

การออกแบบและพัฒนาเครื่องตรวจวัดคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผง เซลล์แสงอาทิตย์ด้วยบอร์ดอาคูอิโนรูนานาโน

Design and Development of Solar Panel Current-Voltage Characterization Instrument Using Arduino Nano Board

โชคชัย ชื่นวัฒนาประณีต¹ และ มณฑนา รังสิโยภาส^{2*}

Chokchai Chuenwattanapraniti¹ and Montana Rungsiyopas^{2*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

ผู้นิพนธ์ประสานงาน : montana@eng.buu.ac.th

วันที่รับบทความ: 2 พฤษภาคม 2566 / วันที่แก้ไขบทความ: 25 มิถุนายน 2566 / วันที่ตอบรับการตีพิมพ์: 28 มิถุนายน 2566

บทคัดย่อ การตรวจวัดสมรรถนะในการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกติดตั้ง ณ สถานที่จริงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมหลายปัจจัย บทความนี้จึงนำเสนอการออกแบบและพัฒนาเครื่องตรวจวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความซับซ้อนน้อย ขนาดเล็ก ราคาถูก โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาคูอิโนเป็นตัวควบคุมและประมวลสัญญาณ ร่วมกันกับวงจรชาร์จประจุคาปาซิเตอร์ที่ทำหน้าที่กวาดแรงดันที่ออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การแสดงผลของเครื่องบนหน้าจอแสดงผลแบบสัมผัส มี 2 รูปแบบ คือ กราฟกระแส-แรงดัน และตารางแสดงตัวแปรทางไฟฟ้าเพื่อใช้ในการตรวจวินิจฉัยระบบ ผลการทดสอบเครื่องต้นแบบในสภาวะที่ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์แตกต่างกัน รวมทั้งสภาวะที่แผงถูกบังเงาบางส่วน พบว่าเครื่องตรวจวัดที่นำเสนอสามารถทำงานได้เทียบเท่ากับเครื่องตรวจวัดที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ โดยให้ผลคลาดเคลื่อนระหว่างอุปกรณ์ทั้งสองไม่เกิน 4 %

คำสำคัญ : คุณลักษณะกระแส-แรงดัน, โหลดอิเล็กทรอนิกส์, อาคูอิโน, ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

Abstract It is necessary to measure the generation performance of solar panels installed on site since the yield of electricity produced by solar panels depends on many environmental factors. Therefore, this paper presents the design and development of a simple, small, and low-cost instrument for measuring the electrical characteristics of solar panels. The proposed instrument is equipped with the Arduino microcontroller board responsible for controlling and signal processing in conjunction with the capacitor charging circuit that sweeps the panel output voltage. The instrument's display on the Human Machine Interface (HMI) screen has 2 formats including a current-voltage graph and a table showing electrical parameters for

the diagnosis purpose. The 4% of maximum discrepancy between the test results carried out from the proposed instrument and a commercial device under different solar irradiance and the partial shading conditions confirmed that the proposed instrument is comparable with the commercial one.

Keywords: I-V Characteristics, Electronic Loads, Arduino, Photovoltaic systems

1. บทนำ

สำหรับประเทศไทยด้วยสถานการณ์ราคาพลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้ามีแนวโน้มที่จะติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้เองเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์อาทิตย์ที่มีต้นทุนอุปกรณ์ลดลงเป็นอย่างมากในปัจจุบัน โดยมีการคาดการณ์ว่าระบบดังกล่าวจะมีมูลค่าทางการตลาดสูงถึง 137,000 ล้านบาทในอีก 10 ปีข้างหน้า [1]

ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์อาทิตย์ขึ้นอยู่กับปัจจัย อาทิเช่น ทิศทางและตำแหน่งติดตั้งแผง ประสิทธิภาพของแผง อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ ปัจจัยด้านเงาบังและคราบฝุ่นละอองบนแผง เป็นต้น [2-4] ในขั้นตอนการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีความจำเป็นที่จะต้องอาศัยเครื่องมือในการตรวจวัดคุณลักษณะกระแส-แรงดัน และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจเลือกตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสม นอกจากนี้ เครื่องมือดังกล่าวยังสามารถใช้ในการตรวจวัดการเสื่อมสภาพและความสมบูรณ์ของระบบที่ได้ติดตั้งใช้งานไปเป็นระยะเวลาหนึ่งแล้ว

หลักการที่ใช้ในการตรวจวัดคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะอาศัยการต่อแผงที่ต้องการทดสอบเข้ากับโหลดอิเล็กทรอนิกส์ที่แปรเปลี่ยนค่าได้ตลอดช่วงที่สนใจ ในระหว่างนั้นก็ทำการบันทึกค่าแรงดันและกระแส แล้วทำการส่งข้อมูลไปแสดงผลบนโปรแกรมที่เขียนขึ้นมาบนคอมพิวเตอร์[5] การสร้างชุดโหลดอิเล็กทรอนิกส์วิธีหนึ่งที่ได้รับการ

นิยมคือการควบคุมมอสเฟตทรานซิสเตอร์ (MOSFET) ให้ทำงานในย่านการทำงานแบบแอคทีฟ (Active Region) [6-9] โดยรับคำสั่งการไบอัสจากรอบควบคุมแรงดันแบบวงปิดเพื่อกำหนดแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปที่ค่าต่างๆ [10] ซึ่งวิธีดังกล่าวมีความซับซ้อนของระบบควบคุมค่อนข้างมาก ทำให้มีต้นทุนสูง การขยายพิกัดจะต้องทำการต่อขนานเพิ่มมอสเฟตกำลังเพื่อรองรับกระแสที่สูงขึ้น

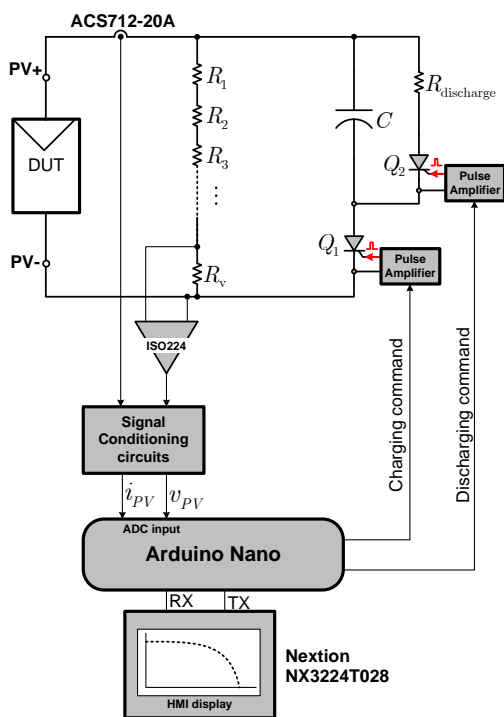
โหลดอิเล็กทรอนิกส์แบบที่มีความซับซ้อนน้อยกว่า คือการใช้รีเลย์ตัดต่อชุดตัวต้านทานหลายระดับเพื่อต่อเข้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องการทดสอบ โดยออกแบบให้ชุดตัวต้านทานประกอบด้วยตัวต้านทานย่อยๆ จำนวนมาก และทำการต่อสวิตช์เริ่มจากค่าความต้านทานน้อยๆ เกือบเป็นศูนย์จนกระทั่งถึงค่ามากๆ เข้าใกล้อนันต์ [11] วิธีดังกล่าวจะต้องใช้ช่วงเวลาในการสแกนต่อการตรวจวัดหนึ่งค่อนข้างยาวนาน ซึ่งจะส่งผลต่อความถูกต้องของกราฟกระแส-แรงดันที่ได้ หากสถานะของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ขณะทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็ว การเปลี่ยนไปใช้มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตช์แทนรีเลย์ [12] ช่วยให้ระบบตรวจวัดใช้เวลาในการทดสอบสั้นลง แต่ยังคงมีความซับซ้อนขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก [13]

