

การสร้างแบบจำลองและการจำลองการทำงานระบบเก็บพลังงานแบบใช้งานอุปกรณ์เก็บพลังงานหลายตัวโดยใช้การจัดการพลังงานด้านบัลลิสต์ระแสดง

Modeling and simulation of energy storage system with multiple energy storage devices using energy management at DC-bus

พีรพล จันทน์หอม^{1*}

Peerapon Chanhom^{1*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองและการจำลองการทำงานระบบเก็บพลังงานแบบใช้งานอุปกรณ์เก็บพลังงานหลายตัวโดยใช้วิธีการจัดการพลังงานด้านบัลลิสต์ระแสดง ซึ่งวิธีนี้อาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับกริดที่ทำงานในโหมดควบคุมแรงดันด้านบัลลิสต์ระแสดงคงที่ และคอนเวอร์เตอร์ buck-boost แบบสองทิศทางที่ทำหน้าที่ควบคุมการอัดและคายประจุระหว่างอุปกรณ์เก็บพลังงานแต่ละตัวกับบัลลิสต์ระแสดงของอินเวอร์เตอร์ ทำให้ระบบสามารถควบคุมปริมาณการอัดและคายประจุไฟฟ้าของอุปกรณ์เก็บพลังงานแต่ละตัวได้อย่างอิสระ ซึ่งปริมาณการอัดและคายประจุไฟฟ้ารวมที่บัลลิสต์ระแสดงนี้จะสอดคล้องกับปริมาณกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าหรือกักเก็บจากระบบไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงาน วิธีนี้มีจุดเด่นที่ระบบสามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์เก็บพลังงานที่มีระดับแรงดันหลากหลาย ทำให้ระบบเก็บพลังงานสามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์เก็บพลังงานได้หลายชนิด สำหรับงานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองรวมถึงจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยใช้ระบบเก็บพลังงานร่วมกับแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นกรณีศึกษา จากผลการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่า ระบบสามารถควบคุมการอัดและคายประจุของอุปกรณ์เก็บพลังงานแต่ละตัวได้ตามต้องการ และกำลังไฟฟ้าสามารถเสริมหรือหน่วงเวียนกันได้บริเวณบัลลิสต์ระแสดง โดยปริมาณกำลังไฟฟ้ารวมที่บัลลิสต์ระแสดงจะสอดคล้องกับปริมาณกำลังไฟฟ้าที่จ่ายหรือกักเก็บจากระบบไฟฟ้าตามที่ได้วิเคราะห์ไว้ นอกจากนี้ การทำงานในช่วงเริ่มต้นและสิ้นสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ยังแสดงให้เห็นจุดเด่นของระบบที่สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์เก็บพลังงานที่มีระดับแรงดันที่หลากหลายได้

คำสำคัญ: ระบบเก็บพลังงาน แบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด อินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับกริด คอนเวอร์เตอร์ buck-boost แบบสองทิศทาง

Abstract

This research presents the modeling and simulation of energy storage system with multiple energy storage devices using DC-bus energy management approach. This approach combined the grid-connected inverter operating in constant voltage mode, where the DC-bus was regulated, and the multiple bidirectional buck-boost converters independently control the charging and discharging of electric power on each storage device. This allowed the system to manage the dispatched power at the DC-bus, where the total amount of dispatched power at the DC-bus were proportional to the electric power delivered to or stored from the grid. The advantage of this method was that the system was

¹ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี

¹ Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Nonthaburi Campus

* Corresponding author. E-mail: peerapon.c@rmutsb.ac.th

compatible with storage devices with wide-voltage range, which made it possible to work with many storage types. In this research, the energy storage system with battery and supercapacitor was modeled and simulated by the MATLAB/Simulink program. The results showed that the system had an ability to control the charging and discharging of electric power on each storage device as desired. The dispatched power could be combined or circulated at the DC-bus, and the total amount of dispatched power were proportional to the electric power delivered to or drawn from the grid. In addition, the simulation results during the start and finish mode of the supercapacitor also verify the advantage of the system that could be compatible with storage devices with wide-voltage range.

Keywords: energy storage system, battery, supercapacitor, grid-connected inverter, bidirectional buck-boost converter

บทนำ

ระบบเก็บพลังงาน (energy storage systems) เข้ามามีบทบาทสำคัญในการรักษาเสถียรภาพและแก้ไขปัญหาคุณภาพไฟฟ้าให้กับระบบ (Sheikh, Muyeen, Takahashi, Murata, & Tamura, 2009; Akatsuka, et al., 2010) ซึ่งปัจจัยหลักเกิดขึ้นจากความผันผวนตามธรรมชาติของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดพลังงานหมุนเวียน (Rahman, & Bouzguenda, 1994; Woyte, Van Thong, Belmans, & Nijs, 2006; Tan, & Kirschen, 2007) ยกตัวอย่างเช่น ความผันผวนของกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของเมฆมาบดบังแผงพลังงาน (cloud shading) เป็นต้น (Richardson, & McNerney, 1993; Ribeiro, Johnson, Crow, Arsoy, & Liu, 2001)

ระบบเก็บพลังงานแต่เดิมนั้นมีขนาดใหญ่และตอบสนองต่อการทำงานช้า แต่มีข้อดีคือสามารถกักเก็บพลังงานได้ในปริมาณสูง ในปัจจุบัน ระบบเก็บพลังงานนั้นมีขนาดเล็กลงและตอบสนองต่อการทำงานได้รวดเร็วขึ้น สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายและยังสามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์เก็บพลังงานได้หลายตัว ซึ่งหลายงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเทคนิคการจัดการพลังงาน (energy

management) อย่างต่อเนื่อง เพื่อดึงเอาจุดเด่นของอุปกรณ์เก็บพลังงานแต่ละตัวที่ทำงานร่วมกันอยู่มาช่วยเพิ่มสมรรถนะการทำงานของระบบเก็บพลังงาน (Yamaguchi, Hatti, Skolthanarat, Phontip, & Tungpimolrut, 2010; IEC, 2011; San Martín, Zamora, San Martín, Aperribay, & Eguía, 2011)

เทคนิคการจัดการพลังงานนั้นมีหลากหลายรูปแบบ สามารถแบ่งออกโดยพิจารณาตามวิธีการควบคุมได้เป็น 1) การจัดการพลังงานด้านบัสกระแสสลับ (AC-bus) และ 2) การจัดการพลังงานด้านบัสกระแสตรง (DC-bus) โดยการจัดการพลังงานด้านบัสกระแสสลับนั้นมีข้อได้เปรียบในด้านของการเพิ่มพิกัดของระบบที่ทำได้ง่ายและสะดวกต่อการบำรุงรักษา แต่มีข้อเสียเปรียบในด้านของต้นทุนในการพัฒนาที่สูง (Ramirez-Elizondo, Velez, & Paap, 2010; Chanhom, Sirisukprasert, & Hatti, 2013) และในส่วนของการจัดการด้านบัสกระแสตรงนั้น มีข้อเสียเปรียบในด้านของข้อจำกัดในการเพิ่มพิกัดกำลังของระบบซึ่งจะถูกจำกัดโดยอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับกริด แต่มีข้อได้เปรียบในด้านของโครงสร้างที่ซับซ้อนน้อยกว่าและสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว (Jallouli, & Krichen, 2012; Liukkonen, Ovaska, & Kyyrä, 2014; Zubieta, 2017;

Zha, Wang, Cheng, & Deng, 2019) นอกจากนี้ยังมีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง เนื่องจากระบบสามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์เก็บพลังงานที่มีระดับแรงดันหลากหลายได้ จึงทำให้ระบบสามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์เก็บพลังงานที่มีอยู่ในปัจจุบันได้หลายชนิด ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับอุปกรณ์เก็บพลังงานสมัยใหม่ (Ma, Yang, & Lu, 2015; Kollimalla, Mishra, Ukil, & Beng, 2017; Lo, Chen, & Chang, 2017; Kumar, & Singh, 2019)

