

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะมืดและสว่าง อาศัยพื้นฐานทางทฤษฎีและงานวิจัยเกี่ยวกับสมบัติคงตัวและลักษณะพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อพัฒนาแนวความคิดทางวิชาการ นวัตกรรมใหม่ที่เสนอในงานวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วย การพัฒนาระบบแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม ชนิดไดโอดเปล่งแสงด้วยแรงดันสูง การสร้างแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมราคาถูกลงสำหรับการศึกษาลักษณะกระแส-แรงดันและพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ และการศึกษาพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์

2.1 สมบัติคงตัวของเซลล์แสงอาทิตย์ (Static characteristics of solar cell)

การศึกษาสมบัติคงตัวของเซลล์แสงอาทิตย์อาศัยพื้นฐานเรื่องลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ พารามิเตอร์ในภาวะคงตัว การปรับแก้ค่ากระแส-แรงดันจากผลการทดสอบนอกภาวะมาตรฐานไปสู่ภาวะมาตรฐาน และแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม ดังต่อไปนี้

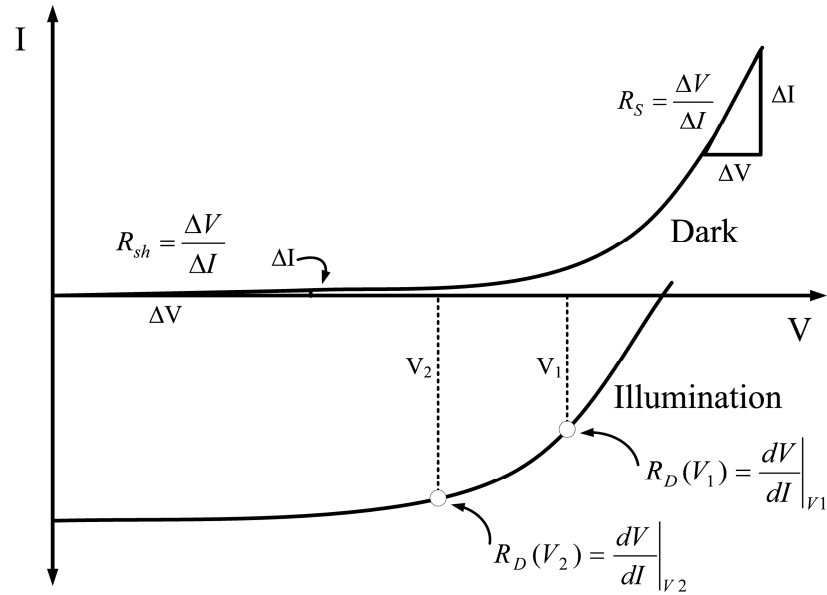
2.1.1 ลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V characteristics of solar cell)

ลักษณะกระแส-แรงดันเป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์สมรรถนะ และศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทั่วไปแล้ว ลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งในภาวะมืดและสว่าง แสดงได้ดังรูปที่ 2.1 โดยสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้สมการของชอกเคเลย์ (Shockley) ซึ่งมีการพัฒนาขึ้นมาตั้งแต่ในช่วงปี ค.ศ. 1950 [45-46, 55-56] ดังนี้

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp\left(\frac{q(V + IR_S)}{nkT}\right) - 1 \right\} - \frac{(V + IR_S)}{R_p} \quad (2.1)$$

ลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์อาจแสดงได้ด้วยโมเดลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบด้วยไดโอดสองตัว (Two-diode model) เพื่อให้เส้นโค้งกระแส-แรงดันมีสอดคล้องกับการวัดองค์ประกอบของไดโอดที่เพิ่มเข้ามาคือ ไอเดียลิตีแฟกเตอร์ (Ideality factor) ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 2 ดังสมการต่อไปนี้ [57]

$$I = I_{ph} - I_{01} \left\{ \exp\left(\frac{qV + IR_S}{nkT}\right) - 1 \right\} - I_{02} \left\{ \exp\left(\frac{qV + IR_S}{2kT}\right) - 1 \right\} - \frac{(V + IR_S)}{R_p} \quad (2.2)$$



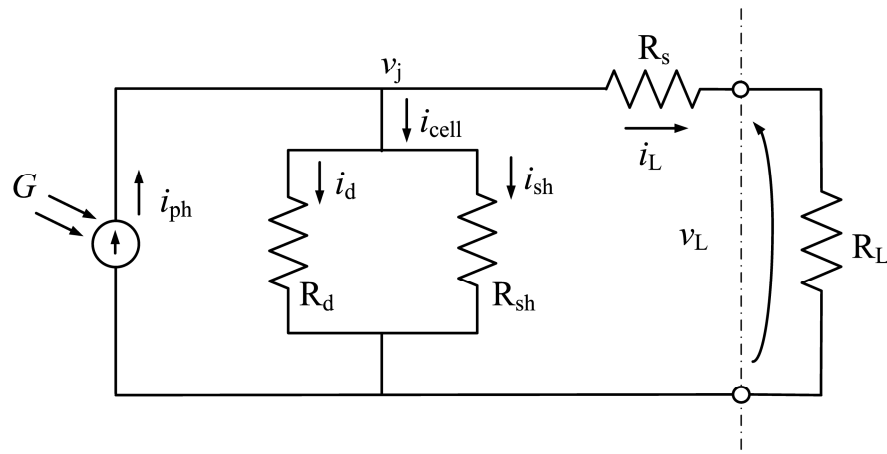
รูปที่ 2.1 ลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะมืดและสว่าง ดัดแปลงจาก [57, 60, 62]

2.1.2 พารามิเตอร์ในภาวะคงตัวของเซลล์แสงอาทิตย์ (Static parameters of solar cell)

สมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์ได้แก่ กระแสลัดวงจร แรงดันเปิดวงจร กำลังงานสูงสุด ฟิลแฟกเตอร์ และประสิทธิภาพ พารามิเตอร์สมรรถนะดังกล่าวหาได้จากกราฟลักษณะกระแส-แรงดันที่ภาวะทดสอบมาตรฐาน

นอกจากนั้น มีพารามิเตอร์ไฟฟ้าอื่นที่ส่งผลต่อสมรรถนะในภาวะคงตัว (กระแสตรง) ของเซลล์แสงอาทิตย์ได้แก่ ความต้านทานอนุกรม (Series resistance, R_s) ความต้านทานขนาน (Parallel resistance, R_{sh}) และความต้านทานไดนามิกภายใน (Internal dynamic diode resistance, R_d) [33, 38-40, 45-47, 56] สามารถนำมาสร้างเป็นวงจรสมมูล เพื่อการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า ได้ดังรูปที่ 2.2

ความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ เกิดจากความต้านทานของเนื้อสาร รอยต่อ และขั้วไฟฟ้า ความต้านทานขนาน เกิดจากการรวมตัวกลับ (recombination) ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ (imperfections) และกับดัก (traps) ในเนื้อสาร ความต้านทานไดนามิกภายใน เกิดจากสมบัติไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์ [33, 55, 58]



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลแบบคงตัวของเซลล์แสงอาทิตย์โมเดลไดโอดหนึ่งตัว คัดแปลงจาก [45-47, 56]

ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ มีวิธีการทดสอบหาค่าได้มากกว่า 20 วิธี และแต่ละวิธีให้ผลแตกต่างกัน [45-47, 59] การหาค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ จากเส้นโค้งกระแส-แรงดันในภาวะมืดเพียงเส้นเดียวเป็นวิธีที่ง่าย และสามารถหาค่าได้จากสมการ [60]

$$R_s = \frac{\Delta V}{\Delta I} \Big|_{\text{conduct-region}} \quad (2.3)$$

ความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึก เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตและการปลูกผลึก ความต้านทานขนานที่เกิดในกระบวนการผลิต มีสาเหตุจากการตกค้างของอิมิเตอร์ที่บริเวณขอบเซลล์ ซึ่งเกิดจากการตัด การแตกร้าว การรวมตัวกลับบริเวณขอบเซลล์ การเกิดความต้านทานแบบช็อตตี้ (Schottky-type) บริเวณใต้ตัวนำ การเกิดรอยขีดข่วน และการตกค้างของอนุภาคอะลูมิเนียมที่ผิว ส่วนในขั้นตอนปลูกผลึกนั้น เกิดขึ้นจากความไม่สมบูรณ์ของเนื้อสาร [61] ความต้านทานขนานสามารถหาได้จากผลทดสอบลักษณะกระแส-แรงดันในภาวะมืด ดังนี้ [62]

$$R_{sh} = \frac{\Delta V}{\Delta I} \Big|_{\text{near_zero-voltage_region}} \quad (2.4)$$

ความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนาน สามารถหาค่าได้จากผลการทดสอบในภาวะมืด ส่วนสมรรถนะอื่น ถูกกำหนดให้หาค่าจากผลทดสอบภายใต้ภาวะทดสอบมาตรฐาน (STC) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สำหรับการรายงานสมบัติ หรือสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อวัตถุประสงค์ในด้านการศึกษา วิจัย และด้านการค้า

2.1.3 การปรับแก้ค่ากระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์จากผลทดสอบนอกภาวะ

มาตรฐาน (Translation of solar cell characterization at non-STC to STC)

เนื่องจากลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ถูกกำหนดให้ทดสอบภายใต้ภาวะมาตรฐาน เพื่อใช้แสดงสมบัติคงตัวในเงื่อนไขที่สอดคล้องตรงกัน แต่ในการทดสอบจริงนั้น อาจไม่สะดวก ในการควบคุมการทดสอบให้สอดคล้องกับภาวะมาตรฐานทุกประการ มาตรฐานไออีซี 60904-1 จึงกำหนดให้สามารถทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์นอกภาวะมาตรฐานได้ เช่น ให้ทดสอบด้วยความเข้มแสงไม่น้อยกว่า 800 W/m^2 หรือ ทดสอบด้วยแสงธรรมชาติ หรือแสงเทียม เป็นต้น [35]

มาตรฐาน IEC 60891 [63] Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics ได้เสนอวิธีการปรับแก้ค่าผลการวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่กระทำภายใต้อุณหภูมิต่างกันและภายใต้ค่าความเข้มแสงที่มีได้กระทำที่ภาวะมาตรฐาน 3 วิธี คือ

(1) Correction procedure 1 เป็นการปรับแก้ค่าผลการวัด I-V curve โดยใช้สมการเดิมที่ได้เคยให้ไว้ในมาตรฐานฉบับเก่า คือ IEC 891 (1987)

(2) Correction procedure 2 เป็นทางเลือกอีกวิธีหนึ่งที่ใช้การแก้ค่าทางพีชคณิต (alternative algebraic correction method) ซึ่งเหมาะสำหรับปรับแก้ค่าผลการทดสอบภายใต้ค่าความเข้มแสงที่แตกต่างมากกว่าร้อยละ 20

(3) Correction procedure 3 เป็นวิธีบัญญัติไตรยางศ์ (An interpolation method) ซึ่งใช้เส้นกราฟผลการวัดลักษณะกระแส-แรงดัน หลายเส้น เช่น สอง สาม หรือสี่เส้นกราฟ เป็นต้น

ความแตกต่างของการปรับแก้ค่ากระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 วิธี ถูกเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 2.1 ซึ่งประกอบด้วย

- (ก) เส้นโค้งกระแส-แรงดันที่ใช้ในการเริ่มต้นปรับแก้ค่า
- (ข) พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณปรับแก้ค่า
- (ค) การปรับแก้ค่าจากเส้น โค้งหรือจุดทำงานนอกภาวะมาตรฐาน

