นคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อนหน้า ซึ่งจะอาศัยการเปรียบเทียบแบบวิธีเพิ่มค่าความนำคือ ถ้าค่าความนำมีค่าน้อยกว่าศูนย์จะทำการลดกระแสอ้างอิงให้ค่าความนำมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ถ้าค่าความนำมีค่ามากกว่าศูนย์จะทำการเพิ่มกระแส และถ้าค่าความนำมีค่าเท่ากับศูนย์แสดงว่าเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่จุดกำลังสูงสุดค่ากระแสอ้างอิงจะถูกคงค่าไว้ วิธีอิงกระแสในบทความนี้แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองที่ทนทานและรวดเร็วเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมอย่างรวดเร็ว
2010	Md Fahim Ansaria, S. Chatterjib, and Atif Iqbalc. [12]	บทความนี้นำเสนอตรรกศาสตร์คลุมเครือ เพื่อใช้ในการตามรอยจุดกำลังสูงสุด โดยการประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นดีซี ซึ่งการออกแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือจะใช้การอนุมานฟัซซีแบบแมมดานิและการทำดีฟัซซีด้วยวิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง รวมทั้งแสดงผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบกับวิธีรบกวนและสังเกต ผลปรากฏว่าตรรกศาสตร์คลุมเครือมีข้อดีคือ สามารถออกแบบได้โดยไม่จำเป็นต้องมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แม่นยำ และยังสามารถแสดงพฤติกรรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดที่ดียิ่งขึ้น มีข้อเสียคือไม่มีกระบวนการปรับแต่งโครงสร้างในตรรกศาสตร์คลุมเครือ โครงสร้างของระบบจะถูกกำหนดโดยผู้ใช้งาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2010	H. Toodeji, S.H. Fathi and N. Farokhnia. [9]	บทความนี้นำเสนอวิธีอิงกระแสที่ใช้ในระบบรวมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และตัวชดเชยซิงโครนัสแบบสถิต ซึ่งวิธีดังกล่าวได้จากการพัฒนาอัลกอริธึมของวิธีรบกวนและสังเกต แต่จะเน้นไปที่การหากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุด ข้อดีที่นำเสนอในบทความนี้คือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เชื่อมต่อกับตัวชดเชยซิงโครนัสแบบสถิตสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้โดยปราศจากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นดีซี
2014	Ahmed Ali, Ali N Hasan and Tshilidzi Marwala. [15]	บทความนี้นำเสนอผลการทดสอบสมรรถนะและการจำลองสถานการณ์ของวิธีรบกวนและสังเกตกับวิธีตรรกศาสตร์คลุมเครือ โดยใช้โปรแกรม MATLAB เมื่อพิจารณาทั้งสองวิธีเห็นได้ชัดว่าวิธีตรรกศาสตร์คลุมเครือมีเสถียรภาพมากขึ้นและการกวัดแกว่งของระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดมีค่าน้อยมาก อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธีรบกวนและสังเกต
2014	Alivarani Mohapatra, Byamakesh Nayak and K.B.Mohanty. [10]	บทความนี้นำเสนอการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระทำงานโดยการเปรียบเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังและกระแสไฟฟ้า จากนั้นทำการรบกวนค่ากระแสไฟฟ้าแทนการรบกวนค่าแรงดันไฟฟ้าในวิธีรบกวนและสังเกต ทำให้สามารถเร่งความเร็วในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดได้ดียิ่งขึ้น แต่ก็มีข้อเสียในการออกแบบค่าแอมพลิจูดหรือสมการการรบกวนค่ากระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมกับระบบ

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2015	Md Faysal Nayan and S.M.Safayet Ullah. [16]	บทความนี้นำเสนอสมการพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์และนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB รวมไปถึงการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์และกราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะแวดล้อมต่าง ๆ
2015	ปทุมพร วงค์ใหญ่, กองพัน อารีรักษ์ และ กองพล อารีรักษ์. [6]	บทความนี้นำเสนอระบบการตามรอยกำลังงานสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีรบกวนและสังเกต มีหลักการทำงานโดยใช้การเปรียบเทียบกำลังและแรงดันไฟฟ้าในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อนหน้า จากนั้นทำการรบกวนด้วยการปรับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ให้แรงดันมีค่าเท่ากับแรงดันที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ ข้อดีคือเป็นวิธีการที่ง่ายและมีขั้นตอนในการคำนวณที่น้อย แต่มีข้อเสียคือปัญหาในการเลือกกำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ที่เหมาะสมกับระบบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ.)	คณะผู้วิจัย	สาระสำคัญของงานวิจัย
2015	R. Boukenoui, R. Bradai, A. Mellit, M. Ghanes and H. Salhi. [7]	บทความนี้นำเสนอวิธีการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ถูกพัฒนาด้วยตรรกศาสตร์คลุมเครือ โดยมีการศึกษาและวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของวิธีที่ถูกพัฒนาด้วยตรรกศาสตร์คลุมเครือทั้ง 2 แบบคือแบบที่ 1 Modified hill climbing-FLC และแบบที่ 2 Adaptive P&O-FLC กับวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิม ด้วยการจำลองสถานการณ์ในโปรแกรม MATLAB ผลปรากฏว่าวิธี Adaptive P&O-FLC MPPT มีการตอบสนองที่รวดเร็วที่สุดและมีสมรรถนะการทำงานที่สูงที่สุด
2015	Tawfix Radjai, Jean Paul Gaubert, Lazhar Rahmani and Saad Mekhilef [17]	บทความนี้นำเสนอวิธีรบกวนและสังเกตที่มีการปรับตัวของค่าวัฏจักรหน้าที่โดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือผ่านวงจรแปลงผันแบบชุคค์ จากผลการจำลองสถานการณ์และการทดสอบฮาร์ดแวร์สามารถปรับปรุงการตอบสนองในภาวะชั่วครู่และสภาวะอยู่ตัวของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับวิธีรบกวนและสังเกตแบบดั้งเดิมที่มีการคงค่าขนาดของค่าวัฏจักรหน้าที่อีกด้วย

การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันจะเห็นได้ว่าวิธีที่ใช้ในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดนั้นมีด้วยกันหลากหลายวิธี ในแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป สำหรับวิธีรบกวนและสังเกตนั้นถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และมีขั้นตอนในการคำนวณน้อย โดยจากงานวิจัยในอดีต [6] พบว่าปัญหาในการเลือกกำหนดขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่ (duty cycle: *D*) ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ที่ไม่เหมาะสมกับระบบ อาจส่งผลกระทบทางอ้อมต่อกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดในสภาวะอยู่ตัวทำให้ไม่สามารถหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างถูกต้อง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมโดยเฉพาะเมื่อปริมาณความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจะทำให้การตามรอยจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดเกิดข้อผิดพลาดได้ เพื่อแก้ไขปัญหาและข้อเสียที่เกิดขึ้นในวิธีรบกวนและสังเกต ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสซึ่งจะอาศัยการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (ΔI_{step}) โดยตรงแทนการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ที่ใช้วิธีรบกวนและสังเกต เนื่องจากการเลือกกำหนดค่า ΔI_{step} นั้นเป็นการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการแปลงกำลังไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรงจึงทำให้มีระยะเวลาการตอบสนองในภาวะชั่วครู่ก่อนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่รวดเร็วขึ้นและทำให้เข้าใกล้จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าตรรกศาสตร์คลุมเครือได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานด้านระบบควบคุมเนื่องจากเป็นวิธีการควบคุมที่ให้ประสิทธิผลสูงและไม่จำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แม่นยำ ทั้งยังสามารถออกแบบการใช้งานได้หลากหลายตามความเหมาะสมของระบบที่พิจารณาโดยใช้ความรู้และประสบการณ์ของผู้ใช้งานเอง ดังนั้นงานวิจัยจึงได้นำเอา ตรรกศาสตร์คลุมเครือเข้ามาประยุกต์ใช้งานร่วมกับวิธีอิงกระแส โดยนำตรรกศาสตร์ดังกล่าวมาใช้ในการปรับตัวและเลือกกำหนดค่า ΔI_{step} ให้เหมาะสมกับระบบและการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของวิธีอิงกระแสให้ดียิ่งขึ้น

2.3 สรุป

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงวิธีการต่าง ๆ ที่ใช้ในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ รวมถึงหลักการทำงานและสาระสำคัญของแต่ละวิธีที่มีการใช้งานตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสองวิธีได้แก่วิธีอิงกระแสและวิธีอิงกระแสที่มีการประยุกต์ใช้ ตรรกศาสตร์คลุมเครือ ซึ่งจากงานวิจัยต่าง ๆ ข้างต้นถือเป็นองค์ความรู้พื้นฐานและเป็นแนวทางที่สำคัญสำหรับการดำเนินงานวิจัยและการพัฒนาสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

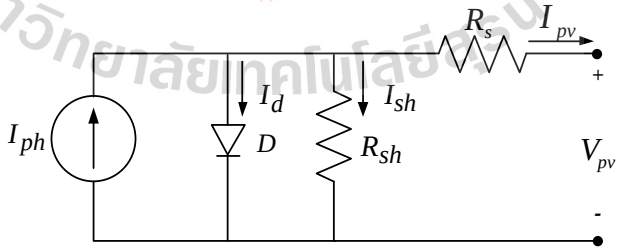
บทที่ 3
ทฤษฎีพื้นฐาน

3.1 บทนำ

ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระที่ใช้ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ประกอบด้วยอินพุตของระบบคือแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าดีซีเป็นดีซีที่มีการควบคุมด้วยอัลกอริทึมในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดและมีเอาต์พุตของระบบเป็นโหลดหรือแหล่งพลังงานสำรองแบตเตอรี่ โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีอิงกระแสผสมผสานกับตรรกศาสตร์คลุมเครือในการตามรอยจุดกำลังสูงสุด ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จึงได้นำเสนอทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับความรู้พื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์และความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับตรรกศาสตร์คลุมเครือเพื่อประยุกต์ใช้กับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในบทถัดไป

3.2 ความรู้พื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำทำหน้าที่เปลี่ยนรูปพลังงานจากพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยสามารถวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าได้จากวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ (equivalent circuit) แสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าแบบคงที่ (photo current, I_{ph}) ต่อขนานกับไดโอด (รอยต่อพีเอ็น) และความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์ (R_{sh}) ที่ต่ออนุกรมกับความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ (R_s) ตามลำดับ

ค่าความต้านทานขนานเกิดขึ้นเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าในลักษณะไบอัสแบบย้อนกลับให้กับไดโอด ส่วนความต้านทานอนุกรมเป็นค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจากจุดเชื่อมต่อระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับเซลล์ เมื่อพิจารณารูปที่ 3.1 โดยใช้กฎพื้นฐานทางไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์สามารถเขียนสมการกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าแบบคงที่หักลบด้วยกระแสที่ไหลผ่านไดโอดและกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานขนานดังสมการที่ (3-1) ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เกิดจากแสงอาทิตย์ไปทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สร้างประจุพาหะอิสระให้ไหลผ่านโหลดที่ต่ออยู่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงที่ตกกระทบรอยต่อพีเอ็น สามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปของสมการเอกซ์โพเนนเชียล (exponential equation) ที่สามารถสื่อความหมายของคุณลักษณะทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังสมการที่ (3-2) [16]

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{3-1}$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s\left(\exp\frac{\left(V_{pv} + I_{pv}R_s\right)}{nCV_t} - 1\right) - \frac{\left(V_{pv} + I_{pv}R_s\right)}{R_{sh}} \tag{3-2}$$

โดยที่ I_{pv} คือ กระแสไฟฟ้าขาออกที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (A)

I_{ph} คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งพลังงานแสง (A)

I_d คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด (A)

I_{sh} คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทานขนานของเซลล์ (A)

I_S คือ กระแสไบอัสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด (A)

V_{pv} คือ แรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (V)

R_S คือ ความต้านทานอนุกรมของเซลล์ (Ω)

R_{sh} คือ ความต้านทานขนานของเซลล์ (Ω)

C คือ จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมใน 1 มอดูล

n คือ พจน์ในอุดมคติ ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์(ซิลิกอน มีค่าเท่ากับ 1.3)

V_t คือ Thermal voltage $V_t = \frac{kT}{q}$

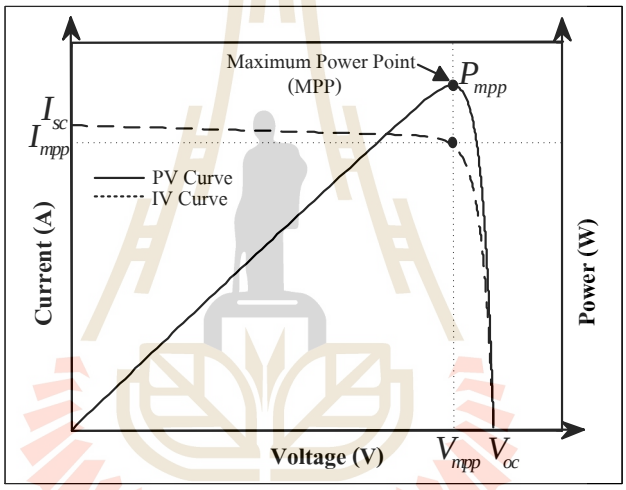
k คือ ค่าคงที่ของ Boltzman มีค่าเท่ากับ 1.3806504×10^{-23} (J/Kevin)

T คือ อุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์ (Kevin)

q คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} (C)

3.2.1 คุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์

คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้โดยใช้กราฟคุณลักษณะเฉพาะกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ (เส้นโค้ง I - V) และกราฟคุณลักษณะเฉพาะกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ (เส้นโค้ง P - V) ซึ่งได้จากการทดสอบวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าโดยการต่อโหลดกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ตั้งแต่สภาวะเปิดวงจรไปจนถึงสภาวะลัดวงจรในสภาวะแวดล้อมที่มีการควบคุมปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์และอุณหภูมิของเซลล์ที่สภาวะมาตรฐาน (standard test condition, STC) คืออุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (°C) และความเข้มแสง 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) ดังนั้นจึงสามารถสร้างกราฟลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 คุณลักษณะของกระแส แรงดัน และกำลังของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 3.2 กราฟคุณลักษณะของกระแส แรงดัน และกำลังของเซลล์แสงอาทิตย์มีพารามิเตอร์ที่สำคัญที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วย ค่าแรงดันสูงสุดที่กระแสเป็นศูนย์ในสภาวะเปิดวงจร (open circuit voltage, V_{oc}) ค่ากระแสสูงสุดเมื่อแรงดันเป็นศูนย์ในสภาวะลัดวงจร (short circuit current, I_{sc}) และเมื่อนำค่ากระแสคูณกับแรงดันจะได้กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีจุดสำคัญจุดเดียวที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเรียกว่า “จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point, P_{mpp})” โดยจุดนี้จะทำให้ทราบค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด (V_{mpp}) และกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด(I_{mpp}) นอกจากนั้นยังมีตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งปัจจัยภายนอกและสมบัติของเซลล์ได้แก่ ปริมาณความเข้มแสง อุณหภูมิ ความต้านทานขนาน ความต้านทานอนุกรม และพจน์ในอุดมคติ เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะปัจจัยภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้

จำนวน 2 ตัวแปรคืออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์และปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์เท่านั้น

3.2.2 ผลกระทบของความเข้มแสง

ปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์และอุณหภูมิของเซลล์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสง ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสงเป็นกระแสที่สร้างขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้แสงในการเปลี่ยนรูปพลังงานแสดงได้ดังสมการที่ (3-3) โดยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มแสงในสภาวะที่อุณหภูมิคงที่จะส่งผลต่อกระแสที่จ่ายได้ของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสามารถแสดงกราฟลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้กระแสและกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นในขณะที่ค่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

$$I_{ph} = \left[I_{sc} + K_i \left(T - T_{ref} \right) \right] \cdot \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) \tag{3-3}$$

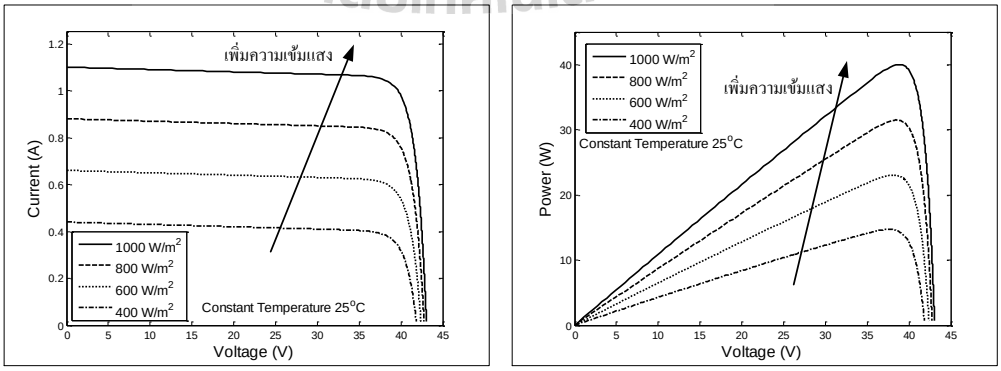
โดยที่ I_{sc} คือ กระแสลัดวงจรของเซลล์ที่ 25 °C (A)

K_i คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจร (A/°C)

T_{ref} คือ อุณหภูมิอ้างอิงของเซลล์ (Kevin)

G คือ ความเข้มแสง (W/m^2)

G_{ref} คือ ความเข้มแสงอ้างอิงของเซลล์ (W/m^2)



รูปที่ 3.3 ลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มแสง

3.2.3 ผลกระทบของอุณหภูมิ

พิจารณากำหนดให้ปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่ ค่าอุณหภูมิจะส่งผลกระทบต่อกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแสงในสมการที่ (3-3) และยังส่งผลกระทบต่อกระแสไบอัสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด (I_s) ในสมการที่ (3-4) และ (3-5) โดยค่าอุณหภูมิของเซลล์ทำให้ระยะห่างของแถบพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงเป็นผลให้แรงดันไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ส่วนค่ากระแสไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหรือแทบไม่มีผล โดยจะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จากรูปที่ 3.4 แสดงกราฟลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลทำให้แรงดันและกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง

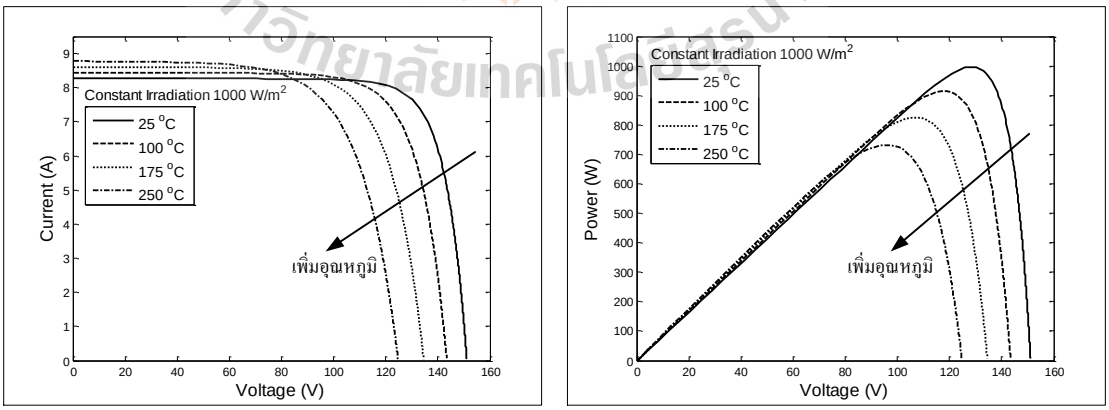
$$I_S = I_O \left[\frac{T}{T_{ref}}\right]^3 \exp\left[\left(\frac{T}{T_{ref}} - 1\right)\frac{E_g}{nCV_t}\right] \tag{3-4}$$

$$I_O = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{nCV_t}\right) - 1} \tag{3-5}$$

โดยที่ I_O คือ กระแสไบอัสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอดในสภาวะมาตรฐาน (A)

E_g คือ พลังงานระหว่างชั้นของสารกึ่งตัวนำ มีค่าเท่ากับ 1.12eV

V_{oc} คือ แรงดันเปิดวงจรของเซลล์ที่ 25 °C (V)



รูปที่ 3.4 ลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

จากกราฟในรูปที่ 3.3 และ 3.4 แสดงให้เห็นว่าในทุกสภาวการณ์เซลล์แสงอาทิตย์จะมีจุดที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพียงจุดเดียวที่ขึ้นอยู่กับความเข้มแสงและอุณหภูมิ

3.2.4 แผงเซลล์แสงอาทิตย์

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละแผง (module) นั้นจะประกอบไปด้วยเซลล์ (cell) หลาย ๆ เซลล์ต่อขนานหรืออนุกรมกันเนื่องจากในแต่ละเซลล์จะมีแรงดันไฟฟ้าประมาณ 0.6 ถึง 0.7 โวลต์ทำให้ในการใช้งานจริงจึงต้องมีการนำเอาเซลล์ต่อเข้าด้วยกันหลาย ๆ เซลล์เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นใน 1 แผง การต่อเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมจะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การต่อเซลล์แบบขนานจะทำให้ได้กระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้น โดยแรงดันและกระแสไฟฟ้าของเซลล์จะแปรผันตามตัวแปรในสมการที่ (3-2) แต่ถ้าหากแผงเซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งแผงไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอต่อการใช้งานในระบบ จะต้องมีการนำเอาแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาเชื่อมต่อกัน โดยการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอนุกรมจะเป็นการเพิ่มระดับแรงดันและกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่กระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจะมีค่าเท่าเดิม และการต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบขนานจะเป็นการเพิ่มระดับกระแสและกำลังไฟฟ้าในการจ่ายให้กับโหลดโดยแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าเท่าเดิม สมการความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเชื่อมต่อกันหลาย ๆ แผงแสดงได้ดังสมการที่ (3-6)

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_s \left(\exp \frac{\left(\frac{V_{pv}}{N_s} + \frac{I_{pv}}{N_p} R_s \right)}{nCV_t} - 1 \right) - \frac{\left(\frac{N_p}{N_s} V_{pv} + I_{pv} R_s \right)}{R_{sh}} \qquad (3\text{-}6)$$

โดย N_p คือจำนวนแผงที่ต่อขนาน

N_s คือจำนวนแผงที่ต่ออนุกรม

3.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ

ตรรกศาสตร์คลุมเครือ (fuzzy logic) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานควบคุมทางด้านวิศวกรรมต่าง ๆ มากมาย ตรรกศาสตร์ดังกล่าวเป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจภายใต้ความไม่แน่นอนหรือซับซ้อนคลุมเครือของข้อมูลโดยยอมให้มีความยืดหยุ่นได้ตามธรรมชาติของมนุษย์ ซึ่งการออกแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือสำหรับใช้ในการควบคุมระบบหรือสามารถเรียกว่า “ตัวควบคุมฟัซซี (fuzzy controller)” จะอาศัยความรู้พื้นฐานและประสบการณ์การของผู้ใช้งานในการออกแบบจึงทำให้ระบบต่าง ๆ มีความสามารถในการปรับเปลี่ยนได้อัตโนมัติตามสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงและมี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การตัดสินใจแบบชาญฉลาดได้เหมือนมนุษย์มากขึ้น อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้นำเอาตรรกศาสตร์คลุมเครือเข้ามาประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีอิงกระแสเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ ดังนั้นเนื้อหาในห้อข้อนี้จึงได้นำเสนอทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับตรรกศาสตร์คลุมเครือเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบตัวควบคุม

3.3.1 ฟัซซีเซต

เซตชัดเจน (crisp set) เป็นเซตที่มีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0 และ 1 $\{0,1\}$ เท่านั้น ซึ่งจะมีการกำหนดขอบเขตของเซตอย่างชัดเจนหรือเป็นขอบเขตที่ตัดขาดจากกันแบบทันทีทันใด โดย 0 หมายถึงการไม่เป็นสมาชิกของเซตและ 1 หมายถึงการเป็นสมาชิกของเซต สำหรับฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของเซตชัดเจน $\mathbf{A}$ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-7)

$$\mu_{\mathbf{A}}(x)=\begin{cases}1, & x\in\mathbf{A}\\ 0, & x\notin\mathbf{A}\end{cases} \tag{3-7}$$

โดยที่ $\mathbf{A}$ เป็นเซตชัดเจน

x เป็นสมาชิกในเซต

$\mu_{\mathbf{A}}$ เป็นค่าความเป็นสมาชิกและ

$\mu_{\mathbf{A}}(x)$ เป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในเซต $\mathbf{A}$

ฟัซซีเซต (fuzzy set) เป็นเซตที่มีความคลุมเครือไม่มีการกำหนดขอบเขตที่ชัดเจน ทฤษฎีฟัซซีเซตสามารถแก้ปัญหาข้อจำกัดและครอบคลุมเซตชัดเจนได้ด้วยการยอมให้มีค่าหรือระดับความเป็นสมาชิกของเซต ซึ่งแสดงด้วยค่าตัวเลขต่อเนื่องระหว่าง 0 ถึง 1 ทำให้มีจำนวนค่าความเป็นสมาชิกเป็นอนันต์ ในที่นี้ค่าความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต $\mathbf{A}$ จะมีการเปลี่ยนแปลงแบบค่อยเป็นค่อยไปบนขอบเขตระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งแตกต่างจากเซตชัดเจน และถ้า x อยู่ในเอกภพสัมพัทธ์เป็นสมาชิกของฟัซซีเซต $\mathbf{A}$ แล้วฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของฟัซซี $\mathbf{A}$ จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-8)

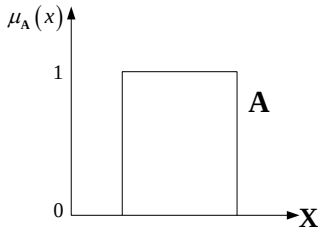
$$\mu_{\mathbf{A}}(x):\mathbf{X}\rightarrow[0,1] \tag{3-8}$$

โดยที่ $\mu_{\mathbf{A}}(x)$ มีค่าเท่ากับ 0 หมายถึง x ไม่เป็นสมาชิกในเซต $\mathbf{A}$

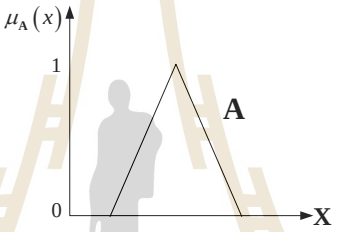
$\mu_{\mathbf{A}}(x)$ มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึง x เป็นสมาชิกในเซต $\mathbf{A}$

$\mu_{\mathbf{A}}(x)$ มีค่าระหว่าง 0 กับ 1 หมายถึง x เป็นสมาชิกบางส่วนในเซต $\mathbf{A}$

รูปร่างของฟังก์ชันที่แสดงความเป็นสมาชิกของเซตชัดเจนและฟัซซีเซตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ



รูปที่ 3.5 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของเซตชัดเจน **A**



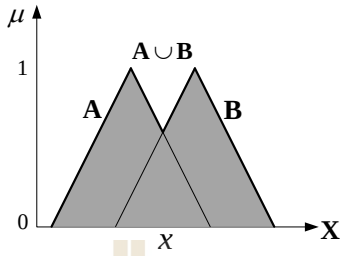
รูปที่ 3.6 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต **A**

3.3.2 การดำเนินการทางฟัซซี

การดำเนินการทางฟัซซี (fuzzy set operations) จะให้ผลว่าสมาชิกอยู่ในเซตด้วยค่าความเป็นสมาชิกเท่าไร ทั้งยังมีการดำเนินการที่มีคุณสมบัติเหมือนกับเซตชัดเจนโดยมีการดำเนินการ 3 แบบคือ ยูเนียน (union) อินเตอร์เซกชัน (intersection) และคอมพลีเมนต์ (complement) [18] – [19] ซึ่งจะกำหนดให้ฟัซซีเซต **A** และ **B** อยู่บนเอกภพสัมพัทธ์ **X** และให้ x เป็นส่วนประกอบของเอกภพสัมพัทธ์

- ยูเนียนของฟัซซีเซต **A** และ **B** คือเซตที่ประกอบด้วยสมาชิกที่เป็นสมาชิกของฟัซซีเซต **A** หรือ **B** หรือทั้งฟัซซีเซต **A** และ **B** สามารถเขียนแทนได้ด้วยสัญลักษณ์ $\mathbf{A} \cup \mathbf{B}$ โดยค่าความเป็นสมาชิกของการยูเนียนกันระหว่างฟัซซีเซต **A** และ **B** ในสมการที่ (3-9) $\mu_{\mathbf{A}\cup\mathbf{B}}$ คือค่ามากที่สุด (maximum) ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเป็นสมาชิกของทั้งสองฟัซซีเซตแสดงได้ในส่วนที่แรงเงาดังรูปที่ 3.7

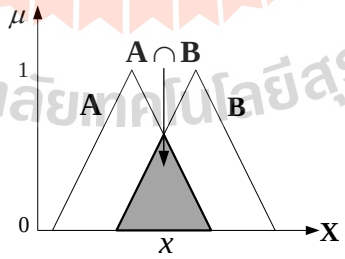
$$\begin{aligned}\mu_{\mathbf{A}\cup\mathbf{B}} &= \mu_{\mathbf{A}}(x) \vee \mu_{\mathbf{B}}(x) \\ &= \max\left(\mu_{\mathbf{A}}(x), \mu_{\mathbf{B}}(x)\right)\end{aligned} \tag{3-9}$$



รูปที่ 3.7 ยูเนียนของฟัซซีเซต **A** และ **B**

- อินเตอร์เซกชันของฟัซซีเซต **A** และ **B** คือเซตที่ประกอบด้วยสมาชิกที่เป็นสมาชิกของฟัซซีเซต **A** และ **B** สามารถเขียนแทนได้ด้วยสัญลักษณ์ $\mathbf{A}\cap\mathbf{B}$ โดยค่าความเป็นสมาชิกของการอินเตอร์เซกชันกันระหว่างฟัซซีเซต **A** และ **B** ในสมการที่ (3-10) $\mu_{\mathbf{A}\cap\mathbf{B}}$ คือค่าน้อยที่สุด (maximum) ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเป็นสมาชิกของทั้งสองฟัซซีเซต สามารถแสดงได้ในส่วนที่แรงเงาดังรูปที่ 3.8

$$\begin{aligned}\mu_{\mathbf{A}\cap\mathbf{B}} &= \mu_{\mathbf{A}}(x) \vee \mu_{\mathbf{B}}(x) \\ &= \min\left(\mu_{\mathbf{A}}(x), \mu_{\mathbf{B}}(x)\right)\end{aligned} \tag{3-10}$$

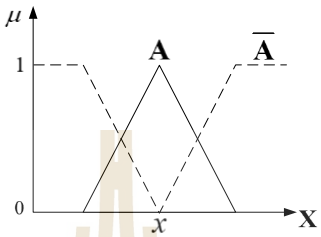


รูปที่ 3.8 อินเตอร์เซกชันของฟัซซีเซต **A** และ **B**

- คอมพลีเมนต์ของฟัซซีเซต **A** คือเซตที่ประกอบด้วยสมาชิกที่เป็นสมาชิกของเอกภพสัมพัทธ์ **X** แต่ไม่เป็นสมาชิกของฟัซซีเซต **A** ในส่วนที่เป็นเส้นประดังรูปที่ 3.9 ซึ่งสามารถเขียนแทนได้ด้วย

สัญลักษณ์ $\overline{\mathbf{A}}$ โดยค่าความเป็นสมาชิกของ $\overline{\mathbf{A}}$ $\mu_{\overline{\mathbf{A}}}(x)$ จะมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าระดับความเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 กับค่าระดับความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต $\mathbf{A}$ สามารถแสดงได้ในสมการที่ (3-11)

$$\mu_{\overline{\mathbf{A}}}(x) = 1 - \mu_{\mathbf{A}}(x) \tag{3-11}$$



รูปที่ 3.9 คอมพลีเมนต์ของฟัซซีเซต $\mathbf{A}$

3.3.3 คุณสมบัติของฟัซซีเซต

คุณสมบัติของฟัซซีเซต (properties of fuzzy sets) จะมีคุณสมบัติเหมือนกับเซตชัดเจน เนื่องจากค่าความเป็นสมาชิกของเซตชัดเจนเป็นเซตย่อยของช่วง [0,1] ดังนั้นเซตชัดเจนจึงสามารถคิดเป็นกรณีพิเศษของฟัซซีเซตได้ โดยคุณสมบัติที่ถูกใช้บ่อยของฟัซซีเซตมีดังต่อไปนี้

1. คุณสมบัติการสลับที่ (commutativity):

$$\mathbf{A} \cup \mathbf{B} = \mathbf{B} \cup \mathbf{A}$$

$$\mathbf{A} \cap \mathbf{B} = \mathbf{B} \cap \mathbf{A}$$

2. คุณสมบัติการจัดกลุ่ม (associativity):

$$\mathbf{A} \cup (\mathbf{B} \cup \mathbf{C}) = (\mathbf{A} \cup \mathbf{B}) \cup \mathbf{C}$$

$$\mathbf{A} \cap (\mathbf{B} \cap \mathbf{C}) = (\mathbf{A} \cap \mathbf{B}) \cap \mathbf{C}$$

3. คุณสมบัติการกระจาย (distributivity):

$$\mathbf{A} \cup (\mathbf{B} \cap \mathbf{C}) = (\mathbf{A} \cup \mathbf{B}) \cap (\mathbf{A} \cup \mathbf{C})$$

$$\mathbf{A} \cap (\mathbf{B} \cup \mathbf{C}) = (\mathbf{A} \cap \mathbf{B}) \cup (\mathbf{A} \cap \mathbf{C})$$

4. คุณสมบัติความเหมือน (idempotency):

$$\mathbf{A} \cup \mathbf{A} = \mathbf{A} \quad \text{และ} \quad \mathbf{A} \cap \mathbf{A} = \mathbf{A}$$

5. คุณสมบัติเอกลักษณ์ (identity):

$$\mathbf{A} \cup \varnothing = \mathbf{A} \quad \text{และ} \quad \mathbf{A} \cap \mathbf{X} = \mathbf{A}$$

$$\mathbf{A} \cap \varnothing = \varnothing \quad \text{และ} \quad \mathbf{A} \cup \mathbf{X} = \mathbf{X}$$

เมื่อ $\varnothing$ คือ ฟัซซีเซตว่าง และ $\mathbf{X}$ คือ เอกภพสัมพัทธ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

6. คุณสมบัติการส่งผ่าน (transitivity):

ถ้า $\mathbf{A} \subseteq \mathbf{B} \subseteq \mathbf{C}$ แล้ว $\mathbf{A} \subseteq \mathbf{C}$

7. คุณสมบัติการผกผัน (involution):

$$\overline{\overline{\mathbf{A}}} = \mathbf{A}$$

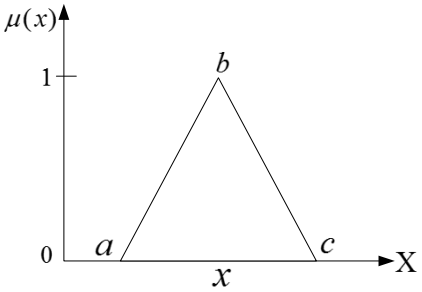
3.3.4 ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษา

ตัวแปรภาษา (linguistic variable) คือตัวแปรที่ช่วยกำหนดค่าของสิ่งที่จะอธิบายทั้งในรูปคุณภาพด้วยการใช้พจน์ภาษาและในรูปปริมาณด้วยการใช้ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิก เช่น ความสูง การให้ค่าแก่ความสูงอาจเป็น “สูง” “ปานกลาง” หรือ “ต่ำ” เป็นต้น โดยระดับค่าของตัวแปรภาษาดังกล่าวจะเรียกว่า ค่าเชิงภาษา (linguistic value) ซึ่งจะถูกนำไปแปลงเป็นค่าเชิงตัวเลขสำหรับประมวลผลด้วยฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกต่อไป

3.3.5 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิก

ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิก (membership function) คือฟังก์ชันที่มีการกำหนดค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่ต้องการศึกษาและใช้งาน ซึ่งรูปร่างของฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกจะแทนที่กับตัวแปรที่มีความไม่ชัดเจน ไม่แน่นอน และคลุมเครือ รูปร่างดังกล่าวผู้ใช้งานสามารถออกแบบให้มีรูปร่างที่แตกต่างกันหรือสมมาตรกันหรือไม่ก็ได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการคิดและแก้ไขปัญหาที่ศึกษา โดยรูปร่างของฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกที่ใช้งานทั่วไปมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบ แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียง 8 รูปแบบที่นิยม [18] – [19] ใช้ดังนี้

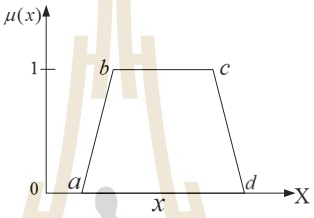
- ฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยมหรือฟังก์ชันรูปตัว Λ (triangular membership function, trimf) ดังรูปที่ 3.10 มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 ตำแหน่งคือ a, b และ c สามารถคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิกของตำแหน่งตัวแปร x ใด ๆ ค่า $\mu(x)$ ได้จากสมการที่ (3-12)



รูปที่ 3.10 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกรูปสามเหลี่ยมหรือฟังก์ชันรูปตัว Λ

$$\mu(x) = trimf(x:a,b,c) = \begin{cases} 0 & ;x \le a \\ (x-a)/(b-a) & ;a < x < b \\ 1 & ;x = b \\ (c-x)/(c-b) & ;b < x < c \\ 0 & ;x \ge c \end{cases} \quad (3\text{-}12)$$

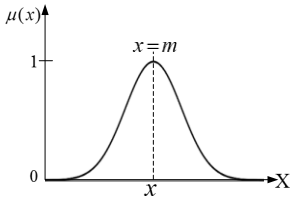
- ฟังก์ชันรูปสี่เหลี่ยมคางหมูหรือฟังก์ชันรูปตัว Π (trapezoidal membership function, trapmf) ดังรูปที่ 3.11 มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 4 ตำแหน่งคือ a,b,c และ d สามารถคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิกของตำแหน่งตัวแปร x ใด ๆ ค่า $\mu(x)$ ได้จากสมการที่ (3-13)



รูปที่ 3.11 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมูหรือฟังก์ชันรูปตัว Π

$$\mu(x) = trapmf(x:a,b,c,d) = \begin{cases} 0 & ;x \le a \\ (x-a)/(b-a) & ;a < x < b \\ 1 & ;b \le x \le c \\ (d-x)/(d-c) & ;c < x < d \\ 0 & ;x \ge d \end{cases} \quad (3\text{-}13)$$

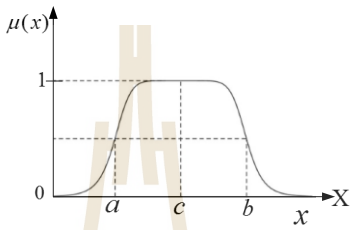
- ฟังก์ชันรูปเกาส์เซียน (gaussian membership function, gaussmf) ดังรูปที่ 3.12 มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ตำแหน่งคือ m และ σ ซึ่ง m หมายถึงค่าเฉลี่ยใช้สำหรับกำหนดค่าตำแหน่งกึ่งกลางของรูปกราฟและ σ หมายถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานใช้สำหรับกำหนดความกว้างของรูปกราฟ โดยสามารถคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิกของตำแหน่งตัวแปร x ใด ๆ และค่า $\mu(x)$ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3-14)



รูปที่ 3.12 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกรูปเกาส์เซียน

$$\mu(x) = gaussmf(x : m, \sigma) = \exp\left(-\frac{(x - m^2)}{2\sigma^2} \right) \quad (3\text{-}14)$$

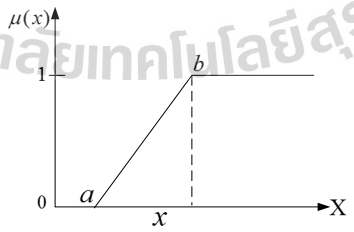
- ฟังก์ชันรูประฆังคว่ำ (generalized bell membership function, gbellmf) ดังรูปที่ 3.13 มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 ตำแหน่งคือ a, b และ c สามารถคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิกของตำแหน่งตัวแปร x ใด ๆ ค่า $\mu(x)$ ได้จากสมการที่ (3-15)



รูปที่ 3.13 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกรูประฆังคว่ำ

$$\mu(x) = gbellmf(x : a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c}{a} \right|^{2b}} \quad (3\text{-}15)$$

- ฟังก์ชันรูปตัว Γ (Γ - membership function) ดังรูปที่ 3.14 มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ตำแหน่งคือ a, b สามารถคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิกของตำแหน่งตัวแปร x ใด ๆ ค่า $\mu(x)$ ได้จากสมการที่ (3-16)

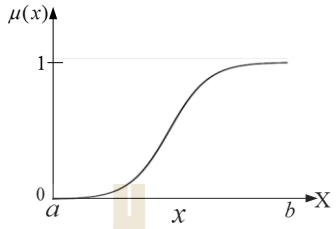


รูปที่ 3.14 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกรูปตัว Γ

$$\mu(x) = \Gamma(x : a, b) = \begin{cases} 0 & ; x < a \\ (x - a)/(b - a) & ; a \le x \le b \\ 1 & ; x > b \end{cases} \quad (3\text{-}16)$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

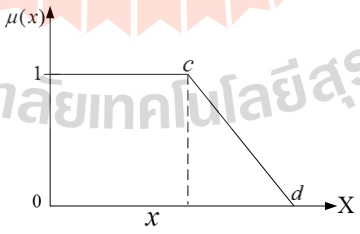
- ฟังก์ชันรูปตัวเอส (s-membership function, smf) ดังรูปที่ 3.15 มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ตำแหน่งคือ a,b สามารถคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิกของตำแหน่งตัวแปร x ใด ๆ ค่า $\mu(x)$ ได้จากสมการที่ (3-17)



รูปที่ 3.15 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกรูปตัวเอส

$$\mu(x) = smf(x:a,b) = \begin{cases} 0 & ;x < a \\ 2\left(\dfrac{x-a}{b-a}\right)^2 & ;a \le x \le \dfrac{a+b}{2} \\ 1-2\left(\dfrac{x-b}{b-a}\right)^2 & ;\dfrac{a+b}{2} \le x < b \\ 1 & ;x \ge b \end{cases} \tag{3-17}$$

- ฟังก์ชันรูปตัว L (L - membership function) ดังรูปที่ 3.16 มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ตำแหน่งคือ a,b สามารถคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิกของตำแหน่งตัวแปร x ใด ๆ ค่า $\mu(x)$ ได้จากสมการที่ (3-18)

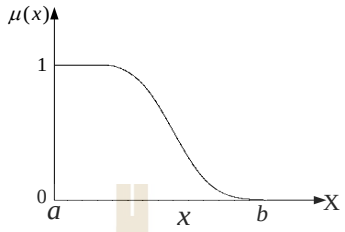


รูปที่ 3.16 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกรูปตัว L

$$\mu(x) = L(x:c,d) = \begin{cases} 1 & ;x < c \\ (c-x)/(d-c) & ;c \le x \le d \\ 0 & ;x > d \end{cases} \tag{3-18}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

- ฟังก์ชันรูปตัวแซด (z-membership function, zmf) ดังรูปที่ 3.17 มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ตำแหน่งคือ a, b สามารถคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิกของตำแหน่งตัวแปร x ใด ๆ ค่า $\mu(x)$ ได้จากสมการที่ (3-19)



รูปที่ 3.17 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกรูปตัวแซด

$$\mu(x) = zmf(x:a,b) = \begin{cases} 0 & ;x < a \\ 1-2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 & ;a \le x \le \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & ;\frac{a+b}{2} \le x < b \\ 1 & ;x \ge b \end{cases} \quad (3\text{-}19)$$

3.3.6 กฎของฟัซซี

กฎของฟัซซี (fuzzy rule) เป็นเงื่อนไขและข้อปฏิบัติของตรรกศาสตร์คลุมเครือมีประโยชน์ในการจัดรูปแบบระบบที่ซับซ้อนสามารถสังเกตได้ด้วยมนุษย์และสามารถแสดงด้วยตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของกฎ ซึ่งสามารถออกแบบกฎและกำหนดขึ้นเองได้โดยผู้ใช้งาน อย่างไรก็ตามวิธีที่นิยมและถูกประยุกต์ใช้งานมากที่สุดคือกฎฟัซซีแบบถ้า-แล้ว (IF-THEN rule) สามารถแสดงในรูปประโยคได้ดังนี้

IF <เงื่อนไข> THEN < ข้อปฏิบัติ>

จากรูปแบบกฎของฟัซซีประกอบด้วยส่วนของตัวแปรเงื่อนไขและส่วนของตัวแปรข้อปฏิบัติหรือผลลัพธ์ซึ่งเงื่อนไขจะถูกตรวจสอบและให้ค่าความเป็นสมาชิกของฟัซซีค่าหนึ่ง จากนั้นข้อปฏิบัติจะถูกประเมินและจะให้ค่าระดับความเป็นสมาชิกค่าหนึ่งเช่นกัน ทั้งนี้รูปแบบกฎของฟัซซีสามารถมีได้หลายเงื่อนไข โดยจะรวมกันด้วยตัวดำเนินการทางเซต AND หรือ OR และทุกเงื่อนไขจะถูกตรวจสอบพร้อมกัน โดยการกำหนดจำนวนกฎสามารถกำหนดได้หลายกฎแต่ไม่ควรมีจำนวนกฎ

มากเกินไป ควรจะเลือกใช้กฎเท่าที่จำเป็นเท่านั้นเพื่อลดความยุ่งยากซับซ้อนของตรรกศาสตร์คลุมเครือซึ่งสามารถแสดงกฎของฟัซซีที่มีหลายกฎและหลายเงื่อนไขในรูปประโยคได้ดังต่อไปนี้

Rule 1: IF [x is A] THEN [y is B]

Rule 2: IF [x is A] AND [y is B] OR [z is C] THEN [s is D]

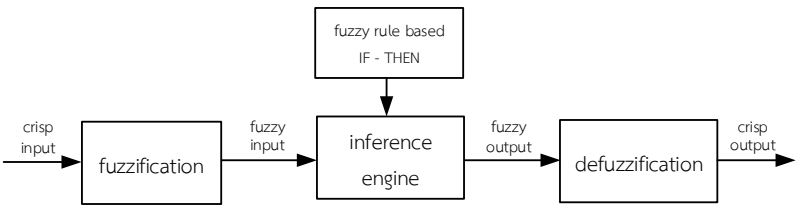
โดยที่ x, y, z และ s คือ ตัวแปรภาษา

A, B, C และ D คือ ค่าเชิงภาษา

3.3.7 การอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno

การอนุมานฟัซซี (fuzzy inference) เป็นกระบวนการส่งค่าอินพุตของระบบที่ควบคุมไปเป็นค่าเอาต์พุตด้วยการใช้ทฤษฎีของฟัซซีเซต โดยมีโครงสร้างพื้นฐานของการอนุมานฟัซซีแสดงดังแผนภาพรูปที่ 3.18 ซึ่งจะประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. การทำฟัซซี (fuzzification) คือส่วนที่แปลงค่าระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตชัดเจน (crisp input) เป็นอินพุตแบบตัวแปรฟัซซี(fuzzy input) ค่าระดับความเป็นสมาชิกดังกล่าวสามารถคำนวณหาได้จากฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกที่เลือกใช้ที่มีการระบุค่าเชิงภาษา
2. เครื่องมืออนุมานหรือการตีความ (inference engine) คือส่วนที่ทำหน้าที่ประเมินกฎของฟัซซี (fuzzy rule evaluation) ด้วยการอาศัยฐานกฎ (rule base) โดยจะทำการตรวจสอบค่าเชิงภาษาของตัวแปรอินพุตในลักษณะรูปแบบกฎหรือเงื่อนไข ถ้า (IF) และจะทำการกำหนดค่าเอาต์พุตเชิงภาษาในส่วนของ แล้ว (THEN) จากนั้นจะนำกฎทั้งหมดที่ได้รับการประเมินแล้วมารวมกฎ (aggregation) เนื่องจากค่าของตัวแปรอินพุตหนึ่งค่าสามารถอยู่ในเงื่อนไขของกฎได้หลายกฎ โดยจะรวมฟัซซีเซตของค่าเชิงภาษาของเอาต์พุตของทุกกฎที่เป็นจริงให้เป็นเซตเดียวกันเพื่อหาผลลัพธ์ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต
3. การทำดีฟัซซี (defuzzification) คือส่วนที่ทำการแปลงค่าผลลัพธ์ฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตจากผลของการรวมกฎให้อยู่ในรูปของค่าเอาต์พุตชัดเจน(crisp output)