จากที่กล่าวในข้างต้นงานวิจัยนี้จึงเน้นทำศึกษาระบบเก็บพลังงานโดยใช้การจัดการพลังงานด้านบัลลัสกระแสดตรง เนื่องจากมีข้อดีหลายด้านทำให้ระบบมีศักยภาพที่จะนำไปใช้พัฒนาเพื่อสามารถนำไปใช้งานได้จริง โดยงานวิจัยนี้จะเน้นศึกษาหลักการการทำงานและวิธีควบคุมโดยทำการสร้างแบบจำลองรวมถึงทำการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

และจะใช้ระบบเก็บพลังงานร่วมกับแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นกรณีศึกษา เพื่อแสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบของการจัดการด้านบัลลัสกระแสดตรงตามที่ได้กล่าวในข้างต้น โดยรายละเอียดวิธีการศึกษามีดังต่อไปนี้

วิธีการศึกษา

การจัดการพลังงานด้านบัลลัสกระแสดตรง

ระบบจัดการพลังงานด้านบัลลัสกระแสดตรงมีลักษณะตาม (Figure 1) โดยมีอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับกริดทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการจ่ายหรือกักเก็บพลังงานระหว่างระบบไฟฟ้าและระบบกักเก็บพลังงาน ซึ่งที่บริเวณบัลลัสกระแสดตรงของอินเวอร์เตอร์นี้จะมีอุปกรณ์เก็บพลังงาน (energy storage device#1 (ESS1) และ energy storage device#2 (ESS2)) ต่อร่วมกันโดยผ่านคอนเวอร์เตอร์บัค-บูสต์แบบสองทิศทาง

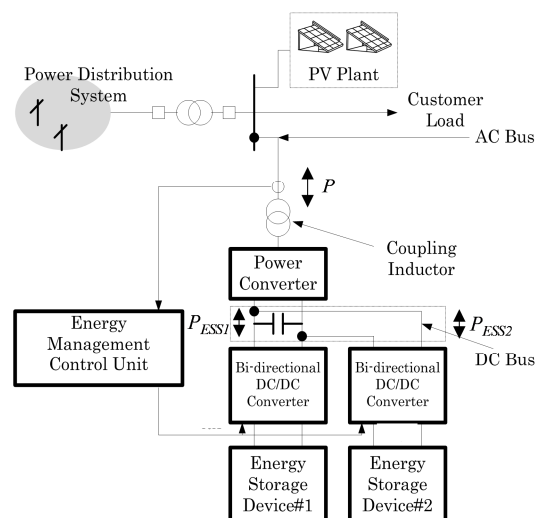


Figure 1 Fundamental of energy management at DC-bus.

สำหรับวิธีการจัดการพลังงานด้านบัลลิสต์แรงตรงในกรณีนี้ จะอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกิตที่ทำงานในโหมดควบคุมแรงดันด้านบัลลิสต์แรงตรงคงที่และคอนเวอร์เตอร์บัค-บูสต์แบบสองทิศทางที่ทำหน้าที่ควบคุมการอัดและคายประจุระหว่างอุปกรณ์เก็บพลังงานแต่ละตัวกับบัลลิสต์แรงตรงของอินเวอร์เตอร์ จึงทำให้ระบบสามารถควบคุมปริมาณการอัดและคายประจุไฟฟ้าของอุปกรณ์เก็บพลังงานแต่ละตัวได้อย่างอิสระ ซึ่งปริมาณการอัดและคายประจุไฟฟ้ารวมที่บัลลิสต์แรงตรงนี้จะสัมพันธ์กับปริมาณกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าหรือกักเก็บจากระบบไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงาน (โดยไม่พิจารณาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย) ได้ดังสมการ (1)

$$P = P_{ESS1} + P_{ESS2} \quad (1)$$

โดยที่ P คือ กำลังไฟฟ้ารวมของระบบเก็บพลังงาน (วัตต์)

P_{ESS1} คือ กำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์เก็บพลังงาน 1 (วัตต์)

P_{ESS2} คือ กำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์เก็บพลังงาน 2 (วัตต์)

หลักการการทำงานและการควบคุมอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกิต

(Figure 2) แสดงหลักการการทำงานของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกิต ประกอบด้วยวงจรภาคกำลัง (power stage) และหน่วยควบคุม (controller unit) ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณการไหลของกำลังไฟฟ้า (P, Q) ผ่านตัวเหนี่ยวนำ (coupling inductor) โดยอินเวอร์เตอร์จะสามารถควบคุมทั้งขนาดและทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้าได้จากการควบคุมขนาดและมุมเฟสของแรงดันของอินเวอร์เตอร์ ($V_{con} \angle \delta$) เทียบกับแรงดันที่บริเวณจุดต่อรวม (V_{pcc}) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ (2) และ (3)

$$P = \frac{V_{con} V_{pcc} \sin \delta}{X_L} \quad (2)$$

$$Q = \frac{(V_{con} \cos \delta - V_{pcc}) V_{pcc}}{X_L} \quad (3)$$

โดยที่ P คือ ปริมาณกำลังไฟฟ้า (วัตต์)

Q คือ ปริมาณกำลังไฟฟ้าเสมือน (วาร์)

V_{con} คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ (โวลต์)

V_{pcc} คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อรวม (โวลต์)

δ คือ มุมระหว่าง V_{con} และ V_{pcc} (เรเดียน)

X_L คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ (โอห์ม)

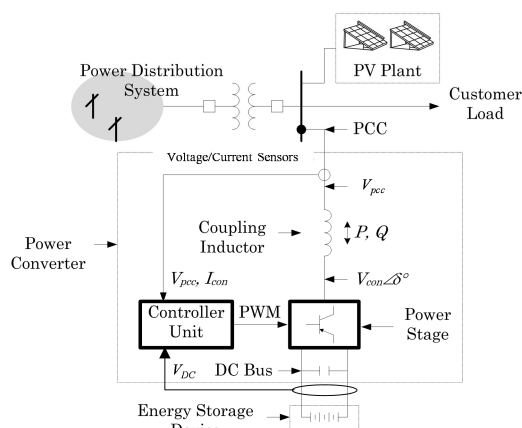


Figure 2 Fundamental and block diagram of energy storage systems.

สำหรับการควบคุมอินเวอร์เตอร์จะใช้การควบคุมแบบวงรอบปิดแบบพีไอ (closed-loop PI control) โดยรับเอาแรงดันและกระแส (V_{DC}, V_{pcc}, I_{con}) ที่วัดได้จากเซนเซอร์แรงดันและกระแสนำมาคำนวณเพื่อสร้างสัญญาณควบคุม โดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบ

DQ synchronous reference frame control (Schauder, & Mehta, 1993) ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงใน (Figure 3) ซึ่ง V_d และ V_q ที่คำนวณได้จะนำไปใช้สร้างสัญญาณ

มอดูเลตความกว้างพัลส์ (pulse width modulation: PWM) โดยใช้เทคนิค space vector modulation (SVM) เพื่อนำไปควบคุมอินเวอร์เตอร์

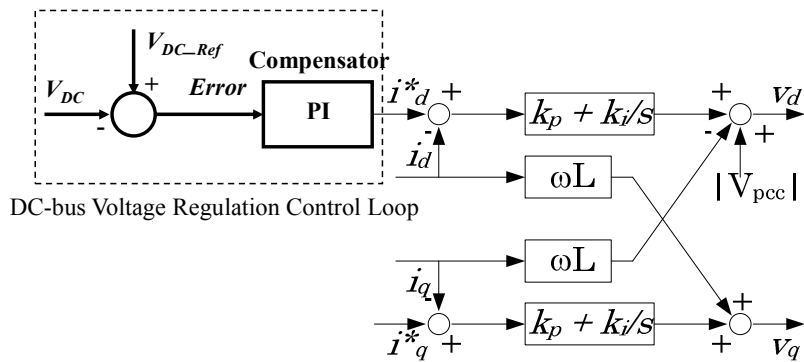


Figure 3 Control diagram of DQ synchronous reference frame control.