ตารางที่ 2.1 กระบวนการปรับแก้ค่ากระแส-แรงดันนอกภาวะมาตรฐานไปสู่ภาวะมาตรฐาน

ความแตกต่าง ของกระบวนการ ปรับแก้ค่า กระแส-แรงดัน	วิธีที่ 1 [63]	วิธีที่ 2 [63]	วิธีที่ 3 [63]
เส้นโค้งกระแส- แรงดันที่ใช้ในการ เริ่มต้นปรับแก้ค่า	ใช้เส้นโค้งลักษณะ กระแส-แรงดันของ เซลล์แสงอาทิตย์ อย่างน้อย 5 เส้น เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ ตามอนุกรม และใช้ในการ การปรับแก้ค่า	ใช้เส้นโค้งลักษณะ กระแส-แรงดันของ เซลล์แสงอาทิตย์ อย่างน้อย 5 เส้น เพื่อ หาค่าสัมประสิทธิ์ตาม อนุกรม และใช้ในการ ปรับแก้ค่า	ใช้เส้นโค้งลักษณะ กระแส-แรงดันของ เซลล์แสงอาทิตย์ อย่างน้อย 2 เส้น เพื่อใช้ ในการปรับแก้ค่า
พารามิเตอร์ ที่ใช้ปรับแก้ค่า	α , β , κ , และ R_S	α_{rel} , β_{rel} , a , R'_S , และ κ'	ไม่มี
การปรับแก้ค่า จากเส้นโค้งหรือจุด ทำงานนอกภาวะ มาตรฐาน	คำนวณค่ากระแส- แรงดันบนเส้นโค้ง โดยใช้สมการปรับแก้ ค่าและพารามิเตอร์ α , β , κ , และ R_S	คำนวณค่ากระแส- แรงดันบนเส้นโค้ง โดยใช้สมการปรับแก้ ค่าและพารามิเตอร์ α_{rel} , β_{rel} , a , R'_S , และ κ'	(1) เลือกจุดกระแส- แรงดันบนเส้นโค้ง แต่ละเส้น เส้นละหนึ่งจุด (2) คำนวณค่ากระแส- แรงดัน ของค่าที่ ต้องการปรับแก้ค่า โดยวิธีเทียบ บัญญัติไตรยางค์ จากเส้นโค้งที่เลือกไว้ ทั้งสองไปสู่ ค่าที่ต้องการ

2.1.3.1 การปรับแก้ค่ากระแส-แรงดันด้วยวิธีที่ 1

การปรับแก้ค่าผลการทดสอบนอกภาวะมาตรฐานไปสู่ภาวะมาตรฐาน ด้วยวิธีการตามมาตรฐาน ไออีซี 60891 วิธีที่ 1 ในการปรับแก้ นั้น ค่าความต้านทานอนุกรม ค่าสัมประสิทธิ์เชิงอุณหภูมิของ กระแสและแรงดัน (Temperature coefficients current (α) and voltage (β)) และแฟกเตอร์ปรับแก้ เส้นโค้ง (Curve correction factor) ถูกหาค่ามาก่อน เพื่อใช้ในการปรับแก้ค่า ดังต่อไปนี้ [63]

$$I_2 = I_1 + I_{SC} \left[\frac{G_2}{G_1} - 1 \right] + \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.5)$$

$$V_2 = V_1 - R_s \cdot (I_2 - I_1) - \kappa \cdot I_2 (T_2 - T_1) + \beta \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.6)$$

วิธีการตามสมการ (2.5) และ (2.6) เป็นหนึ่งใน 3 วิธี ที่มาตรฐานแนะนำให้เลือกใช้ได้ โดยค่ากระแสที่ปรับแก้ค่า (I_2) สามารถหาค่าได้จากค่ากระแสที่วัดได้นอกภาวะมาตรฐาน (I_1) ค่ากระแสลัดวงจร (I_{sc}) ที่เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของความเข้มแสง และสัมประสิทธิ์ของกระแสตามอุณหภูมิ และ ค่าแรงดันที่ปรับแก้ค่า (V_2) หาค่าได้จากค่าแรงดันที่วัดได้นอกภาวะมาตรฐาน (V_1) ค่าแรงดันตกคร่อมค่าความต้านทานอนุกรมซึ่งแปรผันตามผลต่างของค่ากระแสที่ปรับแก้ค่า (I_2) กับค่ากระแสที่วัดได้นอกภาวะมาตรฐาน (I_1) ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานตามอุณหภูมิ (κ) และค่าสัมประสิทธิ์แรงดันตามอุณหภูมิ (β)

2.1.3.2 การปรับแก้ค่ากระแส-แรงดันด้วยวิธีที่ 2

การปรับแก้ค่ากระแส-แรงดันวิธีที่ 2 เป็นการปรับแก้ค่าโดยใช้สมการทางพีชคณิต ซึ่งคล้ายวิธีแรก แต่เหมาะสำหรับการปรับแก้ค่าตามความเข้มแสงที่ต่างจากภาวะมาตรฐานมากเกินกว่าร้อยละ 20 วิธีการปรับแก้ค่านี้นี้ พัฒนาขึ้นมาจากโมเดลเซลล์แสงอาทิตย์แบบไดโอดตัวเดียว (One diode model) ในการปรับแก้ค่าใช้สมการที่ (2.7) และ (2.8) ดังต่อไปนี้ [63]

$$I_2 = I_1 \cdot (1 + \alpha_{rel} \cdot (T_2 - T_1)) \cdot \frac{G_2}{G_1} \quad (2.7)$$

$$V_2 = V_1 + V_{oc1} \cdot \left(\beta_{rel} \cdot (T_2 - T_1) + a \cdot \ln \left(\frac{G_2}{G_1} \right) \right) - R_s \cdot (I_2 - I_1) - \kappa' \cdot I_2 \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.8)$$

จากสมการข้างต้น สัญลักษณ์หมายเลข 1 ที่กำกับไว้ หมายถึงค่าที่วัดได้หรือค่าที่ยังไม่ได้ปรับแก้ค่า ส่วนหมายเลข 2 เป็นค่าที่ปรับแก้ค่าแล้ว ค่ากระแสของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถปรับแก้ค่าได้จากผลคูณของค่ากระแสที่วัดได้ (I_1) กับค่าสัมประสิทธิ์กระแสตามอุณหภูมิ ณ ภาวะมาตรฐาน (α_{rel}) และ สัดส่วนความเข้มแสงในการทดสอบ (G_2/G_1) และค่าแรงดันที่ปรับแก้ค่า เป็นผลรวมของค่าแรงดันที่วัดได้นอกภาวะมาตรฐาน ค่าแรงดันเปิดวงจรที่วัดได้ (V_{oc1}) ซึ่งคูณกับผลรวมของค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันตามอุณหภูมิ (β_{rel}) กับค่าแก้ไขของแรงดันตามความเข้มแสง (a) ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานตามอุณหภูมิ (R) และค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันตามอุณหภูมิ

2.1.3.3 การปรับแก้ค่ากระแส-แรงดันด้วยวิธีที่ 3

การปรับแก้ค่ากระแส-แรงดันวิธีที่ 3 เป็นการปรับแก้ค่าโดยใช้การเทียบบัญญัติไตรยางศ์ (Linear interpolation or extrapolation) จากเส้นกราฟลักษณะกระแส-แรงดันหลายเส้น เช่น สอง สาม หรือสี่เส้นกราฟ เป็นต้น เส้นกราฟลักษณะกระแส-แรงดันนอกภาวะมาตรฐานที่วัดได้ ณ ค่าอุณหภูมิหรือความเข้มแสงอื่น ๆ สามารถปรับแก้ค่าไปสู่ภาวะมาตรฐานได้ โดยใช้สมการที่ (2.9) และ (2.10) ดังนี้

$$V_3 = V_1 + a \cdot (V_2 - V_1) \quad (2.9)$$

$$I_3 = I_1 + a \cdot (I_2 - I_1) \quad (2.10)$$

ในการปรับแก้ค่านั้น ค่าแรงดันและกระแสที่ต้องการปรับแก้ค่า (V_3, I_3) สามารถหาค่าได้จากผลต่างของค่ากระแส - แรงดันที่วัดได้จำนวน 2 จุด คือ (I_1, V_1) และ (I_2, V_2) กับคงที่ของการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ (a) ผลต่างของค่ากระแสที่วัดได้กับค่ากระแสที่ปรับแก้ค่านั้นจะมีค่าเท่ากับผลต่างของค่ากระแสลัดวงจรที่วัดได้กับค่ากระแสลัดวงจรที่ปรับแก้ค่า ($I_2 - I_1 = I_{sc2} - I_{sc1}$) และค่าคงที่ของการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ (a) สามารถหาค่าได้ดังสมการที่ (2.11) และ (2.12) ดังนี้

$$G_3 = G_1 + a \cdot (G_2 - G_1) \quad (2.11)$$

$$T_3 = T_1 + a \cdot (T_2 - T_1) \quad (2.12)$$

ในด้านการวิจัย เกี่ยวกับการวัดลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์นั้น Keith Emery ได้ศึกษาสมรรถนะของเซลล์และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยแสดงระบบการวัดลักษณะกระแส-แรงดันและประเมินสมบัติของเซลล์ที่ใช้งานไปแล้ว 20-30 ปี [64] และ Yuki Tsuno, et al. ได้ศึกษาการปรับแก้ค่ากระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่อุณหภูมิและความเข้มแสงนอกภาวะมาตรฐาน และต่อมา ถูกยกย่องว่าเป็นวิธีการในมาตรฐาน ไออีซี 60891 วิธีที่สาม ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว [65]

การทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งในและนอกภาวะทดสอบมาตรฐาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทดสอบภายในอาคาร สามารถควบคุมให้ทำได้สะดวกมากยิ่งขึ้น โดยการใช้อย่างน้อยหนึ่งแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม

2.1.4 แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม (Solar simulator)

การศึกษาพารามิเตอร์ในภาวะคงตัวของเซลล์แสงอาทิตย์ อาศัยลักษณะกระแส-แรงดันเป็นเครื่องมือเพื่อให้ได้ลักษณะกระแส-แรงดันสอดคล้องกับภาวะมาตรฐาน จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงธรรมชาติ หรือทดสอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม ซึ่งช่วยให้สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมของการทดสอบได้สะดวกยิ่งขึ้น

แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมเป็นแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์เพื่อทดแทนแสงอาทิตย์ สำหรับใช้ทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะที่ควบคุมได้ มาตรฐาน ไออีซี 60904-1 ได้จำแนกแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมเป็น แบบพัลส์ และแบบคงตัว (Pulse and steady-state solar simulator) [35]

แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมตามมาตรฐาน ไออีซี 60904-9 ต้องพิจารณาคุณลักษณะ 3 ด้าน คือ ก) ความไม่สอดคล้องของสเปกตรัมแสง (Spectral mismatch) ข) ความไม่สม่ำเสมอของความเข้มแสงบนพื้นงานทดสอบ (Non-uniformity on the test plane) และ ค) ความไม่เสถียรของความเข้มแสง (Temporal instability of irradiance) [66, 100]

ความไม่สอดคล้องของสเปกตรัมแสง (Spectral mismatch) ของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม วัดได้ด้วยเรดิโอมิเตอร์ (Radiometer) เพื่อประเมินสัดส่วนความเข้มแสงในแต่ละช่วงความยาวคลื่นเทียบกับมาตรฐาน เอเอ็ม 1.5 จี ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สัดส่วนของความเข้มแสงอาทิตย์เทียม [66, 100]

ช่วงความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	เอเอ็ม 1.5 จี
400-500	18.4 %
500-600	19.9 %
600-700	18.4 %
700-800	14.9 %
800-900	12.5 %
900-1100	15.9 %

ความไม่สม่ำเสมอของความเข้มแสงบนพื้นงานทดสอบ สามารถหาค่าได้จากค่าความเข้มแสงสูงสุด (G_{\max}) และต่ำสุด (G_{\min}) ที่ตกลงบนพื้นงาน (หน่วย วัดต่อตารางเมตร (วัดต่อ ตร.ม.)) ซึ่งได้จากการวัดความเข้มแสงบนพื้นงานจำนวนไม่น้อยกว่า 8*8 (64) จุด ดังต่อไปนี้

$$\text{ความไม่สม่ำเสมอของความเข้มแสงบนพื้นงานทดสอบ (\%)} = \left[\frac{G_{\max} - G_{\min}}{G_{\max} + G_{\min}} \right] \times 100\% \quad (2.13)$$

