

การศึกษาระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมระหว่างแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวดด้วยเทคนิคการจัดการพลังงานที่บัสไฟตรง

พีรพล จันทร์หอม*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประกอบ โกเมศวรากุล

ทีมวิจัยสมองกลอัจฉริยะและความจริงเสมือน หน่วยวิจัยระบบอัจฉริยะ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

ณัชพงศ์ หัตถิ

ทีมวิจัยมอเตอร์และการแปลงผันพลังงาน หน่วยวิจัยระบบอัจฉริยะ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 6363 9820 อีเมล: peerapon.c@rmutsb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.01.002

รับเมื่อ 10 เมษายน 2563 แก้ไขเมื่อ 16 กันยายน 2563 ต่อบรรณเมื่อ 9 พฤศจิกายน 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 13 มกราคม 2565

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและทดลองระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมระหว่างแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวด โดยมีการเชื่อมต่อชุดกักเก็บพลังงานทั้งสองเข้าด้วยกันที่บัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ ในส่วนของอินเวอร์เตอร์ถูกตั้งโหมดการทำงานให้ทำหน้าที่รักษาแรงดันที่บัสไฟตรงให้คงที่ที่ 600 โวลต์ เพื่อใช้เป็นจุดเชื่อมต่อให้กับคอนเวอร์เตอร์ต่างๆ ที่ควบคุมการอัดประจุและคายประจุอุปกรณ์กักเก็บพลังงานทั้งสองชนิด โดยคอนเวอร์เตอร์แต่ละตัวมีพิกัดกำลังงานสูงสุด 25 กิโลวัตต์ ใช้ความถี่การสวิตซ์ 4 กิโลเฮิรตซ์ และมีโอจีบีทีเป็นอุปกรณ์สวิตซ์ ระบบนี้รองรับคอนเวอร์เตอร์ได้ทั้งหมด 4 ตัว จึงทำให้มีพิกัดกำลังงานรวมสูงสุดที่ 100 กิโลวัตต์ ในการทำงานของระบบโดยรวมนั้น อุปกรณ์กักเก็บพลังงานทั้งสองชนิดรวมถึงคอนเวอร์เตอร์แต่ละตัว สามารถถูกสั่งให้มีการอัดประจุหรือคายประจุตามระดับกำลังงานที่กำหนดได้โดยอิสระ โดยพลังงานที่เกิดจากการทำงานจะมีการเสริม หรือหักล้างกันที่บัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์ จากผลการทดลองเป็นการยืนยันว่า ระบบที่ได้ออกแบบมีการทำงานได้ตามที่ตั้งไว้ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

คำสำคัญ: ระบบกักเก็บพลังงานแบบผสม การกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ การกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่ด้วยตัวเก็บประจุยิ่งยวด การจัดการพลังงานที่บัสไฟตรง คอนเวอร์เตอร์แบบสองทาง

การอ้างอิงบทความ: พีรพล จันทร์หอม, ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ, ประกอบ โกเมศวรากุล และ ณัชพงศ์ หัตถิ, “การศึกษาระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมระหว่างแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวดด้วยเทคนิคการจัดการพลังงานที่บัสไฟตรง,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 32, ฉบับที่ 3, หน้า 567-584, ก.ค.-ก.ย. 2565.



Study of a Battery-super Capacitor Hybrid Energy Storage System Using Energy Management Technique at DC-bus Network

Peerapon Chanhom*

Electrical Engineering Division, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Bangkok, Thailand

Siroj Sirisukprasert

Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand

Prakob Komeswarakul

Smart Machines and Mixed Reality Research Team, Intelligent System Research Group, Thailand's National Electronics and Computer Technology Center, Bangkok, Thailand

Natchpong Hatti

Machines and Power Conversions Research Team, Intelligent System Research Group, Thailand's National Electronics and Computer Technology Center, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 6363 9820, E-mail: peerapon.c@rmutsb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.01.002

Received 10 April 2020; Revised 16 September 2020; Accepted 9 November 2020; Published online: 13 January 2022

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research aimed to investigate the battery-supercapacitor hybrid energy storage system. The battery energy storage and supercapacitor energy storage were connected to the dc-bus network of the inverter. This inverter was operated in a dc-bus voltage regulation mode for keeping the dc-bus voltage at 600 V. The dc-bus network was used as a common point for connecting of multiple dc-to-dc converters, which were used for cooperative control of charging and discharging amount of energy from battery banks and supercapacitors banks. Each converter has a power rating of 25 kW and IGBTs (Insulated-gate bipolar transistors) as switching devices, where the switching frequency of each IGBT is 4 kHz. Totally, this system could support at least four dc-to-dc converters, resulting in a total power rating of at least 100 kW. Moreover, each converter can independently charge or discharge an amount of energy to or from a corresponding energy storage device, thus the amount of energy during charging or discharging can be combined at the dc-bus network. The experimental results confirm that the proposed system can work as intended from the design and description above.

Keywords: Hybrid Energy Storage System, Battery Energy Storage, Supercapacitor Energy Storage, DC-bus Energy Management, Bi-directional DC-to-DC Converter

Please cite this article as: P. Chanhom, S. Sirisukprasert, P. Komeswarakul, and N. Hatti, "Study of a battery-super capacitor hybrid energy storage system using energy management technique at dc-bus network," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 3, pp. 567-584, Jul.-Sep. 2022 (in Thai).

1. บทนำ

จากความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นในปัจจุบันผลักดันให้เกิดการส่งเสริมการนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้ผลิตไฟฟ้า และเชื่อมต่อเข้ากับระบบมากขึ้น โดยในช่วงสิ้น พ.ศ. 2557 มีกำลังผลิตจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน 8,476 เมกะวัตต์ หรือประมาณร้อยละ 22.5 [1] และจากแผนพัฒนาพลังงานหมุนเวียนและพลังงานทางเลือก (AEDP) [2] ใน พ.ศ. 2579 จะมีเป้าหมายในการผลิตพลังงานทางเลือกรวม 19,634.4 เมกะวัตต์ หรือประมาณร้อยละ 28 ของกำลังผลิตไฟฟ้ารวม ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แผนพัฒนาพลังงานหมุนเวียนและพลังงานทางเลือก

แหล่งพลังงาน	กำลังผลิต (หน่วย: เมกะวัตต์)
แสงอาทิตย์	6,000.00
พลังลม	3,002.00
พลังน้ำ	3,282.40
ขยะ	500.00
ชีวมวล	5,570.00
ก๊าซชีวภาพ	600.00
พืชพลังงาน	680.00
รวม	19,634.40

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของระบบเก็บพลังงานชนิดต่างๆ [3]-[10]

ประเภท	ข้อดี	ข้อเสีย
1. ระบบกักเก็บน้ำ ท้ายเขื่อน	1. ให้พิกัดกำลังงานไฟฟ้าที่สูง 2. อายุการใช้งานยาวนาน 3. สามารถจ่ายกำลังงานได้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน	1. ต้นทุนสูง 2. เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ เช่น ต้องการพื้นที่ป่าในการสร้าง และขัดขวางการดำรงชีวิตของสัตว์ป่าและสัตว์น้ำ
2. ระบบกักเก็บ พลังงานไฟฟ้า ชนิดการอัดอากาศ	1. ให้พิกัดกำลังงานไฟฟ้าที่สูง 2. มีการตอบสนองที่เร็ว โดยทั่วไป สามารถจ่ายกำลังงานจาก 0% ถึง 100% ได้ภายในเวลา 10 นาที	1. หาสถานที่ได้ยาก เนื่องจากมีเงื่อนไขที่หลากหลาย เช่น ต้องอยู่ใกล้ระบบส่งกำลังงานไฟฟ้าและมีพื้นที่ที่ใหญ่พอที่จะเก็บอากาศ 2. ต้นทุนในการสร้างสูง 3. ยังต้องมีการใช้พลังงานฟอสซิล (แก๊ส) ร่วมด้วยจึงมีการสร้างก๊าซเรือนกระจก
3. การสำรอง พลังงานไฟฟ้า ด้วยฟลายวีล	1. มีความเร็วในการตอบสนองที่สูงมาก เหมาะกับการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า เช่น ลดการกระเพื่อมของพลังงานที่เกิดจากแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียน หรือใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานแบบต่อเนื่อง (Uninterruptable Power Supply; UPS) 2. มีอายุการใช้งานนาน	1. เกิดกำลังงานสูญเสียตลอดเวลาในขณะที่เก็บพลังงาน 2. ต้องใช้ฟลายวีลที่มีขนาดใหญ่ หากใช้ความเร็วในการหมุนต่ำ 3. จ่ายพลังงานได้ในช่วงสั้นๆ 4. โดยปกติฟลายวีลจะถูกเก็บในสุญญากาศขณะทำงาน จึงทำให้ความยุ่งยากในการระบายความร้อน

กรณีที่มีการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนในสัดส่วนที่สูง จะทำให้ระบบประสบกับปัญหาความไม่แน่นอนของกำลังการผลิตและความไม่เสถียรของระบบไฟฟ้าโดยรวม นอกจากนี้ ระบบยังอาจประสบปัญหากระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับเข้ามาในระบบไฟฟ้าเมื่อปริมาณการใช้ไฟฟ้าน้อยกว่าที่ผลิตได้ ในปัจจุบัน ระบบกักเก็บพลังงานเข้ามามีบทบาทสำคัญในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว นอกจากนี้ ระบบกักเก็บพลังงานยังสามารถนำไปปรับใช้กับกลยุทธ์การบริหารจัดการกำลังไฟฟ้าต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น การกักเก็บพลังงานไฟฟ้าช่วงที่มีราคาต้นทุนต่ำและนำพลังงานไฟฟ้าออกมาใช้ในช่วงที่มีราคาต้นทุนสูง หรือนำมาใช้ปรับปรุงระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นพื้นฐานการพัฒนาโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart Grid)

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ระบบกักเก็บพลังงานมีอยู่หลายรูปแบบ โดยแต่ละแบบจะมีข้อได้เปรียบและเสียเปรียบที่แตกต่างกันออกไป คุณสมบัติของระบบกักเก็บพลังงานที่อยู่ในขอบเขตและความสนใจในงานวิจัยนี้มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของระบบเก็บพลังงานชนิดต่างๆ [3]-[10] (ต่อ)