รูปที่ 3.18 ระบบการอนุมานฟัซซี

สำหรับวิธีการอนุมานฟัซซีที่นิยมใช้มี 2 วิธีการคือ การอนุมานฟัซซีแบบ Mamdani และการอนุมานฟัซซีแบบ Takagi - Sugeno โดยวิธีการแบบ Mamdani จะรวมผลการอนุมานของกฎด้วยวิธีการซ้อนทับจากกฎหลาย ๆ ข้อ แต่สำหรับวิธีการแบบ Takagi-Sugeno มีการอนุมานแบบรวมค่าน้ำหนักจากหลาย ๆ กฎ เพื่อรวมเป็นข้อสรุปสุดท้าย ซึ่งวิธีการอนุมานฟัซซีที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้การอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno เนื่องจากเป็นวิธีที่ค่อนข้างสะดวกและง่ายในขั้นตอนการรวมกฎ โดยการอนุมานแบบ Takagi-Sugeno เป็นวิธีการอนุมานฟัซซีที่แตกต่างจากการอนุมานแบบ Mamdani ในส่วนของรูปแบบของฟังก์ชันเอาต์พุต ซึ่งจะใช้เส้นตรงโทนแทนการใช้ฟังก์ชันสมาชิกแบบฟัซซีเซต ทั้งนี้ในส่วนของกฎเงื่อนไขและการประเมินสามารถเขียนอธิบายได้ดังสมการที่ (3-20)

IF [x_1 is A] AND [x_2 is B] AND [x_3 is C] THEN y is $f(x_1, x_2, x_3)$ (3-20)

โดยที่ x_1, x_2, x_3, y คือตัวแปรภาษา

A,B และ C คือค่าเชิงภาษาของฟัซซีเซต

$f(x_1, x_2, x_3)$ คือฟังก์ชันเส้นตรงแกนสัมพันธ์แกน x_1, x_2, x_3

ฟังก์ชัน $f(x_1, x_2, x_3)$ที่นิยมใช้คือ ฟังก์ชันแบบจำลองฟัซซีของ Takagi-Sugeno อันดับศูนย์ (zero-order takagi-sugeno fuzzy model) โดยฟังก์ชันจะเป็นเพียงค่าคงที่เส้นตรงโทน (k) เท่านั้น ทำให้ $f(x_1, x_2, x_3)$ในรูปแบบกฎสมการที่ มีค่าเท่ากับ k

ในการอนุมานแบบ Takagi-Sugeno การทำดีฟัซซีเพื่อหาค่าผลลัพธ์เอาต์พุตของระบบควบคุม จะใช้วิธีที่เรียกว่าค่าน้ำหนักเฉลี่ย (weighted average หรือ WA) ซึ่งมีการคำนวณตามสมการที่ (3-21)

$$x_{WA} = \frac{\sum_{n=1}^{n} \mu(y_n) \times y_n}{\sum_{n=1}^{n} \mu(y_n)} \quad (3\text{-}21)$$

โดยที่ $\mu(y_n)$ คือค่าความเป็นสมาชิกของฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตตำแหน่งที่ n

y_n คือค่าคงที่ของเอาต์พุตที่เป็นเส้นตรงตำแหน่งที่ n

n คือเลขจำนวนจริง 1, 2, 3 ..., n

3.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือ โดยจะประกอบไปด้วยความรู้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์และความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับตรรกศาสตร์คลุมเครือการศึกษาและทำความเข้าใจในทฤษฎีดังกล่าวเพื่อใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน รวมทั้งเป็นพื้นฐานในการออกแบบตัวควบคุมและสร้างระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ ซึ่งนำไปสู่การสร้างระบบควบคุมการตามรอยจุดกาลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสและวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือ โดยรายละเอียดของวิธีดังกล่าวจะนำเสนอในบทต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส

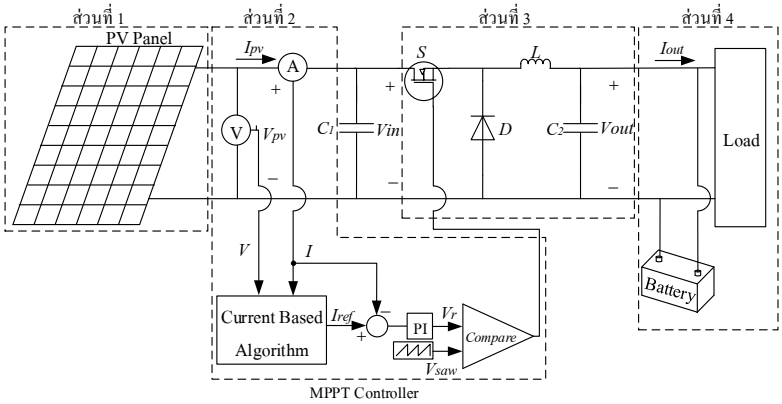
4.1 บทนำ

ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีรบกวนและสังเกตอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ในการหาจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ แต่ปัญหาของวิธีการนี้คือการกำหนดค่าวัฏจักรหน้าที่ (ΔD) ที่เหมาะสมกับระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุด ซึ่งถ้า ΔD มีค่ามากเกินไปจะทำให้ช่วงเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวรวดเร็ว แต่จะทำให้เกิดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะคงตัวและจะทำให้ไม่สามารถหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างถูกต้อง ในทางกลับกัน ถ้า ΔD มีค่าน้อยเกินไปจะทำให้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวช้า ดังนั้นเพื่อปรับปรุงปัญหาดังกล่าวและพัฒนาสมรรถนะของระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดให้ดียิ่งขึ้น ในบทนี้จึงได้นำเสนอระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส (current-based method) ซึ่งจะใช้การเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรงในการหาจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ สภาวะแวดล้อมขณะนั้น ทำให้สามารถควบคุมระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดได้ตามต้องการ เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายถึงหลักการทำงานของวิธีอิงกระแสในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB รวมทั้งอธิบายถึงการออกแบบ การสร้างและทดสอบชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ในส่วนต่าง ๆ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการเขียนโปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR พร้อมทั้งแสดงผลการทดสอบชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

ระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสมีส่วนประกอบ 4 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนที่ 2 ระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุด ส่วนที่ 3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ และในส่วนที่ 4 เนื่องจากเป็นระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระในส่วนนี้จึงพิจารณาเป็นแหล่งพลังงานสำรองแบตเตอรี่ ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 จากรูปดังกล่าวระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดในส่วนที่ 2 จะใช้อัลกอริธึมของวิธีอิงกระแสในการกำหนดจุดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์โดยการประยุกต์ใช้งานในการควบคุมวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์

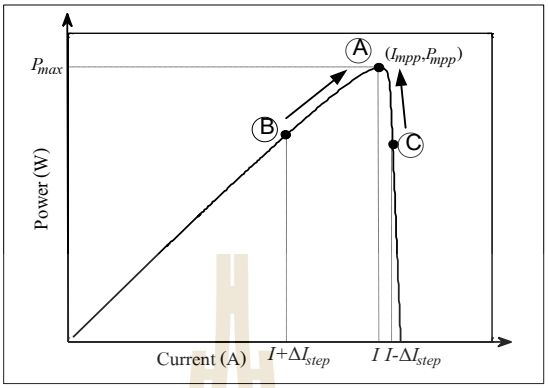


รูปที่ 4.1 ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส

หลักการทำงานของวิธีอิงกระแส

หลักการของวิธีอิงกระแสจะทำงานโดยมุ่งเน้นไปที่การควบคุมและปรับกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรง ซึ่งจะแตกต่างจากวิธีรบกวนและสังเกตที่พิจารณาการปรับแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ ทำให้พบปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดในสภาวะอยู่ตัว และจากงานวิจัยในอดีตพบว่าวิธีอิงกระแส [8] – [10] มักจะมีการใช้งานร่วมกับวงจรแปลงผันแบบบูสต์และมีขั้นตอนการตรวจสอบเงื่อนไขที่ประยุกต์ใช้มาจากวิธีเพิ่มค่าความนำหรือวิธีรบกวนและสังเกต ทั้งนี้ขั้นตอนการตรวจสอบเปรียบเทียบเงื่อนไขจะขึ้นอยู่กับการประยุกต์และเลือกใช้ของผู้ใช้งาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จะปรับปรุงปัญหาที่เกิดขึ้นในวิธีรบกวนและสังเกตและพัฒนาวิธีอิงกระแส เพื่อให้สามารถตามรอยจุดกำลังสูงสุดได้อย่างรวดเร็วเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมและลดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดในสภาวะอยู่ตัว โดยจะประยุกต์ใช้วิธีอิงกระแสให้สามารถทำงานร่วมกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์และมีขั้นตอนการตรวจสอบเงื่อนไขจากการพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า (ΔP) และค่าการเปลี่ยนแปลงกำลังและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์หรือค่าความชัน ($\Delta P / \Delta I$) ในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อนหน้าที่สามารถพิจารณาการตรวจสอบเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมเงื่อนไขต่าง ๆ ได้จากกราฟคุณลักษณะเฉพาะของกำลังและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (เส้นโค้ง P - I) จากนั้นจะทำการปรับเพิ่มหรือลดกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ โดยเมื่อค่าความผิดพลาดของกำลังและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อนหน้ามีค่าเข้าใกล้ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ (ε_s) จะกำหนดให้ค่ากระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่ การกำหนดและปรับกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าวจะทำให้มีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด ณ อุณหภูมิและความเข้มแสงขณะนั้นเพื่อให้จุดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่จุด

กำลังสูงสุดซึ่งจะมีผลทำให้สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ ทั้งนี้การพิจารณาการตรวจสอบเงื่อนไขของวิธีอิงกระแสในกรณีที่อุณหภูมิและปริมาณความเข้มแสงมีค่าคงที่ได้จากเส้นโค้ง P - I ได้ดังรูปที่ 4.2

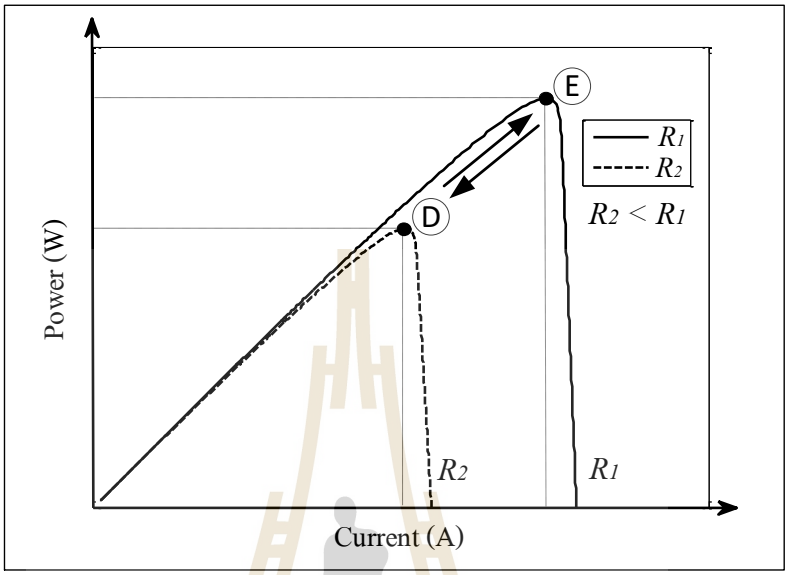


รูปที่ 4.2 คุณลักษณะเฉพาะกำลังและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับวิธีอิงกระแส

จากรูปที่ 4.2 เมื่ออุณหภูมิและปริมาณความเข้มแสงมีค่าคงที่จะสามารถพิจารณาจุดการทำงานทางด้านซ้ายและทางด้านขวาของจุดกำลังสูงสุดได้ดังนี้ ถ้าหากจุดการทำงานเริ่มต้นอยู่ที่จุด B ต้องการให้จุดการทำงานเปลี่ยนไปยังจุดกำลังสูงสุดที่จุด A ทำให้ทั้งค่าผลต่างของกำลังไฟฟ้า (ΔP) และกระแสไฟฟ้า (ΔI) ของเซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อนหน้ามีค่าเป็นบวก (+) จึงทำให้ $\Delta P > 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} \geq 0$ ดังนั้นเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดระบบจะต้องทำการเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดการทำงาน B จากค่า ΔI_{step} เป็นค่า ($I + \Delta I_{step}$) จนกระทั่ง $I = I_{mpp}$ และถ้าพิจารณาจุดการทำงานจากจุด C เปลี่ยนไปยังจุด A จะทำให้ค่าผลต่างของกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเป็นบวก ($+\Delta P$) ในขณะที่ค่าผลต่างของกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเป็นลบ (ΔI) มีผลทำให้ $\Delta P > 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} < 0$ เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ระบบจะต้องทำการลดค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะลดค่ากระแสไฟฟ้าที่จุดการทำงาน C ให้ $I - \Delta I_{step}$ จนกระทั่งมีค่า $I = I_{mpp}$ ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดจุด A

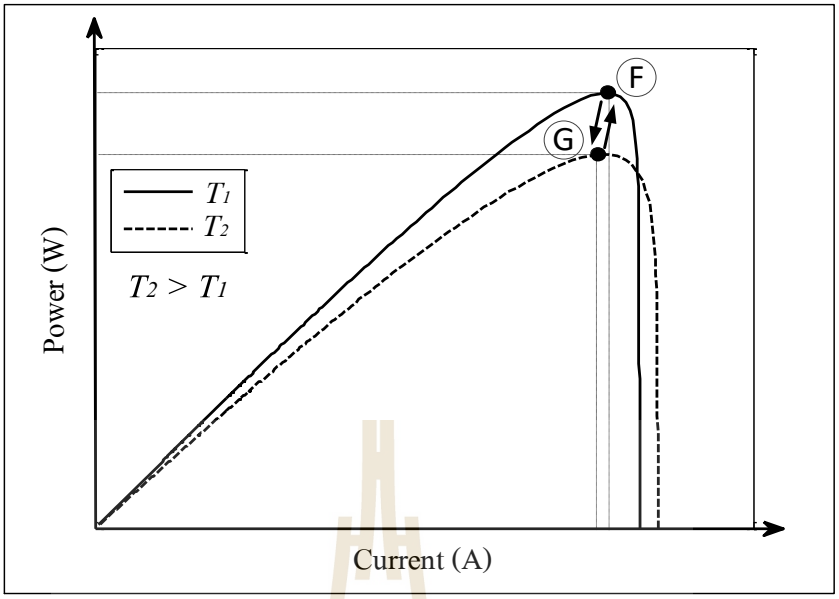
ในกรณีที่อุณหภูมิมีค่าคงที่แต่ปริมาณความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง จะสามารถพิจารณาได้จากเส้นโค้ง P - I ดังรูปที่ 4.3 โดยความเข้มแสงของ R_1 จะมีค่ามากกว่า R_2 มีผลทำให้กำลังไฟฟ้าของ R_1 มีค่ามากกว่า R_2 ซึ่งถ้าปริมาณความเข้มแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้น พิจารณาจากจุดการทำงานจุด D (จุด MPP ของความเข้มแสง R_2) ต้องการให้จุดการทำงานเปลี่ยนไปยังจุด E (จุด MPP ของความเข้มแสง R_1) จะทำให้ $\Delta P > 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} \geq 0$ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกเพิ่มค่าเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเข้มแสง R_1 ในทางตรงข้ามถ้าปริมาณความเข้มแสงมีค่าลดลง จากจุดการ

ทำงานจุด E ไปยังจุด D จะมีผลทำให้ $\Delta P < 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} \geq 0$ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกปรับลดค่าลงเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดเช่นกัน



รูปที่ 4.3 คุณลักษณะเฉพาะกำลังและกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง

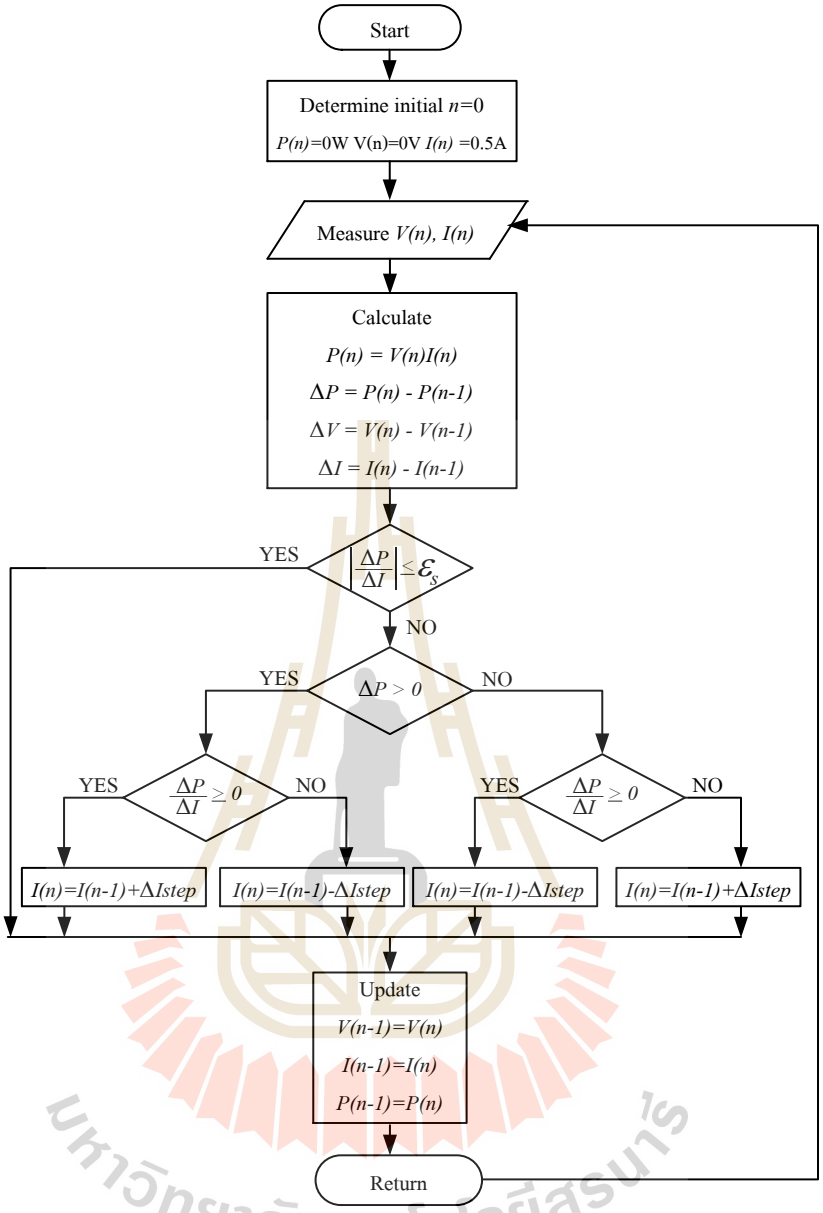
ส่วนกรณีที่ปริมาณความเข้มแสงมีค่าคงที่แต่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงจะพิจารณาเส้นโค้ง P - I ดังรูปที่ 4.4 จากรูปดังกล่าวอุณหภูมิของ T_2 มีค่ามากกว่า T_1 มีผลทำให้กำลังไฟฟ้าของ T_2 มีค่าน้อยกว่า T_1 ซึ่งถ้าอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นจุดการทำงานจุด F (จุด MPP ของอุณหภูมิ T_1) จะเปลี่ยนไปยังจุด G (จุด MPP ของอุณหภูมิ T_2) มีผลทำให้ $\Delta P < 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} \geq 0$ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกลดค่าลงเพื่อให้จุด MPP เปลี่ยนไปยังจุดใหม่และทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด แต่ถ้าหากอุณหภูมิมีค่าลดลงจะทำให้ $\Delta P > 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} \geq 0$ กระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกเพิ่มค่าจนกระทั่งมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุดเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 4.4 คุณลักษณะเฉพาะกำลังและกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

จากการพิจารณาจุดการทำงานในสภาวะแวดล้อมกรณีต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไปข้างต้น วิธีอิงกระแสจะสามารถหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้แม้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมอย่างรวดเร็ว และสามารถหากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างถูกต้องแต่ต้องอาศัยขั้นตอนการคำนวณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถนำมาเขียนแผนภาพลำดับการทำงานของการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสได้ดังรูปที่ 4.5

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.5 แผนภาพลำดับการทำงานของวิธีอิงกระแส

จากแผนภาพลำดับการทำงานของวิธีอิงกระแสในรูปที่ 4.5 ขั้นตอนแรกของการตามรอยจุดกำลังสูงสุดจะเริ่มจากการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับอัลกอริธึมโดยให้ค่า $P(0)$, $V(0)$ และ $I(0)$ มีค่าเท่ากับ 0 W, 0 V และ 0.5 A ตามลำดับ จากนั้นจะทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า $V(n)$ และกระแสไฟฟ้า $I(n)$ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากตัวตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้าแล้วนำมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้จากสมการ $P(n)=V(n)I(n)$ เพื่อที่จะนำไปใช้ในการตรวจสอบเงื่อนไข ซึ่งในที่นี้จะใช้การเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงกำลัง (ΔP) และกระแสไฟฟ้า (

ΔI) ในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อนหน้า โดยการตรวจสอบเงื่อนไขขั้นแรกจะใช้ $\frac{\Delta P}{\Delta I}$ เปรียบเทียบกับค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ ε_s ก่อน ถ้า $\frac{\Delta P}{\Delta I} \le \varepsilon_s$ นั่นคือสภาพแวดล้อมไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมากพอที่ยอมรับได้ อัลกอริธึมจะไม่เข้าสู่กระบวนการตรวจสอบเงื่อนไข แต่จะทำการอัพเดตค่ากำลังไฟฟ้า $P(n)$ แรงดันไฟฟ้า $V(n)$ และกระแสไฟฟ้า $I(n)$ ของเซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบันค่าเดิมที่ระบบกำหนดไว้เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณรอบต่อไป และอัลกอริธึมจะเริ่มต้นการทำงานใหม่อีกครั้งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม ในทางตรงข้าม ถ้า $\frac{\Delta P}{\Delta I} > \varepsilon_s$ อัลกอริธึมจะทำการเปรียบเทียบค่า ΔP และ $\frac{\Delta P}{\Delta I}$ ว่ามีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์หรือไม่ โดยจะทำการเปรียบเทียบค่า ΔP ก่อนแล้วถึงจะเปรียบเทียบค่า $\frac{\Delta P}{\Delta I}$ ซึ่งจะมีการตรวจสอบเงื่อนไขด้วยกันทั้งหมด 4 เงื่อนไขดังนี้

เงื่อนไขที่ 1: ถ้า $\Delta P > 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} \ge 0$ อัลกอริธึมจะทำการปรับค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ $I(n) = I(n-1) + \Delta I_{step}$

เงื่อนไขที่ 2: ถ้า $\Delta P > 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} < 0$ อัลกอริธึมจะทำการปรับค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ $I(n) = I(n-1) - \Delta I_{step}$

เงื่อนไขที่ 3: ถ้า $\Delta P < 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} \ge 0$ อัลกอริธึมจะทำการปรับค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ $I(n) = I(n-1) - \Delta I_{step}$

เงื่อนไขที่ 4: ถ้า $\Delta P < 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} < 0$ อัลกอริธึมจะทำการปรับค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ $I(n) = I(n-1) + \Delta I_{step}$

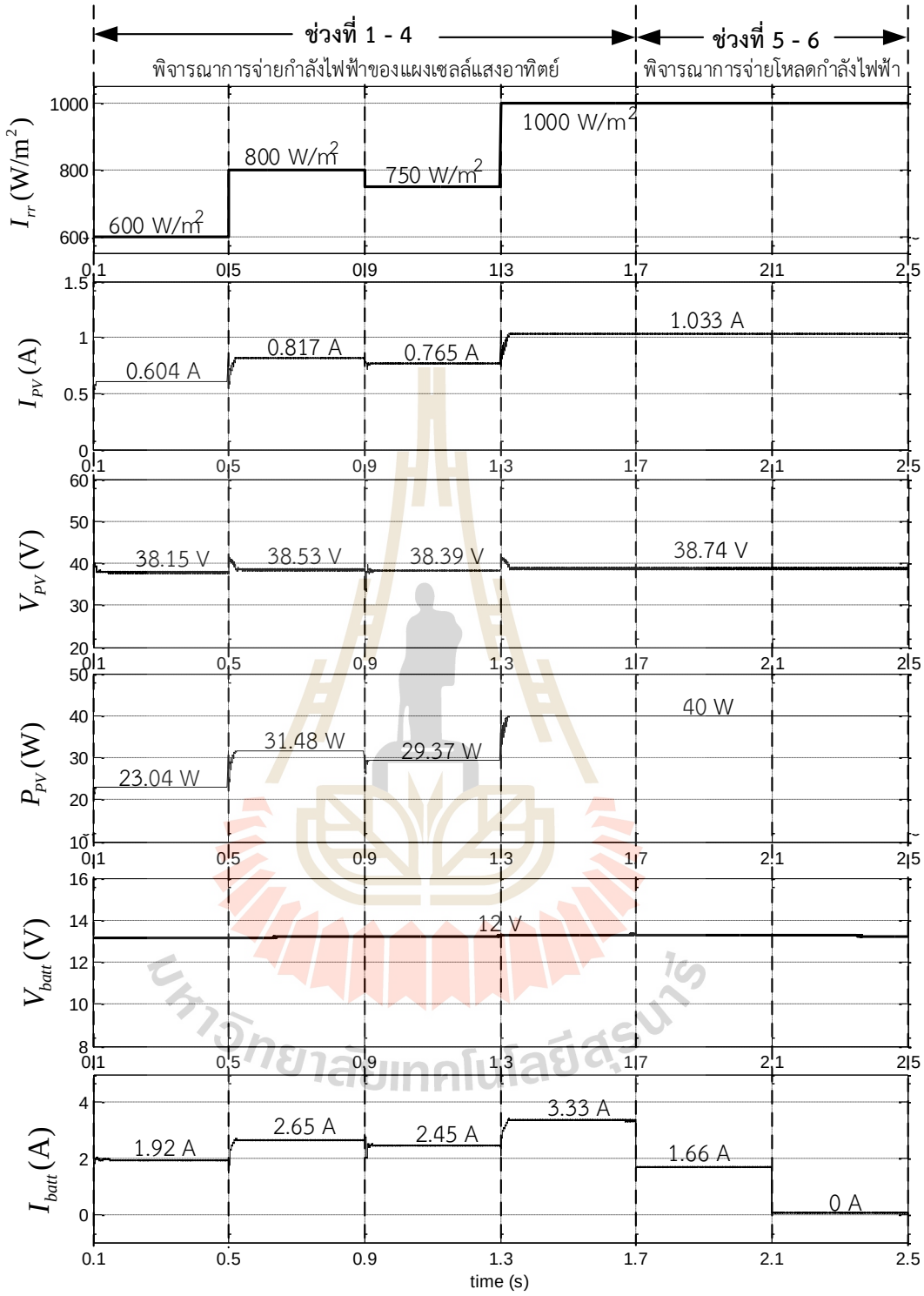
เมื่ออัลกอริธึมเข้าสู่เงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่งข้างต้นระบบจะทำการปรับเพิ่มลดค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ตามเงื่อนไขที่ได้ ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าในคาบเวลาปัจจุบัน $I(n)$ ที่ถูกปรับเพิ่มลดค่าดังแสดงในรูปที่ 4.5 นั้นคือค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิง I_{ref} ที่ทำให้ได้กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุดดังที่พิจารณาในรูปที่ 4.1 จากนั้นอัลกอริธึมจะทำการอัพเดตค่า $P(n-1)$, $V(n-1)$ และ $I(n-1)$ ที่ได้ใหม่พร้อมทั้งเริ่มต้นการทำงานอัลกอริธึมใหม่อีกครั้ง โดยในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้ค่าความผิดพลาด ε_s และค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้า ΔI_{step} สำหรับการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ที่เหมาะสมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 W มีค่า $\varepsilon_s = 10$ และ $\Delta I_{step} = 0.001$ และในส่วนของชุดทดสอบฮาร์ดแวร์จะกำหนดให้มีค่า $\varepsilon_s = 50$ และ $\Delta I_{step} = 0.3$ ซึ่งค่าดังกล่าวได้จากการทดสอบชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ในหัวข้อที่ 4.6

4.3 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

การจากการวิเคราะห์หลักการทำงานของวิธีอิงกระแสข้างต้นเพื่อยืนยันว่าวิธีอิงกระแสสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ได้ รวมทั้งสามารถตามรอยจุดกำลังสูงสุดได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม หัวข้อนี้จึงได้นำเสนอการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของระบบในรูปที่ 4.1 ซึ่งจะอาศัยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ในการจำลองสถานการณ์รายละเอียดชุดบล็อกสำหรับการจำลองสถานการณ์แสดงได้ในภาคผนวก ก. โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าในส่วนต่าง ๆ ที่พิจารณาในการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 4.1

พารามิเตอร์แผงเซลล์แสงอาทิตย์	**ค่า**	**รายละเอียด**
V_{mpp}	38.73 V	แรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด
I_{mpp}	1.033 A	กระแสที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด
V_{oc}	43.125 V	แรงดันเปิดวงจร
I_{sc}	1.1 A	กระแสลัดวงจร
P_{max}	40 W	กำลังไฟฟ้าสูงสุด
พารามิเตอร์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์	**ค่า**	**รายละเอียด**
C_1	100 μF	ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุตัวที่ 1
C_2	1000 μF	ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุตัวที่ 2
L	10 mH	ความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ
f_{sw}	10 kHz	ความถี่ในการสวิตช์
V_{batt}	12 V	แรงดันเอาต์พุต



รูปที่ 4.6 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของวิธีอิงกระแส

การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระดังรูปที่ 4.1 จะใช้สมการทางคณิตศาสตร์สมการที่ (3-1) ถึง (3-6) ในการสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์โดยจะสามารถป้อนค่าความเข้มแสง (W/m^2) และอุณหภูมิ (^{o}C หรือ kevin) ให้แก่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้ค่าความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง แต่กำหนดให้อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่ที่ 25 ^{o}C ทุกค่าความเข้มแสง ทั้งนี้ระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสจะทำการวัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าเข้าสู่อัลกอริธึมเพื่อคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าพร้อมทั้งตรวจสอบเงื่อนไขและทำการปรับค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นไปตามเงื่อนไขโดยกระแสไฟฟ้าที่ได้จะถูกกำหนดเป็นกระแสไฟฟ้าอ้างอิงเพื่อนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในการหาค่าความผิดพลาดผ่านตัวควบคุมพีไอ ตัวควบคุมพีไอดังกล่าวจะส่งสัญญาณแรงดันอ้างอิงในการเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อยซึ่งจะทำให้ได้สัญญาณพัลส์สำหรับนำไปขับสวิตช์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์โดยจะทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเข้มแสงและอุณหภูมิขณะนั้น สำหรับการจำลองสถานการณ์จะแบ่งสัญญาณความเข้มแสงออกเป็น 6 ช่วงด้วยกันคือช่วงที่ 1 ถึง 4 กำหนดให้ความเข้มแสงมีค่าเปลี่ยนแปลงแบบสัญญาณขั้นบันไดที่ไม่มีการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า (power load) และในช่วงที่ 5 ถึง 6 ความเข้มแสงมีค่าคงที่ แต่มีการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได โดยการจำลองสถานการณ์จะทำการวัดค่า I_{PV}, V_{PV}, P_{PV}, V_{batt} และ I_{batt} ซึ่งสามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของวิธีอิงกระแสได้ดังรูปที่ 4.6

ช่วงที่ 1 - 4: เมื่อความเข้มแสงมีลักษณะเป็นสัญญาณขั้นบันไดและไม่มีการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า

พิจารณาจากรูปที่ 4.6 ช่วงที่ 1 ถึง 4 มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงแบบสัญญาณขั้นบันไดหรือแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงเป็น 600, 800, 750 และ 1000 W/m^2 ตามลำดับ ผลการจำลองสถานการณ์พบว่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ I_{PV} จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเข้มแสง ซึ่งกระแสไฟฟ้า I_{PV} ที่ได้จะมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด I_{mpp} ทำให้ในแต่ละความเข้มแสงสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่จ่ายออกมาจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ โดยที่ความเข้มแสง 600 W/m^2 มี I_{PV} = 0.604A, P_{PV} = 23.04W, ความเข้มแสง 800 W/m^2 มี I_{PV} =0.817A P_{PV} =31.48W, ความเข้มแสง 750 W/m^2 มี I_{PV} =0.765A P_{PV} =29.37W และที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 มี I_{PV} =1.033A P_{PV} =40W ซึ่งในผลการจำลองสถานการณ์ทั้ง 4 ช่วงนี้ไม่มีการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า ทำให้กระแสไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ ณ ความเข้มแสงขณะนั้นจะไม่มีการแบ่งจ่ายให้โหลดแต่จะจ่ายเก็บเข้าสู่แบตเตอรี่ทั้งหมด

ช่วงที่ 5: เมื่อความเข้มแสงมีค่าเท่ากับ 1000 W/m^2 และมีการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า 20 W

พิจารณาจากรูปที่ 4.6 เมื่อความเข้มแสงมีค่าเท่ากับ 1000 W/m^2 เซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 40 W ซึ่งจะมีผลทำให้สามารถเก็บกระแสไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ได้สูงสุด 3.33 A แต่เนื่องจากมีการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า 20 W ซึ่งมีขนาดครึ่งหนึ่งของกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้สูงสุด 3.33 A จะมีการแบ่งจ่ายให้กับโหลด I_{load} =1.665 A และเก็บกระแสไฟฟ้าที่เหลือเข้าสู่แบตเตอรี่ I_{batt} =1.665 A

ช่วงที่ 6: เมื่อความเข้มแสงมีค่าเท่ากับ 1000 W/m^2 และมีการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า 40 W

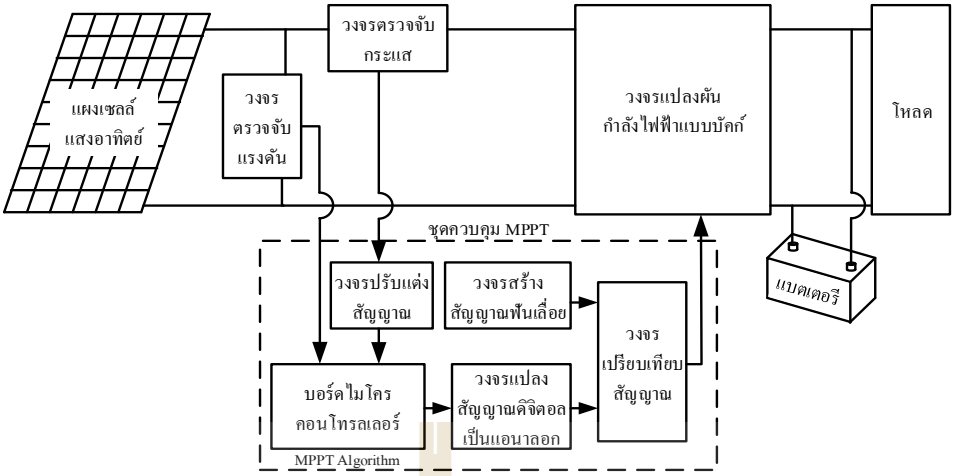
พิจารณาจากรูปที่ 4.6 เมื่อมีการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า 40 W เท่ากับกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ 40 W กระแสไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ทั้งหมดจะทำการจ่ายให้กับโหลดทั้งหมดโดยไม่มีการจ่ายเก็บเข้าสู่แบตเตอรี่ ผลการจำลองสถานการณ์ทั้ง 6 ช่วงที่ได้นำเสนอในรูปที่ 4.6 สังเกตได้ว่าระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ปริมาณความเข้มแสงต่าง ๆ และสามารถตามรอยจุดกำลังสูงสุดได้เมื่อปริมาณความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง โดยจะเห็นได้ว่าถ้าปริมาณความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงตามปริมาณความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลง ทำให้สามารถติดตามกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงและทำให้ได้กำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด อย่างไรก็ตามถ้าไม่มีการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้จะถูกเก็บเข้าสู่แบตเตอรี่ ในทางตรงกันข้ามถ้ามีการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จะถูกแบ่งเพื่อไปจ่ายให้กับโหลดและส่วนที่เหลือจะถูกเก็บไว้ที่แบตเตอรี่

4.4 การสร้างชุดทดสอบฮาร์ดแวร์

4.4.1 ภาพรวมอุปกรณ์ของระบบ

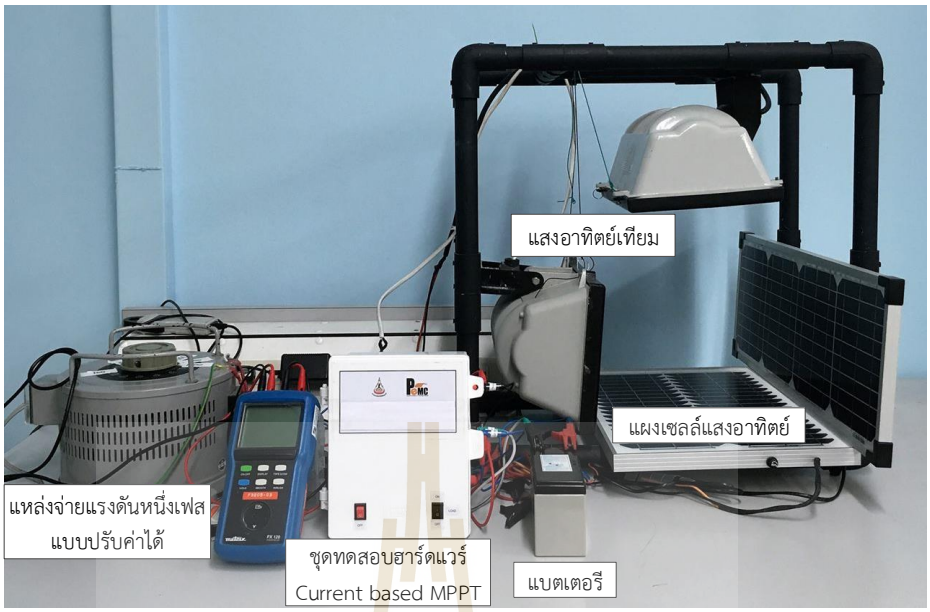
เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์และแสดงให้เห็นว่าวิธีอิงกระแสที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถสร้างใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ จึงได้มีการสร้างชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ โดยมีโครงสร้างชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ของระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสแสดงได้ดังรูปที่ 4.7

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

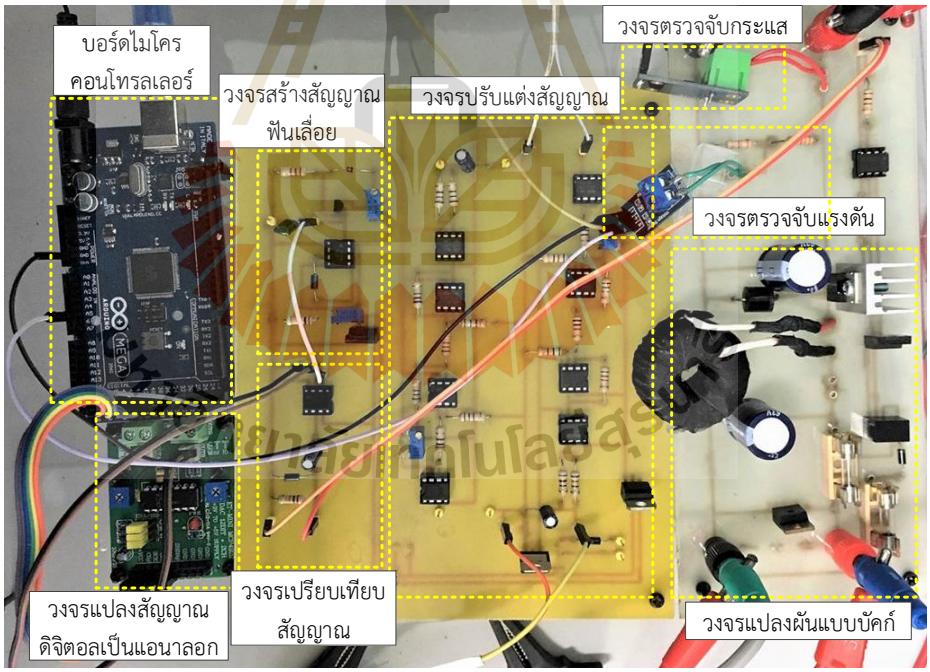


รูปที่ 4.7 โครงสร้างชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ของระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุด

หลักการทำงานของระบบดังกล่าวประกอบไปด้วย วงจรตรวจจับแรงดันและวงจรตรวจจับกระแสทำหน้าที่วัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ป้อนค่าให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ในชุดควบคุม MPPT เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหากำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งชุดควบคุม MPPT สามารถปรับโปรแกรมหรืออัลกอริธึมในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ได้เมื่อต้องการเปลี่ยนวิธีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด สำหรับวิธีอิงกระแสบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะคำนวณหากำลังไฟฟ้าสูงสุด พร้อมทั้งตรวจสอบเงื่อนไขและกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิง I_{ref} เพื่อนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ การเปรียบเทียบจะทำให้ได้ค่าความผิดพลาดที่ผ่านตัวควบคุมพีไอแล้วได้ค่าแรงดันอ้างอิง v_r โดยค่าแรงดันอ้างอิงที่ได้นี้จะถูกส่งออกจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอกเพื่อนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกับวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยที่สร้างขึ้นโดยอาศัยวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ จากนั้นจะได้สัญญาณพัลส์ที่ผ่านวงจรแยกโดดสัญญาณสำหรับนำไปใช้ขับสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ ซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดและทำให้สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดออกมาใช้งานได้ การทำงานของระบบควบคุมดังกล่าวในข้างต้น ทำให้สามารถควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระได้ตามต้องการ โดยภาพรวมของระบบฮาร์ดแวร์ชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่ใช้งานจริงแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 และส่วนประกอบของชุดควบคุมในชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งในหัวข้อถัดไปจะอธิบายถึงหลักการทำงาน การออกแบบ การสร้างและทดสอบวงจรควบคุมในส่วนต่าง ๆ พร้อมทั้งแสดงผลการทดสอบที่ได้จากชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้น



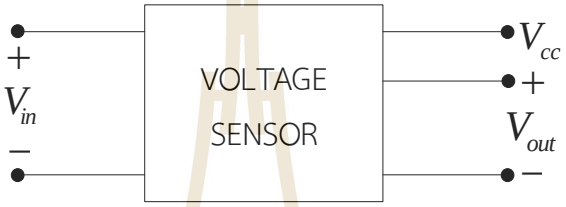
รูปที่ 4.8 ระบบฮาร์ดแวร์ชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส



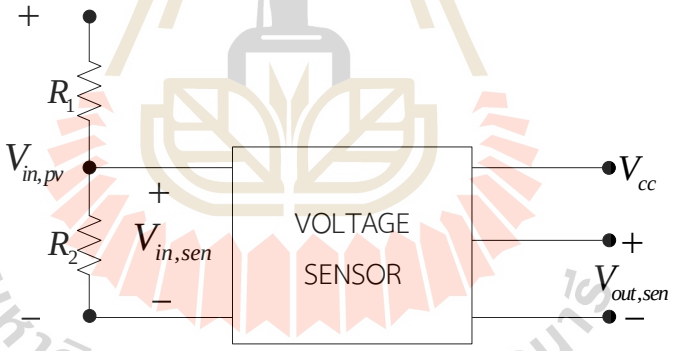
รูปที่ 4.9 ชุดควบคุมในชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุด

4.4.2 วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า

ชุดควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดมีวงจรตรวจจับแรงดันทำหน้าที่วัดค่าแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยในงานวิจัยจะเลือกใช้ตัวตรวจจับแรงดัน Arduino Standard Voltage Sensor Module พิกัด0 - 24 V ซึ่งมีโครงสร้างของตัวตรวจจับแรงดันแสดงดังรูปที่ 4.10 แต่เนื่องจากค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีค่าเท่ากับ 43 V จึงมีความจำเป็นจะต้องนำเอาวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้งานร่วมกับตัวตรวจจับแรงดันซึ่งจะทำให้วงจรตรวจจับแรงดันมีโครงสร้างดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 โครงสร้างของตัวตรวจจับแรงดัน



รูปที่ 4.11 โครงสร้างของวงจรตรวจจับแรงดัน

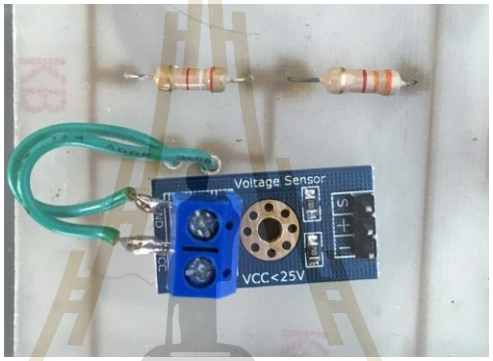
การออกแบบวงจรตรวจจับแรงดันสามารถออกแบบค่าตัวต้านทานและคำนวณหาค่าแรงดันของวงจรแบ่งแรงดันได้ดังสมการที่ (4-1)

$$V_{in,sen} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in,pv} \tag{4-1}$$

โดยที่ $V_{in,sen}$ คือแรงดันอินพุตของตัวตรวจจับแรงดัน (V)

$V_{in,pv}$ คือแรงดันอินพุตของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (V)

การออกแบบวงจรตรวจจับแรงดันในงานวิจัยจะกำหนดให้ค่าตัวต้านทานในวงจร R_1 = 3.3 kΩ และ R_2 = 3.9 kΩ และเนื่องจากวงจรตรวจจับแรงดันจะให้แรงดันเอาต์พุตที่สามารถอ่านค่าได้ที่ 0 - 5 V ดังนั้นจึงจำเป็นต้องดำเนินการทดสอบวงจรเพื่อหาความสัมพันธ์ของแรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจับแรงดันและแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริงในรูปที่ 4.12 จะดำเนินการทดสอบด้วยการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรตรวจจับแรงดันที่ระดับแรงดันค่าต่าง ๆ จากนั้นจะทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของวงจรตรวจจับแรงดันที่ทำการทดสอบ ผลการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันแสดงได้ดังตารางที่ 4.2

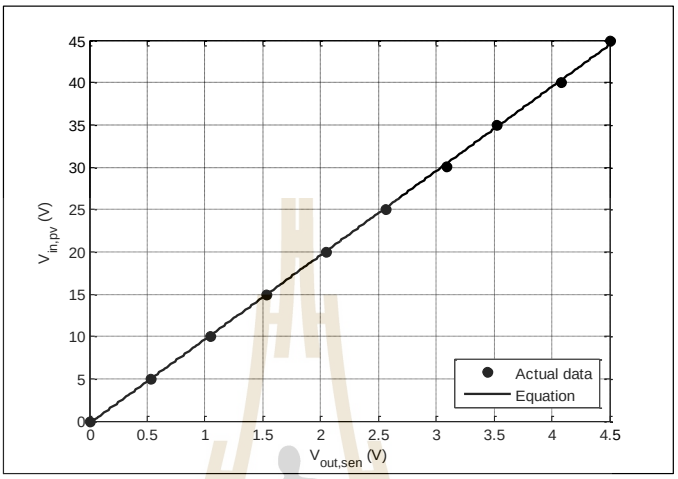


รูปที่ 4.12 วงจรตรวจจับแรงดันที่ใช้งานจริง

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดัน

$V_{in,pv}$ (V)	$V_{out,sen}$ (V)
0.00	0.000
5.00	0.529
10.00	1.044
15.00	1.536
20.00	2.052
25.00	2.567
30.00	3.088
35.00	3.521
40.00	4.083
45.00	4.501