ความไม่เสถียรของความเข้มแสงแบ่งเป็น (ก) ความไม่เสถียรระยะสั้น (Short Term Instability, STI) ซึ่งสัมพันธ์กับระยะเวลาในการเก็บข้อมูลของการวัดลักษณะกระแส-แรงดัน และ (ข) ความไม่เสถียรระยะยาว (Long Term instability, LTI) ซึ่งจะสัมพันธ์กับช่วงเวลาที่พิจารณา คือ ช่วงตลอดระยะเวลาของการวัดเพื่อให้ได้เส้นโค้งลักษณะกระแส-แรงดัน หรือ คาบเวลาของการฉายแสงที่ทำการทดสอบ ค่าความไม่เสถียรของความเข้มแสงคำนวณได้จากดังนี้

$$\text{เสถียรภาพของความเข้มแสง (\%)} = \left[\frac{G_{\max} - G_{\min}}{G_{\max} + G_{\min}} \right] \times 100\% \quad (2.14)$$

แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม ต้องมีชั้นคุณภาพในระดับ เอ บี หรือซี โดยการจัดลำดับด้วยเกณฑ์สมรรถนะทั้ง 3 ด้าน ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การจำแนกชั้นคุณภาพของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม [66, 100]

ชั้นคุณภาพ	ความไม่สอดคล้องกับแสงมาตรฐาน	ความไม่สม่ำเสมอ	ความไม่เสถียร	
			ระยะสั้น	ระยะยาว
เอ (A)	0.75 – 1.25	2 %	0.5 %	2 %
บี (B)	0.6 – 1.4	5 %	2 %	5 %
ซี (C)	0.4 – 2.0	10 %	10 %	10 %

ไดโอดเปล่งแสง เป็นแหล่งกำเนิดแสงความเข้มสูง ใช้พลังงานน้อย มีอายุการใช้งานยาวนาน น้ำหนักเบา ราคาถูก และใช้งานแพร่หลายในปัจจุบัน ไดโอดเปล่งแสงถูกพัฒนาเป็นแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมแบบใหม่ มาตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 2000 และพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จนถึงปัจจุบัน [67-77] ดังตารางที่ 2.1 แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสงที่พัฒนาขึ้น มีความเข้มแสงต่ำกว่า 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร และส่วนใหญ่เป็นต้นแบบขนาดเล็กสำหรับใช้ทดสอบเซลล์ตัวอย่าง จึงเป็นโอกาสในการพัฒนาวิธีการเพิ่มความเข้มแสงให้สูงขึ้น หรือ เพิ่มขนาดสำหรับเซลล์ขนาดใหญ่ และจากการปริทัศน์งานวิจัยและพัฒนา พบว่า มีศักยภาพการพัฒนาใน 4 รูปแบบ คือ

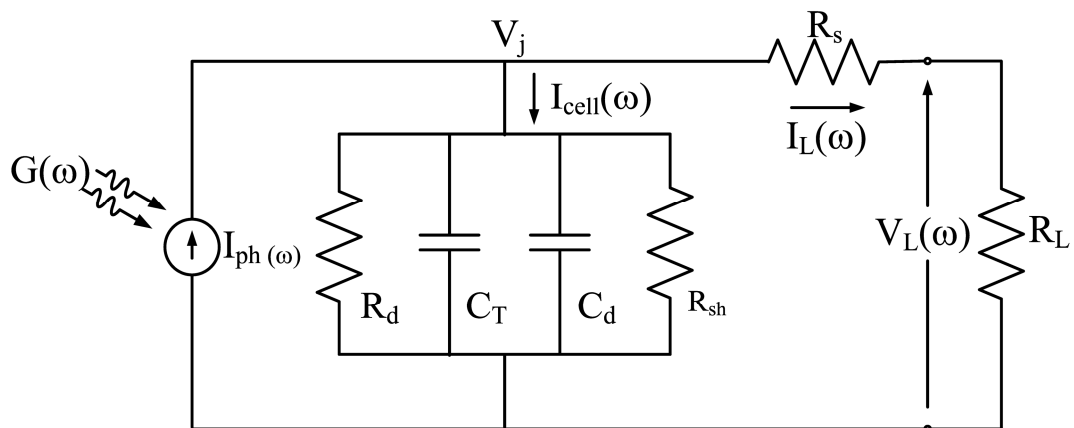
- ก) การผสมแสงให้ได้สเปกตรัมแสงตามที่ต้องการ
- ข) การสร้างความเข้มแสงให้สูงถึง 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร
- ค) การควบคุมความไม่สม่ำเสมอของความเข้มแสง และ
- ง) การรักษาเสถียรภาพความเข้มแสง

ตารางที่ 2.4 งานวิจัยเกี่ยวกับแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสง [100]

ผู้วิจัย	วัตถุประสงค์	สมรรถนะ
Kohraku and Kurokawa [67]	เพื่อวัดผลตอบสนอง ความยาวคลื่นแสงของ เซลล์แสงอาทิตย์	ใช้ไดโอดเปล่งแสง ผสมสีน้ำเงิน สีแดง สีขาว และอินฟราเรด แผง (Diode array) มีขนาด 21*21 ตารางเซนติเมตร พื้นที่ทดสอบ (Test plane area) ขนาด 10*10 ตารางเซนติเมตร ได้ความเข้ม 10 วัตต์ต่อตารางเมตร ความไม่สม่ำเสมอ 3%
Grischke, et al. [68]	เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ของ เซลล์แสงอาทิตย์	แผงไดโอดเปล่งแสง 2 สี และ 3 สี แสงแฉก สัดส่วนความเข้มแสงที่ 940, 700, 470 นาโนเมตร เท่ากับ 31, 44 และ 25 %
Kohraku and Kurokawa [69]	เพื่อวัดผลตอบสนอง ความยาวคลื่นและลักษณะ กระแส-แรงดัน	ไดโอดเปล่งแสง ผสมสีน้ำเงิน สีแดง สีขาว และอินฟราเรด พื้นที่ทดสอบขนาด 10*10 ตารางเซนติเมตร เปล่งแสงคงตัว มีความเข้มแสง 100 วัตต์ต่อตารางเมตร ความไม่สม่ำเสมอ 5%
Koyanagi and Kurokawa [70]	เพื่อวัดลักษณะกระแส-แรงดัน	แผงไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน แดง ขาว และอินฟราเรด แสงคงตัว ความเข้มแสง 110 วัตต์ต่อตารางเมตร
Thongpron, Lohapetch, and Kirtikara [71]	เพื่อวัดลักษณะกระแส-แรงดัน	แผงไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน เขียว แดง มีขนาด 24*24 ตารางเซนติเมตร แสงคงตัว ความเข้มแสง 400 วัตต์ต่อตารางเมตร ความไม่สม่ำเสมอ 20%
Tsuno, Kamisako, and Kurokawa [72]	เพื่อวัดลักษณะกระแส-แรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์	แผงขนาด 34*34 ตารางเซนติเมตร ใช้ไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน สีแดง และ อินฟราเรด แสงคงตัว พื้นที่ทดสอบ ขนาด 10*10 ตารางเซนติเมตร ความเข้มแสง 420 วัตต์ต่อตารางเมตร
Bliss, Betts, and Gottshalg [73]	เพื่อวัดสมรรถนะของ แสงอาทิตย์เทียม	แสงผสมไดโอดเปล่งแสง กับหลอดทั้งสแตนด์บายไฮโดเจน พื้นที่ทดสอบ 20*20 ตารางเซนติเมตร ความเข้มแสง 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร ชั้นคุณภาพ บีเอเอ
Jang and Shin [74]	เพื่อสร้างแหล่งกำเนิด แสงอาทิตย์เทียม	แผงไดโอดเปล่งแสงสีขาว 1.5 W 96 ตัว แสงคงตัว ความเข้มแสง 500 และ 900 วัตต์ต่อตารางเมตร
Kerbs, et al. [75]	เพื่อวัดสมรรถนะของแสง อาทิตย์เทียม	แผงไดโอดเปล่งแสง 18 สี มีขนาด 1.7*4.7 ตารางเซนติเมตร เปล่งแสงคงตัว มีสเปกตรัมแสงประดิษฐ์ AM 1.5 G ความเข้ม 743 วัตต์ต่อตารางเมตร
Kolberg, et al. [76]	เพื่อสร้างแหล่งกำเนิด แสงอาทิตย์เทียม	ไดโอดเปล่งแสง 800 ตัว แสงคงตัว แสงประดิษฐ์ AM 1.5 G ความไม่เสถียร $\pm 3\%$
Bazzi, et al. [77]	เพื่อสร้างแหล่งกำเนิด แสงอาทิตย์เทียม	แผงไดโอดเปล่งแสง 6 สี มีขนาด 5*10 ตารางเซนติเมตร เปล่งแสงคงตัว สเปกตรัม AM 1.5 G ความไม่สม่ำเสมอ <10%
Hamadani, et al. [37]	เพื่อสร้างแหล่งกำเนิด แสงอาทิตย์เทียม	ไดโอดเปล่งแสง 15 วัตต์ จำนวน 24 ตัว 5 สี แสงคงตัวและแสงแฉก ความเข้ม 29 และ 52 วัตต์ต่อตาราง เมตร ชั้นคุณภาพ ซีซีเอ

2.2 ลักษณะพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์

ลักษณะพลวัต (กระแสสลับ) ของเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นกับโมเดลทางพลวัต หรือรูปแบบการทดสอบ เซลล์แสงอาทิตย์ พารามิเตอร์พลวัต (dynamic parameters) ของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย ความต้านทานอนุกรม ความต้านทานขนาน ความต้านทานไดนามิกภายใน เช่นเดียวกับภาวะคงตัว แต่มีองค์ประกอบอีกสองตัวคือ ทรานสิชันคาปาซิแตนซ์ (Transition capacitance, C_T) และ ดิฟฟิวชันคาปาซิแตนซ์ (Diffusion capacitance, C_D) วงจรสมมูลกระแสสลับของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 [33, 45-47, 55, 57]



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลแบบพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ ดัดแปลงจาก [33, 45-47, 55, 57]

2.2.1 ความต้านทานไดนามิกของเซลล์แสงอาทิตย์ (Dynamic resistance of solar cell)

ความต้านทานไดนามิกของเซลล์แสงอาทิตย์ แยกได้เป็น ความต้านทานไดนามิกภายนอก และภายใน (External and internal dynamic resistances) [45-47]

: ความต้านทานไดนามิกภายใน เป็นพารามิเตอร์แสดงความต้านทานพลวัตตามสมบัติ ไดโอดในรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ และมีค่าขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเซลล์ จึงขึ้นกับจุดทำงาน (operating point) ของเซลล์

: ความต้านทานไดนามิกภายนอก เป็นพารามิเตอร์ผสมที่รวมความต้านทานสามตัว คือ ความต้านทานไดนามิกภายใน ความต้านทานอนุกรม และความต้านทานขนาน

จัดดูฤทธิ์ ท่องปรอน และคณะ ได้เสนอความสัมพันธ์ของความต้านทานอนุกรม ความต้านทานไดนามิกภายนอก และไดนามิกภายใน ของเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะมืดและสว่าง ดังนี้ [45-47] ในภาวะมืด

$$R_S = \frac{1}{\lambda_j(I_2 - I_1)} \cdot \ln \left[\frac{I_0 + I_1}{I_0 + I_2} \right] - \underbrace{\left(\frac{V_1 - V_2}{I_2 - I_1} \right)}_{R_D} \quad (2.15)$$

ในภาวะสว่าง

$$R_S = \underbrace{\left(\frac{V_1 - V_2}{I_2 - I_1} \right)}_{R_D} - \frac{1}{\lambda_j(I_2 - I_1)} \cdot \ln \left[\frac{I_0 + I_1}{I_0 + I_2} \right] \quad (2.16)$$

โมเดลดังกล่าวที่ (2.15) และ (2.16) ถูกนำไปใช้ในการหาค่าความต้านทานไดนามิกของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน แบบผลึกเดี่ยว (Mono-crystalline PV) ผลึกย่อย (Poly-crystalline PV) และผลึกอสัณฐาน (Amorphous silicon PV) ในภาวะมืดและสว่าง ในภาวะสว่าง เซลล์แสงอาทิตย์ถูกทดสอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมมาตรฐาน เอเอเอ พบว่า ความต้านทานไดนามิกภายในของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าแปรผันกับค่าแรงดันไฟฟ้า ความต้านทานไดนามิกภายในที่ภาวะมืดมีค่าแตกต่างจากภาวะสว่าง และความต้านทานไดนามิกภายในมีค่าแปรผันกับค่าความเข้มแสง

