

การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดด้วยการจำลองผลรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน

วรายุทธ คัมภีร์วัฒน์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์*

ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก และภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 8559 2351 อีเมล: chayut.s@cit.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.006

รับเมื่อ 20 เมษายน 2563 แก้ไขเมื่อ 22 กรกฎาคม 2563 ตอรับเมื่อ 10 สิงหาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 24 พฤษภาคม 2564

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงพลังงานในระบบรถไฟฟ้ายานขนส่งมวลชน โดยการจัดการพลังงานคืนกลับจากการเบรกรถไฟฟ้ายานด้วยการติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดบนขบวนรถไฟ เพื่อกักเก็บพลังงานที่ได้จากการเบรกจ่ายคืนพลังงานกลับแล้วนำไปใช้ในระบบขับเคลื่อนรถไฟอย่างเหมาะสม โดยศึกษาผลกระทบของขนาดพิกัดของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟต่อการเปลี่ยนแปลงการใช้พลังงานของระบบ การทดสอบจะใช้ระบบรถไฟฟ้ายานขนส่งมวลชนกระแสดตรง BTS Skytrain สายสีลม พิจารณาการเคลื่อนที่และสมรรถนะของรถไฟฟ้ายาน 1 ขบวน ทั้งขาขึ้นและขาล่อง จากการทดสอบพบว่า การติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดบนขบวนรถไฟฟ้ายานที่เหมาะสมจะทำให้ประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์จากพลังงานที่ได้จากการเบรกจ่ายคืนพลังงานกลับสูงตามไปด้วย โดยตัวเก็บประจุยิ่งยวดขนาดไม่เกิน 15 กิโลวัตต์ชั่วโมง สามารถช่วยให้ประหยัดพลังงานรวมได้สูงสุดประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ สามารถใช้พลังงานคืนกลับได้มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ และลดพลังงานสูญเสียในระบบจ่ายไฟได้สูงสุดประมาณ 44 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: รถรางไฟฟ้า รถไฟฟ้ายานขนส่งมวลชนกระแสดตรง ตัวเก็บประจุยิ่งยวด พลังงานคืนกลับ



A Study of Increasing Efficiency of Energy Utilization by Using Supercapacitor with a Single-train Simulation

Warayut Kampeerawat

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

Chaiyut Sumpavakup *

Research Centre for Combustion Technology and Alternative Energy and Department of Power Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

*Corresponding Author, Tel. 08 8559 2351 E-mail: chaiyut.s@cit.kmutnb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.006

Received 20 April 2020; Revised 22 July 2020; Accepted 10 August 2020; Published online: 24 May 2021

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This article presents a guideline to enhance the efficiency of energy usage in Mass Rapid Transit Systems by means of management of regenerative energy from brake systems of an electric train using onboard supercapacitor. The onboard supercapacitors are designed to store regenerative energy and to appropriately supply energy for traction systems. The effects of capacity of onboard energy storage to energy usage of train system are studied based on the BTS Skytrain-Silom line, an urban mass transit system currently operated in Bangkok. The cases studies are performed numerically by considering a single train running along the ordinary operating route in the directions of up-track and down-track. From the numerical results, suitable capacity of supercapacitor can considerably increase the efficiency of regenerative energy usage. For energy saving purpose, a 15 kWh supercapacitor can increase energy saving rate by approximately 18%, provide regenerative energy's recovery rate up to 80% and reduce energy losses in transmission system by 44%.

Keywords: Electric Railway, DC Mass Rapid Transit System, Supercapacitor, Regenerative Energy

Please cite this article as: C. Sumpavakup and W. Kampeerawat, "A study of increasing efficiency of energy utilization by using supercapacitor with a single-train simulation," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 3, pp. 416–426, Jul.–Sep. 2021 (in Thai).