ประเภท	ข้อดี	ข้อเสีย
4. การสำรองพลังงานไฟฟ้าด้วยแม่เหล็กตัวนำยิ่งยวด	<ol style="list-style-type: none"> 1. มีการตอบสนองที่รวดเร็วมาก สามารถเก็บพลังงานได้เต็ม 100 % ภายในเวลาไม่เกิน 1 นาที และคายพลังงานได้ภายในเวลาระดับมิลลิวินาที 2. มีอายุการใช้งานนาน (มากกว่า 20 ปี) เพราะไม่มีการสึกหรอจากการทำงาน 	<ol style="list-style-type: none"> 1. วัสดุอุณหภูมิ ต้องมีการรักษาระดับอุณหภูมิให้เหมาะสมกับชนิดของตัวนำที่นำมาใช้
5. ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่	<ol style="list-style-type: none"> 1. เป็นการออกแบบในลักษณะโมดูลาร์ (Modular Design) กล่าวคือสามารถที่จะทำซ้ำ หรือเพิ่ม/ลด ขนาดพิกัดกำลังงานของระบบได้โดยง่าย 2. ใช้เวลาในการสร้างสั้น 3. มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย เนื่องจากระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มีลักษณะเป็นระบบปิด จึงไม่ต้องการสารหรือวัสดุอื่นในการใช้งานยกเว้นน้ำ จึงไม่มีการปล่อยมลภาวะทางอากาศ นอกจากนั้นยังไม่ก่อให้เกิดเสียงรบกวนในการทำงาน จึงสามารถติดตั้งในเขตเมืองได้ 4. วัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตแบตเตอรี่ ส่วนใหญ่สามารถนำมารีไซเคิลได้ 5. สามารถประยุกต์ใช้ฟังก์ชันการใช้งานที่หลากหลาย เช่น ใช้เป็นตัวชดเชยค่าอาร์ ใช้ร่วมกับระบบพลังงานหมุนเวียน 	<ol style="list-style-type: none"> 1. พิกัดกำลังงานต่ำ เมื่อเทียบกับระบบกักเก็บพลังงานขนาดใหญ่ เช่น ระบบกักเก็บน้ำท้ายเขื่อน ซึ่งโดยส่วนใหญ่ระบบสำรองกำลังงานด้วยแบตเตอรี่มีพิกัดกำลังงานสูงสุดไม่เกิน 50 เมกกะวัตต์
6. ระบบกักเก็บพลังงานด้วยตัวเก็บประจุยิ่งยวด	<ol style="list-style-type: none"> 1. มี Power Density สูง มีอัตรากำลังงานในการอัดประจุและคายประจุที่สูง 2. การตอบสนองรวดเร็ว (ในหลักมิลลิวินาที) 3. มีอายุการใช้งานยาวนาน สามารถทำการอัดประจุและคายประจุได้ในระดับล้านครั้ง 4. มีความน่าเชื่อถือและความทนทานสูง 5. ไม่ต้องการการดูแลบำรุงรักษา 6. มีย่านอุณหภูมิในการทำงานกว้าง 7. เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Energy Density ต่ำมากเมื่อเทียบกับระบบการสำรองพลังงานแบบอื่น 2. ราคาต่อหน่วยพลังงานสูง

จากตารางที่ 2 ระบบกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่มีความพร้อมในการนำไปแก้ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าได้จริง แต่มีข้อเสียเปรียบในเรื่องความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า และมีการตอบสนองที่ไม่เร็วมากนักในทางปฏิบัติ [11]-[13]

โดยปกติแบตเตอรี่นั้นเหมาะกับการจ่ายโหลดหรืออัดประจุแบบนิ่งๆ แต่ในหลายๆ กรณี เช่น ปัญหาความผันผวนของกำลังไฟฟ้าที่ต้องการแก้ไขนั้น ระบบจะต้องทำการอัดหรือคายประจุในอัตราที่สูงในช่วงเวลาสั้นๆ จึงทำให้แบตเตอรี่เกิดความเครียดและส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งาน

สั้นลง [14]-[16] ดังนั้น การนำตัวเก็บประจุยิ่งยวดมาช่วยรับภาระในจุดนี้ จะช่วยเพิ่มความสามารถในการอัดหรือคายประจุไฟฟ้าในอัตราที่สูงได้อย่างรวดเร็ว และยังช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบโดยรวมให้ดีขึ้น

สำหรับการนำแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดมาใช้งานร่วมกันในระบบเก็บพลังงานนั้น จำเป็นต้องมีเทคนิคการจัดการพลังงานเพื่อช่วยประสานการทำงาน ซึ่งเทคนิคการจัดการพลังงานนั้นมีหลายรูปแบบ สามารถแบ่งออกตามวิธีการควบคุมได้เป็น 1) การจัดการพลังงานด้านบัลไฟสลับ

และ 2) การจัดการพลังงานด้านบัสไฟตรง สำหรับการจัดการพลังงานด้านบัสไฟสลับนั้นมิใช่ได้เปรียบที่ระบบมีความซับซ้อนน้อยและประสิทธิภาพสูง แต่มีข้อจำกัดสำหรับการใช้กับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานแบบผสม [17] สำหรับระบบการจัดการพลังงานด้านบัสไฟตรง มีข้อดีคือ มีการแบ่งอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเป็นกลุ่มๆ ทำให้สามารถควบคุมจัดการได้ง่าย เช่น การบาลานซ์สถานะประจุ (State-of-charge; SOC) อุปกรณ์กักเก็บพลังงานแต่ละชนิดมีการควบคุมโดยคอนเวอร์เตอร์ที่อิสระต่อกัน จึงทำให้มีความยืดหยุ่นในการทำงาน และทำให้สามารถใช้อุปกรณ์กักเก็บพลังงานได้เต็มศักยภาพ นอกจากนี้ยังสามารถต่ออุปกรณ์กักเก็บพลังงานเพิ่มเติมในภายหลังได้เพื่อเพิ่มความจุของระบบ แต่จะมีข้อ้อยที่ประสิทธิภาพทางพลังงานต่ำกว่าแบบแรก [18] โดยรายละเอียดและพิกัดต่างๆ ของระบบกักเก็บพลังงานที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สรุปได้ตามตารางที่ 3

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเน้นทำการศึกษาและทดลองระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมระหว่างแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุ

ยิ่งยวดด้วยเทคนิคการจัดการพลังงานที่บัสไฟตรง โดยใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ตั้งโหมดการทำงานรักษาแรงดันที่บัสไฟตรงให้คงที่ ทำงานร่วมกับคอนเวอร์เตอร์ (DC-to-DC Converter) ซึ่งจะทำให้สามารถควบคุมการอัดประจุ และคายประจุอุปกรณ์กักเก็บพลังงานทั้งสองชนิดได้อย่างอิสระ [19]-[21]

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

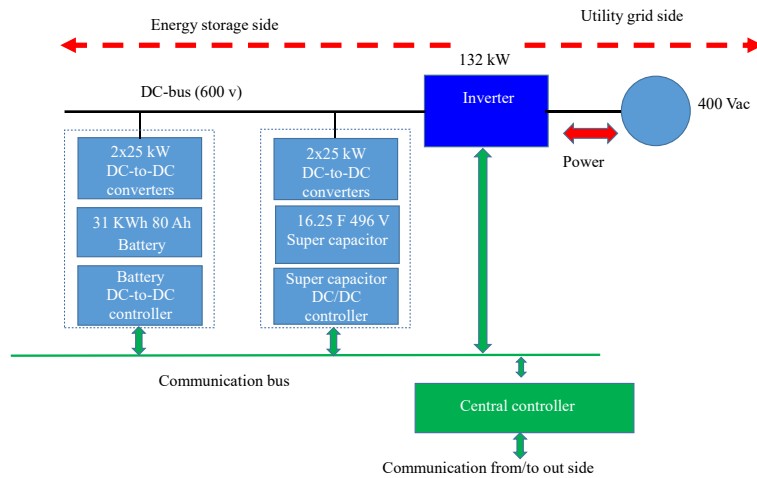
2.1 ระบบกักเก็บพลังงานและหลักการทำงานที่นำเสนอ

ระบบกักเก็บพลังงานที่นำเสนอมีส่วนประกอบหลักดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า ทำหน้าที่สร้างและควบคุมระดับแรงดันที่บัสไฟตรง (DC-bus Network) ให้มีค่าประมาณ 600 โวลต์ และที่บัสไฟตรงนี้ จะเชื่อมต่อกับแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดโดยผ่านคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งคอนเวอร์เตอร์นี้จะทำหน้าที่ควบคุมการอัดและคายประจุให้กับอุปกรณ์เก็บพลังงานทั้งสอง

ตารางที่ 3 คุณสมบัติพื้นฐานของระบบกักเก็บพลังงานที่นำเสนอ

รายการ	คุณสมบัติ
1. พิกัดกำลังงานรวมของระบบ	100 กิโลวัตต์
2. ชุดกักเก็บพลังงานด้วยแบตเตอรี่	พิกัดกำลังงาน: 25 กิโลวัตต์ แรงดันขาเข้า: 600 โวลต์ (จากบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์) แบตเตอรี่: ลิเธียม-ไอออน (Li-ion), 399.6 โวลต์ (แรงดันปกติ), 80 แอมแปร์-ชั่วโมง ความจุแบตเตอรี่: 31 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ชนิดของคอนเวอร์เตอร์: บัค-บูสต์ แบบสองทิศทาง ความถี่การสวิตช์: 4 กิโลเฮิร์ตซ์ ตัวเหนี่ยวนำสำหรับคอนเวอร์เตอร์: แกนเหล็ก (Iron Core), 3 มิลลิเฮนรี, 120 แอมแปร์
3. ชุดกักเก็บพลังงานด้วยตัวเก็บประจุยิ่งยวด	พิกัดกำลังงาน: 50 กิโลวัตต์ (2 x 25 กิโลวัตต์) แรงดันขาเข้า: 600 โวลต์ (จากบัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์) ตัวเก็บประจุยิ่งยวด: 16.2 ฟารัด, 496 โวลต์ ย่านแรงดันทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด: 250-450 โวลต์ ชนิดของคอนเวอร์เตอร์: บัค-บูสต์ แบบสองทิศทาง ความถี่การสวิตช์: 4 กิโลเฮิร์ตซ์ ตัวเหนี่ยวนำสำหรับคอนเวอร์เตอร์: แกนเหล็ก (Iron Core), 3 มิลลิเฮนรี 120 แอมแปร์
4. อินเวอร์เตอร์	กำลังงานสูงสุด: 132 กิโลวัตต์ แรงดันขาเข้า: 400 โวลต์ 3 เฟส ชนิดของอินเวอร์เตอร์: อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส (d-q control) แรงดันบัสไฟตรง: 600 โวลต์ โหมดการทำงาน: ควบคุมแรงดันบัสไฟตรง
5. ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ	400 โวลต์, 3 เฟส, 50 เฮิร์ตซ์

พิรพล จันท์หอม และคณะ, “การศึกษาระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมระหว่างแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวดด้วยเทคนิคการจัดการพลังงานที่บัสไฟตรง.”