โดยที่	k_p	คือ ค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบพี	k_i	คือ ค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบไอ
	i_d^*	คือ คำสั่งกระแสกำลังไฟฟ้าจริง	i_q^*	คือ คำสั่งกระแสกำลังไฟฟ้าเสมือน
	$ V_{pcc} $	คือ ขนาดแรงดันที่จุดต่อร่วม (โวลต์)	L	คือ ค่าความเหนี่ยวนำ (เฮนรี่)
	v_d	คือ ขนาดแรงดันในแนวแกน d (โวลต์)	v_q	คือ ขนาดแรงดันในแนวแกน q (โวลต์)
	V_{DC}	คือ ขนาดแรงดันที่บัสกระแสตรง (โวลต์)	$V_{DC,ref}$	คือ ค่าแรงดันอ้างอิงบัสกระแสตรง

หลักการทำงานและการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ บัส-บูสต์แบบสองทิศทาง

คอนเวอร์เตอร์บัส-บูสต์แบบสองทิศทางมีลักษณะแสดงดัง (Figure 4a) ซึ่งกระแสจะสามารถไหลได้สองทิศทางจากการสลับกันทำงานระหว่างโหมดบัค (buck) และโหมดบูสต์ (boost) โดยขณะที่ทำงานในโหมดบัค กระแสจะไหลจาก v_1 ไปยัง v_2 และในทางกลับกัน ขณะที่ทำงานในโหมดบูสต์ กระแสจะไหลจาก v_2 ไป v_1 ดังแสดงใน (Figure 4b) และ (Figure 4c)

ตามลำดับ ซึ่งในการทำงานจริงในระบบเก็บพลังงานที่นำเสนอ โหมดบัคจะถูกใช้เมื่อทำการอัดประจุ โดยกระแส (i_{dc}) จะไหลจากบัสกระแสตรง (v_1) ไปยังอุปกรณ์เก็บพลังงาน (v_2) และในทางกลับกัน โหมดบูสต์จะถูกใช้เมื่อทำการคายประจุ โดยกระแสจะไหลจากอุปกรณ์เก็บพลังงาน (v_2) ไปยังบัสกระแสตรง (v_1) ดังนั้น วงจรคอนเวอร์เตอร์บัส-บูสต์แบบสองทิศทางนี้ v_1 จะต้องมากกว่า v_2 เท่านั้นจึงจะทำงานได้

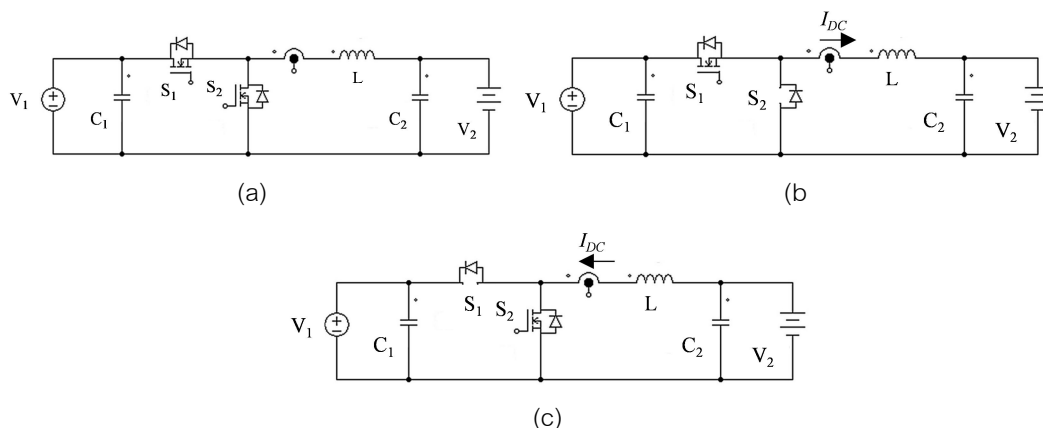


Figure 4 (a) Bidirectional buck-boost converter circuit (b) buck mode, and (c) boost mode.

สำหรับเทคนิคการควบคุมคอนเวอร์เตอร์ บัค-บูสต์ จะใช้การควบคุมวงรอบปิดแบบพีไอที่สามารถควบคุมได้ทั้งโหมดแรงดันคงที่ (constant voltage: CV) และโหมดกระแสคงที่ (constant current: CC) โดยตัวควบคุมมีลักษณะดังแสดงใน (Figure 5) ซึ่งจะมีการคำนวณสัญญาณควบคุมไปพร้อมกันทั้งสองโหมด และมีตัวเปรียบเทียบ (comparator) ทางด้านเอาต์พุตเลือกเอาค่าที่น้อยที่สุดไปเป็นค่าดิวตี้ไซเคิล (duty cycle) สำหรับควบคุมคอนเวอร์เตอร์บัค-บูสต์ ซึ่งตรงนี้จะทำให้ทั้งสองโหมดสามารถสลับกันทำหน้าที่โดยอัตโนมัติ โดยตัวควบคุมลักษณะนี้จะช่วยให้ระบบสามารถทำงานในสภาวะที่ต้องการอัตราขยายสูงหรือลดทอนต่ำมากๆ (high conversion ratio) เช่น สภาวะเริ่มต้นการอัดประจุ หรือคายประจุเมื่อสิ้นสุดการทำงาน ของตัวเก็บประจุยิ่งยวด เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดจะได้อธิบายในส่วนต่อไป

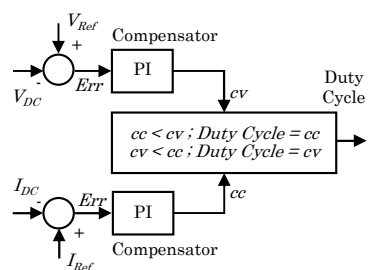


Figure 5 Block diagram of closed-loop PI control.

แบบจำลองของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ และเทคนิคการอัดและคายประจุ

แบบจำลองตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่ที่ใช้ในงานวิจัยมีรายละเอียดดังแสดงใน (Figure 6a) และ (Figure 6b) ตามลำดับ โดยแบบจำลองดังกล่าวพัฒนาขึ้นโดย Simscape electrical ซึ่งเป็นแพ็คเกจภายในโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยแรงดันขณะทำการอัดและคายประจุ (ด้วยค่ากระแสคงที่) ของแบบจำลองตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่นี้มีลักษณะแสดงดัง (Figure 6c) และ (Figure 6d) ตามลำดับ

(Figure 6d) แสดงช่วงที่อนุญาตให้ใช้งาน (available area) ในการอัดและคายประจุของแบตเตอรี่ ซึ่งการอัดและคายประจุเกินนอกเหนือจากในช่วงการใช้งานนี้จะทำให้เกิดปัญหาแรงดันผันผวน และในการใช้งานจริงจะส่งผลให้เกิดความเสียหายกับเซลล์ของแบตเตอรี่ ในส่วนของตัวเก็บประจุยิ่งยวด จะมีช่วงที่สามารถทำการอัดหรือคายประจุปกติได้ในช่วงหนึ่ง เช่นเดียวกันกับแบตเตอรี่ดังแสดงใน (Figure 6c) อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่า ตัวเก็บประจุยิ่งยวดในช่วงเริ่มต้นขณะที่ไม่มีประจุไฟฟ้าเก็บอยู่จะมีแรงดันอยู่ที่ประมาณศูนย์โวลต์ ดังนั้น การจะทำให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดพร้อมใช้งานปกติ จึงจำเป็นต้องมีโหมดเริ่มต้นการทำงาน (pre-charge) เพื่ออัดประจุให้กับตัวเก็บประจุยิ่งยวดในภาวะนี้ และนอกจากนี้ เมื่อต้องการ