จากตารางที่ 4.2 นำผลการทดสอบวงจรตรวจจับแรงดันมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจับแรงดัน และแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แสดงได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจับแรงดัน และแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากกราฟรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจับแรงดัน และแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะเป็นเชิงเส้น สามารถหาฟังก์ชันของกราฟโดยใช้คำสั่ง “polyfit” ในโปรแกรม MATLABได้ดังสมการที่ (4-2)

$$V_{in,pv} = 9.943V_{out,sen} - 0.2898 \qquad (4\text{-}2)$$

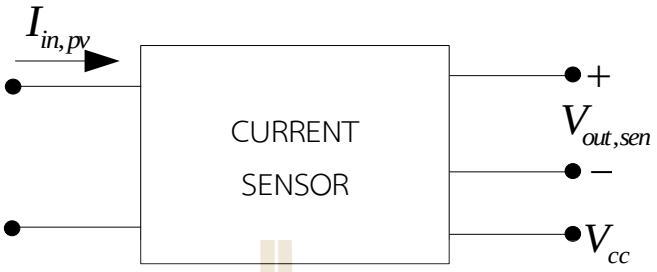
โดยที่ $V_{out,sen}$ คือแรงดันเอาต์พุตของวงจรตรวจจับแรงดัน (V)

ผลการทดสอบหาค่าความสัมพันธ์แรงดันของวงจรตรวจจับแรงดันจะเห็นได้ว่าสมการที่ (4-2) เป็นสมการความสัมพันธ์ที่ใช้คำนวณเพื่อแปลงแรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าให้เป็นแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อใช้ในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

4.4.3 วงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้า

วงจรตรวจจับกระแสทำหน้าที่วัดกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ Arduino Current Sensor Module พิกัด 5 A ซึ่ง

เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยไอซี ACS712-05 มาใช้เป็นตัวเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดันและมีการทำงานด้วยวิธีการวัดแบบ Hall Effect Sensor สามารถแสดงโครงสร้างของตัวตรวจจับกระแสได้ดังรูปที่ 4.14

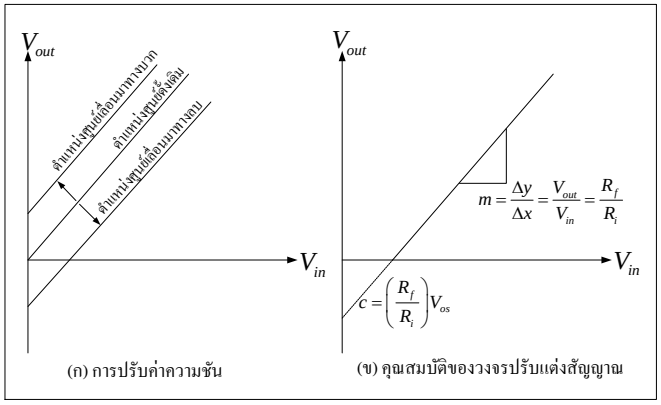


รูปที่ 4.14 โครงสร้างตัวตรวจจับกระแส

ตัวตรวจจับกระแสที่เลือกใช้งานในรูปที่ 4.14 สามารถวัดกระแสได้ทั้งกระแส AC และ DC หรือในย่าน -5 ถึง +5 A แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้จะใช้วัดกระแสในช่วง 0 ถึง 5 A ทั้งยังเมื่อจ่ายไฟเลี้ยง $+V_{cc}$ ให้กับตัวตรวจจับกระแส แรงดันเอาต์พุตปกติที่ได้จะอยู่ที่ประมาณครึ่งหนึ่งของแหล่งจ่ายขณะที่ยังไม่มีกระแสไหลผ่านตัวตรวจจับกระแส นั่นคือถ้าจ่ายไฟเลี้ยง 5 V ให้กับตัวตรวจจับกระแสขณะที่ยังไม่มีกระแสไหลผ่าน แรงดันเอาต์พุตปกติจะได้เท่ากับ 2.5 V แต่เนื่องจากต้องการส่งผ่านสัญญาณไฟฟ้านี้ไปเป็นสัญญาณดิจิตอลเข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ 0 ถึง 5 V ปัญหาคือย่านการวัดกระแสของตัวตรวจจับไม่เหมาะสมและระดับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตไม่สอดคล้องกับแรงดันไฟฟ้าอินพุต ดังนั้นจึงมีการแก้ไขปัญหาเหล่านี้ด้วยวงจรปรับค่าความชัน (slope) และปรับตำแหน่งศูนย์ (zero) หรือเรียกอีกอย่างว่าวงจรปรับแต่งสัญญาณ (signal-conditioner) มาใช้เพื่อปรับช่วงขนาดของกระแสที่ได้จากตัวตรวจจับกระแสให้เป็นไปตามที่ต้องการก่อนที่จะป้อนค่าเข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งวงจรปรับแต่งสัญญาณจะมีหลักการทำงานและการออกแบบ รวมไปถึงการทดสอบวงจรตรวจจับกระแสดังนี้

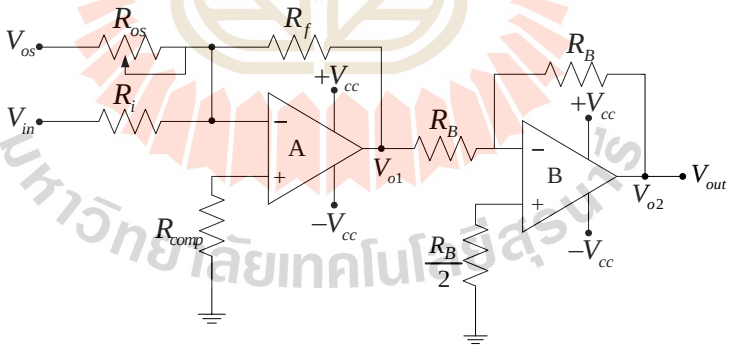
การออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณ (signal conditioner circuit)

วงจรปรับแต่งสัญญาณเป็นวงจรที่ทำหน้าที่ในการปรับค่าความชันและปรับตำแหน่งศูนย์ ซึ่งจะนำมาใช้ปรับแต่งสัญญาณระหว่างสัญญาณอินพุตกับเอาต์พุตให้มีความสัมพันธ์เป็นไปตามเงื่อนไขที่ต้องการ โดยจะพิจารณาการปรับค่าความชันและคุณสมบัติของวงจรได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต V_{out} และแรงดันอินพุต V_{in} แสดงดังรูปที่ 4.15 [20]



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{out} และ V_{in}

จากรูปที่ 4.15 เป็นกราฟเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตต่ำสุด $V_{in(\min)}$ และสูงสุด $V_{in(\max)}$ เปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตค่าต่ำสุด $V_{out(\min)}$ และแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด $V_{out(\max)}$ ซึ่งจะทำการปรับตำแหน่งศูนย์ด้วยการเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าอินพุตเป็นค่าย่านแรงดันเอาต์พุตตามที่ต้องการ โดยกราฟจะมีความสัมพันธ์กันเป็นกราฟแบบที่มีความชันเป็นบวกคือถ้าแรงดันไฟฟ้าอินพุตมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงจะทำให้แรงดันเอาต์พุตเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างเป็นสัดส่วน กราฟความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณแสดงได้ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 การออกแบบวงจรปรับแต่งสัญญาณ

การทำงานของวงจรปรับแต่งสัญญาณนั้นจะใช้งานร่วมกับวงจรรวมสัญญาณแบบกลับเฟส (inverting summer: A) และวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (inverting amplifier: B) ซึ่งมีอัตราขยายเท่ากับ -1 โดยการทำงานแรงดัน V_{in} จะถูกป้อนให้ออปแอมป์ A ทำให้มีอัตราการขยาย $-R_f / R_i$ และแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง $V_{os} = \pm V$ เป็นแรงดันไฟฟ้าอินพุตอีกค่าหนึ่งที่จะถูกป้อน

ให้กับออปแอมป์ A มีอัตราการขยายเท่ากับ $-R_f / R_{os}$ ดังนั้นจากรูปที่ 4.16 แรงดันเอาต์พุตของออปแอมป์ A จะมีค่าเท่ากับ

$$V_{o1} = -\left(\frac{R_f}{R_i}V_{in} + \frac{R_f}{R_{os}}V_{os}\right) \tag{4-3}$$

จากนั้นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จาก A จะถูกป้อนให้เป็นสัญญาณอินพุตให้กับ B ซึ่งต่อเป็นวงจรขยายที่มีอัตราขยายเท่ากับ -1 ทำให้แรงดันเอาต์พุตของ B มีค่าเท่ากับ

$$V_{out} = V_{o2} = (-1)V_{o1} = \left(\frac{R_f}{R_i}V_{in} + \frac{R_f}{R_{os}}V_{os}\right) \tag{4-4}$$

จากคุณสมบัติของกราฟและสมการความสัมพันธ์ระหว่าง V_{out} กับ V_{in} ของวงจรที่ได้เมื่อเทียบสมการที่ (4-4) กับสมการที่อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงในสมการที่ (4-5)

$$y = mx + c \tag{4-5}$$

จะได้

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{V_{out(\max)} - V_{out(\min)}}{V_{in(\max)} - V_{in(\min)}} \tag{4-6}$$

และ

$$c = \frac{R_f}{R_{os}}V_{os} \tag{4-7}$$

โดยที่ m คือความชันของกราฟหรืออัตราขยาย

c คือจุดตัดแกน y ของกราฟหรือตำแหน่งศูนย์

จากสมการข้างต้นสามารถออกแบบและคำนวณหาค่าความต้านทานค่าต่าง ๆ ของวงจรปรับแต่งสัญญาณได้ดังนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขั้นตอนที่ 1: คำนวณหาค่าความชัน โดยคุณสมบัติของตัวตรวจจับกระแสที่เลือกใช้แรงดันเอาต์พุตเริ่มต้นที่กระแส 0 A จะอยู่ที่ 2.507 V และแรงดันเอาต์พุตสูงสุดที่กระแส 5 A อยู่ที่ 3.456 V ในการออกแบบวงจรต้องการให้แรงดันเอาต์พุตของวงจรปรับแต่งสัญญาณที่กระแส 0-5A มีค่าเท่ากับ 0-5 V ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาค่าความชันได้จากสมการที่ (4-6) ดังนี้

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{V_{out(\max)} - V_{out(\min)}}{V_{in(\max)} - V_{in(\min)}} = \frac{5-0}{3.456-2.507} = 5.2687$$

$$m = \frac{R_f}{R_i} = 5.2687$$

ถ้าเลือก $R_f = 1000\Omega$ จะได้ $R_i = 200\Omega$

ขั้นตอนที่ 2: คำนวณหาค่าจุดตัดแกนหรือตำแหน่งศูนย์

จาก $y = mx + c$

$$V_{out(\min)} = mV_{in(\min)} + c$$

เมื่อ $V_{out(\min)} = 0$, $V_{in(\min)} = 2.507$ และ $m = 5.2687$
จะได้

$$0 = 5.2687(2.507) + c$$

จะได้ $c = -13.2$
และจากสมการที่ (4-7) สามารถคำนวณหาค่า R_{os} โดยกำหนดให้ $V_{os} = -12\text{V}$ จะได้ว่า

$$R_{os} = \frac{R_f}{c} V_{os} = \frac{1000}{-13.2}(-12) = 909\Omega$$

ดังนั้นจะเลือกใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ $R_{os} = 5k\Omega$ เพื่อที่จะสามารถปรับตำแหน่งศูนย์ได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

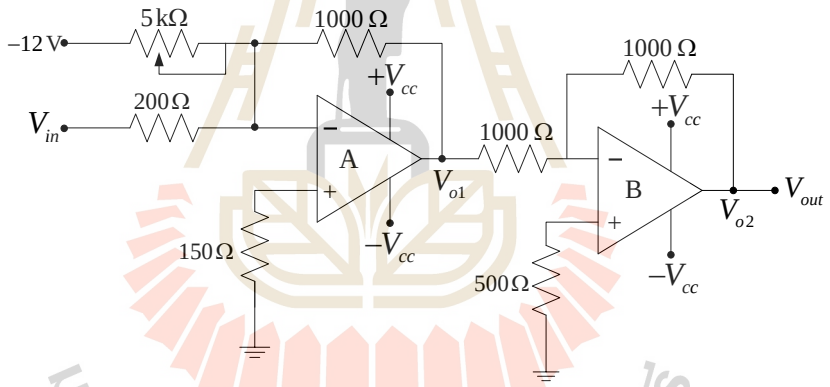
ขั้นตอนที่ 3: คำนวณหาค่าตัวต้านทาน R_{comp} จากรูปที่ 4.17 จะทำให้

$$R_{comp} = R_f \,//\, R_i \,//\, R_{os}$$

ดังนั้น $R_{comp} = 1000 // 200 // 909$

จะได้ $R_{comp} = 141\Omega$ จึงเลือกใช้ $R_{comp} = 150\Omega$

จากการออกแบบคำนวณหาค่าตัวต้านทานของวงจรปรับแต่งสัญญาณข้างต้นจะได้ R_f =1000 Ω, R_i =200 Ω, R_{os} =5 kΩ และ R_{comp} =150 Ω นอกจากนี้ในส่วนของวงจรกลับเฟสออปแอมป์ B จะกำหนดให้ค่าความต้านทาน R_B มีค่าเท่ากับ 1000 Ω ซึ่งสามารถแสดงวงจรปรับแต่งสัญญาณที่ได้จากการออกแบบและวงจรปรับแต่งสัญญาณที่ใช้งานจริงได้ดังรูปที่ 4.17

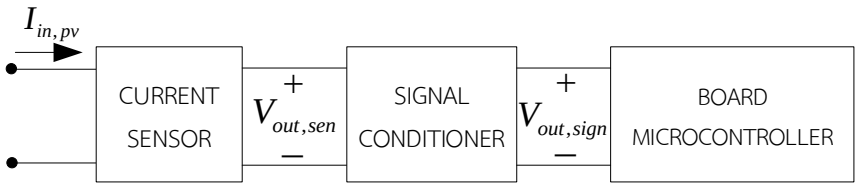


รูปที่ 4.17 วงจรปรับแต่งสัญญาณที่ได้จากการออกแบบ

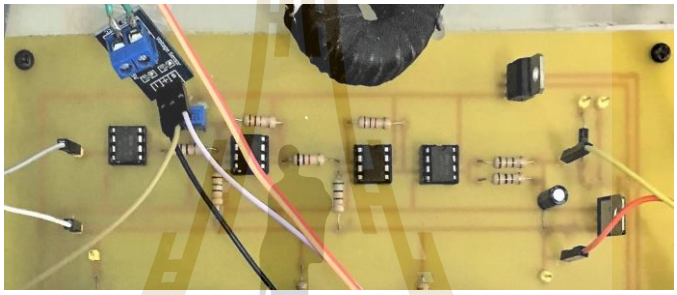
การทดสอบวงจรตรวจจับกระแส

วงจรตรวจจับกระแสประกอบไปด้วยตัวตรวจจับกระแสและวงจรปรับแต่งสัญญาณ แสดงโครงสร้างได้ดังรูปที่ 4.18 ตัวตรวจจับกระแสดังกล่าวจะทำการวัดกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดันเพื่อส่งค่าให้กับวงจรปรับแต่งสัญญาณ จากนั้นวงจรปรับแต่งสัญญาณจะทำการปรับช่วงขนาดของสัญญาณแรงดันอินพุตที่รับเข้ามาให้เหมาะสมกับแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการก่อนส่งค่าไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังนั้นจึงดำเนินการทดสอบวงจรตรวจจับกระแสเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์กับแรงดันที่วัดได้จาก

วงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้า โดยการทดสอบวงจรตรวจจับกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริง ในรูปที่ 4.19 มีผลการทดสอบวงจรตรวจจับกระแสแสดงดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.18 โครงสร้างวงจรตรวจจับกระแส



รูปที่ 4.19 วงจรตรวจจับกระแสที่ใช้งานจริง

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบวงจรตรวจจับกระแส

$I_{in,pv}$ (A)	$V_{out,sign}$ (V)
0.000	0.0041
0.115	0.1184
0.206	0.1997
0.317	0.3017
0.424	0.3989
0.511	0.4792
0.623	0.5783
0.732	0.6768
0.816	0.7503
0.953	0.8615
1.001	0.9086

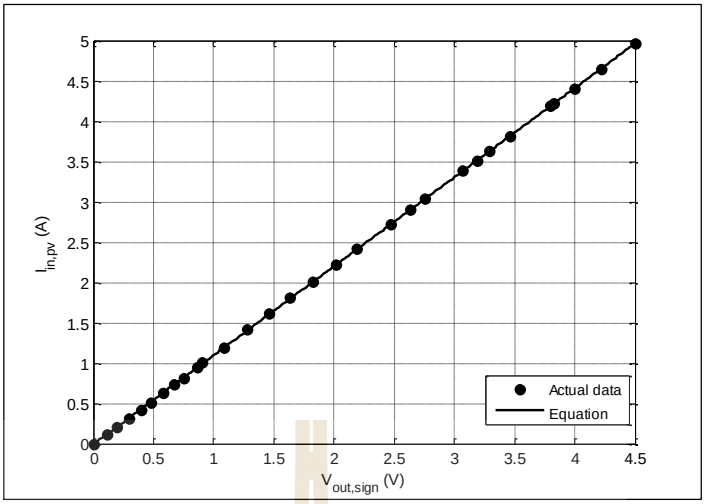
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบวงจรตรวจจับกระแส (ต่อ)

$I_{in,pv}$ (A)	$V_{out,sign}$ (V)
1.195	1.0862
1.413	1.2807
1.610	1.4562
1.805	1.6352
2.012	1.8225
2.223	2.0144
2.419	2.1862
2.726	2.4682
2.907	2.6336
3.039	2.7532
3.386	3.0665
3.515	3.1871
3.631	3.2965
3.813	3.4607
4.184	3.7956
4.214	3.8312
4.403	3.9988
4.648	4.2251
4.956	4.5054

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากตารางที่ 4.3 นำผลการทดสอบวงจรตรวจจับกระแสมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจับแรงดัน และกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แสดงได้ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจับกระแสและกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากกราฟรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจับแรงดัน และกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะเป็นเชิงเส้น สามารถหาฟังก์ชันของกราฟโดยใช้คำสั่ง “polyfit” ในโปรแกรม MATLABได้ดังสมการที่ (4-8)

$$I_{in,pv} = 1.1044 V_{out,sign} - 0.0079 \quad (4\text{-}8)$$

โดยที่ $I_{in,pv}$ คือกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (A)

$V_{out,sign}$ คือแรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจับกระแส

ผลการทดสอบหาค่าความสัมพันธ์แรงดันของวงจรตรวจจับกระแสจะเห็นได้ว่าสมการที่ (4-8) เป็นสมการความสัมพันธ์ที่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ใช้คำนวณเพื่อแปลงแรงดันที่วัดได้จากวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าให้เป็นกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

4.4.4 การเขียนโปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR

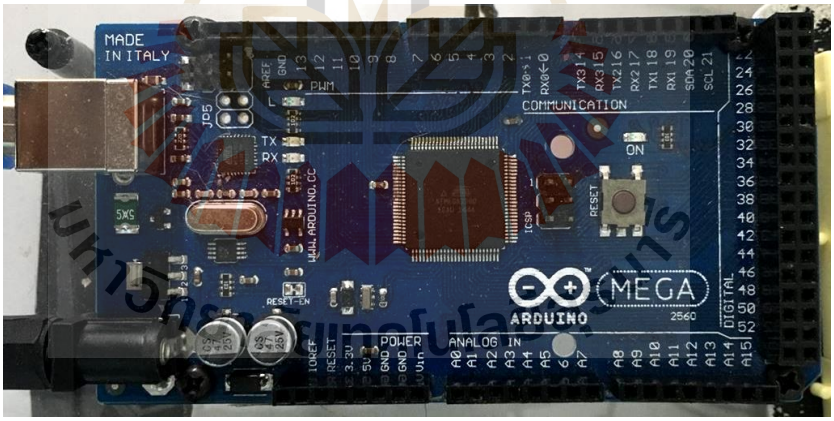
ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสจะกำหนดจุดการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้อยู่ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยการเพิ่มลดกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะอาศัยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในการคำนวณหากำลังไฟฟ้าสูงสุด พร้อมทั้งกำหนดกระแสไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อ้างอิงผ่านตัวควบคุมพีไอก่อนที่จะส่งสัญญาณควบคุมแรงดันอ้างอิงให้กับวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอก เพื่อนำไปใช้ในการเปรียบเทียบสัญญาณหาสัญญาณพัลส์สำหรับควบคุมสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ภายนอกบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ดังโครงสร้างของชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ในรูปที่ 4.7 ดังนั้นการสร้างโปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์

สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET-EASY MEGA2560 ของบริษัทอีทีที ใช้ชิพไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMEGA2560 ที่เป็นชิพตระกูล AVR ของบริษัท Atmel รองรับการเขียนโปรแกรมภาษาซีของ Arduino ซึ่งง่ายต่อการเขียนโปรแกรมสำหรับใช้งาน และสามารถรองรับการใช้งานได้หลากหลาย ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาให้ Arduino สามารถรองรับการใช้งานขนาดใหญ่ขึ้นโดยปรับปรุงโปรแกรมให้ใช้ชิพ AVR รุ่นใหญ่ขึ้น เพื่อให้จำนวนพอร์ตอินพุต, พอร์ตเอาต์พุต, พอร์ตดิจิตอล, พอร์ตอนาล็อก, พอร์ตสร้างสัญญาณ PWM และพอร์ตสื่อสารอนุกรม และขนาดความจำที่เพิ่มมากกว่าเดิม ซึ่งสามารถแสดงบอร์ดรุ่น ET – EASY MEGA 2560 ได้ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น ET - EASY MEGA2560

คุณสมบัติที่สำคัญของบอร์ด ET-EASY MEGA 2560

- เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต ประสิทธิภาพสูงแต่ใช้พลังงานต่ำในตระกูล AVR
- สถาปัตยกรรมแบบ RISC

- ชุดคำสั่ง 135 คำสั่ง และส่วนใหญ่คำสั่งเหล่านี้จะใช้เพียง 1 สัญญาณนาฬิกาในการประมวลผลคำสั่ง
- มีรีจิสเตอร์สำหรับใช้งานทั่วไปขนาด 8 บิต จำนวน 32 ตัว
- ทำงานสูงสุดที่ 16 ล้านคำสั่งต่อวินาที(MIPS) เมื่อใช้สัญญาณนาฬิกา 16 เมกะเฮิร์ซ

- หน่วยความจำ
  - หน่วยความจำแฟสสำหรับโหลดโปรแกรมขนาด 128 กิโลไบต์ เขียน/ลบได้ 10,000 ครั้ง
  - หน่วยความจำแบบ EEPROM ขนาด 4 กิโลไบต์ เขียน/ลบได้ 10,000 ครั้ง
  - หน่วยความจำแรมชนิดเอสแรม (SRAM) ขนาด 8 กิโลไบต์
  - เก็บข้อมูลได้กว่า 20 ปี ที่อุณหภูมิ 85 °C และกว่า 100 ปีที่ 25 °C
- มีระบบโปรแกรมตัวเองอยู่ในตัวชิพ
- มีการเชื่อมประสานกับ JTAG (IEEE std. 1149.1 compliant)
- สามารถทำการอ่านขณะเขียนได้จริงและสามารถล็อกการทำงานได้เพื่อความปลอดภัยของซอฟต์แวร์
- คุณสมบัติเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก
  - มีตัวตั้งเวลาและตัวนับเวลาขนาด 8 บิต จำนวน 2 ตัว ที่สามารถแยกโหมดการทำงานจากกันได้ 2 โหมดคือ Prescalar และ Capture
  - มีตัวตั้งเวลาและตัวนับขนาด 16 บิต จำนวน 4 ตัว ที่สามารถแยกโหมดการทำงานได้ 3 โหมด คือ Prescaler, Compare และ Capture
  - มีตัวนับเวลาจริง (real time counter) ที่แยกวงจรกำหนดความถี่ได้
  - มี PWM จำนวน 12 ช่องสัญญาณที่สามารถกำหนดความละเอียดได้ 16 บิต
  - มีตัวปรับผลการเปรียบเทียบของเอาต์พุต
  - มีตัวแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอลขนาด 10 บิต จำนวน 16 ช่องสัญญาณ
  - มีพอร์ตสื่อสารอนุกรมที่สามารถกำหนดอัตราการรับ/ส่งได้ จำนวน 4 พอร์ต
  - เชื่อมประสานอนุกรมแบบ SPI ได้ทั้งแบบมาสเตอร์และสเลฟ (mater/slave)
  - มีการเชื่อมประสานแบบอนุกรมด้วยสายสัญญาณ 2 เส้น แบบส่งข้อมูลเรียงไบต์
  - มีตัวตั้งเวลาแบบวอตช์ด็อกที่สามารถกำหนดการทำงานได้โดยสามารถแยกสัญญาณนาฬิกาได้จากตัวชิพ
  - มีตัวเปรียบเทียบสัญญาณแอนาลอกอยู่ในตัว

- มีการรองรับการขัดจังหวะและการเวก-อัพ (wake-up) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับขาของชิพ

- คุณสมบัติพิเศษ
  - มีตัวตรวจจับหาความเที่ยงตรงของออสซิเลเตอร์อยู่ในตัว (interal calibrated oscillator)
  - มีแหล่งการขัดจังหวะทั้งภายในและภายนอก (internal and external interrupt source)
- อินพุต/เอาต์พุต และตัวถัง
  - มีขาของอินพุตและเอาต์พุตที่สามารถกำหนดการทำงานได้ 86 ขา
  - ตัวถังแบบ TQFP ชนิด 100 ขา
- ช่วงอุณหภูมิที่ชิพทำงานได้ -40 °C ถึง 85 °C
- การใช้พลังงาน
  - โหมดการทำงานที่ 1 MHz ต้องการแรงดัน 1.8 V กระแส $500\,\mu A$
  - โหมดเพาเวอร์ดาวน์ (power-down) ต้องการกระแส $0.1\,\mu A$ ที่แรงดัน 1.8 V

การใช้งานพอร์ตสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล

ในงานวิจัยนี้จะสร้างโปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งจะต้องมีการรับค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากวงจรตรวจจับเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหากำลังไฟฟ้าสูงสุด ดังนั้นจึงประยุกต์ใช้งานพอร์ตแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในการส่งข้อมูล โดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีพอร์ตแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลหรือ ADC (analog to digital converter) ความละเอียด 10 บิต (10-bit resolution) ที่แรงดัน 5 V นั่นคือถ้าแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลจะได้ค่าตัวเลขอยู่ระหว่าง 0 – 1024 โดยมีพอร์ตแปลงสัญญาณจำนวน 16 ช่องอินพุตสัญญาณ คือ ADC0 – ADC15 สำหรับการใช้งานในงานวิจัยนี้จะใช้ 2 ช่องสัญญาณ คือช่องสัญญาณ ADC5 สำหรับแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลที่ได้จากวงจรตรวจจับแรงดัน และช่องสัญญาณ ADC7 สำหรับแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลที่ได้จากวงจรตรวจจับกระแส การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-9) และรายละเอียดการเขียนโปรแกรมการใช้งานพอร์ตสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลสามารถดูได้ในภาคผนวก ข. ส่วนที่ 1

$$ADC = \frac{V_{SENSOR} \cdot 1024}{V_{REF}} \qquad (4\text{-}9)$$

โดยที่ V_{SENSOR} คือ แรงดันทางด้านอินพุตหรือแรงดันจากวงจรตรวจจับ

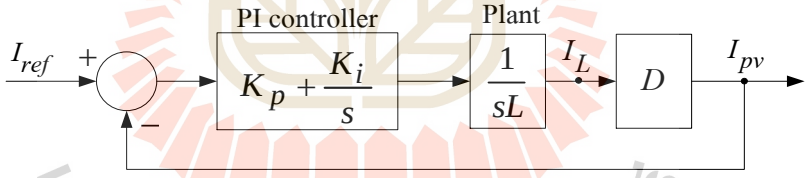
V_{REF} คือ แรงดันอ้างอิงซึ่งถูกกำหนดไว้ที่ 5 V

4.4.5 การเขียนโปรแกรมตัวควบคุมพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR

การควบคุมกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้เท่ากับกระแสไฟฟ้าอ้างอิงที่ถูกกำหนดจากอัลกอริธึมการตามรอยจุดกำลังสูงสุด จึงได้มีการนำเอากระแสไฟฟ้าอ้างอิงดังกล่าวผ่านตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ เพื่อลดค่าความผิดพลาดและเพื่อให้ได้สัญญาณควบคุมหรือแรงดันอ้างอิงสำหรับนำไปใช้สั่งสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบตัวควบคุมพีไอ ซึ่งจะมีรายเอียดการออกแบบตัวควบคุมดังนี้

การออกแบบตัวควบคุมพีไอ

การออกแบบตัวควบคุมพีไอของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ในงานวิจัยนี้จะอาศัยการออกแบบด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมของระบบควบคุม [21] เนื่องจากเป็นวิธีที่มีขั้นตอนการออกแบบที่ง่ายไม่ซับซ้อน ทั้งยังให้ผลการตอบสนองที่ดีอีกด้วย โดยการออกแบบตัวควบคุมวงรอบกระแสไฟฟ้าสามารถแสดงแผนภาพของวงรอบควบคุมกระแสไฟฟ้าของระบบได้ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 วงรอบควบคุมกระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.22 สามารถเขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของวงรอบกระแสไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (4-10)

$$\frac{I_{pv}(s)}{I_{ref}(s)} = \frac{\frac{DK_p}{L}s + \frac{DK_i}{L}}{s^2 + \frac{DK_p}{L}s + \frac{DK_i}{L}} \tag{4-10}$$

โดยที่ K_p และ K_i คือพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ D คือค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ และ L คือค่าความเหนี่ยวนำของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้า

แบบบัคก์ สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมจะอาศัยระบบสมการมาตรฐานอันดับ 2 ของระบบควบคุมแบบวงปิด มีสมการฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงดังสมการที่ (4-11)

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \tag{4-11}$$

เมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ที่ตัวส่วนระหว่างสมการที่ (4-10) และ (4-11) จะสามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในเทอมพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ K_p และ K_i ได้ดังสมการที่ (4-12) และ (4-13) ตามลำดับ

$$K_p = \frac{2\zeta\omega_n L}{D} \tag{4-12}$$

$$K_i = \frac{\omega_n^2 L}{D} \tag{4-13}$$

ตัวควบคุมพีไอของวงรอบกระแสไฟฟ้าสามารถออกแบบได้จากสมการที่ (4-12) และ (4-13) ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมพีไอในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าอัตราส่วนการหน่วง (damping ratio) ζ = 0.69 ความกว้างแถบหรือความถี่ธรรมชาติ ω_n =116 rad/s และค่าวัฏจักรหน้าที่ D = 0.32 ดังนั้นจะทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอที่เลือกใช้มีค่า K_p = 7.5 และ K_i = 630.75

การสร้างตัวควบคุมพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

สำหรับการสร้างตัวควบคุมพีไอด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR จะอาศัยพื้นฐานจากการนำตัวควบคุมทั้ง 2 แบบคือ ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (proportional controller) และตัวควบคุมแบบอินทริกรัล (integral controller) มาใช้งานร่วมกัน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (4-14) โดยสมการดังกล่าวเป็นสมการที่ต่อเนื่องทางเวลา (continuous time) ทำให้ไม่สามารถเขียนในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นจะต้องสร้างสมการใหม่ให้อยู่ในรูปแบบที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา (discrete time) เพื่อใช้สำหรับเขียนโปรแกรมลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

$$U_{out} = K_p U_{error} + K_i \int U_{error} dt \tag{4-14}$$

โดยที่ U_{out} คือสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ

K_p คืออัตราขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วนในตัวควบคุมพีไอ

K_i คืออัตราขยายของตัวควบคุมแบบอินทริกรัลในตัวควบคุมพีไอ

U_{error} คือสัญญาณอินพุตของตัวควบคุมพีไอ

การปรับรูปแบบสมการให้เป็นสมการทางเวลาที่ไม่ต่อเนื่องแสดงได้ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 พิจารณาสมการตัวควบคุมพีไอในช่วงเวลาที่ต่อเนื่องแสดงดังสมการที่ (4-15)

$$U_{out} = K_p U_{error} + K_i \int U_{error} dt \tag{4-15}$$

ขั้นตอนที่ 2 ดำเนินการอนุพันธ์ทั้งสองข้างของสมการที่ (4-15) ได้เป็นสมการที่ (4-16)

$$\frac{d}{dt} U_{out} = K_p \frac{d}{dt} U_{error} + K_i U_{error} \tag{4-16}$$

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดให้ $dt = T_i$ โดยที่ T_i คือค่าสุ่มตัวอย่างเวลา (sampling time) และอนุพันธ์ของสัญญาณผิดพลาดประมาณค่าให้อยู่ในรูปผลต่างแสดงได้ดังสมการที่ (4-17)

$$\frac{\Delta U_{out}}{T_i} = K_p \frac{\Delta U_{error}}{T_i} + K_i U_{error} \tag{4-17}$$

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดให้ผลต่างของสัญญาณเอาต์พุต (ΔU_{out}) มีค่าเท่ากับ $U_{out(i)} - U_{out(i-1)}$ และผลต่างของค่าสัญญาณผิดพลาด (ΔU_{error}) มีค่าเท่ากับ $U_{error(i)} - U_{error(i-1)}$ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4-18)

$$\frac{U_{out(i)} - U_{out(i-1)}}{T_i} = K_p \frac{U_{error(i)} - U_{error(i-1)}}{T_i} + K_i U_{error(i)} \tag{4-18}$$

โดยที่ $U_{out(i)}$ คือค่าสัญญาณเอาต์พุตในรอบปัจจุบัน

$U_{out(i-1)}$ คือค่าสัญญาณเอาต์พุตในรอบก่อนหน้า (อดีต)

$U_{error(i)}$ คือค่าสัญญาณผิดพลาดในรอบปัจจุบัน

$U_{error(i-1)}$ คือค่าสัญญาณผิดพลาดในรอบก่อนหน้า (อดีต)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

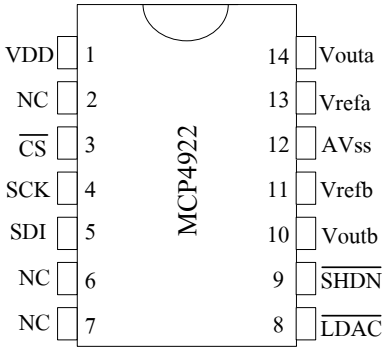
ขั้นตอนที่ 5 คูณสมการที่ (4-18) ด้วย T_i ทั้งสองข้างของสมการ จะทำให้ได้สมการตัวควบคุมพีไอที่เวลาไม่ต่อเนื่องแสดงดังสมการที่ (4-19) ดังนี้

$$U_{out(i)} = U_{out(i-1)} + K_p U_{error(i)} - K_p U_{error(i-1)} + K_i U_{error(i)} T_i \quad (4\text{-}19)$$

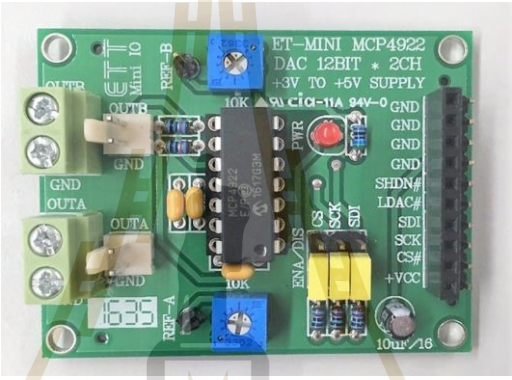
จากสมการที่ (4-19) เป็นสมการตัวควบคุมพีไอที่สามารถนำไปเขียนโปรแกรมลงในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ได้ ซึ่งสามารถดูรายละเอียดการเขียนโปรแกรมตัวควบคุมพีไอได้ในภาคผนวก ข. ส่วนที่ 2 อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การควบคุมกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการคำนวณผ่านตัวควบคุมพีไอในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังนั้นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จึงมีความไว sensitivity มากที่สุดของชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET-EASY MEGA 2560 ที่มีความไวในการประมวลผลของบอร์ดสูงสุดที่ 16 ล้านคำสั่งต่อวินาที เมื่อใช้สัญญาณนาฬิกา 16 MHz ทั้งนี้สามารถปรับปรุงค่าความผิดพลาดในการควบคุมและเพิ่มสมรรถนะในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดได้ด้วยการเปลี่ยนชนิดของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีความไวของสัญญาณนาฬิกามากขึ้น เช่น Arduino Due (32 MHz) หรือ TMDSDOCK28335 (150MHz) เป็นต้น

4.4.6 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก

วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอกทำหน้าที่แปลงสัญญาณดิจิตอลของค่าแรงดันอ้างอิง V_r ที่ได้จากการตามรอยจุดกำลังสูงสุดในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ให้เป็นสัญญาณแรงดันอ้างอิงแบบอนาลอก เพื่อนำไปใช้เปรียบเทียบกับวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยที่สร้างขึ้นซึ่งจะทำให้ได้สัญญาณพัลส์สำหรับนำไปใช้ควบคุมสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ โดยงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ไอซีแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอกเบอร์ MCP4922 แสดงได้ดังรูปที่ 4.23 อย่างไรก็ตามไอซีชนิดนี้ถูกนำมาสร้างเป็นโมดูลเพื่อให้สะดวกและง่ายต่อการนำไปใช้งานกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้โมดูลแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอกรุ่น ET-MINI MCP4922 DAC ในการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาลอกซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.23ไอซีเบอร์ MCP4922



รูปที่ 4.24 โมดูล ET-MINI MCP4922 DAC

จากรูปที่ 4.24 คุณสมบัติที่สำคัญของโมดูล ET-MINI MCP4922 DAC คือใช้ไอซี DAC เบอร์ MCP4922 แบบ DIP TYPE 14 ขา มี Digital Input ความละเอียด 12 bit ใช้งานกับ Power Supply 2.7 ถึง 5.5V มี OUTPUT ให้ใช้งาน 2 ช่องสัญญาณคือขา OUTA และ OUTB ซึ่งสามารถเลือกเกณฑ์ขยายของสัญญาณ Output ได้ที่ 1x หรือ 2x ทั้งยังสามารถปรับตั้งแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) ได้จาก VR ตั้งแต่ 0 ถึง $+V_{cc}$ นอกจากนี้ยังสามารถ Interface การส่งข้อมูล Digital Input ด้วย SPI ซึ่งรองรับสัญญาณ Clock ได้ถึง 20MHz โดยรายละเอียดหน้าที่และการเชื่อมต่อขาสัญญาณบนโมดูลแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอกกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

- ขา $+V_{cc}$ ใช้ต่อเข้ากับ V_{cc} ของ MCU ที่ใช้ควบคุม จะต่อกับไฟเลี้ยงของบอร์ดขนาด 5 V
- ขา CS – Chipselect Input จะทำงานที่ลอจิก Low เพื่อที่จะ Enable Clock และ Data โดยต่อกับช่องสัญญาณดิจิตอลที่ 41 ของบอร์ด
- ขา SCK จะเป็นขาสำหรับรับสัญญาณ Clock (SPI) จากภายนอกเข้ามา ต่อเข้ากับช่องสัญญาณดิจิตอลที่ 43 ของบอร์ด

- ขา SDI เป็นขา Data สำหรับรับข้อมูลแบบ Serial จากภายนอกเข้ามา ซึ่งจะทำการต่อกับช่องสัญญาณดิจิตอลที่ 45 ของบอร์ด

- ขา LDAC จะทำงานที่ Logic Low และทำหน้าที่โหลดข้อมูลที่ถูก Convert แล้วออกไปที่ขา Output โดยขานี้จะต่อกับช่องสัญญาณดิจิตอลที่ 47 ของบอร์ด

- ขา SHDN จะทำงานที่ Logic Low ทำหน้าที่ Shutdown DAC ให้อยู่ใน Standby Mode ในสภาวะใช้งานปกติจะต้องให้เป็น Logic High ซึ่งจะทำการต่อเข้ากับช่องสัญญาณดิจิตอลที่ 49 ของบอร์ด

- ขา GND ใช้ต่อเข้ากับ GND ของ MCU ที่ใช้ควบคุม ในที่นี้จะต่อกับกราวด์ของบอร์ด

การแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอกในงานวิจัยนี้จะใช้ช่องสัญญาณเอาต์พุตขา OUTA สำหรับต่อสัญญาณอนาลอกที่ได้ไปใช้งาน โดยจะปรับตั้งแรงดันอ้างอิง (V_{ref}) จาก VR REF-A ไว้ที่ V_{cc} ขนาด 5 V ทำให้ค่าสัญญาณดิจิตอลที่ค่าตัวเลขระหว่าง 0 - 4095 สามารถแปลงเป็นสัญญาณอนาลอกที่มีขนาดแรงดันระหว่าง 0 - 5 V ซึ่งผลการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-20) และสามารถแสดงการเขียนโปรแกรมแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอกได้ในภาคผนวก ข. ส่วนที่ 3

$$V_r = \frac{U_{out} \cdot 4095}{V_{REF}} \tag{4-20}$$

โดยที่ V_r คือสัญญาณแรงดันอ้างอิง(อนาลอก)ที่จะส่งค่าออกจากบอร์ด

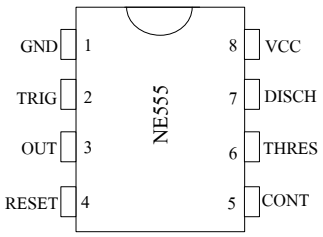
U_{out} คือสัญญาณเอาต์พุตดิจิตอลจากโปรแกรมการตามรอยที่ผ่านตัวควบคุมพีไอ

V_{REF} คือแรงดันอ้างอิงซึ่งถูกกำหนดไว้ที่ 5 V

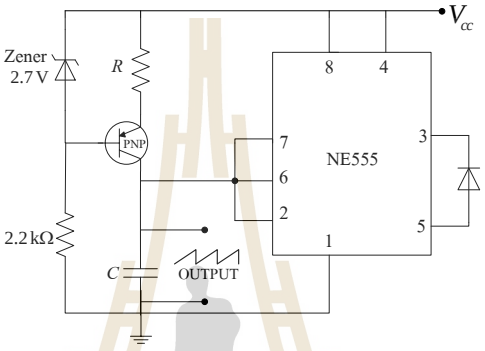
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.4.7 วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย

วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยเป็นวงจรที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสัญญาณกับแรงดันอ้างอิงที่ได้จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์โดยใช้วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป) โดยวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยในงานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้ไอซีเบอร์ NE555 ดังรูปที่ 4.25 กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ได้แก่ ทรานซิสเตอร์ ไดโอด ซีเนอร์ไดโอด ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน เพื่อสร้างสัญญาณรูปคลื่นแบบฟันเลื่อย โดยจะมีโครงสร้างของวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยได้ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.25 ไอซีเบอร์ NE555



รูปที่ 4.26 วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย

การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยในรูปที่ 4.26 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4-21)

$$f = \frac{(V_{cc} - 2.7)}{R \times C \times V_{pp}} \tag{4-21}$$

โดยที่ f คือค่าความถี่ในการออกแบบ (Hz)

V_{cc} คือแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงของวงจร (V)

R คือตัวต้านทาน (Ω)

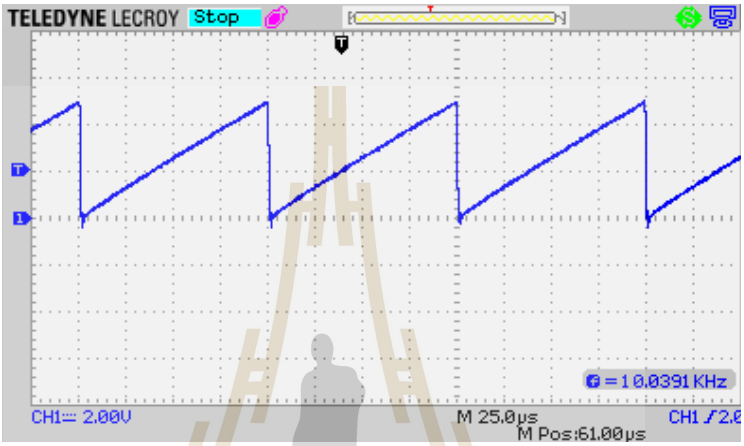
C คือตัวเก็บประจุ (F)

V_{pp} คือขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุต (V)

จากสมการการออกแบบที่ (4-21) จะกำหนดให้แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงของวงจร $V_{cc} = 8\text{V}$ ค่าความถี่ของสัญญาณ $f = 10\,\text{kHz}$ ค่าตัวเก็บประจุ $C = 0.01\mu\text{F}$ และต้องการให้ขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตของวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย $V_{pp} = 5\text{V}$ ดังนั้นจากสมการการคำนวณจะได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ค่าตัวต้านทาน $R = 10.6\,\text{k}\Omega$ โดยตัวต้านทานในวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยที่ใช้งานจริงจะใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ ซึ่งจะดำเนินการทดสอบวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยที่ได้จากการออกแบบด้วยการจ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจรและปรับตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ให้ได้ค่าความถี่ของสัญญาณตามที่ต้องการ จากนั้นจะทำการวัดค่าสัญญาณเอาต์พุตของวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยที่ได้ ซึ่งสามารถแสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยได้ดังรูปที่ 4.27 ดังนี้



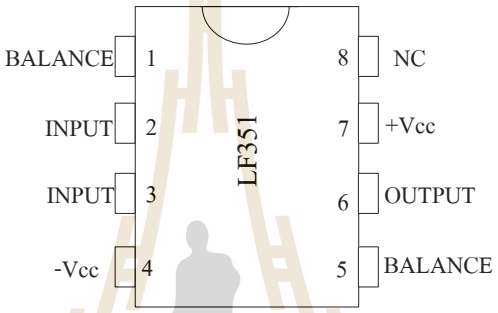
รูปที่ 4.27 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย

จากผลการทดสอบวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยจะเห็นได้ว่าสัญญาณเอาต์พุตของวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยที่ได้มีค่าความถี่ของสัญญาณเอาต์พุตเท่ากับ 10 kHz ขนาดแอมพลิจูดมีค่าเท่ากับ 5 V ตามที่ต้องการและสามารถนำสัญญาณฟันเลื่อยที่ได้นี้ไปใช้ในการเปรียบเทียบได้ โดยวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยที่นำมาทดสอบและใช้งานจริงแสดงได้ดังรูปที่ 4.28

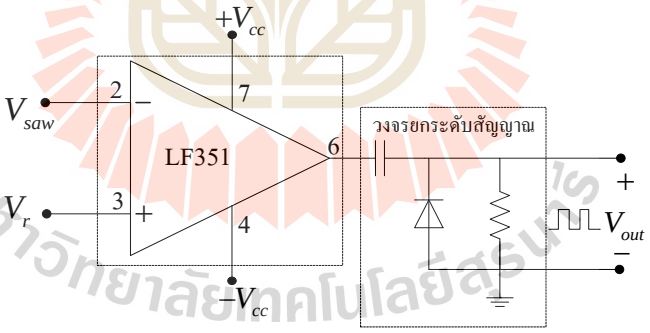
รูปที่ 4.28 วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยที่ใช้งานจริง

4.4.8 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

วงจรเปรียบเทียบสัญญาณเป็นวงจรที่ใช้เปรียบเทียบสัญญาณแรงดันอินพุตที่ป้อนให้ขาอินพุตขาหนึ่งกับสัญญาณแรงดันอ้างอิงที่ป้อนให้กับขาอินพุตอีกขาหนึ่ง ทำให้เกิดสัญญาณแรงดันเอาท์พุทของวงจรเปลี่ยนแปลงอยู่สองสภาวะคือสภาวะสูง (high) และสภาวะต่ำ (low) ขึ้นอยู่กับลักษณะความแตกต่างของสัญญาณอินพุตทั้งสองขา โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ไอซีเบอร์ LF351 เป็นตัวเปรียบเทียบสัญญาณแสดงได้ดังรูปที่ 4.29 และมีโครงสร้างของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณแสดงได้ดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.29 ไอซีเบอร์ LF351



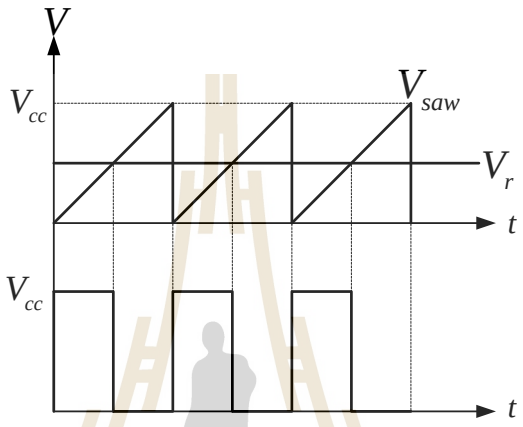
รูปที่ 4.30 โครงสร้างของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