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาเครื่องตรวจวัดกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ควบคุมการทำงานด้วยบอร์ดอาดูอินโนนาโน (Arduino Nano) ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาดเล็กที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและมีราคาถูก เครื่องตรวจวัดจะทำการสวิตช์คาปาซิเตอร์ให้ต่อเข้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ที่ต้องการทดสอบ ทำให้เกิดการกวาดแรงดันอันเนื่องจากการชาร์จประจุคาปาซิเตอร์ จึงสามารถสแกนเพื่อบันทึกกราฟกระแส-แรงดันได้ วิธีดังกล่าวมีการควบคุมที่ไม่ซับซ้อน ใช้เวลาในการสแกนน้อย นอกจากนี้บทความได้นำเสนอสมการอย่างง่ายสำหรับการเลือกค่าความจุของคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับวิธีทดสอบดังกล่าว

2. รายละเอียดของเครื่องตรวจวัด

2.1 แผนผังโดยรวมของระบบ



รูปที่ 1 แผนผังของเครื่องตรวจวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับงานวิจัยนี้ การสร้างชุดโหนดอิเล็กทรอนิกส์จะอาศัยการทำงานของเอสซีอาร์ร่วมกับคาปาซิเตอร์ความจุสูง ดังรูปที่ 1 โดยเมื่อตั้งให้เอสซีอาร์นำกระแสจะเกิดกระแสไหลจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ไหลเข้าไปชาร์จประจุคาปาซิเตอร์ ทำให้แรงดันตกคร่อมคาปาซิเตอร์ค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้น แรงดันที่คาปาซิเตอร์นี้จะมีค่าใกล้เคียงกับแรงดันที่ขั้วของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำมาทดสอบ เนื่องจากแรงดันที่ตกเอสซีอาร์มีค่าน้อย (ประมาณ 1-2V) ในระหว่างนั้นกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกตรวจวัดผ่านเซ็นเซอร์ได้สัญญาณที่แปรผันตรงกับกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่งผ่านไปยังวงจรปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning Circuits) ก่อนส่งเข้าพอร์ตอินพุตแอนะล็อก (Analog Inputs) ของไมโครคอนโทรลเลอร์

ชุดข้อมูลกระแสและแรงดันที่บันทึกไว้จะถูกกรองด้วยตัวกรองแบบคัตออฟเพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนก่อนนำค่าออกไปแสดงผลทั้งข้อมูลแบบเชิงตัวเลขและกราฟบนจอแสดงผลระบบสัมผัส (Human machine interface display) ยี่ห้อ Nextion รุ่น NX3224T028 ซึ่งสื่อสารกับบอร์ดอาคูอินโนผ่านทางพอร์ตอนุกรม โดยนอกจากจะใช้แสดงผลแล้วยังใช้ในการรับคำสั่งควบคุมจากผู้ใช้งานด้วย

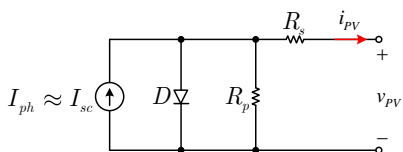
2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เลือกใช้คือบอร์ดอาคูอินโนนาโนซึ่งติดตั้งชิปไมโครคอนโทรลเลอร์ 8 บิต เบอร์ ATmega328 ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 16 MHz เป็นบอร์ดที่มีขนาดเล็กและมีความถูกต้องประกอบไปด้วยพอร์ตอินพุตแบบแอนะล็อก 10 บิต 8 ช่อง และอินพุต-เอาต์พุตแบบดิจิทัลจำนวน 22 ช่อง [14] โดยพอร์ต A1 และ A2 จะถูกใช้เพื่อรับแรงดันจากเซ็นเซอร์ที่แปรตามกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามลำดับ ส่วนพอร์ตเอาต์พุตแบบดิจิทัล 2 ช่องจะถูกใช้เพื่อทำการส่งสัญญาณขับนำเอสซีอาร์ และอีก 2 ช่องใช้เป็นพอร์ตเพื่อติดต่อสื่อสารกับจอแสดงผลพร้อมแสดงผลระบบสัมผัส

2.3 การเลือกความจุคาปาซิเตอร์

การทดสอบหาคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการชาร์จประจุคาปาซิเตอร์ดังกล่าวมาข้างต้น การเลือกความจุของคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง โดยคาปาซิเตอร์จะต้องมีค่าความจุเพียงพอเพื่อให้สามารถใช้อัตราการสุ่มสัญญาณ (Sampling Rate) ที่ไม่สูงเกินความสามารถของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยเฉพาะเมื่อใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีกำลังผลิตสูงๆ ในทางตรงข้ามจะต้องมีความจุไม่มากจนเกินไป ขณะที่ระบบผลิตกำลังได้น้อย

การเลือกความจุของคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมจะต้องทำการศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงแรงดันและกระแสในช่วงเวลาทรานเซียนต์หลังจากที่สั่งให้เอสซีอาร์นำกระแสเพื่อเริ่มการชาร์จประจุคาปาซิเตอร์ โดยพิจารณาให้เซลล์แสงอาทิตย์มีวงจรสมมูลแบบไดโอดตัวเดียว(one-diode model)[15] แสดงดังรูปที่ 2 ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสที่แปรตามความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ (I_{ph}) ไดโอด ความต้านทานขนาน (R_p) และความต้านทานอนุกรม (R_s)



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

สมการที่ (1) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (i_{pv}) และแรงดัน (v_{pv}) ของเซลล์แสงอาทิตย์

$$i_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{v_{pv} + i_{pv} R_s}{V_T}} - 1 \right) - \frac{v_{pv} + i_{pv} R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

โดย I_0 คือกระแสไบอัสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด(A) และ V_T คือความต่างศักย์เนื่องมาจากความร้อน (mV) ซึ่งมีค่าประมาณ 26 mV

เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์นำมาต่อเป็น โมดูล (Module) ที่ประกอบไปด้วยการอนุกรมจำนวน N_s เซลล์ จากนั้นนำมาการขนานกัน N_p ชุด จะทำให้ได้กระแส (i_{pv}^M) และแรงดัน (v_{pv}^M) ที่ออกจากโมดูล ดังนี้

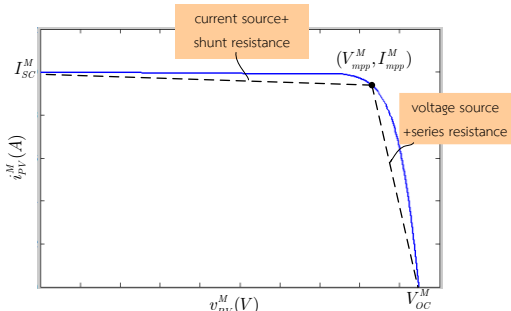
$$v_{pv}^M = N_s v_{pv}, \quad i_{pv}^M = N_p i_{pv} \quad (2)$$

เมื่อแทนสมการทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ตามสมการที่ (1) ลงในสมการที่ (2) จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (i_{pv}^M) และแรงดัน (v_{pv}^M) ของโมดูลได้ดังนี้

$$i_{pv}^M = I_{ph}^M - \left(I_{ph}^M - \frac{N_p V_{oc}^M}{N_s R_p} \right) e^{\frac{(v_{pv}^M + R_s^M i_{pv}^M - V_{oc}^M)/N_s V_T}{}} \quad (3)$$