1. บทนำ

การลดการใช้พลังงานเป็นแนวโน้มที่สำคัญในระบบขนส่ง เนื่องจากความไม่แน่นอนของการใช้กำลังไฟฟ้าและพลังงานในระบบรถไฟฟ้า การจัดการพลังงานเป็นประเด็นที่สำคัญที่นักวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสำคัญ ระบบการจัดการพลังงานสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการดำเนินการควบคุมการเดินรถไฟฟ้าภายใต้การวางแผนการใช้พลังงาน อย่างไรก็ตาม ระบบการจัดการพลังงานต้องมีการดำเนินงานร่วมกันหลายฟังก์ชันและหลายองค์ประกอบจึงทำให้ระบบการจัดการพลังงานนั้นเป็นระบบที่ซับซ้อน การเพิ่มขีดความสามารถของการจัดการพลังงานด้วยอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน (Energy Storage Devices; ESD) เช่น แบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด สามารถนำมาบูรณาการในระบบรถไฟฟ้าในรูปแบบติดตั้งบนขบวนรถ (On-board) และรูปแบบติดตั้งข้างทาง (Stationary or Wayside) เนื่องจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในปัจจุบันทำให้อุปกรณ์กักเก็บพลังงานมีความยืดหยุ่นและความเชื่อถือได้มากขึ้น การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์กักเก็บพลังงานในระบบรถไฟฟ้าให้สามารถบรรลุตามวัตถุประสงค์การใช้งานได้นั้น ย่อมต้องอาศัยกลยุทธ์ในการควบคุมที่มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ [1]

เบรกไฟฟ้าของรถไฟฟ้าสามารถแยกตามระบบการทำงานได้ 2 ชนิด คือ ไดนามิกเบรก (Dynamic Brake) และเบรกคืนพลังงานกลับ (Regenerative Brake) ซึ่งไดนามิกเบรกใช้กับขบวนรถไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าโดยเปลี่ยนจากมอเตอร์หมุนล้ามาเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งถูกลัดขั้วให้หมุนแล้วนำกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไปผ่านชุดความต้านทาน (Brake Resistor) ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนและถูกพัดลมระบายความร้อนเป่าทิ้งไปในอากาศ ส่วนเบรกคืนพลังงานกลับใช้หลักการเดียวกันกับไดนามิกเบรก เพียงแต่ไม่เป่าความร้อนที่เกิดขึ้นทิ้งไปในอากาศ แต่นำพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไปขับเคลื่อนขบวนรถอื่นที่อยู่ใกล้เคียงที่ต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าหรืออาจจะเก็บไว้ในอุปกรณ์กักเก็บพลังงานแล้วนำกลับมาใช้ช่วยจ่ายพลังงานไฟฟ้าช่วงที่รถไฟเร่งความเร็ว การเบรกคืนพลังงานกลับเป็นเทคโนโลยีที่มี

ประสิทธิภาพ สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ซึ่งสามารถประหยัดพลังงานได้ประมาณ 8-25 เปอร์เซ็นต์ ของการใช้พลังงานทั้งหมดของรถไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับรอบการขับและกลยุทธ์ควบคุม [1] โดยทั่วไปพลังงานคืนกลับที่ได้จากการเบรกสามารถจัดการได้อย่างมีประสิทธิภาพร่วมกับระบบกักเก็บพลังงาน

วัตถุประสงค์ของการใช้ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System; ESS) สำหรับการใช้งานในระบบรถไฟฟ้า ได้แก่ 1) เพื่อรักษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ [2], [3] 2) เพื่อลดกำลังไฟฟ้าค่าสูงสุดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนหรือระหว่างความเร็วของรถไฟ [4], [5] 3) เพื่อลดการใช้พลังงานโดยรวมของระบบ [6], [7] 4) เพื่อใช้กำลังไฟฟ้าจากรถไฟเป็นแหล่งจ่ายหลัก [8], [9] และ 5) เพื่อใช้ประโยชน์พลังงานคืนกลับจากการเบรก [10], [11] ระบบกักเก็บพลังงานเป็นตัวเลือกที่สำคัญในการจัดการพลังงานที่ได้จากการเบรกในรถไฟ การเลือกเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานขึ้นอยู่กับความต้องการของแต่ละกรณี เช่น พิกัดกำลังไฟฟ้าและพลังงาน เวลาการตอบสนอง ขนาด น้ำหนัก และอุณหภูมิทำงาน แต่โดยทั่วไปการนำมาใช้กับรถไฟในเมืองจะพิจารณาให้มีคุณสมบัติพิกัดกำลังไฟฟ้าสูง พิกัดการจذبพลังงานระดับกลาง เวลาการตอบสนองเร็ว รอบอายุการใช้งานสูง น้ำหนักและจำนวนที่ใช้ให้น้อยโดยเฉพาะสำหรับระบบบนขบวนรถ ซึ่งเทคโนโลยีหลักที่ตอบสนองความต้องการเหล่านี้คือ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด ปัจจุบันอุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าชนิดนี้ได้รับความสนใจอย่างมาก ด้านการประยุกต์ใช้งานสำหรับรถไฟฟ้า มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางสำหรับการเก็บพลังงานคืนกลับจากการเบรกในการขนส่งสาธารณะ เมื่อรถต้องเบรกบ่อยครั้งและไม่สามารถนำพลังงานไฟฟ้าคืนกลับไปยังแหล่งจ่ายหรือรถขบวนอื่นที่วิ่งอยู่บริเวณใกล้เคียง ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถเก็บพลังงานคืนกลับจากการเบรกได้

การจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานบนขบวนรถมีหลายวิธีที่ถูกนำเสนอในงานวิจัยที่ผ่านมา แต่ละวิธีมีความยากง่ายแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น กลยุทธ์การเขียนกฎ (Rule Based Strategy) เพื่อหา

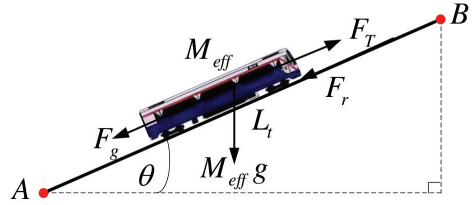
โครงสร้างความเร็วหรือกำลังไฟฟ้าของรถไฟที่ใช้ในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมที่สุด [10] กลยุทธ์ควบคุมที่อยู่บนพื้นฐานฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic) หรือโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network; ANN) [12] กลยุทธ์ควบคุมการประจุไฟฟ้า [11] หรือกลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอด (Peak Demand Cutting Strategy) [4] อย่างไรก็ตาม ขนาดพิกัดของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการใช้พลังงานของระบบ

งานวิจัยนี้แนะนำการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระบบรถไฟไฟฟ้า โดยจัดการพลังงานจากการเบรกรถไฟด้วยการใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟเพื่อกักเก็บพลังงานที่ได้จากการเบรกรถไฟคืนพลังงานกลับแล้วนำไปใช้ในการลดค่ากำลังไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน โดยศึกษาผลกระทบของขนาดพิกัดของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟต่อการเปลี่ยนแปลงการใช้พลังงานของระบบ การทดสอบจะใช้ข้อมูลตัวอย่างของระบบรถไฟไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ดำเนินการจริง นำมาจำลองผลในโปรแกรมเชิงตัวเลข เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงพลังงานก่อนติดตั้ง ESS และหลังติดตั้ง ESS รวมถึงการเปลี่ยนขนาดพิกัดของ ESS ในที่นี้จะนำเสนอการศึกษาผลกระทบเชิงประสิทธิภาพด้านพลังงานโดยพิจารณากรณีระบบที่มีรถไฟไฟฟ้า 1 ขบวนเท่านั้น รายละเอียดที่นำเสนอจะแบ่งเป็น 4 หัวข้อ ได้แก่ แบบจำลองการเคลื่อนที่และสมรรถนะของรถไฟไฟฟ้า การจัดการพลังงานคืนกลับด้วยระบบกักเก็บพลังงาน วิธีการทดสอบผลการทดสอบ และสรุป

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 แบบจำลองและลักษณะสมบัติการเคลื่อนที่ของรถไฟไฟฟ้า

การคำนวณทางพลวัตของรถไฟไฟฟ้า (Train Vehicle Dynamic) เริ่มต้นจากแผนภาพวัตถุอิสระของการเคลื่อนที่ของหัวรถจักรไฟฟ้าที่มีค่าประสิทธิผลของน้ำหนักรถไฟ (Effective Vehicle Mass; M_{eff}) ดังรูปที่ 1 รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปบนรางวิ่ง เพื่อให้การวิเคราะห์อยู่ในรูปทั่วไปรางวิ่งจะถูกยกให้เอียงทำมุมกับแนวราบ ส่งผลให้แรงโน้มถ่วงมีผลต่อ