จากรูปที่ 4.30 สามารถหาค่าแรงดันเอาต์พุตได้จากการเปรียบเทียบว่าสัญญาณขาบวก (non-inverting) และขาลบ (inverting) ของออปแอมป์ขาไหนมีค่ามากกว่ากัน ถ้าขา non-inverting มีค่ามากกว่าขา inverting ค่าแรงดันเอาต์พุตจะอิ่มตัวไปในทิศทางบวก ในทางตรงข้ามถ้าขา inverting มีค่าแรงดันมากกว่าจะทำให้ค่าแรงดันเอาต์พุตอิ่มตัวไปในทิศทางลบ โดยค่าแรงดันของเอาต์พุตที่อิ่มตัวนั้นจะถูกจำกัดอยู่ที่แรงดันไฟเลี้ยงที่ป้อนให้กับออปแอมป์ (V_{cc}) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้สัญญาณแรงดันอ้างอิง V_r ป้อนให้กับขา non-inverting ของออปแอมป์และสัญญาณ

แรงดัน V_{saw} จะถูกป้อนให้กับขา inverting ของออปแอมป์ ลักษณะการเปรียบเทียบสัญญาณและสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.31 ซึ่งการทำงานของวงจรเปรียบเทียบจะมีความสัมพันธ์สรุปได้ 2 เงื่อนไขดังนี้

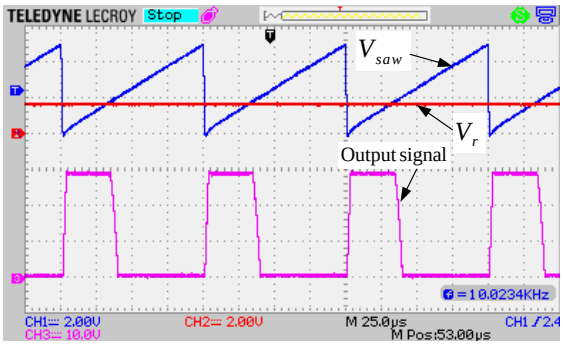
เงื่อนไขที่ 1: ถ้า $V_r > V_{saw}$ จะได้ $V_{out} = +V_{cc}$

เงื่อนไขที่ 2: ถ้า $V_r < V_{saw}$ จะได้ $V_{out} = 0$

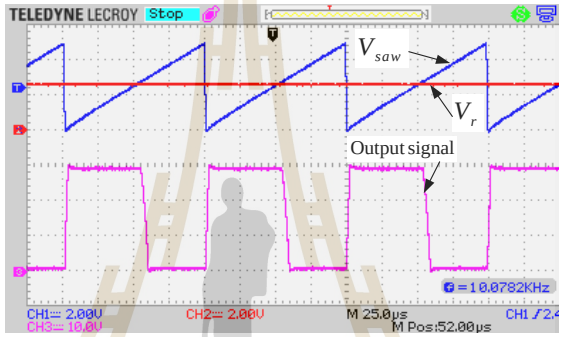


รูปที่ 4.31 การทำงานของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ

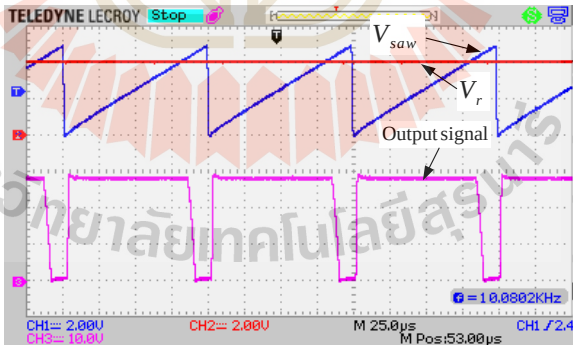
การทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณจะดำเนินการทดสอบด้วยการป้อนแรงดันอ้างอิงและสัญญาณฟันเลื่อยให้กับอินพุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ โดยจะทำการทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณด้วยการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันอ้างอิง 3 กรณีด้วยกันคือ 1.5, 2.5 และ 4 V จากนั้นจะทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณซึ่งก็คือสัญญาณพัลส์ที่มีขนาด 30, 50 และ 80% ตามลำดับ ผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอ้างอิงแสดงได้ดังรูปที่ 4.32 ถึง 4.34 โดยช่องสัญญาณที่ 1 คือสัญญาณฟันเลื่อย ช่องสัญญาณที่ 2 คือแรงดันอ้างอิงที่ได้จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และช่องสัญญาณที่ 3 คือสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ



รูปที่ 4.32 ผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณกรณีที่ 1 แรงดันอ้างอิง 1.5 V



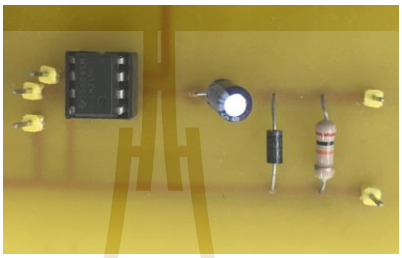
รูปที่ 4.33 ผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณกรณีที่ 2 แรงดันอ้างอิง 2.5 V



รูปที่ 4.34 ผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณกรณีที่ 3 แรงดันอ้างอิง 4 V

จากผลการทดสอบวงจรเปรียบเทียบสัญญาณในรูปที่ 4.32 ถึง 4.34 จะเห็นได้ว่าถ้า V_r มีค่ามากกว่า V_{saw} จะทำให้ได้ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ V_{out} มีค่าเท่ากับ $+V_{cc}$ และถ้า V_r มีค่าน้อยกว่า V_{saw} ค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ V_{out} จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ตามที่ได้มีการสรุปเงื่อนไขการทำงานไว้ในข้างต้น และเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันอ้างอิงที่

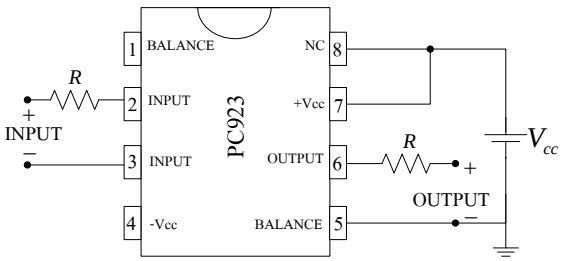
ระดับต่าง ๆ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบสัญญาณจะให้สัญญาณพัลส์ที่มีขนาดของค่าวัฏจักรหน้าที่ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับระดับของแรงดันอ้างอิง โดยวงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่ทดสอบและใช้งานจริงแสดงได้ดังรูปที่ 4.35 นอกจากนี้การนำเอาสัญญาณพัลส์ที่ได้จากวงจรเปรียบเทียบไปใช้ในการขับสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์จะต้องมีการผ่านวงจรแยกโดดสัญญาณก่อน เพื่อแยกกราวด์และป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดกับอุปกรณ์ โดยจะอธิบายวงจรในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 4.35 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณที่ใช้งานจริง

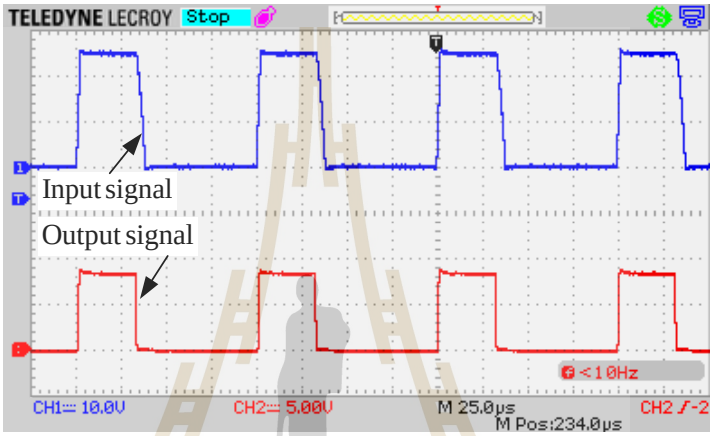
4.4.9 วงจรแยกโดดสัญญาณ

วงจรแยกโดดสัญญาณเป็นวงจรที่ถูกสร้างขึ้นสำหรับใช้ในการแยกกราวด์ของวงจรไฟฟ้าฝั่งแรงต่ำและแรงสูงไม่ให้เชื่อมต่อกันเพื่อป้องกันการรบกวนกันทางไฟฟ้าระหว่างสองวงจรซึ่งอาจทำให้เกิดอันตรายกับอุปกรณ์ฝั่งวงจรไฟฟ้าแรงต่ำได้ โดยในงานวิจัยจะแยกกราวด์ของสัญญาณระหว่างส่วนของวงจรควบคุมและวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์โดยใช้อุปกรณ์เชื่อมต่อทางแสงไอซีเบอร์ PC923 ซึ่งได้แสดงการต่อวงจรแยกโดดสัญญาณที่นำไปใช้งานจริงแสดงได้ดังรูปที่ 4.36 ดังนี้

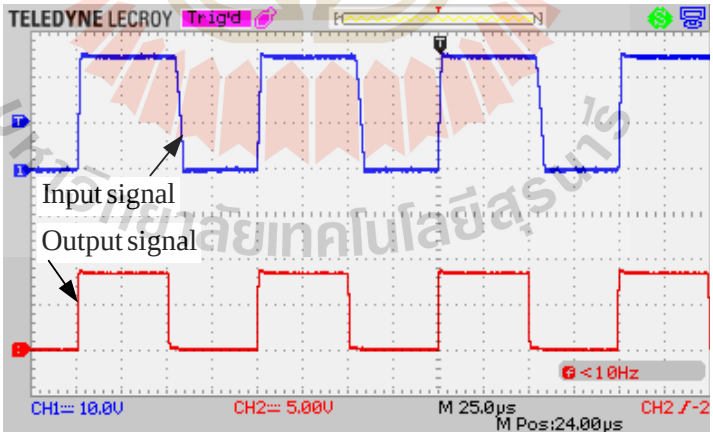


รูปที่ 4.36 วงจรแยกโดดสัญญาณที่ใช้ไอซี PC923

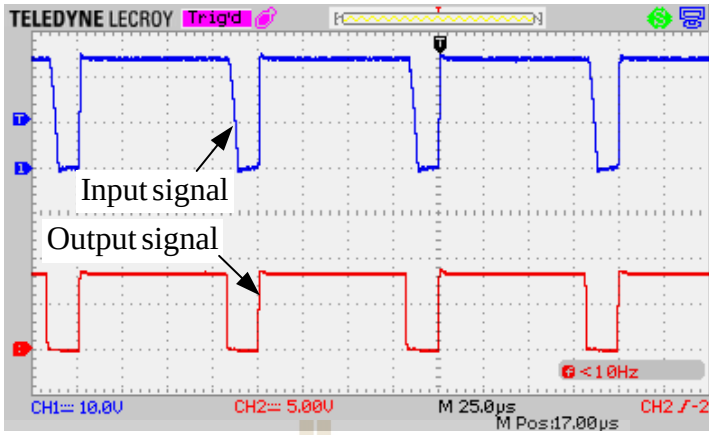
จากรูปที่ 4.36 เพื่อยืนยันขนาดและลักษณะรูปสัญญาณพัลส์ที่ได้จากวงจรแยกโดดสัญญาณจะดำเนินการทดสอบด้วยการจ่ายสัญญาณอินพุตที่เป็นรูปสัญญาณพัลส์และวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรที่ขนาดแรงดันไฟเลี้ยง V_{cc} =12 V โดยการทดสอบจะทำการกำหนดให้ค่า วัฏจักรหน้าที่มีความกว้างของสัญญาณ 3 กรณีด้วยกันคือ 30 50 และ 80% ซึ่งจะได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.37 ถึง 4.39 ตามลำดับโดยช่องสัญญาณที่ 1 คือสัญญาณอินพุตของวงจรแยกโดดสัญญาณและช่องสัญญาณที่ 2 คือสัญญาณเอาต์พุตของวงจรแยกโดดสัญญาณ



รูปที่ 4.37 ผลการทดสอบวงจรแยกโดดสัญญาณกรณีที่ 1 ค่าวัฏจักรหน้าที่ 30%



รูปที่ 4.38 ผลการทดสอบวงจรแยกโดดสัญญาณกรณีที่ 2 ค่าวัฏจักรหน้าที่ 50%

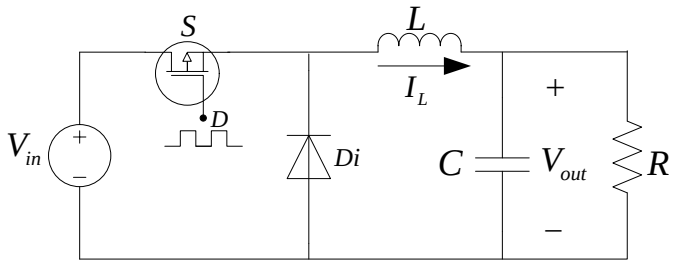


รูปที่ 4.39 ผลการทดสอบวงจรแยกโดดสัญญาณกรณีที่ 3 ค่าวัฏจักรหน้าที่ 80%

ผลการทดสอบวงจรแยกโดดสัญญาณรูปที่ 4.37 ถึง 4.39 พบว่าค่าวัฏจักรหน้าที่ที่กำหนดความกว้างของสัญญาณทั้ง 3 กรณีมีสัญญาณเอาต์พุตของวงจรเหมือนกับสัญญาณอินพุตที่กำหนด ดังนั้นสัญญาณจากวงจรแยกโดดสัญญาณดังกล่าวสามารถนำไปใช้สั่งการสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ให้ทำงานได้

4.4.10 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์

ระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดจะถูกนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ เนื่องจากวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์เป็นวงจรที่ทำให้ระดับแรงดันทางด้านเอาต์พุตมีค่าต่ำกว่าแรงดันทางด้านอินพุตซึ่งเหมาะกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระที่มีขนาดแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มากกว่าแรงดันของแบตเตอรี่ โดยวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์แสดงได้ดังรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์

จากวงจรในรูปที่ 4.40 พบว่าสามารถคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านเอาต์พุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ V_{out} [22] ได้จากสมการ (4-22)

$$V_{out} = DV_{in} \tag{4-22}$$

โดยที่ V_{in} คือแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์

D คือค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์

การออกแบบวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ในรูปที่ 4.40 จะประกอบไปด้วยสวิตช์ประเภทมอสเฟต ไดโอด ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ การออกแบบในส่วนของค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์จะต้องรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้คงที่ให้มีการกระเพื่อมของสัญญาณน้อยที่สุด โดยจะต้องคำนึงถึงค่าแรงดันพลิ้ว ΔV_c (ripple voltage) ของแรงดันตกคร่อมโหลดและค่ากระแสพลิ้ว ΔI_L (ripple current) ของกระแสไหลผ่านโหลดที่ใช้ในการออกแบบเพื่อให้ได้ค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุที่เหมาะสม การออกแบบค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ [22] สามารถพิจารณาได้ดังสมการที่ (4-23) และ (4-24) ตามลำดับดังนี้

$$L = \frac{V_{out}\left(V_{in} - V_{out}\right)}{\Delta I_L f_s V_{in}} \tag{4-23}$$

$$C = \frac{(1-D)V_{out}}{\Delta V_c 8 L f_s^{\,2}} \tag{4-24}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สำหรับการออกแบบจะกำหนดให้ค่าแรงดันอินพุตของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์มีค่าเท่ากับแรงดันสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และแรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับแรงดันสูงสุดของแบตเตอรี่ เพื่อที่จะได้คำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำและค่าตัวเก็บประจุที่สามารถรองรับค่าพิกัดสูงสุดได้ ซึ่งมีเงื่อนไขสำหรับการออกแบบดังนี้ $V_{in} = 43\,\text{V}$, $V_{out} = 13.8\,\text{V}$, $D = 0.32$, $f_s = 10\,\text{kHz}$, $\Delta I_L \le 0.07\text{A}$, $\Delta V_c \le 1\text{mV}$ จากเงื่อนไขข้างต้นพิจารณาจากสมการที่ (4-23) และ (4-24) จะสามารถแสดงการออกแบบได้ดังนี้

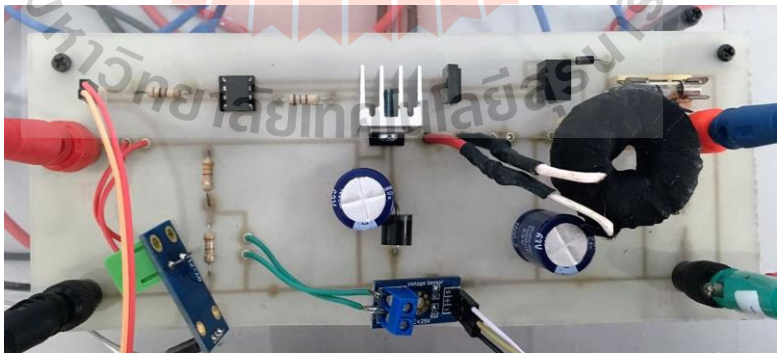
$$L = \frac{13.8(43-13.8)}{0.07\times 10\times 10^3\times 43} = 13.387\ \text{mH}$$

$$C = \frac{(1-0.32)13.8}{1\times10^{-3}\times8\times15\times10^{-3}\times(10\times10^{3})^{2}} = 782\,\mu\text{F}$$

จากการคำนวณหาค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุสำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ $15\,\text{mH}$ และค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ $1000\,\mu\text{F}$ นอกจากนี้ค่ากระแสเอาต์พุตของโหลดแบตเตอรี่ที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ 3.33 A จึงเลือกใช้พิกัดของอุปกรณ์ที่ทนกระแสพิกัดได้สูงสุด 5 A และเนื่องจากแรงดันสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 43 V จึงเลือกใช้แรงดันพิกัดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ 60 V ซึ่งสามารถแสดงพิกัดอุปกรณ์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ที่ออกแบบได้ดังตารางที่ 4.4 และแสดงวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ที่นำมาใช้งานจริงได้ดังรูปที่ 4.41

ตารางที่ 4.4 พิกัดอุปกรณ์ต่าง ๆ ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์

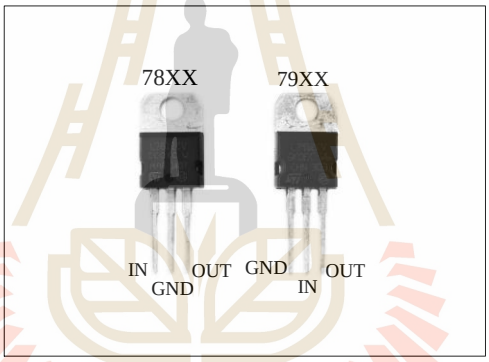
อุปกรณ์	**ขนาดพิกัด**	**รายละเอียด**
ตัวเหนี่ยวนำ	15 mH, 60 V ,5 A	DC Choke
ตัวเก็บประจุ	$1000\,\mu\text{F}$, 60 V	ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโตรไลต์ (electrolytic capacitor)
มอสเฟต	60 V, 50 A	เบอร์ F50N06 N-Channel
ไดโอด	60 V, 6 A	เบอร์ 6A6



รูปที่ 4.41 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ที่นำมาใช้งานจริง

4.4.11 แหล่งจ่ายของวงจรภายในชุดทดสอบฮาร์ดแวร์

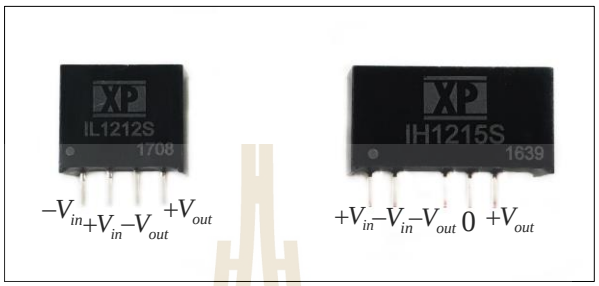
แหล่งจ่ายที่จ่ายให้แก่วงจรต่าง ๆ ภายในระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ไอซีรักษาระดับแรงดัน (IC voltage regulators) เป็นตัวจ่ายแรงดัน $\pm V_{cc}$ ในวงจรต่าง ๆ ไอซีดังกล่าวทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้มีค่าคงที่เมื่อไอซีมีแรงดันอินพุตเข้ามามากกว่าแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการจ่ายออกไป โดยจะเลือกใช้ไอซีตระกูล 78XX และ 79XX ไอซีตระกูล 78XX จะให้ระดับแรงดันเอาต์พุตไฟบวกคงที่ (positive voltage regulator) ส่วนไอซีตระกูล 79XX จะให้ระดับแรงดันเอาต์พุตไฟลบคงที่ (negative voltage regulator) ซึ่งไอซีทั้งสองตระกูลนี้จะมีลักษณะการวางขาของอุปกรณ์แตกต่างกัน โดยค่า 2 ตัวเลขท้าย XX ของไอซีคือขนาดแรงดันเอาต์พุตที่กำหนดไว้ ตัวอย่างเช่น ไอซีเบอร์ 7812 แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ +12 V และ 7912 แรงดันเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ -12 V เป็นต้น ซึ่งไอซีรักษาระดับแรงดันจะมีโครงสร้างและลักษณะของไอซีที่ใช้งานจริงแสดงดังรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 ไอซีรักษาระดับแรงดัน

อย่างไรก็ตามไอซีรักษาระดับแรงดันที่ได้กล่าวไปข้างต้นจะใช้แรงดันอินพุตจากแหล่งพลังงานสำรองแบตเตอรี่ ซึ่งอาจทำให้เกิดการรบกวนกันทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่กับแหล่งจ่ายไอซีรักษาระดับแรงดันที่จ่ายแรงดันให้แก่วงจรควบคุมต่าง ๆ ทำให้ไม่สามารถจ่ายแรงดันจากแบตเตอรี่ให้กับไอซีรักษาระดับแรงดันได้โดยตรง ดังนั้นเพื่อป้องการอันตรายที่จะเกิดกับวงจรควบคุม จึงได้ทำการแยกกราวด์แรงดันจากแบตเตอรี่และไอซีรักษาระดับแรงดันออกจากกันโดยการใช้ตัวแยกกราวด์แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (dc/dc isolator) ซึ่งการเลือกใช้ตัวแยกกราวด์นั้นจะขึ้นอยู่กับการใช้งานค่าแรงดันอินพุตและเอาต์พุตที่ต้องการ โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ตัวแยกกราวด์แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเบอร์ 12XX คือแรงดันอินพุตจากแบตเตอรี่ 12 V และค่าแรงดันเอาต์พุตขึ้นอยู่กับเบอร์ XX ของตัวแยกกราวด์ที่เลือกใช้งาน ซึ่งตัวแยกกราวด์ดังกล่าวสามารถแบ่งตามลักษณะการคงค่าแรงดันเอาต์พุตออกเป็น 2 แบบคือแบบ Single Output และแบบ Multi Output แบบ Single

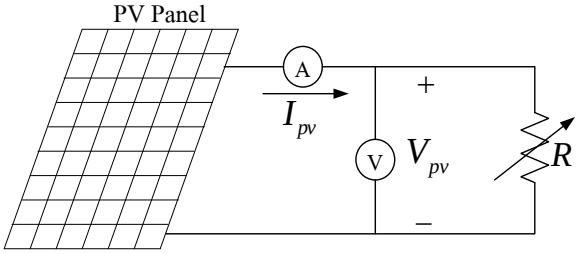
Output จะมีค่าแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ +Vo และ 0 V ตัวอย่างเช่น เบอร์ 1212 จะให้ค่าแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ +12 และ 0 V เป็นต้น ส่วนแบบ Multi Output จะมีค่าแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ $+V_{out}$ $-V_{out}$ และ 0V ตัวอย่างเช่น เบอร์ 1215 จะให้ค่าแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ +15 -15 และ 0 V เป็นต้น ซึ่งตัวแยกกราวด์แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้งานจริงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.43 ตัวแยกกราวด์แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้งานจริง

4.5 การทดสอบหากราฟคุณลักษณะเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

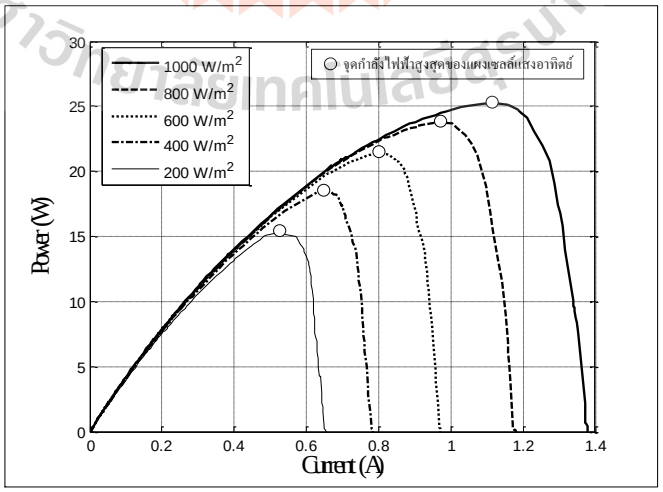
คุณสมบัติของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปจะให้กำลังไฟฟ้าสูงสุด แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องทำงานที่สภาวะมาตรฐาน ความเข้มแสง 1000 W/m^2 และอุณหภูมิ 25 °C โดยในการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสสามารถทำงานและดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะมาตรฐานได้ แต่เนื่องจากการใช้งานจริงในทางปฏิบัติไม่สามารถควบคุมความเข้มแสงและอุณหภูมิที่สภาวะมาตรฐาน ดังนั้นจึงได้ดำเนินการทดสอบหากราฟลักษณะเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริงเพื่อใช้สำหรับตรวจสอบผลการทดสอบชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ว่าระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะแวดล้อมขณะนั้นและสามารถตามรอยจุดกำลังสูงสุดได้จริงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม โดยแสดงการทดสอบหากราฟคุณลักษณะเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังรูปที่ 4.44



รูปที่ 4.44 การทดสอบหากราฟคุณลักษณะเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 4.44 การทดสอบหากราฟลักษณะเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะใช้แสงอาทิตย์เทียมที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ โดยจะดำเนินการทดสอบด้วยการปรับแรงดันจากแหล่งจ่ายหนึ่งเฟสแบบปรับค่าได้ให้ความเข้มแสงของหลอดไฟที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่ซึ่งจะใช้เครื่องมือวัดความเข้มแสง (lux meter) ในรูปที่ 4.45 เป็นตัววัดค่าความเข้มแสงในหน่วยของ lux โดย 100,000 lux มีค่าเท่ากับ 1000 W/m^2 ถัดไปจะให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้าด้วยการปรับตัวต้านทานแบบปรับค่าได้จากค่ามากสุดไปยังค่าน้อยสุดจนกระทั่งเกิดกระแสไฟฟ้าสูงสุดในสภาวะลัดวงจร จากนั้นจะนำเอาข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะได้กราฟคุณลักษณะเฉพาะของกระแสและกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริงขนาด 40 W ที่มีจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดแสดงไว้ในแต่ละระดับค่าความเข้มแสงดังรูปที่ 4.46

รูปที่ 4.45 เครื่องมือวัดความเข้มแสง



รูปที่ 4.46 คุณลักษณะเฉพาะของกระแสและกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริง

จากการทดสอบหากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 W พบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าที่ 40 W ได้ เนื่องจากการทดสอบด้วยแสงอาทิตย์เทียมในห้องปฏิบัติการไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความร้อนที่เกิดจากหลอดไฟได้ ทำให้อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่สภาวะมาตรฐานส่งผลให้ไม่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ที่ 40 W ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะสนใจเฉพาะปริมาณความเข้มแสงเท่านั้น ซึ่งเมื่อดูผลการทดสอบหากราฟคุณลักษณะเฉพาะของกระแสและกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริงในรูปที่ 4.46 จะเห็นได้ว่าที่ระดับค่าความเข้มแสง 1000 W/m^2 อุณหภูมิ 36°C แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 25.26 W และเมื่อทำการลดปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลงเป็น 800, 600, 400 และ 200 W/m^2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 23.79, 21.52, 18.62 และ 15.33 W ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อระดับปริมาณความเข้มแสงลดลง ค่ากำลังและกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะมีค่าลดลงตามลำดับเช่นกัน ซึ่งตรงตามทฤษฎีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ดังนั้นกราฟคุณลักษณะเฉพาะที่มีจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดดังกล่าวจะนำไปใช้สำหรับตรวจสอบผลการทดสอบของชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการเป็นลำดับถัดไป

4.6 การทดสอบหาค่าความผิดพลาด (ε_s) และค่าการเปลี่ยนแปลงกระแส (ΔI_{step})

การทดสอบชุดทดสอบฮาร์ดแวร์จะต้องกำหนดค่าความผิดพลาด (ε_s) และค่าการเปลี่ยนแปลงกระแส (ΔI_{step}) ในอัลกอริธึมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของวิธีอิงกระแสดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2 ซึ่งค่าดังกล่าวจะถูกป้อนในโปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังนั้นจึงได้ดำเนินการทดสอบหาค่า ε_s และ ΔI_{step} ที่เหมาะสมกับชุดทดสอบฮาร์ดแวร์โดยเริ่มจากการกำหนดค่าคงที่ ΔI_{step} ไว้ที่ 0.03 แล้วทำการเปลี่ยนแปลงค่า ε_s เท่ากับ 20, 50, 100 และ 200 ตามลำดับ เมื่อได้ค่า ε_s ที่ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดแล้ว จะทำการเปลี่ยนแปลงค่า ΔI_{step} เท่ากับ 0.01, 0.02, 0.03 และ 0.04 โดยคงค่า ε_s ที่มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดค่าเดิมไว้ ซึ่งจะได้ผลการทดสอบหาค่าความผิดพลาดและค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสแสดงได้ดังตารางที่ 4.5 และ 3.6

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบหาค่าความผิดพลาด เมื่อคงค่า $\Delta I_{step} = 0.03$

ε_s = 20			
ความเข้มแสง(W/m^2)	V_{PV} (V)	I_{PV} (A)	P_{PV} (W)
600	24.3	0.825	20.05
1000	23.1	1.050	24.26

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบหาค่าความผิดพลาด เมื่อคงค่า $\Delta I_{step} = 0.03$ (ต่อ)

ε_s = 50			
ความเข้มแสง(W/m^2)	V_{PV} (V)	I_{PV} (A)	P_{PV} (W)
600	24.5	0.866	21.22
1000	23.7	1.042	24.70
ε_s = 100			
ความเข้มแสง(W/m^2)	V_{PV} (V)	I_{PV} (A)	P_{PV} (W)
600	25.0	0.833	20.83
1000	25.6	0.964	24.68
ε_s = 150			
ความเข้มแสง(W/m^2)	V_{PV} (V)	I_{PV} (A)	P_{PV} (W)
600	24.8	0.835	20.71
1000	24.9	0.983	24.48

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบหาค่าการเปลี่ยนแปลงกระแส เมื่อคงค่า $\varepsilon_s = 50$

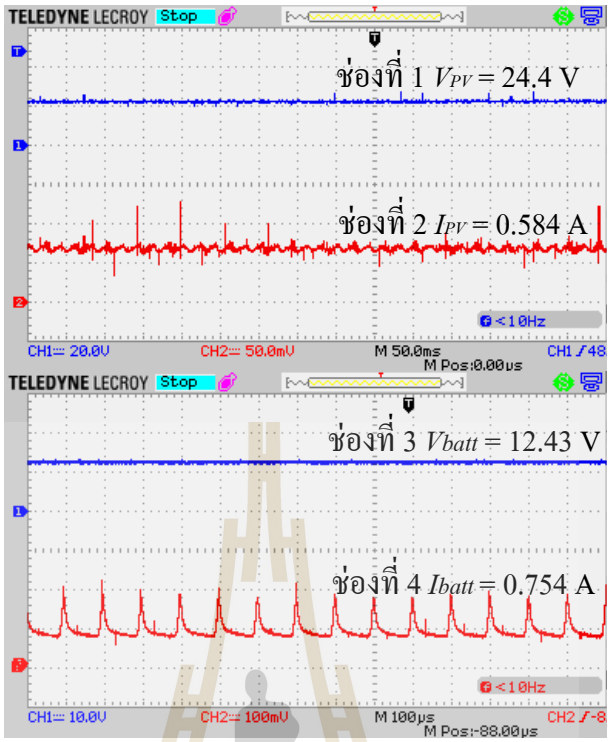
$\Delta I_{step} = 0.01$			
ความเข้มแสง (W/m^2)	V_{PV} (V)	I_{PV} (A)	P_{PV} (W)
600	24.9	0.850	21.17
1000	24.6	1.001	24.63
$\Delta I_{step} = 0.02$			
ความเข้มแสง (W/m^2)	V_{PV} (V)	I_{PV} (A)	P_{PV} (W)
600	24.3	0.868	21.09
1000	23.5	1.039	24.42
$\Delta I_{step} = 0.03$			
ความเข้มแสง (W/m^2)	V_{PV} (V)	I_{PV} (A)	P_{PV} (W)
600	24.5	0.866	21.22
1000	23.7	1.042	24.70
$\Delta I_{step} = 0.04$			
ความเข้มแสง (W/m^2)	V_{PV} (V)	I_{PV} (A)	P_{PV} (W)
600	24.3	0.859	20.87
1000	24.4	0.995	24.28

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

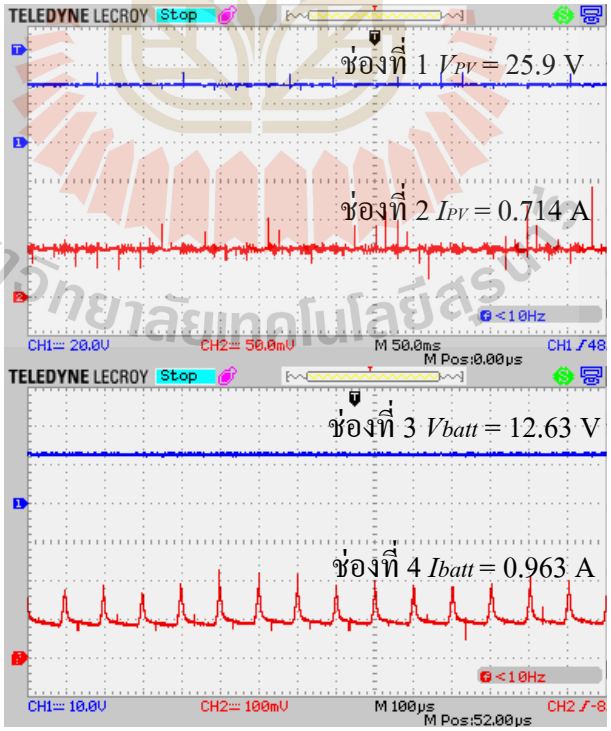
จากผลการทดสอบตารางที่ 4.5 และ 4.6 จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดและค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสที่ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดและเหมาะสมกับชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ในงานวิจัยนี้คือ $\varepsilon_s = 50$ และ $\Delta I_{step} = 0.03$ ซึ่งค่าดังกล่าวทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเข้มแสงที่ทำการทดสอบ โดยที่ความเข้มแสง 600 และ 1000 W/m^2 จะทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 21.22 และ 24.70 W ตามลำดับ ดังนั้นจะเลือกใช้ค่า $\varepsilon_s = 50$ และ $\Delta I_{step} = 0.03$ ในการทดสอบชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ในหัวข้อถัดไป

4.7 ผลการทดสอบชุดทดสอบฮาร์ดแวร์

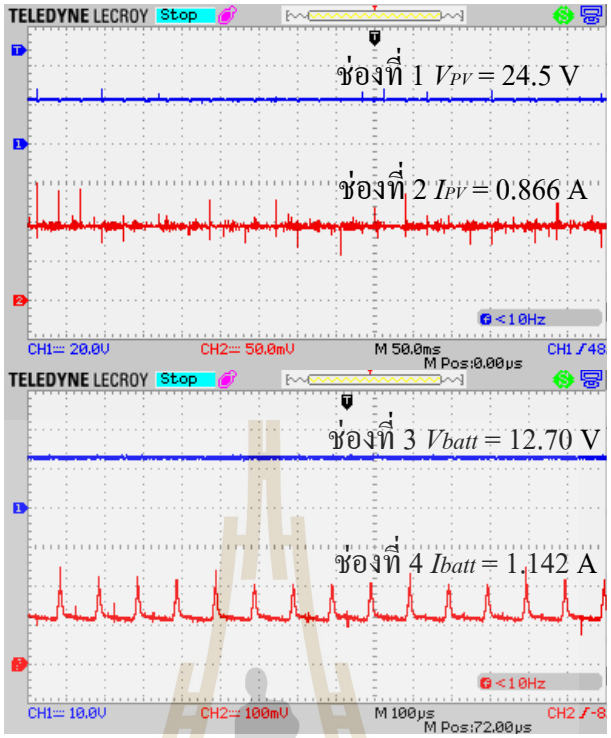
การทดสอบระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสในชุดทดสอบจะทำการทดสอบกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระคือมีแหล่งจ่ายอินพุตเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์และเอาต์พุตเป็นแหล่งพลังงานสำรองแบตเตอรี่ ซึ่งการทดสอบในงานวิจัยนี้จะพิจารณาการผลิตกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์และการประจุกำลังไฟฟ้าเก็บเข้าสู่แบตเตอรี่เท่านั้น จะไม่พิจารณาการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าเหมือนในการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เนื่องจากการทดสอบนี้จะมุ่งเน้นไปที่การปรับจุดการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ในแต่ละระดับค่าความเข้มแสง โดยการทดสอบชุดทดสอบจะใช้แสงอาทิตย์เทียมที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการด้วยการปรับแหล่งจ่ายแรงดันหนึ่งเฟสแบบปรับค่าได้ให้หลอดไฟมีค่าความเข้มแสงคงที่ ในส่วนของการทดสอบจะกำหนดให้ค่าความเข้มแสงมีค่าคงที่ที่ 200, 400, 600, 800 และ 1000 W/m^2 ตามลำดับ จากนั้นจะทำการวัดกระแสและแรงดันที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ พร้อมทั้งวัดกระแสและแรงดันที่ป้อนเก็บเข้าสู่แบตเตอรี่ แสดงผลการทดสอบชุดทดสอบได้ดังรูปที่ 4.47 ถึง 4.51 โดยสัญญาณช่องที่ 1 และ 2 คือแรงดันและกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามลำดับ และช่องสัญญาณที่ 3 และ 4 คือแรงดันและกระแสของแบตเตอรี่ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงโปรแกรมการตามรอยจุดกาลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ได้ในภาคผนวก ข. และคู่มือการใช้งานชุดชาร์จเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสแสดงได้ในภาคผนวก จ.



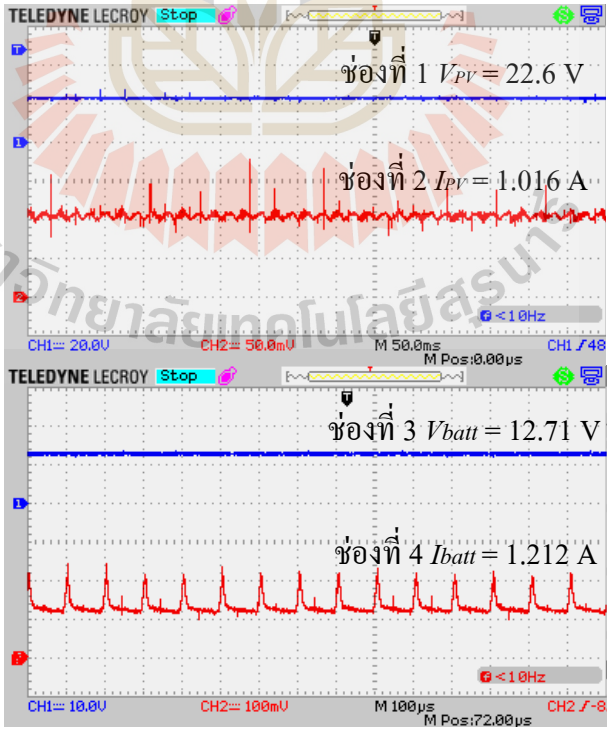
รูปที่ 4.47 ผลการทดสอบชุดทดสอบที่ความเข้มแสง 200 W/m^2



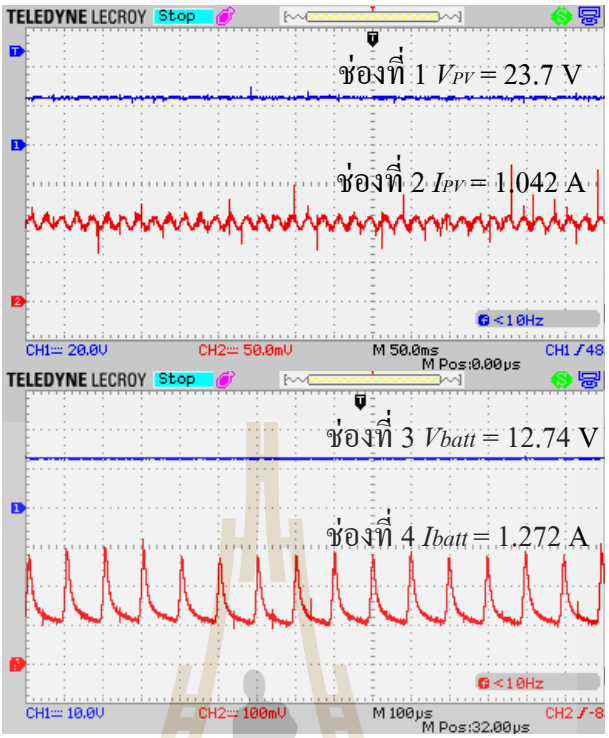
รูปที่ 4.48 ผลการทดสอบชุดทดสอบที่ความเข้มแสง 400 W/m^2



รูปที่ 4.49 ผลการทดสอบชุดทดสอบที่ความเข้มแสง 600 W/m^2



รูปที่ 4.50 ผลการทดสอบชุดทดสอบที่ความเข้มแสง 800 W/m^2

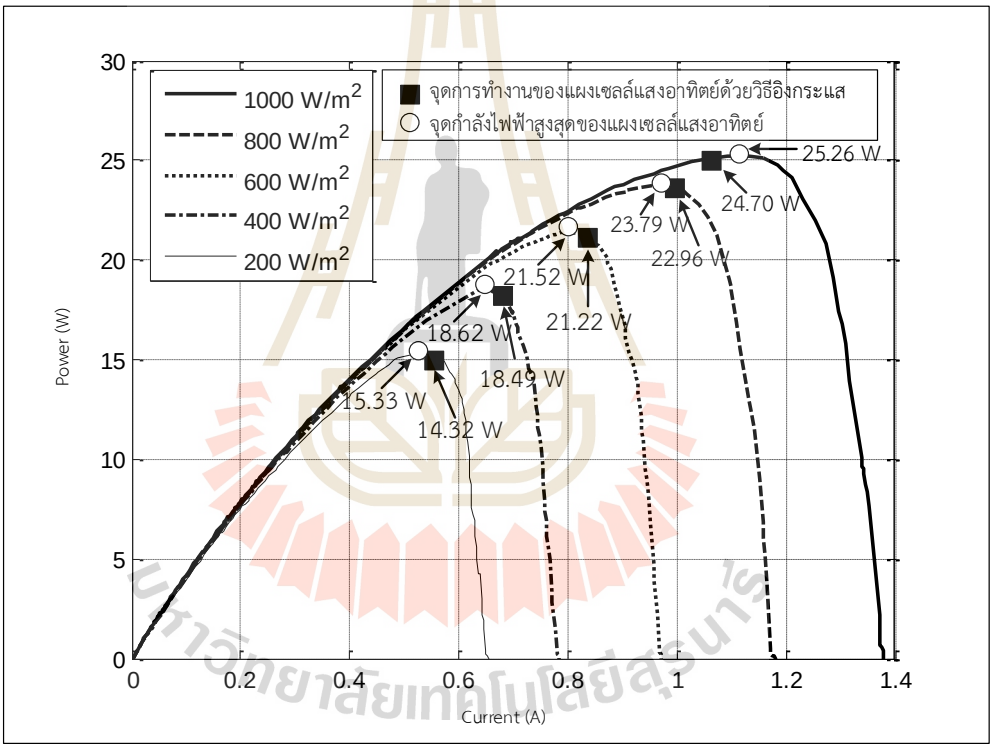


รูปที่ 4.51 ผลการทดสอบชุดทดสอบที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2

จากผลการทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส พบว่าที่ความเข้มแสงเท่ากับ 200 W/m^2 ในรูปที่ 4.47 จะได้ I_{PV} =0.584 A, P_{PV} =14.32 Wและเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 400 W/m^2 ในรูปที่ 4.48 จะได้ I_{PV} =0.714 A, P_{PV} =18.49 W และเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 600 W/m^2 ในรูปที่ 4.49 จะได้ I_{PV} =0.866 A, P_{PV} =21.22 W และเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 800 W/m^2 ในรูปที่ 4.50 จะได้ I_{PV} =1.016 A, P_{PV} =22.96 W และสุดท้ายเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 1000 W/m^2 ในรูปที่ 4.51 จะได้ I_{PV} =1.042 A, P_{PV} =24.70 W จากค่า I_{PV} และ P_{PV} ที่ได้ในแต่ละความเข้มแสงข้างต้นจะเห็นได้ว่าค่า I_{PV} มีค่าใกล้เคียงกระแสที่จุดกำลังสูงสุดและค่า P_{PV} มีค่าใกล้เคียงกำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด โดยสามารถแสดงจุดการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ในวิธีอิงกระแสที่ระดับค่าความเข้มแสงต่าง ๆ ในกราฟคุณลักษณะเฉพาะกำลังและกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 W ได้ในรูปที่ 4.52 และในส่วนทางด้านเอาต์พุตแบตเตอรี่ ถ้าความเข้มแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้มีค่ากระแสที่ป้อนเข้าสู่แบตเตอรี่มีค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งส่งผลทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่แบตเตอรี่มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยสามารถสรุปค่าแรงดันกระแส และกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตที่ได้ในแต่ละความเข้มแสงทั้งหมดดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส

ความเข้มแสง (W/m^2)	ทางด้านอินพุต			ทางด้านเอาต์พุต		
	V_{pv} (V)	I_{pv} (A)	P_{pv} (W)	V_{batt} (V)	I_{batt} (A)	P_{batt} (W)
200	24.4	0.584	14.32	12.43	0.754	9.37
400	25.9	0.714	18.49	12.63	0.963	12.16
600	24.5	0.866	21.22	12.70	1.142	14.50
800	22.6	1.016	22.96	12.71	1.212	15.41
1000	23.7	1.042	24.70	12.74	1.272	16.21



รูปที่ 4.52 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของกระแสและกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 W

จากกราฟแสดงจุดการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ในรูปที่ 4.52 เมื่อเทียบจุดการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีอิงกระแส(รูปสี่เหลี่ยมทึบ) กับจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (รูปวงกลมโปร่ง) ที่ระดับค่าความเข้มแสงต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าจุดการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีอิงกระแสมีค่าใกล้เคียงกับจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสสามารถปรับจุดการทำงานของแผง

เซลล์แสงอาทิตย์เพื่อดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ในแต่ละระดับค่าความเข้มแสง โดยถ้าปริมาณความเข้มแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ได้กระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระได้ อย่างไรก็ตามเพื่อเพิ่มสมรรถนะการทำงานของระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสให้ดียิ่งขึ้นจึงได้มีการนำเอาตรรกศาสตร์คลุมเครือเข้ามาประยุกต์ใช้งานร่วมกับวิธีอิงกระแสซึ่งจะนำเสนอในบทที่ 5 เป็นลำดับถัดไป

4.8 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระซึ่งประกอบไปด้วยหลักการทำงาน ขั้นตอนการตามรอยจุดกำลังสูงสุด การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB และเพื่อยืนยันผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นจึงได้มีการสร้างชุดทดสอบฮาร์ดแวร์เพื่อทดสอบว่าระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสสามารถสร้างใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ ซึ่งในส่วนของการสร้างชุดทดสอบจะมีการอธิบายถึงโครงสร้างของชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ หลักการทำงาน การออกแบบการสร้างและการทดสอบวงจรควบคุมในส่วนต่าง ๆ ที่ประยุกต์ใช้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ พร้อมทั้งการหากราฟคุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริง การทดสอบหาค่าความผิดพลาดและค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสที่เหมาะสม จากผลการทดสอบของชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้นพบว่าวิธีอิงกระแสสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ ณ ความเข้มแสงขณะนั้นซึ่งสอดคล้องกับหลักการทำงานและผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้นำเสนอไว้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือ

5.1 บทนำ

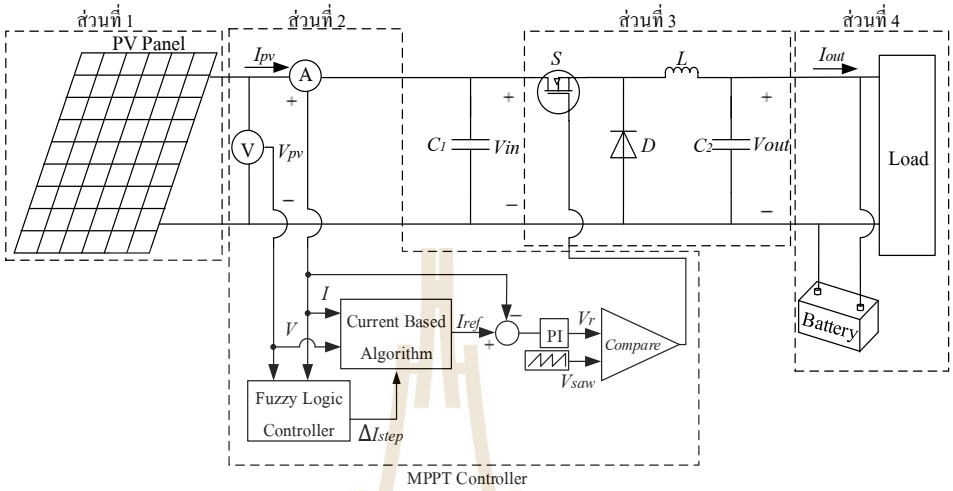
ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสในบทที่ผ่านมาจะอาศัยค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้า ΔI_{step} ที่เหมาะสมกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์คงที่เพียงค่าเดียวเพื่อหาจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาการเลือกกำหนดขนาดค่าดังกล่าวที่ไม่เหมาะสมกับระบบได้เช่นเดียวกันกับวิธีรบกวนและสังเกต ดังนั้นเพื่อพัฒนาวิธีอิงกระแสให้มีประสิทธิภาพการตามรอยจุดกำลังสูงสุดที่ดียิ่งขึ้น ในบทนี้จึงได้นำเสนอระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วย วิธีอิงกระแสร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือ โดยเป็นการประยุกต์ใช้งานตรรกศาสตร์ดังกล่าวในรูปแบบของตัวควบคุมสามารถเรียกได้อีกอย่างว่า ตัวควบคุมฟัซซี (Fuzzy Logic Controller, FLC) นำมาใช้งานร่วมกับวิธีอิงกระแสเพื่อแก้ปัญหาการเลือกกำหนดค่า ΔI_{step} ที่เหมาะสมกับระบบและการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะทำให้ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดมีเวลาการตอบสนองที่รวดเร็วขึ้นและทำให้จุดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เข้าใกล้จุดกำลังสูงสุดมากยิ่งขึ้นอีกด้วย เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายถึงหลักการทำงานของวิธีอิงกระแสที่มีการทำงานร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือ การออกแบบตัวควบคุมตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือที่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB นอกจากนี้ยังได้อธิบายถึงการออกแบบและการเขียนโปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR สำหรับใช้ในชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ พร้อมทั้งนำเสนอผลการทดสอบชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5.2 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

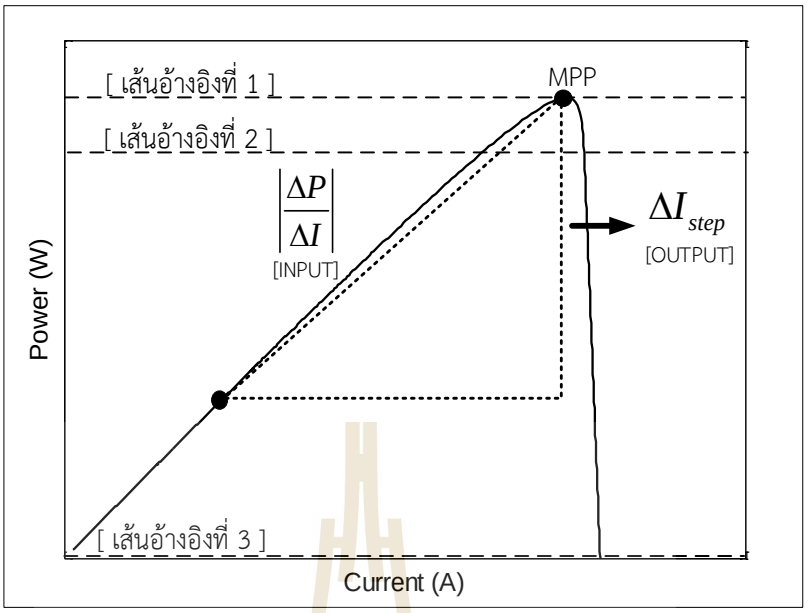
ระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือนั้นประกอบด้วย 4 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนที่ 2 ระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุด ส่วนที่ 3 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ และส่วนที่ 4 โหลดหรือแหล่งพลังงานสำรองแบตเตอรี่ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 จากรูประบบดังกล่าวจะเห็นได้ว่าส่วนประกอบทั้ง 4 ส่วนของระบบเหมือนกับระบบในวิธีอิงกระแส แต่จะแตกต่างกันแค่เพียงในส่วนที่ 2 มีตรรกศาสตร์คลุมเครือเป็นตัวควบคุมเพิ่มเข้ามาในระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุด ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวทำหน้าที่ออกแบบและเลือกกำหนดค่า ΔI_{step} ที่เหมาะสม จากนั้นจะส่งค่าให้กับอัลกอริธึมของวิธีอิงกระแส

เพื่อใช้ในการเพิ่มหรือลดกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับกำหนดจุดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะแวดล้อมต่าง ๆ



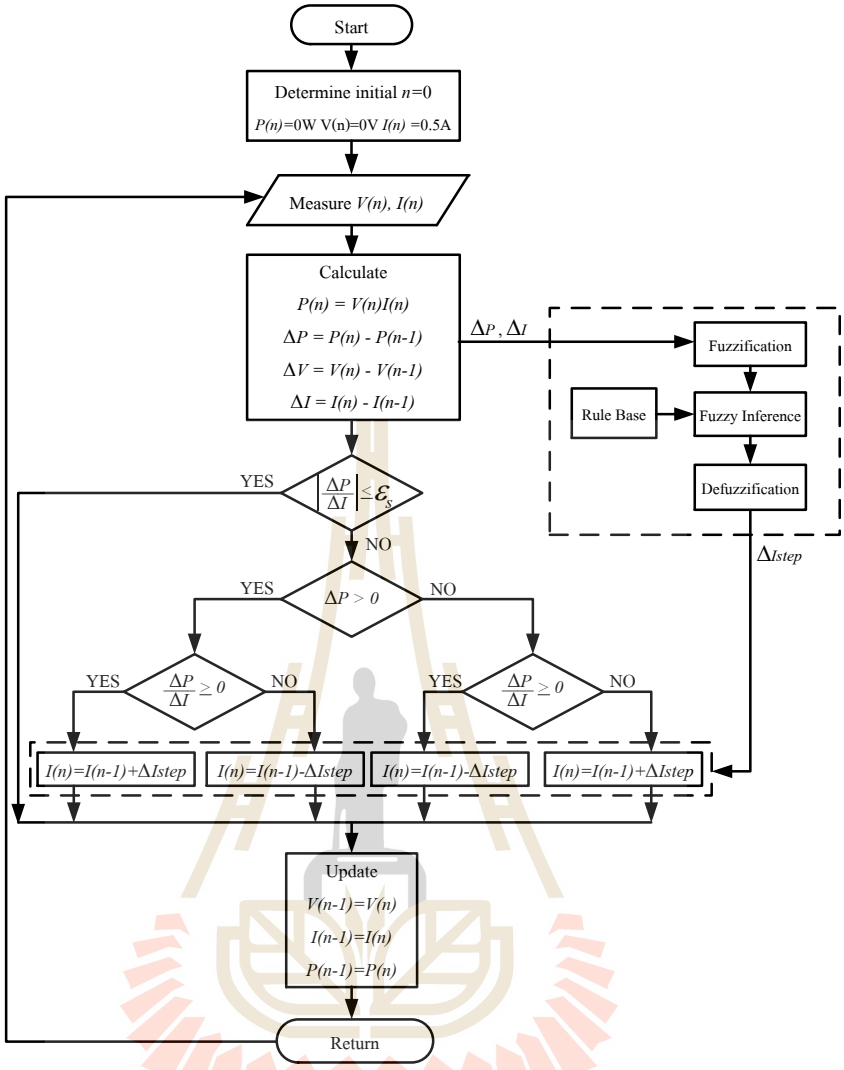
รูปที่ 5.1 ระบบไฟฟ้าที่พิจารณาสำหรับงานวิจัย

โดยหลักการทำงานและลำดับขั้นตอนการตรวจสอบของวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือจะมีขั้นตอนและหลักการทำงานเหมือนกับวิธีอิงกระแส แต่จะมีในส่วนที่เพิ่มเข้ามาคือส่วนของการหาค่า ΔI_{step} ที่ใช้ในขั้นตอนการเพิ่มหรือลดกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในวิธีอิงกระแส ดังนั้นเนื้อหาในส่วนนี้จะอธิบายถึงหลักการหาค่า ΔI_{step} ที่ได้จากตรรกศาสตร์คลุมเครือรวมทั้งขั้นตอนการทำงานของวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือ โดยความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของตรรกศาสตร์คลุมเครือในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้อินพุตของตรรกศาสตร์คลุมเครือเป็นการเปรียบเทียบกำลังและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ($\left|\frac{\Delta P}{\Delta I}\right|$) ส่วนเอาต์พุตของตรรกศาสตร์คลุมเครือจะกำหนดให้เป็นค่าการเปลี่ยนแปลงกระแส (ΔI_{step}) ซึ่งสามารถพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอินพุต $\left|\frac{\Delta P}{\Delta I}\right|$ ที่จะทำให้ได้ค่าเอาต์พุต ΔI_{step} ได้จากกราฟคุณลักษณะเฉพาะกำลังและกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ลักษณะเฉพาะของกำลัง และกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

พิจารณาจากรูปที่ 5.2 เป็นกราฟคุณลักษณะเฉพาะของกำลังและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เลือกใช้ในการออกแบบค่าอินพุตของตรรกศาสตร์คลุมเครือ ซึ่งจะออกแบบด้วยการขีดแบ่งเส้นอ้างอิงภายในกราฟออกเป็น 3 ระดับที่แตกต่างกันตามสัดส่วนดังรูปคือ เส้นอ้างอิงที่ 1, เส้นอ้างอิงที่ 2 และเส้นอ้างอิงที่ 3 โดยกำหนดให้การทำงานของตรรกศาสตร์คลุมเครือมีลักษณะดังนี้คือ ถ้าจุดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ระหว่างเส้นอ้างอิงเส้นใด ตรรกศาสตร์คลุมเครือจะคำนวณหาค่าความชันของ $\left|\frac{\Delta P}{\Delta I}\right|$ โดยเทียบระหว่างจุดการทำงานปัจจุบันกับจุดกำลังสูงสุด MPP จากนั้นจะให้ค่าเอาต์พุต ΔI_{step} ค่าหนึ่งออกมาตามค่าความชันของอินพุตที่ได้ ทั้งนี้ระดับของเส้นอ้างอิง ค่าอินพุตและค่าเอาต์พุตที่ใช้จะขึ้นอยู่กับการออกแบบโครงสร้างต่าง ๆ ของตรรกศาสตร์คลุมเครือซึ่งจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 5.3 โดยสามารถแสดงแผนผังไดอะแกรมลำดับขั้นตอนการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แผนผังไดอะแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือ

แผนภาพลำดับการทำงานของวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือในรูปที่ 5.3 ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดจะเริ่มต้นการทำงานจากการกำหนดค่าเริ่มต้นของกำลัง กระแส และแรงดันไฟฟ้าที่รอบ $n=0$ ให้กับอัลกอริธึมเหมือนกับวิธีอิงกระแส จากนั้นจะทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า $V(n)$ และกระแสไฟฟ้า $I(n)$ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แล้วนำมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากสมการ $P(n)=V(n)I(n)$ พร้อมทั้งหาค่าการเปลี่ยนแปลงของกำลัง (ΔP) และกระแสไฟฟ้า (ΔI) ในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อนหน้า เพื่อที่จะนำไปใช้ในขั้นตอนการตรวจสอบเงื่อนไขทั้ง 4 เงื่อนไขในวิธีอิงกระแสต่อไป ในขณะเดียวกันตรรกศาสตร์คลุมเครือก็จะรับค่า ΔP และ ΔI ที่คำนวณได้มาเป็นค่าอินพุตและผ่านกระบวนการตรวจสอบตามโครงสร้างของตรรกศาสตร์คลุมเครือที่ออกแบบ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าเอาต์พุต ΔI_{step} ออกมาและส่งค่าดังกล่าวเข้าสู่

ขั้นตอนการเพิ่มหรือลดกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการตรวจสอบเงื่อนไขแล้วในอัลกอริธึมของวิธีอิงกระแส ซึ่งเมื่ออัลกอริธึมเข้าสู่เงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่ง ระบบจะทำการปรับเพิ่มลดค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ตามเงื่อนไขที่ได้ ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าในคาบเวลาปัจจุบัน $I(n)$ ที่ถูกปรับเพิ่มลดค่าในรูปที่ 5.3 นั้นคือค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิง I_{ref} ที่ทำให้ได้กระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุดดังที่พิจารณาในรูปที่ 5.1 จากนั้นอัลกอริธึมจะทำการอัพเดตค่า $P(n-1)$ $V(n-1)$ และ $I(n-1)$ ที่ได้ใหม่พร้อมทั้งเริ่มต้นการทำงานใหม่อีกครั้ง รวมไปถึงตรรกศาสตร์คลุมเครือก็จะทำการรับค่าอินพุตเพื่อคำนวณหาค่าเอาต์พุตพร้อมทั้งส่งค่าไปยังอัลกอริทึมของระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดใหม่อีกครั้งเช่นกัน ซึ่งการออกแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือสำหรับการหาค่า ΔI_{step} ที่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาและเหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

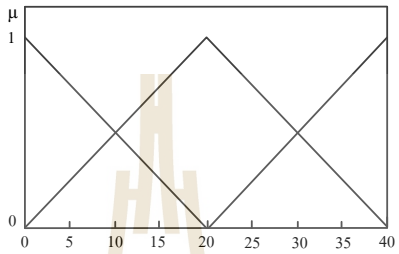
5.3 การออกแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ

การนำตรรกศาสตร์คลุมเครือมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ เริ่มต้นจะต้องทำการออกแบบโครงสร้างของตรรกศาสตร์คลุมเครือดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 ได้แก่ การเลือกใช้รูปร่างฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิก การออกแบบตัวแปรเชิงภาษาและค่าเชิงภาษา การออกแบบกฎของตรรกศาสตร์คลุมเครือ และการเลือกใช้วิธีการอนุมานตรรกศาสตร์คลุมเครือ การออกแบบโครงสร้างต่าง ๆ จะต้องมีความเหมาะสมกับระบบไฟฟ้าที่พิจารณาหรือกำหนดการออกแบบโดยผู้ใช้งานซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดการออกแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือได้ดังนี้

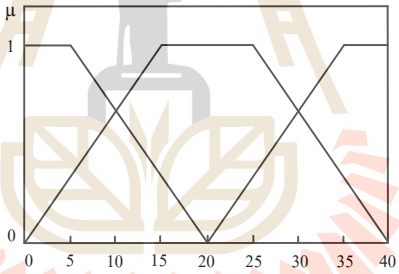
5.3.1 การทดสอบรูปร่างฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกสำหรับระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุด

การออกแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือสำหรับระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดในระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 5.1 จะต้องมีการกำหนดค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตของตรรกศาสตร์คลุมเครือที่ใช้งานด้วยรูปร่างฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิก ทั้งนี้การออกแบบรูปร่างฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกนั้นขึ้นอยู่กับกระบวนการคิดแก้ไขปัญหาที่ศึกษาและเหมาะสมกับระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ในหัวข้อนี้จึงได้ออกแบบรูปร่างฟังก์ชันโดยใช้วิธีการทดสอบเปรียบเทียบการใช้รูปร่างฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกด้วยกัน 4 แบบคือ รูปสามเหลี่ยม รูปสี่เหลี่ยมคางหมู รูปเกาส์เซียนและรูประฆังคว่ำแสดงได้ดังรูปที่ 5.4 ถึง 5.7 ตามลำดับ โดยการทดสอบดังกล่าวจะทำการทดสอบระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 W ที่อ้างอิงสภาวะมาตรฐานความเข้มแสง 1000 W/m^2 อุณหภูมิ 25 $^{\circ}$C ด้วยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

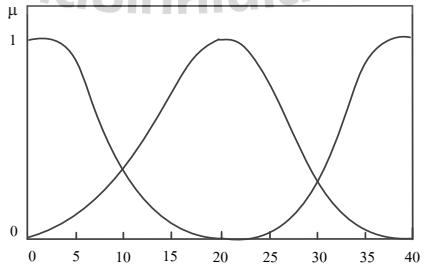
และกำหนดให้ใช้โครงสร้างส่วนต่าง ๆ ของตรรกศาสตร์คลุมเครือเหมือนกันหมด ได้แก่ การกำหนดตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของอินพุตและเอาต์พุตของตรรกศาสตร์คลุมเครือ กฎของฟัซซีและวิธีการอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno ที่มีการทำดีฟัซซีด้วยวิธีหาค่าน้ำหนักเฉลี่ย โดยการทดสอบนั้นจะพิจารณาเฉพาะผลของรูปร่างฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกที่มีผลต่อสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังสูงสุดเท่านั้น



รูปที่ 5.4 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกรูปสามเหลี่ยม

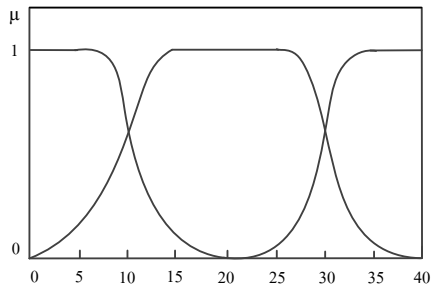


รูปที่ 5.5 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกรูปสี่เหลี่ยมคางหมู



รูปที่ 5.6 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกรูปเกาส์เซียน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 5.7 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกรูประฆังคว่ำ

รูปร่างฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกจากรูปที่ 5.4 – 4.7 เมื่อนำผลการทดสอบลักษณะรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกแต่ละแบบที่ได้จากการจำลองสถานการณ์มาเทียบกับกำลังไฟฟ้าอ้างอิง จะสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าและค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบลักษณะรูปร่างฟังก์ชันสมาชิกของตรรกศาสตร์คลุมเครือสำหรับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอ้างอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือ

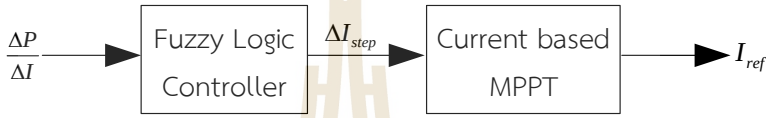
รูปร่างฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิก	ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ที่สภาวะมาตรฐาน 1000 W/m^2 , 25 °C		กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (W)
	ภาวะชั่วครู่ถึงสภาวะอยู่ตัว	เฉพาะสภาวะอยู่ตัว	
รูปสามเหลี่ยม	0.3382	0.0312	39.9691
รูปสี่เหลี่ยมคางหมู	0.3406	0.0331	39.9671
รูปเกาส์เซียน	0.3478	0.0331	39.9671
รูประฆังคว่ำ	0.3425	0.0335	39.9667

พิจารณาจากตารางที่ 5.1 พบว่าฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกอินพุตรูปสามเหลี่ยมให้ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วงสภาวะอยู่ตัวมากที่สุดเท่ากับ 39.9691 W และมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเมื่อเทียบกับกำลังไฟฟ้าอ้างอิงขนาด 40 W เท่ากับ 0.0312 ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการทดสอบดังกล่าวจะเห็นได้ว่าผลที่ออกมาไม่ได้มีนัยยะหรือความแตกต่างในการเลือกรูปร่างฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของอินพุตมากนัก ดังนั้นงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะเลือกใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือที่มีรูปร่างฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของอินพุตรูปสามเหลี่ยมสำหรับนำไปใช้ในระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุด เนื่องจากเป็นรูปร่างฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกที่มีการคำนวณค่าความเป็นสมาชิกที่ง่ายและสะดวกในการเขียนโปรแกรมลงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และในส่วนของเอาต์พุตนั้นได้เลือกใช้วิธีการอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno ทำให้มีรูปร่างฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตมีลักษณะเป็นรูป

เส้นตรงโทนที่มีลักษณะเป็นค่าคงที่แทนการใช้รูปร่างฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกแบบฟัซซีเซต เนื่องจากวิธีการอนุมานดังกล่าวค่อนข้างสะดวกและง่ายต่อการรวมกฎหาค่าความเป็นสมาชิกเอาต์พุต

5.3.2 การออกแบบตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษา

จากการอธิบายหลักการทำงานของวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือที่ใช้ในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดในหัวข้อที่ 5.2 สามารถแสดงระบบควบคุมการหาค่า ΔI_{step} สำหรับอัลกอริธึมในวิธีอิงกระแสโดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือได้ดังรูปที่ 5.8



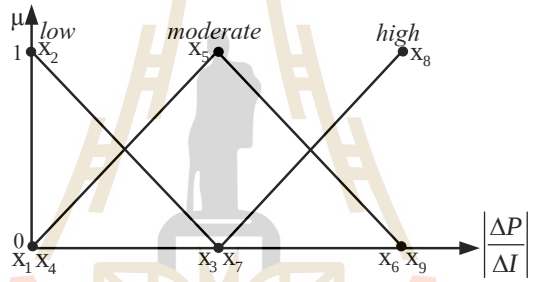
รูปที่ 5.8 ระบบควบคุมการหาค่า ΔI_{step} สำหรับอัลกอริธึมในวิธีอิงกระแสโดยใช้ตรรกศาสตร์คลุมเครือ

จากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่า อินพุตของตัวควบคุมคือ ค่าการเปรียบเทียบกำลังและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ($\left|\frac{\Delta P}{\Delta I}\right|$) และเอาต์พุตของตัวควบคุมคือ ค่าการเปลี่ยนแปลงกระแส (ΔI_{step}) ที่จะถูกป้อนค่าให้กับอัลกอริธึมของวิธีอิงกระแสในขั้นตอนเพิ่มลดกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด การออกแบบตัวแปรทางภาษาและค่าเชิงภาษาของตรรกศาสตร์คลุมเครือสำหรับระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดโดยพื้นฐานจะกำหนดให้ค่าเชิงภาษามีจำนวน 3 ค่า สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.2

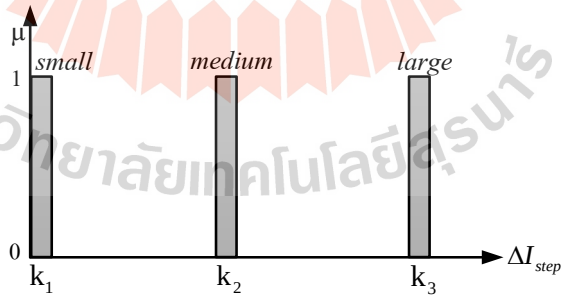
ตารางที่ 5.2 ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาของตรรกศาสตร์คลุมเครือสำหรับระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุด

ค่าของระบบ	ตัวแปรภาษาและความหมาย		ค่าชิงภาษาและความหมาย	
	ตัวแปรภาษา	ความหมาย	ค่าเชิงภาษา	ความหมาย
อินพุต	$\left\|\frac{\Delta P}{\Delta I}\right\|$	กำลังและกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	*low*	ค่าน้อย
			moderate	ค่าปานกลาง
			high	ค่ามาก
เอาต์พุต	ΔI_{step}	ค่าการเปลี่ยนแปลงกระแส	*small*	ขนาดเล็ก
			medium	ขนาดปานกลาง
			large	ขนาดใหญ่

จากตารางที่ 5.2 อินพุต $\left|\frac{\Delta P}{\Delta I}\right|$ เป็นตัวแปรทางภาษาของตรรกศาสตร์คลุมเครือกำหนดให้มีค่าเชิงภาษาจำนวน 3 ค่าคือ *"low" "moderate" และ "high"* และเอาต์พุต ΔI_{step} เป็นตัวแปรทางภาษาของตรรกศาสตร์คลุมเครือกำหนดให้มีค่าเชิงภาษาจำนวน 3 ค่าเช่นกันคือ *"small" "medium"* และ *"large"* ซึ่งสามารถดูความหมายของค่าเชิงภาษาดังที่ได้กล่าวไปข้างต้นได้ดังตารางที่ 5.2 การออกแบบตัวแปรทางภาษาให้มีค่าเชิงภาษาสำหรับนำไปใช้ควบคุมในระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดโดยพื้นฐานการออกแบบโครงสร้างตรรกศาสตร์คลุมเครือจะกำหนดให้ใช้ค่าเชิงภาษาจำนวน 3 ค่า ทั้งนี้ถ้าหากต้องการให้ประสิทธิภาพของตัวควบคุมดียิ่งขึ้นสามารถทำได้โดยการกำหนดเพิ่มจำนวนค่าเชิงภาษาของตรรกศาสตร์คลุมเครือ แต่ในงานวิจัยนี้ค่าเชิงภาษาจำนวน 3 ค่ามีความเหมาะสมและเพียงพอต่อความต้องการของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา ซึ่งสามารถแสดงเป็นลักษณะรูปร่างฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุตได้ดังรูปที่ 5.9 และ 4.10 ตามลำดับ



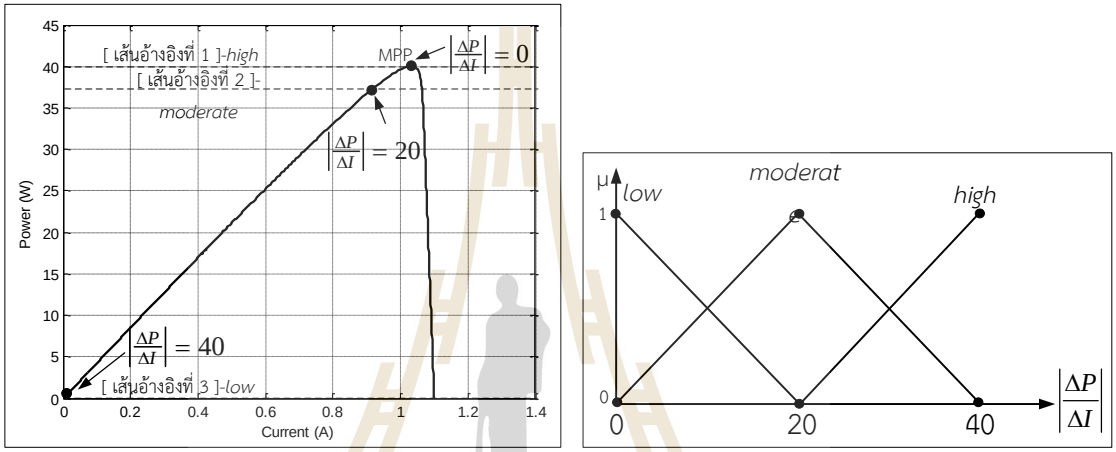
รูปที่ 5.9 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของอินพุต



รูปที่ 5.10 ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ของอินพุต $\left|\frac{\Delta P}{\Delta I}\right|$ และเอาต์พุต ΔI_{step} ที่ได้จากกราฟคุณลักษณะเฉพาะกำลังและกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.2 ถ้าจุดการทำงานจุดปัจจุบันของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ไกลจากจุด MPP ค่าความชันอินพุต $\left|\frac{\Delta P}{\Delta I}\right|$ จะมีค่ามากทำให้ค่าเอาต์พุต ΔI_{step} มีขนาดใหญ่ แต่ถ้าจุดการทำงานจุดปัจจุบันของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ใกล้จุด

MPP ค่าความชันอินพุต $\left|\frac{\Delta P}{\Delta I}\right|$ จะมีค่าน้อยทำให้ค่าเอาต์พุต ΔI_{step} มีขนาดเล็กหรือขนาดเข้าใกล้ค่าศูนย์ และจากการพิจารณาลักษณะการทำงานของตรรกศาสตร์คลุมเครือในเส้นโค้ง P - I นั้นเพื่อให้การออกแบบค่าตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกมีความง่าย เป็นลักษณะทั่วไป และเป็นแนวทางในการเพิ่มขนาดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคต งานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบให้ค่าตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของอินพุตในรูปที่ 5.9 มีค่าตามขนาดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานขนาด 40 W แสดงได้ดังรูปที่ 5.11



(ก) เส้นโค้ง P-I ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานขนาด 40 W (ข) ฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของอินพุต

รูปที่ 5.11 การออกแบบค่าตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกอินพุตของตรรกศาสตร์คลุมเครือ

พิจารณาจากรูปที่ 5.11 การออกแบบค่าตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของอินพุตที่ค่าเชิงภาษา *low* ตำแหน่ง x_1, x_2 และ x_3 มีค่าเท่ากับ 0, 0 และ 20 ตามลำดับ ค่าตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกที่ค่าเชิงภาษา *medium* ตำแหน่ง x_4, x_5 และ x_6 มีค่าเท่ากับ 0, 20 และ 40 ตามลำดับ และสุดท้ายตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกที่ค่าเชิงภาษา *high* ตำแหน่ง x_7, x_8 และ x_9 มีค่าเท่ากับ 20, 40 และ 40 ตามลำดับ โดยที่ค่าตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของอินพุตในส่วนของการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และในส่วนของชุดทดสอบฮาร์ดแวร์นั้นจะกำหนดให้มีค่าเท่ากัน แต่ในส่วนของค่าตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตตำแหน่ง k_1, k_2 และ k_3 ดังรูปที่ 5.10 สำหรับการจำลองสถานการณ์จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0, 0.0015 และ 0.003 ตามลำดับ และในส่วนของชุดทดสอบฮาร์ดแวร์จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0, 0.05 และ 0.1 ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวได้จากการทดสอบเปรียบเทียบในชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ในหัวข้อที่ 4.6 ทั้งนี้สามารถแสดงผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และผลการทดสอบชุดทดสอบของระบบการ

ตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือได้ในหัวข้อที่ 5.4 และ 5.6 ตามลำดับ

5.3.3 การออกแบบกฎของตรรกศาสตร์คลุมเครือ

การออกแบบค่าเชิงภาษาอินพุตและเอาต์พุตของตรรกศาสตร์คลุมเครือจำนวน 3 ค่าทำให้สามารถออกแบบกฎของฟัซซีได้จำนวน 3 กฎ กฎของฟัซซีประกอบไปด้วยสองส่วนหลักคือ ส่วน IF และส่วน THEN ในทฤษฎีฟัซซี ค่าเงื่อนไขใน IF จะมีความเป็นฟัซซีในระดับหนึ่ง ส่วน THEN จะถูกประเมินค่าด้วยระดับความเป็นสมาชิก ซึ่งจะให้ค่าที่สัมพันธ์ในระดับนั้นๆ ทั้งนี้จากการออกแบบฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิก ตัวแปรภาษาและค่าเชิงภาษาที่สอดคล้องกับกราฟคุณลักษณะเฉพาะกำลังและกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40W ที่ใช้ (ในหัวข้อที่ 5.3.1 และ 5.3.2) ผู้เขียนจะออกแบบให้กฎของฟัซซีมีจำนวน 1 อินพุตและ 1 เอาต์พุต ทั้งหมดจำนวน 3 กฎที่จำเป็นและมีโอกาสเกิดขึ้นเท่านั้น (จำนวนกฎจะขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรภาษาภายในระบบที่ออกแบบ) เพื่อลดความยุ่งยากในการออกแบบกฎของฟัซซีในงานต่อไปภายหลัง

ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดและอธิบายความหมายกฎของฟัซซีแต่ละข้อที่ได้ออกแบบดังนี้

กฎข้อที่ 1: IF [$\left|\frac{\Delta P}{\Delta I}\right|$ =*low*] THEN [ΔI_{step} =*small*]

ความหมายของกฎข้อที่ 1 ถ้าค่าอินพุต $\left|\frac{\Delta P}{\Delta I}\right|$ มีค่าเท่ากับ *low* แล้ว กำหนดให้ค่าเอาต์พุต ΔI_{step} เท่ากับ *small* จะมีหมายความว่า ถ้าค่าความชัน $\left|\frac{\Delta P}{\Delta I}\right|$ มีค่าน้อย นั่นคือจุดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในพื้นที่ส่วนที่ 1 ของเส้นโค้ง P - I ใกล้จุด MPP จะกำหนดให้ค่าเอาต์พุต ΔI_{step} มีขนาดเล็ก

กฎข้อที่ 2: IF [$\left|\frac{\Delta P}{\Delta I}\right|$ =*moderate*]THEN [ΔI_{step} =*medium*]

ความหมายของกฎข้อที่ 2 ถ้าค่าอินพุต $\left|\frac{\Delta P}{\Delta I}\right|$ มีค่าเท่ากับ *moderate* แล้ว กำหนดให้ค่าเอาต์พุต ΔI_{step} เท่ากับ *medium* จะมีหมายความว่า ถ้าค่าความชัน $\left|\frac{\Delta P}{\Delta I}\right|$ มีค่าปานกลาง นั่นคือจุดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในพื้นที่ส่วนที่ 2 ของเส้นโค้ง P - I จะกำหนดให้ค่าเอาต์พุต ΔI_{step} มีขนาดปานกลาง

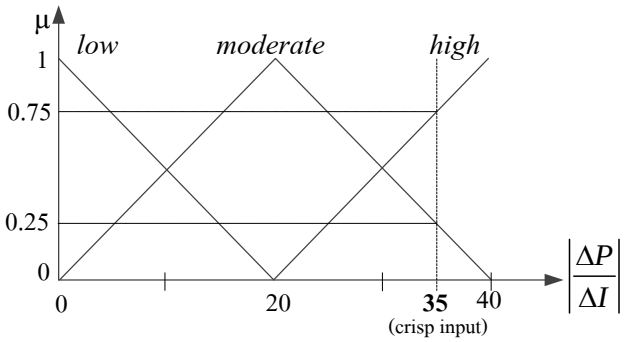
กฎข้อที่ 3: IF [$\left|\frac{\Delta P}{\Delta I}\right|$ =*high*] THEN [ΔI_{step} =*large*]

ความหมายของกฎข้อที่ 3 ถ้าค่าอินพุต $\left|\frac{\Delta P}{\Delta I}\right|$ มีค่าเท่ากับ *high* แล้ว กำหนดให้ค่าเอาต์พุต ΔI_{step} เท่ากับ *large* จะมีหมายความว่า ถ้าค่าความชัน $\left|\frac{\Delta P}{\Delta I}\right|$ มีค่ามาก นั่นคือจุดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในพื้นที่ส่วนที่ 3 ของเส้นโค้ง P - I ไกลจากจุด MPP มาก จะกำหนดให้ค่าเอาต์พุต ΔI_{step} มีขนาดใหญ่

การเปลี่ยนแปลงจุดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังจุดกำลังสูงสุด MPP ตามกฎของฟัซซีทั้ง 3 ข้อข้างต้น พบว่าถ้าจุดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์จุดปัจจุบันอยู่ไกลจากจุด MPP ตรรกศาสตร์คลุมเครือจะให้ค่า ΔI_{step} ที่มีขนาดใหญ่กับวิธีอิงกระแส ทำให้วิธีอิงกระแสสามารถเพิ่มหรือลดกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ให้เข้าใกล้จุดกำลังสูงสุดรวดเร็วขึ้น มีผลให้ใช้เวลาในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดรวดเร็วมากยิ่งขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม ในทางกลับกันถ้าจุดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์จุดปัจจุบันอยู่ใกล้จุด MPP ตรรกศาสตร์คลุมเครือจะให้ค่า ΔI_{step} ที่มีขนาดเล็กกับวิธีอิงกระแส เพื่อให้จุดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เข้าใกล้จุดกำลังสูงสุดและไม่ทำให้เกิดการกวัดแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะอยู่ตัว ซึ่งการทำงานของตรรกศาสตร์คลุมเครือสามารถเข้าเงื่อนไขของกฎฟัซซีได้หลายข้อและการออกแบบกฎของฟัซซีจำนวน 3 กฎสำหรับควบคุมระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดมีความเหมาะสมและเพียงพอต่อความต้องการของระบบไฟฟ้าที่พิจารณา

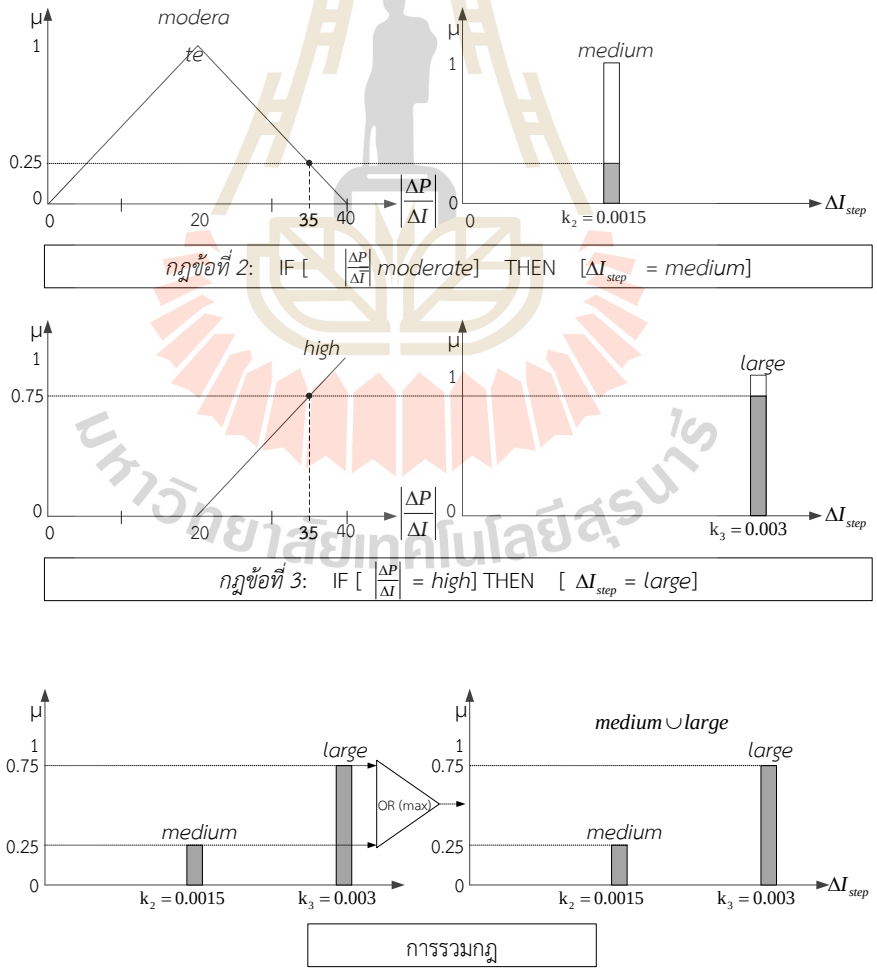
5.3.4 การอนุมานและการทำดีฟัซซีของตรรกศาสตร์คลุมเครือสำหรับระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุด

กระบวนการอนุมานฟัซซีคือกระบวนการส่งค่าอินพุตของระบบที่ได้ออกแบบไปเป็นค่าเอาต์พุตโดยใช้ทฤษฎีทางฟัซซี ซึ่งประกอบไปด้วย การทำฟัซซี การประเมินกฎฟัซซี การรวมกฎ และการทำดีฟัซซี ในหัวข้อนี้จึงได้แสดงตัวอย่างกระบวนการอนุมานฟัซซีด้วยวิธี Takagi-Sugeno สำหรับระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือที่ได้จากการกำหนดออกแบบโครงสร้างของตรรกศาสตร์คลุมเครือในส่วนต่าง ๆ เริ่มแรกนั้นได้ทำการทำฟัซซีดังรูปที่ 5.12 โดยสมมุติให้ค่าอินพุตกำลังและกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์($\left|\frac{\Delta P}{\Delta I}\right|$)เท่ากับ 35 ตามตำแหน่งที่ปรากฏคือค่าอินพุต $\left|\frac{\Delta P}{\Delta I}\right|$ ตกอยู่ในฟัซซีเซตค่าเชิงภาษา *moderate* และ *high* ที่มีค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.25 และ 0.75 ตามลำดับ



รูปที่ 5.12 การทำฟัซซีของระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือ

การประเมินกฎฟัซซีและการรวมกฎซึ่งสามารถอธิบายเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 5.13 พบว่าค่าตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของอินพุต $\left|\frac{\Delta P}{\Delta I}\right|$ เข้าเงื่อนไขของกฎฟัซซีข้อที่ 2 และ 3 ทำให้ได้ค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุต ΔI_{step} อยู่ในเซตเส้นตรงโทน *medium* และ *large* ตรงกับค่าคงที่ 0.0015 และ 0.003 ตามลำดับ จากนั้นจะดำเนินการรวมกฎด้วยการประมวลค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตเซต *medium* และ *large* โดยใช้ตัวกระทำ OR เพื่อหาค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตสูงสุดของแต่ละเซตและทำการรวมผลลัพธ์ของค่าความเป็นสมาชิกเอาต์พุตเข้าด้วยกันให้เป็นเซตเดียวด้วยตัวกระทำฟัซซีแบบ Union และสุดท้ายการทำดีฟัซซีเพื่อหาค่าเอาต์พุตชัดเจนจากผลลัพธ์เอาต์พุตเส้นตรงโทนจะใช้วิธีค่าน้ำหนักเฉลี่ยแสดงได้ดังรูปที่ 5.14 และสามารถแสดงการคำนวณเพื่อหาค่าเอาต์พุตชัดเจนได้ดังสมการที่ (5-1) จากการคำนวณจะได้ค่าเอาต์พุตชัดเจนมีค่าเท่ากับ 0.002625 ซึ่งหมายความว่าตรรกศาสตร์คลุมเครือจะให้ค่า ΔI_{step} เท่ากับ 0.002625 กับวิธีอิงกระแส เพื่อเพิ่มหรือลดกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่าเท่ากับกระแสที่จุดกำลังสูงสุด



รูปที่ 5.13 การอนุมานฟัซซีแบบ Takagi-Sugeno

$$x_{WA} = \frac{\sum_{n=1}^{n} \mu(y_n) \times y_n}{\sum_{n=1}^{n} \mu(y_n)}$$

$$= \frac{\left(\mu(\mathrm{k}_2) \times \mathrm{k}_2\right) + \left(\mu(\mathrm{k}_3) \times \mathrm{k}_3\right)}{\mu(\mathrm{k}_2) + \mu(\mathrm{k}_3)} \quad \text{.....(5-1)}$$

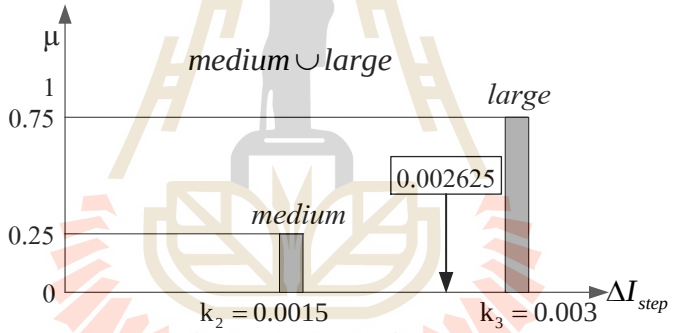
$$= \frac{(0.25 \times 0.0015) + (0.75 \times 0.003)}{0.25 + 0.75}$$

$$= 0.002625$$

โดยที่ $\mu(y_n)$ คือ ค่าความเป็นสมาชิกของฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุตตำแหน่งที่ n

y_n คือ ค่าคงที่ของเอาต์พุตที่เป็นเส้นตรงตำแหน่งที่ n

n คือ เลขจำนวนจริง 1, 2, 3 ..., n



รูปที่ 5.14 ค่าเอาต์พุตชัดเจนที่ได้จากการทำดีฟัซซีด้วยวิธีค่าน้ำหนักเฉลี่ย

5.4 การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

เพื่อยืนยันว่าตรรกศาสตร์คลุมเครือที่ออกแบบสามารถใช้งานร่วมกับวิธีอิงกระแสและสามารถทำให้ดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้นำเสนอการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของระบบในรูปที่ 5.1 โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แสดงดังตารางที่ 5.3 และอาศัยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ในการจำลองสถานการณ์รายละเอียดชุดบล็อกสำหรับการจำลองสถานการณ์แสดงได้ในภาคผนวก ค.