2.2.2 คาปาซิแตนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell capacitance)

คาปาซิแตนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ มีการศึกษามาตั้งแต่วางปี ค.ศ. 1970 [55-56] และเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการวิเคราะห์ลักษณะพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งในโดเมนเวลาและความถี่

ทรานสิชันคาปาซิแตนซ์ (Transition capacitance) หรือคาปาซิแตนซ์รอยต่อ (Junction capacitance) เกิดจากพาหะหลักเคลื่อนที่ออกจากรอยต่อ (Junction) พาหะไฟฟ้าหมดไปจากรอยต่อทำให้รอยต่อกลายเป็นช่วงปลอดพาหะ (Depletion region/layer) ซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้า ในช่วงปลอดพาหะมีอะตอมสารเจือที่ถูกไอออนไนซ์ อะตอมเหล่านี้ถูกตรึงไว้ในโครงสร้างและเคลื่อนที่ไม่ได้ กลายเป็น Space charge รอยต่อไม่เป็นกลางทางไฟฟ้าและเกิดสภาพขั้วไฟฟ้าจาก Space charge เหล่านี้มีสนามไฟฟ้า (จาก Space charge บวกไปสู่ Space charge ลบ) ภายในรอยต่อ เกิดแรงดันภายในตกคร่อมรอยต่อ/ช่วงปลอดพาหะ การป้อนแรงดันไบอัสจากภายนอกเปลี่ยนค่าสนามไฟฟ้าภายในรอยต่อ ทำให้เปลี่ยนความกว้างของช่วงปลอดพาหะ และเปลี่ยนค่าทรานสิชันคาปาซิแตนซ์ด้วย

ทรานสิชันคาปาซิแตนส์ มีอิทธิพลมากเมื่อเซลล์มีการไบอัสกลับ และองค์ประกอบของทรานสิชันคาปาซิแตนส์ สามารถแสดงได้โดยสมการ [55]

$$C_T \propto \frac{1}{(V_j)^{1/2}} \quad (2.17)$$

$$C_T = \left| \frac{dQ}{dV} \right| = \frac{\epsilon A}{W} \quad (2.18)$$

เมื่อมีไบอัสไปด้านหน้า มีการแพร่ (Diffusion) ของพาหะจากด้านนอกซีกหนึ่งของรอยต่อข้ามรอยต่อ (โดยการครีฟในสนามไฟฟ้าในรอยต่อ) ไปสะสมอยู่ด้านนอกของรอยต่ออีกซีกหนึ่ง การสะสมของประจุรอยต่อนี้ทำให้เกิดดิฟฟิวชันคาปาซิแตนส์ เมื่อเซลล์ได้รับไบอัสไปข้างหน้า ดิฟฟิวชันคาปาซิแตนส์จึงเพิ่ม อัตราการเปลี่ยนแปลงของประจุที่สะสมรอยต่อนี้ขึ้นกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดัน ดังนี้ [55]

$$C_D = \frac{dQ}{dV} = \tau \frac{dI}{dV} = \frac{\tau}{R_d} \quad (2.19)$$

$$C_D = \tau \cdot I \left(\frac{q}{nkT} \right) \quad (2.20)$$

ดิฟฟิวชันคาปาซิแตนส์ แปรผันตามค่าความถี่ของสัญญาณที่กระตุ้นแบบสัญญาณไซน์ซอซด์ เมื่อสัญญาณมีความถี่ต่ำ ($\omega\tau \ll 1$) ดิฟฟิวชันคาปาซิแตนส์ มีค่าเท่ากับ [55]

$$C_D(f)_{\omega\tau \ll 1} = \tau \cdot \frac{1}{2R_d} \quad (2.21)$$

และที่ความถี่สูง ($\omega\tau \gg 1$) ดิฟฟิวชันคาปาซิแตนส์ของเซลล์แสงอาทิตย์ มีเท่ากับ [55]

$$C_D(f)_{\omega\tau \gg 1} = \left(\frac{\tau}{2\omega} \right)^2 \cdot \frac{1}{R_d} \quad (2.22)$$

กล่าวโดยสรุป

: ทรานสิชันคาปาซิแตนส์ เกิดจากอะตอมธาตุเจอร์เมเนียมไอออนไนซ์ เป็นประจุที่เคลื่อนที่ไม่ได้ มีสภาพเป็น Space charge ทรานสิชันคาปาซิแตนส์เกิดจากประจุที่เคลื่อนที่ไม่ได้ ภายในรอยต่อ

: ดิฟฟิวชันคาปาซิแตนส์ เกิดจากประจุที่เคลื่อนที่ได้แพร่ข้ามรอยต่อ ไปสะสมอยู่ด้านนอกของรอยต่อ ดิฟฟิวชันคาปาซิแตนส์เกิดจากประจุที่เคลื่อนที่ได้ ภายนอกรอยต่อ

การทดสอบหาค่าและสภาพพลวัตของคาปาซิแตนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ มีการศึกษาหลายลักษณะ เช่น

: การทดสอบการแปรผันของค่าคาปาซิแตนซ์ตามค่าแรงดันและความถี่ ด้วยวิธีการทดสอบอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี ในภาวะมืด [33, 38-40, 78-81]

: การทดสอบลักษณะคาปาซิแตนซ์-แรงดัน (C-V characteristics) ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเมื่อไบอัสกลับในภาวะมืด [50, 82]

: การทดสอบลักษณะคาปาซิแตนซ์-แรงดัน โดยทดสอบการหน่วงเวลาของแรงดันเปิดวงจรในภาวะมืด [83] และที่มีการไบอัสด้วยแสงและกระตุ้นด้วยเลเซอร์ [84]

: การทดสอบลักษณะคาปาซิแตนซ์-ความถี่ (C-f characteristics) ของเซลล์แสงอาทิตย์ ในภาวะสว่าง [85]

: การเปรียบเทียบคาปาซิแตนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ในโดเมนเวลาและความถี่ [86] เป็นต้น

2.2.3 การศึกษาพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ในโดเมนความถี่

(Frequency domain dynamic characteristics of solar cell)

การศึกษาลักษณะพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ในโดเมนความถี่ในการศึกษานี้ แบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ

: การวิเคราะห์อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี (Impedance spectroscopy) และ

: การมอดูเลตความเข้มแสง (Intensity Modulation)

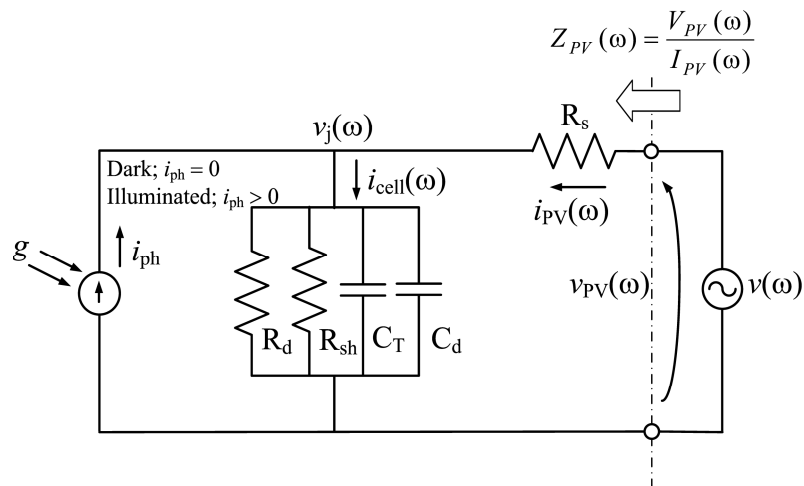
2.2.3.1 การศึกษาลักษณะพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี

การวิเคราะห์อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี หากความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่ขั้วของเซลล์แสงอาทิตย์ ตามลักษณะที่แสดงในรูปที่ 2.4 ในการทดสอบ มีการไบอัสไฟฟ้ากระแสตรง และป้อนสัญญาณไซน์ชอยซ์อัมพลิจูดขนาดเล็กที่ความถี่ต่างๆ ให้กับเซลล์ และวิเคราะห์สัญญาณตอบสนองที่ความถี่นั้นๆ การวิเคราะห์อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปี บางครั้งเรียก การวิเคราะห์แอดมิตแตนซ์ หรือ แอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโกปี (Admittance spectroscopy)

พลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ในโดเมนความถี่ มีการศึกษามาตั้งแต่ทศวรรษ ค.ศ. 1960-70 H. S. Rauschenbach รายงานผลการศึกษาแอดมิตแตนซ์เชิงซ้อน (Complex admittance) โดยแสดง

: สมการพลวัตกระแสตรงและกระแสสลับของเซลล์แสงอาทิตย์ ที่กระตุ้นด้วยแรงดันไซน์ชอยด์ ซึ่งเป็นผลงานของ W. Schockley ที่ตีพิมพ์ในปี ค.ศ. 1950 และ

: การศึกษาลักษณะอิมพีแดนซ์-ความถี่ของเซลล์แสงอาทิตย์ ณ ค่าแรงดันไบอัสต่างกัน ซึ่งเป็นผลงานของ D. W. Zerbel ซึ่งตีพิมพ์ในปี ค.ศ. 1978 อีกด้วย



รูปที่ 2.4 การวิเคราะห์ห้อมพีแดนส์สเปกโตรสโกปีของเซลล์แสงอาทิตย์ คัดแปลงจาก [33, 38-40]

ในทศวรรษ ค.ศ. 1990 มีการศึกษาลักษณะพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ในโดเมนความถี่ ด้วยการวิเคราะห์ห้อมพีแดนส์สเปกโตรสโกปีในภาวะมืดและไบอัสไปข้างหน้า โดยได้ทดสอบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานในอวกาศ เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs/Ge) และ บีเอสเอฟอาร์ (BSFR-back surface field reflection) เป็นต้น โดย Mueller R. L. and Wallace M. T. ได้พิจารณาผลของความต้านทานอนุกรมเข้าไปในโมเดลด้วย [31]

ต่อมา M. S. Suresh [32] พิจารณาผลของความต้านทานอนุกรม ความต้านทานขนาน ความต้านทานไดนามิกภายใน ทรานซิสชันคาปาซิแตนส์ และดิฟฟิวชันคาปาซิแตนส์ ที่มีต่อห้อมพีแดนส์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนี้

$$R_{PV} = \frac{R_d R_p}{R_d + R_{sh}} \quad (2.26)$$

$$X_{PV} = \frac{1}{2\pi f(C_T + C_D)} \quad (2.27)$$

ช่วงปี ค.ศ. 2000 มีงานวิจัยเรื่องพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยห้อมพีแดนส์สเปกโตรสโกปี หลายผลงาน ส่วนใหญ่เป็นการวิเคราะห์เซลล์ที่ใช้ในอวกาศ R. A. Kumar, M. S. Suresh, and J. Nagaraju ใช้โมเดลดังสมการที่ (2.18) และ (2.19) มาศึกษาเปรียบเทียบลักษณะพลวัตและหาค่าคาปาซิแตนส์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอน (BSR and BSFR) และชนิดแกลเลียมอาร์เซไนด์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้อมพีแดนส์ในโดเมนความถี่ (Frequency Response Analyzer-FRA) งานวิจัยกลุ่มนี้ ส่วนใหญ่ถูกรวบรวมไว้ในวิทยานิพนธ์ระดับดุษฎีบัณฑิตของ R. A. Kumar [89] และสามารถแบ่งการศึกษาเป็น 3 รูปแบบ คือ

ก) การทดสอบในภาวะมืดและที่อุณหภูมิห้อง พบว่าค่าแรงดันใช้งานมีผลต่อลักษณะพลวัตของอิมพีแดนซ์และค่าคาปาซิแตนซ์ [78-79]

