

การจำลองการทำงานของคอนเวอร์เตอร์แบบหลายพอร์ตสำหรับงานด้าน PVB2V และ V2V ด้วยฮาร์ดแวร์ใน ลูป (HiL simulations)

Hardware in the Loop (HiL) Simulations of Multi - Port Converter for PVB2V and V2V Applications

โฆสิต พงษ์ไพโร¹ ชญาภาณต์ แซ่เซียว¹ ปิยฉนิย ภาชนะพรรณ^{1,*} และ ธนกร แก้วชุ่ม² ศักดา สมกุล²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร kositp65@nu.ac.th, chayakarns66@nu.ac.th, piyadanip@nu.ac.th*

²วิทยาลัยพลังงานและสมารถกริตเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนเรศวร tanakornka66@nu.ac.th, sakdaso@nu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอแบบจำลองวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบหลายพอร์ตสำหรับชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าหลากหลายรูปแบบ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องอัดประจุแบบเคลื่อนย้ายได้สำหรับการชาร์จแบบฉุกเฉินนอกสถานที่ โดยวงจรคอนเวอร์เตอร์ประกอบด้วย 2 พอร์ต ได้แก่ 1) DC-DC Bidirectional Converter สำหรับแบตเตอรี่สะสมพลังงาน 2) DC-DC Boost Converter สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทำการทดสอบ 2 กรณี ได้แก่ 1) ใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่สะสมพลังงานในการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า (PVB2V) และ 2) ใช้ระบบแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าในการชาร์จแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า (V2V) โดยวงจรคอนเวอร์เตอร์ต้นแบบขนาด 30 kVA ได้ถูกจำลองและทดสอบใน Hardware in the loop (HiL) real time Simulator ด้วยผลิตภัณฑ์ OPAL-RT รุ่น OP4510 และเชื่อมต่อกับระบบควบคุมการทำงานด้วยบอร์ด Texas Instruments (TI C2000) รุ่น LAUNCHXL-F280049C

คำสำคัญ: คอนเวอร์เตอร์แบบหลายพอร์ต, แบตเตอรี่สะสมพลังงานชนิดแรงดันสูง, ยานยนต์ไฟฟ้า, เครื่องอัดประจุแบบเคลื่อนย้ายได้

Abstract

This paper presents a multi-port converter designed for electric vehicle (EV) charging applications with multi-energy sources. The proposed system is intended for use as a mobile EV charger in outdoor emergency charging circumstances. The converter consists of two ports: (1) a DC-DC bidirectional converter for battery energy storage and (2) a DC-DC boost converter for a photovoltaic (PV) system. Two case studies were investigated: (1) EV charging using both the PV system and the battery energy storage (PVB2V) and (2) vehicle-to-vehicle (V2V) charging using an EV battery as the power source. A 30 kVA prototype converter circuit was simulated and evaluated using Hardware-in-the-Loop (HiL) real-time simulator (OPAL-RT OP4510) and integrated with a control system based on the

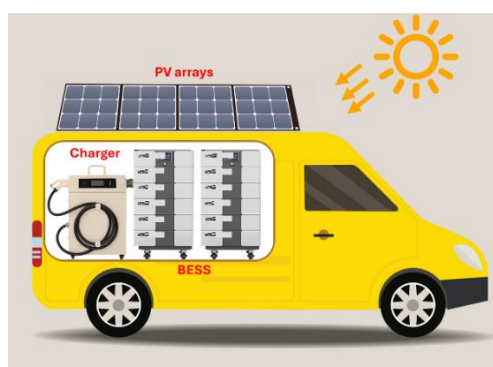
Texas Instruments (TI C2000) LAUNCHXL-F280049C development board.

Keywords: Multi-Port Converter, High-Voltage Battery Energy Storage, Electric Vehicles, Mobile EV Charger

1. บทนำ

ในปัจจุบันยานยนต์ไฟฟ้ามีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างมากในหลายประเทศรวมถึงประเทศไทย [1] แต่จากอัตราการเพิ่มขึ้นของยานยนต์ไฟฟ้าที่รวดเร็วทำให้เกิดปัญหาสถานีอัดประจุไม่เพียงพอต่อความต้องการ โดยเฉพาะในช่วงเทศกาลวันหยุดที่มีการเดินทางเป็นจำนวนมาก ทำให้บางครั้งยานยนต์ไฟฟ้าบางคันต้องประสบปัญหาแบตเตอรี่หมดกลางทาง โดยเฉพาะในช่วงเส้นทางที่มีการจราจรแออัด

จึงเกิดแนวคิดที่จะพัฒนาเครื่องอัดประจุสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าชนิดเคลื่อนย้ายได้เพื่อใช้สำหรับชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าในกรณีฉุกเฉิน โดยสามารถใช้ร่วมกับแหล่งผลิตไฟฟ้าที่หลากหลายรูปแบบ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่สะสมพลังงานได้ รวมทั้งการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า