รูปที่ 1 ระบบกักเก็บพลังงานที่นำเสนอในงานวิจัย

เนื่องจากอินเวอร์เตอร์มีการควบคุมแรงดันที่บัสไฟตรงให้คงที่ ขณะที่คอนเวอร์เตอร์ทำการอัดหรือคายประจุอยู่ชั้นอินเวอร์เตอร์จะทำการจ่ายพลังงานเข้าหรือดึงพลังงานจากระบบไฟฟ้าเข้ามาในระบบเพื่อควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้คงที่ไว้ตลอดเวลา ซึ่งปริมาณพลังงานดังกล่าวจะสัมพันธ์กับปริมาณการอัดหรือคายประจุของคอนเวอร์เตอร์ที่บริเวณบัสไฟตรง

สำหรับการควบคุมทั้งระบบนั้น จะมีชุดควบคุมกลาง (Central Controller) ทำหน้าที่ในการควบคุมสั่งงานโดยรวม เช่น ส่งคำสั่งให้คอนเวอร์เตอร์ทำการอัดประจุหรือคายประจุตามพิกัดกำลังงานที่กำหนด โดยที่ระบบกักเก็บพลังงานทั้งสองมีตัวควบคุมอีกชุดที่ทำการรับคำสั่ง และควบคุมการทำงานภายในระบบของตัวเอง

2.2 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นอินเวอร์เตอร์สำเร็จที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ทั้งนี้เนื่องจาก งานวิจัยมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาชุดคอนเวอร์เตอร์ และศึกษาการจัดการพลังงานด้านบัสไฟตรง ซึ่งอินเวอร์เตอร์นี้มีโครงสร้างวงจรมูลฐาน และตัวควบคุมดังแสดงในรูปที่ 2 [21] ประกอบด้วยอุปกรณ์สวิตชิง S_1-S_6 โดยอุปกรณ์สวิตซ์เหล่านี้จะทำงานร่วมกับตัวเหนี่ยวนำ (L) และตัวควบคุม (ดังแสดงในเส้นประ) เพื่อ

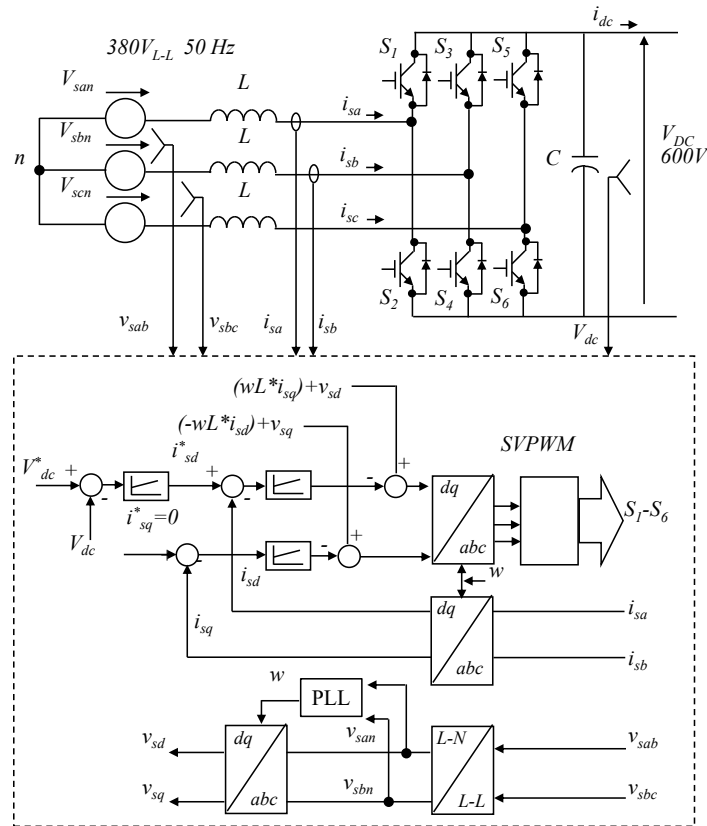
ควบคุมการทำงานของระบบให้เป็นไปตามต้องการ

ตัวควบคุมดังกล่าวมีหลักการการทำงานโดยการแปลงค่าแรงดันและกระแสจากแกนนิ่ง (a, b, c) ไปอยู่บนแกนหมุน (d, q) โดยค่าบนแกนหมุน d และ q สามารถแยกควบคุมได้อย่างอิสระ โดยการควบคุมค่าในแกน d นั้น จะมีผลต่อการสร้างแรงดันให้กับบัสไฟตรง (V_{dc}) แต่ค่าในแกน q จะมีผลต่อค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน (Reactive Power) ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงทำการควบคุมค่าในแกน d เพื่อรักษาระดับแรงดันบัสไฟตรงให้คงที่ (600 โวลต์) และกำหนดค่าสั่งในแกน q ให้เท่ากับศูนย์ เนื่องจากต้องการควบคุมเฉพาะกำลังไฟฟ้าจริง (Active Power) เท่านั้น จากนั้นจึงทำการแปลงค่ากลับอีกครั้ง เพื่อนำไปขับอุปกรณ์สวิตชิง โดยการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์พีดีบีบลิวเอ็ม (SVPWM)

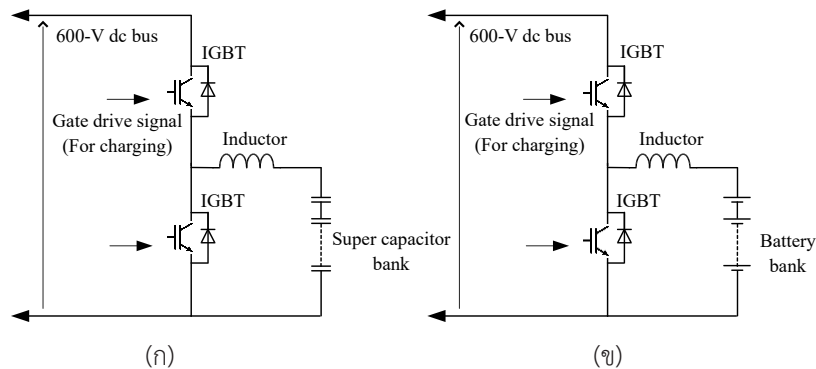
2.3 คอนเวอร์เตอร์

วงจรถนคอนเวอร์เตอร์แบบบัส-บูสต์ต่อกับแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดแสดงในรูปที่ 3 (ก) และ (ข) ตามลำดับ [22], [23] โดยทั้งสองจะมีลักษณะวงจรที่คล้ายกัน สำหรับการควบคุมการอัดและคายประจุนั้น ตัวคอนเวอร์เตอร์จะสลับกันทำงานระหว่างโหมดบัสและโหมดบูสต์ ซึ่งรายละเอียดการทำงานในแต่ละโหมดจะอธิบายดังต่อไปนี้

ขณะทำการอัดประจุ คอนเวอร์เตอร์จะทำงานในโหมดบัส



รูปที่ 2 โครงสร้างและการควบคุมพื้นฐานของอินเวอร์เตอร์สำหรับเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า

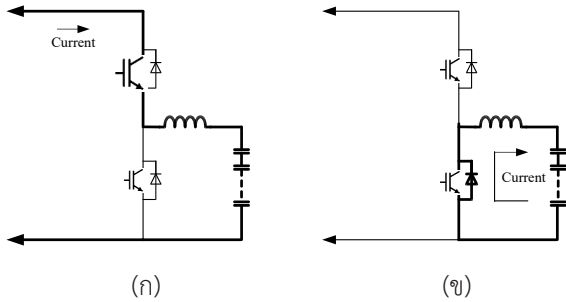


รูปที่ 3 คอนเวอร์เตอร์แบบกักเก็บพลังงานที่นำเสนอ สำหรับ (ก) ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (ข) แบตเตอรี่

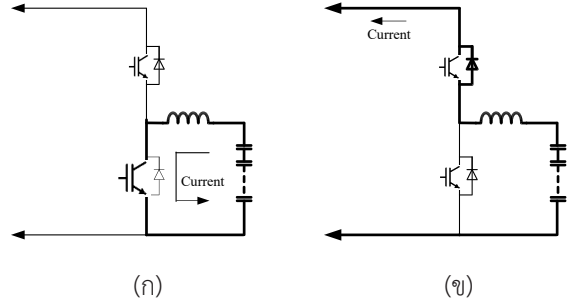
ทิศทางของกระแสจะไหลจากบัสไฟตรงไปยังอุปกรณ์กักเก็บพลังงานดังแสดงในรูปที่ 4 โดยการทำงานโหมดนี้ ไอจีบีทีตัวล่างจะถูกควบคุมไม่ให้นำกระแส แต่กระแสจะสามารถไหลผ่านไดโอดภายในตัวไอจีบีทีได้ ซึ่งจะมีเพียง

ไอจีบีทีที่ตัวบนที่ทำงานตามค่าวัฏจักรงาน (Duty Cycle; D) โดยจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.0–1.0 หากวัฏจักรงานมีค่าสูงแรงดันขาออก (ในโหมดนี้จะเป็น VES) จะสูงตาม ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

พิรพล จันทรหอม และคณะ, “การศึกษาระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมระหว่างแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวดด้วยเทคนิคการจัดการพลังงานที่บัสไฟตรง.”