หยุดการทำงานของระบบ จำเป็นจะต้องมีโหมดสิ้นสุดการทำงาน (deep-discharge) เพื่อคายประจุให้กับตัวเก็บประจุยิ่งยวดให้เหลือในปริมาณน้อย โดยให้แรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเหลือประมาณศูนย์โวลต์ ทั้งนี้ เพื่อความปลอดภัยในการบำรุงรักษาและดูแลระบบ

ดังนั้น ภาพรวมโหมดการทำงานต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมการอัดและคายประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแบตเตอรี่สามารถอธิบายได้ตาม (Figure 7) โดยส่วนของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะมีโหมดการทำงานอีกสองโหมดเพิ่มเติมเข้ามา โดยโหมดที่เพิ่มเข้ามานี้จะสามารถทำการควบคุมได้โดยใช้เทคนิคการควบคุมตามที่ได้อธิบายในส่วนของหลักการการทำงานและการควบคุมคอนเวอร์เตอร์บัส-บูสต์แบบสองทิศทาง

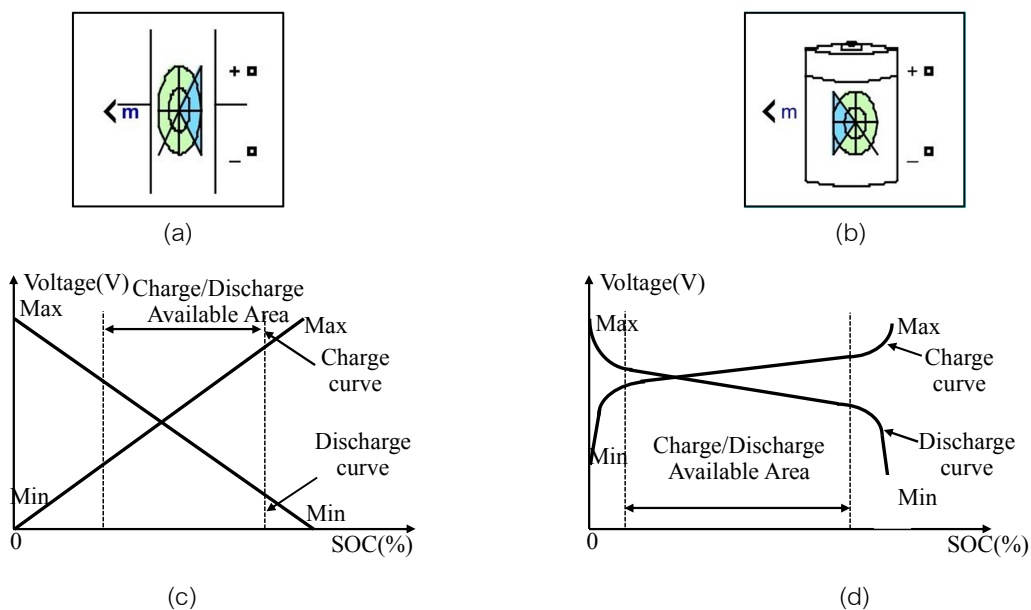


Figure 6 Model of (a) supercapacitor, (b) battery and voltage and current during charge and discharge of (c) supercapacitor and (d) battery.

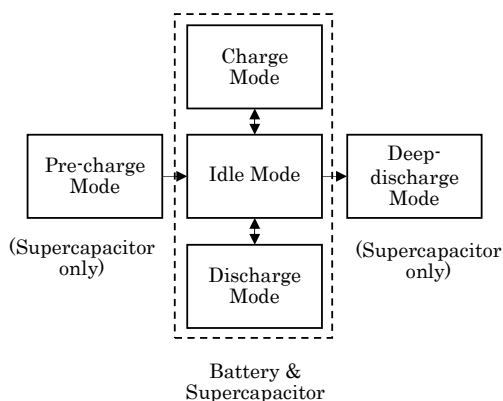


Figure 7 Operating mode of bi-directional buck-boost converter.

กรณีศึกษาและแบบจำลองการทำงานของระบบเก็บพลังงานที่นำเสนอในงานวิจัย

กรณีศึกษาในงานวิจัยนี้มีภาพรวมและรายละเอียดตาม (Figure 8) ประกอบด้วยโหลดไฟฟ้า (load) และระบบเก็บพลังงาน โดยจะเชื่อมต่อเข้าระบบไฟฟ้า (power system) ที่บัสกระแสสลับ ในส่วนของระบบเก็บพลังงานจะประกอบด้วยอุปกรณ์เก็บพลังงาน 2 ชนิด คือ 1) แบตเตอรี่ และ 2) ตัวเก็บประจุยิ่งยวด โดยต่อร่วมกันที่บัสกระแสตรงของอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับกริด

กรณีศึกษาดังแสดงใน (Figure 8) จะนำมาสร้างแบบจำลองและจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยใช้แพ็คเกจที่พัฒนาโดย Simscape electrical ซึ่งมีรายละเอียดดัง (Figure 9) โดยในส่วนของระบบไฟฟ้านั้นจะใช้บล็อก 3phase source เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าสามเฟสให้กับระบบไฟฟ้า และในส่วนของโหลดไฟฟ้าจะใช้บล็อก 3phase load โดยกำหนดโหลดไฟฟ้ามีค่าคงที่ สำหรับอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกับกริดจะใช้บล็อกไอจีบี-ที (IGBT) แบบ 6 สวิตช์ทำงานร่วมกับเทคนิคการควบคุมแบบ DQ synchronous

reference frame control และ SVM ตามที่ได้อธิบายในส่วนก่อนหน้านี้นี้ เพื่อทำหน้าที่ควบคุมขนาดและทิศทางการไหลของกระแสให้ได้ตามต้องการ

ในส่วนของวงจรคอนเวอร์เตอร์บัส-บูสต์ และอุปกรณ์อื่นๆ ภายในแบบจำลองของกรณีศึกษา จะใช้บล็อกที่อยู่ภายใน Simscape electrical นำมาสร้างตามวงจรตามที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งการจำลองการทำงานจะดำเนินการในลักษณะของการทำงานแบบสวิตช์ซึ่งเป็นลักษณะคล้ายวงจรจริง โดยพิกัดกำลังไฟฟ้าและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบแสดงรายละเอียดตาม (Table 1)

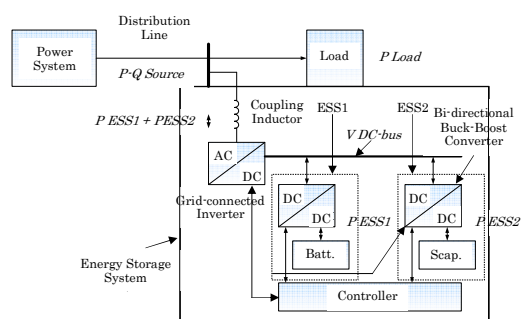


Figure 8 Proposed energy storage system simulation scenario.