รูปที่ 1 เครื่องอัดประจุสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าชนิดเคลื่อนย้ายได้

จากแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้าคันอื่นๆได้อีกด้วย โดยสามารถบรรจุอยู่ในรถตู้ส่งของดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเครื่องอัดประจุได้ถูกพัฒนาในรูปแบบ

วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบหลายพอร์ต ซึ่งมีรูปแบบการใช้งานที่หลากหลายดังที่รื้อไว้ใน [2] โดยเลือกใช้โครงสร้างคอนเวอร์เตอร์แบบไม่แยกวงจร (Non-isolated converter) เพื่อให้เครื่องอัดประจุมีขนาดกะทัดรัดเหมาะแก่การเคลื่อนย้ายได้ง่าย

งานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่ประกอบด้วย 2 พอร์ต ได้แก่ DC-DC Bidirectional Converter ชนิดอินเตอร์ลิฟสำหรับแบตเตอรี่สะสมพลังงาน/แบตเตอรี่แรงสูงในยานยนต์ไฟฟ้า และ DC-DC Boost Converter สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ โดยที่วงจร DC-DC Bidirectional Converter จะคอยควบคุมกระแสชาร์จไปที่ยานยนต์ไฟฟ้า และในส่วนวงจร DC-DC Boost Converter จะทำหน้าที่ดึงการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มกำลังไฟฟ้าในการอัดประจุไปที่ยานยนต์ไฟฟ้าได้มากขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาในการชาร์จเร็วขึ้น และเมื่อยานยนต์ไฟฟ้าถูกชาร์จจนเต็มแล้ว กำลังไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกนำมาใช้ชาร์จแบตเตอรี่สะสมพลังงานแทน

นอกจากนี้ วงจร DC-DC Bidirectional Converter สามารถรองรับการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่แรงดันสูงของยานยนต์คันอื่นเพื่อนำมาชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าคันที่มีปัญหาได้ แทนการเชื่อมต่อแบตเตอรี่สะสมพลังงานโดยไม่ต้องทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างวงจรและระบบควบคุม ส่งผลให้การชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าในกรณีฉุกเฉินสามารถทำได้ยืดหยุ่นมากขึ้น

2. คอนเวอร์เตอร์แบบหลายพอร์ต

วงจรคอนเวอร์เตอร์สำหรับชาร์จยานยนต์ไฟฟ้ามีลักษณะดังรูปที่ 2 การอัดประจุจะเชื่อมต่อแบตเตอรี่แรงสูงของยานยนต์ไฟฟ้าเข้ากับบัสดีซี (DC link bus) ของวงจรโดยตรง โดยมีวงจร DC-DC Bidirectional Converter ชนิดอินเตอร์ลิฟที่เชื่อมต่อกับแบตเตอรี่สะสมพลังงานหรือแบตเตอรี่จากยานยนต์ไฟฟ้า ทำหน้าที่ควบคุมขนาดกระแสที่ไปชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า โดยมีการปรับขนาดกระแสให้สอดคล้องกับสถานะการชาร์จ (State of charge, SOC) ของยานยนต์ไฟฟ้า

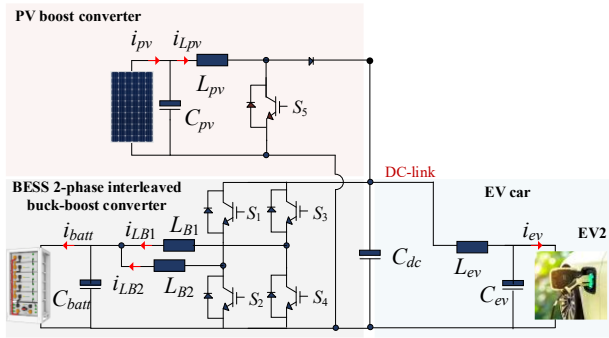
นอกจากนี้ กำลังไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกควบคุมด้วย DC-DC Boost Converter โดยมีการทำงานร่วมกับฟังก์ชัน Maximum Power Point Tracking (MPPT) เพื่อดึงกำลังไฟฟ้ามาเสริมการชาร์จจากแบตเตอรี่สะสมพลังงาน ส่งผลให้การชาร์จมีระยะเวลาที่รวดเร็วขึ้น

2.1 คอนเวอร์เตอร์กระแสตรงแบบสองทิศทางสำหรับ

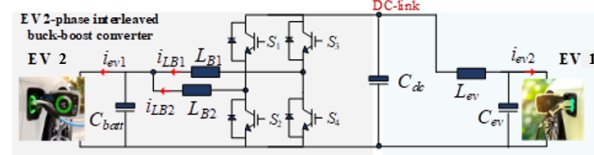
แบตเตอรี่สะสมพลังงาน

คอนเวอร์เตอร์กระแสตรงแบบสองทิศทางนั้นจะใช้เทคนิคอินเตอร์ลิฟสำหรับเชื่อมต่อกับแบตเตอรี่สะสมพลังงานแรงดันสูง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานและลดการกระเพื่อม (Ripple) ของกระแสและแรงดันไฟฟ้าตามจำนวนของวงจรที่เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 2 เมื่อต้องการดึงพลังงานไฟฟ้ามาชาร์จแบตเตอรี่สะสมพลังงาน คอนเวอร์เตอร์จะทำงานใน Buck mode ด้วยการสับสวิตช์ S1