รูปที่ 4 คอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดชด (ก) ช่วงนำกระแส (t_{bk_on}) (ข) ช่วงหยุดนำกระแส (t_{bk_off})



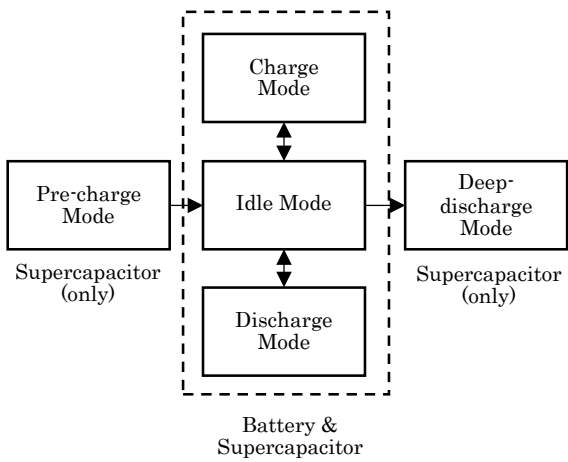
รูปที่ 5 คอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดบูสต์ (ก) ช่วงนำกระแส (t_{bt_on}) (ข) ช่วงหยุดนำกระแส (t_{bt_off})

$$V_{ES} = D_{Bk} \times V_{dc-bus} \tag{1}$$

เมื่อ V_{dc-bus} คือ แรงดันบัสไฟตรง V_{ES} คือ แรงดันของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน และ D_{Bk} คือ วัฏจักรงานของบัตคอนเวอร์เตอร์ เมื่อต้องการทำการคายประจุ คอนเวอร์เตอร์จะทำงานในโหมดบูสต์ ทิศทางของกระแสจะไหลจากอุปกรณ์กักเก็บพลังงานไปยังบัสไฟตรงดังแสดงในรูปที่ 5 และจะมีเพียงไอจีบีทีตัวล่างที่ทำงานตามค่าวัฏจักรงาน โดยแรงดันขาออก (ในโหมดนี้จะเป็น V_{dc-bus}) จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$V_{dc-bus} = V_{ES} / (1 - D_{Bt}) \tag{2}$$

เมื่อ D_{Bt} คือ วัฏจักรงานของบูสต์คอนเวอร์เตอร์



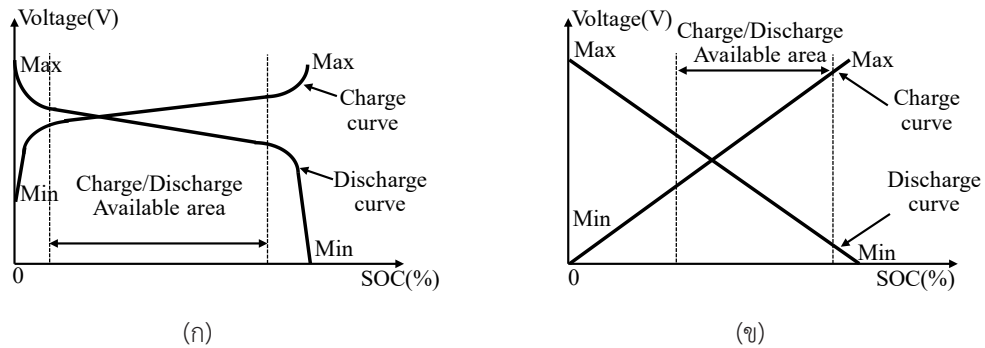
รูปที่ 6 โหมดการการอัดและคายประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่

2.4 เทคนิคการอัดประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

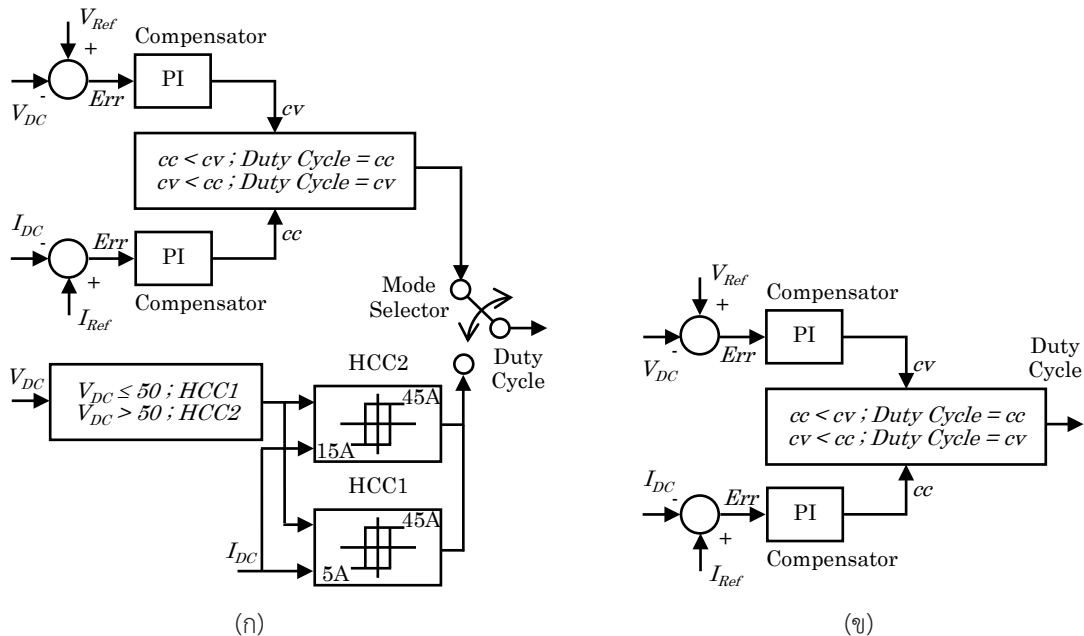
การอัดและคายประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะแบ่งออกเป็น 2 โหมดหลัก คือ 1) การอัดและคายประจุปกติ และ 2) การอัดและคายประจุในตอนเริ่มต้น (Pre-charge) และสิ้นสุดการทำงาน (Deep-discharge) ซึ่งจะแตกต่างจากแบตเตอรี่ที่มีเพียงการอัดและคายประจุปกติ ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 6 ทั้งนี้เนื่องจากแรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในตอนเริ่มต้นขณะไม่มีประจุไฟฟ้าเก็บอยู่จะมีค่าต่ำมาก (ประมาณศูนย์โวลต์) ดังแสดงในรูปที่ 7 (ข) ฉะนั้น การจะทำให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีระดับแรงดัน ที่พร้อมทำงานใน

โหมดปกติ นั้น จะต้องอาศัยโหมดการอัดประจุในตอนเริ่มต้นเข้ามาช่วยอัดประจุในสภาวะนี้ และในทางกลับกัน เมื่อต้องการหยุดการทำงานของระบบ จำเป็นต้องคายประจุที่เก็บอยู่ออกให้หมดเพื่อลดระดับแรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวดลงมาที่ประมาณศูนย์โวลต์ (เพื่อความปลอดภัยต่อผู้ใช้งานในกรณีที่ต้องทำการตรวจสอบและบำรุงรักษาระบบ) สำหรับการอัดประจุ และคายประจุในตอนเริ่มต้นและสิ้นสุดการทำงานนี้ วงจรบัต-บูสต์คอนเวอร์เตอร์จะต้องทำงานในสภาวะที่ต้องการอัตราขยายที่สูง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคการควบคุมแบบ Adaptive Hysteresis โดยเทคนิคนี้ทางคณะผู้วิจัยได้ยื่นจดอนุสิทธิบัตรดัง [24] โดยมีรายละเอียด

พีรพล จันทร์หอม และคณะ, “การศึกษาระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมระหว่างแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวดด้วยเทคนิคการจัดการพลังงานที่บัสไฟตรง.”



รูปที่ 7 การอัดประจุและคายประจุสำหรับการใช้งานจริงของ (ก) แบตเตอรี่และ (ข) ตัวเก็บประจุยิ่งยวด



รูปที่ 8 ตัวควบคุมการอัดและคายประจุของ (ก) แบตเตอรี่ และ (ข) ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

การทำงานตามบล็อกไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 8 (ก)

ในส่วนของการอัดและคายประจุในโหมดปกติของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ช่วงของแรงดันเฉลี่ยในการทำงานในโหมดนี้จะขึ้นอยู่กับกรอกแบบใช้งาน โดยทั่วไปจะกำหนดไว้ในช่วงประมาณ 40% ถึง 90% ของพิกัดแรงดันสูงสุด สำหรับโหมดการอัดประจุและคายประจุปกตินี้จะใช้เทคนิคการควบคุมวงรอบปิดแบบพีไอ (Closed-loop PI Control) ที่ประกอบด้วยโหมดควบคุมแรงดันคงที่ (Constant Voltage; CV) และโหมดควบคุมกระแสคงที่ (Constant Current; CC)

ทั้งสองโหมดจะมีการคำนวณไปพร้อมๆ กัน โดยสัญญาณขาออกของพีไอตัวใดตัวหนึ่งที่มีค่าน้อยกว่าอีกตัวจะถูกเลือกนำไปใช้เป็นตัวควบคุมการทำงานเพื่อควบคุมคอนเวอร์เตอร์ซึ่งบล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 8 (ก)

2.5 เทคนิคการอัดประจุและคายประจุของแบตเตอรี่

ในกรณีของแบตเตอรี่นั้น เมื่อพิจารณาแรงดันของแบตเตอรี่ดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) ขณะที่สถานะประจุมีค่า