ข) การทดสอบภายใต้ภาวะมืดและอุณหภูมิต่างกัน พบว่าอุณหภูมิของเซลล์มีผลต่อค่าคาปาซิแตนซ์ [80-81] และ

ค) การทดสอบภายใต้ภาวะสว่าง เพื่อหาค่าคาปาซิแตนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแกเลียมอาร์เซไนด์ ให้ผลไม่แตกต่างกันระหว่างภาวะมืดและสว่าง [88]

เช่นเดียวกับการทดสอบในภาวะมืด การศึกษาลักษณะพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย ถูกนำไปใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ๆ หลายรูปแบบ และมีการพัฒนามาสู่การศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ภาวะสว่างมากขึ้น

ในปี ค.ศ. 2007 Y. Y. Proskuryakov, K. Durose, and B. M. Taelle ใช้วิธีอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีวิเคราะห์วงจรมูลของเซลล์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์/แคดเมียมซัลไฟด์ (CdTe/CdS) เพื่อศึกษาพารามิเตอร์และวงจรมูลของเซลล์ เนื่องจากเซลล์ดังกล่าวมีรอยต่อพีเอ็นและชั้นกำบังข้อต่อกึ่งบริเวณแผ่นสัมผัสหลังจึงทำให้มีรอยต่อเพิ่มขึ้น และมีวงจรมูลแตกต่างไปจากเซลล์ชนิดผลึก ผลการศึกษาในภาวะมืด พบว่าโมเดลวงจรมูลต้องใช้พารามิเตอร์มากถึง 12 ตัว [90] และผลการศึกษาในภาวะสว่าง พบว่าความเข้มแสงมีผลต่ออิมพีแดนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ การได้รับแสงทำให้เซลล์มีรอยต่อเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดชั้นที่ถูแสง และ ในภาวะสว่างเซลล์มีกระแสแสงไม่เป็นศูนย์ ทำให้การวิเคราะห์มีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นมาก [91]

ในปี ค.ศ. 2009 S. Kumar, P. K. Singh, and G. S. Chilana ใช้อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีศึกษาอิมพีแดนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน ภายใต้ความเข้มแสงและความยาวคลื่นต่างกัน ผลการศึกษาพบว่า ความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้น ทำให้ครึ่งวงกลมของเส้นโค้งอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนมีขนาดลดลง และ ครึ่งวงกลมของเส้นโค้งอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนภายใต้สเปกตรัมแสงต่างกัมีขนาดแตกต่างกัน [43]

ในปี ค.ศ. 2010 G. Garcia – Belmonte และคณะ นำวิธีการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีไปศึกษากลไกการรวมตัวกลับของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ภายใต้ภาวะมีแสง และพบว่า จลนพลศาสตร์การรวมตัวกลับเป็นไปตามกฎสองโมเลกุล (Bimolecular law) [92]

การศึกษาพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ในโดเมนความถี่ ตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 2000 เป็นต้นมา ได้ใช้เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ มาช่วยในการศึกษาพารามิเตอร์และจลนพลศาสตร์ของเซลล์ชนิดต่าง ๆ

ในช่วงแรก เป็นการวิเคราะห์ในภาวะมีด และต่อมาจึงพัฒนามาสู่ภาวะสว่าง การศึกษาส่วนใหญ่ เป็นการวิเคราะห์เซลล์รอยต่อเดี่ยว โดยใช้สมการอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ทั้งนี้โลกัสมพีแดนซ์เชิงซ้อนเมื่อพล็อตใน Complex plane จึงเป็นเส้นโค้งครึ่งวงกลม สำหรับเซลล์หลายรอยต่อ การวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือนี้ ช่วยให้ปรับรูปแบบการวิเคราะห์ได้โดยสะดวกและรวดเร็ว แต่เนื่องจากเซลล์หลายรอยต่อมีอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนหลายตัวจากหลายรอยต่อ จึงมีโลกัสมพีแดนซ์เป็นเส้นโค้งครึ่งวงกลมหลายวง ผู้วิเคราะห์จำเป็นต้องเข้าใจโครงสร้างและอิมพีแดนซ์ในรอยต่อแต่ละชั้น จึงจะสามารถวิเคราะห์พลวัตได้อย่างถูกต้อง

ในปี ค.ศ. 2003 ชีรยุทธ์ เจนวิทยา และคณะ เสนอการวิเคราะห์อิมพีแดนซ์พลวัตของเซลล์ชนิดผลึกซิลิกอน ซึ่งใช้เป็นต้นแบบและพัฒนาไปสู่การวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ในเซลล์ชนิดหลายรอยต่อได้ ในการวิเคราะห์ได้แสดงที่มาของโมเดลอิมพีแดนซ์พลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเดี่ยว เสนอเทคนิคการวัดทดสอบอิมพีแดนซ์ด้วยเครื่องมือพื้นฐาน และการวิเคราะห์อนุกรมฟูเรียร์ของสัญญาณ โมเดลที่เสนอนี้ มีความสอดคล้องกับแนวคิดก่อนหน้านี้ แต่แสดงรายละเอียดและที่มาอย่างชัดเจน ดังนี้ [33, 38-40]

$$Z_{PV}(V, \omega) = R_{PV}(V, \omega) + jX_{PV}(V, \omega) \quad (2.28)$$

$$Z_{PV}(V, \omega) = R_S + \left[\frac{[R_{sh} + R_d(V)]R_{sh}R_d(V)}{[\omega R_{sh}R_d(V)\{C_D(V, \omega) + C_T(V)\}]^2 + [R_{sh} + R_d(V)]^2} \right] + j \left[\frac{\omega\{R_{sh}R_d(V)\}^2\{C_D(V, \omega) + C_T(V)\}}{[\omega R_{sh}R_d(V)\{C_D(V, \omega) + C_T(V)\}]^2 + [R_{sh} + R_d(V)]^2} \right] \quad (2.29)$$

$$Z_{PV} = \left[R_S + \frac{R_p}{(\omega R_p C_p)^2 + 1} \right] + j \left[\frac{\omega R_p^2 C_p}{(\omega R_p C_p)^2 + 1} \right] \quad (2.30)$$

สมการที่ (2.30) แสดงให้เห็นว่า

: อิมพีแดนซ์พลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นฟังก์ชันของแรงดันและความถี่

: องค์ประกอบที่แปรผันตามแรงดัน ได้แก่ ความต้านทานไดนามิกภายใน ดิฟฟิวชันคาปาซิแตนซ์ และทรานสิชันคาปาซิแตนซ์ เฉพาะดิฟฟิวชันคาปาซิแตนซ์เท่านั้น ที่ทำให้อิมพีแดนซ์แปรผันตามความถี่

: อิมพีแดนซ์พลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ มีโลกัสมพีแดนซ์เป็น โค้งครึ่งวงกลม และมีจุดกำเนิดที่ R_S

2.2.3.2 การศึกษาพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการมอดูเลตความเข้มแสง

การศึกษาพลวัตด้วยการมอดูเลตความเข้มแสงนั้น วิเคราะห์ผลตอบสนองของวัสดุตัวอย่างหรือชิ้นงานทดสอบที่มีต่อแสงกระตุ้นในโดเมนความถี่ การทดสอบนี้ ส่วนใหญ่ใช้ในการศึกษาปรากฏการณ์ทางเคมีไฟฟ้า เช่น การทดสอบสารกึ่งตัวนำ หรือสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นต้น

ในการทดสอบด้วยวิธีมอดูเลตความเข้มแสง วัสดุตัวอย่างถูกฉายแสงกระแสตรง และกระตุ้นด้วยแสงกระแสสลับไบซุชอยด์ขนาดเล็ก ผลตอบสนองของชิ้นงานตัวอย่างที่มีการวัดและวิเคราะห์อาจเป็น กระแสแสง เรียกว่าโฟโตเคอเรนทส์เปกโทรสโกปี (Photocurrent spectroscopy) หรืออาจเป็นแสงสะท้อน – การดูดกลืน ของวัสดุตัวอย่าง ซึ่งเรียกว่า รีเฟล็กแตนส์ – แอปซอร์ปแตนส์สเปกโทรสโกปี (Reflectance – absorption spectroscopy) หรือ อื่น ๆ เป็นต้น

ผลตอบสนองต่อแสงกระตุ้นที่วัดได้ ถูกนำไปใช้อธิบายกลไกหรือปรากฏการณ์ และจลนพลศาสตร์ของวัสดุตัวอย่าง เช่น ใช้ศึกษาการเกิดกระแสแสงของอิเล็กโทรดของอิเล็กโทรดแสง (Photoelectrode process) [93] หรือใช้ศึกษาการเกิดกระแสแสงของอิเล็กโทรดนาโนแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS nanoparticle modified electrodes) [94] เป็นต้น วิธีการมอดูเลตความเข้มแสง ให้ผลการวิเคราะห์ในลักษณะเส้นโค้งครึ่งวงกลมที่เป็นค่าเชิงซ้อนเช่นเดียวกับวิธีอิมพีแดนส์สเปกโทรสโกปี และการวิเคราะห์ลักษณะไดนามิกเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีมอดูเลตความเข้มแสง แสดงได้ดังตารางที่ 2.5

การศึกษาพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีมอดูเลตความเข้มแสง มีขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 โดย J. Rostalski and D. Meissner ได้ศึกษาการกำเนิดและการเคลื่อนที่ของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์แบบรอยต่อพีเอ็น เพื่ออธิบายผลของความต้านทานอนุกรมซึ่งเกิดขึ้นในชั้นของวัสดุ 4 ส่วน คือ อินเดียมทินออกไซด์ (ITO) ซิงค์แพร์โลเคนไนน์ (ZnPC) เมธิล-สับสตีวเตด-เพอร์ลิโน-ฟิกเมนต์ (MPP) และออร์ม (Au) และอธิบายองค์ประกอบของกระแส ความต้านทานไดนามิกภายใน และความต้านทานชั้นในรอยต่อพีเอ็น ในการทดสอบเซลล์ได้นายแสงไบอัสด้วยหลอดอาร์กซีนอน 75 วัตต์ และใช้โมโนโครเมเตอร์ และวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนส์ ทำให้สามารถเปรียบเทียบโมเดลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ และลักษณะพลวัตของค่ากระแสลัดวงจรที่แปรผันตามความยาวคลื่นแสงได้ [95]

ในปี ค.ศ. 2008 P. M. DiCarmine and O. A. Semnikhin ได้ ศึกษาการแยกพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีบิไทโอฟีน (Polybithiophene) ด้วยการฉายแสงเลเซอร์ไดโอด (405 nm) 20 มิลลิวัตต์ $n_0=6,259$ เฮิร์ตซ์ มีปริมาณแสง 5.8×10^7 โฟตอนต่อวินาที-ตารางเซนติเมตร ให้วัสดุตัวอย่างขนาดวงกลม 3 มิลลิเมตร พบว่า เซลล์ที่พัฒนาขึ้น มีประสิทธิภาพต่ำ

เนื่องจากความไม่สมดุลอย่างมากของโมบิลิตีของอิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดจากแสง ผลตอบสนองของกระแสแสงมีลักษณะเป็นเส้น โค้งเชิงซ้อน และการศึกษานี้สามารถอธิบายลักษณะเชิงซ้อนของกระแสแสงที่ทดสอบได้ ดังนี้ [96]

$$I_{ph} = g_a \left[1 - \frac{\beta_a}{1 + j\omega\tau_a} \right] + g_c \left[1 - \frac{\beta_c}{1 + j\omega\tau_c} \right] \quad (2.31)$$

ในปี ค.ศ. 2010 W. Liu, et al. ศึกษาผลของความต้านทานอนุกรมที่มีต่อการเกิดและการรวมตัวกลับของอิเล็กตรอนในเซลล์แสงอาทิตย์อินทรีย์ชนิดโคโยเซนซีไทซ์ ในการทดสอบ ได้ศึกษาผลตอบสนองของกระแสแสง และแรงดันแสง (Photovoltage) ของเซลล์แสงอาทิตย์ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ขนาด 0.25 ตารางเซนติเมตร ด้วยการไบอัสและกระตุ้นด้วยไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน (455nm) ที่มีอคูเลตสัญญาณในระดับ 10% ช่วงความถี่ 0.1 – 3,000 เฮิร์ตซ์ ในการศึกษาพบว่าความต้านทานอนุกรมมีผลกระทบต่อ การส่งผ่านอิเล็กตรอนในภาวะลัดวงจร แต่ไม่มีผลในการรวมตัวกลับของประจุที่ภาวะเปิดวงจร [53]