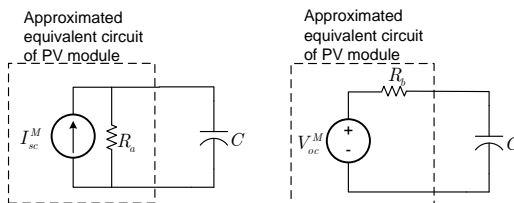
โดย $R_s^M = \frac{N_s}{N_p} R_s$

เมื่อทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง i_{pv}^M และ v_{pv}^M ตามสมการที่ (3) ที่สภาวะความเข้มรังสีดวงอาทิตย์และอุณหภูมิเซลล์ค่าหนึ่ง จะได้ลักษณะกราฟที่ความไม่เป็นเชิงเส้นแสดงดังรูปที่ 3 ในการเลือกขนาดคาปาซิเตอร์ที่ไม่ได้ต้องการความถูกต้องสูงมากนักสามารถทำการประมาณความสัมพันธ์ดังกล่าวในลักษณะเชิงเส้นแบบเป็นช่วง (piecewise linear) ง่ายต่อการวิเคราะห์ (เส้นปะในรูปที่ 3)



รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง i_{pv}^M และ v_{pv}^M

โดยช่วงที่ $0 \leq v_{PV} \leq V_{mpp}^M$ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เปรียบเสมือนแหล่งจ่ายกระแส I_{sc}^M ต่อขนานกับ R_a (รูปที่ 4 ก) และเมื่อ $V_{mpp}^M \leq v_{PV} \leq V_{oc}^M$ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์เปรียบเสมือนแหล่งจ่ายแรงดัน V_{oc}^M ต่ออนุกรมกับ R_b (รูปที่ 4 ข)



(ก) ช่วง $0 \leq v_{PV} \leq V_{mpp}^M$ (ข) ช่วง $V_{mpp}^M \leq v_{PV} \leq V_{oc}^M$

รูปที่ 4 วงจรสมมูลโดยประมาณขณะแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อกับคาปาซิเตอร์

ค่าความต้านทาน R_a และ R_b ในวงจรสมมูลที่สภาวะทดสอบมาตรฐาน (Standard test conditions) สามารถคำนวณได้จากข้อมูลคุณลักษณะที่ได้จากผู้ผลิตดังนี้

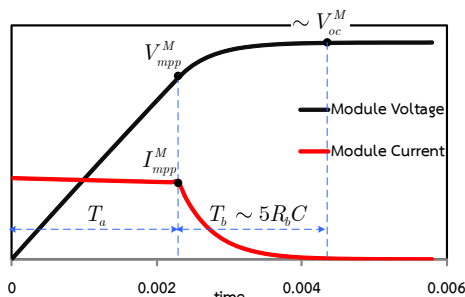
$$R_a = \frac{V_{mpp}^M}{(I_{sc}^M - I_{mpp}^M)} \quad (4)$$

และ

$$R_b = \frac{(V_{oc}^M - V_{mpp}^M)}{I_{mpp}^M} \quad (5)$$

สมการที่ (4) และ (5) สามารถอธิบายได้ว่า หาก I_{sc}^M กับ I_{mpp}^M มีความแตกต่างกันมากจะทำให้ค่า R_a มีค่าน้อย ทำให้กระแสจากแหล่งจ่ายกระแสสมมูลภายในถูกลดทอนลงมากก่อนที่จะจ่ายออกที่ขั้วของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนความแตกต่างระหว่าง V_{oc}^M กับ V_{mpp}^M จะส่งผลต่อโดยตรงกับ R_b ซึ่งเป็นปัจจัยลดทอนแรงดันที่ขั้วของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อพิจารณาวงจรสมมูลโดยประมาณดังรูปที่ 4 จะสามารถวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงแรงดันและกระแสของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกทดสอบในช่วงเวลาทรานเซียนต์หลังจากสั่งให้เกิดการชาร์จประจุคาปาซิเตอร์ ซึ่งตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงแรงดันและกระแส แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของแรงดันและกระแสในช่วงการชาร์จประจุคาปาซิเตอร์

โดยช่วงเวลาแรก เริ่มจาก $t = 0$ และสิ้นสุดที่ $t = T_a$ วงจรสมมูลมีลักษณะดังรูปที่ 4(ก) การเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันมีสมการเป็นดังนี้

$$v_{pv}^M = I_{sc}^M R_a \left(1 - e^{-\frac{t}{R_a C}}\right), i_{pv}^M = I_{sc}^M e^{-\frac{t}{R_a C}} : 0 \leq t \leq T_a \quad (6)$$

ช่วงเวลาที่สองวงจรสมมูลเป็นดังรูปที่ 4(ข) เริ่มจาก $t > T_a$ ถึง $t = T_a + T_b$ การเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันเทียบกับเวลามีสมการเป็นดังนี้

$$v_{pv}^M = V_{oc}^M \left(1 - e^{-\frac{T_a - t}{R_b C}}\right) + V_{mpp}^M e^{-\frac{T_a - t}{R_b C}}, i_{pv}^M = \frac{V_{oc}^M - V_{mpp}^M}{R_b} e^{-\frac{T_a - t}{R_b C}} : T_a < t \leq \infty \quad (7)$$

จากสมการที่ (4), (5), (6) และ (7) สามารถคำนวณหาช่วงเวลา T_a และ T_b ได้ตามสมการที่ (8) และ (9) ตามลำดับ

$$T_a = C \frac{V_{mpp}^M}{I_{mpp}^M} \left[\frac{\ln \left(\frac{I_{sc}^M}{I_{mpp}^M} \right)}{\left(\frac{I_{sc}^M}{I_{mpp}^M} - 1 \right)} \right] \quad (8)$$

และ

$$T_b = 5R_b C = C \frac{V_{mpp}^M}{I_{mpp}^M} \left[5 \left(\frac{V_{oc}^M}{V_{mpp}^M} - 1 \right) \right] \quad (9)$$

เวลารวมในการชาร์จประจุ (T_{charge}) นับตั้งแต่แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เริ่มเปลี่ยนแปลงจาก 0 จนถึงแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}^M) เท่ากับ

$$T_{charge} = T_a + T_b = C \frac{V_{mpp}^M}{I_{mpp}^M} \left\{ \left[\frac{\ln \left(\frac{I_{sc}^M}{I_{mpp}^M} \right)}{\left(\frac{I_{sc}^M}{I_{mpp}^M} - 1 \right)} \right] + \left[5 \left(\frac{V_{oc}^M}{V_{mpp}^M} - 1 \right) \right] \right\} \quad (10)$$

เทอมที่อยู่ในวงเล็บด้านขวามือของสมการที่ (10) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสัดส่วนระหว่างกระแสลัดวงจรต่อกระแส ณ จุดกำลังสูงสุด $\left(\frac{I_{sc}^M}{I_{mpp}^M} \right)$ และแรงดันเปิดวงจรต่อแรงดัน ณ จุดกำลังสูงสุด $\left(\frac{V_{oc}^M}{V_{mpp}^M} \right)$ สามารถพิจารณาให้เป็นค่าคงที่ เนื่องจากในปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของแต่ละผู้ผลิตมีความแตกต่างกันไม่มากนัก เมื่อกำหนดให้ $\frac{I_{sc}^M}{I_{mpp}^M} \approx \frac{1}{0.90}$ [16]

และ $\frac{V_{oc}^M}{V_{mpp}^M} \approx 0.8$ [17] ช่วงเวลา T_{charge} จะขึ้นอยู่กับ V_{mpp}^M

I_{mpp}^M และ C ดังสมการที่ (11)

$$T_{charge} \approx 2.22 C \frac{V_{mpp}^M}{I_{mpp}^M} \quad (11)$$

ในกรณีที่พิจารณาระบบที่มีการต่ออนุกรมโมดูลหลายๆ โมดูลเข้าด้วยกันเป็นสตริง ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในสมการที่ (10) และ (11) ต้องถูกเปลี่ยนให้เป็น