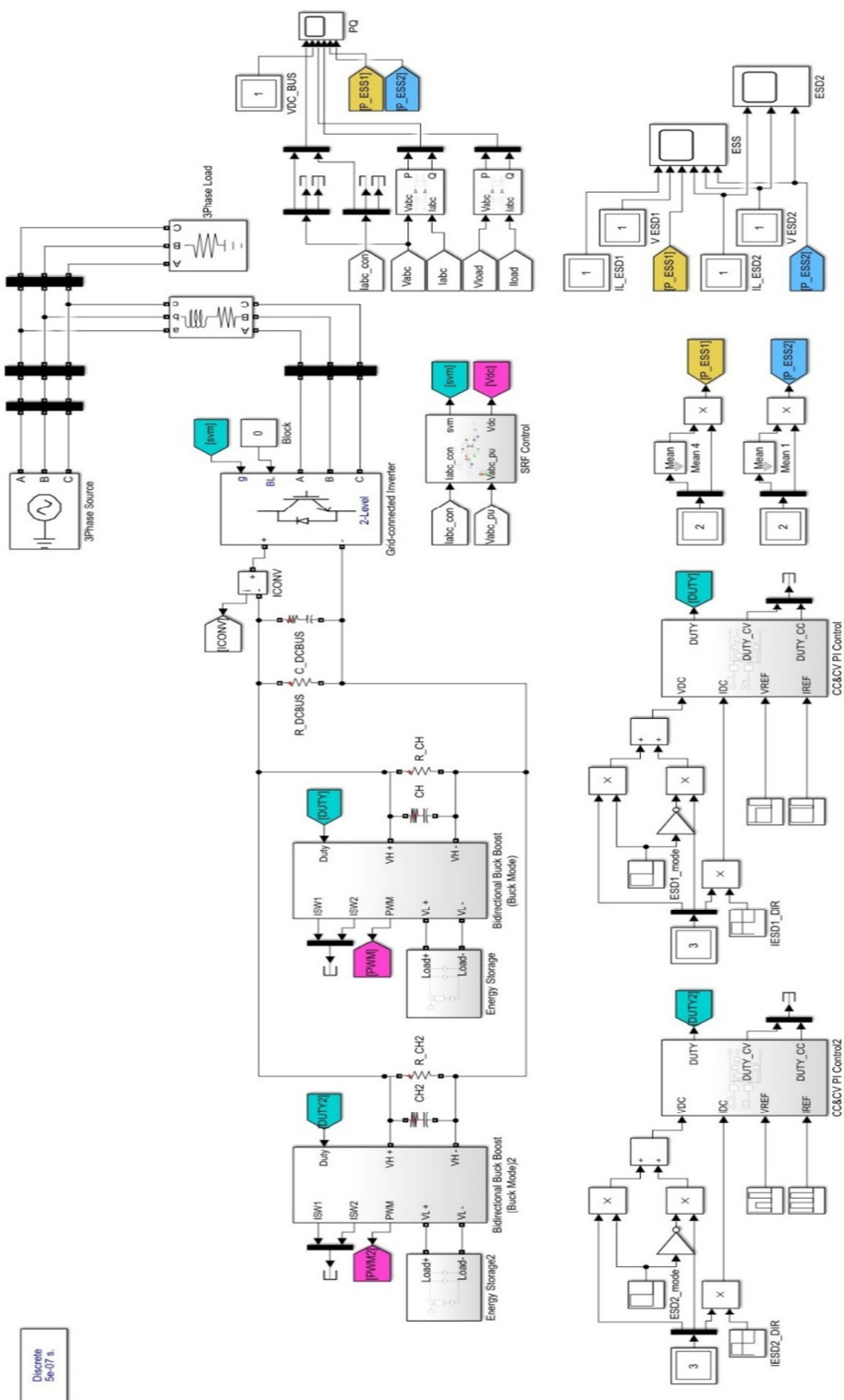


Figure 9 Proposed energy storage system MATLAB/Simulink model.

Table 1 Parameter of the proposed energy storage system simulation scenario.

parameters	rate
voltage at point of common coupling (PCC)	380 VAC (rms) 3 phase
DC-bus voltage	600 VDC
maximum charge/discharge of buck-boost converter	$\cong 25$ kW
system load	100 kW
battery voltage	400 VDC 32 kWh
super capacitor (charge/discharge voltage range)	1 F (300 – 400 VDC)
switching frequency	4 kHz
K_p, K_i (CC loop)	0.25, 0.025
K_p, K_i (CV loop)	0.25, 0.025
K_p, K_i (DQ synchronous reference frame control)	5.0, 0.5
K_p, K_i (V_{DC} loop)	5.0, 0.5

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การจำลองการทำงานจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) การจำลองภาพรวมการทำงานของระบบซึ่งจะกำหนดให้อินเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดรักษาระดับแรงดันคงที่และกำหนดให้คอนเวอร์เตอร์ทำการอัดและคายประจุให้กับแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดในช่วงระยะเวลาที่แตกต่างกัน และ 2) การทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดในโหมดเตรียมพร้อมทำงานและโหมดสิ้นสุดการทำงาน ซึ่งการจำลองการทำงานทั้งสองส่วนนี้จะเป็นการเน้นให้เห็นถึงความสามารถของระบบตามที่นำเสนอไว้ โดยจะได้อภิปรายผลดังต่อไปนี้

ผลการจำลองภาพรวมการทำงานของระบบจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี โดยในกรณีที่ 1 แสดงใน (Figure 10) ในกรณีนี้จะกำหนดให้ทำการอัดประจุแบตเตอรี่ที่ค่าพิกัด (25 kW) คงที่และกำหนดให้ทำการอัดและคายประจุตัวเก็บประจุยิ่งยวดสลับกันไปตามค่าพิกัดดังแสดงใน (Figure 10d) และ (Figure 10f) โดยจาก (Figure 10c)

เมื่อมีการอัดประจุให้กับแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวด คอนเวอร์เตอร์บัส-บูสต์จะดึงกำลังไฟฟ้าจากบัสกระแสตรงของอินเวอร์เตอร์เข้าสู่อุปกรณ์เก็บพลังงานทั้งสอง ส่งผลให้แรงดันที่บัสกระแสตรงของอินเวอร์เตอร์มีการเปลี่ยนแปลงลดลง ดังนั้น เพื่อรักษาระดับแรงดันบัสกระแสตรงเอาไว้ (ที่ประมาณ 600 โวลต์) ตัวควบคุมของอินเวอร์เตอร์จะทำการดึงกำลังไฟฟ้าจากระบบเข้ามาเพื่ออัดประจุให้กับอุปกรณ์เก็บพลังงานทั้งสอง ดังจะเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงกระแสใน (Figure 10a) ในช่วงวินาทีที่ 1-2 ซึ่งจะสอดคล้องกับปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ทำการอัดประจุให้กับแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวด นอกจากนี้ พิจารณาในช่วงวินาทีที่ 3-4 จะพบว่า ขณะที่แบตเตอรี่ทำการอัดประจุอยู่นั้น ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะทำการคายประจุ ซึ่งในกรณีนี้จะเกิดการหมุนเวียนของกำลังไฟฟ้าภายในบัสกระแสตรง โดยจะเกิดการถ่ายเทกำลังไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดไปยังแบตเตอรี่และกำลังไฟฟ้าในส่วนที่ขาดหรือเกินจากนี้ ตัวอินเวอร์เตอร์

จะทำการดึงหรือจ่ายเข้าระบบไฟฟ้าเพื่อรักษาระดับแรงดันบัสกระแสตรงเอาไว้ ดังจะเห็นได้จากกำลังไฟฟารวมใน (Figure 10e) ในช่วงวินาทีที่ 3-4 กำลังไฟฟารวมจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับโหลดไฟฟ้าเท่านั้น