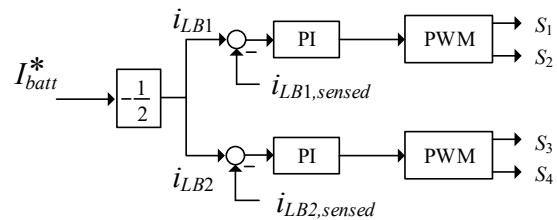


(ก) กรณีนี PVB2V



(ข) กรณีนี V2V

รูปที่ 2 ภาพรวมวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบหลายพอร์ต (ทิศทางลูกศร คือ ทิศทางที่กระแสมีค่าเป็นบวก)



รูปที่ 3 วงจรควบคุม DC-DC Converter สำหรับแบตเตอรี่สะสมพลังงาน

และ S3 และเปิดสวิตช์ S2 และ S4 ในทางตรงกันข้ามเมื่อต้องการดึงพลังงานจากแบตเตอรี่ออกไป คอนเวอร์เตอร์จะเปลี่ยนมาทำงานใน Boost mode ด้วยการสับสวิตช์ S2 และ S4 และเปิดสวิตช์ S1 และ S3 ซึ่งการทำงานทั้งสองโหมดพบว่าคู่สวิตช์ในแต่ละเฟสจะทำงานกลับสถานะกัน (Complementary)

โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้เทคนิคอินเตอร์ลิฟแบบสองเฟส ($N=2$) ซึ่งแต่ละเฟสทำมุมต่างกัน 180° ซึ่งจะส่งผลให้การกระเพื่อมของกระแสที่ไหลเข้าออกแบตเตอรี่ (i_{batt}) ลดลงได้เกือบ 50 % [3] ซึ่งพิจารณา ได้จาก

$$\frac{di_{batt}(t)}{dt} = \sum_{n=1}^N \frac{di_{LBn}(t)}{dt} \quad (1)$$

ในส่วนวงจรควบคุมแบตเตอรี่สะสมพลังงานจะเป็นการควบคุมกระแส (i_{LBn}) ของแต่ละเฟสของวงจรอินเตอร์ลิฟด้วยระบบควบคุมแบบ PI เพื่อควบคุมกระแสที่ไหลเข้ามาและออกจากแบตเตอรี่สะสมพลังงานแรงดันสูง ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยที่ขนาดกระแสอ้างอิงของวงจรควบคุมแบตเตอรี่ (i_{batt}^*) จะมีขนาดขึ้นอยู่กับสถานะการชาร์จของยานยนต์ไฟฟ้าที่กำลังถูกชาร์จอยู่ (SOC_EV) โดยมีการตัดสินใจเป็น 3 ระดับดังนี้

1) $SOC_EV \leq 95\%$: วงจรควบคุมจะดึงชาร์จกำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่สะสมพลังงานที่ค่าพิกัดของวงจรคอนเวอร์เตอร์กระแสตรง โดยที่ i_{batt}^* มีค่าเท่ากับ พิกัดกำลังของคอนเวอร์เตอร์หารด้วยพิกัดแรงดันของแบตเตอรี่สะสมพลังงาน

2) $95\% < SOC_EV \leq 99\%$: วงจรควบคุมจะค่อยๆ ลดกระแสที่ดิสชาร์จออกจากแบตเตอรี่ ด้วยอัตรา 25 % ต่อ SOC_EV ที่เพิ่มขึ้น 1% โดยการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสแบตเตอรี่อ้างอิงสามารถเขียนได้เป็น

$$i_{batt}^* = 1 - 0.25 \times (SOC_EV - 95) \quad (2)$$

3) $99\% < SOC_EV$: วงจรควบคุมหยุดการดิสชาร์จกระแสไปที่ยานยนต์ไฟฟ้า และจะเปลี่ยนเป็นการดึงกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายอื่น เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อชาร์จแบตเตอรี่สะสมพลังงาน โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสแบตเตอรี่อ้างอิงเป็น

$$i_{batt}^* = -1 \times (SOC_EV - 99) \quad (3)$$

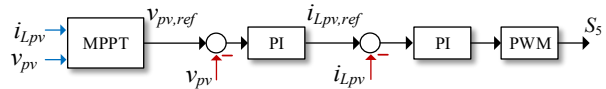
2.2 บูลต์คอนเวอร์เตอร์สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์

วงจรบูลต์คอนเวอร์เตอร์และระบบควบคุมที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยมีการทำงานร่วมกับฟังก์ชัน Maximum Power Point Tracking (MPPT) เพื่อดึงการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุดด้วยการปรับแรงดัน (V_{pv}) และกระแสไฟฟ้า (I_{Lpv}) ให้เหมาะสม