ค่าพารามิเตอร์ของสตริงนั้นๆ ดังนั้นจะสังเกตได้ว่าเมื่อสตริงที่มีจำนวน โมดูลที่ต่ออนุกรมมากขึ้น (แรงดัน ณ จุดกำลังสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น) ช่วงเวลาในการทดสอบจะยาวนานขึ้น ในทางตรงข้ามกระแส ณ จุดกำลังสูงสุดซึ่งขึ้นกับความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่กระทบแผง เมื่อมีค่ามากจะทำให้ช่วงเวลาในการทดสอบสั้นลง

เมื่อความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงจะทำให้ I_{mpp}^M เปลี่ยนแปลงตาม ในขณะที่ V_{mpp}^M จะค่อนข้างคงที่ (แต่จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของเซลล์) เมื่อพิจารณาตามสมการที่ (10) หากความเข้มรังสีดวงอาทิตย์มีค่าสูง จะส่งผลให้เวลารวมในการชาร์จประจุสั้นลง ดังนั้นจึงต้องเลือกความจุของคาปาซิเตอร์ให้สูงพอ เพื่อให้สามารถใช้อัตราการสุ่มสัญญาณ (Sampling Rate) ที่สามารถให้ค่าการแปลงแอนะล็อก-ดิจิทัลที่ถูกต้อง การคำนวณหาขนาดความจุของคาปาซิเตอร์จะอาศัยสมการที่ (11) โดยเมื่อกำหนดพิกัดสูงสุดของแผงหรือสตริงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV String) ที่สามารถนำมาทดสอบด้วยเครื่องตรวจวัดฯ ดังตารางที่ 1 และแทนค่า V_{mpp} และ I_{mpp} ลงในสมการที่ (11) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างเวลารวมที่ใช้ในการชาร์จประจุกับความจุของคาปาซิเตอร์ดังสมการที่ (12)

$$T_{charge} \approx 50.74 C \quad (12)$$

ตารางที่ 1 พิกัดสูงสุดของสตริงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถนำมาทดสอบกับเครื่องตรวจวัดคุณลักษณะกระแส-แรงดันที่นำเสนอ

แผงที่สภาวะทดสอบมาตรฐาน (Standard Test Conditions, STC) อุณหภูมิเซลล์ 25°C ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ 1000 W/m ² AM 1.5	
V_{oc}	400 V
V_{mpp}	320 V
I_{sc}	15 A
I_{mpp}	14 A

สมการที่ (12) จะถูกนำไปใช้เพื่อเลือกความจุคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมให้สอดคล้องกับช่วงเวลาในการทดสอบที่ต้องการ ซึ่งจะได้ออกมาในหัวข้อที่ 3 ต่อไป

2.4 พิกัดของเอสซีอาร์ (SCR)

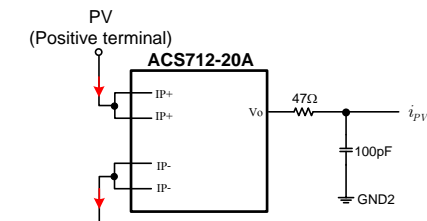
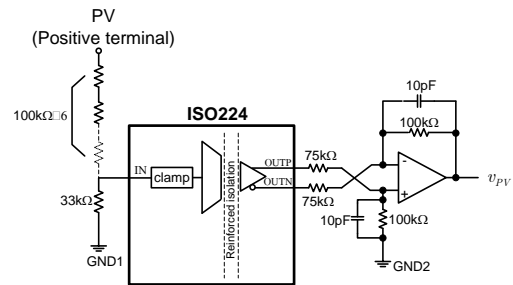
เอสซีอาร์เป็นสวิตช์สารกึ่งตัวนำที่มีราคาถูกหาง่ายในท้องตลาด และมีพิกัดกระแส/แรงดันสูง ทำให้เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นสวิตช์สำหรับควบคุมการชาร์จและดิสชาร์จคาปาซิเตอร์ในชุดโหลดจำลองเพื่อทดสอบหาคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การเริ่มต้นการชาร์จและดิสชาร์จคาปาซิเตอร์จะถูกควบคุมผ่านสัญญาณจุดชนวนเอสซีอาร์ โดยเมื่อจุดชนวนเอสซีอาร์ด้วยพัลส์สั้นๆ จะทำให้เอสซีอาร์นำกระแสได้ต่อไป หากกระแสนั้นมีค่าสูงกว่ากระแสแลตซ์ของเอสซีอาร์ (Latching Current) และเอสซีอาร์จะหยุดนำกระแสเมื่อกระแสที่ตัวมัน ลดต่ำกว่ากระแสโฮลดิ้ง (Holding Current) [18] จากคุณสมบัติของเอสซีอาร์ดังกล่าวจะทำให้สะดวก ไม่จำเป็นต้องจ่ายสัญญาณขับนำตลอดช่วงเวลาในการทดสอบ

สำหรับพิกัดแรงดันและกระแสของเอสซีอาร์ที่เลือกใช้จะต้องสามารถบล็อกแรงดันได้เท่ากับแรงดันเปิดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (V_{oc}) และทนกระแสไหลผ่านได้มากกว่าค่ากระแสลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (I_{sc}) จากพิกัดสูงสุดของสตริงเซลล์แสงอาทิตย์ในตารางที่ 1 จึงเลือกใช้เอสซีอาร์เบอร์ TN4015 ที่มีพิกัด 40 A 600 V และมีค่ากระแสโฮลดิ้ง และกระแสแลตซ์สูงสุดที่ 60 mA และ 80 mA ตามลำดับ [19]

2.5 วงจรวัดกระแสและแรงดันแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การวัดกระแสที่ไหลออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เลือกใช้เซ็นเซอร์วัดกระแส ACS712-20A ที่ใช้หลักการฮอลล์เอฟเฟกต์ (Hall Effect) ทำให้ความสามารถในการวัดได้ทั้งกระแสสลับและกระแสตรง

โดยเซ็นเซอร์ให้เป็นแรงดันเอาต์พุตที่สัมพันธ์โดยตรงกับกระแสที่ไหลผ่านตัวมันด้วยค่าความไว (Sensitivity) 100mV/A และมีความสามารถในการแยกโดด (Isolation) ได้ถึง 2.1 kV_{rms} [20] ทำให้ปลอดภัยต่อผู้ใช้งานและบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์



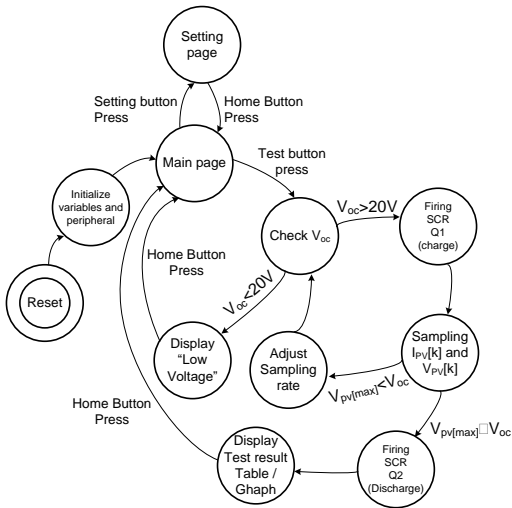
รูปที่ 6 วงจรวัดกระแสและแรงดันแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การวัดแรงดันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ใช้หลักการแบ่งแรงดันด้วยตัวต้านทาน (Resistive Divider) (รูปที่ 6) เพื่อลดทอนแรงดันสูงให้เป็นแรงดันต่ำก่อน โดยแรงดัน 400 V จะถูกลดทอนเหลือ 10.42 V จากนั้นจะส่งให้กับไอซีแอมพลิฟายเออร์ที่มีการแยกโดด (Isolated Amplifier) เบอร์ ISO224 [21] ซึ่งจะลดทอนสัญญาณลงอีก 1/3 เท่า และทำการเปลี่ยนสัญญาณแบบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Signal) เป็นสัญญาณแบบปลายเดี่ยว (Single-ended Signaling) ด้วยออปแอมป์ดิฟเฟอเรนเชียลที่มีการขยายสัญญาณ 1.3 เท่า