จากผลการจำลองการทำงานในข้างต้น เป็นการยืนยันให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าที่บัสกระแสตรงและกระแสสลับของอินเวอร์เตอร์นั้นจะสอดคล้องกับที่ได้วิเคราะห์ไว้ โดยกำลังไฟฟ้าจะสามารถเสริมหรือหมุนเวียนกันได้บริเวณบัสกระแสตรง ซึ่งปริมาณกำลังไฟฟารวมที่บัสกระแสตรงจะสอดคล้องกับปริมาณกำลังไฟฟ้าที่จ่ายหรือกักเก็บจากระบบไฟฟ้า

(Figure 11) เป็นผลการจำลองภาพรวมการทำงานของระบบในกรณีที่ 2 ซึ่งจะคล้ายกับกรณีที่ 1 แต่จะแตกต่างกันตรงที่กำหนดให้ทำการคายประจุแบตเตอรี่ที่ค่าพิกัด (25 kW) คงที่ ซึ่งผลการจำลองการทำงานยืนยันให้เห็นว่า กำลังไฟฟ้านั้นสามารถเสริมกันได้ทั้งในขณะที่ทำการอัดหรือคายประจุและยังสามารถหมุนเวียนกันได้บริเวณบัสกระแสตรงเช่นเดียวกับกรณีที่ 1

ผลการจำลองทำงานในโหมดเริ่มต้นและสิ้นสุดการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดแสดงใน (Figure 12) จะเห็นได้ว่า เริ่มต้นขณะที่ไม่มีพลังงานไฟฟ้าเก็บอยู่ดังแสดงใน (Figure 12a) ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะมีระดับแรงดันต่ำมาก (ประมาณศูนย์โวลต์) เมื่อระบบเริ่มทำงานในโหมดเริ่มต้นการทำงาน แรงดันจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นไปจนถึงระดับแรงดันที่กำหนดไว้ (ในช่วงวินาทีที่ 0-5) โดยคอนเวอร์เตอร์จะทำงานในโหมด

กระแสคงที่ (CC) ดังแสดงใน (Figure 12b) ซึ่งเมื่อแรงดันใกล้ถึงระดับที่กำหนดไว้ กระแสที่ทำการอัดประจุจะค่อยๆ ลดลงจนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ณ จุดนี้คอนเวอร์เตอร์จะกลับมาทำงานในโหมดแรงดันคงที่ (CV) โดยอัตโนมัติ เพื่อรักษาระดับแรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเอาไว้และเตรียมพร้อมรับคำสั่งในการทำงานในโหมดปกติ (ในช่วงวินาทีที่ 5-12) ซึ่งถือเป็นการสิ้นสุดการทำงานในโหมดเริ่มต้นการทำงาน ในส่วนของโหมดสิ้นสุดการทำงาน (ในช่วงวินาทีที่ 12-20) จะมีลักษณะคล้ายกับโหมดเริ่มต้นการทำงาน แต่จะมีทิศทางของกระแสและแรงดันในลักษณะตรงกันข้าม โดยแรงดันจะค่อยๆ ลดลง (จนถึงค่าศูนย์ในที่สุด) ซึ่งจากผลการจำลองการทำงานในส่วนของตัวเก็บประจุยิ่งยวดนี้ยืนยันให้เห็นว่า ตัวควบคุมและคอนเวอร์เตอร์สามารถทำงานในสภาวะที่ต้องการอัตราการขยายสูงหรือลดทอนต่ำมากๆ ได้ ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่า ข้อได้เปรียบในส่วนนี้ทำให้ระบบสามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์เก็บพลังงานที่มีระดับแรงดันที่หลากหลาย ทั้งนี้ ในส่วนของ (Figure 10f), (Figure 11f) และ (Figure 12c) แสดงกำลังไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดขณะทำการอัดและคายประจุนั้นมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นลง ทั้งนี้ เนื่องจากในงานวิจัยนี้กำหนดให้ตัวควบคุมทำงานในโหมดควบคุมกระแสคงที่ จึงส่งผลทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าขณะอัดหรือคายประจุมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตามแรงดันของอุปกรณ์เก็บพลังงาน ซึ่งปกติแล้วจะสามารถออกแบบให้ตัวควบคุมทำงานในโหมดกำลังไฟฟ้าคงที่ได้

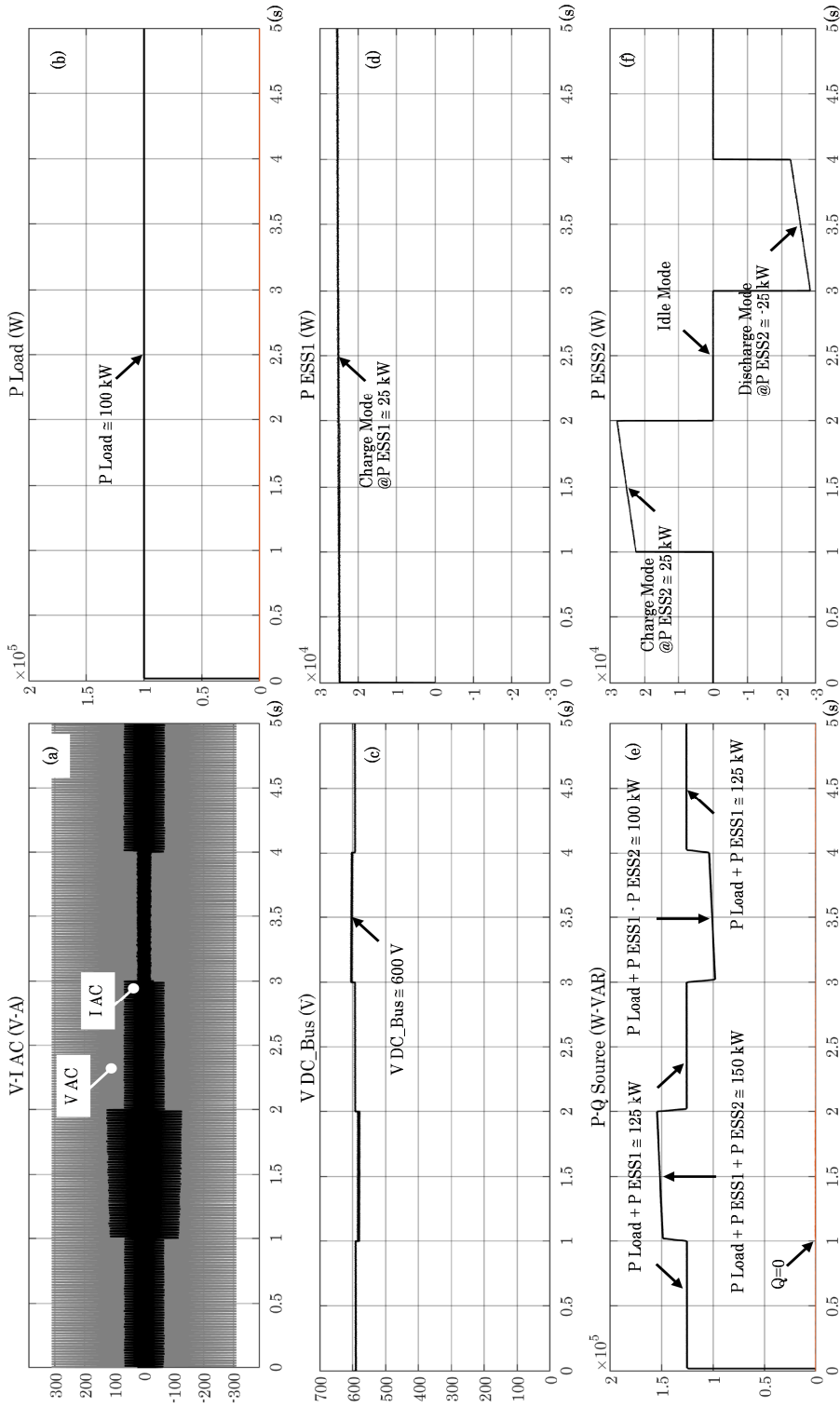


Figure 10 (a) Voltage and current at AC-bus, (b) system load, (c) DC-bus voltage, (d) battery power during charge rated power (e) net power, and (f) supercapacitor power during charge and discharge with rated power.