สูงหรือต่ำมากๆ ระดับแรงดันของแบตเตอรี่จะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ในสภาวะนี้ ระบบจะไม่มี การอัดประจุหรือคายประจุ เพื่อป้องกันการเสียหายของแบตเตอรี่จากสภาวะการอัดประจุเกินและคายประจุเกิน โดยมีการกำหนดขอบเขตการอัดประจุ และคายประจุให้อยู่ในช่วงที่ปลอดภัยคือ เมื่อแรงดันรวมของแบตเตอรี่ทั้งชุดน้อยกว่า 345.6 โวลต์ จะหยุดการคายประจุ และเมื่อแรงดันรวมของแบตเตอรี่ทั้งชุดมากกว่า 432 โวลต์ จะหยุดการอัดประจุ สำหรับการอัดประจุหรือคายประจุปกติ นั้น จะกำหนดไว้ไม่เกิน 80 แอมแปร์ ซึ่งเท่ากับ 1 C-rate ของแบตเตอรี่ที่นำมาใช้งาน (รุ่น SP44-20S-80) ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ลิเธียม-ไอออนชนิดเอ็นซีเอ (NCA)

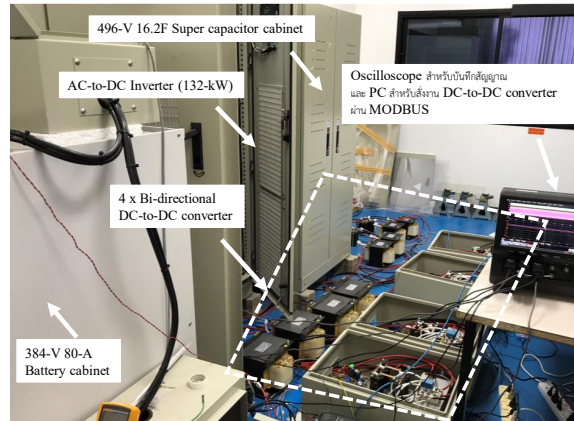
สำหรับเทคนิคการควบคุมของแบตเตอรี่ในโหมดอัดและคายประจุปกติ จะใช้เช่นเดียวกับเทคนิคของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในโหมดปกติ แต่จะไม่มีในส่วนของ การควบคุมกระแสแบบ Adaptive Hysteresis รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 8 (ข)

3. ผลการทดลอง

ภาพรวมของต้นแบบระบบกักเก็บพลังงานในงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 9 และรูปที่ 10 ประกอบด้วย 1) อินเวอร์เตอร์ 2) คอนเวอร์เตอร์สำหรับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจำนวน 4 ตัว 3) มอดูลตัวเก็บประจุยิ่งยวด และ 4) มอดูลแบตเตอรี่ โดยแต่ละมอดูลจะต่อเข้ากับคอนเวอร์เตอร์ 2 ตัว และจะมีตัวควบคุมกลางคอยทำหน้าที่รับคำสั่ง และประสานการทำงานระหว่างคอนเวอร์เตอร์แต่ละตัวให้ทำงานตามคำสั่งจากผู้ใช้งาน

การศึกษาทดลองในบทความวิจัยนี้ เบื้องต้นจะใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลเป็นตัวควบคุมกลางเพื่อทำหน้าที่รับคำสั่ง โดยคอนเวอร์เตอร์แต่ละตัวจะรับคำสั่งผ่านโพรโทคอลแบบมอดบัส (MODBUS) ในโหมดอาร์ทียู (RTU) ซึ่งจะแบ่งการทดสอบเป็น 3 กรณี คือ 1) การอัดและคายประจุในตอนเริ่มต้นและสิ้นสุดการทำงานตัวเก็บประจุยิ่งยวด 2) การอัดและคายประจุปกติสำหรับทั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ โดยมีรายละเอียดผลการทำงานดังนี้

ผลการทำงานในโหมดการอัดประจุในตอนเริ่มต้นของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแสดงในรูปที่ 11 ในระหว่างการอัด



รูปที่ 9 ระบบกักเก็บพลังงานจริงสำหรับการทดสอบ

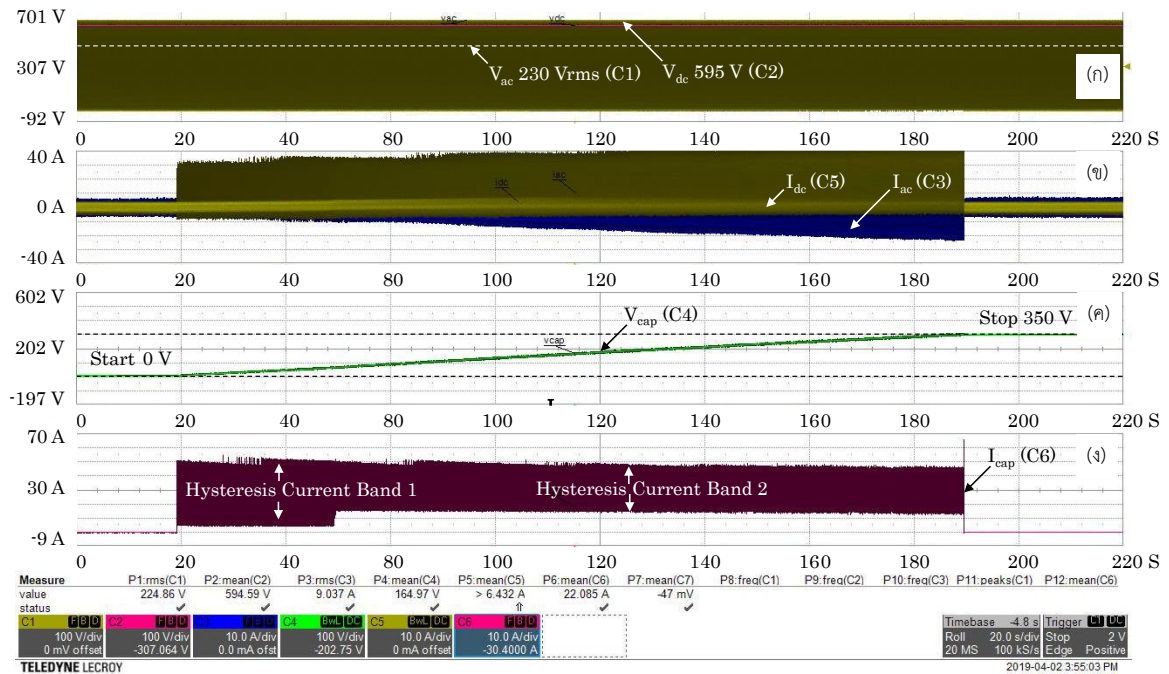


(ก)

(ข)

รูปที่ 10 (ก) มอดูลแบตเตอรี่ และ (ข) มอดูลตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ประกอบในตู้สำหรับใช้ในระบบกักเก็บพลังงาน

ประจุนี้ กระแสของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะถูกควบคุมแบบฮิสเทอรีซิส ดังจะเห็นได้จากแถบกระแสฮิสเทอรีซิสที่มีการเปลี่ยนแปลงตามระดับแรงดันของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน ซึ่งเป็นไปตามเทคนิคการควบคุมดังอธิบายในส่วนของเทคนิคการอัดประจุและคายประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และหลังจากเริ่มทำการอัดประจุนี้ แรงดันของตัวเก็บประจุจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นโดยเริ่มต้นจากประมาณศูนย์โวลต์ไปจนถึงระดับแรงดันพร้อมทำงาน (กำหนดไว้ที่ประมาณ 345 โวลต์) หลังจากนั้น ระบบจะหยุดการควบคุมกระแสแบบฮิสเทอรีซิสและเตรียมพร้อมที่จะทำงานในโหมดปกติ



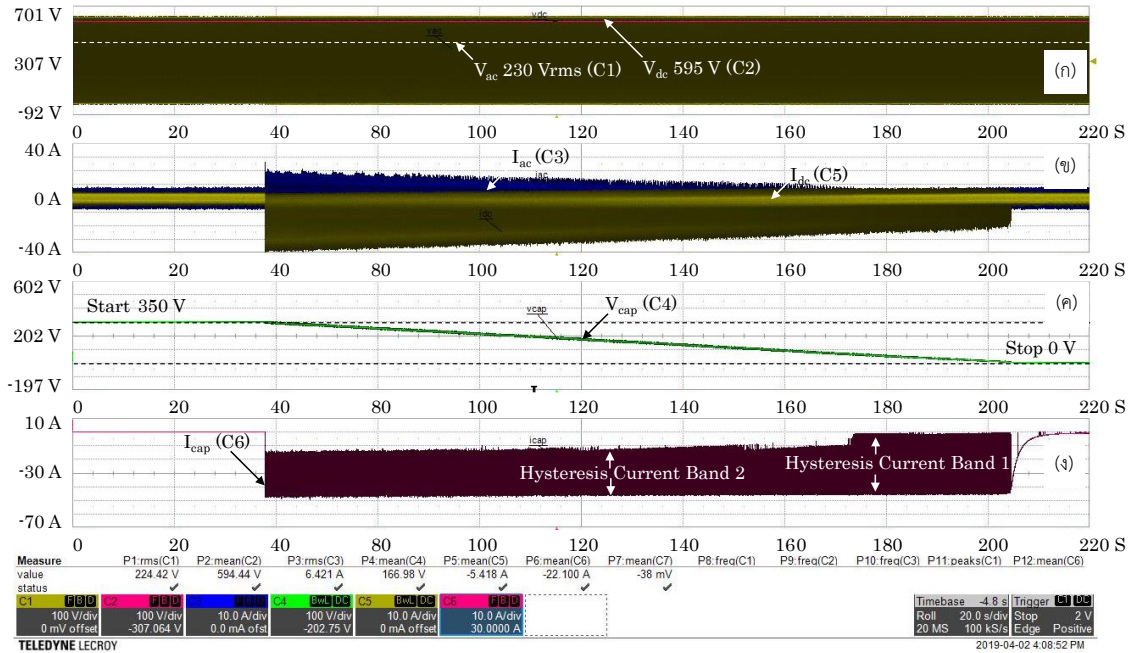
รูปที่ 11 ผลทดสอบการอัดประจุตัวเก็บประจุยิ่งยวดในตอนเริ่มต้น (ก) แรงดันบัสไฟสลับและบัสไฟตรง (ข) กระแสไฟสลับและกระแสไฟตรง (ค) แรงดันตัวเก็บประจุยิ่งยวด (ง) กระแสตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ในส่วนของการคายประจุเมื่อสิ้นสุดการทำงานนั้น กระแสและแรงดันจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับการทำงานในโหมดการอัดประจุในตอนเริ่มต้น โดยจะเห็นว่าขณะทำงานในโหมดนี้ แรงดันจะค่อยๆ ลดลงจนอยู่ที่ประมาณศูนย์โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 12 และแถบกระแสฮิสเทอรีซิสจะมีการเปลี่ยนแปลงตามระดับแรงดันของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน เช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่า เทคนิคการควบคุมกระแสแบบฮิสเทอรีซิส สามารถควบคุมวงจรบัส-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ให้สามารถทำงานในภาวะที่ต้องการอัตราการขยายที่สูงได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ ยังแสดงให้เห็นข้อได้เปรียบของการจัดการพลังงานด้านบัสไฟตรง ที่ระบบสามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์ที่มีระดับแรงดันที่หลากหลาย