สัญญาณที่สัมพันธ์กับกระแสและแรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านวงจรปรับสภาพสัญญาณตามที่อธิบายข้างต้นจะถูกส่งให้เข้าพอร์ตแอนะล็อกของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยมีความละเอียดของการวัดเป็น 49 mA/bit และ 0.42 V/bit ตามลำดับ

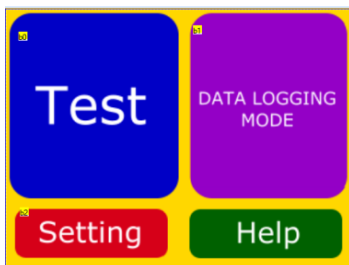
3. โปรแกรมควบคุมการทำงาน

โปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบสามารถอธิบายได้ด้วยแผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะ (State Machine Diagram) ดังรูปที่ 7



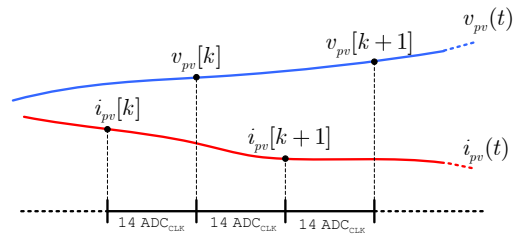
รูปที่ 7 แผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะของโปรแกรมควบคุมเครื่องตรวจวัดที่นำเสนอ

โปรแกรมเริ่มจากสภาวะรีเซ็ตและทำการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรและรีจิสเตอร์ควบคุมที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์รอบข้าง (Peripheral Control Register) อาทิเช่น พอร์ตดิจิทัล พอร์ตแอนะล็อก-ดิจิทัล เป็นต้น หลังจากนั้นจะเข้าสู่การแสดงผลหน้าจอหลักส่วนแสดงผลดังรูปที่ 8 ซึ่งจะมีปุ่มสัมผัสหน้าจอเพื่อให้ผู้ใช้งานเลือก



รูปที่ 8 ปุ่มสัมผัสรับคำสั่งหน้าจอแสดงผลหลัก

เมื่อกดปุ่ม Test ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการอ่านแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งคือค่า V_{oc} ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขณะนั้น หากค่า V_{oc} นี้ต่ำกว่า 20 V ซึ่งเป็นเงื่อนไขขั้นต่ำของเครื่อง หน้าจอแสดงผลจะแจ้งเตือนด้วยข้อความ “Low Voltage” ค้างไว้แต่หากว่า V_{oc} สูงกว่า 20 V จะเริ่มมีการส่งพัลส์จุดชนวนเอสซีอาร์ Q1 เพื่อให้เกิดการนำกระแสทำให้เกิดการชาร์จคาปาซิเตอร์ ระหว่างนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการสุ่มสัญญาณ (Sampling) กระแส ($i_{pv}(t)$) และแรงดัน ($v_{pv}(t)$) ที่ออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อเก็บไว้ในตัวแปรชนิดอาร์เรย์คือ $i_{pv}[k]$ และ $v_{pv}[k]$ จำนวน 120 จุด โดยการสุ่มสัญญาณจะกระทำสลับกันระหว่างกระแสกับแรงดันดังแสดงในไดอะแกรมเวลารูปที่ 9



รูปที่ 9 ไดอะแกรมเวลาการทำงานช่วงการสุ่มสัญญาณ

ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega328 มีขีดจำกัดในการสุ่มสัญญาณได้ที่ละช่องสัญญาณ จึงต้องพยายามกำหนดช่วงเวลาที่ใช้ในการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลให้สั้นที่สุด เพื่อให้เกิดการสุ่มสัญญาณกระแสกับแรงดันเกิดขึ้นในเวลาใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยเวลาในการสุ่มและโฮลด์ (Sample and Hold) รวมกับการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิตจะต้องใช้เวลาประมาณ 14 ขอบขาขึ้นของสัญญาณนาฬิกาสำหรับหน่วยแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (ADC_{CLK}) [14] ที่ได้มาจากการลดทอน (ปรีสเกล) สัญญาณนาฬิกาของซีพียู (CPU Clock) ที่มี

ความถี่ 16 MHz ลงมา โดยอัตราการปรีสเกลความถี่จะถูกกำหนดโดยบิตที่ 1-3 ของรีจิสเตอร์ ADCSRA

สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega328 ADC_{CLK} ที่สามารถทำให้วงจรแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัลทำงานได้อย่างถูกต้องควรอยู่ระหว่าง 50-200 kHz [14] ในที่นี้จึงกำหนดค่าเริ่มต้นของปรีสเกลเท่ากับ 64 ทำให้สามารถคำนวณเวลาในการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล $56 \mu s$ หรือ $17.86 kS/s$ ต่อช่องสัญญาณ

เมื่อสิ้นสุดช่วงการสุ่มสัญญาณ โปรแกรมจะทำการตรวจสอบว่าแรงดันค่าสุดท้ายที่รับเข้ามาใกล้เคียง V_{oc} หรือไม่ หากค่าสุดท้ายต่ำกว่า V_{oc} แสดงว่าช่วงเวลารวมการสุ่มสัญญาณมีค่าน้อยเกินไปทำให้ไม่ครอบคลุมช่วงของแรงดัน ดังนั้นจะต้องทำการปรับเพิ่มค่าปรีสเกลเป็น 128 ประกอบกับการใช้คำสั่ง delay เพื่อทำให้ช่วงเวลาในการสุ่มสัญญาณยาวนานขึ้น หลังจากนั้นจะเริ่มตั้งให้เริ่มการทดสอบซ้ำอีกครั้งหนึ่งแบบอัตโนมัติ โดยจะต้องทำการดีสชาร์จคาปาซิเตอร์ด้วยการตั้งสัญญาณจุดชนวนเอสซีอาร์ Q_2 ก่อนทุกครั้ง

ค่าจากการสุ่มสัญญาณที่เก็บไว้ในตัวแปรชนิดอาร์เรย์ $i_{pv}[k]$ และ $v_{pv}[k]$ จำนวน 50 จุด จะถูกนำมากรอง เพื่อลดสัญญาณรบกวน โดยการค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบสมมาตร (Symmetrically Moving Average) ดังสมการที่ (13) และ (14) ก่อนจะนำค่าที่ได้ไปแสดงผล (กราฟกระแส-แรงดัน และพารามิเตอร์ที่สำคัญ)

$$i_r[k] = \frac{i[k-1] + i[k] + i[k+1]}{3} \quad (13)$$

และ

$$v_r[k] = \frac{v[k-1] + v[k] + v[k+1]}{3} \quad (14)$$

โดย $i_r[k]$ และ $v_r[k]$ คือ สัญญาณกระแสและแรงดันที่ผ่านตัวกรองแบบค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่

จากที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 2.3 ความจุของคาปาซิเตอร์ที่เหมาะสมต้องพิจารณาจากช่วงเวลาชาร์จประจุที่ต้องการ โดยจะต้องสัมพันธ์กับอัตราการสุ่มสัญญาณที่เป็นไปได้ คาปาซิเตอร์จะต้องมีความจุสูงพอที่จะทำให้สามารถเก็บจำนวนจุดของข้อมูลกระแสและแรงดันได้ครบ (ในที่นี้กำหนดไว้สัญญาณละ 50 จุด) สำหรับค่าปรีสเกลเท่ากับ 64 คำนวณเป็นช่วงเวลาทดสอบสั้นที่สุดได้เท่ากับ $100 \times 56 \mu s$ หรือ $5.6 ms$ เมื่อนำค่าเวลาดังกล่าวไปคำนวณหาค่าความจุของคาปาซิเตอร์ตามสมการที่ (11) จะได้ค่าความจุขั้นต่ำเท่ากับ $110 \mu F$ ดังนั้นเพื่อในช่วงการสุ่มสัญญาณครอบคลุมตลอดช่วงเวลา T_{charge} จึงเลือกใช้คาปาซิเตอร์ขนาด $220 \mu F$ ซึ่งได้จากการอนุกรมคาปาซิเตอร์ $220 \mu F$ 250V สองตัว แล้วจึงนำมาขนานกันจำนวน 2 ชุด