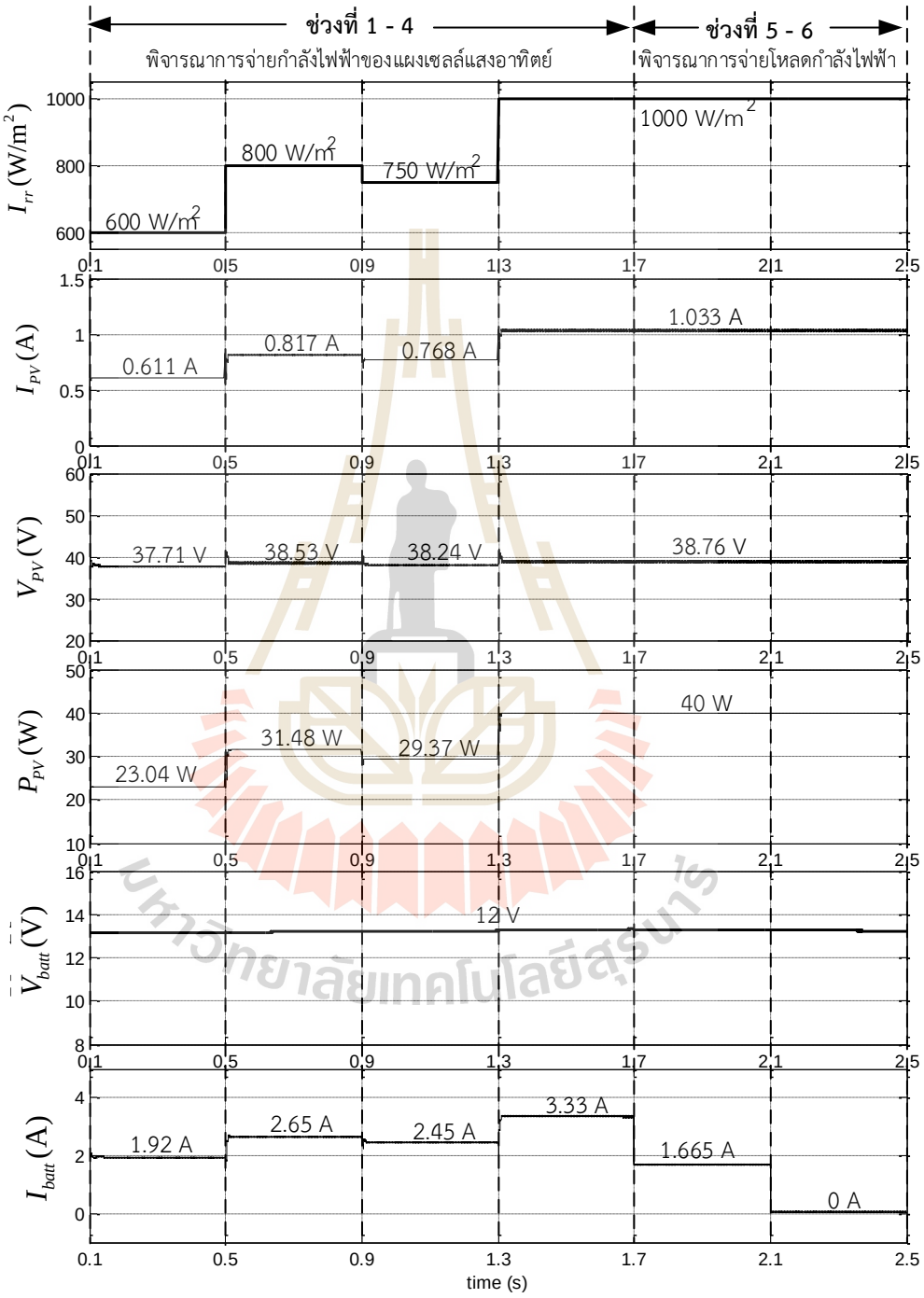
ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนต่าง ๆ ของระบบไฟฟ้าที่พิจารณาในรูปที่ 5.1

พารามิเตอร์แผงเซลล์แสงอาทิตย์	**ค่า**	**รายละเอียด**
V_{mpp}	38.73 V	แรงดันที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด
I_{mpp}	1.033 A	กระแสที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด
V_{oc}	43.125 V	แรงดันเปิดวงจร
I_{sc}	1.1 A	กระแสลัดวงจร
P_{max}	40 W	กำลังไฟฟ้าสูงสุด

พารามิเตอร์วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์	**ค่า**	**รายละเอียด**
C_1	100 μF	ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุตัวที่ 1
C_2	1000 μF	ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุตัวที่ 2
L	10 mH	ความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ
f_{sw}	10 kHz	ความถี่ในการสวิตช์
V_{batt}	12 V	แรงดันเอาต์พุต

การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของระบบดังรูปที่ 5.1 ประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชื่อมต่อกับวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์และแบตเตอรี่ โดยการจำลองสถานการณ์ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือ จะกำหนดให้ค่าความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงและอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่ที่ 25 °C ทุกค่าความเข้มแสง จากนั้นจะทำการวัดค่าแรงดันและกระแสเข้าสู่อัลกอริธึมเพื่อคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าพร้อมทั้งตรวจสอบเงื่อนไข ในขณะเดียวกันตรรกศาสตร์คลุมเครือก็จะรับค่าอินพุตผ่านกระบวนการตรวจสอบและให้ค่าเอาต์พุตตามที่ออกแบบเพื่อนำไปใช้ในการปรับค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นไปตามเงื่อนไขของวิธีอิงกระแสซึ่งจะทำให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิง และเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้ได้ค่าความผิดพลาดผ่านตัวควบคุมพีไอ สุดท้ายจะได้สัญญาณแรงดันอ้างอิงที่ผ่านตัวควบคุมพีไอไปเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อยเพื่อหาสัญญาณพัลส์สำหรับควบคุมสวิตช์ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ ในการจำลองสถานการณ์จะทำการวัดค่า $I_{PV}, V_{PV}, P_{PV}, V_{batt}$ และ I_{batt} แสดงผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือดังรูปที่ 5.15 โดยการจำลองสถานการณ์จะแบ่งสัญญาณความเข้มแสงออกเป็น 6 ช่วงคือ ช่วงที่ 1-4 กำหนดให้ความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงตามลักษณะสัญญาณขั้นบันได

แบบไม่มีการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า และช่วงที่ 5-6 กำหนดให้ค่าความเข้มแสงมีค่าคงที่แต่มีการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 5.15 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือ

ช่วงที่ 1 ถึง 4: เมื่อความเข้มแสงมีลักษณะเป็นสัญญาณขั้นบันไดและไม่มีการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า

จากรูปที่ 5.15 ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดโดยมีการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 600, 800, 750 และ 1000 W/m^2 ตามลำดับ ผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่าความเข้มแสง 600 W/m^2 ในช่วงที่ 1 มี I_{PV} =0.611A P_{PV} =23.04W ในช่วงที่ 2 ความเข้มแสง 800 W/m^2 มี I_{PV} =0.817A P_{PV} =31.48W ในช่วงที่ 3 ความเข้มแสง 750 W/m^2 มี I_{PV} =0.768A P_{PV} =29.37W และสุดท้ายที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 ในช่วงที่ 4 มี I_{PV} =1.033A P_{PV} =40W อีกทั้งยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของปริมาณความเข้มแสง จะส่งผลต่อกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ I_{PV} ที่ได้ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด I_{mpp} ทำให้ในแต่ละความเข้มแสงสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่จ่ายออกมาจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้ และเนื่องจากการจำลองสถานการณ์ทั้ง 4 ช่วงนี้ไม่มีการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้าทำให้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้เก็บเข้าสู่แบตเตอรี่ทั้งหมด

ช่วงที่ 5: เมื่อความเข้มแสงมีค่าเท่ากับ 1000 W/m^2 และมีการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า 20 W

จากรูปที่ 5.15 เมื่อความเข้มแสงมีค่าเท่ากับ 1000 W/m^2 เซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 40 W ซึ่งจะมีผลทำให้สามารถเก็บกระแสไฟฟ้าเข้าสู่แบตเตอรี่ได้สูงสุด 3.33 A แต่เนื่องจากมีการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า 20 W ซึ่งมีขนาดครึ่งหนึ่งของกำลังไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้สูงสุด 3.33 A จะมีการแบ่งจ่ายให้กับโหลด I_{load} =1.665 A และเก็บกระแสไฟฟ้าที่เหลือเข้าสู่แบตเตอรี่ I_{batt} =1.665 A

ช่วงที่ 6: เมื่อความเข้มแสงมีค่าเท่ากับ 1000 W/m^2 และมีการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า 40 W

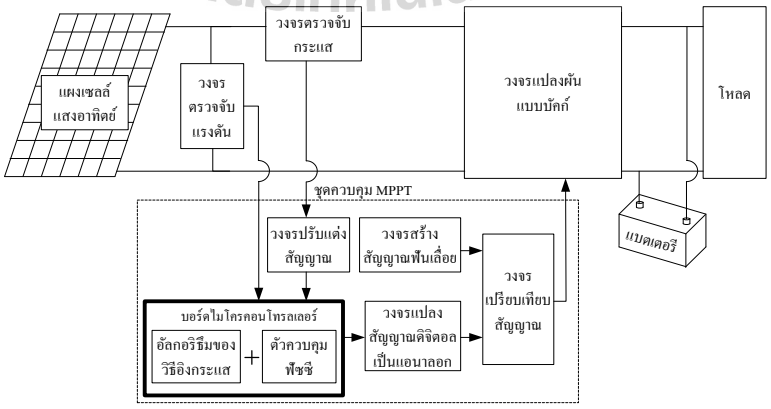
จากรูปที่ 5.15 เมื่อความเข้มแสงมีค่าเท่ากับ 1000 W/m^2 และมีการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า 40 W เท่ากับกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ 40 W กระแสไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ 3.3 A จะทำการจ่ายให้กับโหลดทั้งหมด ซึ่งหมายความว่าไม่มีกระแสไฟฟ้าจ่ายเก็บเข้าสู่แบตเตอรี่

จากผลการจำลองสถานการณ์ทั้ง 6 ช่วงที่ได้นำเสนอ แสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณความเข้มแสงต่าง ๆ ระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้และสามารถตามรอยจุดกำลังสูงสุดได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มแสงแบบทันทีทันใด ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ้าปริมาณความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นกระแสไฟฟ้าก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางตรงกลับกันถ้าปริมาณความเข้มแสงมีค่าลดลงกระแสไฟฟ้าก็จะมีค่าลดลง ส่งผลทำให้สามารถติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณความเข้มแสงได้

สำหรับกรณีที่ไม่มีการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้จะถูกเก็บเข้าสู่แบตเตอรี่ แต่ในกรณีที่มีการจ่ายโหลดกำลังไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้จะถูกแบ่งเพื่อไปจ่ายให้กับโหลดตามขนาดของโหลดที่ใช้งานและในส่วนของกำลังไฟฟ้าที่เหลือจะถูกเก็บเข้าสู่แบตเตอรี่

5.5 การสร้างชุดทดสอบฮาร์ดแวร์

เพื่อยืนยันผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์และแสดงให้เห็นว่าตรรกศาสตร์คลุมเครือสามารถนำมาใช้เพิ่มประสิทธิภาพการตามรอยจุดกำลังสูงสุดให้แก่วิธีอิงกระแสได้ รวมทั้งยังสามารถนำมาสร้างใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ งานวิจัยนี้จึงได้มีการสร้างชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ โดยมีโครงสร้างชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ของระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือแสดงดังรูปที่ 5.16 ประกอบไปด้วย วงจรตรวจจับแรงดัน วงจรตรวจจับกระแส บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีอัลกอริธึมของวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือ วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก วงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อย วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ และวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์ จากส่วนประกอบที่ได้กล่าวไปจะเห็นได้ว่าโครงสร้างของชุดทดสอบฮาร์ดแวร์มีส่วนประกอบเหมือนกับชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ในวิธีอิงกระแส ซึ่งมีหลักการออกแบบและหลักการทำงานของวงจรในส่วนต่าง ๆ แสดงได้ดังหัวข้อที่ 4.4 และแสดงชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่ใช้งานจริงได้ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ดังนั้นวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือจะใช้ชุดทดสอบฮาร์ดแวร์เดียวกันกับชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ในวิธีอิงกระแสสำหรับทดสอบระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุด โดยจะเปลี่ยนแค่เพียงอัลกอริธึมโปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR



รูปที่ 5.16 โครงสร้างชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ของระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุด

จากภาพรวมอุปกรณ์ของระบบที่พิจารณาดังรูปที่ 5.16 การเขียนโปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ภายในจะมีอัลกอริธึมของวิธีอิงกระแสและอัลกอริธึมของตรรกศาสตร์คลุมเครือทำงานร่วมกัน โดยตรรกศาสตร์คลุมเครือนั้นจะเลือกกำหนดขนาดการเปลี่ยนแปลงกระแส ΔI_{step} ที่เหมาะสมให้กับอัลกอริธึมของวิธีอิงกระแส เพื่อกำหนดจุดการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้อยู่ที่จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยการเพิ่มลดกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดทำให้สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดออกมาใช้งานได้ตลอดเวลา ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดการเขียนโปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่ใช้ในการทดสอบชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ได้ในภาคผนวก ง. และการใช้งานชุดชาร์จเซลล์แสงอาทิตย์ของวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือสามารถดูคู่มือชุดเดียวกันกับคู่มือการใช้งานของวิธีอิงกระแสได้ในภาคผนวก จ.

5.6 การทดสอบชุดทดสอบฮาร์ดแวร์

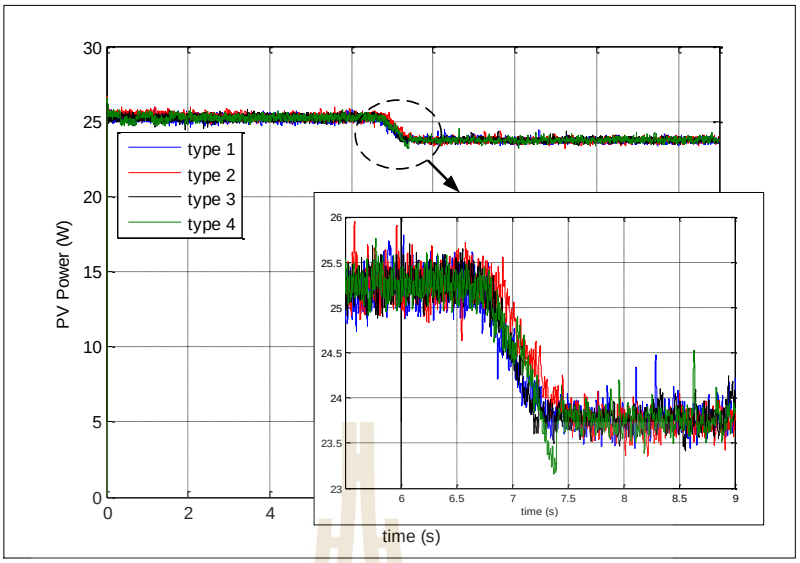
การทดสอบชุดทดสอบระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตัวควบคุม ฟัซซีจะต้องกำหนดค่าตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกอินพุตและเอาต์พุตของตรรกศาสตร์คลุมเครือ ดังที่ได้ออกแบบและอธิบายไว้ในหัวข้อ 4.3.2 ซึ่งค่าดังกล่าวนั้นจะถูกป้อนในโปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดในบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ ดังนั้นจึงได้ดำเนินการทดสอบหาค่าตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของตรรกศาสตร์คลุมเครือที่เหมาะสมกับชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ โดยเริ่มแรกจะกำหนดให้ค่าตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของอินพุตที่ได้จากการออกแบบตามลักษณะของเส้นโค้ง P - I มีขนาดคงที่ แล้วจึงทำการเปลี่ยนแปลงค่าตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตตำแหน่ง k_1 k_2 และ k_3 อย่างไรก็ตามเพื่อที่จะให้ตรรกศาสตร์คลุมเครือสามารถพัฒนาระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดให้ดียิ่งขึ้นทั้งในเรื่องของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ในสภาวะอยู่ตัวและเวลาตอบสนองที่ใช้ในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง การทดสอบนี้จึงได้ทำการทดสอบด้วยกัน 2 กรณีคือ มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงน้อยจาก 1000 ไปเป็น 800 W/m^2 และเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงมากจาก 0 ไปยัง 1000 W/m^2 สำหรับตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกที่ใช้ในการทดสอบและผลการทดสอบหาค่าตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกเอาต์พุตของตรรกศาสตร์คลุมเครือแสดงได้ดังตารางที่ 5.4 และรูปที่ 5.17

ตารางที่ 5.4 ค่าตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของอินพุตและเอาต์พุตที่ใช้ในการทดสอบชุดทดสอบ

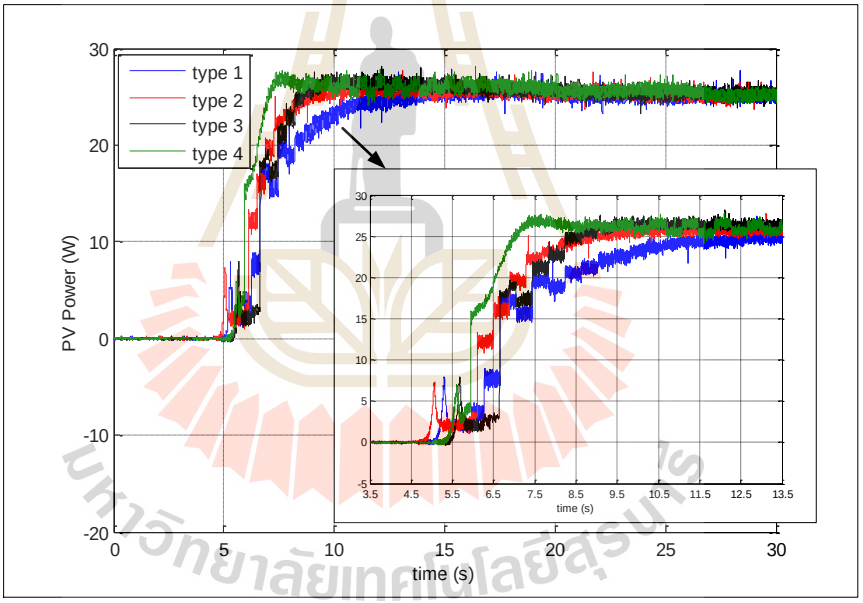
ตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิก อินพุต $\left\|\frac{\Delta P}{\Delta I}\right\|$								
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
0	0	20	0	20	40	20	40	40

ตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกเอาต์พุต ΔI_{step}						
แบบที่	ตำแหน่ง			ความเข้มแสง	P_{avg} (W)	T_s (s)
1	k_1	k_2	k_3	1000 $\rightarrow$ 800 W/m^2	23.69	0.60
	0	0.025	0.05	0 $\rightarrow$ 1000 W/m^2	25.01	10.00
2	k_1	k_2	k_3	1000 $\rightarrow$ 800 W/m^2	23.76	0.60
	0	0.035	0.07	0 $\rightarrow$ 1000 W/m^2	25.10	5.20
3	k_1	k_2	k_3	1000 $\rightarrow$ 800 W/m^2	23.76	0.55
	0	0.05	0.1	0 $\rightarrow$ 1000 W/m^2	25.23	4.50
4	k_1	k_2	k_3	1000 $\rightarrow$ 800 W/m^2	23.58	0.65
	0	0.075	0.15	0 $\rightarrow$ 1000 W/m^2	25.21	4.00

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ก) ความเข้มแสงจาก 1000 ไปเป็น 800 W/m^2



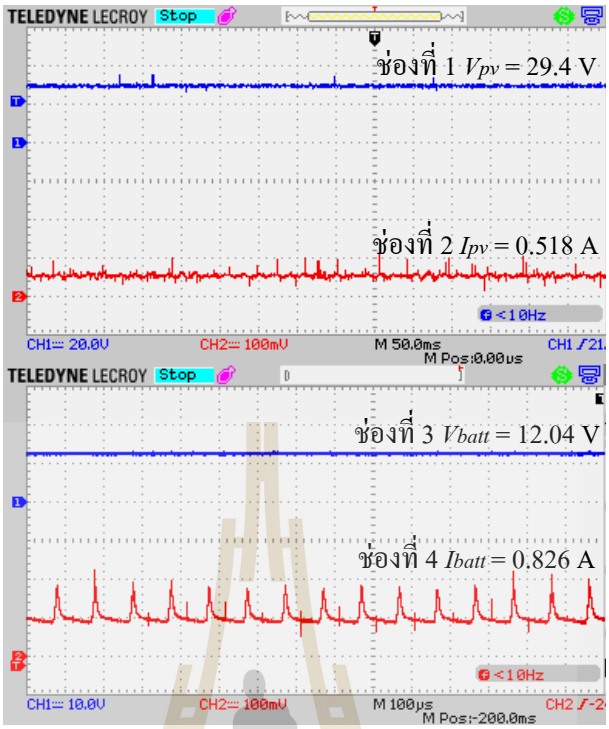
(ข) ความเข้มแสงจาก 0 ไปยัง 1000 W/m^2

รูปที่ 5.17 ผลการทดสอบหาค่าตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกเอาต์พุตของตรรกศาสตร์คลุมเครือ

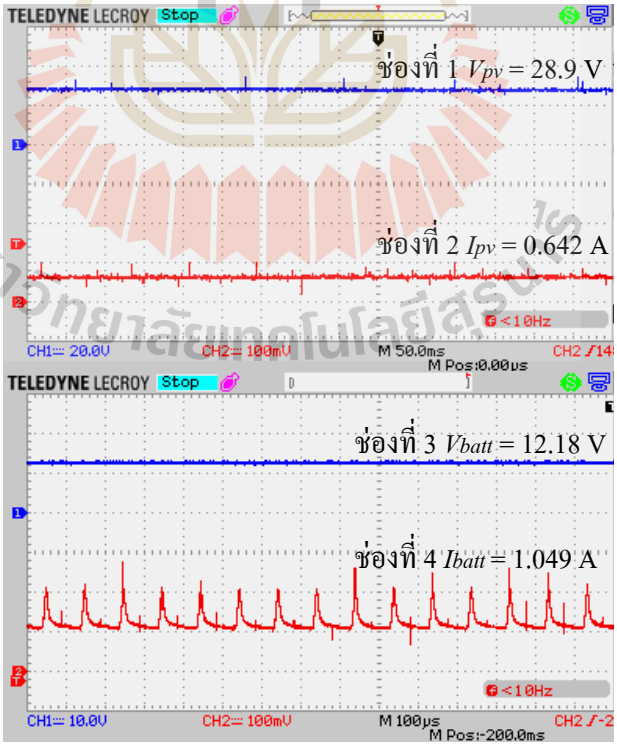
ผลการทดสอบหาค่าตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตในรูปที่ 5.17 เป็นผลการเปรียบเทียบของตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกที่ทำการทดสอบ 4 รูปแบบ ซึ่งกำหนดให้ type 1, type 2, type 3 และ type 4 ของผลการทดสอบรูปที่ 5.17 เป็นค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกแสดงความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตในรูปแบบที่ 1 ถึง 4 ตามลำดับ ทั้งนี้สามารถหาค่า

กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดและเวลาที่ใช้ในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดในแต่ละรูปแบบที่ใช้ในการทดสอบได้ดังตารางที่ 5.4 จากตารางดังกล่าวจะเห็นได้ว่าถ้ามีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงน้อยจากความเข้มแสง 1000 เป็น 800 W/m^2 ดังรูปที่ 5.17 (ก) ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดและเวลาที่ใช้ในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจะไม่แตกต่างกันมากนัก ในทางกลับกันถ้ามีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงมากจากความเข้มแสง 0 เป็น 1000 W/m^2 ดังรูปที่ 5.17 (ข) ค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกแบบที่ 4 จะใช้เวลาในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงมากได้รวดเร็วที่สุด แต่เนื่องจากเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ทำให้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดน้อยกว่าค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยของค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกแบบที่ 3 อย่างไรก็ตามเพื่อที่จะให้ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะนั้น พร้อมทั้งยังคงสามารถตามรอยจุดกำลังสูงสุดได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกแบบที่ 3 โดยที่ค่าตำแหน่งฟังก์ชันสมาชิกดังกล่าวที่ความเข้มแสง 1000 เป็น 800 W/m^2 สามารถดึงกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดได้เท่ากับ 23.76 W และใช้เวลาในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดก่อนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเท่ากับ 0.55 s และที่ความเข้มแสง 0 เป็น 1000 W/m^2 สามารถดึงกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดได้เท่ากับ 25.23 W และใช้เวลาในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดก่อนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเท่ากับ 4.5 s

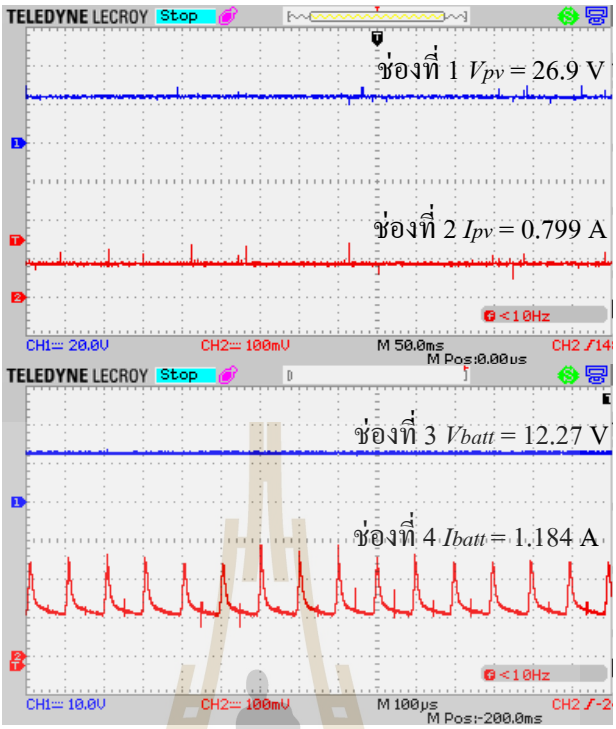
การทดสอบระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือจะดำเนินการทดสอบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีแหล่งพลังงานสำรองแบตเตอรี่ โดยจะใช้แสงอาทิตย์เทียมที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการด้วยการปรับแหล่งจ่ายแรงดันหนึ่งเฟสแบบปรับค่าได้ให้ค่าความเข้มแสงของหลอดไฟมีค่าคงที่ ซึ่งการทดสอบนั้นจะทำการวัดค่ากระแสและแรงดันที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ พร้อมทั้งวัดกระแสและแรงดันที่ป้อนเก็บเข้าสู่แบตเตอรี่ที่ค่าความเข้มแสงคงที่ 200, 400, 600, 800 และ 1000 W/m^2 ตามลำดับ ผลการทดสอบชุดทดสอบระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือแสดงได้ดังรูปที่ 5.18 ถึงรูปที่ 5.22 โดยสัญญาณช่องที่ 1 และ 2 คือแรงดันและกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ตามลำดับ และช่องสัญญาณที่ 3 และ 4 คือแรงดันและกระแสของแบตเตอรี่ ตามลำดับ



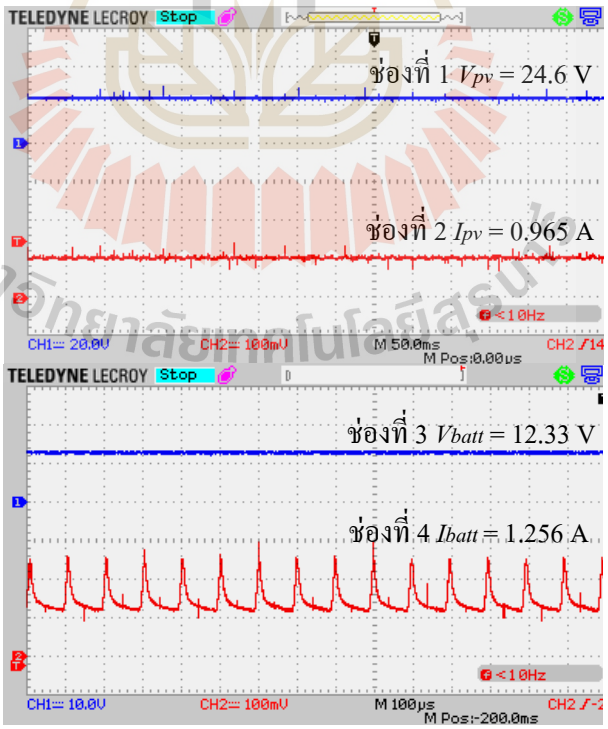
รูปที่ 5.18 ผลการทดสอบชุดทดสอบที่ความเข้มแสง 200 W/m^2



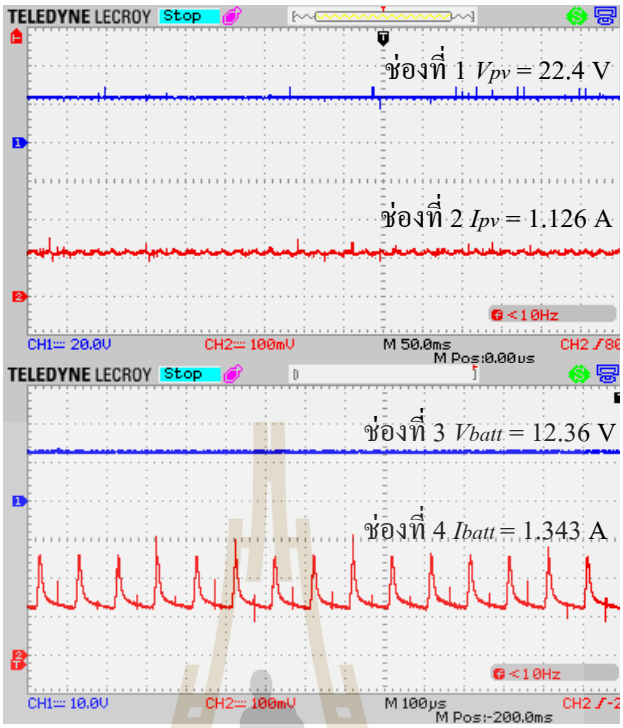
รูปที่ 5.19 ผลการทดสอบชุดทดสอบที่ความเข้มแสง 400 W/m^2



รูปที่ 5.20 ผลการทดสอบชุดทดสอบที่ความเข้มแสง 600 W/m^2



รูปที่ 5.21 ผลการทดสอบชุดทดสอบที่ความเข้มแสง 800 W/m^2

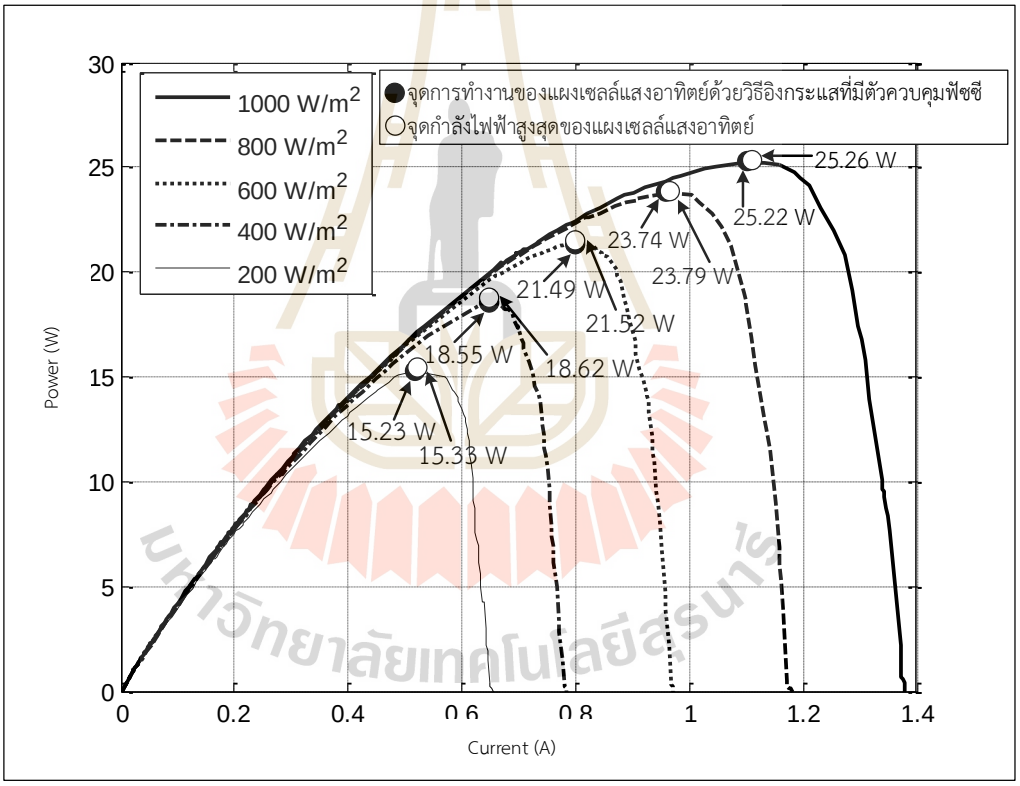


รูปที่ 5.22 ผลการทดสอบชุดทดสอบที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2

ผลการทดสอบของชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือในรูปที่ 5.18 จะเห็นได้ว่าที่ความเข้มแสงเท่ากับ 200 W/m^2 จะได้ค่า I_{PV} =0.518A, P_{PV} =15.23W และเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 400 W/m^2 ในรูปที่ 5.19 จะได้ I_{PV} =0.642A, P_{PV} =18.55W และเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 600 W/m^2 ในรูปที่ 5.20 จะได้ I_{PV} =0.799A, P_{PV} =21.49W และเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 800 W/m^2 ในรูปที่ 5.21 จะได้ I_{PV} =0.965A, P_{PV} =23.74W และสุดท้ายเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 1000 W/m^2 ในรูปที่ 5.22 จะได้ I_{PV} =1.126A, P_{PV} =25.22W ซึ่งจากค่า I_{PV} และ P_{PV} ที่ได้ในแต่ละความเข้มแสงข้างต้นจะเห็นได้ว่าค่า I_{PV} มีค่าใกล้เคียงกระแสที่จุดกำลังสูงสุดและค่า P_{PV} มีค่าใกล้เคียงกำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด โดยสามารถแสดงจุดการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ในแต่ละความเข้มแสงในกราฟคุณลักษณะเฉพาะกำลังและกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 W ได้ในรูปที่ 5.23 และในส่วนทางด้านเอาต์พุตแบตเตอรี่ ถ้าความเข้มแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้มีค่ากระแสที่ป้อนเข้าสู่แบตเตอรี่มีค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งส่งผลทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่แบตเตอรี่มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยสามารถสรุปค่าแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตและเอาต์พุตที่ได้ในแต่ละความเข้มแสงทั้งหมดดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส
ที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือ

ความเข้มแสง	ทางด้านอินพุต			ทางด้านเอาต์พุต		
(W/m^2)	V_{PV} (V)	I_{PV} (A)	P_{PV} (W)	V_{batt} (V)	I_{batt} (A)	P_{batt} (W)
200	29.4	0.518	15.23	12.04	0.826	9.95
400	28.9	0.642	18.55	12.18	1.049	12.78
600	26.9	0.799	21.49	12.27	1.184	14.53
800	24.6	0.965	23.74	12.33	1.256	15.49
1000	22.4	1.126	25.22	12.36	1.343	16.52



รูปที่ 5.23 คุณลักษณะเฉพาะของกระแสและกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 W

จากกราฟแสดงจุดการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ในรูปที่ 5.23 เมื่อเทียบจุดการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือ(รูปวงกลมทึบ) กับจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์(รูปวงกลมโปร่ง) ที่ระดับค่าความเข้มแสงต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าจุดการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือมีค่าใกล้เคียงกับจุด

กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือสามารถปรับจุดการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ในแต่ละระดับค่าความเข้มแสง โดยถ้าปริมาณความเข้มแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ได้กระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระได้

5.7 สรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ ซึ่งจะอธิบายถึงหลักการทำงาน ขั้นตอนการตามรอยจุดกำลังสูงสุด การออกแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือในส่วนต่าง ๆ และการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB นอกจากนี้ยังได้อธิบายถึงโครงสร้างชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ของวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือที่สามารถใช้ชุดทดสอบฮาร์ดแวร์เดียวกันกับวิธีอิงกระแสได้ โดยจะนำเสนอส่วนที่แตกต่างกันคือส่วนของการเขียนโปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ตระกูล AVR รวมทั้งแสดงผลการทดสอบที่ได้จากชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้น ซึ่งพบว่าชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ ณ ความเข้มแสงขณะนั้นได้อย่างถูกต้อง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 6
สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

งานนี้ได้นำเสนอการศึกษา ออกแบบ และสร้างชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระด้วยวิธีอิงกระแสและวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือเพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ระดับค่าความเข้มแสงต่าง ๆ ได้มากที่สุด งานวิจัยได้เริ่มจากการค้นคว้าปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ผลงานวิจัยที่ได้นำเสนอจะแสดงสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยที่มีวิธีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์วิธีการต่าง ๆ หลากหลายวิธีด้วยกัน ซึ่งผลงานวิจัยที่ได้ศึกษาค้นคว้าทั้งหมดได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

การศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบไปด้วย คุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ ผลกระทบของความเข้มแสงและอุณหภูมิ และการเพิ่มจำนวนเซลล์เป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อีกทั้งได้ทำการศึกษาทฤษฎีของตรรกศาสตร์คลุมเครือ ซึ่งการทำความเข้าใจในเรื่องทฤษฎีของเซลล์แสงอาทิตย์และตรรกศาสตร์คลุมเครือมีความสำคัญมากสำหรับการหาแนวทางการพัฒนาวิธีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ ตลอดจนการออกแบบและสร้างตรรกศาสตร์คลุมเครือเพื่อเพิ่มสมรรถนะการทำงานของระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งรายละเอียดการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 ของงานวิจัย

การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีรบกวนและสังเกตเป็นวิธีการที่ง่ายและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย แต่มีความจำเป็นต้องเลือกกำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้าแบบบัคก์(ΔD) เพียงค่าเดียวที่เหมาะสมกับระบบที่ใช้งาน งานวิจัยจึงได้นำเสนอการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระในบทที่ 4 ของงานวิจัย โดยได้อธิบายถึงหลักการทำงานและลำดับขั้นตอนการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของวิธีอิงกระแส รวมทั้งการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมMATLAB ผลการจำลองสถานการณ์พบว่าระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสสามารถตามรอยจุดกำลังสูงสุดได้ตามต้องการและสามารถดึงกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้มากกว่าวิธีรบกวนและสังเกต นอกจากนี้ยังได้อธิบายถึงโครงสร้างของชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ หลักการทำงาน การออกแบบ การสร้างและการทดสอบวงจรควบคุมในส่วนต่าง ๆ ของระบบ การเขียนโปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุด

ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR และผลการทดสอบที่ได้จากชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้น ซึ่งผลการทดสอบพบว่าวิธีอิงกระแสสามารถสร้างใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติและสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ ณ ความเข้มแสงขณะนั้น การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสถึงแม้ว่าจะสามารถดึงกำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้มากยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีรบกวนและสังเกต แต่ก็ยังคงต้องอาศัยการเลือกกำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ΔI_{step}) เพียงค่าเดียวที่เหมาะสมกับระบบที่ใช้งานเช่นกัน จึงได้นำไปสู่การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือ

ตรรกศาสตร์คลุมเครือได้รับความนิยมในงานด้านระบบควบคุมและเป็นวิธีการควบคุมที่ให้ประสิทธิผลสูง เหมาะสำหรับระบบควบคุมที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น สามารถออกแบบการใช้งานได้หลากหลายตามความเหมาะสมของระบบที่พิจารณาโดยใช้ความรู้และประสบการณ์ของผู้ใช้งาน ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการควบคุมกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จึงได้มีการนำเอาตรรกศาสตร์คลุมเครือเข้ามาใช้ในเลือกกำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในวิธีอิงกระแส เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้ดียิ่งขึ้น จึงได้นำเสนอการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือในบทที่ 5 ของงานวิจัย โดยได้อธิบายถึงหลักการทำงาน ขั้นตอนการตามรอยจุดกำลังสูงสุด การออกแบบตรรกศาสตร์คลุมเครือในส่วนต่าง ๆ และการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ผลการจำลองสถานการณ์พบว่าระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้และยังสามารถทำให้เวลาที่ใช้ในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดรวดเร็วขึ้นอีกด้วยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง นอกจากนี้ยังได้อธิบายถึงโครงสร้างของชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ของวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือที่สามารถใช้ชุดทดสอบเดียวกันกับวิธีอิงกระแสได้ตลอดจนแสดงผลการทดสอบที่ได้จากชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้น ซึ่งผลการทดสอบพบว่าวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ที่ระดับความเข้มแสงค่าต่าง ๆ ส่งผลให้การทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการนำไปประยุกต์สำหรับผู้ใช้งานยังจำเป็นต้องคำนึงถึงสภาวะแวดล้อมที่จะนำไปใช้จริงทั้งค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมีนัยสำคัญที่ทำให้จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลง รวมทั้งการออกแบบกฎต่าง ๆ ของตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือเพื่อให้มีความเหมาะสมในการตามรอยจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เมื่อนำไปใช้งานจริง

ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดจะทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้ามาใช้งานได้มากที่สุดที่ค่าความเข้มแสงขณะนั้น อย่างไรก็ตามเพื่อให้การใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์เกิดประโยชน์สูงสุดจึงได้มีการพัฒนาวิธีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดให้ดียิ่งขึ้น ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือสามารถดึง

กำลังไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังใช้เวลาในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดก่อนเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวที่รวดเร็วส่งผลให้มั่นใจได้ว่าวิธีการดังกล่าวสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ทุกสภาวะการทำงาน สำหรับผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่สามารถดูได้ในภาคผนวก ฉ.

6.2 ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยในอนาคต

- การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอ ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ และค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสสามารถพิจารณาการออกแบบร่วมกับระบบควบคุมชนิดอื่น ๆ เพื่อให้ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นได้ เช่น วิธีทางปัญญาประดิษฐ์หรือการค้นหาแบบตาบูเชิงปรับตัว (Adaptive Tabu Search: ATS) เป็นต้น

- การออกแบบโครงสร้างของตรรกศาสตร์คลุมเครือในงานวิจัยนี้ออกแบบสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระขนาด 40 W เท่านั้น ดังนั้นควรมีการพัฒนาต่อยอดและออกแบบให้โครงสร้างของตรรกศาสตร์คลุมเครือในอัลกอริทึมของชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธี อิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือสอดคล้องกับขนาดพิกัดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มากขึ้นและเหมาะสมกับการใช้งาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

[1] T. Esram and P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion,* vol. 22, no. 2, pp. 439-449, 2007.

[2] M. S. Ngan and C. W. Tan, "A study of maximum power point tracking algorithms for stand-alone Photovoltaic Systems," in *2011 IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC)*, 2011, pp. 22-27.

[3] A. F. Murtaza, H. A. Sher, M. Chiaberge, D. Boero, M. D. Giuseppe, and K. E. Addoweesh, "Comparative analysis of maximum power point tracking techniques for PV applications," in *INMIC*, 2013, pp. 83-88.

[4] A. Sandali, T. Oukhoya, and A. Cheriti, "Modeling and design of PV grid connected system using a modified fractional short-circuit current MPPT," in *2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 2014, pp. 224-229.

[5] M. M. Shebani, T. Iqbal, and J. E. Quaicoe, "Comparing bisection numerical algorithm with fractional short circuit current and open circuit voltage methods for MPPT photovoltaic systems," in *2016 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, 2016, pp. 1-5.

[6] ปทุมพร วงค์ใหญ่, กองพัน อารีรักษ์ และกองพล อารักษ์. ระบบตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระโดยใช้วิธีรบกวนและสังเกตที่มีการปรับตัว, *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38 (EECON38),* โรงแรมวรบุรี อโยธยา คอนเวนชั่น รีสอร์ท จังหวัดพระนครศรีอยุธยา, วันที่ 18-20 พฤศจิกายน 2558, หน้า. 393-396.

[7] R. Boukenoui, R. Bradai, A. Mellit, M. Ghanes, and H. Salhi, "Comparative analysis of P&O, modified hill climbing-FLC, and adaptive P&O-FLC MPPTs for microgrid standalone PV system," in *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2015, pp. 1095-1099.

[8] H. Cha and S. Lee, "Design and Implementation of Photovoltaic Power Conditioning System Using a Current Based Maximum Power Point Tracking," in *2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2008, pp. 1-5.

[9] H. Toodeji, S. H. Fathi, and N. Farokhnia, "Using current-based MPPT method in new integrated system of PV module and STATCOM," in *2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2010, pp. 1028-1033.

[10] A. Mohapatra, B. Nayak, and K. B. Mohanty, "Current based novel adaptive P&O MPPT algorithm for photovoltaic system considering sudden change in the irradiance," in *2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 2014, pp. 1-4.

[11] I. W. Christopher and R. Ramesh, "Comparative Study of P&O and InC MPPT Algorithms," *American Journal of Engineering Research (AJER),* vol. 02, no. 12, pp. 402-408, 2013.

[12] M. F. Ansari, S. Chatterji, and A. Iqbal, "A fuzzy logic control scheme for a solar photovoltaic system for a maximum power point tracker," *International Journal of Sustainable Energy,* vol. 29, no. 4, pp. 245-255, 2010/12/01 2010.

[13] J.-K. Shiau, Y.-C. Wei, and B.-C. Chen, *A Study on the Fuzzy-Logic-Based Solar Power MPPT Algorithms Using Different Fuzzy Input Variables*. 2015, pp. 100-127.

[14] L. Bouselham, B. Hajji, and H. Hajji, "Comparative study of different MPPT methods for photovoltaic system," in *2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 2015, pp. 1-5.

[15] A. Ali, A. N. Hasan, and T. Marwala, "Perturb and observe based on fuzzy logic controller maximum power point tracking (MPPT)," in *2014 International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)*, 2014, pp. 406-411.

[16] M. F. Nayan and S. M. S. Ullah, "Modelling of solar cell characteristics considering the effect of electrical and environmental parameters," in *2015 3rd International Conference on Green Energy and Technology (ICGET)*, 2015, pp. 1-6.

[17] T. Radjai, J. P. Gaubert, L. Rahmani, and S. Mekhilef, "Experimental verification of P&O MPPT algorithm with direct control based on Fuzzy logic control using CUK converter," *International Transactions on Electrical Energy Systems,* vol. 25, no. 12, pp. 3492-3508, 2015/12/01 2015.

[18] D. Driankov, "An Introduction to Fuzzy Control," 1993.

[19] M. Jamshidi, N. Vadiee, and T. J. Ross, *Fuzzy Logic and Control: Software and Hardware Applications*. 1994.

[20] J. M. Jacob, *Industrial control electronics : applications and design*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1989.

[21] K. M. Tsang and W. L. Chan, "Cascade controller for DC/DC buck convertor," *IEE Proceedings - Electric Power Applications,* vol. 152, no. 4, pp. 827-831, 2005.