รูปที่ 1 แผนภาพวัตถุอิสระของการเคลื่อนที่ของรถไฟ [13]

การเคลื่อนที่นี้ด้วย อาจจะช่วยเสริมการเคลื่อนที่หรือต้านการเคลื่อนที่ก็ได้

จากรูปที่ 1 กำหนดให้รถไฟกำลังเคลื่อนที่ไปตามรางวิ่งที่เอียงทำมุม θ กับแนวระดับ ด้วยความเร่ง α แรงกระทำที่เกี่ยวข้อง คือ แรงฉุดของหัวรถจักร (Tractive Effort; F_T) และแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟโดยรวม (Overall Resistance Force; R) ซึ่งแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟประกอบด้วยแรงต้านทานการวิ่ง (Running Resistance Force; F_r) แรงต้านทานเกรเดียนต์ (Gradient Resistance Force; F_g) และแรงต้านทานทางโค้ง (Curve Resistance Force; F_c) ดังนั้นสมการพื้นฐานการเคลื่อนที่ของรถไฟพิจารณาด้วยกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน (Newton's Second Law) ดังสมการที่ (1) และ (2) [4]

$$F = F_T - R = M_{eff} \alpha \quad (1)$$

$$R = F_r + F_g + F_c \quad (2)$$

สำหรับการคำนวณแรงต้านทานการวิ่งเป็นแรงต้านซึ่งเกิดจากการเสียดสีระหว่างล้อกับรางและแรงต้านอากาศสามารถคำนวณได้จากสมการเดวี (Davis Equation) ในส่วนของแรงต้านทานเกรเดียนต์ จะพิจารณาแรงต้านทานเกรเดียนต์โดยพิจารณารูปแบบขบวนรถไฟแบบ Homogeneous Strip และแรงต้านทานทางโค้งสามารถหาได้จาก Roeckl's Formula [4]

2.2 การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่รถไฟใช้ในการเคลื่อนที่

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนขบวนรถไฟ (Train Power

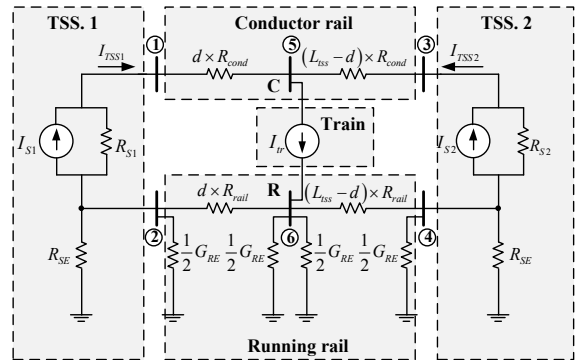
Consumption; P_{tr}) ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ กำลังไฟฟ้าลากจูง (Tractive Power; P_{ta}) กำลังไฟฟ้าจากระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าบนขบวนรถ (ESS Power; P_{ESS}) และกำลังไฟฟ้าเสริม (Auxiliary Power; P_{aux}) ที่เกิดจากระบบแสงสว่าง เครื่องปรับอากาศ ระบบสัญญาณ และอื่นๆ ดังสมการที่ (3) [4] โดยที่ กำลังไฟฟ้าลากจูงจะขึ้นกับค่าแรงดูดขบวนรถไฟฟ้า (F_T) ความเร็วของรถไฟและประสิทธิภาพการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์ลากจูง (η) ดังสมการที่ (4) [4] และ P_{ESS} จะมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ประจุของระบบกักเก็บพลังงาน (ESS Charge Power; P_{charge}) ก็ต่อเมื่อติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานบนขบวนรถและอยู่ในโหมดประจุไฟฟ้า (Charging Mode) และจะมีค่าเท่ากับลบกำลังไฟฟ้าที่คายประจุของระบบกักเก็บพลังงาน (ESS Discharging Power; P_{dis}) ก็ต่อเมื่อติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานบนขบวนรถ และอยู่ในโหมดคายประจุไฟฟ้า (Discharging Mode) และจะมีค่าเป็น 0 เมื่อไม่ได้ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานบนขบวนรถ

$$P_{tr} = P_{ta} + P_{ESS} + P_{aux} \quad (3)$$

$$P_{ta} = \begin{cases} \frac{F_T}{\eta} \times v & ; \text{if } F_T \geq 0 \\ \eta F_T \times v & ; \text{if } F_T < 0 \end{cases} \quad (4)$$