4. ผลการทดสอบ

เครื่องตรวจวัดคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำเสนอ (รูปที่ 10) ถูกนำมาใช้ทดสอบกับสตริงแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบด้วยโมดูลยี่ห้อ Suntech รุ่น STP290-24/Vd อนุกรมกัน 3 โมดูล โดยคุณลักษณะจำเพาะของแต่ละโมดูลเป็นไปตามตารางที่ 2

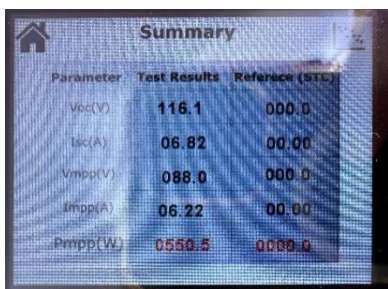


รูปที่ 10 ภาพถ่ายจริงเครื่องตรวจวัดคุณลักษณะกระแส-แรงดันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำเสนอ

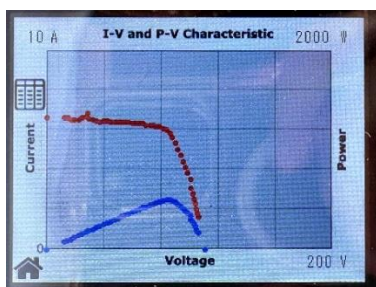
ตารางที่ 2 คุณสมบัติเฉพาะของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น STP290-24/Vd [22]

คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สภาวะทดสอบมาตรฐาน (Standard Test Conditions)	
V_{oc}	44.1 V
V_{mpp}	35.4 V
I_{sc}	8.65 A
I_{mpp}	8.20 A
P_{mpp}	290 W

การแสดงผลการทดสอบของเครื่องตรวจวัดฯ ที่นำเสนอ จะมี 2 รูปแบบคือการแสดงในรูปแบบตารางแสดงตัวแปรทางไฟฟ้าที่สำคัญ และลักษณะกราฟกระแส-แรงดัน (I-V) และ กำลัง-แรงดัน (P-V) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 11



(ก) ตารางแสดงตัวแปรทางไฟฟ้าที่สำคัญ



(ข) กราฟกระแส-แรงดัน ที่แสดงบนหน้าจอ HMI

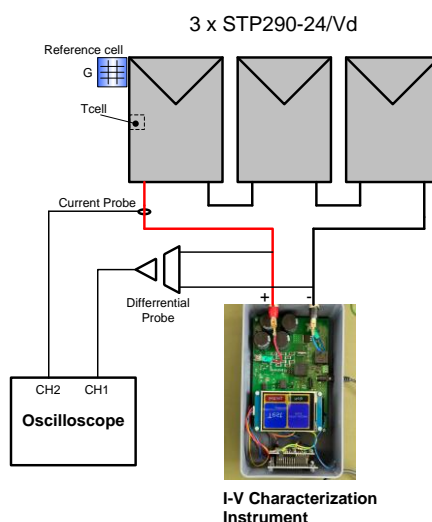
รูปที่ 11 ตัวอย่างการแสดงผลการทดสอบวัดกระแสแรงดันและกำลังไฟฟ้าของสตริงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากเครื่องตรวจวัดฯ ที่นำเสนอ

4.1 การทดสอบพล็อตกราฟ กระแส-แรงดัน

การทดสอบนี้จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของกราฟ กระแส-แรงดัน โดยทำการติดตั้งระบบทดสอบดังรูปที่ 12 และทำการทดสอบที่สภาวะแตกต่างกัน ชุดข้อมูลที่ได้จากการสุ่มสัญญาณของเครื่องตรวจวัดฯ จะถูกเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดด้วยออสซิลโลสโคป ที่รับค่ากระแสและแรงดันจาก โพรบ วัดกระแส (current probe) ยี่ห้อ Hameg รุ่น HZC50 และ โพรบ วัดแรงดันแบบผลต่าง (voltage differential probe) ยี่ห้อ Micsig รุ่น DP10013 ตามลำดับ

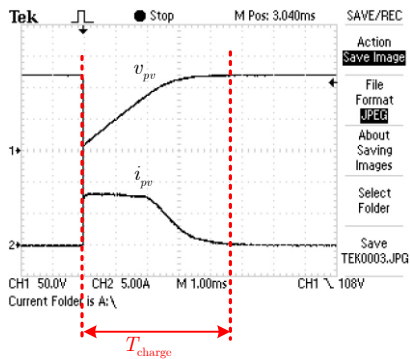
ขณะทดสอบได้ติดตั้ง โพรบ วัดอุณหภูมิ (Metrel A1400) และเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐาน (Metrel A1427) เพื่อทำการวัดอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์และความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ต่อกระบวนระนาบของแผงทดสอบ ตามลำดับ

โดยเงื่อนไขการทดสอบที่ 1 เป็นกรณีทั้ง 3 โมดูลได้รับความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ต่อกระบวนแผง (G) อย่างสม่ำเสมอ โดยวัดค่า G ที่ต่อกระบวนแผงขณะนั้นได้เท่ากับ 950 W/m² ขณะที่อุณหภูมิเซลล์ (T_{cell}) วัดได้ 62°C



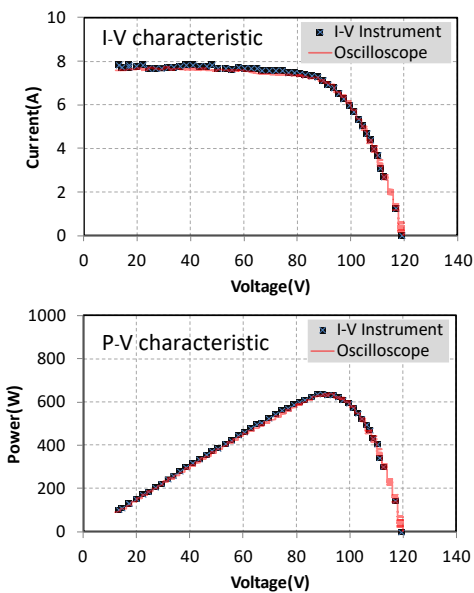
รูปที่ 12 แผนผังการต่อระบบทดสอบเครื่องตรวจวัด

เมื่อทำการกดปุ่ม Test เพื่อสั่งให้เริ่มการทดสอบ จะ ได้รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ตรวจวัดได้ โดยออสซิลโลสโคปดังรูปที่ 13



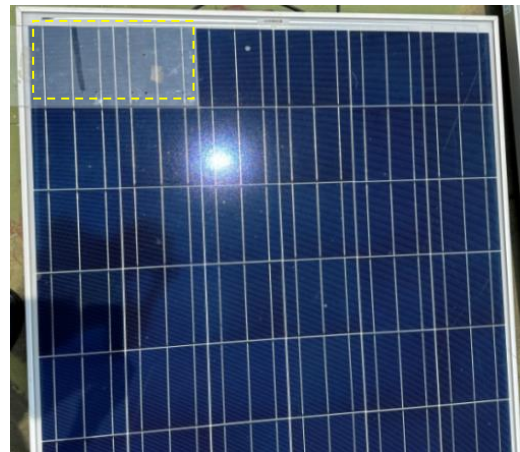
รูปที่ 13 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเทียบเวลา ในช่วงเวลา T_{charge} (เงื่อนไขการทดสอบที่ 1)