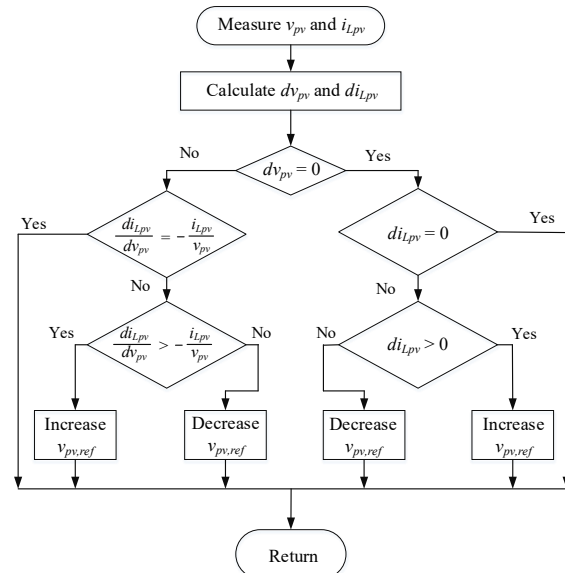
โดยงานวิจัยนี้เลือกวิธี Incremental Conductance Method สำหรับการติดตามจุดกำลังสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นวิธีที่มีความแม่นยำสูงและตอบสนองได้ดีต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อนมากและมีความไวต่อการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยจะมีการปรับค่าแรงดันอ้างอิง ($V_{pv,ref}$) ตามเงื่อนไขการทำงานในรูปที่ 5 [4]

3.ระบบทดสอบคอนเวอร์เตอร์แบบหลายพอร์ตใน Hardware in the Loop (HiL)

การทำงานของ Hardware-in-the-Loop (HiL) เป็นวิธีการทดสอบและตรวจสอบระบบควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ด้วยการจำลองสถานะแวดล้อมจริงแบบเรียลไทม์ โดยจำลองฮาร์ดแวร์แบบเสมือนจริงเพื่อทดสอบการทำงานของซอฟต์แวร์โดยยังไม่ต้องใช้อุปกรณ์จริง ทำให้ช่วยประหยัดเวลาในการทดสอบและช่วยตรวจสอบความถูกต้องเพื่อลดความเสี่ยงต่อการใช้งานจริง



รูปที่ 4 ระบบควบคุมวงจร DC-DC Boost Converter ร่วมกับ MPPT



รูปที่ 5 โฟลว์ชาร์ต MPPT ด้วยเทคนิค Incremental Conductance

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนางจรคอนเวอร์เตอร์แบบหลายพอร์ตแบบเสมือนจริงด้วยวงจร RT-Lab ใน Hardware in the loop (HiL) real time Simulator ของผลิตภัณฑ์ OPAL-RT รุ่น OP4510 ซึ่งมีการเชื่อมต่อกับวงจรควบคุมที่พัฒนาบนบอร์ด DSP ไมโครคอนโทรลเลอร์ของผลิตภัณฑ์ Texas Instruments (TI C2000) รุ่น LAUNCHXL-F280049C ดังแสดงในรูปที่ 6 และมีการเก็บผลด้วยออสซิลอสโคป SIGLENT รุ่น sds 1104x HD ซึ่งตั้งค่าความละเอียด 200 s/div สามารถเก็บค่าทดสอบได้ 2000 วินาที (ประมาณ 33 นาที)

ในการทดสอบแบ่งเป็น 2 กรณี โดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

กรณี PVB2V : แบตเตอรี่สะสมพลังงานขนาด 300 V พิกัด 70 Ah, ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 300 V พิกัด 6 kW และยานยนต์ไฟฟ้าขนาดแบตเตอรี่ 400 V พิกัด 100 Ah โดยทำการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ใน Boost mode

กรณี V2V : ยานยนต์ที่ใช้ดิสชาร์จกำลังไฟฟ้า (EV1) ใช้แบตเตอรี่ขนาด 420 V พิกัด 150 Ah และยานยนต์ไฟฟ้าตัวที่ถูกชาร์จ (EV2) ใช้แบตเตอรี่ 400 V พิกัด 100 Ah เนื่องจากการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ให้อยู่ใน Buck mode จึงจำเป็นต้องให้แรงดันของยานยนต์ไฟฟ้า (EV1) นั้นต้องมีระดับแรงดันที่สูงกว่าแรงดันไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้า (EV2) เพื่อให้ทำการดิสชาร์จกำลังไฟฟ้าได้

สำหรับการออกแบบวงจรกำลังและวงจรควบคุมของแต่ละพอร์ต มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และวงจรดังนี้