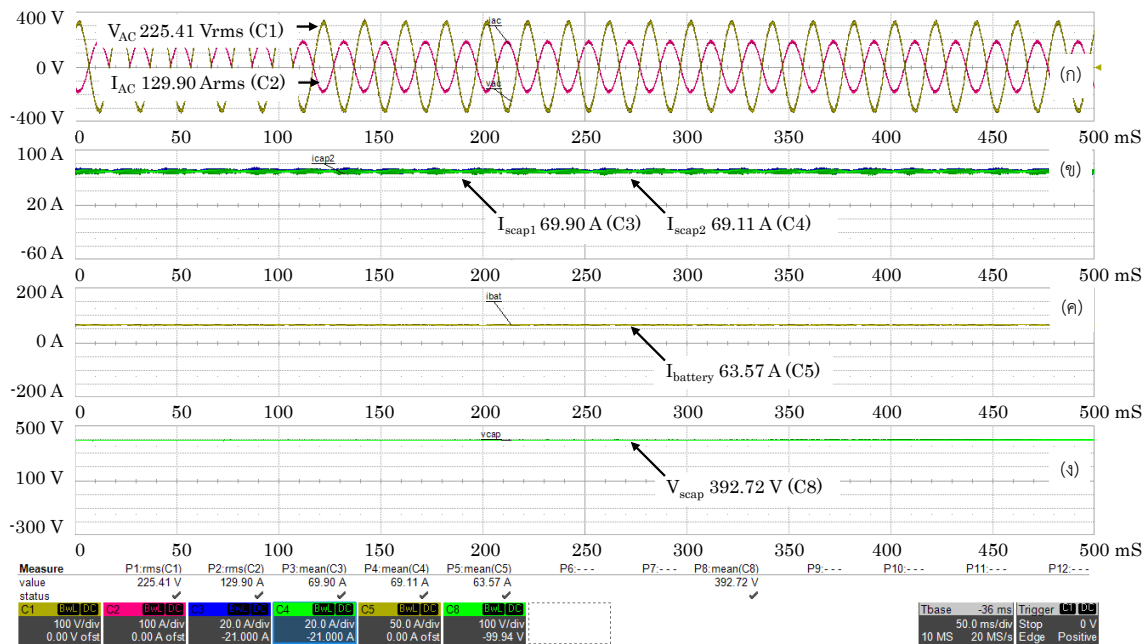
รูปที่ 13 และ 14 แสดงการอัดและคายประจุปกติของระบบกักเก็บพลังงานทั้งระบบ ขณะทำงานในกรณีนี้ คอนเวอร์เตอร์ทั้ง 4 ตัว จะทำงานในการอัดหรือคายประจุพร้อมกันโดยรับคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ โดยในขณะที่ทำการอัด

ประจุนั้น กระแสไฟจะไหลจากบัสไฟตรงเข้าสู่อุปกรณ์กักเก็บพลังงานทั้งสอง (ทิศทางเป็นบวก) และอินเวอร์เตอร์จะทำการดึงกำลังไฟฟ้าจากระบบเพื่อรักษาระดับแรงดันบัสไฟตรง โดยคิดเป็นค่ากำลังไฟฟ้ารวมประมาณ 80 กิโลวัตต์ ซึ่งกระแสไฟฟ้าสลับนี้จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 13 (ก)

ในส่วนของการโหมดคายประจุ กระแสไฟฟ้าจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับโหมดอัดประจุในข้างต้น โดยจะไหลย้อนจากอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเข้าสู่บัสไฟตรง และอินเวอร์เตอร์จะทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ไหลมาที่บัสไฟตรงนี้เข้าสู่ระบบไฟฟ้า โดยคิดเป็นค่ากำลังไฟฟ้ารวมประมาณ 87 กิโลวัตต์ และกระแสไฟฟ้าสลับจะมีทิศทางเดียวกันกับแรงดันไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 14 (ก) ซึ่งจากผลการดำเนินงานนี้ เป็นการยืนยันให้เห็นความสามารถของระบบเก็บพลังงานในการทำงานร่วมกันระหว่างอินเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดรักษาระดับแรงดันที่บัสไฟตรงและคอนเวอร์เตอร์บัส-บูสต์

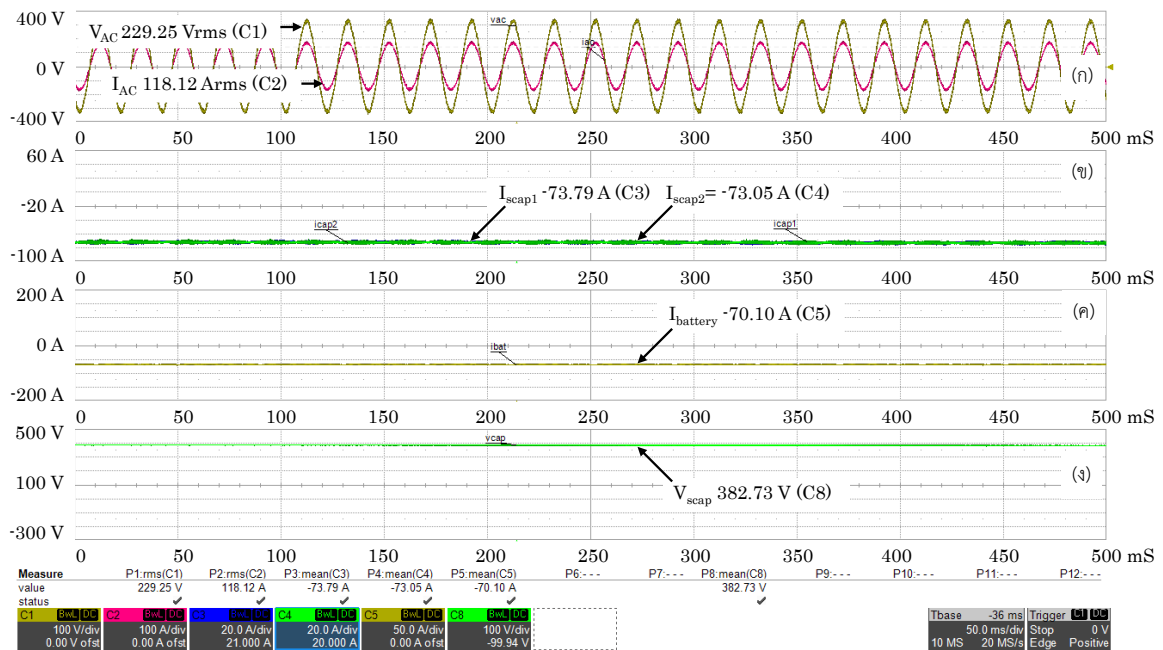


รูปที่ 12 ผลทดสอบการคายประจุตัวเก็บประจุยิ่งยวดเมื่อสิ้นสุดการทำงาน (ก) แรงดันบัสไฟสลับและบัสไฟตรง (ข) กระแสไฟสลับและกระแสไฟตรง (ค) แรงดันตัวเก็บประจุยิ่งยวด (ง) กระแสตัวเก็บประจุยิ่งยวด



รูปที่ 13 ผลทดสอบการอัดประจุทั้งระบบที่พิกัดกำลังงานประมาณ 80 กิโลวัตต์ (ก) แรงดันและกระแสไฟสลับ (ข) กระแสตัวเก็บประจุยิ่งยวด (ค) กระแสแบตเตอรี่ (ง) แรงดันตัวเก็บประจุยิ่งยวด

พีรพล จันทร์หอม และคณะ, "การศึกษาระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมระหว่างแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวดด้วยเทคนิคการจัดการพลังงานที่บัสไฟตรง."

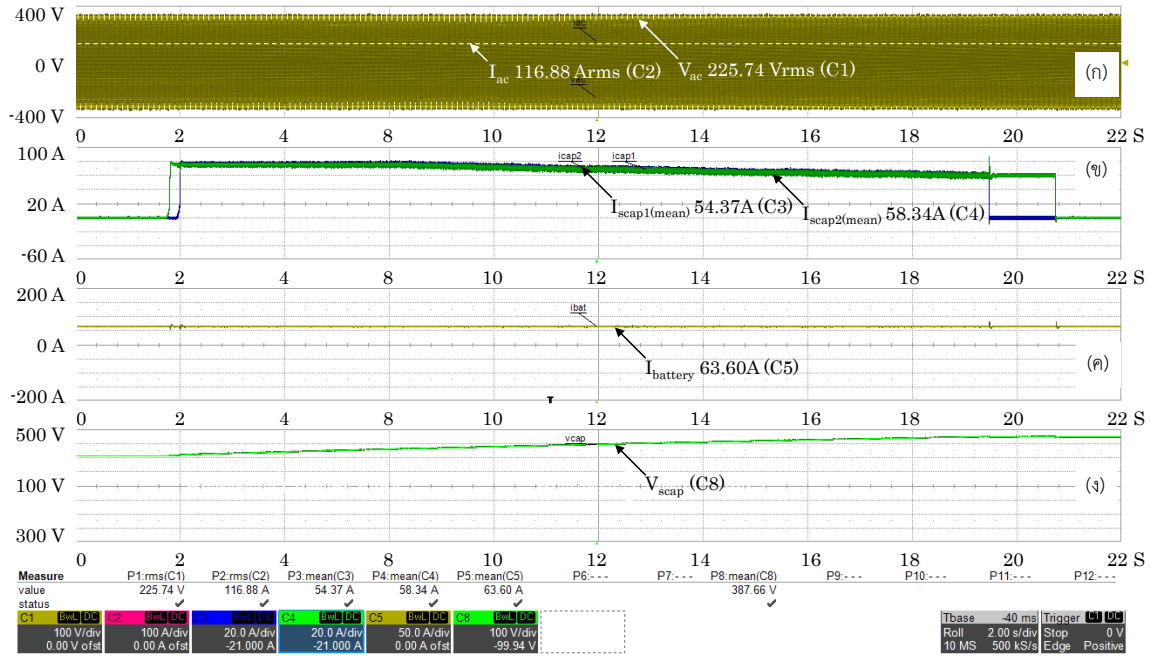


รูปที่ 14 ผลทดสอบการคายประจุทั้งระบบที่พิกัดกำลังงานประมาณ 87 กิโลวัตต์ (ก) แรงดันและกระแสไฟสลับ (ข) กระแสตัวเก็บประจุยิ่งยวด (ค) กระแสแบตเตอรี่ (ง) แรงดันตัวเก็บประจุยิ่งยวด