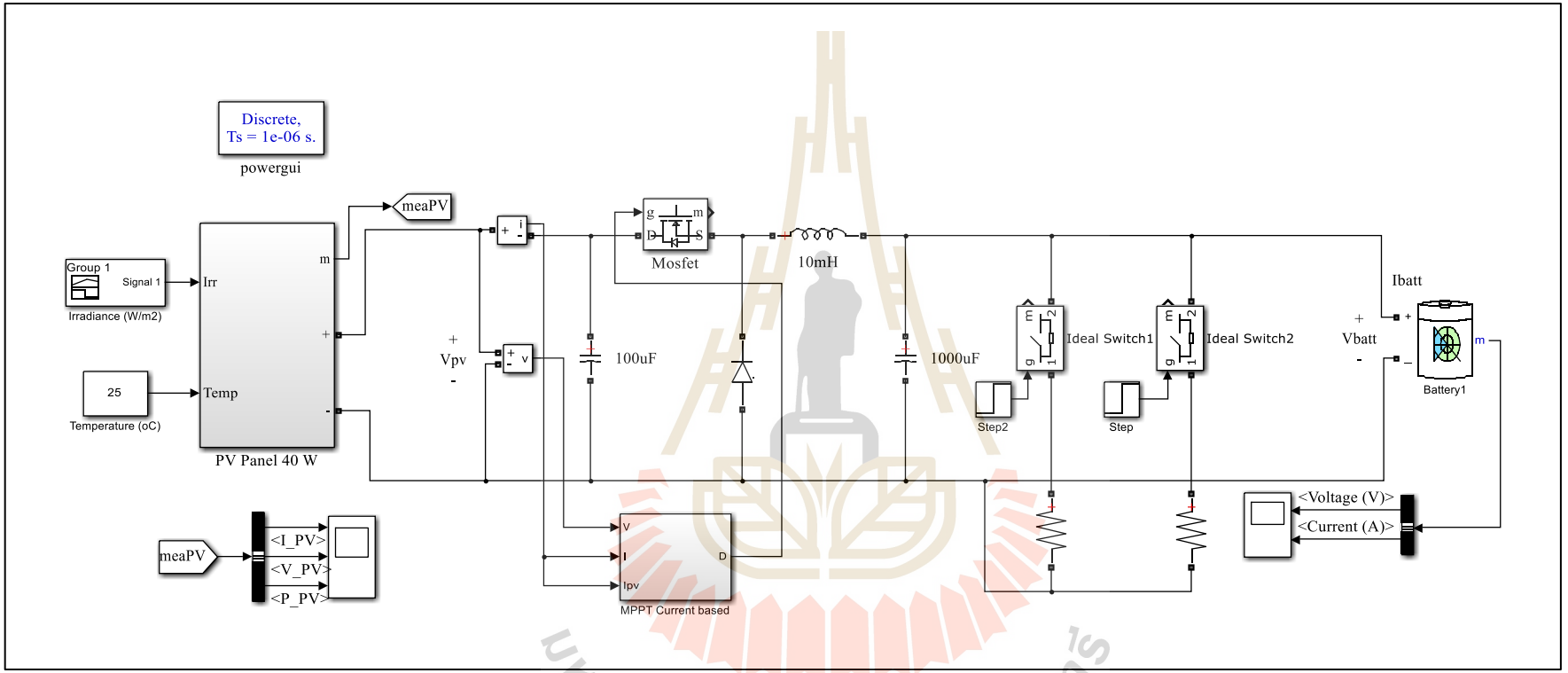
[22] M. H. Rashid, *Power electronics : devices, circuits, and applications*. 2014.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก

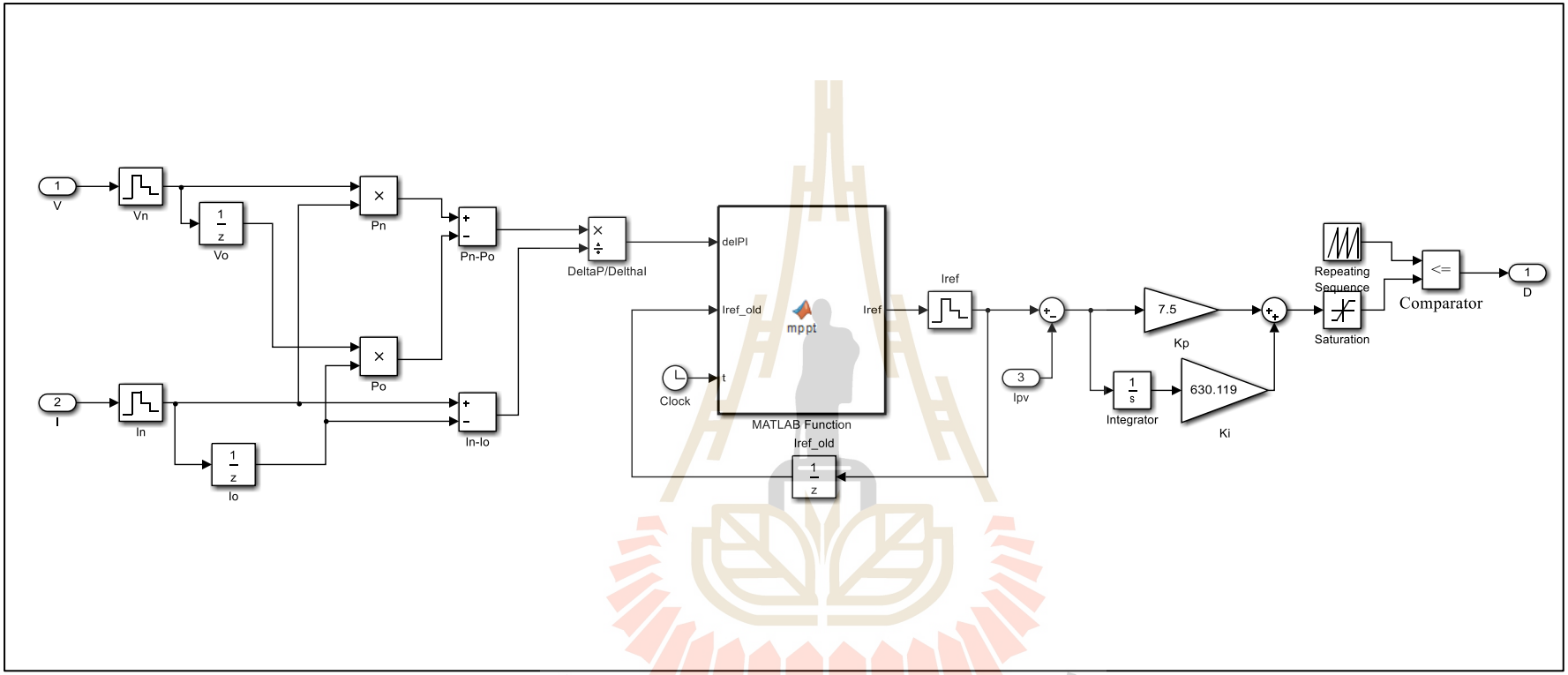
ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ของการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ก.1 การจำลองสถานการณ์อัลกอริทึมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ก.2 บล็อกจำลองสถานการณ์อัลกอริทึมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
**************************************************************************
โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสในชุดบล็อก MATLAB FUNCTION บน
โปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB
**************************************************************************
function Iref = mppt(delPI,Iref_old,t)
es=10;                    %กำหนดค่าความผิดพลาด
if     t<0.1
       Iref=0.5;
else
       II=0.001;      %กำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้า ΔI_step
%โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส
       if    (abs(delPI) <= es)
             Iref=Iref_old;
       elseif (delPI > 0)
             Iref=Iref_old+II;
       else
             Iref=Iref_old-II;
       end
end
end
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ข

โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
*****************************************************************************
โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ
*****************************************************************************%ประกาศตัว
แปรและกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณหาจุด MPPT เป็นตัวเลขทศนิยม
#include <avr/io.h>
float es,Vr,P_n,V_n,C
_n,Deltha_P_n,Deltha_V_n,Deltha_C_n,Deltha_PandC_n,Deltha_Istep;
float P_n1=0,V_n1=0,Deltha_P_n1=0,Deltha_V_n1=0,Deltha_C_n1=0,C_n1=0.5;
float Voltage_Sense,Voltage_Actual,Current_Sense,Current_Actual,Power_Actual;
%กำหนดช่องสัญญาณสำหรับรับสัญญาณจากวงจรตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้า
int Voltage_Sensor=5;
int Current_Sensor=7;
%ประกาศตัวแปรเป็นตัวเลขจำนวนเต็ม
%กำหนดช่องสัญญาณของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก
int Read_Voltage,Read_Current;
int CS = 41;
int SCX = 43;
int SDI = 45;
int LDAC = 47;
int SHDN = 49;
%ประกาศพารามิเตอร์ลูปกระแสไฟฟ้าของตัวควบคุมพีไอ%
float err,Up,Ui,Upi,Ui_new,Upi_i,U;
float kp=0.7747, ki=1301.732, Ui_old=0;
%กำหนด sampling time
float Ts=0.000625; //ms
*****************************************************************************
%เข้าสู่ฟังก์ชันการตั้งค่า CPU ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR เพื่อใช้งานช่องสื่อสาร
วงจร DAC
*****************************************************************************
void Write_MCP4922(unsigned char DAC_Chanel,unsigned int DAC_Data)
{
```

```
  digitalWrite(CS,LOW);
  switch(DAC_Chanel)
  {
    case 0x00 : DAC_Data |=0x3000;
        break;
    case 0x01 : DAC_Data |=0xB000;
        break;
  }
  shiftOut(SDI,SCX,MSBFIRST,(DAC_Data>>8)&0xFF);
  shiftOut(SDI,SCX,MSBFIRST,DAC_Data&0xFF);
  digitalWrite(CS,HIGH);
  digitalWrite(LDAC,LOW);
  digitalWrite(LDAC,HIGH);
}
void setup()
{
Serial.begin(19200);
Serial.begin(9600);
Serial.flush();
  pinMode(CS,OUTPUT);
  pinMode(SCX,OUTPUT);
  pinMode(SDI,OUTPUT);
  pinMode(LDAC,OUTPUT);
  pinMode(SHDN,OUTPUT);
  digitalWrite(CS,HIGH);
  digitalWrite(SCX,LOW);
  digitalWrite(SDI,LOW);
  digitalWrite(LDAC,HIGH);
  digitalWrite(SHDN,HIGH);
}
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
*********************************************************************************
%เข้าสู่ฟังก์ชันตั้งค่าของบอร์ด arduino [void loop()] เพื่อวนรอบสั่งค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงสำหรับ
ตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส
*********************************************************************************
void loop()
{  while(1)
    {
%การอ่านค่าจากวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและแปลงค่าตามสมการ (4-2)
Read_Voltage=analogRead(Voltage_Sensor);
Voltage_Sense=((float)Read_Voltage)/1024*5;
Voltage_Actual=(9.943*Voltage_Sense)-0.2898;
%การอ่านค่าจากวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าและแปลงค่าตามสมการ (4-8)
Read_Current=analogRead(Current_Sensor);
Current_Sense=((float)Read_Current)/1024*5;
Current_Actual=(1.1044*Current_Sense)-0.0079;
%โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส
Power_Actual=Voltage_Actual*Current_Actual;
V_n= Voltage_Actual;
C_n= Current_Actual;
P_n= Power_Actual;
Deltha_V_n=V_n-V_n1;
Deltha_C_n= C_n-C_n1;
Deltha_P_n= P_n-P_n1;
Deltha_PandC_n=Deltha_P_n/Deltha_C_n;
Deltha_Istep=0.03; %ค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้า
if (abs(Deltha_PandC_n) <= 50)
    {
    C_n=C_n1;
    }
else if (Deltha_PandC_n > 50)
    {
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

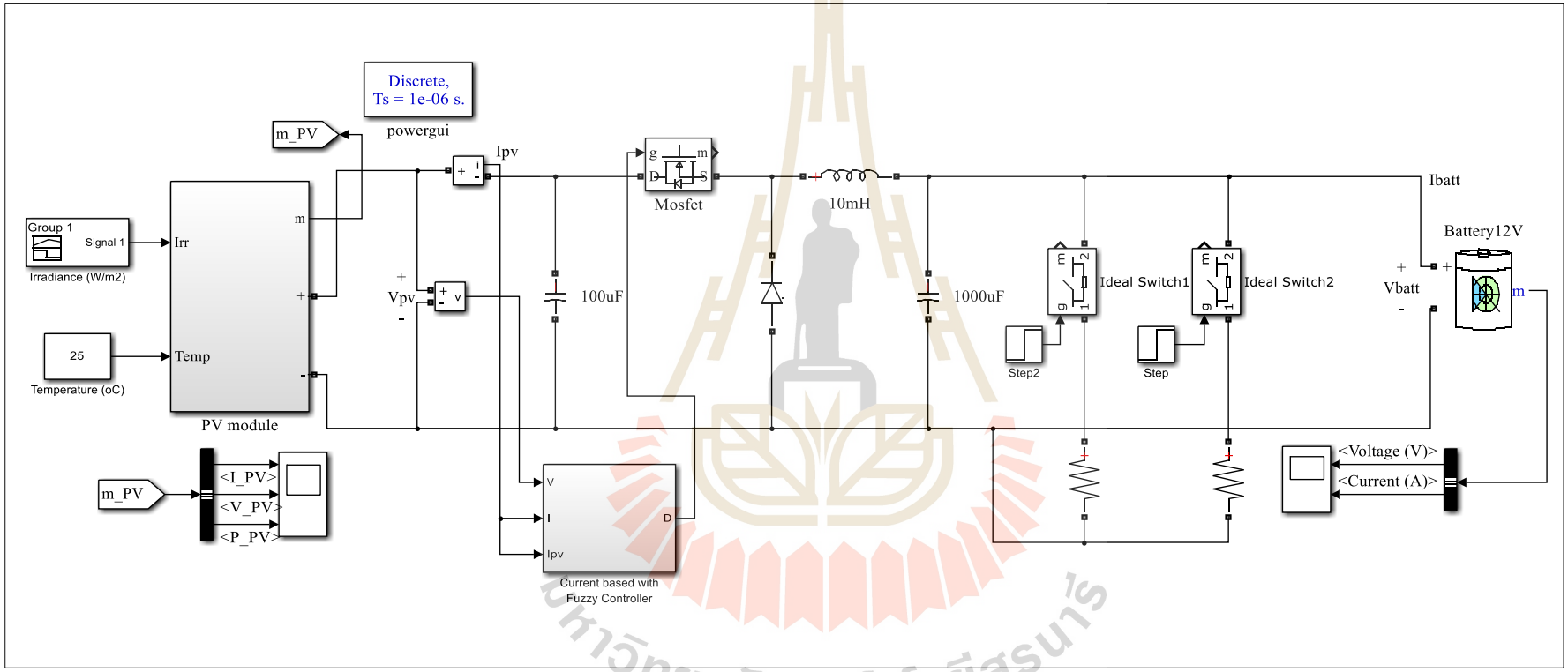
```
    C_n=C_n1+Deltha_Istep;
    }
else
    {
    C_n=C_n1-Deltha_Istep;
    }
%เข้าสู่ลูปกระแสไฟฟ้าของตัวควบคุมพีไอ
err=C_n-Current_Actual;
Up=kp*err;
Ui=(ki*Ts*err)+Ui_old;
U=Up+Ui;
if (Upi_i>=5)
  {  Upi_i=5;  }
if (Upi_i<=0)
  {  Upi_i=0;  }
%แปลงค่าสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอกและส่งค่าเอาต์พุต Vr ที่ได้ไปยังวงจร DAC
Upi=Upi_i*4095/5;
Vr=Upi;
Write_MCP4922(1,float(Vr));
Ui_old=Ui;
%อัพเดทค่าล่าสุด
Deltha_V_n1= Deltha_V_n;
Deltha_C_n1= Deltha_C_n;
Deltha_P_n1= Deltha_P_n;
C_n1=C_n;
V_n1=V_n;
P_n1=P_n;
    }
}
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

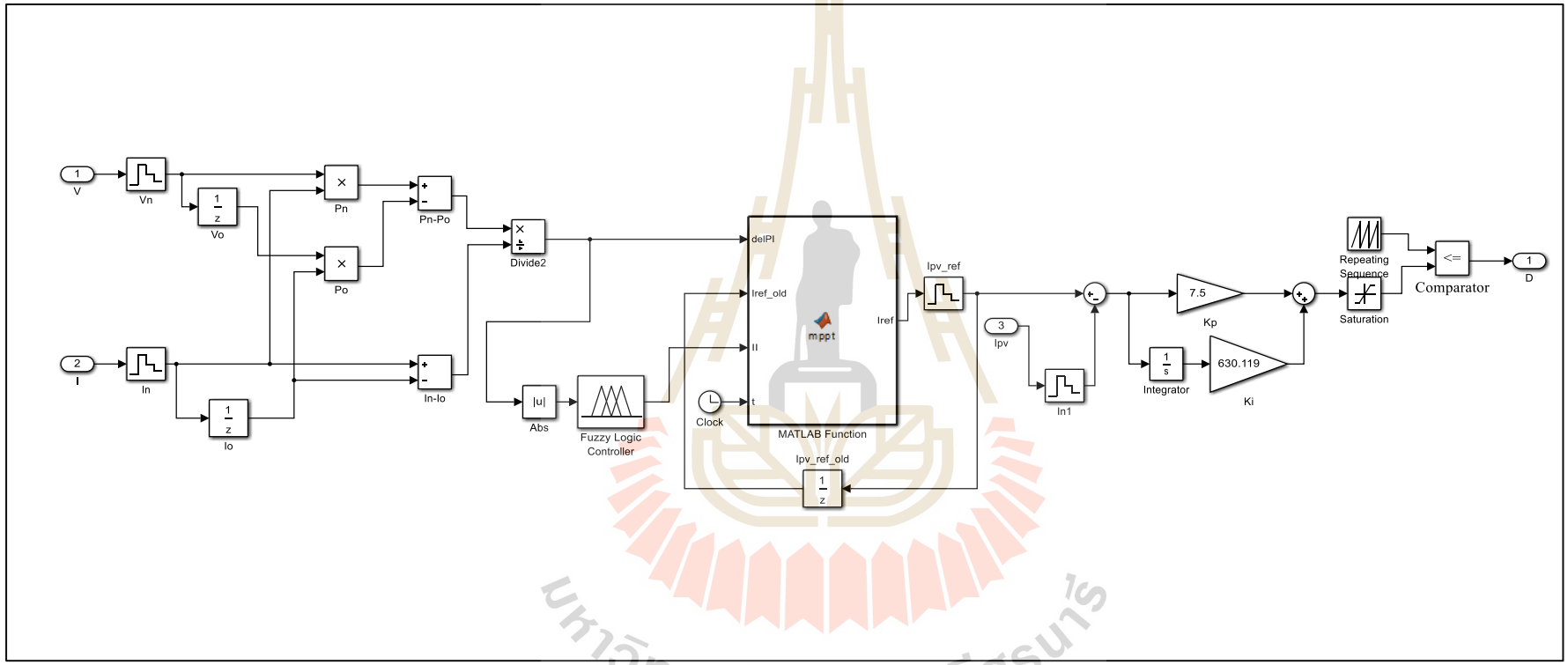
ภาคผนวก ค

ชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ของการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ค.1 การจำลองสถานการณ์อัลกอริทึมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือ



รูปที่ ค.2 บล็อกจำลองสถานการณ์อัลกอริทึมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
**************************************************************************
โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือในชุดบล็อก
MATLAB FUNCTION บนโปรแกรมสำเร็จรูป SIMULINK ใน MATLAB
**************************************************************************
function Iref = mppt(delPI,Iref_old,t)
es=10;                    %กำหนดค่าความผิดพลาด
if     t<0.1
       Iref=0.5;
else
       II=abs(II);       %ค่าการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้า ΔI_step รับค่ามาจากตรรกศาสตร์คลุมเครือ
%โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส
       if    (abs(delPI) <= es)
             Iref=Iref_old;
       elseif (delPI > 0)
             Iref=Iref_old+II;
       else
             Iref=Iref_old-II;
       end
end
end
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ง

โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
**************************************************************************
โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่มีตรรกศาสตร์คลุมเครือ สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ
**************************************************************************
%ประกาศตัวแปรและกำหนดค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณหาจุด MPPT เป็นตัวเลขทศนิยม
#include <avr/io.h>
float es,Vr,P_n,V_n,C
_n,Deltha_P_n,Deltha_V_n,Deltha_C_n,Deltha_PandC_n,Deltha_Istep;
float P_n1=0,V_n1=0,Deltha_P_n1=0,Deltha_V_n1=0,Deltha_C_n1=0,C_n1=0.5;
float Voltage_Sense,Voltage_Actual,Current_Sense,Current_Actual,Power_Actual;
%กำหนดช่องสัญญาณสำหรับรับสัญญาณจากวงจรตรวจจับแรงดันและกระแสไฟฟ้า
int Voltage_Sensor=5;
int Current_Sensor=7;
%ประกาศตัวแปรเป็นตัวเลขจำนวนเต็ม
%กำหนดช่องสัญญาณของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก
int Read_Voltage,Read_Current;
int CS = 41;
int SCX = 43;
int SDI = 45;
int LDAC = 47;
int SHDN = 49;
%ประกาศพารามิเตอร์ลูปกระแสไฟฟ้าของตัวควบคุมพีไอ%
float err,Up,Ui,Upi,Ui_new,Upi_i,U;
float kp=0.7747, ki=1301.732, Ui_old=0;
%กำหนด sampling time
float Ts=0.000625; //ms
% กำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตรรกศาสตร์คลุมเครือ
float e=0;
float mfe1=0.0,mfe2=0.0,mfe3=0.0;
float mf1=0.0,mf2=0.0,mf3=0.0;
float G1=0.0,G2=0.0,G3=0.0;
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
float num=0.0;
float den=0.0;
%กำหนดค่าตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกอินพุตของตรรกศาสตร์คลุมเครือ
float x1=0 ,x2=0 ,x3=20 ;
float x4=0 ,x5=20 ,x6=40 ;
float x7=20 ,x8=40 ,x9=40 ;
%กำหนดค่าตำแหน่งฟังก์ชันแสดงความเป็นสมาชิกเอาต์พุตของตรรกศาสตร์คลุมเครือ
float k1=0,k2=0.05,k3=0.1;
*****************************************************************************
%เข้าสู่ฟังก์ชันการตั้งค่า CPU ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR เพื่อใช้งานช่องสื่อสาร
วงจร DAC
*****************************************************************************
void Write_MCP4922(unsigned char DAC_Chanel,unsigned int DAC_Data)
{
  digitalWrite(CS,LOW);
  switch(DAC_Chanel)
  {
    case 0x00 : DAC_Data |=0x3000;
        break;
    case 0x01 : DAC_Data |=0xB000;
        break;
  }
  shiftOut(SDI,SCX,MSBFIRST,(DAC_Data>>8)&0xFF);
  shiftOut(SDI,SCX,MSBFIRST,DAC_Data&0xFF);
  digitalWrite(CS,HIGH);
  digitalWrite(LDAC,LOW);
  digitalWrite(LDAC,HIGH);
}
void setup()
{
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
Serial.begin(19200);
Serial.begin(9600);
Serial.flush();
  pinMode(CS,OUTPUT);
  pinMode(SCX,OUTPUT);
  pinMode(SDI,OUTPUT);
  pinMode(LDAC,OUTPUT);
  pinMode(SHDN,OUTPUT);
  digitalWrite(CS,HIGH);
  digitalWrite(SCX,LOW);
  digitalWrite(SDI,LOW);
  digitalWrite(LDAC,HIGH);
  digitalWrite(SHDN,HIGH);
}
*****************************************************************************
%เข้าสู่ฟังก์ชันตั้งค่าของบอร์ด arduino [void loop()] เพื่อวนรอบสั่งค่ากระแสไฟฟ้าอ้างอิงสำหรับ
ตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแส
*****************************************************************************
void loop()
{
  while(1)
  {
%การอ่านค่าจากวงจรตรวจจับแรงดันไฟฟ้าและแปลงค่าตามสมการ (4-2)
Read_Voltage=analogRead(Voltage_Sensor);
Voltage_Sense=((float)Read_Voltage)/1024*5;
Voltage_Actual=(9.943*Voltage_Sense)-0.2898;
%การอ่านค่าจากวงจรตรวจจับกระแสไฟฟ้าและแปลงค่าตามสมการ (4-8)
Read_Current=analogRead(Current_Sensor);
Current_Sense=((float)Read_Current)/1024*5;
Current_Actual=(1.1044*Current_Sense)-0.0079;
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
%โปรแกรมการคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าและผลต่างของคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อนหน้า
Power_Actual=Voltage_Actual*Current_Actual;
V_n= Voltage_Actual;
C_n= Current_Actual;
P_n= Power_Actual;
Deltha_V_n=V_n-V_n1;
Deltha_C_n= C_n-C_n1;
Deltha_P_n= P_n-P_n1;
Deltha_PandC_n=Deltha_P_n/Deltha_C_n;
**************************************************************************
%โปรแกรมการตรวจสอบสถานะของตรรกศาสตร์คลุมเครือและคำนวณหาค่าฟังก์ชันแสดงความ
เป็นสมาชิกของอินพุต
**************************************************************************
e=(abs(Deltha_PandC_n));
if (e<=x3)
{
   if (e<=x1)
   {
      mfe1 = 1;
   }
   else if (e>=x2 && e<=x3)
   {
      mfe1 = (x3-e)/(x3-x2);
   }
}
else
{
   mfe1 = 0;
}
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
if (e>=x4 && e<=x6)
{
   if (e>=x4 && e<=x5)
   {
      mfe2 = (e-x4)/(x5-x4);
   }
   else if (e>x5 && e<=x6)
   {
      mfe2 = (x6-e)/(x6-x5);
   }
}
else
{
   mfe2 = 0;
}
if (e>=x7)
{
   if (e>=x7 && e<=x8)
   {
      mfe3 = (e-x7)/(x8-x7);
   }
   else if (e>x9)
   {
      mfe3 = 1;
   }
}
else
{
   mfe3 = 0;
}
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
%เริ่มกระบวนการตรวจสอบสถานะของตัวแปรเอาต์พุต
if (mfe1>0)
  {
   mf1 = mfe1;
   G1  = mf1*k1;    }
else
  {
  mf1 = 0.0;
  G1  = 0.0;   }
if (mfe2>0)
  {
  mf2 = mfe2;
  G2  = mf2*k2;   }
else
  {
  mf2 = 0.0;
  G2  = 0.0;   }
if (mfe3>0)
  {
   mf3 = mfe3;
   G3  = mf3*k3;  }
else
  {
   mf3 = 0.0;
   G3  = 0.0;    }
%การอนุมานฟัซซีเพื่อหาเอาต์พุตของตรรกศาสตร์คลุมเครือด้วยวิธีค่าน้ำหนักเฉลี่ย
num = G1+G2+G3;
den = mf1+mf2+mf3;
Deltha_Istep=num/den;
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

```
*****************************************************************************
%โปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีอิงกระแสที่รับค่า ΔI_step มาจากตรรกศาสตร์คลุมเครือ
*****************************************************************************
if (abs(Deltha_PandC_n) <= 50)
   {
   C_n=C_n1;
   }
else if (Deltha_PandC_n > 50)
   {
   C_n=C_n1+Deltha_Istep;
   }
else
   {
   C_n=C_n1-Deltha_Istep;
   }
%เข้าสู่ลูปกระแสไฟฟ้าของตัวควบคุมพีไอ
err=C_n-Current_Actual;
Up=kp*err;
Ui=(ki*Ts*err)+Ui_old;
U=Up+Ui;
if (Upi_i>=5)
  {  Upi_i=5;  }
if (Upi_i<=0)
  {Upi_i=0;  }
%แปลงค่าสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอกและส่งค่าเอาต์พุต Vr ที่ได้ไปยังวงจร DAC
Upi=Upi_i*4095/5;
Vr=Upi;
Write_MCP4922(1,float(Vr));
Ui_old=Ui;
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

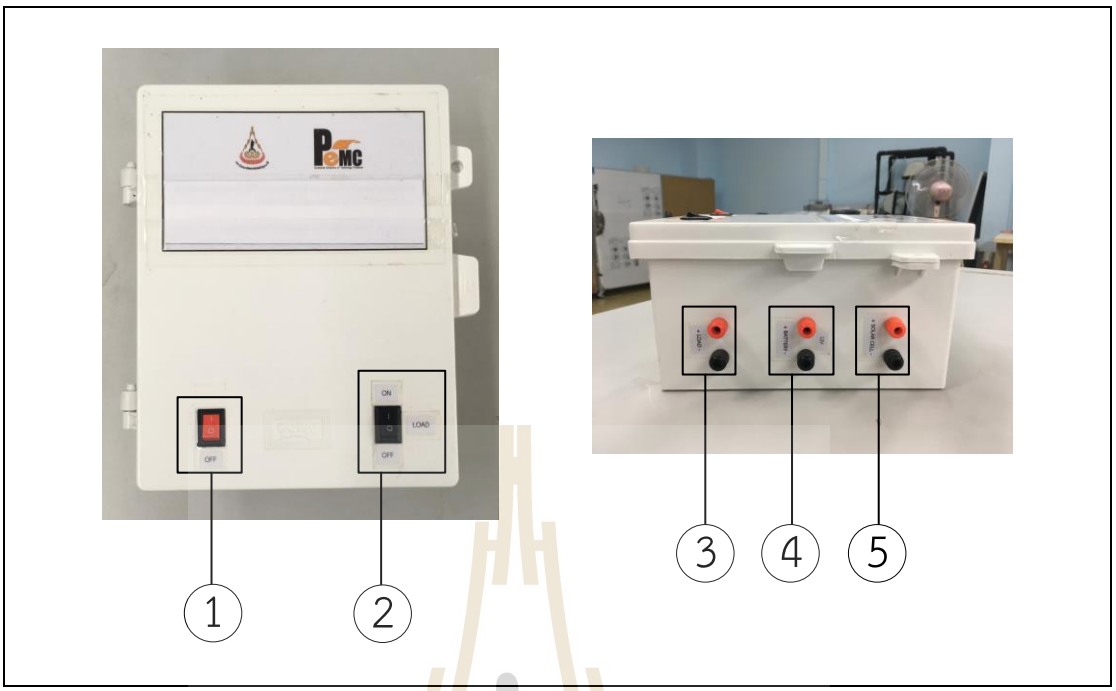
```
%อัพเดทค่าล่าสุด
Deltha_V_n1= Deltha_V_n;
Deltha_C_n1= Deltha_C_n;
Deltha_P_n1= Deltha_P_n;
C_n1=C_n;
V_n1=V_n;
P_n1=P_n;
    }
}
```

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก จ

คู่มือการใช้งานชุดชาร์จเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ จ.1 กล่องชุดชาร์จเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด

คุณสมบัติของกล่องชุดชาร์จเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดในรูปที่ ฉ.1

1.ปุ่มตั้งค่าในโหมดแมนนวลที่ใช้สำหรับการเปิด / ปิดเครื่อง

2.ปุ่มตั้งค่าในโหมดแมนนวลที่ใช้สำหรับการเปิด / ปิดโหลด

3. ขั้วต่อโหลดสำหรับเชื่อมต่อโหลด

4. ขั้วต่อแบตเตอรีสำหรับเชื่อมต่อแบตเตอรี

5. ขั้วต่อแผงโซล่าเซลล์สำหรับเชื่อมต่อแผงโซล่าเซลล์

การเชื่อมต่อสายไฟเข้ากับกล่อง MPPT Charger

ขั้นตอนที่ 1: การเชื่อมต่อสายไฟแบตเตอรี

ต่อสายไฟที่ช่องแบตเตอรีของกล่อง MPPT Charger จากนั้นให้ต่อสายไฟไปยังขั้วของ แบตเตอรี คำเตือน: อาจเกิดการระเบิดหรือไฟไหม้ได้! ระวังอย่าให้แบตเตอรีต่อสลับขั้วหรือลัดวงจรบวก (+) และลบ(-) เด็ดขาด

ขั้นตอนที่ 2:การเชื่อมต่อสายไฟแผงโซล่าเซลล์

ต่อสายไฟจากแผงโซล่าเซลล์ไปยังช่องขั้วต่อแผงโซล่าเซลล์ของ MPPT Charger ให้ต่อให้ถูกช่องและถูกขั้ว

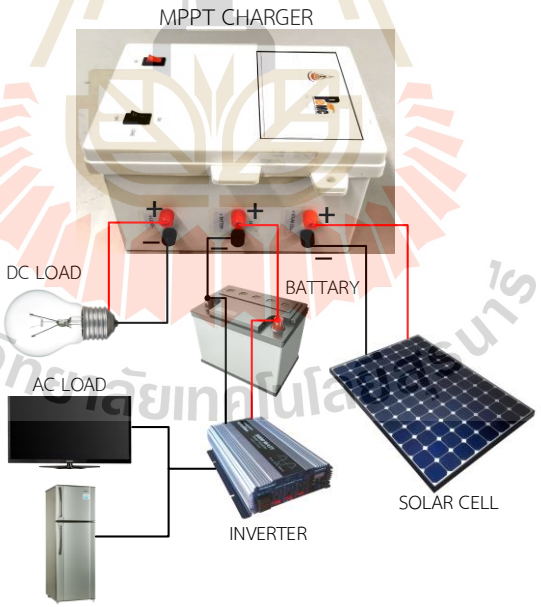
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขั้นตอนที่ 3: การเชื่อมต่อสายไฟโหลด

ต่อสายไฟที่ช่องโหลดของกล่อง MPPT Charger เข้ากับขั้วต่อ + และ – ของโหลด ระวังอย่าต่อสลับขั้วอาจทำให้เกิดความเสียหายกับเครื่องใช้ไฟฟ้าได้ การเชื่อมต่อโหลดสามารถเชื่อมต่อกับโหลด DC เช่น หลอดไฟ เครื่องสูบ มอเตอร์ และโหลดทางไฟฟ้าอื่น ๆ แต่ไม่สามารถนำมาใช้กับโหลด AC หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไปตามบ้านได้ จะต้องผ่านเครื่องแปลงไฟฟ้า (Inverter) แปลงไฟ DC เป็น AC ก่อน โดยจะต่อ Input ของ Inverter เข้ากับแบตเตอรี่ จากนั้นจะต่อเครื่องใช้ไฟฟ้า AC ต่าง ๆ เข้ากับช่อง Output ของ Inverter (ไม่ควรต่อ Inverter เข้าช่องโหลดของกล่อง MPPT Charger โดยตรงเพราะจะทำให้เครื่องทำงานหนัก)

ขั้นตอนที่ 4: ตรวจสอบการเดินสายทั้งหมด

ตรวจสอบสายไฟอีกครั้ง ยืนยันให้แน่ชัดว่าต่อขั้วไฟฟ้าในแต่ละขั้วทั้งหมดถูกต้อง โดยการเชื่อมต่อสายทั้งหมดของอุปกรณ์ระบบโซล่าเซลล์เข้ากับขั้วต่อกล่อง MPPT Charger แสดงได้ดังรูปที่ ฉ.2



รูปที่ จ.2 การเชื่อมต่อสายของระบบโซล่าเซลล์เข้ากับ MPPT Charger

ภาคผนวก ฉ

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Chavaree Thueanpangthaim, Patumporn Wongyai, Kongpan Areerak and Kongpol Areerak. **The Maximu Power Point Tracking for Stand-Alone Photovoltaic SystemusingCurrentBasedApproach**.5th International Electrical Engineering Congress, Pattaya, Thailand, 8-10 March 2017.

ชวรีย์ เถื่อนพังเทียม กองพัน อารีรักษ์ และกองพล อารีรักษ์. **อัลกอริธึมอิงกระแสสำหรับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ**. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 13, ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม 2561. หน้า 1-15.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5th International Electrical Engineering Congress, Pattaya, Thailand, 8-10 March 2017

The Maximum Power Point Tracking for Stand-Alone Photovoltaic System using Current Based Approach

Chavaree Thueanpangthaim, Patumporn Wongyai, Kongpan Areerak* and Kongpol Areerak
Power Electronic, Energy, Machines and Control Research Group
School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima, THAILAND
*kongpan@sut.ac.th

***Abstract*— This paper presents the maximum power point tracking for stand-alone photovoltaic system using current based technique. This method mitigates the disadvantage of conventional perturb and observe (P&O) technique in term of both transient and steady-state responses. The simulation results show that the proposed current based MPPT technique can provide the maximum power point value closed to the corresponding maximum power of photovoltaic for each irradiance. Both transient and steady state responses are better than those of conventional P&O technique.**

Keywords*— *stand-alone photovoltaic; maximum power point tracking; perturb and observe algorithm; current based maximum power point tracking

I. Introduction

Presently, solar energy is widely used in the world because it is clean, free and pollution-free. Thailand is located in the subtropical region and possesses excellent sunshine conditions. However, the efficiency of energy conversion of solar energy into electrical energy is still low. Moreover, the receiving energy depend on an environment and connected load. If engineers can control the operating point of photovoltaic to the maximum power point (MPP), the maximize power from the photovoltaic can be achieved.

MPP can be determined by many techniques, such as the solar tracking by rotating solar panels toward the sun or the maximum power point tracking (MPPT) by controllers. The MPPT algorithm for the photovoltaic is simple and widely used. From a literature survey of MPPT, many techniques such as fractional open circuit voltage [1-3], fractional short circuit current [1-3], perturb and observe (P&O) [4-5], current based [6-7], incremental conductance [8], fuzzy logic [3],[9] have been used. However, it can be found that the P&O technique is one of the most commonly used because of simplicity and ease of implementation. The P&O approach is working well when the irradiance changes slowly. However, it presents drawbacks such as slow response, oscillation around the MPP in steady-state, and poor tracking under changing conditions. Therefore, this paper proposes the current based technique that is improved from the current based algorithm in [3] and [4] by concerning ΔP in the algorithm. It is to ensure that the maximum power point can be achieved. The current reference for the maximum power point can be determined from the proposed approach. After that a PI controller is used to control such current to be equal to the resulting current reference via a buck converter. The results will show that the proposed technique can provide the better transient and steady-state power response.

The paper is structured as follows. The characteristic of photovoltaic is explained in section II. In section III, the algorithm of current based technique is fully presented. The simulation results when the proposed MPPT technique is used are shown in Section IV. Moreover, the comparison results between the P&O method and current based approach are also illustrated in section IV. Finally, the section V concludes the benefit of the proposed current based MPPT technique for stand-alone photovoltaic.

II. Characteristics of Photovoltaic

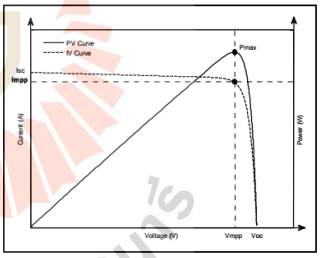


Fig. 1. *I-V and P-V characteristics of photovoltaic*

Characteristics of photovoltaic are depicted in Fig. 1 in which the I-V and P-V curves of photovoltaic are tested at 25°C and 1,000W/m^2 as the standard condition. As can be seen in Fig. 1, each irradiance can provide only one MPP. The MPPT is used to control the system operated around MPP. The voltage and current at MPP are set as V_{mpp} and I_{mpp}, respectively. It can be seen from the I-V curve, the MPP is changed when temperature and irradiance are changed. It is important to operate photovoltaic at the maximum power

978-1-5090-4666-9/17/$31.00 ©2017 IEEE

condition. The proposed method will control the current of photovoltaic at I_{mpp}. As a result, the MPP can be achieved.

III. Proposed Current Based MPPT

A. MPPT for stand-slone photovoltaic system

The MPP can be determined by the MPPT. The MPPT is a technique commonly used with photovoltaic systems to maximize power extraction under all conditions. MPPT for stand-alone photovoltaic system is shown in Fig. 2 in which the MPP is determined from the MPPT algorithm. The DC/DC converter is used to convert DC output voltage from PV panel to the voltage level suitable for feeding battery or load. In this paper, 40W PV panel, buck converter, and 12V battery are used. As for MPPT algorithm, the proposed current based technique is applied.

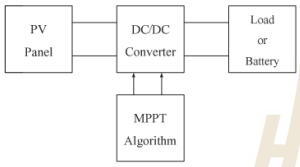


Fig. 2. *Maximum power point tracking for stand-alone photovoltaic system*

B. P&O technique

For P&O technique [1], PV panel voltage is perturbed by changing the duty ratio ($\Delta Dstep$) of DC/DC converter. To achieve the maximum power, PV panel voltage is increased or decreased. If $\Delta Dstep$ is set as a high value, the transient response will be fast. However, the oscillation in power response at steady-state will be occurred. In contrast, if $\Delta Dstep$ is set as a small value, the transient response is very slow. The disadvantage of changing $\Delta Dstep$ is that the varying duty ratio of DC/DC converter affects to the PV power indirectly. As a result, the maximum power value may be incorrect as expected. Therefore, this paper presents a current based MPPT technique to handle such problem. A current based technique uses a current ratio (ΔI_{step}) instead of the duty ratio because changing the current ratio can affect to the PV power directly. As a result, this technique can provide smooth and fast transient response.

C. Current based technique

As can be seen in P-I curve of Fig. 3, if the operating point of the system is initially assumed at B. To achieve the MPP at A, the operating point at B is moved to A. For this case, both ΔP and ΔI are positive that result in $\Delta P/\Delta I > 0$. The PV panel current should be increased by $I_{pv}+\Delta I_{step}$ until $I_{pv}=I_{mmp}$ If the operating point of the system is initially assumed at C, To achieve the MPP at A, the operating point at C is moved to A. For this case, ΔP is positive, while ΔI is negative that result in $\Delta P/\Delta I < 0$. The PV panel current should be decreased by I_{pv}-ΔI_{step} until $I_{pv}=I_{mmp}$ In case of irradiance variation, the P-I curve is depicted in Fig. 4. The operating point is initially assumed at the MPP for I_1 at B. If the irradiance is increased to I_2, the MPP will be changed to A. The operating point should be changed from B to A by using the same condition, here is increasing current. In contrast, if the irradiance is decreased, the PV current should be decreased.

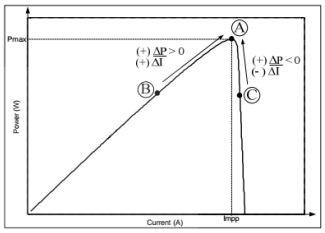


Fig. 3. *P-I curve of PV panel for current based*

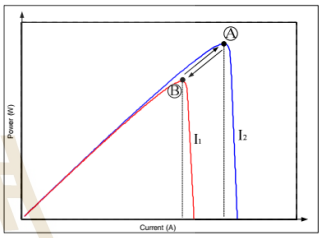


Fig. 4. *P-I curve for irradiance variation*

As for temperature variation, the V-I curve of PV panel will be considered as shown in Fig. 5. The initial operating point is assumed at D that is the MPP of T_1. If the temperature is increased from T_1 to T_2, the MPP is changed to E. Therefore, the operating point should be changed from D to E ($\Delta V_{pv} < 0$) by increasing the PV current. In contrast, if the temperature is decreased ($\Delta V_{pv} > 0$), the PV current must be decreased to achieve the new MPP.

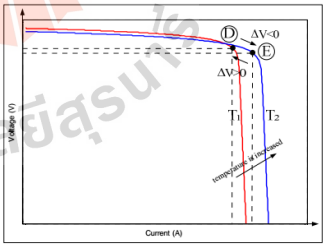


Fig. 5. *V-I curve for tempurature variation*

The flow chart of current based algorithm is depicted in Fig. 6 as follows:

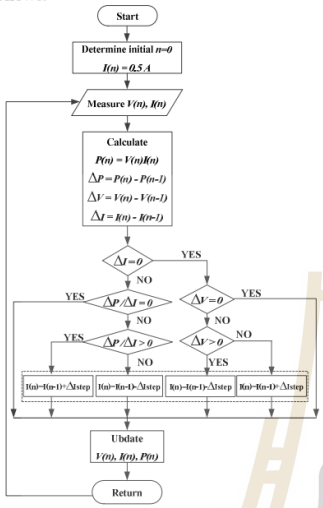


Fig. 6. *Flowchart of current based MPPT*

IV. Simulation Results

The considered system is shown in Fig. 7. It consists of PV panel, MPPT current based controller, buck converter feeding 12V battery. The current and voltage of PV panel are measured into the current based algorithm. The proposed algorithm will provide the reference current in which the MPP can be obtained. The PI controller will provide the control signal for adjusting the pulse for the switch *S* of buck converter to achieve the PV current following on the reference.

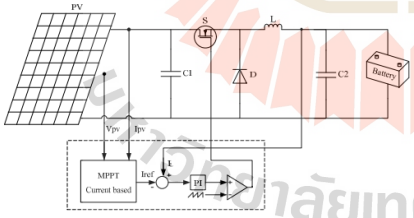


Fig. 7. *The considered system*

In order to show the feasibility and performance of the proposed current based technique, the system of Fig. 7 is simulated via the SIMULINK and MATLAB with the PV module conditions as given in Table I and parameters of buck converter as given in Table II.

TABLE I. SPECIFICATION OF PV MODULE

Parameter	Value	Details
V_{oc}	43.125 V	Open circuit voltage
I_{sc}	1.1 A	Short circuit current
V_{mpp}	38.73 V	Maximum power point voltage
I_{mpp}	1.033 A	Maximum power point current
P_{max}	40 W	Rated maximum power (W)

TABLE II. PARAMETER OF BUCK CONVERTER

Parameter	Value	Details
C_1	100 µF	Capacitor
C_2	2200 µF	Capacitor
L	10 mH	Inductance
f_{sw}	10 kHz	Switching frequency
V_{batt}	12 V	Output voltage

The simulation results of the system in Fig. 7 with current based algorithm are shown in Fig. 8. Step changes of irradiance equal to 600, 400, 500, 1000 and 800 W/m^2 at temperature 25°C are applied. At irradiance equal to 1000 W/m^2, PV panel can generate power 40W in which this value is the MPP for 1000 W/m^2. If irradiance is decreased or increased, the proposed technique can track the power and the MPP can be obtained.

The comparison results between P&O and current based technique are shown in Fig. 9 in which a step change of irradiance equal to 500, 1000 and 750 W/m^2 at temperature 25°C is applied. It can be seen that the proposed algorithm can provide the better transient performance compared with P&O technique. Moreover, for the steady-state response, oscillation around the MPP is occurred for P&O method. The error of MPP in steady-state under changing conditions can be also found. In contrast, the current based technique can provide the faster response as well as a good accuracy in steady-state response.

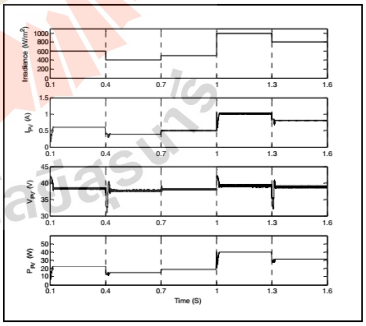


Fig. 8. *Simulation results of current based technique*

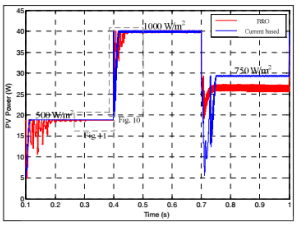


Fig. 9. *Simulation result of compare P&O and current based*

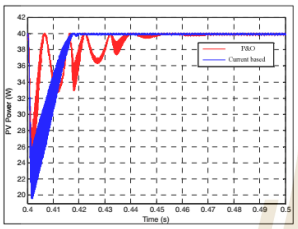


Fig. 10. *Power transient at irradiance 1000 W/m²*

The zoom area of transient response for 1000W/m² is shown in Fig. 10. It can be seen that the current based method can provide the better transient response than those from the P&O method. As for steady-state response, the zoom area of power response for 500W/m² is considered as depicted in Fig.11. The high oscillation is occurred when the P&O method is applied. Moreover, the power delivered from PV panel from the P&O method is lower than those from the proposed MPPT method.

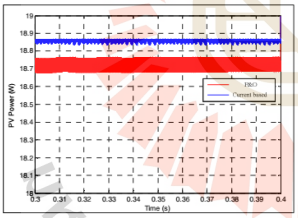


Fig. 11. *Steady-state power at irradiance 500 W/m²*

The percentage of increased power when using P&O and current based MPPT technique compared with the system without MPPT technique can be calculated by (1).

$$\frac{P_{MPPT} - P_{without}}{P_{without}} x100\% \qquad (1)$$

where P_{MPPT} is the power from the MPPT methods, while $P_{without}$ is the power for the system without MPPT algorithm.

As for the irradiance equal to 500, 750 and 1000 W/m², the power of photovoltaic without MPPT technique equal to 6.42, 9.72, 13.01 W, respectively. As a result, the percentage of increased power following on (1) is given in TABLE III. It can be seen that the current based approach can provide maximum power for each irradiance, especially the power at irradiance equal to 750 W/m².

TABLE III. PERCENTAGE OF INCREASED POWER

Irradiance(W/m²)	P&O		Current based	
	P_{MPPT} (W)	*% of increased power*	P_{MPPT} (W)	*% of increased power*
500	18.7	191.27	18.87	193.92
750	26.35	171.09	29.37	202.16
1000	40	206.98	40	206.98

V. Conclustion

The paper presents the current based MPPT technique for maximize the PV panel power of stand-alone photovoltaic. The simulation results show that the maximum power point can be obtained via the proposed current based MPPT technique. The transient and steady-state responses of PV power are better than those of P&O technique.

Acknowledgment

This work was supported by Suranaree University of Technology (SUT).

References

[1] [Trishan Esram and Patrick L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", in IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, No. 2, June 2007.

[2] Ali F Murtaza, Hadeed Ahmed Sher, Marcello Chiaberge, Diego Boero, Mirko De Giuseppe and Khaled E Addoweesh, "Comparative Analysis of Maximum Power Point Tracking Techniques for PV applications", Pakistan , Saudi Arabia and Italy, pp. 83-88, IEEE 2013.

[3] Mei Shan Ngan and Chee Wei Tan, "A Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand-alone Photovoltaic Systems", in IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC), Johor Bahru, Malaysia, pp.22-27, April 2011.

[4] Patumporn Wongyai, kongpan Areerak and Kongpol Areerak, "Perturb and Observe MPPT for Stand-alone Photovoltaic," The 38th Electrical Engineering Conference (EECON-38), Ayutthaya, 18-20 November 2015.

[5] R. Boukenoui, R. Bradai, A. Mellit, M. Ghanes and H. Salhi, "Comparative Analysis of P&O, Modified Hill Climbing-FLC, and Adaptive P&O-FLC MPPTs for Microgrid Standalone PV System", in 4th International Conference on Renewable Energy Renewable Energy Research and Applications, Palermo, 22-25 Nov 2015, pp. 1095-1099.

[6] Hanju Cha and Sanghoey Lee, "Design and Implementation of Photovoltaic Power Conditioning System using a Current based Maximum Power Point Tracking," Chungnam National University/Department of Electrical Engineering, Korea, 2008.

[7] Alivarani Mohapatra1, Byamakesh Nayak2, and K.B.Mohanty3, "Current Based Novel Adaptive P&O MPPT Algorithm for Photovoltaic System Considering Sudden Change in the Irradiance", in IEEE International Conference on Power Electronics, 2014.

[8] I. William Christopher and Dr.R.Ramesh, "Comparative Study of P&O and InC MPPT Algorithms", in American Journal of Engineering Research (AJER), Volume-02, Issue-12, pp. 402-408, 2013.

[9] L. Bouselham and B. Hajji, H. Hajji, "Comparative Study of Different MPPT Methods for Photovoltaic System", ENSA-UMP, Morocco, BP 669, 60000 oujda, 2015.

SWU Engineering Journal (2018) 13(2), 1-15
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561

อัลกอริธึมอิงกระแสสำหรับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

Current Based Algorithm for the Maximum Power Point Tracking of Stand-alone Photovoltaic System

ชวรีย์ เถื่อนพังเทียม กองพัน อารีรักษ์* และกองพล อารีรักษ์
กลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
Chavaree Thueanpangthaim, Kongpan Areerak* and Kongpol Areerak
Power Electronic, Energy, Machines and Control Research Group
School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
*Corresponding author: Email: kongpan@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนออัลกอริธึมอิงกระแสในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ อัลกอริธึมดังกล่าวสามารถปรับปรุงสมรรถนะการตามรอยจุดกำลังสูงสุดเมื่อเทียบกับวิธีรบกวนและสังเกต โดยอัลกอริธึมอิงกระแสจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรงทำให้มีการตอบสนองที่รวดเร็วขึ้นและสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างถูกต้องเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมของการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ การยืนยันผลการตอบสนองทางพลวัตรของอัลกอริธึมอิงกระแสในบทความจะอาศัยการจำลองสถานการณ์ด้วยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังบนโปรแกรม MATLAB นอกจากนี้ยังมีการทดสอบด้วยชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ ผลการทดสอบพบว่าอัลกอริธึมอิงกระแสสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างถูกต้องและลดการกวัดแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะคงตัว อีกทั้งยังให้เวลาตอบสนองในสภาวะชั่วครู่ที่รวดเร็วกว่าเมื่อเทียบกับวิธีรบกวนและสังเกต

คำสำคัญ: ระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ การตามรอยจุดกำลังสูงสุด วิธีรบกวนและสังเกต อัลกอริธึมอิงกระแส

ABSTRACT

This paper present current based algorithm for the maximum power point tracking of stand-alone system. The proposed algorithm can improve the tracking performance compared with the conventional perturb and observe (P&O) method. The current based algorithm directly uses the change of photovoltaic current. As a result, the response and the achieved power are better than there of the P&O method. To verify the advantage of the proposed algorithm, the simulation via MATLAB and the experimental results from the hardware implementation are used. The results show that the current based algorithm can provide the better performance in both transient and steady-state response compared with the P&O method.