1) พารามิเตอร์ของวงจร DC-DC bidirectional converter พิกัดกำลังของคอนเวอร์เตอร์ 30 kVA, แรงดันไฟฟ้าฝั่งแบตเตอรี่สะสมพลังงาน (V_{batt}) อยู่ในช่วงระหว่าง 300 - 500 V, ตัวเก็บประจุฝั่งแบตเตอรี่ (C_{batt}) ขนาด 150 μ F, ตัวเก็บประจุฝั่งดีซีบัส (C_{dc}) ขนาด 200 μ F, แรงดันที่บัสดีซี (V_{dc}) ขนาด 450 V, ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าฝั่งแบตเตอรี่สองตัว (L_{B1} และ L_{B2}) ขนาดตัวละ 2 mH, แบนด์วิดท์ 35 Hz, ค่าเกนของวงจรควบคุมกระแส $K_p = 1.8502$, $K_i = 0.1542$, ความถี่สวิตชิ่ง 20 kHz

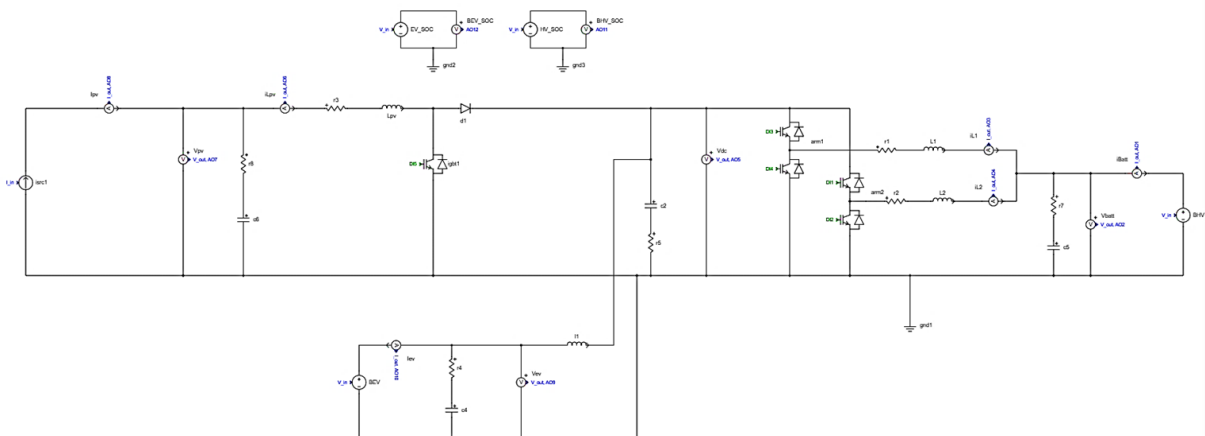
2) พารามิเตอร์ของวงจร DC-DC boost converter พิกัดกำลังของคอนเวอร์เตอร์ 6 kVA, แรงดันไฟฟ้าฝั่งระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (V_{PV}) อยู่ในช่วงระหว่าง 300 - 500 V, ตัวเก็บประจุฝั่งเซลล์แสงอาทิตย์ (C_{PV}) ขนาด 50 μ F, ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าฝั่งเซลล์แสงอาทิตย์ (L_{PV}) ขนาด 2 mH, ค่าเกนของวงจรควบคุมแรงดัน $K_p = 0.8330$, $K_i = 0.0083$, แบนด์วิดท์ 45 Hz, ค่าเกนของวงจรควบคุมกระแส $K_p = 0.2177$, $K_i = 0.0181$, ความถี่สวิตชิ่ง 20 kHz

ตารางที่ 1 สรุปเหตุการณ์ในการทดสอบ กรณี PVB2V

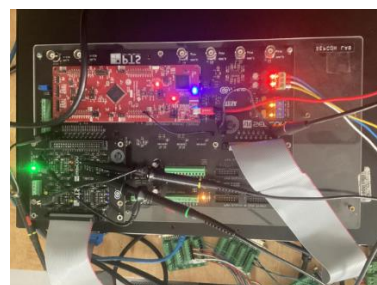
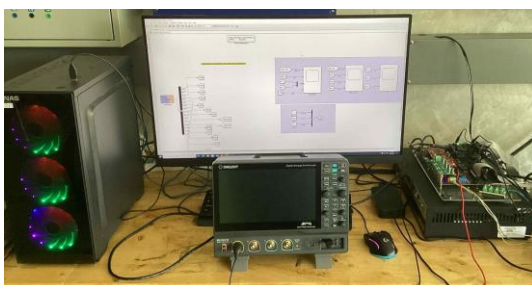
วินาทีที่	เหตุการณ์
0	ได้เริ่มชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่แรงดันสูงด้วยกระแส 100 A (30 kW)
120	มีระบบเซลล์แสงอาทิตย์เข้ามา เพื่อเพิ่มอัตราการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าให้สูงขึ้น เปิดการทำงาน MPPT เพื่อให้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังสูงสุด 6 kW (กระแส 20 A)
1150	SOC ของยานยนต์ไฟฟ้าสูงเกิน 95 % กระแสดีสชาร์จจะค่อยๆ ลดลงตามสมการที่ (2)
1500	SOC ของยานยนต์ไฟฟ้าเกิน 99 % กระแสจะหยุดไหลเข้ายานยนต์ไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกนำมาชาร์จที่แบตเตอรี่สะสมพลังงานตามสมการที่ (3)
2000	การชาร์จจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้ SOC ของแบตเตอรี่สะสมพลังงานเพิ่มจาก 57 % มาเป็น 63 %