ชุดข้อมูลกระแส-แรงดัน และกำลัง-แรงดัน ที่บันทึกไว้ในออสซิลโลสโคปและเครื่องตรวจวัดฯ ถูกนำมาพล็อตเปรียบเทียบกัน แสดงดังรูปที่ 14

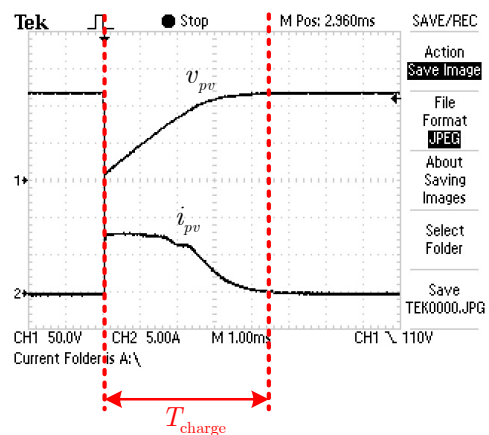


รูปที่ 14 เปรียบเทียบกราฟที่พล็อตจากข้อมูลที่บันทึกได้จากออสซิลโลสโคปกับเครื่องตรวจวัดฯ (เงื่อนไขการทดสอบที่ 1)

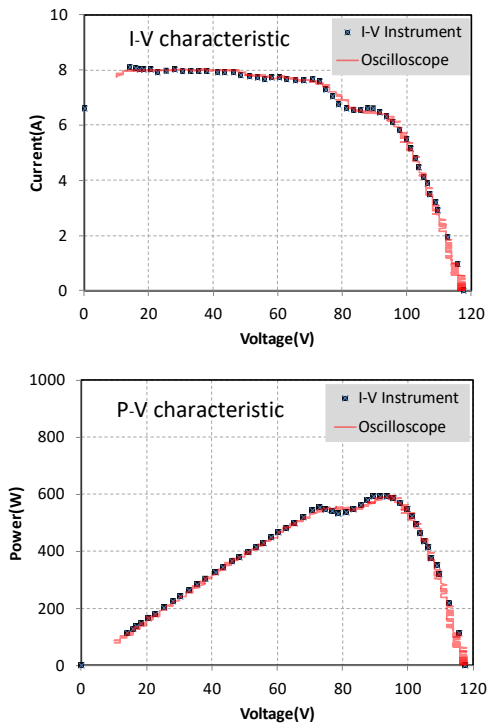
เงื่อนไขการทดสอบที่ 2 ทำการทดสอบในสภาวะการบังเงาบางส่วน โดยนำแผ่นอะคลิลิกใสมาบัง 2 เซลล์ของโมดูลที่ 1 ดังรูปที่ 15 ส่วนที่ถูกบังนี้วัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ได้เท่ากับ 830 W/m^2 ในขณะที่ส่วนอื่นที่ไม่ถูกบังวัดได้ 980 W/m^2 อุณหภูมิเซลล์ (T_{cell}) เท่ากับ 68°C ผลการทดสอบที่สภาวะตามเงื่อนไขที่ 2 แสดงดังรูปที่ 16 และ 17



รูปที่ 15 ภาพถ่ายการทดสอบขณะบางส่วนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกบังด้วยแผ่นอะคลิลิกใส



รูปที่ 16 รูปคลื่นกระแสและแรงดันเทียบเวลา ในช่วงเวลา T_{charge} (เงื่อนไขการทดสอบที่ 2)

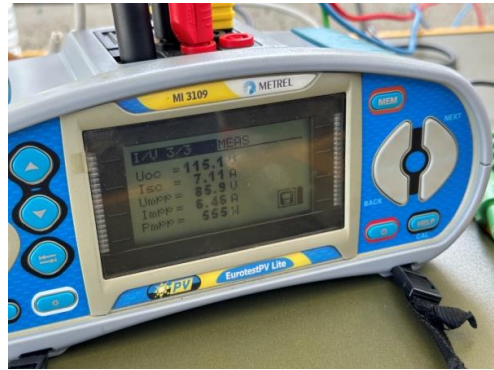


รูปที่ 17 เปรียบเทียบกราฟที่พล็อตจากข้อมูลที่บันทึกจากออสซิลโลสโคปกับเครื่องตรวจวัดฯ (เงื่อนไขการทดสอบที่ 2)

ผลการทดสอบทั้ง 2 กรณีข้างต้นแสดงให้เห็นว่าวงจรการชาร์จประจุ วงจรวัดกระแสและแรงดันแผงเซลล์แสงอาทิตย์ รวมทั้งโปรแกรมควบคุมการจุดชนวนเอสซีอาร์และการสุ่มสัญญาณทำงานได้อย่างถูกต้อง ทั้งในกรณีที่แผงได้รับแสงอย่างสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ

4.2 การทดสอบเปรียบเทียบระหว่างเครื่องตรวจวัดที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องตรวจวัดที่ขายเชิงพาณิชย์

ผลการวัดตัวแปรทางไฟฟ้าที่สำคัญซึ่งได้จากเครื่องตรวจวัดกระแส-แรงดันที่นำเสนอถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากเครื่องตรวจวัดที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ยี่ห้อ METREL รุ่น MI 3109 (รูปที่ 18)



รูปที่ 18 เครื่องตรวจวัดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ยี่ห้อ METREL รุ่น MI 3109



รูปที่ 19 ภาพถ่ายการทดสอบขณะบางส่วนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกเงาบัง 100% ด้วยแผ่นทึบ

ปริมาณทางไฟฟ้าที่สำคัญที่อ่านได้จากเครื่องมือตรวจวัดที่พัฒนาเปรียบเทียบกับเครื่องตรวจวัดที่ขายเชิงพาณิชย์ แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าที่วัดได้น้อยกว่า 4% ในทุกกรณีที่ทดสอบ ถ้าความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้น เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจะลดลง และหากบางส่วนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ถูกเงาบัง 100% (รูปที่ 19) จะส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของกำลังไฟฟ้าที่วัดมากขึ้น เนื่องจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันในช่วงทรานเซียนต์จะมีลักษณะที่ซับซ้อนขึ้น ดังรูปที่ 16 ทำให้กระแสและแรงดันที่ได้จากการสุ่มสัญญาณอาจมีความถูกต้องลดน้อยลง โดยข้อมูลท้ายสุดของตารางแสดงให้เห็นว่าการถูกบดบังจากวัสดุทึบโปร่งแสง (รูปที่ 15) จะส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของการวัดเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างเครื่องตรวจวัดฯ กับเครื่องตรวจวัดที่ขายเชิงพาณิชย์