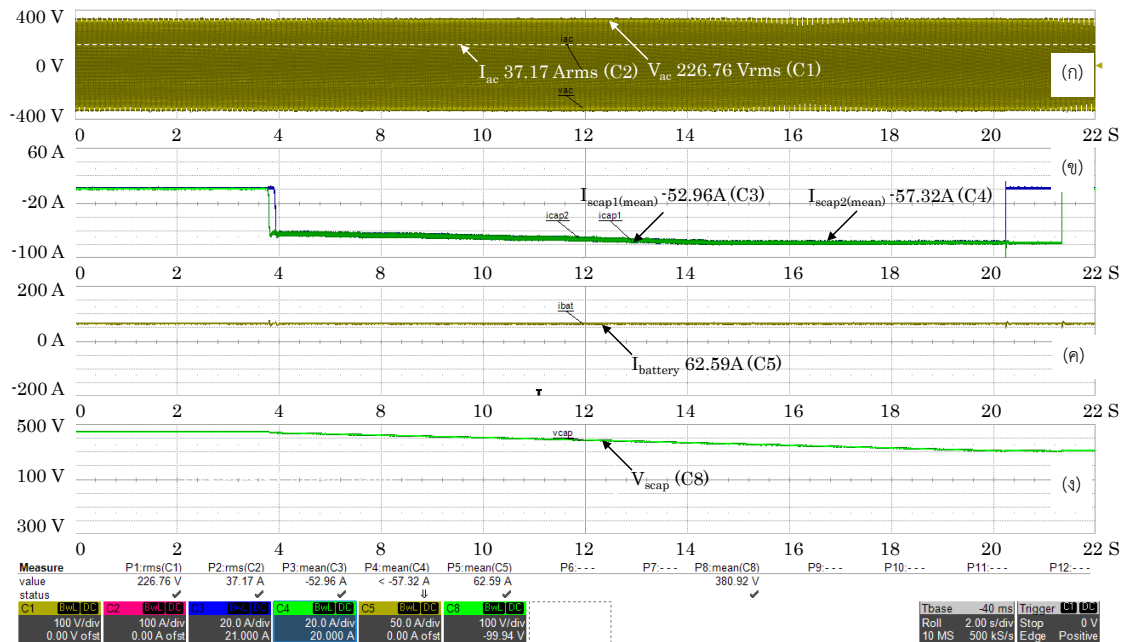
ในกรณีสุดท้าย เป็นผลการทำงานในการอัดและคายประจุปกติของระบบกักเก็บพลังงานซึ่งคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 4 ตัว จะทำงานในการอัดหรือคายประจุไม่พร้อมกัน โดยในรูปที่ 15 และ 16 จะควบคุมให้ระบบกักเก็บพลังงานอัดประจุแบตเตอรี่ที่กำลังไฟที่ประมาณ 25 กิโลวัตต์ (โดยใช้คอนเวอร์เตอร์ทำงานร่วมกัน 2 ตัว) และในช่วงเดียวกันนี้ คอนเวอร์เตอร์อีก 2 ตัว ที่เหลือจะทำการอัดและคายประจุตัวเก็บประจุยิ่งยวดพร้อมกันที่กำลังไฟรวมประมาณ 50 กิโลวัตต์ ซึ่งเมื่อพิจารณาขนาดกระแสไฟฟ้าสลับรวม (C2) พบว่า ขนาดกระแสรวมจะเพิ่มขึ้นเมื่อตัวเก็บประจุยิ่งยวดทำการอัดประจุ และในทางกลับกัน ขนาดกระแสรวมดังกล่าวจะลดลงเมื่อตัวเก็บประจุยิ่งยวดทำการคายประจุ ทั้งนี้ เนื่องจากเกิดการเสริมและหักล้างกันของกระแสไฟฟ้าที่บัสไฟตรงจากการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดโดยคอนเวอร์เตอร์

รูปที่ 17 และ 18 เป็นการทดสอบลักษณะเดียวกันกับ

รูปที่ 15 และ 16 แต่จะแตกต่างกันตรงที่เริ่มต้นจะควบคุมระบบให้คายประจุแบตเตอรี่ที่กำลังไฟที่ประมาณ 25 กิโลวัตต์ และในช่วงเดียวกันนี้ คอนเวอร์เตอร์อีก 2 ตัว ที่เหลือ จะทำการอัดและคายประจุตัวเก็บประจุยิ่งยวดพร้อมกันที่กำลังไฟรวมประมาณ 50 กิโลวัตต์ เช่นเดียวกันกับกรณีข้างต้น ซึ่งเมื่อพิจารณาขนาดกระแสไฟฟ้าสลับรวม (C2) พบว่า ขนาดกระแสรวมจะเพิ่มขึ้นเมื่อตัวเก็บประจุยิ่งยวดทำการคายประจุ และในทางกลับกัน ขนาดกระแสรวมดังกล่าวจะลดลงเมื่อตัวเก็บประจุยิ่งยวดทำการอัดประจุ ทั้งนี้ เนื่องจากเกิดการเสริมและหักล้างกันของกระแสไฟฟ้าที่บัสไฟตรง ในทำนองเดียวกันกับกรณีก่อนหน้านี้ ผลการทำงานนี้ เป็นการยืนยันความสามารถในการจัดการพลังงานที่บัสไฟตรง โดยคอนเวอร์เตอร์ทั้ง 4 ตัว สามารถอัดประจุหรือคายประจุได้อย่างอิสระ นอกจากนี้ยังสังเกตพบว่า ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถอัดประจุและคายประจุได้ในระดับกำลังไฟที่สูงอย่างรวดเร็วตามที่ไว้ใจไว้ในตอนต้น

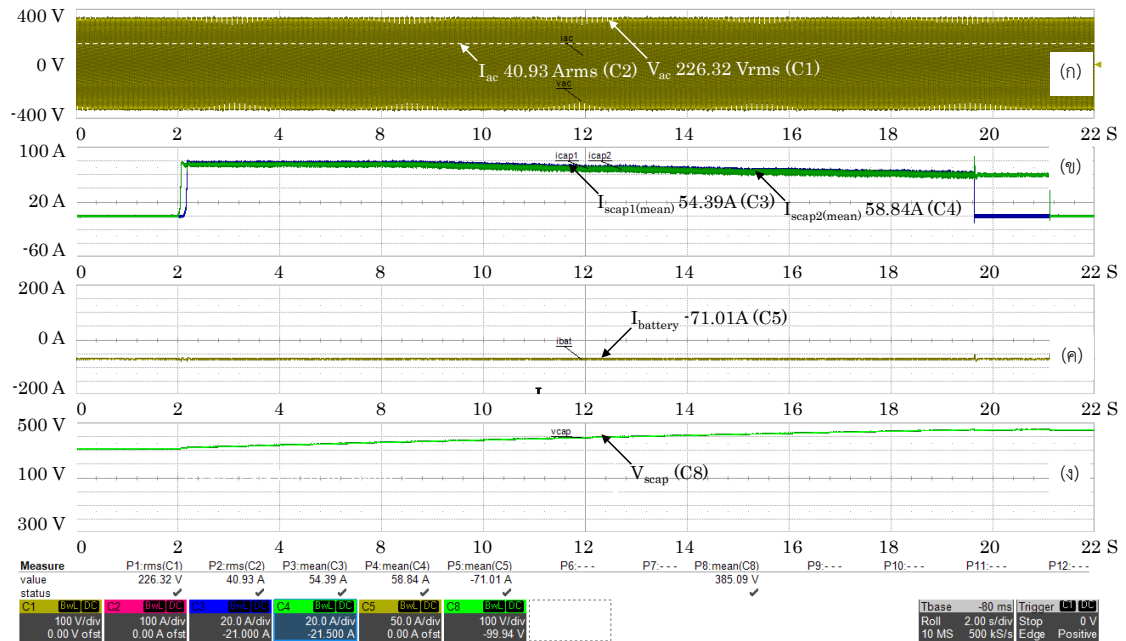


รูปที่ 15 ผลทดสอบการอัดประจุแบตเตอรี่และให้ฮอตประจุตัวเก็บประจุยิ่งยวด (ก) แรงดันและกระแสไฟสลับ (ข) กระแสตัวเก็บประจุยิ่งยวด (ค) กระแสแบตเตอรี่ (ง) แรงดันตัวเก็บประจุยิ่งยวด