ตารางที่ 2 สรุปเหตุการณ์ในการทดสอบ กรณี V2V

วินาทีที่	เหตุการณ์
0	เริ่มชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า EV2 (ขนาดพิกัด 100 Ah) จากยานยนต์ไฟฟ้า EV1 (ขนาดพิกัด 150 Ah) ด้วยกระแส 72.5 A (กำลังไฟฟ้าดีสชาร์จ เท่ากับ 30 kW)
2000	SOC ของยานยนต์ไฟฟ้า EV1 ลดลงเหลือ 70 % และ SOC ของยานยนต์ไฟฟ้า EV2 เพิ่มขึ้นมาเป็น 50 % ได้



(ก) วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบหลายพอร์ตในโปรแกรม RT-Lab



(ข) ชุดทดสอบ OPAL-RT รุ่น OP4510 และ บอร์ดควบคุม Texas Instruments (TI C2000) รุ่น LAUNCHXL-F280049C ในห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 6 ระบบทดสอบคอนเวอร์เตอร์แบบหลายพอร์ตบน HiL real time simulator

3) พารามิเตอร์ของวงจรฝั่งที่เชื่อมต่อกับยานยนต์ไฟฟ้าตัวที่ถูกชาร์จ ได้แก่ ตัวเก็บประจุ (C_e) ขนาด 150 μ F, ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าฝั่ง (L_e) ขนาด 0.1 mH และ ตัวต้านทานไฟฟ้า (R_e) ขนาด 5 m Ω

4. รายละเอียดการทดสอบ

ทำการทดสอบการทำงานของคอนเวอร์เตอร์แบบหลายพอร์ตที่ได้ออกแบบ เป็น 2 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 ใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับแบตเตอรี่สะสมพลังงาน ชนิดแรงดันสูงเพื่อชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า (PVB2V) กำหนดให้ SOC เริ่มต้นของยานยนต์ไฟฟ้าและแบตเตอรี่สะสมพลังงานคือ 70 % และ 100 % ตามลำดับ และมีการทดสอบตามเหตุการณ์ต่างๆ ที่กำหนดในตารางที่ 1

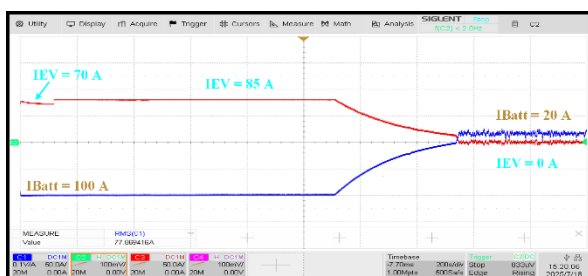
กรณีที่ 2 กรณีใช้แบตเตอรี่แรงดันสูงในยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า (V2V) กำหนดให้ SOC เริ่มต้นของยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ดิสชาร์จ (EV1) และยานยนต์ไฟฟ้าถูกชาร์จ (EV2) คือ 100 % และ 10 % ตามลำดับ และมีการทดสอบตามเหตุการณ์ต่างๆ ที่กำหนดในตารางที่ 2

5.. ผลการทดสอบ

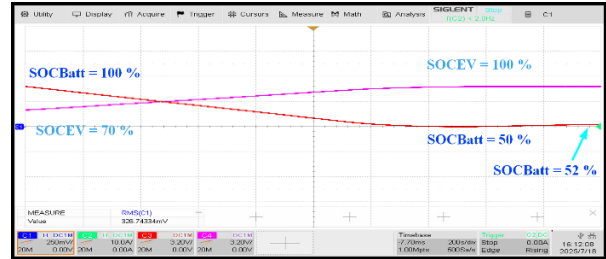
5.1 กรณีศึกษา PVB2V

ผลการทดสอบในกรณีที่ 1 (PVB2V) แสดงได้ในรูปที่ 7 ถึง 11 พบว่า เริ่มต้นแบตเตอรี่สะสมพลังงานได้ทำการถูกใช้เพื่อชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว โดยกำลังไฟฟ้าที่ถูกดิสชาร์จมีขนาดเท่ากับพิกัดของวงจร DC-DC bidirectional converter ซึ่งวัดค่าได้ประมาณ 32 kW (กระแสดิสชาร์จประมาณ 100 A) จากนั้นในวันที่ที่ 120 ได้มีการเชื่อมต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์เข้ามาในระบบและถูกเปิดการทำงานในโหมด MPPT เพื่อหาจุดสูงสุดของกำลังไฟฟ้าของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ 6 kW (กระแส 20 A) สามารถช่วยเพิ่มกำลังไฟฟ้าในการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าขึ้นมาเป็น 38 kW