สภาวะการทดสอบ	ตัวแปร	เครื่องตรวจวัดฯ	METREL รุ่น MI 3109	Error
G = 458W/m ² T _{cell} = 53 °C	V _{oc} (V)	116.8	114.7	+1.83 %
	V _{mpp} (V)	92.1	92.5	-0.43 %
	I _{sc} (A)	3.61	3.75	-3.73 %
	I _{mpp} (A)	3.51	3.39	+3.50 %
	P _{mpp} (W)	324	313	+3.51 %
G = 738W/m ² T _{cell} = 63 °C	V _{oc} (V)	116.1	114.1	+1.75 %
	V _{mpp} (V)	88	87.3	+0.80 %
	I _{sc} (A)	6.82	6.81	+0.14 %
	I _{mpp} (A)	6.22	6.16	+0.97 %
	P _{mpp} (W)	547	538	+1.67 %
G = 715 W/m ² T _{cell} = 62 °C และมี 1 เซลล์ ถูกเงาบัง 100%	V _{oc} (V)	117.0	114.9	+1.82 %
	V _{mpp} (V)	76.7	79.2	-3.16 %
	I _{sc} (A)	6.42	6.46	-0.62 %
	I _{mpp} (A)	6.07	5.81	+4.47 %
	P _{mpp} (W)	466	461	+1.08 %
G = 692 W/m ² T _{cell} = 61 °C และมี 4 เซลล์ ถูกเงาบัง 100%	V _{oc} (V)	115.5	113.6	+1.67 %
	V _{mpp} (V)	64.9	67.5	-3.85 %
	I _{sc} (A)	6.22	6.30	-1.26 %
	I _{mpp} (A)	5.72	5.73	+0.17 %
	P _{mpp} (W)	372	387	-3.86 %
G = 980 W/m ² T _{cell} = 67 °C และมี 2 เซลล์ ถูกเงาบัง ทำให้ G=870 W/m ²	V _{oc} (V)	115.2	113.2	+1.76 %
	V _{mpp} (V)	89.5	90	-0.56 %
	I _{sc} (A)	8.32	8.33	-0.12 %
	I _{mpp} (A)	6.72	6.71	+0.15 %
	P _{mpp} (W)	602	603	-0.17 %

5. สรุปผล

บทความนี้ได้นำเสนอรายละเอียดการออกแบบและพัฒนาเครื่องตรวจวัดคุณลักษณะกระแส-แรงดันของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ การออกแบบได้ใช้ส่วนประกอบและไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมที่มีราคาไม่สูง แต่สามารถตรวจวัดตัวแปรทางไฟฟ้าที่สำคัญของแผงเซลล์อาทิตย์ขณะติดตั้งใช้งานจริงได้

ผลลัพธ์เทียบเท่าเครื่องมือที่นำเข้าจากต่างประเทศแต่มีต้นทุนต่ำกว่าหลายสิบเท่า เครื่องตรวจวัดที่นำเสนอมีประโยชน์ในการนำไปใช้เพื่อตรวจวัดความสมบูรณ์ของการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และยังสามารถใช้งานในการตรวจวัดและบำรุงรักษาเชิงป้องกัน เมื่อระบบถูกใช้งานไปช่วงระยะเวลาหนึ่งแล้วในอนาคตสามารถพัฒนาให้สามารถส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเพื่อใช้ประโยชน์ข้อมูลการตรวจวัดได้มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Krungthai (2023, April 30). “Solar Rooftop Household sector, an additional source of income for real estate developers” [Online] (in Thai). Available: https://krungthai.com/Download/economyresources/EconomyResourcesDownload_457Solar_Rooftop_ภาคครัวเรือน_แหล่งรายได้เสริมของผู้พัฒนาอสังหาฯ_31_03_64.pdf
- [2] M. A. Cluintana, D. L. King, T. J. McMahon and C. R. Osterwald “Commonly observed degradation in field-aged photovoltaic modules,” in Proc. *Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, USA, 19-24 May 2002 , pp. 1436 – 1439.
- [3] Y. Hishikawa and K. Morita “Initial drop in I_{sc} of the field test c-Si PV modules in Japan,” in Proc. *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Japan, 11-18 May 2003, pp. 2916-2920.
- [4] U. Schwabe and P. M. Jansson, "Performance measurement of amorphous and monocrystalline silicon PV modules in Eastern U.S. Energy production versus ambient and module temperature," in Proc. *2009 IEEE Instrumentation*

- and Measurement Technology Conference, Singapore, 5-7 May 2009, pp. 1636-1641.
- [5] V.J. Leite, J. Batista, F. Chenlo and J.L. Afonso, "Low-cost instrument for tracing current-voltage characteristics of photovoltaic modules," *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol.1, no.10, pp.1012-1017, Apr. 2012.
- [6] E.E. Van Dyk, A.R. Gxasheka and E.L. Meyer, "Monitoring current-voltage characteristics and energy output of silicon photovoltaic modules," *Renewable Energy*, vol. 30, no.3, pp. 399-411, Mar. 2005.
- [7] V. Leite, F. Chenlo, "An improved electronic circuit for tracing the I-V characteristics of photovoltaic modules and strings" , in Proc. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREQP'10)* , Spain, 23-25 Mar. 2010.
- [8] A. Garrigós and J.M. Blanes, "Power MOSFET is core of regulated-DC electronic load," *EDN*, vol.50, pp.92-93, Mar. 2005.
- [9] Yingying Kuai and S. Yuvarajan, "An electronic load for testing photovoltaic panels," *Journal of Power Sources*, vol.154, no.1, pp. 308-313, Mar. 2006.
- [10] P. Papageorgas, D. Piromalis, T. Valavanis, S. Kambasis, T. Iliopoulou and G. Vokas, "A low-cost and fast PV I-V curve tracer based on an open source platform with M2M communication capabilities for preventive monitoring," *Energy Procedia*, vol.74, pp.423-438, Aug. 2015.
- [11] E. E. Van Dyk, A. R. Gxasheka and E. L. Meyer, "Monitoring current-voltage characteristics of photovoltaic modules," in Proc. 2002 *the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, USA, 19-24 May 2002, pp. 1516-1519.
- [12] H. Amiry, M. Benhmida, R. Bendaoud, C. Hajjaj, S. Bounouar, S. Yadir, K. Raïs and M. Sidki, "Design and implementation of a photovoltaic I-V curve tracer: Solar modules characterization under real operating conditions," *Energy Conversion and Management*, vol. 169, pp. 206-216, 2018.
- [13] Y. Zhu, W. Xiao, "A comprehensive review of topologies for photovoltaic I-V curve tracer," *Solar Energy*, vol. 196, pp. 346-357, 2020.
- [14] Microchip. (2023, Apr. 30). "ATmega328P datasheet" [Online]. Available: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf
- [15] T. Selmi, M. Bouzguenda, A. Gastli and A. Masmoudi, "MATLAB/Simulink based modelling of solar photovoltaic cell," *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 2, no.2, pp. 213-218, Feb. 2012.
- [16] S. M. Alghuwainem, "Matching of a DC motor to a photovoltaic generator using a step-up converter with a current-locked loop," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 9, no. 1, pp. 192-198, March 1994, doi: 10.1109/60.282492.
- [17] S. Salman, X. Ai and Z. Wu, "Design of a P-&-O algorithm based MPPT charge controller for a stand-alone 200W PV system," *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 3, no.25, pp.1-8, Aug. 2018.
- [18] M. Ned, U. M. Tore and R. P. William, *Power Electronic*, John Wiley and sons, 1995.

- [19] ST. (2023, Apr.30). “TN4015H-6T datasheet” [Online]. Available:
<https://www.st.com/resource/en/datasheet/tn4015h-6t.pdf>
- [20] Allegro MicroSystems. (2023, Apr. 30). “ACS712 datasheet” [Online]. Available:
<https://www.es.co.th/Schematic/PDF/ACS712-ALLEGRO.PDF>
- [21] Texas Instruments. (2023, Apr. 30). “ISO224 datasheet” [Online]. Available:
<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso224.pdf>
- [22] Suntech. (2023, Apr. 30). “STP290-24/Vd datasheet” [Online]. Available:
https://selasenergy.gr/technical%20data/solar-panels/suntech/STP_285-290.pdf

ประวัติผู้ประพันธ์ :

ผศ.ดร. โชกชัย ชื่นวัฒนาประณีต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา
งานวิจัยที่สนใจ: ระบบผลิต
ไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์และ
การประยุกต์ใช้วงจร
อิเล็กทรอนิกส์กำลัง



ผศ.ดร. มั่นทนา รังธิโยภาส
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา
งานวิจัยที่สนใจ: เทคโนโลยี
พลังงานและระบบทางความร้อน