ในปี ค.ศ. 2011 Kavasoglu, et al. ได้ศึกษากระบวนการแยกและส่งผ่านประจุของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนและซีไอจีเอส (CIGS) ด้วยการวิเคราะห์กระแสลัดวงจรที่ตอบสนองต่อการมอดูเลตความเข้มแสง ในการทดลอง ได้การนำเซลล์ขนาด 7.5 ตารางเซนติเมตรมาฉายแสงไบอัสและกระตุ้นด้วยไดโอดเปล่งแสงสีแดง (660nm) ที่มีอคูเลตในระดับ 1% ในช่วงอุณหภูมิ 50-300 เคลวิน ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิของเซลล์มีผลต่อมูมเฟสและจำนวนประจุที่ส่งผ่านในเซลล์แสงอาทิตย์ และเซลล์ชนิดซีไอจีเอสส่งผ่านประจุได้เร็วกว่าเซลล์ชนิดซิลิกอน และการศึกษานี้ ได้แสดงลักษณะของฟลักแสงที่ฉายบนเซลล์ (ϕ) ที่กำหนดให้สัดส่วนการมอดูเลตสัญญาณมีค่าน้อยมาก ($\delta \ll 1$) [90] ดังนี้

$$\phi = \phi_0 [1 + \delta \exp(j\omega t)] \quad (2.32)$$

$$i = i_m \exp(j\omega t + \varphi) \quad (2.33)$$

การวิเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีมอดูเลตความเข้มแสง มีการศึกษาตั้งแต่เริ่มต้นสหัสวรรษใหม่เพื่ออธิบายกลไกและจลนพลศาสตร์ของประจุในเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดจิวหลายชนิด ในการทดสอบ ได้ใช้เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ต่อพ่วงกับอุปกรณ์ขับไดโอดเปล่งแสง จึงสามารถวิเคราะห์ผลตอบสนองได้สะดวกและรวดเร็ว ในการมอดูเลตสัญญาณแสง ได้ใช้ความยาวคลื่น 405, 455 และ 660 นาโนเมตร ที่ระดับ 46% 10% และ 1% ตามลำดับ

งานวิจัยทั้งหมดวิเคราะห์ผลตอบสนองของกระแสแสง มีเพียง W. Liu, et al. เท่านั้น ที่ศึกษาผลตอบสนองของแรงดันแสงด้วย [53] การวิจัยส่วนใหญ่ใช้รูปแบบการสืบสวนสอบสวน

คือ ทดสอบก่อน แล้วจึงพรรณนาและอภิปรายผลตอบสนองเชิงซ้อนด้วยทฤษฎีวัสดุศาสตร์ – เคมีไฟฟ้า หรือการเชื่อมโยงจำนวนครั้งวงกลมกับจำนวนรอยต่อในเซลล์ ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะว่า นักวิจัยได้การศึกษา ออกแบบ และสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เหล่านั้นมาก่อน และหลายผลงานได้ตีพิมพ์ ก่อนหน้านี้แล้ว และในด้านการอธิบายผลทดสอบ P. M. DiCarmine and O. A. Semenikhin ได้ใช้ สมการเชิงซ้อนของกระแสแสงอธิบายผลตอบสนองของประจุพาหะ [96] ส่วน Kavasoglu, et al. ใช้สมการอธิบายลักษณะเชิงซ้อนของฟลักแสงที่ฉายและแสดงลักษณะผลตอบสนองของกระแส เชิงซ้อนที่จะเกิดขึ้น และเมื่อได้ทดสอบตัวอย่างแล้ว จึงพรรณนาและอภิปรายอีกครั้งหนึ่ง [90]

ตารางที่ 2.5 การวิเคราะห์ลักษณะพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยวิธีการมอดูเลตความเข้มแสง

ผู้วิจัย	วัตถุประสงค์	การทดสอบ	ผลการศึกษา
Rostalksi and Meissner [95]	ศึกษาการส่งผ่าน ประจุของเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดอินทรีย์	ไบอัสด้วยหลอดอาร์กซีนอน 75 วัตต์ และใช้โมโนโครเมเตอร์ที่ควบคุมการทดลอง และวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ อิมพีแดนส์	เปรียบเทียบโมเดลของ เซลล์แสงอาทิตย์ และพลวัตของ ค่ากระแสลัดวงจร แปรผันตาม ความยาวคลื่นแสง
DiCarmine and Semenikhin [96]	ศึกษากลไกและ จลนพลศาสตร์ ในเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Polybithiophene	วัสดุตัวอย่างถูกฉายแสงด้วยเลเซอร์ไดโอด (405 nm) อิมพัลส์จุดแสงขนาดเล็ก ความถี่ 0-6,259 เฮิร์ตซ์ ปริมาณแสง 5.8×10^7 โฟตอนต่อวินาที – ตารางเซนติเมตร บนพื้นที่วงกลม ขนาด 3 มิลลิเมตร	เซลล์ มีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจาก ความไม่สมดุลของโมบิลิตีของ อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดจากแสง และการเกิดสถานะรอยต่อ ที่หนาแน่น
Liu, et al. [53]	ศึกษาผลของความต้านทานอนุกรม ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดอินทรีย์	ทดสอบผลตอบสนองกระแสแสง และ แรงดันแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 0.25 ตารางเซนติเมตร ด้วยไดโอดเปล่งแสง (455nm) มอดูเลต ที่ 10% ช่วงความถี่ 0.1 – 3,000 เฮิร์ตซ์	ความต้านทานอนุกรมมีผลต่อ การส่งผ่านอิเล็กตรอนในภาวะ ลัดวงจร แต่ไม่มีผลต่อการรวมตัว กลับของประจุในภาวะเปิดวงจร
Kavasoglu, et al. [54]	ศึกษาการแยกและ ส่งผ่านประจุของ เซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดซิลิกอนและ ชนิดซีไอจีเอส	เซลล์ตัวอย่างขนาด 7.5 ตารางเซนติเมตร ถูกฉายแสงไบอัสและกระตุ้นด้วย ไดโอดเปล่งแสง (660nm) มอดูเลตที่ 1% ในช่วง 50-300 เคลวิน	(ก) อุณหภูมิของเซลล์ มีผลต่อ มุมเฟสและจำนวนของประจุที่ ส่งผ่านในเซลล์แสงอาทิตย์ (ข) เซลล์ชนิดซีไอจีเอสส่งผ่าน ประจุได้รวดเร็วกว่าเซลล์ซิลิกอน

2.3 แนวคิดใหม่ที่พัฒนาในวิทยานิพนธ์นี้

แนวคิดใหม่ที่พัฒนาในวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วย

ก) การพัลส์แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสงด้วยแรงดันสูง เพื่อใช้ศึกษาพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

ข) การสร้างแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมราคาถูก สำหรับศึกษาลักษณะกระแส-แรงดัน และพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ และ

ค) การวิเคราะห์ลักษณะพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์

2.3.1 การพัลส์ไดโอดเปล่งแสงด้วยแรงดันสูงสำหรับแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม

ไดโอดเปล่งแสงถูกใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงทดแทนหลอดไฟแควซอินอน เพื่อเพิ่มอายุและลดพลังงานของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม ปัจจุบันการพัฒนาแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1.4 ส่วนใหญ่เป็นเครื่องต้นแบบขนาดเล็ก เน้นผสมแสงให้ใกล้เคียงกับสเปกตรัมมาตรฐาน AM 1.5 แต่มีข้อจำกัดด้านความเข้มแสง ซึ่งได้ต่ำกว่า 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร

เพื่อแก้ปัญหาแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสงที่มีความเข้มแสงต่ำ การศึกษานี้ได้นำเทคนิคการพัลส์แรงดันสูงให้กับแผงไดโอดเปล่งแสง เนื่องจากความเข้มแสงมีค่าแปรผันกับพลังงานที่ป้อนเข้าไดโอดเปล่งแสง [62] การจ่ายแรงดันตรงค่าสูงจะเพิ่มความเข้มแสงจากไดโอด แต่จะทำให้อุณหภูมิเพิ่มตามไปด้วย ทำให้ประสิทธิภาพไดโอดลด และอายุการทำงานสั้น แต่การพัลส์แรงดันสูงในช่วงเวลาสั้น อุณหภูมิของไดโอดจึงไม่เพิ่มมาก

ค่าเฉลี่ยของกำลังงานของไดโอดเปล่งแสง มีค่าเท่ากับกำลังงานที่ป้อนเข้าต่อคาบเวลา เมื่อกำหนดกำลังงานที่ป้อนเข้าค่าหนึ่ง การพัลส์มีความกว้างน้อยกว่าคาบเวลา ($\tau_p \ll T$) จึงทำให้ขนาดของพัลส์มีค่าสูงได้เท่ากับอัตราส่วนคาบเวลาต่อความกว้างพัลส์ (T/τ_p) ซึ่งสูงกว่าการทำงานแบบต่อเนื่องเป็นอย่างมาก คาบเวลาของการพัลส์ช่วยทำให้ระบายความร้อนจากกำลังงานสูญเสียในความต้านทานส่วนต่าง ๆ ของไดโอด ออกได้ทันเวลา ก่อนการพัลส์ซ้ำอีกครั้งหนึ่ง

การควบคุมไดโอดเปล่งแสง จ่ายความเข้มได้สูงในอัตราที่คูณ ทำได้โดยการพัลส์แรงดันสูง กำลังงานเฉลี่ยของไดโอดเปล่งแสงถูกควบคุมให้มีค่าจำกัด เพื่อไม่ให้ไดโอดเปล่งแสงร้อนจนเสียหาย การพัลส์ด้วยแรงดันสูง ทำให้ไดโอดจ่ายความเข้มสูงในเวลาอันรวดเร็ว หลังจากนั้น

จึงสามารถระบายความร้อนตลอดช่วงเวลาก่อนการพัลส์ซ้ำ เทคนิคนี้ จึงสามารถช่วยให้ขั้วไดโอดเปล่งแสงให้มีความเข้มแสงสูงมากได้ถึงระดับ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร และใช้แก้ปัญหาความเข้มแสงที่มีค่าต่ำของแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสงได้

2.3.2 การสร้างแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมราคาถูกลง สำหรับศึกษาลักษณะกระแส-แรงดัน และพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์

การศึกษาพลวัต ของความต้านทานไดนามิกของเซลล์แสงอาทิตย์ ตาม [45-47] จำกัดเฉพาะในภาวะมืดและภาวะสว่างที่สเปกตรัมมาตรฐานชั้นคุณภาพ เอเอเอ เท่านั้น ซึ่งพบว่า

- : ความต้านทานไดนามิกในภาวะมืดและสว่างมีค่าต่างกัน และ
- : ความต้านทานไดนามิกแปรผันกับค่าความเข้มแสง

การศึกษาค่าความต้านทานไดนามิกภายในภายใต้แสงเดี่ยว (monochromatic wavelength) ของไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน เขียว หรือแดง และแสงหลายความยาวคลื่นของไดโอดเปล่งแสงสีขาว เป็นการศึกษาค่าความต้านทานไดนามิกภายในและพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ในเงื่อนไขใหม่ที่แตกต่างออกไป

นอกจากนี้ การใช้วิธีปรับแก้ค่าลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ไออีซี 60891 [63] มุ่งเน้นการปรับแก้ค่าผลการทดสอบที่กระทำนอกภาวะมาตรฐาน เมื่อค่าความเข้มแสงและอุณหภูมิแตกต่างจากภาวะทดสอบมาตรฐาน ซึ่งกำหนดให้ทดสอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงชั้นคุณภาพไม่ต่ำกว่า ซี การนำวิธีการปรับแก้ค่ากระแส-แรงดันตามมาตรฐานไปปรับใช้กับการทดสอบนอกภาวะมาตรฐาน ภายใต้แสงเดี่ยวของไดโอดเปล่งแสงสเปกตรัมต่อเนื่องของไดโอดเปล่งแสงสีขาว แสงทั้งสแตน – ฮาโลเจน และแสงผสมทั้งสแตน ฮาโลเจน – ไดโอดเปล่งแสง เป็นประเด็นที่ยังไม่มีการศึกษา

E. F. Schubert พบว่า อุณหภูมิมีผลต่อสเปกตรัมของไดโอดเปล่งแสงเพียงเล็กน้อย การควบคุมอุณหภูมิของไดโอดให้คงที่ สามารถคงสเปกตรัมของไดโอดเปล่งแสงได้ [62]

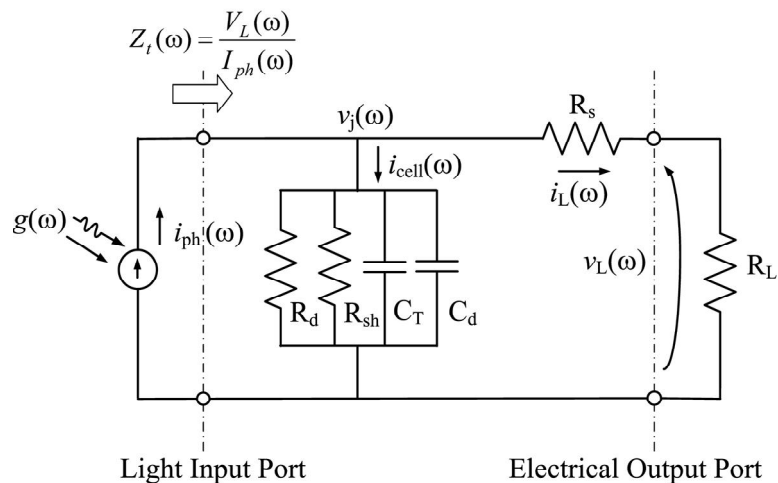
เมื่อพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมของไดโอดเปล่งแสงเทียบกับสเปกตรัมมาตรฐานที่อยู่ในช่วง 400-1,100 นาโนเมตร [97 –98] พบว่าอุณหภูมิมีผลต่อสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงน้อยมาก ดังนั้น จึงอนุมานได้ว่าแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชนิดไดโอดเปล่งแสงมีสเปกตรัมคงที่

ดังนั้น เราจึงสามารถตั้งสมมติฐานว่า “ความไม่สอดคล้องระหว่างสเปกตรัมมาตรฐานกับสเปกตรัมของไดโอดเปล่งแสงชนิดหนึ่งมีค่าคงที่ ไม่ขึ้นกับแรงดันที่จ่ายให้ไดโอด” และการปรับแก้ค่ากระแส-แรงดันของเซลล์ตามมาตรฐานไออีซี 60891 ย่อมนำไปปรับใช้กับการทดสอบด้วยแสงของไดโอดได้เช่นกัน

การพัฒนาแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมสเปกตรัมคงที่และมีราคาถูกลง จึงสามารถปรับแก้ค่าลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์นอกภาวะมาตรฐานไปสู่ภาวะมาตรฐานได้ เช่นเดียวกับการใช้แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียมชั้นคุณภาพมาตรฐาน ซึ่งมีอายุใช้งานสั้น และมีราคาแพง

2.3.3 การศึกษาพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์

การศึกษาพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์เป็นการศึกษาทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer function) อย่างหนึ่งของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงดันที่ขั้วจ่ายออกกับสัญญาณแสงที่ป้อนเข้าเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การวิเคราะห์ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ [101]

การศึกษาพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ ประกอบด้วย

- ก) การมอดูเลตความเข้มแสง
- ข) การวัดค่าทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์
- ค) การศึกษาทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีของเซลล์แสงอาทิตย์ และ
- ง) การหาค่าคาปาซิแตนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์จากทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์

2.3.3.1 การมอดูเลตความเข้มแสงสำหรับศึกษาพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์

การมอดูเลตความเข้มแสง เพื่อกระตุ้นเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบด้วย

ก) การไบอัสด้วยความเข้มแสงสูงในระดับปกติ จากหลอดทั้งสแตนดาโลเจน ควบคู่กับ

ข) การให้แสงสัญญาณไซน์ชอยด์อัมพลิจูดขนาดเล็กที่ความถี่ต่าง ๆ จากไดโอดเปล่งแสง ตกกระทบเซลล์ ($\phi_{diode}(\omega)$) แสงสัญญาณไซน์ชอยด์อัมพลิจูดเล็กสร้างขึ้นโดยการควบคุมขนาด และความถี่ของสัญญาณแรงดัน ($V_{diode}(\omega)$) และกระแสที่มอดูเลต ($I_{diode}(\omega)$) ให้กับ ไดโอดเปล่งแสง ตามสมการต่อไปนี้

$$V_{diode}(\omega) = V_m \sin(\omega t) \quad (2.34)$$

$$I_{diode}(\omega) = \frac{V_{diode}}{Z_{diode} \angle \varphi} = i_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.35)$$

$$g_{diode} = g_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.36)$$

สมการที่ (2.34) แสดงให้เห็นว่าแรงดันมอดูเลตเป็นสัญญาณไซน์ชอยด์ที่มีขนาดแรงดันสูงสุด V_m ส่วนสมการที่ (2.35) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไดโอดกับแรงดันมอดูเลต ซึ่งควบคุมโดย ค่าอิมพีแดนซ์ของไดโอดเปล่งแสง ($Z_{diode} \angle \varphi$) และ แสงสัญญาณไซน์ชอยด์ขนาดเล็กมีอัมพลิจูด เท่ากับ g_m และมีเฟสตรงเท่ากับ $(\omega t + \varphi)$ ซึ่งอินเฟสกับค่ากระแสของไดโอด ดังสมการที่ (2.36)

เมื่อรวมความเข้มแสงรูปคลื่นไซน์ชอยด์จากไดโอด ($g_m \sin(\omega t + \varphi)$) พร้อมกับความเข้มแสง กระแสตรงจากหลอดทั้งสแตนดาโลเจน (g) จะได้ความเข้มแสง ($g(t)$) ตามสมการ

$$g(t) = g + g_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.37)$$

เนื่องจากในเซลล์แสงอาทิตย์ ค่ากระแสแสง ($i_{ph}(t)$) แปรกับผลตอบสนองความเข้มแสงของเซลล์ แสงอาทิตย์ (Spectral response, SR) พื้นที่ของเซลล์แสงอาทิตย์ (A) และความเข้มแสง ($g_\phi(t)$) ส่วนแรงดันแสง ($v_{ph}(t)$) นั้น มีค่าเท่ากับผลคูณของกระแสแสง ($i_{ph}(t)$) กับค่า ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ (Z_t) ดังนั้นเมื่อมีแสงความเข้มตามสมการที่ (2.37) ตกกระทบเซลล์แล้ว มีค่ากระแสแสงและแรงดันแสงดังนี้

$$i_{ph} = SR \cdot A \cdot g \quad (2.38)$$

$$i_{ph}(t) = i + i_m \sin(\omega t + \varphi) \propto g_\phi(t) = SR \cdot A \cdot (g + g_m \sin \omega t + \varphi) \quad (2.39)$$

$$v_{ph}(t) = Z_t \angle \theta \cdot i_{ph}(t) = Z_t \angle \theta \cdot (i + i_m \sin(\omega t + \varphi)) = v + v_m \sin(\omega t + \varphi + \theta) \quad (2.40)$$

เมื่อฉายแสงกระแสตรงผสมกับกระแสไซน์ซอ (ที่ modulating signal ตามกำหนด) ให้ตกกระทบ เซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์จะมีกระแสแสงและแรงดันเกิดขึ้นในเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ความถี่เดียวกับ modulating signal เช่นกัน ถ้าเราวัดกระแสแสงและแรงดันเวลต์ จะสามารถหาทรานส์เฟอร์ อิมพีแดนส์ ซึ่งเป็นตัวแปรที่กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและไปสู่อำนาจแรงดัน โดยทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์นี้ ประกอบด้วยขนาด (magnitude) และเฟส(phase) ณ ความถี่นั้นๆ

2.3.3.2 การวัดค่าทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์ของเซลล์แสงอาทิตย์

ในทางปฏิบัติ ไม่สามารถวัดค่ากระแสแสงได้โดยตรง เพราะกระแสที่ไหลออกที่ขั้วเซลล์และสามารถวัดได้ เป็นผลต่างของกระแสแสงและกระแสไดโอด (ซึ่งไหลอยู่ภายในเซลล์) แต่สามารถประมาณค่าได้จากความเข้มแสงที่ตกกระทบเซลล์ และเมื่อวัดค่าแรงดันที่ขั้วของเซลล์ได้ก็จะสามารถประมาณค่าทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์ได้ดังต่อไปนี้

จากรูปที่ 2.5 เมื่อเซลล์ได้รับแสงกระแสตรงไปอัสจากหลอดทั้งสแตนด์บายและไดโอดเปล่งแสง บางส่วน (g) เซลล์แสงอาทิตย์มีค่ากระแสแสง (i_{ph}) เท่ากับผลรวมของกระแสในเซลล์ (i_{cell}) และกระแสโหลด (i_L) โดยที่ กระแสในเซลล์เป็นผลรวมของกระแสในไดโอด (i_d) และกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานขนาน (i_{sh}) ของเซลล์แสงอาทิตย์ และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความต้านทานภายในแต่ละตัว (ซึ่งหาค่าได้จากเส้นโค้งกระแส-แรงดัน) ของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังนี้

$$i_{ph} = i_{cell} + i_L = i_d + i_{sh} + i_L = \frac{v_j}{R_d} + \frac{v_j}{R_{sh}} + \left(\frac{v_j - v_L}{R_S} \right) \quad (2.41)$$

เมื่อควบคุมให้แสงไปอัสมีสเปกตรัมและขนาดคงที่ (g) จึงทำให้ค่ากระแสแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ มีค่าคงที่ทุกค่าแรงดันของจุดทำงาน ด้วย เช่น ในภาวะเปิดวงจร ภาวะลัดวงจร หรือเมื่อจ่ายกระแส โหลดด้วยค่าแรงดันต่าง ๆ เป็นต้น เพื่อประมาณค่ากระแสแสงและสอบเทียบค่ากระแสแสงกับไฟโอด ไดโอด จึงกำหนดให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานในภาวะลัดวงจร ซึ่งทำให้ค่าแรงดันโหลดมีค่าเท่ากับ ศูนย์ ($v_L = 0$) และค่าแรงดันในรอยต่อ (v_j) มีค่าเท่ากับผลคูณของความต้านทานอนุกรม (R_S) กับ กระแสลัดวงจร i_{sc} ($i_L = i_{sc}$) กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าดังต่อไปนี้

$$i_{ph} = \frac{R_s \cdot i_{sc}}{R_d} + \frac{R_s \cdot i_{sc}}{R_{sh}} + \left(\frac{R_s \cdot i_{sc}}{R_S} \right) = \left(\frac{R_S}{R_d} + \frac{R_S}{R_{sh}} + 1 \right) \cdot i_{sc} \quad (2.42)$$

สมการที่ (2.41) แสดงให้เห็นว่า ค่ากระแสแสง (i_{ph}) ของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถประมาณค่าได้จาก ค่ากระแสลัดวงจร และค่าความต้านทานภายในของเซลล์แสงอาทิตย์

ในภาวะแสงเดียวกัน ค่ากระแสลัดวงจรของโฟโตไดโอด มีค่าเท่ากับ

$$i_{sc-photo-diode} \approx i_{ph-photo-diode} = SR_{photo-diode} \cdot A_{photo-diode} \cdot g \quad (2.43)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง (g) กับค่ากระแสแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ (i_{ph}) ในสมการที่ (2.38) และระหว่างความเข้มแสง กับค่ากระแสลัดวงจรของโฟโตไดโอด ในสมการที่ (2.43) จึงสามารถสร้างสมการของการสอบเทียบค่ากระแสแสงของเซลล์แสงอาทิตย์และโฟโตไดโอด ได้ดังต่อไปนี้

$$g = \frac{i_{ph}}{SR \cdot A} \approx \frac{i_{sc-photo-diode}}{SR_{photo-diode} \cdot A_{photo-diode}} \quad (2.44)$$

$$i_{ph} \approx \left(\frac{SR \cdot A}{SR_{photo-diode} \cdot A_{photo-diode}} \right) \cdot i_{sc-photo-diode} \quad (2.45)$$

สมการที่ (2.45) แสดงให้เห็นว่า กระแสแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถประมาณค่าได้จาก ค่ากระแสลัดวงจรของโฟโตไดโอด ที่สอบเทียบด้วยความเข้มแสง g และมีค่าอัตราการประมาณค่า ขึ้นกับอัตราส่วนของผลตอบสนองของความยาวคลื่นและพื้นที่หน้าของเซลล์แสงอาทิตย์และโฟโตไดโอด

และ จากสมการที่ (2.42) และ (2.45) จึงสรุปความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ กับค่ากระแสลัดวงจรของโฟโตไดโอด ซึ่งทำการสอบเทียบในภาวะแสง g และเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในภาวะลัดวงจร ได้ดังนี้

$$i_{ph} = \left(\frac{R_s}{R_d} + \frac{R_s}{R_{sh}} + 1 \right) \cdot i_{sc} \approx \left(\frac{SR \cdot A}{SR_{photo-diode} \cdot A_{photo-diode}} \right) \cdot i_{sc-photo-diode} \quad (2.46)$$

ทรานส์เฟอริอิมพีแดนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ($Z_t(\omega)$) เป็นสัดส่วนระหว่างค่าแรงดันกระแสลัดที่โหลด ($v_L(\omega)$) กับค่ากระแสแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ตามความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$Z_t(\omega) = \frac{v_L \sin(\omega t + \varphi + \theta)}{i_{ph} \sin(\omega t + \varphi)} \quad (2.47)$$

ในทางปฏิบัติ เราสามารถวัดค่าแรงดันกระแสสลับที่โหลดของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้โดยตรงและวัดค่ากระแสแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยโฟโตไดโอดและสอบเทียบไปสู่ค่ากระแสแสงดังสมการที่ (2.46) ดังนั้น ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์จึงวัดค่าได้ดังนี้

$$Z_t(\omega) = \frac{v_L \sin(\omega t + \varphi + \theta)}{\left(\frac{SR \cdot A}{SR_{photo-diode} \cdot A_{photo-diode}} \right) \cdot i_{sc-photo-diode} \cdot \sin(\omega t + \varphi)} \quad (2.48)$$

เนื่องจาก สัดส่วนระหว่างผลคูณของผลตอบสนองความยาวคลื่น (SR) และพื้นที่ของเซลล์แสงอาทิตย์ และโฟโตไดโอด มีค่าคงที่ตลอดการทดสอบ จึงอาจลดรูปสมการลงเป็น

$$Z_t(\omega) = \frac{v_L \sin(\omega t + \varphi + \theta)}{n \cdot i_{sc-photo-diode} \cdot \sin(\omega t + \varphi)} \quad (2.49)$$

เมื่อ

$$n = \frac{SR \cdot A}{SR_{photo-diode} \cdot A_{photo-diode}} \quad (2.50)$$

และ ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ สมการที่ (2.49) อาจเขียนให้อยู่ในรูปโพลาร์ฟอร์มได้ดังนี้

$$Z_t(\omega) = \frac{V_L \angle(\varphi + \theta)(\omega)}{n \cdot I_{sc-photo-diode} \angle\varphi(\omega)} \quad (2.51)$$

2.3.3.3 ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีของเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจาก

ก) ความต้านทานไดนามิกภายในและทรานส์ชันคาปาซิแตนซ์มีค่าแปรกับค่าแรงดัน และ

ข) ดิฟฟิวชันคาปาซิแตนซ์มีค่าแปรตามค่าแรงดันและความถี่ของเซลล์แสงอาทิตย์

การวิเคราะห์ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปของพารามิเตอร์ไฟฟ้า สามารถช่วยอธิบายลักษณะพลวัตของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ดังต่อไปนี้

จากรูปที่ 2.5 ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนซ์ เป็นผลตอบสนองความถี่ของค่าแรงดันจากเซลล์ที่ตกคร่อม โหลด(เอาท์พุท)ต่อค่ากระแสแสง(อินพุท) สามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการของพารามิเตอร์เชิงซ้อน และความถี่สัญญาณดังนี้

$$Z_t(\omega) = \frac{V_L(\omega)}{I_{ph}(\omega)} \quad (2.52)$$

เมื่อ

$$V_L(\omega) = I_L(\omega) \cdot R_L \quad (2.53)$$

และ

$$I_{ph}(\omega) = I_{sh}(\omega) + I_L(\omega) \quad (2.54)$$

$$I_{ph}(\omega) = I_L(\omega) \cdot (R_s + R_L) \cdot \left(\frac{1}{R_p} + j\omega C_p \right) \quad (2.55)$$

$$I_{ph}(\omega) = I_L(\omega) \cdot (R_s + R_L) \cdot \left(\frac{1 + j\omega C_p R_p}{R_p} \right) + I_L(\omega) \quad (2.56)$$

แรงดันโพลด ($V_L(\omega)$) และกระแสแสง ($I_{ph}(\omega)$) ของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเขียนในเทอมของพารามิเตอร์และกระแสโพลด ($I_L(\omega)$) ซึ่งเป็นตัวแปรที่วัดหาค่าได้ เมื่อแทนสมการ (2.53) และ (2.56) ในสมการ (2.52) ทำให้ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์อยู่ในรูปของตัวแปรที่หาค่าได้ ดังนี้

$$Z_t(\omega) = \frac{I_L(\omega) \cdot R_L}{I_L(\omega) \cdot (R_s + R_L) \cdot \left(\frac{1 + j\omega C_p R_p}{R_p} \right) + I_L(\omega)} \quad (2.57)$$

เมื่อลดรูปสมการที่ 2.57 ทำให้ ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์ของเซลล์แสงอาทิตย์ เขียนอยู่ในรูปของพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าได้ ดังนี้

$$Z_t(\omega) = \frac{(R_L \cdot R_p) \cdot [(R_s + R_L + R_p) - j(\omega C_p R_p) \cdot (R_s + R_L)]}{[R_s + R_L + R_p]^2 + [(\omega C_p R_p) \cdot (R_s + R_L)]^2} \quad (2.58)$$

เมื่อความถี่เชิงมุมมีค่าต่ำมาก (เท่ากับศูนย์ $\omega = 0$)

$$Z_t(0) = \frac{(R_L \cdot R_p)}{[R_s + R_L + R_p]} \quad (2.59)$$

และเมื่อความถี่เชิงมุมมีค่าสูงมาก (เท่ากับอนันต์)

$$Z_t(\infty) = \frac{\infty}{\infty} = 0 \quad (2.60)$$

ตามที่กล่าวในหัวข้อ 2.2.3.2 การวิเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการมอดูเลตความเข้มแสงทั้งหมด ล้วนวิเคราะห์ผลตอบสนองของกระแสแสง มีเพียง W. Liu, et al. [53] เท่านั้น ที่วิเคราะห์ผลตอบสนองของแรงดันแสง (Intensity modulate photovoltage spectroscopy, IMVS) คล้ายกับการศึกษา^{นี้} ในการวิเคราะห์เซลล์ชนิดคายเซนซิไทซ์ของ W. Liu, et al. ใช้ช่วงเวลาเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Electron transit time) ในเซลล์ที่พัฒนาขึ้น และอายุอิเล็กตรอน (Electron life time) มาวิเคราะห์กระบวนการดิฟฟิวชันด้วยอิมพีแดนส์เนิร์นสต์ (Nernst impedance) แต่การศึกษานี้เป็นการวิเคราะห์ทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นมุมมองที่ต่างกัน

2.3.3.4 การวิเคราะห์ค่าคาปาซิแตนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์

การทดสอบลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในภาวะมืดและสว่าง ทำให้ทราบค่ากระแสแสง ความต้านทานอนุกรม ความต้านทานขนาน และความต้านทานไดนามิกภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ ยกเว้นค่าคาปาซิแตนซ์ แต่การศึกษาทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์ สามารถนำผลการทดสอบมาคำนวณหาค่าคาปาซิแตนซ์ในโดเมนความถี่ได้ ดังนี้

จากสมการที่ (2.58) สามารถแสดงความสัมพันธ์ของขนาด ของทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์ ตามทฤษฎีของปีทากอรัส ได้ดังนี้

$$|Z_t(\omega)|^2 = \left| \frac{(R_L \cdot R_p)(R_s + R_L + R_p)}{[R_s + R_L + R_p]^2 + [(\omega C_p R_p) \cdot (R_s + R_L)]^2} \right|^2 + \left| \frac{(R_L \cdot R_p)(\omega C_p R_p) \cdot (R_s + R_L)}{[R_s + R_L + R_p]^2 + [(\omega C_p R_p) \cdot (R_s + R_L)]^2} \right|^2 \quad (2.61)$$

เมื่อรวมพจน์ของค่าจริงกับค่าจินตภาพซึ่งเป็นเศษ ที่มีส่วนเท่ากัน จะได้

$$|Z_t(\omega)|^2 = \left| \frac{(R_L \cdot R_p)^2 (R_s + R_L + R_p)^2 + (R_L \cdot R_p)^2 [(\omega C_p R_p) \cdot (R_s + R_L)]^2}{\{[R_s + R_L + R_p]^2 + [(\omega C_p R_p) \cdot (R_s + R_L)]^2\}^2} \right| \quad (2.62)$$

จัดรูปสมการใหม่เป็น (แยกตัวคูณร่วม $(R_L \cdot R_p)^2$)

$$|Z_t(\omega)|^2 = \left(R_L \cdot R_p \right)^2 \cdot \left(\frac{(R_s + R_L + R_p)^2 + [(\omega C_p R_p) \cdot (R_s + R_L)]^2}{\{[R_s + R_L + R_p]^2 + [(\omega C_p R_p) \cdot (R_s + R_L)]^2\}^2} \right) \quad (2.63)$$

เศษส่วนทางขวามือของสมการที่ (2.63) สามารถตัดทอน และลดรูปสมการได้ดังนี้

$$|Z_t(\omega)|^2 = \left(R_L \cdot R_p \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{\{[R_s + R_L + R_p]^2 + [(\omega C_p R_p) \cdot (R_s + R_L)]^2\}} \right) \quad (2.64)$$

เมื่อจัดรูปสมการให้ ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า C_p อยู่ทางขวามือ จึงได้สมการเป็น

$$[R_s + R_L + R_p]^2 + [(\omega C_p R_p) \cdot (R_s + R_L)]^2 = \frac{(R_L \cdot R_p)^2}{|Z_t(\omega)|^2} \quad (2.65)$$

$$[(\omega C_p R_p) \cdot (R_s + R_L)]^2 = \frac{(R_L \cdot R_p)^2}{|Z_t(\omega)|^2} - [R_s + R_L + R_p]^2 \quad (2.66)$$

$$[(\omega C_p R_p) \cdot (R_s + R_L)] = \left[\frac{(R_L \cdot R_p)^2}{|Z_t(\omega)|^2} - [R_s + R_L + R_p]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.67)$$

ดังนั้น ค่าปาดซีแทนส์ของเซลล์แสงอาทิตย์จึงหาค่าได้จาก ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทรานส์เฟอร์ อิมพีแดนส์ของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังนี้

$$C_p = \frac{1}{(\omega \cdot R_p) \cdot (R_s + R_L)} \left[\frac{(R_L \cdot R_p)^2}{|Z_t(\omega)|^2} - [R_s + R_L + R_p]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.68)$$

การหาค่าปาดซีแทนส์จากทรานส์เฟอร์อิมพีแดนส์ซึ่งทดสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ลักษณะพลวัต ในภาวะสว่าง เป็นแนวทางใหม่ในการทดสอบหาค่าปาดซีแทนส์ของเซลล์แสงอาทิตย์