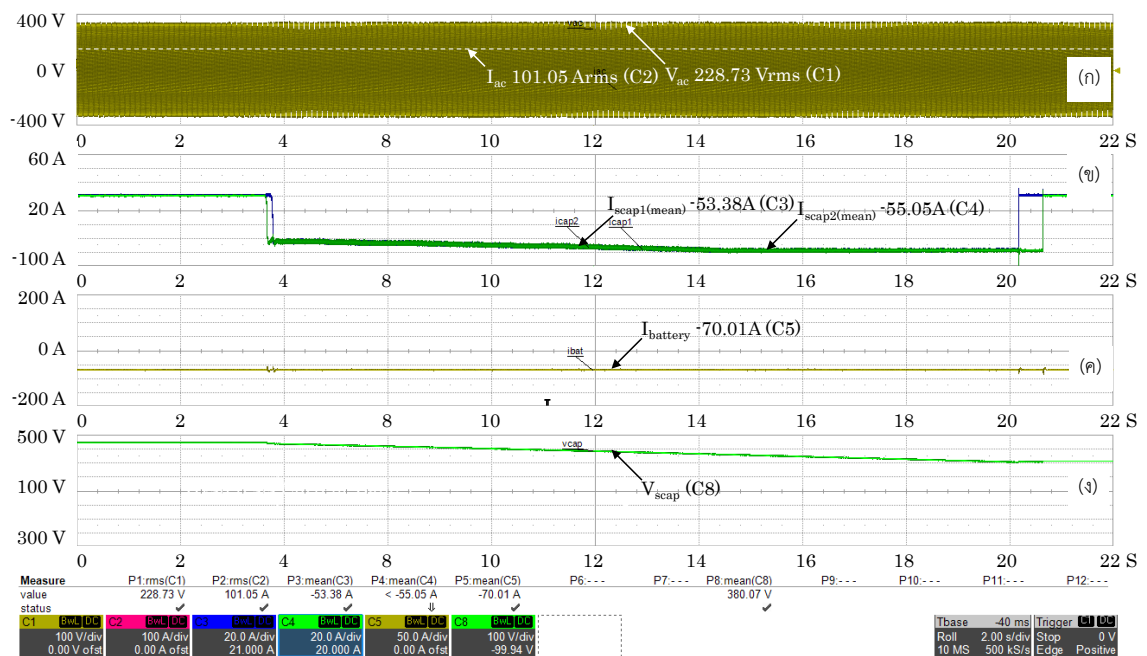


รูปที่ 16 ผลทดสอบการอัดประจุแบตเตอรี่และให้คายประจุตัวเก็บประจุยิ่งยวด (ก) แรงดันและกระแสไฟสลับ (ข) กระแสตัวเก็บประจุยิ่งยวด (ค) กระแสแบตเตอรี่ (ง) แรงดันตัวเก็บประจุยิ่งยวด

พีรพล จันทร์หอม และคณะ, “การศึกษาระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมระหว่างแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวดด้วยเทคนิคการจัดการพลังงานที่ปลั๊กไฟตรง.”



รูปที่ 17 ผลทดสอบการคายประจุแบตเตอรี่และให้อัดประจุตัวเก็บประจุยิ่งยวด (ก) แรงดันและกระแสไฟฟสลับ (ข) กระแสตัวเก็บประจุยิ่งยวด (ค) กระแสแบตเตอรี่ (ง) แรงดันตัวเก็บประจุยิ่งยวด



รูปที่ 18 ผลทดสอบการคายประจุแบตเตอรี่และให้อัดประจุตัวเก็บประจุยิ่งยวด (ก) แรงดันและกระแสไฟฟสลับ (ข) กระแสตัวเก็บประจุยิ่งยวด (ค) กระแสแบตเตอรี่ (ง) แรงดันตัวเก็บประจุยิ่งยวด



4. อภิปรายผลและสรุป

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการศึกษา และทดลองระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมระหว่างแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวด เพื่อนำจุดเด่นของแบตเตอรี่ที่มีความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้าสูง และจุดเด่นของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่มีความหนาแน่นกำลังไฟสูงมาเสริมกันเพื่อเพิ่มศักยภาพโดยรวมของระบบกักเก็บพลังงาน ทั้งนี้การที่จะนำเอาจุดเด่นของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานแต่ละชนิดมาเสริมสมรรถนะของระบบนั้น จำเป็นจะต้องออกแบบระบบกักเก็บพลังงานให้มีความสามารถในการจัดการพลังงานเพิ่มขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ จะใช้เทคนิคการจัดการพลังงานด้านบัสไฟตรง ที่ทำงานร่วมกับวงจรคอนเวอร์เตอร์ที่สามารถควบคุมกระแสให้ไหลได้แบบสองทิศทาง ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นว่า คอนเวอร์เตอร์ดังกล่าวสามารถควบคุมปริมาณการอัดประจุและคายประจุให้กับแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดได้อย่างอิสระในระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นความสามารถของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่สามารถจะอัดประจุ หรือคายประจุได้ในระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงและมีความรวดเร็ว ซึ่งจากความสามารถนี้จะทำให้ระบบกักเก็บพลังงานสามารถรองรับการแก้ปัญหาความผันผวนจากการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากพลังงานหมุนเวียนและสามารถรองรับความผันผวน และที่เกิดจากกระแสกระชากจากการใช้โหลดไฟฟ้าอย่างรวดเร็วได้ นอกจากนี้ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะยังช่วยลดความเครียดแบตเตอรี่จากการอัดประจุ และคายประจุในระดับกำลังงานสูงๆ ในช่วงเวลาสั้นๆ ได้อีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัย “การออกแบบและศึกษาระบบกักเก็บพลังงานแบบผสมระหว่างแบตเตอรี่กับตัวเก็บประจุยิ่งยวดด้วยเทคนิคการจัดการพลังงานที่ดีสี่ลิ้งค์” ที่ได้รับทุนวิจัยจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย แก่สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ โดย ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สัญญาเลขที่ 61-E103000-11-O.SS03E3008368-Nectec

เอกสารอ้างอิง

- [1] Energy Policy and Planning Office. (2015, June). *Thailand Power Development Plan 2015–2036*. [Online] (in Thai). Available: http://www.eppo.go.th/images/POLICY/ENG/PDP2015_Eng.pdf
- [2] Ministry of Energy Thailand. (2015, February). *Master Plan for Smart Grid Network System Development in Thailand 2015–2034*. [Online] (in Thai). Available: http://www.eppo.go.th/images/Power/pdf/smart_gridplan.pdf
- [3] D. Connolly. (2009, August). *A Review of Energy Storage Technologies*. [Online]. Available: http://www.paredox.com/foswiki/pub/Luichart/RedoxTechnicalPapers/David_Connolly_UL_Energy_Storage_Techniques_V3.pdf
- [4] S. Eckroad EPRI, “EPRI DOE handbook of energy storage for transmission and distribution applications,” *Technical Report, EPRI and U.S. Department of Energy*, 2003.
- [5] G. Albright, J. Edie, and S. Al-Hallaj. (2012, March). *A Comparison of Lead Acid to Lithium-ion in Stationary Storage Applications* [Online]. Available: <https://docplayer.net/14063000-A-comparison-of-lead-acid-to-lithium-ion-in-stationary-storage-applications.html>
- [6] A. Gonzalez, B. Ó'Gallachóir, E. McKeogh, and K. Lynch. (2004, May). *Study of electricity storage technologies and their potential to address wind energy intermittency in Ireland, Sustainable Energy Ireland* [Online]. Available: <https://studylib.net/doc/18708257/study-of-electricity-storage-technologies-and-their-poten>
- [7] K. Bradbury. (2010, August). *Energy Storage Technology Review* [Online]. Available:

- <https://www.kylebradbury.org/docs/papers/Energy-Storage-Technology-Review-Kyle-Bradbury-2010.pdf>
- [8] K. Y. Cheung, S. T. Cheung, R. G. Navin De Silva, M. P. Juvonen, R. Singh, and J. J. Woo, *Large-Scale Energy Storage Systems*. London: Imperial College London, 2003.
- [9] K. Sahay and B. Dwivedi, "Supercapacitors energy storage system for power quality improvement: An overview," *Journal of Electrical Systems*, vol. 5, no. 4, pp 1–8, 2009.
- [10] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke, "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation," *Applied Energy*, vol. 137, pp. 511–536, 2015.
- [11] T. Ma, H. Yang, and L. Lu, "Study on stand-alone powersupply options for an isolated community," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 65, pp. 1–11, 2015.
- [12] T. Ma, H. Yang, and L. Lu, "A feasibility study of a stand-alone hybrid solar–wind–battery system for a remote island," *Applied Energy*, vol. 121, pp. 149–58, 2014.
- [13] T. Ma, H. Yang, and L. Lu, "Performance evaluation of a stand-alone photovoltaic system on an isolated island in Hong Kong," *Applied Energy*, vol. 112, pp. 663–672, 2013.
- [14] M. E. Glavin, P. K. W. Chan, and W. G. Hurley, "Optimization of autonomous hybrid energy storage system for photovoltaic applications," in *Proceedings 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, San Jose, CA, 2009, pp. 1417–1424.
- [15] M. E. Glavin, K. W. Chan, S. Armstrong, and H. W. Hurley, "A stand-alone photovoltaic supercapacitor battery hybrid energy storage system," in *Proceedings 2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Poznan, 2008, pp. 1688–1695.
- [16] M. E. Glavin and W. G. Hurley, "Ultracapacitor/battery hybrid for solar energy storage," in *Proceedings 2007 42nd International Universities Power Engineering Conference*, Brighton, 2007, pp. 791–795.
- [17] P. Chanhom, S. Sirisukprasert, and N. Hatti, "A new mitigation strategy for photovoltaic power fluctuation using the hierarchical simple moving average," in *Proceedings 2013 IEEE International Workshop on Intelligent Energy Systems (IMIES)*, Vienna, 2013, pp. 28–33.
- [18] T. Ma, H. Yang, and L. Lu, "Development of hybrid battery-supercapacitor energy storage for remote area renewable energy systems," *Applied Energy*, vol. 153, pp. 56–62, 2015.
- [19] S. Kumar and B. Singh, "Self-normalized-estimator-based control for power management in residential grid synchronized PV-BES microgrid," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 8, pp. 4764–4774, 2019.
- [20] K. Lo, Y. Chen, and Y. Chang, "Bidirectional single-stage grid-connected inverter for a battery energy storage system," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 6, pp. 1–1, 2016.
- [21] S. K. Kollimalla, M. K. Mishra, A. Ukil, and G. H. Beng, "DC grid voltage regulation using new HESS control strategy," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 2 pp. 772–781, 2016.



- [22] V. Blasko and V. Kaura, "A new mathematical model and control of a three-phase AC-DC voltage source converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 12, no. 1, pp. 116–123, 1997.
- [23] N. Mohan, T.M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. 3rd Edition, New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [24] N. Hatti and S. Nuilers, "Method and apparatus for charging and discharging supercapacitors based on buck-boost converter," TH Petty Patent Pending 1803000826, Apr. 4, 2018 (in Thai).