Keyword: Stand-alone photovoltaic, Maximum power point tracking, Perturb and observe method, Current based algorithm.

1. บทนำ

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนทางธรรมชาติที่สำคัญที่สุด ไม่มีวันหมด และเป็นพลังงานสะอาดที่ไม่ทำให้เกิดมลภาวะ ทั้งยังนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ เซลล์แสงอาทิตย์(Solar cell หรือ Photovoltaic cell: PV)จึงเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ผลิตไฟฟ้า เนื่องจากสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีอัตราการใช้งานที่สูง แต่เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าค่อนข้างต่ำและพลังงานไฟฟ้าที่ได้จะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมและโหลด จึงทำให้ไม่สามารถได้พลังงานสูงสุดที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด(Maximum Power Point: MPP) ที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้ จึงได้มีการนำเอาระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดเข้ามาใช้งาน เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ การดึงพลังงานสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้นั้นมีหลายวิธีด้วยกัน ทั้งระบบติดตามแสงอาทิตย์และการหาจุดจ่ายกำลังสูงสุด ในบทความนี้จะอาศัยการหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากในบางเวลาความเข้มแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์และอุณหภูมิที่ได้รับอาจจะไม่สม่ำเสมอกันตลอดทั้งวัน จึงทำให้กระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ไม่คงที่ ดังนั้นจึงมีการนำระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุด(Maximum Power Point Tracking: MPPT) มาใช้งาน เพื่อให้ได้พลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายได้ในสภาวะแวดล้อมขณะนั้น

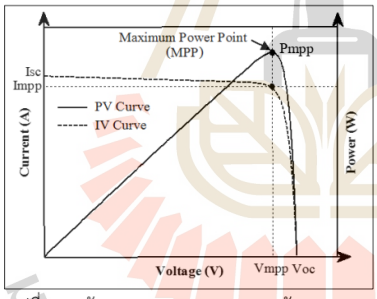
จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตจนถึงปัจจุบัน มีวิธีการตามรอยจุดกำลังสูงสุดหลากหลายวิธีด้วยกันที่ถูกนำมาใช้งานร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น วิธีแรงดันเปิดวงจร (Fractional Open Circuit Voltage: V_{oc})[1]-[3] วิธีกระแสลัดวงจร (Fractional Short Circuit Current: I_{sc})[1]-[3] วิธีรบกวนและสังเกต (Conventional Perturb and Observe method: Conventional P&O)[4]-[5] วิธีอิงกระแส (Current based Method)[6]-[8] วิธีเพิ่มค่าความนำ (Incremental Conductance Method: IncCond)[1],[9] และวิธีตรรกศาสตร์คลุมเครือหรือตัวควบคุมฟัซซี (Fuzzy Logic Method)[10]-[12] เป็นต้น โดยวิธีรบกวนและสังเกตนั้นถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและมีขั้นตอนในการคำนวณน้อย แต่ถ้ากำหนดค่าพารามิเตอร์ไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดปัญหาการกวัดแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะคงตัวและทำให้ไม่สามารถหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างถูกต้อง เพื่อแก้ปัญหาข้อเสียของวิธีรบกวนและสังเกตที่เกิดขึ้น ผลจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าวิธีอิงกระแส สามารถดึงพลังงานสูงสุดที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดได้อย่างถูกต้อง ลดการกวัดแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะคงตัว และมีการตอบสนองในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะทำให้ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดมีประสิทธิภาพการทำงานมากยิ่งขึ้น ดังนั้นบทความนี้จึงได้เลือกนำวิธีการดังกล่าวมาศึกษาและทำการเปรียบเทียบกับวิธีรบกวนและสังเกต เพื่อยืนยันข้อดีของวิธีอิงกระแส การตรวจสอบความถูกต้องและยืนยันผลศึกษาที่ได้จากวิธีที่นำเสนอในบทความนี้จะอาศัยการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB พร้อมทั้งทดสอบชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ

การนำเสนอในบทความนี้ ประกอบไปด้วย 7 ส่วน ด้วยกันคือ ส่วนที่ 1 บทนำที่ได้กล่าวไปข้างต้น ส่วนที่ 2 เป็นการอธิบายสมการทางคณิตศาสตร์และคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนที่ 3 กล่าวถึงการตามรอยจุดกำลังสูงสุด ส่วนที่ 4 เป็นส่วนการนำเสนอการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ส่วนที่ 5 นำเสนอชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบ ส่วนที่ 6 นำเสนอผลการทดสอบและอภิปราย และส่วนสุดท้ายส่วนที่ 7 เป็นส่วนสรุปผลที่แสดงถึงข้อดีของอัลกอริธึมอิงกระแสสำหรับการควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุด

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561

2. คุณลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้โดยตรง โดยการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า เมื่อพิจารณาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแสดงได้โดยใช้กราฟคุณลักษณะเฉพาะกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์(I-V Curve) และกราฟคุณลักษณะเฉพาะกำลังและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ (P-V Curve) ซึ่งใช้ตรวจสอบกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถผลิตได้ ถ้าหากปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์และอุณหภูมิของเซลล์มีค่าคงที่ที่สภาวะมาตรฐาน (Standard Test Condition: STC) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส($^{\circ}$C) และความเข้มแสง 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร(W/m^2) จะสามารถสร้างกราฟลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 คุณลักษณะเฉพาะของกระแส แรงดัน และกำลังของเซลล์แสงอาทิตย์

จากรูปที่ 1 จะมีจุดสำคัญที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด เรียกว่า Maximum Power Point (MPP หรือ P_{mpp}) โดยการพิจารณาคุณลักษณะทางกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ จะมีพารามิเตอร์สำคัญที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วย แรงดันไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด(V_{mpp}), กระแสไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด(I_{mpp}), กระแสขณะลัดวงจร(I_{sc}) และ แรงดันขณะเปิดวงจร(V_{oc}) โดยตัวแปรที่สำคัญที่มีส่วนทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่มีอยู่ด้วย 2 ตัวแปร คือ อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ และปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์

2.1 ผลกระทบของอุณหภูมิ

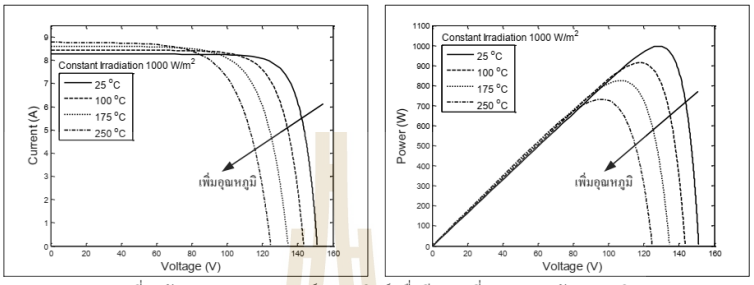
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีผลต่อแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสามารถแสดงกราฟลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังรูปที่ 2 จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้แรงดัน และกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง

2.2 ผลกระทบของปริมาณความเข้มแสง

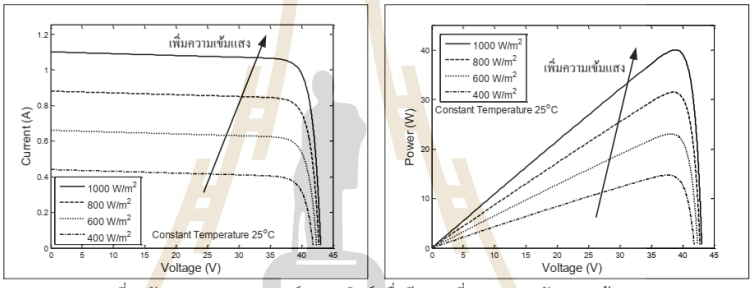
ค่ากระแสไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากเซลล์แสงอาทิตย์มีสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง โดยเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มแสง จะส่งผลต่อกระแสที่จ่ายได้ของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยสามารถแสดงกราฟลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ดังรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้กระแส และกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น

3. การตามรอยจุดกำลังสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

การดึงพลังงานสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถทำได้โดยการใช้ระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุด (MPPT) ซึ่งระบบ MPPT เป็นเทคนิคที่นิยมนำมาใช้กับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะแวดล้อมต่าง ๆ โดยทั่วไประบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ(MPPT for stand-alone photovoltaic system) จะถูกนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันดีซีเป็นดีซี(DC/DC Converter) ซึ่งในบทความนี้จะใช้วงจรแปลงผันแบบบัคก์(Buck Converter) ในการแปลงแรงดันที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการป้อนสู่เอาต์พุตแบตเตอรีหรือโหลด (Load or Battery) แสดงได้ดังรูปที่ 4

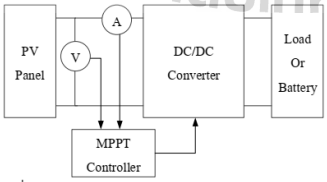


รูปที่ 2 ลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิ



รูปที่ 3 ลักษณะเฉพาะของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มแสง

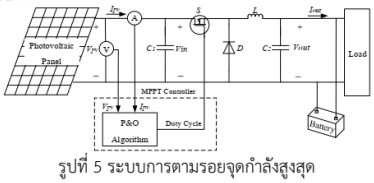
จากรูปที่ 4 วัตถุประสงค์ของตัวควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดคือเพื่อให้ได้ผลการตามรอยอย่างรวดเร็วถูกต้อง และลดการกวัดแกว่งเนื่องจากสภาวะแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลง โดยที่อัลกอริธึมของ MPPT แต่ละวิธีนั้นจะทำการคำนวณ MPP และติดตามแรงดัน(V_{mpp}) หรือกระแส(I_{mpp}) ของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด(P_{mpp}) โดยการให้สัญญาณคำวัฏจักรหน้าที่(Duty Cycle: D) ที่เหมาะสมกับวงจรแปลงผัน



รูปที่ 4 การตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

3.1 วิธีรบกวนและสังเกต

ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีรบกวนและสังเกตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งหลักการทำงานของวิธีรบกวนและสังเกต จะอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่ของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ในการเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อกำหนดจุดการทำงานให้แรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด ซึ่งจะทำให้สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้



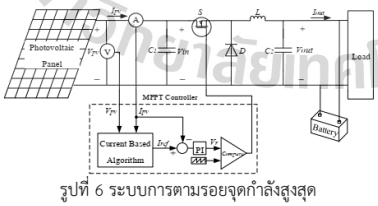
รูปที่ 5 ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีรบกวนและสังเกต

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561

ถ้ากำหนดค่าวัฏจักรหน้าที่ *D* ให้มีค่ามาก จะทำให้ช่วงเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวรวดเร็ว แต่จะทำให้เกิดปัญหาการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะคงตัว และจะทำให้ไม่สามารถหาจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างถูกต้อง ในทางตรงกันข้าม ถ้ากำหนดค่าวัฏจักรหน้าที่ *D* ให้มีค่าน้อย จะทำให้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวช้า จากปัญหาการเลือกกำหนดขนาด *D* นั้นจะส่งผลกระทบทางอ้อมต่อกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ ซึ่งอาจทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ได้ไม่ถูกต้องตามที่คาดหวังไว้ บทความนี้จึงได้นำเสนอระบบการตามรอยกำลังสูงสุดด้วยอัลกอริธึมอิงกระแส เพื่อจัดการกับปัญหาดังกล่าว ซึ่งจะอาศัยการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (ΔI_{step}) โดยตรง แทนการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่โดยการเลือกกำหนดค่า ΔI_{step} แทนนั้น เป็นการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการแปลงกำลังไฟฟ้าที่ได้ของเซลล์แสงอาทิตย์โดยตรง จึงทำให้มีเวลาการตอบสนองก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวรวดเร็วขึ้นและทำให้เข้าใกล้จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดมากยิ่งขึ้น

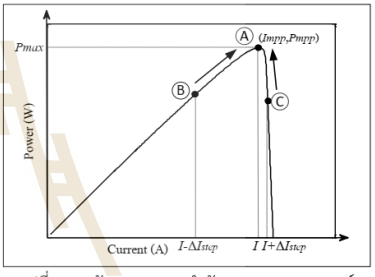
3.2 อัลกอริธึมอิงกระแส

ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยอัลกอริธึมอิงกระแสที่พิจารณาในบทความนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งประกอบไป แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดที่ใช้อัลกอริธึมอิงกระแส สำหรับนำมาประยุกต์ใช้กับวงจรแปลงผันแบบบัคก์ เพื่อหากำลังไฟฟ้าสูงสุด และโหลดหรือแหล่งพลังงานสำรองแบตเตอรี



รูปที่ 6 ระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยอัลกอริธึมอิงกระแส

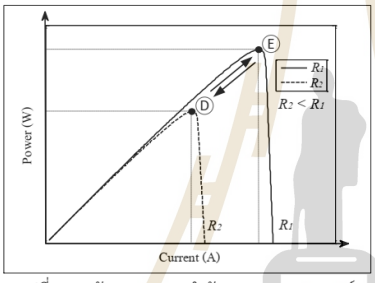
อัลกอริธึมอิงกระแส จะทำงานโดยใช้การเปรียบเทียบกำลังและกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในการหาจุดกำลังสูงสุด จากนั้นจะอาศัยการปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้า เพื่อให้กระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด ซึ่งจะทำให้สามารถดึงกำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุดได้ สามารถพิจารณาหลักการทำงานของอัลกอริธึมอิงกระแสได้จากกราฟคุณลักษณะเฉพาะของกำลังและกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 คุณลักษณะเฉพาะกำลังและกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับอัลกอริธึมอิงกระแส

จากรูปที่ 7 เมื่ออุณหภูมิและปริมาณความเข้มแสงคงที่ ถ้าหากจุดการทำงานเริ่มต้นอยู่ที่จุด B ต้องการให้จุดการทำงานเปลี่ยนไปยังจุดกำลังสูงสุดที่จุด A จะทำให้ทั้งค่าผลต่างของกำลังไฟฟ้า(ΔP) และกระแสไฟฟ้า(ΔI) ของเซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อนหน้ามีค่าเป็นบวก จึงทำให้ $\Delta P > 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} \geq 0$ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกเพิ่มค่าโดย $I + \Delta I_{step}$ จนกระทั่ง $I = I_{mpp}$ เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด และเมื่อพิจารณาเปลี่ยนจุดการทำงานจากจุด C ไปยังจุด A จะทำให้ค่าผลต่างของกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเป็นบวก(+ ΔP) ในขณะที่ค่าผลต่างของกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเป็นลบ(- ΔI) มีผลทำให้ $\Delta P > 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} < 0$ เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจะต้องลดค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดย

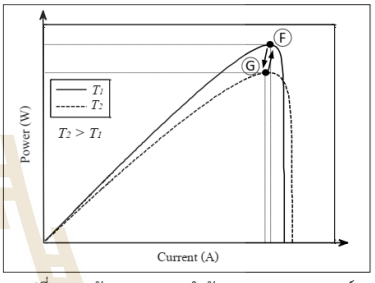
$I - \Delta I_{step}$ จนกระทั่ง $I = I_{mpp}$ โดยค่ากระแสที่จุดกำลังสูงสุดที่ได้นี้จะถูกกำหนดเป็นกระแสไฟฟ้าอ้างอิง (I_{ref}) ในรูปที่ 6 และนำมาเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์(I_{pv}) เพื่อหาค่าความผิดพลาดผ่านตัวควบคุมพีไอ ซึ่งตัวควบคุมพีไอนี้จะให้สัญญาณแรงดันอ้างอิงในการเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อย จากนั้นจะได้สัญญาณพัลส์สำหรับขับสวิตช์วงจรแปลงผันแบบบัคก์ ซึ่งจะทำให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สภาวะแวดล้อมขณะนั้น



รูปที่ 8 คุณลักษณะเฉพาะกำลังและกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง

ในกรณีที่ปริมาณความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงสามารถพิจารณาได้จาก P-I Curve ดังรูปที่ 8 โดยความเข้มแสงของ R_1 จะมีค่ามากกว่า R_2 ถ้าปริมาณความเข้มแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้น พิจารณาจุดการทำงานจุด D (จุด MPP ของความเข้มแสง R_2) ต้องการให้จุดการทำงานเปลี่ยนไปยังจุด E (จุด MPP ของความเข้มแสง R_1) จะทำให้ $\Delta P > 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} \geq 0$ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกเพิ่มค่าเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด ในทางตรงข้าม ถ้าปริมาณความเข้มแสงมีค่าลดลง จุดการทำงานจะเปลี่ยนจากจุด E ไปยังจุด D มีผลทำให้ $\Delta P < 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} \geq 0$ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกปรับลดค่าลงเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดเช่นกัน

ในกรณีที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงจะพิจารณา P-I Curveดังรูปที่ 9 ถ้าอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นจาก T_1 ไปยัง T_2 จุดการทำงานจุด F (จุด MPP ของอุณหภูมิ T_1) จะเปลี่ยนไปยังจุด G (จุด MPP ของอุณหภูมิ T_2) มีผลทำให้ $\Delta P < 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} \geq 0$ กระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกลดค่าลงเพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด แต่ถ้าหากอุณหภูมิมีค่าลดลง จะทำให้ $\Delta P > 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} \geq 0$ กระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกเพิ่มค่าเพื่อไปยังจุด MPP จุดใหม่



รูปที่ 9 คุณลักษณะเฉพาะกำลังและกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

อัลกอริธึมอิงกระแสนี้สามารถหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้แม้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมอย่างรวดเร็ว และสามารถหากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้อย่างถูกต้อง แต่ต้องอาศัยขั้นตอนการคำนวณเพิ่มมากขึ้น จากการพิจารณาจุดการทำงานของการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยอัลกอริธึมอิงกระแส สามารถนำมาเขียนแผนภาพลำดับการทำงานของการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยอัลกอริธึมอิงกระแสได้ดังรูปที่ 10

จากรูปที่ 10 แผนภาพลำดับการทำงานของการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยอัลกอริธึมอิงกระแส เริ่มแรกจะทำการกำหนดค่าเริ่มต้นให้อัลกอริธึมมีค่า $P(0) = 0$ W, $V(0) = 0$ V และ $I(0) = 0.5$ A จากนั้นจะทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า $V(n)$ และกระแสไฟฟ้า $I(n)$ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบันแล้วนำมาคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ $P(n) = V(n)I(n)$ พร้อมทั้งเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้า (ΔP)และกระแสไฟฟ้า(ΔI)ในคาบเวลาปัจจุบันกับ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 7
ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561

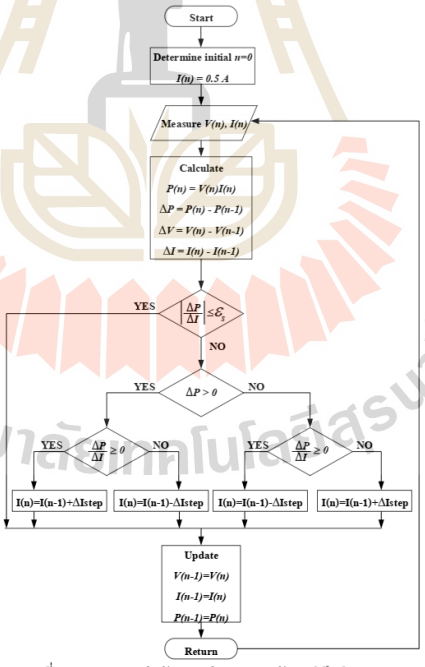
คาบเวลาก่อนหน้า เพื่อนำมาใช้ในการตรวจสอบเงื่อนไข โดยการใช้ $\frac{\Delta P}{\Delta I}$ มาเปรียบเทียบกับค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ ε_s ก่อน ถ้า $\frac{\Delta P}{\Delta I} \le \varepsilon_s$ อัลกอริธึมจะไม่เข้าสู่กระบวนการตรวจสอบเงื่อนไข แต่จะทำการอัพเดตค่ากำลังไฟฟ้า $P(n)$ และกระแสไฟฟ้า $I(n)$ในคาบเวลาปัจจุบัน เพื่อนำไปใช้คำนวณในรอบต่อไป และอัลกอริธึมจะเริ่มต้นการทำงานใหม่อีกครั้ง ในทางตรงข้ามถ้า $\frac{\Delta P}{\Delta I} > \varepsilon_s$ อัลกอริธึมจะทำการเปรียบเทียบค่า ΔP และ $\frac{\Delta P}{\Delta I}$ ว่ามีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์หรือไม่ โดยจะทำการเปรียบเทียบค่า ΔP ก่อนแล้วถึงจะเปรียบเทียบค่า $\frac{\Delta P}{\Delta I}$ ซึ่งจะมีการตรวจสอบเงื่อนไขด้วยกันทั้งหมด 4 เงื่อนไข ดังนี้

1) ถ้า $\Delta P > 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} \ge 0$ อัลกอริธึมจะทำการปรับค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ $I(n) = I(n-1) + \Delta I_{step}$

2) ถ้า $\Delta P > 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} < 0$ อัลกอริธึมจะทำการปรับค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ $I(n) = I(n-1) - \Delta I_{step}$

3) ถ้า $\Delta P < 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} \ge 0$ อัลกอริธึมจะทำการปรับค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ $I(n) = I(n-1) - \Delta I_{step}$ และสุดท้าย

4) ถ้า $\Delta P < 0$ และ $\frac{\Delta P}{\Delta I} < 0$ อัลกอริธึมจะทำการปรับค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ $I(n) = I(n-1) + \Delta I_{step}$ จากนั้นอัลกอริธึมจะทำการอัพเดตค่า $P(n)$ และ $I(n)$ และอัลกอริธึมจะเริ่มต้นทำงานใหม่อีกครั้ง



รูปที่ 10 แผนภาพลำดับการทำงานของอัลกอริธึมอิงกระแส

4. การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์

การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ เพื่อยืนยันว่าอัลกอริธึมอิงกระแส สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดและตามรอยจุดกำลังสูงสุดได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม ซึ่งการจำลองสถานการณ์ของระบบดังรูปที่ 6 ในบทความนี้ จะอาศัยชุดบล็อกไฟฟ้ากำลังร่วมกับ SIMULINK บนโปรแกรม MATLAB ในการจำลองสถานการณ์ โดยกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าในส่วนต่าง ๆ ที่พิจารณาในการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ในส่วนต่าง ๆ ของระบบ

พารามิเตอรแผงเซล์แสงอาทิตย์	**ค่า**
V_{mpp}	38.73 V
I_{mpp}	1.033 A
V_{oc}	43.125 V
I_{sc}	1.1 A
$P_{\max}$	40 W
พารามิเตอร์วงจรแปลงผันแบบบัคก์	**ค่า**
c_1	100 μF
c_2	1000 μF
L	10 mH
f_{sw}	10 kHz
v_{batt}	12 V

4.1 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของอัลกอริธึมอิงกระแส

การจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ในบทความนี้ กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงและให้ค่าอุณหภูมิคงที่ที่ 25 °C ทุกความเข้มแสง โดยการจำลองสถานการณ์แบ่งเป็นลักษณะสัญญาณของความเข้มแสงออกเป็น 2 ช่วงหลัก ๆ ดังนี้ ช่วงที่ 1 สัญญาณลาดเอียงโดยเพิ่มจาก 700 ไป 800 W/m^2 (ในช่วงเวลา 0.2 วินาที) และลดจาก 800 ไปเป็น 600 W/m^2 (ในช่วงเวลา 0.2 วินาที) และ ช่วงที่ 2 สัญญาณขั้นบันไดลดจาก 600 ไปเป็น 500 W/m^2 และเพิ่มจาก 500 ไปยัง 1000 W/m^2 ดังรูปที่ 11(ก) โดยการจำลองสถานการณ์จะทำการวัดค่า I_{pv}, V_{pv} และ P_{pv} แสดงได้ดังรูปที่ 11(ข)-(ง) ตามลำดับ พบว่าอัลกอริธึมอิงกระแสที่ได้นำเสนอ สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายได้ ทั้งแบบที่มีความเข้มแสงแบบสัญญาณลาดเอียงและสัญญาณขั้นบันได โดยสังเกตได้ว่าถ้าปริมาณความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง กระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงตามปริมาณความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลง ทำให้สามารถติดตามกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงและทำให้ได้กำลังไฟฟ้าที่จุด MPP

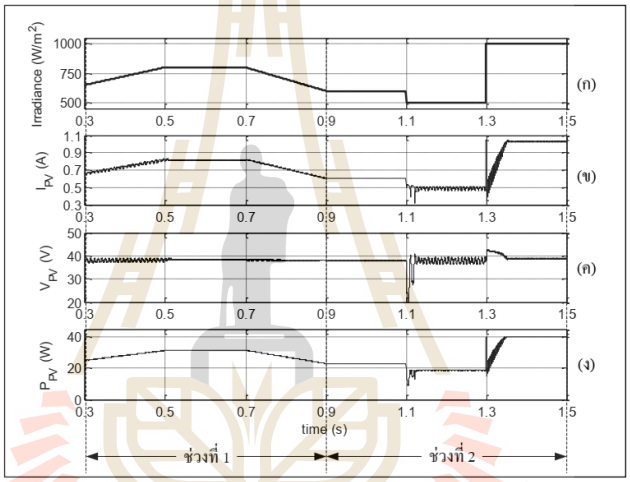
4.2 การเปรียบเทียบผลการตามรอยจุดกำลังสูงสุดระหว่างวิธีรบกวนและสังเกตกับอัลกอริธึมอิงกระแส

การจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบผลการตามรอยจุดกำลังสูงสุด ด้วยวิธีรบกวนและสังเกตกับอัลกอริธึมอิงกระแส ได้ทำการจำลองสถานการณ์เปลี่ยนแปลงความเข้มแสงแบบทันทีทันใดออกเป็น 3 ช่วงด้วยกันคือ 600, 1000 และ 800 W/m^2 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิคงที่ 25 °C แสดงได้ดังรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่าอัลกอริธึมอิงกระแสที่ได้นำเสนอในบทความนี้ มีการตอบสนองในสภาวะชั่วครู่ (transient) ที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธีรบกวนและสังเกต และการตอบสนองในสภาวะคงตัว (steady-state) อัลกอริธึมอิงกระแสสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ดีกว่า รวมทั้งมีความถูกต้องแม่นยำที่ดีกว่าวิธีรบกวนและสังเกต เนื่องจากวิธีรบกวนและสังเกต เกิดการกวัดแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด และอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมได้ เนื่องจากวิธีรบกวนและสังเกต จะต้องอาศัยการกำหนดค่า ΔD ที่เหมาะสมเพียงค่าเดียว ทำให้ดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้น้อยกว่าอัลกอริธึมอิงกระแส

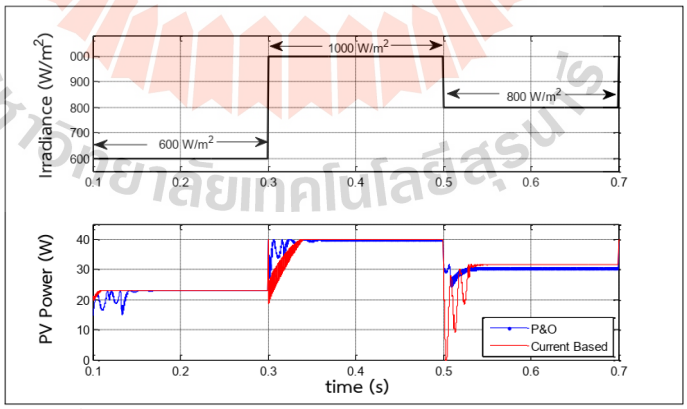
จากรูปที่13(ก) เมื่อพิจารณาเฉพาะช่วงสภาวะชั่วครู่ในสภาวะมาตรฐาน ที่ความเข้มแสง 1000 W/m^2 และอุณหภูมิ 25 °C ในช่วงวินาทีที่ 0.3 ถึง 0.4s จะพบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงแบบทันทีทันใด ในวิธีรบกวนและสังเกตมีเวลาในการตอบสนองที่ช้า โดยใช้

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561

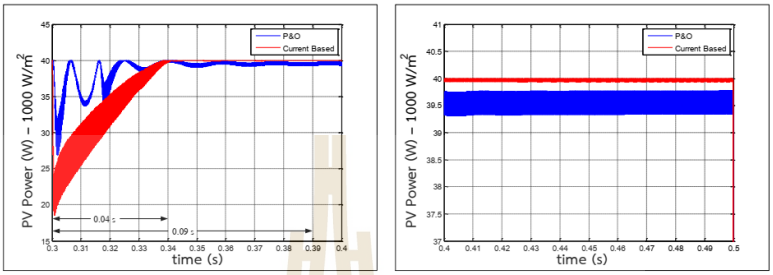
เวลาก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัว 0.09s แต่ในอัลกอริธึมอิงกระแสใช้เวลาในการตอบสนองที่รวดเร็วกว่า โดยใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว 0.04s และเมื่อพิจารณาเฉพาะช่วงสภาวะคงตัว ที่ความเข้มแสงเดียวกัน ในช่วงวินาทีที่ 0.35 ถึง 0.5 ในรูปที่ 13(ข) จะสังเกตได้ว่าในวิธีรบกวนและสังเกตมีการกวัดแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุดในสภาวะคงตัวมาก และไม่สามารถหาจุดกำลังสูงสุดได้อย่างถูกต้อง โดยวิธีรบกวนและสังเกตสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 39.5 W แต่ในอัลกอริธึมอิงกระแสสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้มากกว่าคือ 40 W โดยค่าดังกล่าวตรงกับค่ากำลังไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดสำหรับความเข้มแสง 1000 W/m^2 ดังนั้นระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยอัลกอริธึมอิงกระแส ให้ประสิทธิภาพการทำงานที่ดีกว่าวิธีรบกวนและสังเกต



รูปที่ 11 ผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ของอัลกอริธึมอิงกระแส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง



รูปที่ 12 ผลการจำลองสถานการณ์เปรียบเทียบวิธีรบกวนและสังเกตกับอัลกอริธึมอิงกระแส

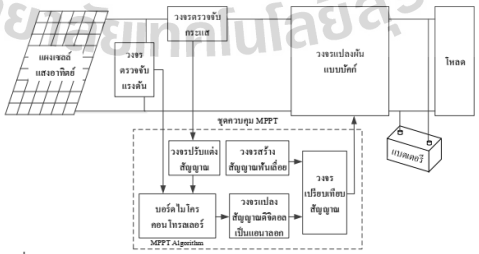


(ก) กำลังไฟฟ้าในสภาวะชั่วครู่ (transient) (ข) กำลังไฟฟ้าในสภาวะคงตัว (steady-state)

รูปที่ 13 พิจารณาผลการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ที่ความเข้มแสง 1000 W/m2

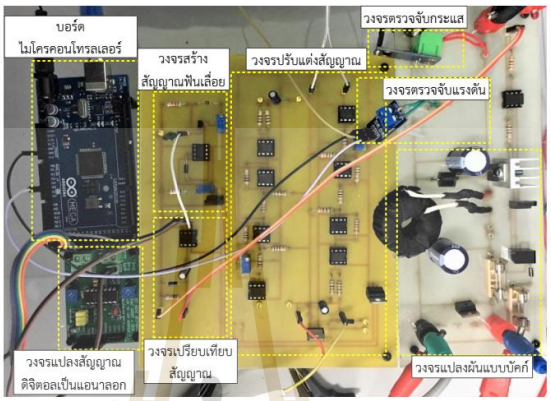
5. ชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบ

เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์และแสดงให้เห็นว่าวิธีที่ได้นำเสนอในบทความ สามารถสร้างใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ จึงได้มีการสร้างชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยอัลกอริธึมอิงกระแสกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระซึ่งสามารถแสดงโครงสร้างได้ดังรูปที่ 14 ประกอบไปด้วย วงจรตรวจจับแรงดันและวงจรตรวจจับกระแส ที่ทำหน้าที่วัดค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ป้อนค่าให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR รุ่น ET-EASY MEGA 2560ในชุดควบคุม MPPT เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหากำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งชุดควบคุม MPPT สามารถปรับโปรแกรมหรืออัลกอริธึมในบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ได้ เมื่อต้องการเปลี่ยนวิธีการตามรอยจุดกำลังสูงสุด ในอัลกอริธึมอิงกระแสนี้ บอร์ดจะคำนวณหากำลังไฟฟ้าสูงสุด และให้กระแสไฟฟ้าอ้างอิงออกมาเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อหาค่าความผิดพลาดผ่านตัวควบคุมพีไอ ซึ่งจะได้ค่าแรงดันอ้างอิง(v_r) โดยค่าแรงดันอ้างอิงที่ได้นี้จะถูกส่งออกให้กับวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นแอนาลอก เพื่อนำไปใช้เปรียบเทียบกับวงจรสร้างสัญญาณฟันเลื่อยที่สร้างขึ้น โดยใช้วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ จากนั้นจะได้สัญญาณพัลส์ที่ผ่านวงจรแยกโดดสัญญาณ เพื่อนำไปใช้ในการขับสวิตช์ของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ ซึ่งจะทำให้กระแส ไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังสูงสุด ทำให้สามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดออกมาใช้งานได้ การทำงานของระบบควบคุมดังกล่าวในข้างต้น ทำให้สามารถควบคุมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระได้ตามต้องการ โดยชุดควบคุมในชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดแสดงได้ดังรูปที่ 15 และภาพรวมของระบบฮาร์ดแวร์ชุดทดสอบทั้งหมดแสดงได้ดังรูป 16

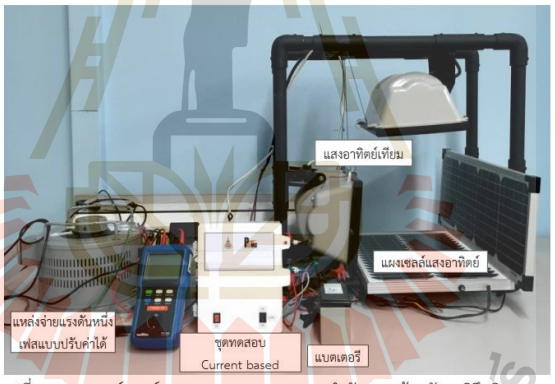


รูปที่ 14 โครงสร้างชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ของระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุด

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 11
ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2561



รูปที่ 15 ชุดควบคุมในชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุด

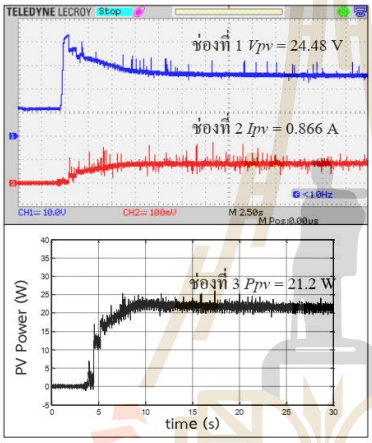


รูปที่ 16 ระบบฮาร์ดแวร์ชุดทดสอบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยอัลกอริธึมอิงกระแส

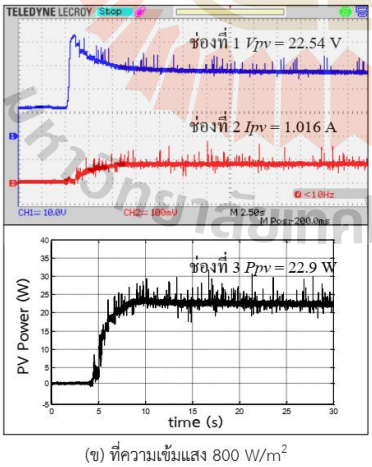
6. ผลการทดสอบชุดทดสอบและอภิปรายผล

การทดสอบชุดทดสอบของระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยอัลกอริธึมอิงกระแส ดำเนินการทดสอบโดยใช้แสงอาทิตย์เทียมที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการ โดยการปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหนึ่งเฟสแบบปรับค่าได้ (ค่าแรงดันไฟฟ้าจะมีผลต่อความเข้มแสงของแสงอาทิตย์เทียมในห้องปฏิบัติการ) ให้ความเข้มแสงที่ได้จากหลอดไฟตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่ที่ค่าต่าง ๆ โดยไม่สนใจอุณหภูมิ ดังนั้นจะส่งผลให้อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิในสภาวะมาตรฐาน ทำให้การทดสอบในบทความนี้ไม่ได้อยู่ภายใต้สภาวะมาตรฐาน ซึ่งในบทความนี้ผู้วิจัยได้เลือกทำการทดสอบที่ความเข้มแสง 600, 800 และ 1000 W/m^2 โดยใช้เครื่องมือวัดความเข้มแสง(lux meter) รุ่น T-10A Konica Minolta เป็นอุปกรณ์ในการวัดค่าความเข้มแสงของหลอดไฟที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อแสดงให้เห็นอัลกอริธึมอิงกระแสสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ความเข้มแสงต่าง ๆ ได้จริง และผลการ

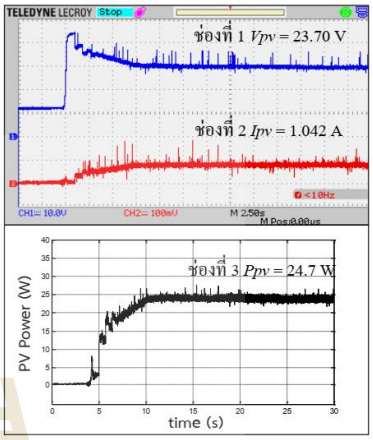
ทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 17 (ก) - (ค) โดยสัญญาณช่องที่ 1 และ 2 คือแรงดันและกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ที่วัดได้จากการทดสอบตามลำดับ ซึ่งจากจุดข้อมูลของแรงดันและกระแสที่ได้จากสัญญาณช่องที่ 1 และ 2 นั้นเมื่อนำมาคำนวณกำลังไฟฟ้าจะสามารถนำมาพล็อตกราฟได้ดังสัญญาณช่องที่ 3



(ก) ความเข้มแสง 600 W/m^2



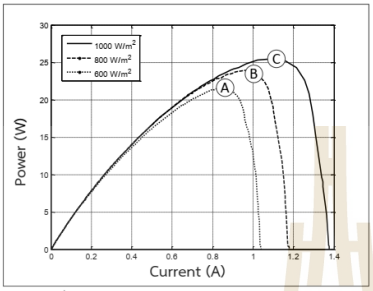
(ข) ที่ความเข้มแสง 800 W/m^2



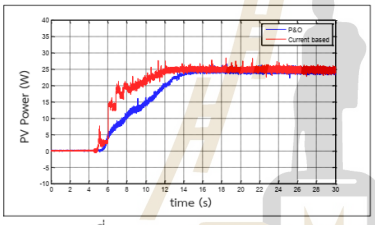
(ค) ความเข้มแสง 1000 W/m^2

รูปที่ 17 ผลการทดสอบชุดทดสอบระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยอัลกอริธึมอิงกระแส

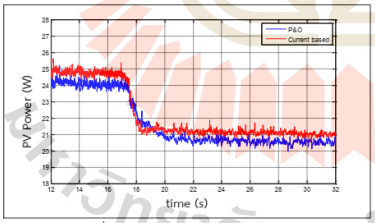
จากผลการทดสอบชุดทดสอบในรูปที่ 17 (ก)-(ค) จะเห็นได้ว่าค่า I_{pv} มีค่าใกล้เคียงกระแสไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด และค่า P_{pv} มีค่าใกล้เคียงกำลังไฟฟ้าที่จุดกำลังสูงสุด โดยเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 600 W/m^2 ในรูปที่ 17(ก) จะได้ $I_{pv} = 0.866\,A$ และ $P_{pv} = 21.2W$ และเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 800 W/m^2 ในรูปที่ 17(ข) จะได้ $I_{pv} = 1.016\,A$ และ $P_{pv} = 22.9W$ และสุดท้ายเมื่อความเข้มแสงเท่ากับ 1000 W/m^2 ดังรูปที่ 17(ค) จะได้ $I_{pv} = 1.042\,A$ และ $P_{pv} = 24.7W$ ซึ่งค่า I_{pv} และ P_{pv} ที่ได้ในแต่ละความเข้มแสงสามารถแสดงจุดการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ในกราฟคุณลักษณะเฉพาะกำลังและกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40W ที่ได้จากการทดสอบจริงดังรูปที่ 18 โดยรูปดังกล่าวจุด A B และ C คือจุดการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำให้ได้กำลังสูงสุดในแต่ละความเข้มแสง ดังนั้นจากผลการทดสอบที่ได้นำเสนอไปข้างต้นยืนยันได้ว่าอัลกอริธึมอิงกระแสสามารถนำไปใช้ในการตามรอยจุดกำลังสูงสุดสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระได้



รูปที่ 18 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 40 วัตต์



รูปที่ 19 ผลการทดสอบชุดทดสอบจากความเข้มแสง 0 ไป 1000 W/m^2



รูปที่ 20 ผลการทดสอบชุดทดสอบจากความเข้มแสง 1000 ไป 600 W/m^2

จากผลการทดสอบชุดทดสอบของอัลกอริธึมอิงกระแส กำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของวิธีรบกวนและสังเกต (ใช้ชุดทดสอบเดียวกัน ปรับโปรแกรมการตามรอยจุดกำลังสูงสุดในบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เท่านั้น) กรณีที่ระดับความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นจาก 0 ไปเป็น 1000 W/m^2 การตอบสนองของกำลังไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 19 และความเข้มแสงลดลงจาก 1000 ไป 600 W/m^2 แสดงได้ดังรูปที่ 20 จะเห็นได้ว่าอัลกอริธึมอิงกระแสใช้เวลาในการตอบสนองในสภาวะชั่วครู่ที่รวดเร็วกว่าวิธีรบกวนและสังเกตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มแสงทั้งสองแบบ และในสภาวะคงตัวอัลกอริธึมอิงกระแสยังสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้มากกว่าอีกด้วย ดังนั้นจากการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้นำเสนอในบทความนี้ ยืนยันได้ว่าอัลกอริธึมอิงกระแสสามารถแก้ปัญหาข้อเสียที่เกิดขึ้นของวิธีรบกวนและสังเกตได้ ซึ่งทำให้อัลกอริธึมอิงกระแสมีประสิทธิภาพการทำงานของระบบการตามรอยจุดกำลังสูงสุดที่ดีกว่าวิธีรบกวนและสังเกต

7. สรุป

บทความนี้นำเสนออัลกอริธึมอิงกระแสสำหรับการตามรอยจุดกำลังสูงสุดของระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ ผลจากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นว่าอัลกอริธึมอิงกระแสสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายได้และสามารถตามรอยจุดกำลังสูงสุดได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง โดยในอัลกอริธึมอิงกระแสนี้มีความจำเป็นจะต้องออกแบบตัวควบคุมพีไอให้เหมาะสมกับระบบ ซึ่งในบทความนี้จะอาศัยวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอด้วยวิธีการแบบดั้งเดิมที่ใช้การเทียบสัมประสิทธิ์ของระบบมาตรฐานอันดับสอง [K.M. Tsang and W.L. Chan, 2005] เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์บนคอมพิวเตอร์ ในบทความนี้จึงได้นำเสนอการสร้างชุดทดสอบฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทดสอบ สำหรับการทดสอบโดยการใช้แสงอาทิตย์เทียมในห้องปฏิบัติการ จากผลการทดสอบปรากฏว่า อัลกอริธึมอิงกระแสสามารถดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่จุดจ่ายกำลังสูงสุดได้อย่างถูกต้อง ลดการกวัดแกว่งของกำลังไฟฟ้าในสภาวะคงตัว และใช้เวลาตอบสนองในสภาวะชั่วครู่ที่รวดเร็วเมื่อเทียบกับวิธีรบกวน

และสังเกตภายใต้สภาวะการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงเดียวกัน การตามรอยจุดกำลังสูงสุดด้วยวิธีดังกล่าว ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น คุ้มค่าต่อการนำไปใช้งานจริง และก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนการศึกษา “ทุนกิตติบัณฑิต” สนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

9. เอกสารอ้างอิง

[1] Trishan Esram and Patrick L. Chapman, “*Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques*”, in IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, No. 2, pp. 439-449, June 2007.

[2] Ali F Murtaza, Hadeed Ahmed Sher, Marcello Chiaberge, Diego Boero, Mirko De Giuseppe and Khaled E Addoweesh, “*Comparative Analysis of Maximum Power Point Tracking Techniques for PV applications*”, Pakistan , Saudi Arabia and Italy, pp. 83-88, 2013.

[3] Mei Shan Ngan and Chee Wei Tan, “*A Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand-alone Photovoltaic Systems*”,in IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC), Malaysia, pp. 22-27, April 2011.

[4] ปทุมพร วงค์ใหญ่ กองพัน อารีรักษ์ และกองพล อารักษ์, “*ระบบตามรอยกำลังสูงสุดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระโดยใช้วิธีรบกวนและสังเกตที่มีการปรับตัว*,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38, อยุธยา, 18-20 พฤศจิกายน 2558.

[5] R. Boukenoui, R. Bradai, A. Mellit, M. Ghanes and H. Salhi, “*Comparative Analysis of P&O, Modified Hill Climbing-FLC, and Adaptive P&O-FLC MPPTs for Microgrid Standalone PV System*”, 4th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Palermo, Italy, 22-25 Nov 2015, pp. 1095-1099.

[6] Hanju Cha and Sanghoey Lee, “*Design and Implementation of Photovoltaic Power Conditioning System using a Current based Maximum Power Point Tracking*,” Chungnam National University, Korea, 2008.

[7] H. Toodeji, S.H. Fathi and N. Farokhnia, “*Using Current-Based MPPT Method in New Integrated System of PV Module and STATCOM*” 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Iran, pp. 1028-1033, 2010.

[8] Alivarani Mohapatra, Byamakesh Nayak and K.B.Mohanty, “*Current Based Novel Adaptive P&O MPPT Algorithm for Photovoltaic System Considering Sudden Change in the Irradiance*”, in IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2014.

[9] I. William Christopher and Dr.R.Ramesh, “*Comparative Study of P&O and InC MPPT Algorithms*”, in American Journal of Engineering Research (AJER), Vol. 02, Issue. 12, pp. 402-408, 2013.

[10] L. Bouselham and B. Hajji, H. Hajji, “*Comparative Study of Different MPPT Methods for Photovoltaic System*”, ENSA-UMP, Morocco, 2015.

[11] Md Fahim Ansaria, S. Chatterjib and Atif Iqbalc, "*A fuzzy logic control scheme for a solar photovoltaic system for a maximum power point tracker*", International Journal of Sustainable Energy Vol. 29, No. 4, pp. 245–255, Dec 2010.

[12] Jaw-Kuen Shiau, Yu-Chen Wei and Bo-Chin Chen, "*A Study on the Fuzzy-Logic-Based Solar Power MPPT Algorithms Using Different Fuzzy Input Variables*", Tamkang University, Taiwan, pp. 100-127, 2015.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้วิจัย

กองพัน อารีรักษ์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี และปริญญาโททางด้านวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2543 และ 2544 ตามลำดับ สำเร็จการศึกษาปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยทุนกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จากมหาวิทยาลัยน็อตติงแฮม ประเทศอังกฤษ เมื่อปี พ.ศ. 2552 ด้วยงานวิจัยวิทยานิพนธ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยเน้นทางด้านระบบไฟฟ้าบนเครื่องบิน ภายหลังจากสำเร็จการศึกษาได้ดำเนินงานวิจัยมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งงานวิจัยที่มีความชำนาญจะเน้นไปทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ การประยุกต์วิธีการทางปัญญาประดิษฐ์กับปัญหาทางด้านวิศวกรรม ระบบขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้า ตลอดจนทฤษฎีระบบควบคุม ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี