



บทความวิจัย

การวิเคราะห์ผลการทำงานของระบบป้องกันแรงดันเกินสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์บน ทุ่นลอยน้ำ

Performance analysis of surge protection systems for floating solar photovoltaic installations

สลิลทิพย์ สินธุสุนธิชาติ*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร แขวงหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

Saliltip Sinthusonthisat*

Department of Electrical Engineering, School of Electrical and Electronics Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok, 10530

* Corresponding author.

E-mail: saliltip@mut.ac.th; Telephone: 029883666

วันที่รับบทความ 31 สิงหาคม 2568; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 13 พฤศจิกายน 2568; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 12 ธันวาคม 2568

วันที่ตอบรับบทความ 19 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ผลการทำงานของระบบป้องกัน และลดทอนแรงดันเกินสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนทุ่นลอยน้ำ โดยสร้างต้นแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์สาธิตขนาด 1 kW จำนวน 2 ชุด โดยชุดที่ 1 ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบแยกแยะระบบ ชุดที่ 2 ติดตั้งบนทุ่นลอยน้ำในสระน้ำเพื่อการทดสอบระบบรวม ระบบป้องกันแรงดันเกินที่การออกแบบ และจัดสร้างใช้ป้องกันแรงดันเกินทั้งทางด้านระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และเพื่อยืนยันความสามารถของระบบป้องกันแรงดันเกินในการจำกัดแรงดัน รวมทั้งต้องการทดสอบความสามารถในการจำกัดแรงดันเกินของระบบป้องกันแรงดันเกินในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ จึงทำการออกแบบ และจัดสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารูปคลื่นผสมตามมาตรฐาน IEC61000-4-5 ผลการทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการและในสภาพแวดล้อมการใช้งานจริงแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ระบบที่ออกแบบสามารถจำกัดแรงดันเกินให้อยู่ต่ำกว่าค่าทนแรงดันของสายไฟฟ้า ขั้วต่อ และฉนวนที่ใช้ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนทุ่นลอยน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการศึกษานี้ยืนยันว่าระบบป้องกันแรงดันเกินที่ใช้งานมีความเหมาะสม น่าเชื่อถือ และสามารถนำไปใช้งานได้จริงภายใต้สภาวะการใช้งานที่กำหนด

คำสำคัญ

ระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนทุ่นลอยน้ำ ระบบป้องกันฟ้าผ่า การป้องกันแรงดันเกิน เครื่องกำเนิดไฟฟ้ารูปคลื่นผสม ตัวกรองความถี่สูง

Abstract

This paper presents performance analysis of surge protection system for floating solar photovoltaic (PV) installations. The prototype of PV system of 1 kW was designed and implemented in two sets for practical testing. The first set was tested in a laboratory environment for isolated system evaluation, while the second set was installed on floating platforms in a water reservoir for integrated system testing. The proposed surge protection system was designed to provide overvoltage suppression for both direct current (DC) and alternating current (AC) circuits. To validate its effectiveness, a combination wave generator was designed and constructed in accordance with IEC 61000-4-5 standards, enabling standardized surge tests in low-voltage electrical networks. The experimental results from both laboratory and field

environments confirm that the designed protection scheme effectively limits overvoltage magnitudes below the withstand levels of cables, connectors, and insulators employed in floating solar PV systems. The findings demonstrate that the performance of the protection system is technically feasible, reliable, and well-suited for practical deployment under operating conditions.

Keywords

floating solar photovoltaic system; lightning protection system; surge protection system; combination wave generator; high-frequency filter

1. บทนำ

เนื่องจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยมีความต้องการใช้ประโยชน์จากพื้นที่ผิวน้ำตามเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำของการไฟฟ้าฯ ที่มีอยู่มาติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อลดข้อจำกัดด้านพื้นที่ใช้งาน และช่วยลดอัตราการระเหยของน้ำในอ่างเก็บน้ำ รวมทั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ลอยน้ำสามารถติดตั้งร่วมกับโรงไฟฟ้าพลังน้ำ (Hydro-Solar Hybrid System) โดยใช้โครงสร้างพื้นฐานด้านสายส่งไฟฟ้าที่มีอยู่แล้วร่วมกันได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร อย่างไรก็ตามระบบเซลล์แสงอาทิตย์ลอยน้ำยังมีความท้าทายเฉพาะทางด้านไฟฟ้าและสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะปัญหาการเกิดแรงดันกระชาก (Surge) และสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [1] ซึ่งมีความสำคัญเป็นพิเศษในพื้นที่ที่มีความหนาแน่นการเกิดฟ้าแลบฟ้าผ่าสูง เช่น ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ รวมถึงประเทศไทย สถานการณ์ดังกล่าวทำให้การออกแบบระบบป้องกันแรงดันเกินที่มีประสิทธิภาพเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อคงความเชื่อถือได้ของระบบ และความมั่นคงในการใช้งานระยะยาว

ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ลอยน้ำเป็นระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนทุ่นลอยน้ำ วางอยู่บนผิวน้ำที่เปิดโล่ง ไม่มีสิ่งบดบัง และมีโครงสร้างลอยน้ำที่เป็นตัวนำไฟฟ้า ดังนั้นความปลอดภัยทางไฟฟ้า และโครงสร้างสร้างลอยน้ำจึงมีความเสี่ยงฟ้าผ่าสูง การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า (Lightning protection system) จึงมีความซับซ้อน และด้วยวิธีมาตรฐานบนบกไม่สามารถนำมาใช้โดยตรงได้ จึงต้องดัดแปลงและออกแบบให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของแหล่งน้ำ และภูมิอากาศของแต่ละประเทศ [2-4]

อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน (Surge Protection Devices: SPDs) เป็นองค์ประกอบสำคัญในการลดทอนแรงดันชั่วขณะอันเกิดจากฟ้าผ่า การสวิตช์อุปกรณ์ไฟฟ้า รวมถึงการเหนี่ยวนำแบบแม่เหล็กไฟฟ้า แม้ว่าหลักการออกแบบ SPDs สำหรับ

ระบบบนพื้นดินมีการศึกษาอย่างกว้างขวางแล้ว แต่ระบบลอยน้ำยังคงต้องมีการพิจารณาเพิ่มเติม เนื่องจากมีลักษณะเฉพาะ ได้แก่ โครงสร้างที่ลอยน้ำ ความชื้นสะสมที่สูง ความไม่แน่นอนของศักย์กราวด์ และระยะสายเคเบิลยาวระหว่างแผงบนทุ่นลอยน้ำ และอินเวอร์เตอร์ที่ติดตั้งบนฝั่ง ซึ่งก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อแรงดันเกินแบบโหมตรงรวม (Common-mode) และโหมดต่างศักย์ (Differential-mode) มากขึ้น [5-7]

ระบบป้องกันฟ้าผ่าประกอบด้วย ระบบตัวนำล่อฟ้า ระบบตัวนำลงสู่ดิน และระบบรากสายดิน แต่เนื่องจากอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินของระบบแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับระดับความละเอียดของการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้า และความต้องการป้องกัน จาก [2-3,7-9] มีข้อเสนอแนะว่าการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ลอยน้ำนั้น ควรติดตั้งที่จุดเข้า array (Array combiner), ที่ด้านเข้า inverter (DC side of inverter) และที่ด้านออกของ inverter (AC distribution)

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ผลการทำงานระบบป้องกันแรงดันเกิน โดยเน้นความแตกต่างด้านพฤติกรรมการแพร่กระจายของแรงดันกระชาก เพื่อป้องกัน และลดทอนแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสูงผิดปกติชั่วขณะ ซึ่งประกอบด้วย อุปกรณ์ และโครงข่ายไฟฟ้าที่ทำหน้าที่จำกัดค่าของแรงดันเกินให้อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าค่าความทนทานของฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้า ฉนวนสายเคเบิล และขั้วต่อทางไฟฟ้า ระบบป้องกันแรงดันเกินซึ่งประกอบด้วยกับดักป้องกันแรงดันเกิน (Surge suppression device) และโครงข่ายตัวกรองความถี่สูง (Network back filter) รวมถึงนำเสนอกรณีศึกษาโดยใช้ระบบทดสอบขนาดพิกัด 1 kWp เพื่อแสดงผลการทดสอบการลดทอนแรงดันเกินในสภาวะห้องปฏิบัติการ และภาคสนามจริง

2. โครงสร้างระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนทุ่นลอยน้ำ

ระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนทุ่นลอยน้ำที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้มี 2 ชุด แต่ละชุดมีขนาดพิกัด 1 kWp โดยแต่ละชุดนำมาใช้งานดังนี้ คือ

ชุดที่ 1 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 kWp จัดวางบนทุ่นลอยน้ำเป็นระบบสมบูรณ์พร้อมทดสอบกลางแจ้ง

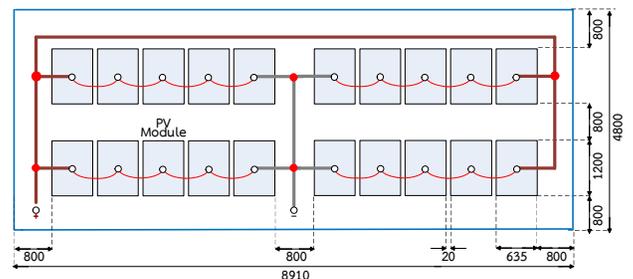
ชุดที่ 2 ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 1 kWp ใช้เพื่อถอดประกอบทำการทดสอบแบบแยกระบบ และทดสอบระบบโดยรวม สำหรับใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การจัดวางระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 1 kWp ที่ออกแบบเป็นดังรูปที่ 1 จากรูปจะเห็นว่าระบบประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 20 แผง (PV Module) โดยจัดวางเป็นแบบ 5 strings 4 arrays ระยะห่างการจัดวาง และขนาดที่แสดงในรูปเป็นขนาดในหน่วยมิลลิเมตร แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Amorphous-Si Thin Film รุ่น BS-50 แต่ละแผงมีพิกัด 50 Wp, V_{max} 70.9 V, I_{max} 0.7 A, V_{oc} 93.4 V, I_{sc} 0.76 A พื้นที่ใต้เซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชุดเป็นพื้นที่ว่างเปล่าไม่มีทุ่นลอยน้ำ เส้นสีแดงคือสายไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ไม่เกี่ยวข้องกับขนาดพื้นที่ของการออกแบบทุ่น ส่วนเส้นสีฟ้า คือความกว้างยาวของทุ่นทั้งหมด โดยออกแบบให้มีช่องว่าง 800 mm. ซึ่งเป็นระยะของทางเดิน โครงเหล็กสำหรับวางแผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละวงจร (1 array) มีรายละเอียดและลักษณะเป็นดังรูปที่ 2

ในส่วนของทุ่นลอยน้ำที่ใช้วางระบบเซลล์แสงอาทิตย์เป็นทุ่นพลาสติกชนิด HDPE ขนาด 50 x 50 x 40 cm จำนวน 48 ตัว โครงเหล็กตัว C ขนาด 3.2 มม. เพลทพลาสติกกันลื่น ขนาด 45 ตรม. โครงสร้างของโครงเหล็กชุบกลวาทนสนิมพร้อมอุปกรณ์ยึดมาตรฐานของชุดรองรับของระบบไฟฟ้า และระบบรองรับน้ำหนักเพื่อใช้สำหรับวางเป็นดังรูปที่ 3 ในการออกแบบกำหนดให้มุมการวางแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีขนาด 15+1 องศา และรับแรงต้านลมได้ขนาด 61.4 km/hr เลือกใช้อินเวอร์เตอร์รุ่น JSI-1500TL อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ถูกติดตั้งภายในตู้กันน้ำ ซึ่งมีดัชนีการป้องกันระดับ IP65

3. ระบบป้องกันฟ้าผ่า และลดทอนแรงดันเกิน

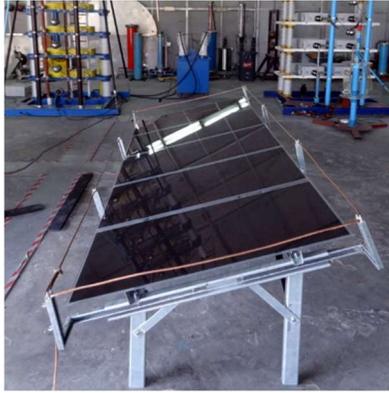
เนื่องจากการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนทุ่นลอยน้ำนั้น จำเป็นต้องมีระบบป้องกันฟ้าผ่าเนื่องจากการติดตั้งในที่โล่งแจ้งเหนือผิวน้ำ ดังนั้นจึงมีโอกาสที่จะถูกฟ้าผ่าโดยตรงและโดยอ้อมจากแรงดันเหนี่ยวนำของกระแสฟ้าผ่า ซึ่งอาจทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ และอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่อกับระบบไฟฟ้าเดียวกันเกิดความเสียหายจากแรงดันเกิน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือความร้อนที่เกิดจากกระแสฟ้าผ่า ตลอดจนเกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าได้แก่ ระบบตัวนำล่อฟ้า ระบบตัวนำลงสู่ดิน และระบบกราวด์ดิน และเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น จำเป็นต้องติดตั้งระบบป้องกันแรงดันเกิน ซึ่งประกอบด้วยกับดักป้องกันแรงดันเกิน (Surge suppression device) และโครงข่ายตัวกรองความถี่สูง (Network back filter) ที่ด้านหลังของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน ทั้งในส่วนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงก่อนเข้าอินเวอร์เตอร์ และส่วนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับหลังออกจากอินเวอร์เตอร์ก่อนเข้าระบบไฟฟ้าที่จ่ายไปยังโหลดทางไฟฟ้า ที่จำเป็นต้องติดตั้งทั้งทางด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่แรงดันเกินเล็กรจะเข้ามาได้จากทั้งสองทิศทาง ระบบป้องกันแรงดันเกินนี้จะทำการป้องกันแรงดันเกินที่เกิดขึ้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์ และโหลดทางไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับระบบเซลล์แสงอาทิตย์นี้



รูปที่ 1 การจัดวางแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนทุ่นลอยน้ำ



(ก) ภาพด้านหน้า



(ข) ภาพด้านข้าง

รูปที่ 2 โครงสร้างของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 1 array



รูปที่ 3 ทุ่นลอยน้ำพร้อมแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และทางเดิน

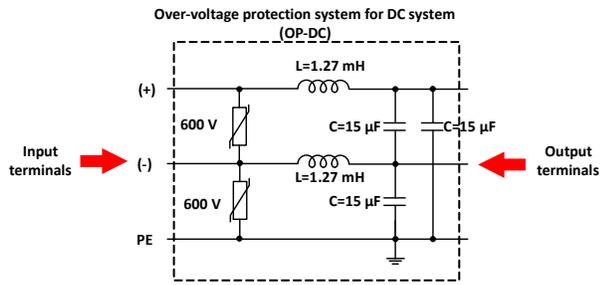
ระบบป้องกันแรงดันเกินของระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะยึดถือตามมาตรฐาน IEC 61000-4-5 [10] มาตรฐานที่เน้นการทดสอบภูมิคุ้มกันของอุปกรณ์ ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการกำหนดคุณสมบัติของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน (Surge Protective Devices - SPDs) สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้กับระบบแรงดันกระแสสลับและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และมาตรฐาน IEC 61643-11 [11] เป็นมาตรฐานหลักที่กำหนดข้อกำหนดและการทดสอบสำหรับอุปกรณ์ป้องกันไฟกระชาก (Surge Protective Devices - SPDs) ที่ใช้ในการป้องกันระบบไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

มาตรฐาน IEC 61643-11 ได้แบ่งระดับชั้น (Class) ของกั๊บดักแรงดันเกิน และเทคนิคการทดสอบเป็น 3 ระดับ เนื่องจากการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์นี้ มีระบบป้องกันฟ้าผ่าที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งได้ทำการทดสอบยืนยันความสามารถในการป้องกันฟ้าผ่าโดยตรงเข้ากับระบบแล้ว โดยระบบป้องกันฟ้าผ่านี้สามารถป้องกันการเกิดฟ้าผ่าโดยตรงเข้ากับระบบได้สูงกว่าที่มาตรฐานกำหนดอย่างมาก ดังนั้นจึงเลือกใช้กั๊บดักแรงดันเกินระดับชั้นที่ 3 ก็เพียงพอในการป้องกันแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในระบบ อ้างอิงตาม IEC 61000-4-5 ระดับแรงดันเกินกรณีเปิดวงจรค่ายอดสูงสุดอยู่ที่ 4 kV กระแสลัดวงจรค่ายอด 2 kA เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินของงานวิจัยนี้ จึงทำการทดสอบที่ระดับแรงดันเกินกรณีเปิดวงจรค่ายอดที่สูงกว่ามาตรฐาน 250% นั่นคือแรงดันเกินค่ายอดสูงสุดที่ 10 kV และกระแสลัดวงจรค่ายอด 5 kA

3.1 ระบบป้องกันแรงดันเกินที่ใช้

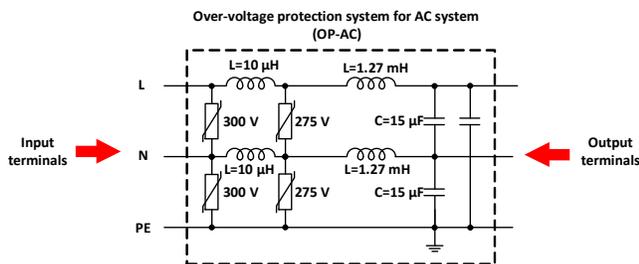
ระบบป้องกันแรงดันเกินประกอบด้วยระบบป้องกันแรงดันเกินสำหรับระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Over-voltage protection system for DC systems; OP-DC) และระบบป้องกันแรงดันเกินสำหรับระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (Over-voltage protection system for AC systems; OP-AC)

สำหรับระบบป้องกันแรงดันเกินด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงประกอบด้วย กั๊บดักป้องกันแรงดันเกินพิกัดทำงานที่ค่าแรงดันไฟฟ้า 600 Vdc ซึ่งสูงกว่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุด ที่สร้างจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ และโครงข่ายตัวกรองความถี่สูงที่มีค่าความถี่ตัด (Cut-off frequency) ที่ประมาณ 1 kHz ดังรูปที่ 4 จากรูปกั๊บดักแรงดันเกินถูกใช้ทำหน้าที่จำกัดแรงดันเกิน เมื่อมีแรงดันเกินเสิร์จเข้ามาให้อยู่ในระดับที่โครงข่ายตัวกรองความถี่สูงรับได้ โดยไม่เกิดความเสียหาย จากนั้นตัวกรองจะลดทอนแรงดันไฟฟ้าให้มีขนาดลดลงสำหรับระบบป้องกันแรงดันเกินนี้ทั้งในส่วนของกั๊บดักแรงดันเกิน และโครงข่ายตัวกรองความถี่สูงจะยอมให้ความถี่ย่านส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านไปยังโหลดได้โดยไม่เกิดการลดทอน



รูปที่ 4 ระบบป้องกันแรงดันเกินด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ส่วนระบบป้องกันแรงดันเกินด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ประกอบด้วยกับดักป้องกันแรงดันเกิน 2 ตัว พิกัดทำงานที่ $300 V_{rms}$ และ $275 V_{rms}$ ต่อขึ้นด้วยตัวเหนี่ยวนำขนาด $10 \mu H$ ซึ่งสูงกว่าขนาดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสูงสุดที่อินเวอร์เตอร์ส่งไปยังกริด และโครงข่ายตัวกรองความถี่สูงที่มีค่าความถี่ตัดที่ประมาณ 1 kHz ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ระบบป้องกันแรงดันเกินด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

3.2 การออกแบบ และสร้างเครื่องกำเนิดรูปคลื่นผสม

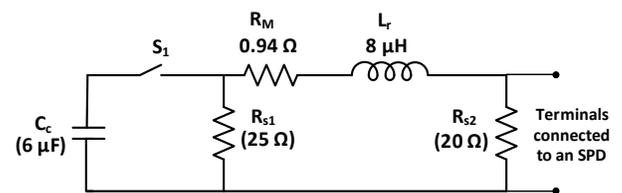
การทดสอบความสามารถการจำกัดแรงดันเกินของระบบป้องกันแรงดันเกินในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ ตามมาตรฐาน IEC 61000-4-5 นั้นจะทดสอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารูปคลื่นผสม (Combination wave) ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้สามารถสร้างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า สัญญาณแรงดัน $1.2/50 \mu s$ ขณะเปิดวงจร และสามารถสร้างรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ สัญญาณกระแส $8/20 \mu s$ ขณะระบบป้องกันแรงดันเกินลัดวงจร โดยมีค่าอัตราส่วนแรงดันค่ายอดต่อกระแสค่ายอดเป็น 2 เทห์หรือ 2Ω

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ารูปคลื่นผสมที่ออกแบบ และจัดสร้างขึ้นสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้า หรือกระแสไฟฟ้าตามเฟสของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับตามที่ต้องการได้ ในกรณีการทดสอบกับระบบป้องกันแรงดันเกินสำหรับระบบแรงดันไฟฟ้า

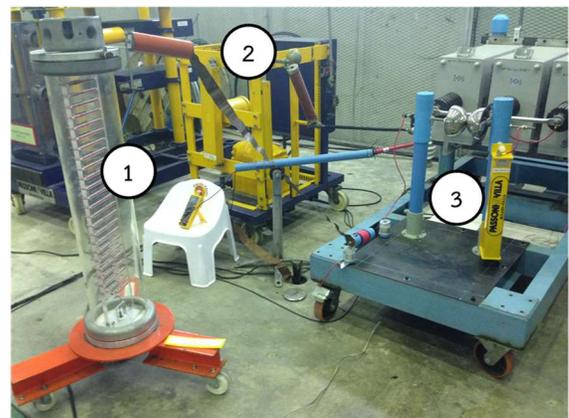
กระแสสลับ ตามมาตรฐานพิกัดความคงทนต่อแรงดันเกินสูงสุดจะทดสอบที่แรงดันไฟฟ้า 4 kV และกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ 2 kA สำหรับงานวิจัยนี้ทำการทดสอบที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 6 kV และกระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่ 3 kA ซึ่งสูงกว่าที่มาตรฐานกำหนดเพื่อยืนยันความสามารถของระบบป้องกันแรงดันเกินในการจำกัดแรงดัน และทำการทดสอบความสามารถการจำกัดแรงดันเกินของระบบที่สร้างขึ้นด้วยรูปคลื่นผสมที่ระดับแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร 10 kV และกระแสไฟฟ้าลัดวงจร 5 kA วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารูปคลื่นผสมเป็นดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) ส่วนในรูปที่ 6 (ข) เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารูปคลื่นผสมที่ประกอบสร้างพร้อมระบบวัด หมายเลข 1 คือโวลต์เตจดีไวเดอร์สำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูง หมายเลข 2 คือชุดหม้อแปลงไฟฟ้าอัดประจุ และ หมายเลข 3 คือเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารูปคลื่นผสมที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้น

4. ผลการทดสอบ และวิเคราะห์ผล

ในการติดตั้งระบบแรงดันเกินกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการทดสอบความสามารถในการจำกัดแรงดันเกิน ในกรณีที่ไม่วัดเข้ากับระบบเซลล์แสงอาทิตย์



(ก) วงจรสมมูล



(ข) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ารูปคลื่นผสมพร้อมระบบวัด

รูปที่ 6 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ารูปคลื่นผสม (Combination wave generator)

ก่อนที่จะนำไปติดตั้งใช้งานจริงเพื่อไม่ให้เป็นระบบเกิดการผิดพลาดโดยไม่ทราบสาเหตุ ดังนั้นจึงแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ระบบ คือทดสอบแยกระบบ ซึ่งเป็นการทดสอบระบบป้องกันแรงดันเกินขณะไม่ต่อเข้ากับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ และทดสอบระบบรวมซึ่งเป็นการทดสอบระบบป้องกันแรงดันเกินขณะต่อเข้ากับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริง

4.1 การทดสอบแยกระบบ

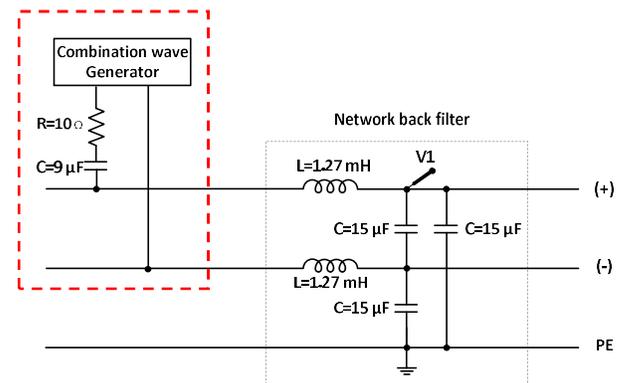
การทดสอบแยกระบบประกอบด้วย การทดสอบความสามารถในการจำกัดแรงดันเกินของระบบป้องกันแรงดันเกินสำหรับระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และระบบป้องกันแรงดันเกินสำหรับระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ขณะที่ไม่มีแรงดันไฟฟ้าของระบบจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปยังระบบป้องกันแรงดันเกิน โดยทำการทดสอบ 2 กรณี

กรณีที่ 1 ทดสอบความสามารถในการลดทอนแรงดันเกินของโครงข่ายตัวกรองความถี่สูงอย่างเดียว กับดักแรงดันเกินไม่ได้ต่อเข้ากับระบบ

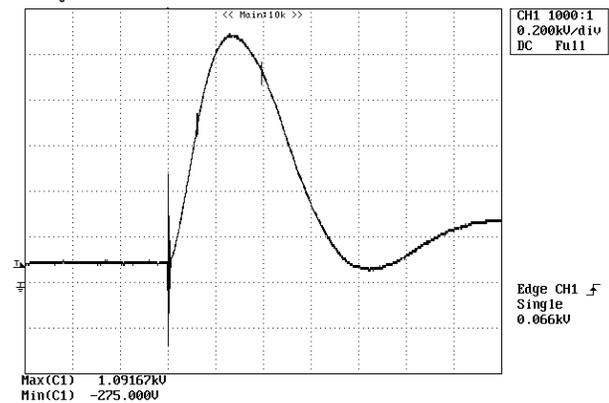
กรณีที่ 2 ทดสอบความสามารถในการลดทอนแรงดันเกินของโครงข่ายตัวกรองความถี่สูงร่วมกับกับดักแรงดันเกิน

กรณีที่ 1 การทดสอบความสามารถในการลดทอนแรงดันเกินของโครงข่ายตัวกรองความถี่สูงอย่างเดียว ไม่ได้ต่อกับดักแรงดันเกินเข้ากับระบบ การทดสอบนี้มีความจำเป็นอย่างมากเนื่องจากกับดักแรงดันเกินมีอายุการใช้งานขึ้นอยู่กับความถี่ของการเกิดแรงดันเกินที่ทำให้กับดักแรงดันเกินทำงาน ซึ่งเป็นไปได้ที่กับดักแรงดันเกินจะชำรุด และไม่ทำการจำกัดแรงดันไฟฟ้า ทำให้ระบบป้องกันแรงดันเกินเหลือเพียงโครงข่ายตัวกรองความถี่สูงเพียงอย่างเดียว ในการทดสอบทำการต่อเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปผสม (Combination Wave Generator) 2 รูปแบบ ดังนี้คือ รูปแบบที่ 1 ต่อเข้าที่ขั้วบวก และขั้วลบของโครงข่ายตัวกรองความถี่สูงดังรูปที่ 7 วัดแรงดันไฟฟ้าคร่อมขั้วบวก (+) และลบ (-) (V1) ด้วยโพรบวัดแรงดันไฟฟ้า อัตราส่วน 1000:1 ได้ผลการลดทอนแรงดันไฟฟ้าของโครงข่ายตัวกรองความถี่สูง ดังแสดงในรูปที่ 8 รูปแบบที่ 2 ต่อเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปผสมเข้าที่ขั้วบวก และขั้วกราวด์ (PE) ของโครงข่ายตัวกรองความถี่ตามรูปที่ 9 วัดแรงดันไฟฟ้าคร่อมขั้วแรงดันบวก (+) และลบ (PE) (V1) ด้วย

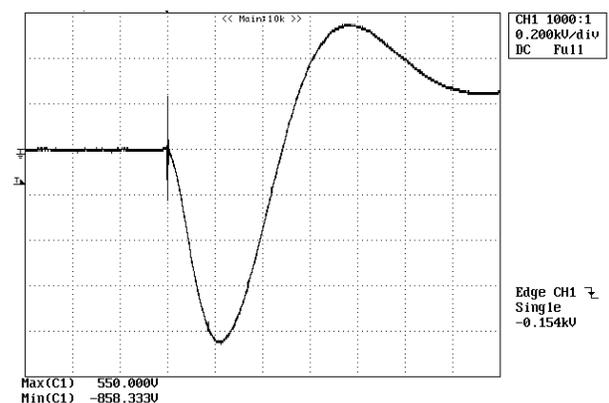
โพรบวัดแรงดันไฟฟ้า อัตราส่วน 1000:1 ได้ผลการลดทอนแรงดันไฟฟ้าของโครงข่ายตัวกรองความถี่สูงดังรูปที่ 10



รูปที่ 7 วงจรทดสอบการลดทอนแรงดันไฟฟ้าของโครงข่ายตัวกรองความถี่สูง

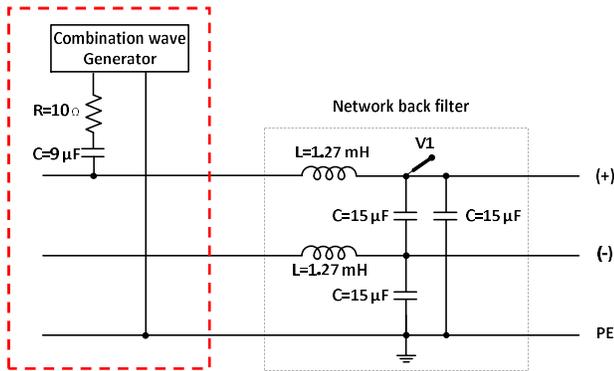


(ก) แรงดันไฟฟ้าอัดประจุ +10.7 kV

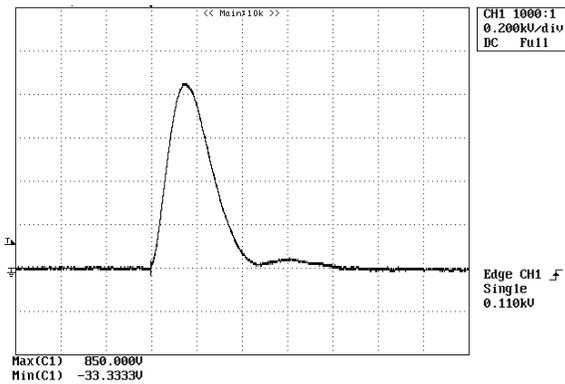


(ข) แรงดันไฟฟ้าอัดประจุ -10.7 kV

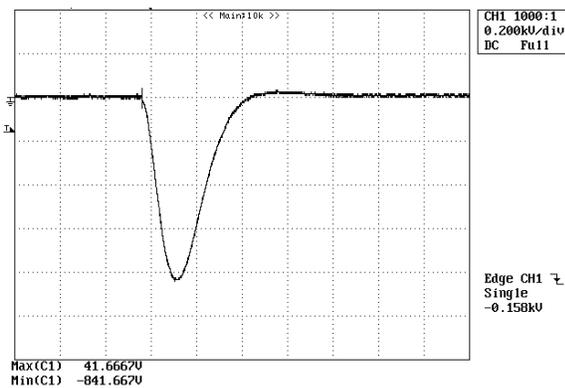
รูปที่ 8 การลดทอนแรงดันไฟฟ้าของโครงข่ายตัวกรองความถี่สูง



รูปที่ 9 วงจรทดสอบการลดทอนแรงดันไฟฟ้าของโครงข่ายตัวกรองความถี่สูง



(ก) แรงดันไฟฟ้าอัดประจุ +10.7 kV



(ข) แรงดันไฟฟ้าอัดประจุ -10.7 kV

รูปที่ 10 การลดทอนแรงดันไฟฟ้าของโครงข่ายตัวกรองความถี่สูง

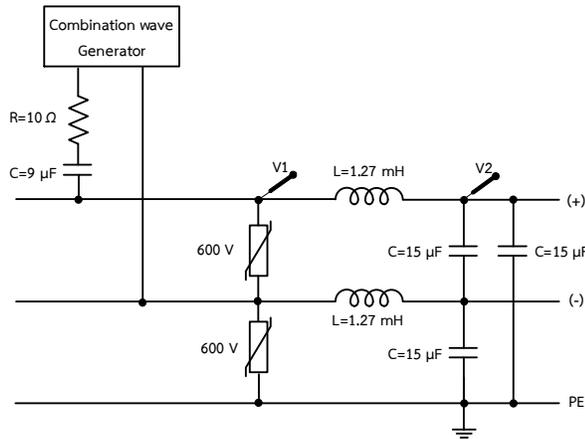
จากผลการทดสอบในรูปที่ 8 และ รูปที่ 10 จะเห็นว่าโครงข่ายตัวกรองความถี่สูงสามารถลดทอนแรงดันไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี โดยแรงดันไฟฟ้าคายยอดสูงสุดในทุกกรณีมีค่าไม่เกิน 1.1 kV ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ฉนวนของสายเคเบิล และขั้วต่อทางไฟฟ้าที่สามารถทนแรงดันเกินอิมพัลส์ฟ้าผ่าได้มากกว่า 10 kV จากผลการทดสอบพบว่าโครงข่ายตัวกรองความถี่สูงที่ประกอบ

สร้างสามารถทนแรงดันเกินอิมพัลส์ได้สูงกว่า 10 kV และสามารถลดทอนแรงดันเกินให้อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าความคงทนอยู่ได้ของฉนวนในระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนทุ่นลอยน้ำ โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งกับดักแรงดันเกิน อย่างไรก็ตามในการติดตั้งกับดักแรงดันเกินเข้ากับระบบป้องกันแรงดันเกินจะเพิ่มประสิทธิภาพ และอายุการใช้งานของระบบป้องกันแรงดันเกิน

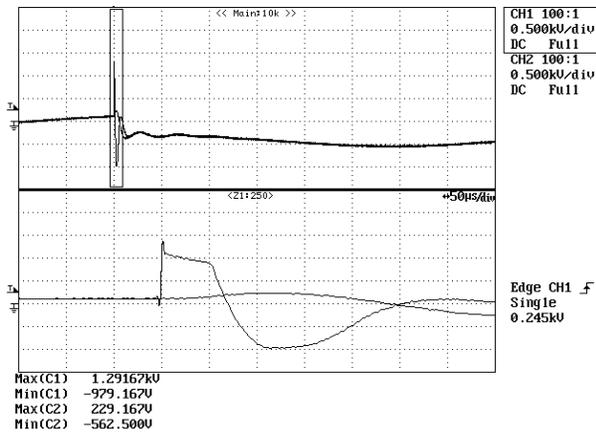
กรณีที่ 2 การทดสอบความสามารถในการลดทอนแรงดันเกินของโครงข่ายตัวกรองความถี่สูงร่วมกับกับดักแรงดันเกิน ทำการทดสอบระบบป้องกันแรงดันเกินสำหรับระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยต่อเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปผสมเข้าที่ขั้วบวกและขั้วลบของระบบป้องกันแรงดันเกิน ตามรูปที่ 11 วัดแรงดันไฟฟ้าคร่อมกับดักแรงดันเกิน (V1) และคร่อมขั้วบวก (+) และลบ (-) (V2) ด้วยโพรบวัดแรงดันไฟฟ้า อัตราส่วน 1000:1 ผลการจำกัดแรงดันไฟฟ้าของกับดักแรงดันเกิน และของระบบกรองความถี่ แสดงดังรูปที่ 12 จากรูปจะเห็นว่ากับดักแรงดันเกินสามารถจำกัดแรงดันไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี โดยค่ายอดสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าในทุกกรณีมีค่าไม่เกิน 1.3 kV และผลการลดทอนแรงดันเกินของระบบกรองความถี่สูงสามารถลดแรงดันเกินให้มีค่ายอดสูงสุดในทุกกรณีไม่เกิน 600 V ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าที่ฉนวนของสายเคเบิล และขั้วต่อทางไฟฟ้าที่สามารถทนแรงดันเกินอิมพัลส์ฟ้าผ่าได้เกิน 10 kV

การทดสอบระบบป้องกันแรงดันเกินสำหรับระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับนั้น ต่อเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารูปผสมเข้าที่ขั้วมีแรงดันไฟฟ้า (L) กับขั้วนิวทรัล (N) ของระบบป้องกันแรงดันเกิน ดังแสดงในรูปที่ 13 วัดแรงดันไฟฟ้าคร่อมกับดักแรงดันเกิน (V1) และคร่อมขั้วมีแรงดันไฟฟ้า (L) กับขั้วนิวทรัล (N) ด้วยโพรบวัดแรงดันไฟฟ้าที่มีอัตราส่วน 100:1 ผลการจำกัดแรงดันไฟฟ้าของกับดักแรงดันเกิน และของระบบกรองความถี่เป็นดังแสดงในรูปที่ 14

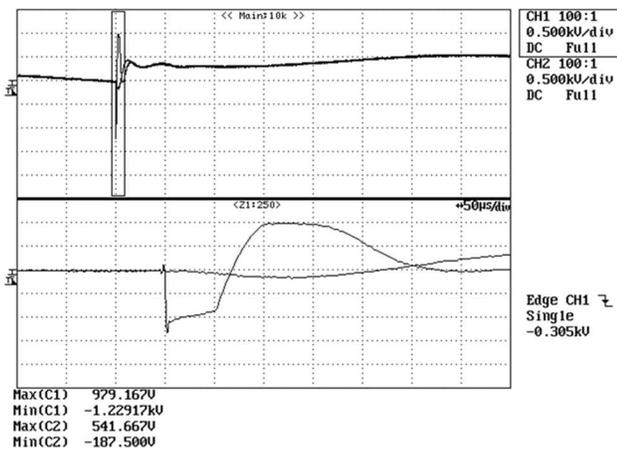
จากผลการทดสอบในรูปที่ 12 และ รูปที่ 14 จะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่ากับดักแรงดันเกินสามารถจำกัดแรงดันไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี โดยค่ายอดสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าในทุกกรณีมีค่าไม่เกิน 800 V และผลการลดทอนแรงดันเกินของระบบกรองความถี่สูงสามารถลดแรงดันเกินให้มีค่ายอดสูงสุดในทุกกรณีไม่เกิน 500 V ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าที่ฉนวนของสายเคเบิล และขั้วต่อทางไฟฟ้าที่สามารถทนแรงดันเกินอิมพัลส์ได้สูงกว่า 10 kV เป็นอย่างมาก



รูปที่ 11 วงจรทดสอบระบบป้องกันแรงดันเกินสำหรับระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

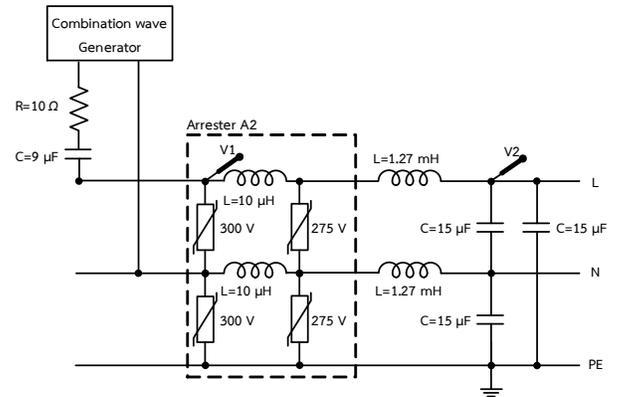


(ก) แรงดันไฟฟ้าอัดประจุ +10.7 kV

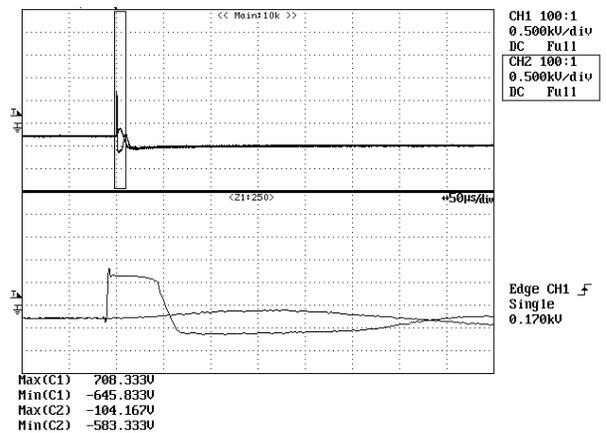


(ข) แรงดันไฟฟ้าอัดประจุ -10.7 kV

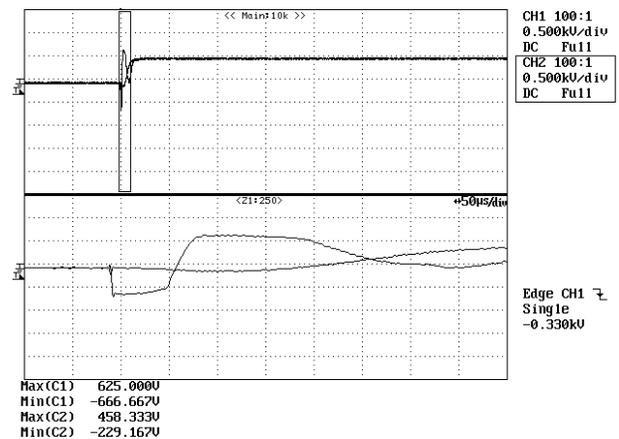
รูปที่ 12 การจำกัดแรงดันไฟฟ้าของระบบป้องกันแรงดันเกินสำหรับระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 13 วงจรทดสอบระบบป้องกันแรงดันเกินสำหรับระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



(ก) แรงดันไฟฟ้าอัดประจุ +10.7 kV



(ข) แรงดันไฟฟ้าอัดประจุ -10.7 kV

รูปที่ 14 การจำกัดแรงดันไฟฟ้าของระบบป้องกันแรงดันเกินสำหรับระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

4.2 การทดสอบระบบรวม

ระบบป้องกันแรงดันเกินสำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้ถูกติดตั้งที่ก่อนเข้าอินเวอร์เตอร์และระบบป้องกันแรงดันเกิน

สำหรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้ถูกติดตั้งหลังจากจากอินเวอร์เตอร์ หรือก่อนจ่ายโหลดดังแสดงในรูปที่ 16 โดยมุ่งเน้นป้องกันอุปกรณ์ที่สำคัญที่สุดคือ อินเวอร์เตอร์ เพื่อยืนยันความสามารถในการจำกัดแรงดันเกิน จึงทำการทดสอบระบบป้องกันร่วมกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ 2 กรณีคือ

กรณีที่ 1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ารูปคลื่นผสมต่อกับระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับแรงดันเกินเกิดขึ้นที่ระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

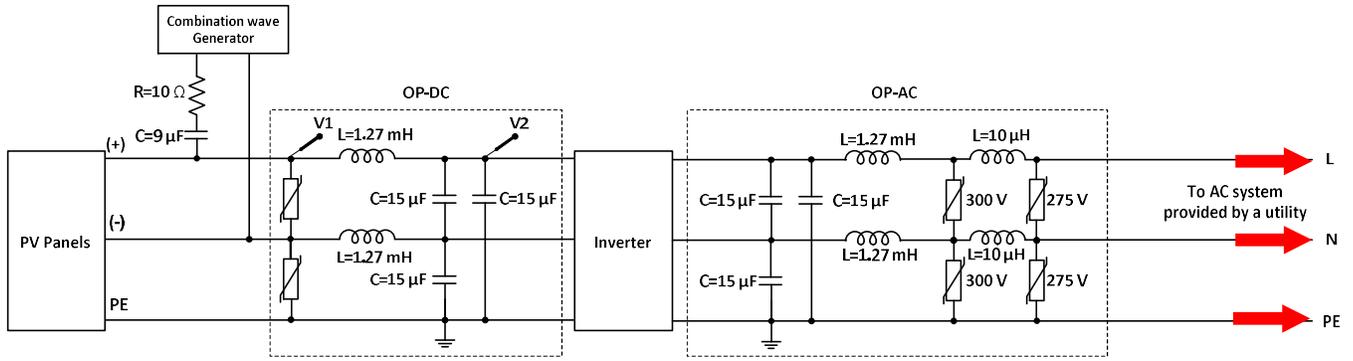
กรณีที่ 2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ารูปคลื่นผสมต่อกับระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ สำหรับแรงดันเกินเกิดขึ้นที่ระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

- **กรณีที่ 1** แรงดันเกินเกิดขึ้นที่ระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ทำการทดสอบ 2 รูปแบบ คือ แรงดันเกินชั่ววาทับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สายชั่ววาท และแรงดันเกินชั่ววาททับซ้อนบนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สายชั่ววาท โดยวัดแรงดันที่กักตักแรงดันเกินของระบบป้องกันแรงดันเกินสำหรับระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V1) หรือแรงดันไฟฟ้าฝั่งเซลล์แสงอาทิตย์ และวัดแรงดันไฟฟ้าที่ฝั่งขาเข้าอินเวอร์เตอร์ (V2) ดังรูปที่ 15 ผลการจำกัดแรงดันเกินเป็นไปดังแสดงในรูปที่ 16 จากรูปจะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าค่ายอดสูงสุดทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงของระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าไม่เกิน 1300 V และแรงดันไฟฟ้าค่ายอดสูงสุดที่ฝั่งอินเวอร์เตอร์มีค่าไม่เกิน 500 V ซึ่งมีค่าต่ำกว่าระดับฉนวนของสายเคเบิลและขั้วต่อทางไฟฟ้าเป็นอย่างมาก

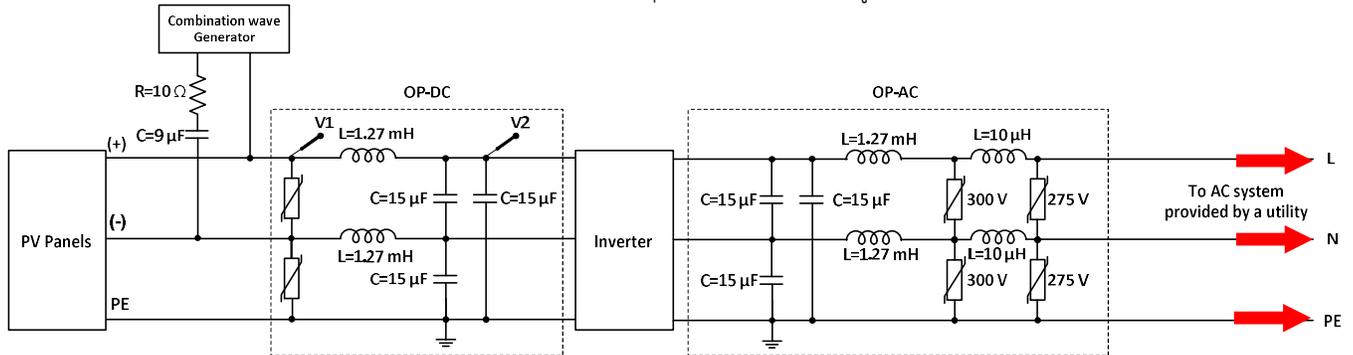
กรณีที่ 2 แรงดันเกินเกิดขึ้นที่ระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ทำการทดสอบ 2 รูปแบบ คือ แรงดันเกินชั่ววาทเกิดระหว่างสายมีแรงดัน (L) และสายนิวทรัล (N) ทับซ้อนที่มุม 90° และแรงดันเกินชั่ววาทเกิดระหว่างสายมีแรงดัน (L) และสายนิวทรัล (N) ทับซ้อนที่มุม 270° โดยวัดแรงดันที่กักตักแรงดันเกินของระบบป้องกันแรงดันเกินสำหรับระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (V1) หรือแรงดันไฟฟ้าฝั่งรับจากผู้จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ และวัดแรงดันไฟฟ้าที่ฝั่งขาเข้า

อินเวอร์เตอร์ (V2) ดังรูปที่ 17 ผลการจำกัดแรงดันเกินเป็นไปเป็นดังรูปที่ 18 จากรูปจะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าค่ายอดสูงสุดทางด้านแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับมีค่าไม่เกิน 700 V และแรงดันไฟฟ้าค่ายอดสูงสุดที่ฝั่งอินเวอร์เตอร์มีค่าไม่เกิน 350 V ซึ่งมีค่าต่ำกว่าระดับฉนวนของสายเคเบิล และขั้วต่อทางไฟฟ้าเป็นอย่างมาก

จากผลการทดสอบทั้งในส่วนการทดสอบแยกระบบ และการทดสอบระบบรวม เป็นการพิสูจน์ และยืนยันให้เห็นถึงความสามารถของระบบป้องกันแรงดันเกินที่ออกแบบ และจัดสร้างขึ้น สามารถนำมาใช้ป้องกันแรงดันเกิน หรือจำกัดแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนทุ่นลอยน้ำได้เป็นอย่างดี รวมทั้งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการใช้กักตักแรงดันเกินเพียงอย่างเดียวสามารถลดทอนแรงดันเกินให้มีค่าต่ำกว่าระดับฉนวนก็จริง แต่การมีโครงข่ายตัวกรองความถี่สูงนั้นมีประโยชน์เนื่องจากการป้องกันเมื่อกักตักแรงดันเกินเสียหายโดยไม่ทราบมาก่อน นอกจากนี้ตัวกรองจะทำให้ di/dt และ dv/dt ของแรงดันเกินมีค่าลดลง หรือลดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่อระบบอิเล็กทรอนิกส์ของอินเวอร์เตอร์ด้วย และเมื่อป้อนรูปคลื่นผสม (Combination wave) เข้าไปในระบบจริง เพื่อพิจารณาความสามารถในการจำกัดแรงดันเกินของกักตักแรงดันเกินที่จุดต่างๆ โดยแรงดันไฟฟ้าที่ถูกจำกัดต้องมีค่าต่ำกว่าระดับแรงดันไฟฟ้าฉนวนของอุปกรณ์ต่างๆ จากการทดสอบระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนทุ่นลอยน้ำขณะทำการทดสอบความสามารถป้องกันความผิดปกติในสถานะต่างๆ นั้น พบว่าระบบเซลล์แสงอาทิตย์บนทุ่นลอยน้ำสามารถส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังระบบไฟฟ้าได้อย่างเป็นปกติ เนื่องจากตัวกรองความถี่สูงมีผลอย่างมากต่ออินเวอร์เตอร์ โดยเฉพาะการลด Fast transients ซึ่งเป็นสาเหตุความเสียหายของวงจรควบคุม ผลลัพธ์ทั้งหมดตรงกับสมมุติฐานเบื้องต้นที่ว่าระบบลอยน้ำมีความเสี่ยงต่อแรงดันเกินสูงกว่าระบบบนพื้นดิน และควรมีการออกแบบ SPD แบบเฉพาะสำหรับระบบลอยน้ำ

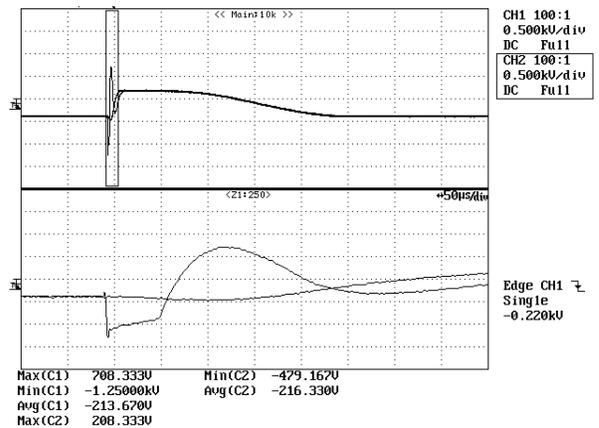
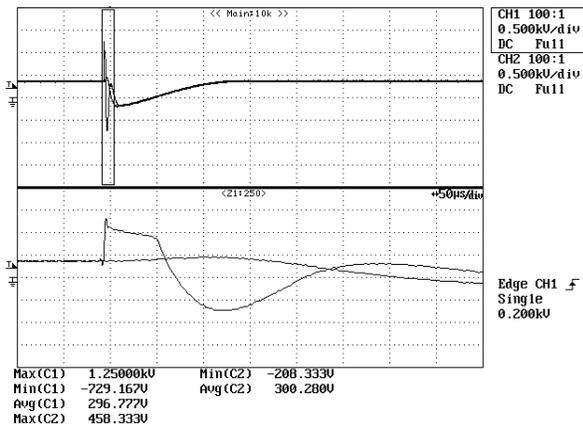


(ก) แรงดันเกินที่ชั่ววอกและแรงดันอัดประจุของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารูปคลื่นผสมเป็น +10.7 kV



(ข) แรงดันเกินที่ชั่ววอกและแรงดันอัดประจุของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารูปคลื่นผสมเป็น -10.7 kV

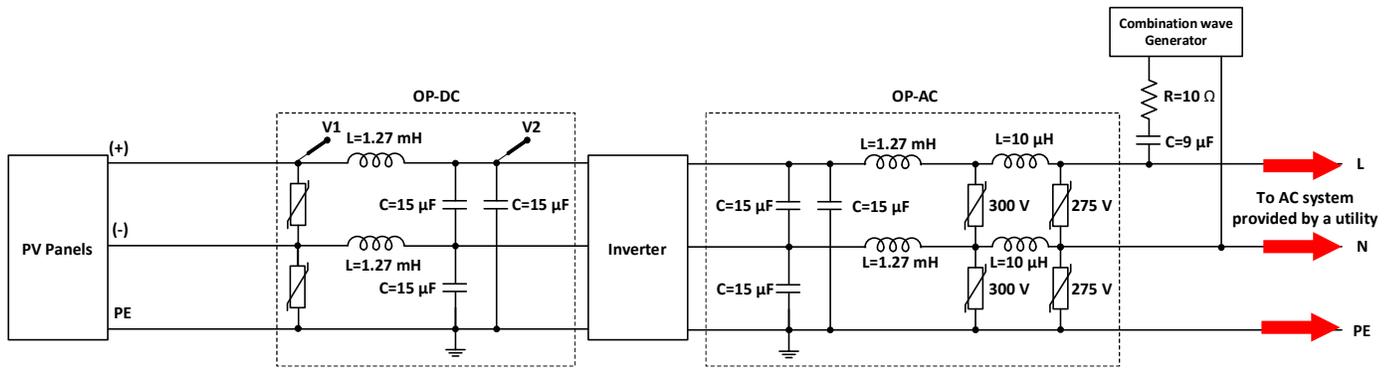
รูปที่ 15 วงจรการทดสอบป้องกันแรงดันเกินเมื่อแรงดันเกินเกิดขึ้นที่ระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



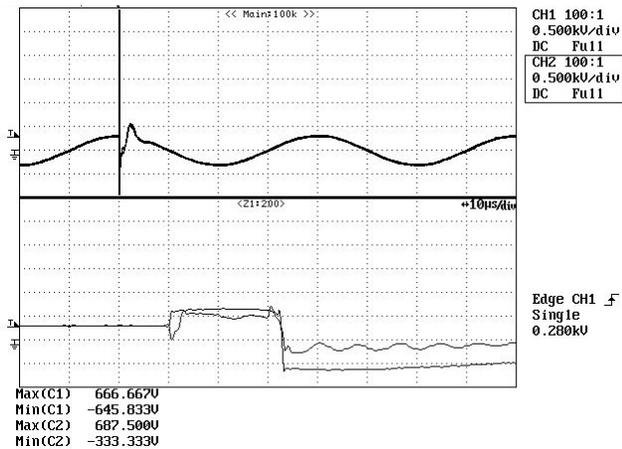
(ก) แรงดันเกินที่ชั่ววอกและแรงดันอัดประจุของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารูปคลื่นผสมเป็น +10.7 kV

(ข) แรงดันเกินที่ชั่ววอกและแรงดันอัดประจุของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ารูปคลื่นผสมเป็น -10.7 kV

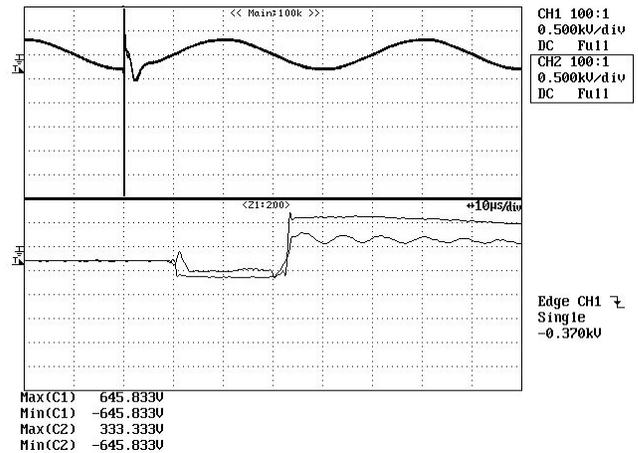
รูปที่ 16 ผลการจำกัดแรงดันเกินของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินสำหรับระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 17 วงจรการทดสอบป้องกันแรงดันเกินเมื่อแรงดันเกินเกิดขึ้นที่ระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ



ก) แรงดันเกินชั่ววอกทับซ้อนที่มุม 90° และแรงดันไฟฟ้าอัดประจุของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ารูปคลื่นผสมเป็น $+10.7$ kV



ข) แรงดันเกินชั่ววอกทับซ้อนที่มุม 270° และแรงดันไฟฟ้าอัดประจุของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ารูปคลื่นผสมเป็น -10.7 kV

รูปที่ 18 ผลการจำกัดแรงดันเกินของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินสำหรับระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

5. สรุป

การวิเคราะห์ผลการทำงานของระบบป้องกัน และลดทอนแรงดันเกินสำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ลอยน้ำที่นำเสนอ โดยทำการทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการและภาคสนามจริง ผลการทดลองยืนยันอย่างชัดเจนว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้ารูปคลื่นผสมที่ออกแบบ และจัดสร้างขึ้นสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าตามเฟสของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้ตามต้องการ อุปกรณ์ป้องกัน และลดทอนแรงดันเกินร่วมกับตัวกรองความถี่สูงสามารถลดทอนแรงดันเกินให้อยู่ในระดับปลอดภัยสำหรับอุปกรณ์ ต่าง ๆ ของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ และอินเวอร์เตอร์ได้ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ระบบป้องกันที่ใช้สามารถลดทอนแรงดันเกินได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยป้องกันความเสียหายต่อแผงเซลล์

แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์ และอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องได้เป็นอย่างดี ระบบที่พัฒนาขึ้นมีความเป็นไปได้ทางเทคนิค มีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐกิจ และสามารถปรับใช้ได้กับโครงการเซลล์แสงอาทิตย์บนทุ่นลอยน้ำในประเทศไทย ซึ่งจะช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบและป้องกันความเสียหายจากแรงดันไฟฟ้าเกินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.พีรฤทธิ ยูทธโกวิท ผศ.ดร.นันทวัฒน์ จุลเดชะ ผศ.ดร.ปุณยภัทร ภูมิภาค และคุณนครินทร์ เกษมทรัพย์ ที่ให้ความช่วยเหลือและร่วมทำการวิจัย และขอขอบคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ได้สนับสนุนให้ทุนวิจัยสำหรับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chowdhury G, Haggag M, Poortmans J. How cool is floating PV? A state-of-the-art review of floating PV's potential gain and computational fluid dynamics modeling to find its root cause. *European Physical Journal Photovoltaics*. 2023;14(24).
- [2] Reindl T, Paton C, Kumar A, Liu H, Krishnamurthy VA, Tan C, et al. *Where Sun Meets Water: Floating Solar Handbook for Practitioners*. Washington DC: World Bank Publications; 2019.
- [3] Huang L, Elzaabalawy H, Sarhaan M, Sherif A, Ding H, Binjian Ou, et al. Developing reliable floating solar systems on seas: A review. *Ocean Engineering*. 2025; 322.
- [4] Sobolewski K, Sobieska E. Lightning Protection of Floating Photovoltaic Power Plants — Simulation Analysis of Sample Solutions. *Energies*. 2023;16(10).
- [5] Choi DH. A Study on External Lightning Protection System for Marine Floating Photovoltaic System. *Journal of the Korean Institute of Information Technology*. 2021 ;19(8): 51-57.
- [6] Zhou C. Lightning protection design of offshore floating photovoltaic power station. *Southern energy construction*. 2024;11(6): 102-110.
- [7] Sobolewski K, Sobieska E. Analysis of lightning protection of floating photovoltaic power plants. In: *IEEE 36th International Conference on Lightning Protection*. Cape Town, South Africa; 2022. p. 1-6.
- [8] Song Y, Zhou O, Chen R, Shen J, Bian X, Zhang Y. Simulation of overvoltage in photovoltaic energy storage system caused by lightning strike. In: *IEEE 13th Asia-Pacific International Conference on Lightning*. Bali, Indonesia; 2025. p. 49-54.
- [9] Hasse P. *Overvoltage Protection of Low Voltage Systems*. London: Institution of Engineering and Technology. 2000.
- [10] International Electrotechnical Commission. *IEC 61000-4-5: Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and Measurement Techniques – Surge Immunity Test*. Geneva: IEC; 2017.
- [11] International Electrotechnical Commission. *IEC 61643-11: Low-voltage Surge Protective Devices – Part 11: Surge Protective Devices Connected to Low-Voltage Power Systems – Requirements and Test Methods*. Geneva: IEC; 2011