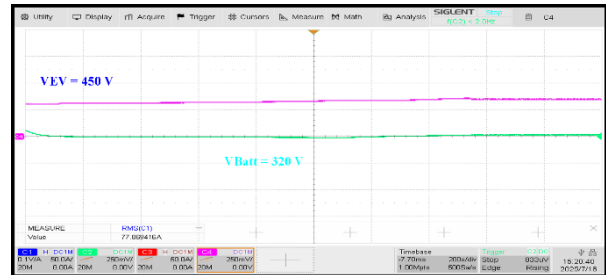
ในวันที่ที่ 1150 ค่า SOC ของยานยนต์ไฟฟ้าถูกเพิ่มถึงระดับ 95 % วงจร DC-DC bidirectional converter ได้ทำการค่อยๆ ลดกระแสชาร์จลง จนกระทั่งในวันที่ที่ 1500 ค่า SOC ของยานยนต์ไฟฟ้าเกิน 99 % จึงหยุดชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า แล้ววงจร DC-DC bidirectional converter จะพยายามดึงกำลังไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์เข้าไปชาร์จที่แบตเตอรี่สะสมพลังงานต่อ พบว่า ค่า SOC ของแบตเตอรี่สะสมพลังงานจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น จากระดับ 50 % จนมาแตะที่ 52 % ณ วินาทีที่ 2000 โดยตลอดการทดสอบแรงดันที่บัสดีซีมีค่าคงที่ ที่ค่าประมาณ 450 V



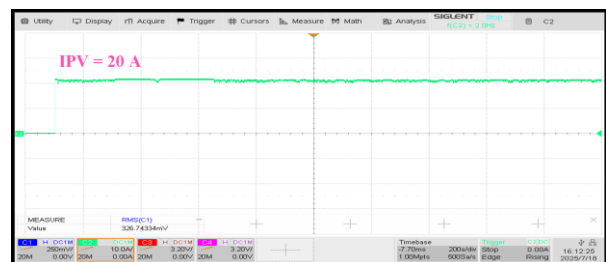
รูปที่ 7 กระแสของยานยนต์ไฟฟ้า (IEV) และแบตเตอรี่สะสมพลังงาน (IBESS) ในกรณีศึกษา PVB2V



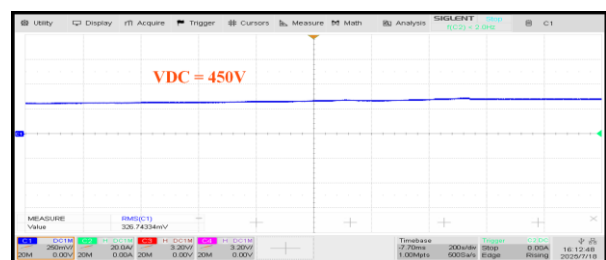
รูปที่ 8 สถานะการชาร์จของยานยนต์ไฟฟ้า (SOCEV) และแบตเตอรี่สะสมพลังงาน (SOCBESS) ในกรณีศึกษา PVB2V



รูปที่ 9 แรงดันไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้า (VEV) และแบตเตอรี่สะสมพลังงาน (VBESS) ในกรณีศึกษา PVB2V



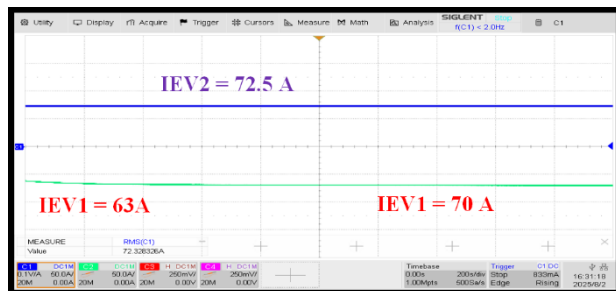
รูปที่ 10 กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีศึกษา PVB2V



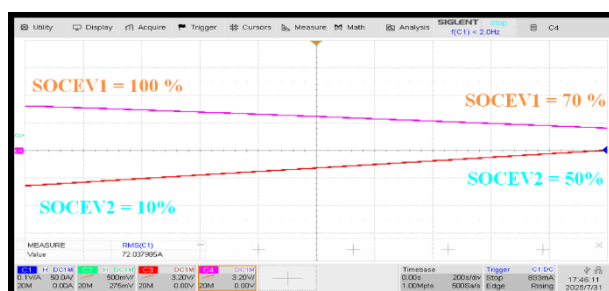
รูปที่ 11 แรงดันที่บัสดีซี (DC link) ในกรณีศึกษา PVB2V