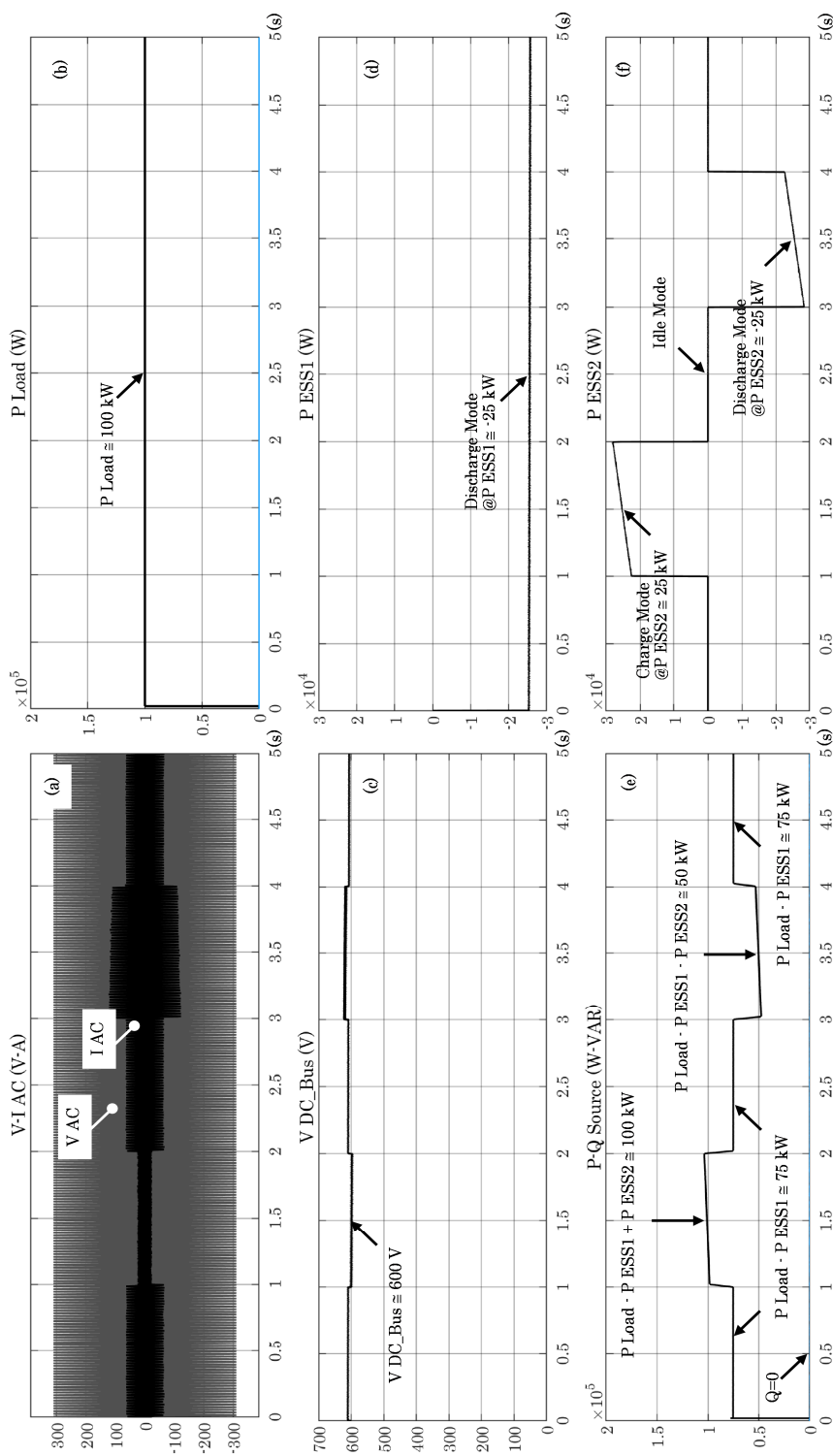


Figure 11 (a) Voltage and current at AC-bus, (b) system load, (c) DC-bus voltage, (d) battery power during discharge with rated power, (e) net power, and (f) supercapacitor power during charge and discharge with rated power.



Figure 12 (a) Current, (b) voltage, and (c) power of supercapacitor from start to finish mode.

สรุป

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการทำงานและวิธีการควบคุมระบบเก็บพลังงานที่ใช้งานอุปกรณ์เก็บพลังงานหลายตัวร่วมกันโดยใช้การจัดการพลังงานด้านประสิทธิภาพโดยตรง เนื่องจากมีข้อได้เปรียบหลายด้าน โดยเฉพาะความสามารถในการทำงานร่วมกับอุปกรณ์เก็บพลังงานที่มีระดับแรงดันหลากหลายได้ จึงทำให้ระบบเก็บพลังงานสามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์เก็บพลังงานหลายชนิด ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับอุปกรณ์เก็บพลังงานสมัยใหม่ สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาหลักการทำงานและวิธีการควบคุมโดยสร้างแบบจำลองและจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยใช้ระบบเก็บพลังงานร่วมกับแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดเพื่อเป็นกรณีศึกษาเพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการประสานการทำงานและข้อได้เปรียบอื่นๆ ตามที่ได้ทำการศึกษา ในส่วนของการทำงานและวิธีการควบคุมจะอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างอินเวอร์เตอร์เชื่อมต่อกิตที่ทำงานในโหมดควบคุมแรงดันคงที่ด้านประสิทธิภาพโดยตรงและคอนเวอร์เตอร์บัค-บูสต์แบบสองทิศทางที่ทำหน้าที่ควบคุมการอัดและคายประจุระหว่างอุปกรณ์เก็บพลังงานแต่ละตัวกับประสิทธิภาพโดยตรงของอินเวอร์เตอร์ และด้วยการทำงานร่วมกันนี้ จึงทำให้คอนเวอร์เตอร์แต่ละตัวสามารถควบคุมปริมาณการอัดและคายประจุไฟฟ้าของอุปกรณ์เก็บพลังงานที่เชื่อมต่ออยู่ได้อย่างอิสระ ซึ่งกำลังไฟฟ้าขณะทำการอัดและคายประจุนี้จะสามารถเสริมหรือหักล้างกันได้ที่บริเวณประสิทธิภาพซึ่งแสดงให้เห็นในส่วนของการศึกษา โดยปริมาณการอัดและคายประจุไฟฟารวมที่ประสิทธิภาพโดยตรงจะสอดคล้อง

กับปริมาณกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าหรือกักเก็บจากระบบไฟฟ้าของระบบเก็บพลังงานตามที่ได้ทำการวิเคราะห์เป็นการแสดงให้เห็นข้อได้เปรียบของระบบการจัดการพลังงานด้านประสิทธิภาพที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบเก็บพลังงานจริงคือ ทำให้ระบบสามารถแบ่งอุปกรณ์เก็บพลังงานเป็นกลุ่มๆ ทำให้สามารถควบคุมจัดการการบาลานซ์สถานะประจุ (state-of-charge: SOC) ได้ง่าย เนื่องจากอุปกรณ์เก็บพลังงานแต่ละชนิดมีการควบคุมโดยคอนเวอร์เตอร์ที่อิสระต่อกัน จึงทำให้มีความยืดหยุ่นในการทำงานและทำให้สามารถใช้อุปกรณ์เก็บพลังงานได้เต็มศักยภาพ นอกจากนี้ยังสามารถปรับเปลี่ยนหรือต่ออุปกรณ์เก็บพลังงานเพิ่มเติมในภายหลังได้เพื่อเพิ่มความหลากหลายของอุปกรณ์เก็บพลังงานรวมถึงเพิ่มความจุพลังงานของระบบ อย่างไรก็ตาม ข้อควรพิจารณาในการนำอุปกรณ์เก็บพลังงานมาต่อใช้งานคือ ระดับแรงดันของอุปกรณ์เก็บพลังงานจะต้องไม่มีค่าสูงกว่าระดับแรงดันที่ประสิทธิภาพโดยตรง สำหรับในส่วนของการควบคุมคอนเวอร์เตอร์นี้ จะใช้ตัวควบคุมที่สามารถทำงานได้ทั้งแบบแรงดันคงที่และกระแสคงที่ ซึ่งนอกจากจะสามารถทำงานในการอัดและคายประจุตามปกติแล้วยังสามารถทำงานในการอัดประจุเริ่มต้นการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและโหมดสิ้นสุดการทำงานได้อีกด้วย ดังจะเห็นได้ในส่วนของผลการศึกษาและอภิปราย อย่างไรก็ตาม สำหรับการใช้งานจริง ในการทำงานในโหมดทั้งสองนี้ มีข้อควรพิจารณาคือ การเกิดความเครียดระหว่างทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ทั้งนี้เนื่องจากระดับแรงดันของตัวเก็บประจุยิ่งยวดและแรงดันประสิทธิภาพโดยตรงมีความแตกต่างกันมาก โดยในสภาวะเช่นนี้ จะทำให้วงจรคอนเวอร์เตอร์

ทำงานในอัตราการผลิตผันสูงมากกว่าปกติ ซึ่งในสภาวะนี้จะส่งผลทำให้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทำงานในลักษณะการเปิดและปิดสวิตช์ในช่วงระยะเวลาที่กว้างหรือแคบมากๆ ส่งผลทำให้เกิดความเครียดในการทำงานสูง จนอาจทำให้ที่วงจรคอนเวอร์เตอร์ถึงขั้นเสียหาย ซึ่งในส่วนของการทำงานจริงนั้น อาจเลือกใช้เทคนิคการควบคุมกระแสแบบฮิสเทอรีซิสเข้ามาช่วยควบคุมในโหมดนี้ แต่ข้อควรพิจารณาในการใช้เทคนิคดังกล่าวคือ ความต่อเนื่องระหว่างการทำงานในแต่ละโหมด เนื่องจากวิธีการควบคุมกระแสแบบฮิสเทอรีซิสและการควบคุมวงรอบปิดแบบพีไอที่ใช้ในการควบคุมแรงดันคงที่และกระแสคงที่นั้นมีหลักการในการทำงานที่แตกต่างกัน โดยในส่วนของ การแก้ปัญหาในประเด็นที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ที่ทีมผู้วิจัยได้ให้ความสำคัญ ซึ่งจะได้นำมาเป็นประเด็นเพื่อดำเนินการทำการวิจัยเพื่อพัฒนาเทคนิคในการควบคุมที่ดียิ่งขึ้นต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- Akatsuka, M., Hara, R., Kita, H., Ito, T., Ueda, Y., & Saito, Y. (2010). Estimation of battery capacity for suppression of a PV power plant output fluctuation. *35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (pp. 540-543). Honolulu, Hawaii: IEEE.
- Chanhom, P., Sirisukprasert, S., & Hatti, N. (2013). A new mitigation strategy for photovoltaic power fluctuation using the hierarchical simple moving average. *IEEE International Workshop on Intelligent Energy Systems* (pp. 28-33). Vienna: IEEE.
- IEC. (2011). *Electrical energy storage*. Retrieved 1 December 2011, from <https://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-energystorage-LR-en.pdf>.
- Jallouli, R., & Krichen, L. (2012). Energy management by coordination control of DC bus voltage in PV hydrogen system. *International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology* (pp. 23-29). Hammamet, Tunisia: IEEE.
- Kollimalla, S. K., Mishra, M. K., Ukil, A., & Beng, G. H. (2017). DC grid voltage regulation using new HESS control strategy. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(2), 772-781.
- Kumar, S., & Singh, B. (2019). Self-normalized-estimator-based control for power management in residential grid synchronized PV-BES microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(8), 4764-4774.
- Liukkonen, M., Ovaska, S. J., & Kyyrä, J. (2014). Sensitivity analysis for the design of an energy management scheme of supercapacitor buffering in a regulated DC bus. *16th European Conference on Power Electronics and Applications* (pp. 1-8). Lappeenranta, Finland: IEEE.
- Lo, K., Chen, Y., & Chang, Y. (2017). Bidirectional single-stage grid-connected inverter for a battery energy storage system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(6), 4581-4590.
- Ma, T., Yang, H., & Lu, L. (2015). Development of hybrid battery-supercapacitor energy storage for remote area renewable energy systems. *Transaction on Applied Energy*, 153(1), 56-62.
- Rahman, S., & Bouzguenda, M. (1994). A model to determine the degree of penetration and energy cost of large-scale utility interactive photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 9(2), 224-230.

- Ramirez-Elizondo, L., Velez, V., & Paap, G. C. (2010). A technique for unit commitment in multiple energy carrier systems with storage. *9th International Conference on Environment and Electrical Engineering* (pp. 106-109). Prague: IEEE.
- Ribeiro, P. F., Johnson, B. K., Crow, M. L., Arsoy, A., & Liu, Y. (2001). Energy storage systems for advanced power applications. *Proceedings of the IEEE*, 89(12), 1744-1756.
- Richardson, R. D., & McNerney, G. M. (1993). Wind energy systems. *Proceedings of the IEEE*, 81(3), 378-389.
- San Martín, J. I., Zamora, I., San Martín, J. J., Aperribay, V., & Eguía, P. (2011). Energy storage technologies for electric applications. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality* (pp. 593-598). Las Palmas de Gran Canaria, Spain: University of Las Palmas.
- Schauder, C., & Mehta, H. (1993). Vector analysis and control of advanced static VAR compensators. *IEEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution*, 140(4), 299-306.
- Sheikh, M. R. I., Muyeen, S. M., Takahashi, R., Murata, T., & Tamura, J. (2009). Minimization of fluctuations of output power and terminal voltage of wind Generator by using STATCOM/SMES. *IEEE Bucharest PowerTech* (pp. 1-6). Bucharest, Romania: IEEE.
- Tan, Y. T., & Kirschen, D. S. (2007). Impact on the power system of a large penetration of photovoltaic generation. *IEEE Power Engineering Society General Meeting* (pp. 1-8). Tampa, FL, USA: IEEE.
- Woyte, A., Van Thong, V., Belmans, R., & Nijs, J. (2006). Voltage fluctuations on distribution level introduced by photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(1), 202-209.
- Yamaguchi, H., Hatti, N., Skolthanarat, S., Phontip, J., & Tungpimolrut, K. (2010). Fluctuation separation for power management considering response of facilities. *Renewable Energy Conference* (pp. 1-4). Yokohama, Japan: Tokyo Institute of Technology.
- Zha, D., Wang, Q., Cheng, M., & Deng, F. (2019). Energy management system applied in DC electric springs. *10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia* (pp. 1435-1439). Busan, Korea: The Korean Institute of Power Electronics.
- Zubieta, L. E. (2017). Power management of a DC bus regulated by multiple energy storage resources. *IEEE Second International Conference on DC Microgrids* (pp. 571-576). Nuremburg: IEEE.