5.2 กรณีศึกษา V2V

ผลการทดสอบในกรณีที่ 2 (V2V) แสดงได้ในรูปที่ 12 ถึง 15 พบว่า ยานยนต์ไฟฟ้า EV2 ถูกชาร์จจากแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า EV1 ด้วยกำลังไฟฟ้าขนาดเทียบเท่าพิกัดของวงจร DC-DC bidirectional converter วัดค่าได้ประมาณ 31 kW (กระแสดิสชาร์จประมาณ 72.5 A) เมื่อทำการชาร์จต่อเนื่องด้วยกำลังไฟฟ้างกล่าวในลักษณะคงที่เป็นระยะเวลา 2000 วินาที จะส่งผลให้ค่า SOC ของยานยนต์ไฟฟ้า EV1 นั้นค่อยๆ ลดลงจากค่าเริ่มต้น 100% ลดลงเหลือ 75% ในทางตรงกันข้าม ค่า SOC ยานยนต์ไฟฟ้า EV2 ค่อยๆ เพิ่มขึ้นจาก 10 % ขึ้นมาเป็น 50 % ได้ โดยที่ตลอดการทดสอบแรงดันที่บัสดีซีมีขนาดคงที่ ที่ค่าประมาณ 451 V



รูปที่ 12 กระแสของยานยนต์ไฟฟ้า EV1 (IEV1) และยานยนต์ไฟฟ้า EV2 (IEV2) ในกรณีศึกษา V2V



รูปที่ 13 สถานะการชาร์จของยานยนต์ไฟฟ้า EV1 (SOCEV1) และยานยนต์ไฟฟ้า EV2 (SOCEV2) ในกรณีศึกษา V2V



รูปที่ 14 แรงดันไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้า EV1 (VEV1) และยานยนต์ไฟฟ้า EV2 (VEV2) ในกรณีศึกษา V2V



รูปที่ 15 แรงดันที่บัสดีซี (DC link) ในกรณีศึกษา V2V

6. สรุปผลการทดสอบ

วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ 2 พอร์ตที่ประกอบด้วยวงจร DC-DC Bidirectional Converter สำหรับแบตเตอรี่สะสมพลังงาน และวงจร DC-DC Boost Converter สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์สามารถใช้ชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่จำเป็นต้องมีวงจร DC-DC

converter ทางฝั่งยานยนต์ไฟฟ้า ส่งผลให้เครื่องอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้ามีขนาดเล็กเหมาะสมแก่การเคลื่อนย้ายและใช้งานภายนอกสถานที่ได้สะดวก

ผลการทดสอบด้วย HiL real time simulator พบว่ากรณีศึกษา PVB2V สามารถเชื่อมต่อระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำงานในโหมด MPPT เพื่อช่วยเพิ่มอัตราการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของยานยนต์ไฟฟ้า ส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าลดลงเมื่อเทียบกับการชาร์จจากแบตเตอรี่สะสมพลังงานเพียงอย่างเดียว ในส่วนกรณีศึกษา V2V พบว่า วงจร DC-DC bidirectional converter สามารถรองรับแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้าซึ่งมีแรงดันสูงกว่าแบตเตอรี่สะสมพลังงานได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงรายละเอียดองค์ประกอบต่างๆ ของวงจร จึงสามารถใช้ร่วมกับแบตเตอรี่แรงดันสูงได้หลากหลายขนาด ส่งผลให้การใช้งานมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น โดยระบบควบคุมจะมีการปรับเปลี่ยนขนาดกระแสที่ไหลเข้าออกแบตเตอรี่ตามระดับพิกัดแรงดันของแบตเตอรี่ที่แตกต่างกันด้วย

7. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนของงานวิจัย “ระบบควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าสำหรับเครื่องอัดประจุยานยนต์ไฟฟ้าชนิดเคลื่อนย้ายได้ที่สามารถเชื่อมต่อกับเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่แรงดันสูง” ทุนอุดหนุนวิจัยงบประมาณรายได้ ปีงบประมาณ 2567 ม.นเรศวร (R2567C029) และขอบคุณบริษัท PTS combination Co., Ltd สำหรับการสนับสนุนและช่วยเหลือเกี่ยวกับเครื่อง OPAL-RT รุ่น OP4510

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Monjagapate and S. Smitintu, “The Market Growth of Light Electric Vehicles (EVs) in Thailand Situation Projection from 2024 to 2031”, Journal of Industrial Business Administration, vol. 6, no. 2, pp. 167–180, Dec. 2024.
- [2] A. Lavanya, J. D. Navamani, K. Vijayakumar, and R. Rakesh, “Multi-input DC-DC converter topologies-a review,” in 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), 3-5 March 2016, pp. 2230-2233, doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7755089.
- [3] C. Saeseiw, P. Pachanapan, S. Somkun, S. Srita and T. Kaewchum, “Interleaved Bidirectional Buck-Boost DC/DC Converter for High Voltage Battery Application,” 2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Chiang Mai, Thailand, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICEMS56177.2022.9982920.
- [4] Esram, T., & Chapman, P.L. (2007), “Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.22(2), pp. 439-449, doi: 10.1109/TEC.2006.874230