2.3 แบบจำลองระบบจ่ายไฟฟ้าของรถไฟกระแสตรง

การวิเคราะห์ระบบจ่ายไฟฟ้าของระบบรถไฟกระแสตรงขนส่งมวลชน ดำเนินการได้โดยอาศัยการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีโหนด (Node Analysis) ดังในรูปที่ 2 จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (Traction Substation) ส่วนสายป้อน (Feeder) ซึ่งประกอบด้วยรางตัวนำและรางวิ่ง และส่วนรถไฟไฟฟ้า กำหนดให้มีรถไฟที่วิ่งอยู่บนรางขาไปหรือขาขึ้น (Up-track) หนึ่งขบวน ใช้แบบจำลองโพลตรงไฟฟ้าในรูปของกระแส จะได้สมการโหนดเพื่อคำนวณแรงดันไฟฟ้าที่โหนดต่างๆ ดังสมการที่ (5) โดยที่ d คือ ตำแหน่งที่ขบวนรถไฟอยู่บนรางวิ่ง L_{tss} คือ ระยะห่างระหว่างสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน R_{cond} คือ ค่าความต้านทานรางตัวนำ (Conductor Rail Resistance) R_{rail} คือ ค่าความ



รูปที่ 2 วงจรสมมูลระบบจ่ายไฟฟ้าของระบบรถไฟกระแสตรง 1 ขบวน [4]

ต้านทานรางวิ่ง (Running Rail Resistance) R_s คือ ค่าความต้านทานลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (Substation Short-circuit Resistance) I_{TSS} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟ (Substation Current) I_{tr} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าของรถไฟ R_{SE} คือ ค่าความต้านทานดินที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (Traction Substation Ground Resistance) และ G_{RE} คือ ค่าความนำไฟฟ้าของรางเทียบกับดิน (Rail-to-earth Conductance)

$$[V] = [G]^{-1} [I] \quad (5)$$

ค่ากระแสไฟฟ้าของรถไฟ I_{tr} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6) โดยที่ V_{tr} คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมขบวนรถไฟ จากรูปที่ 2 สามารถหาได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าโหนดที่ 5 ลบกับแรงดันไฟฟ้าโหนดที่ 6 ($V_5 - V_6$)

$$I_{tr} = \frac{P_{tr}}{V_{tr}} \quad (6)$$

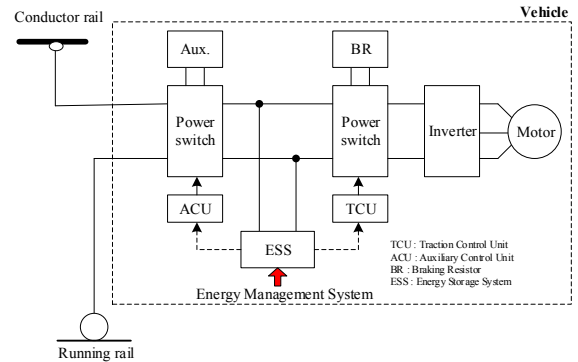
การคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟจะดำเนินการอย่างต่อเนื่อง ใช้ช่วงเวลาคำนวณทุกๆ 0.1 วินาที ตำแหน่งของรถไฟ และกำลังงานไฟฟ้าที่รถไฟรับไปจากสายจ่ายจะเปลี่ยนแปลงไปตามโหมดการทำงานของรถไฟ เช่น โหมดเร่งความเร็ว โหมดรักษาความเร็วคงที่ โหมดแล่นด้วยความเฉื่อย หรือโหมดเบรก การแก้ปัญหาใช้กระบวนการ

แก่สมการแบบไม่เชิงเส้นด้วยวิธีการฉีดกระแส (Current Injection Method) ซึ่งรายละเอียดแสดงไว้ใน [4] โดยกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยรวมสามารถคำนวณได้จากผลรวมของกำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนรถด้วยกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนรถไฟ

2.4 การจัดการพลังงานคืนกลับด้วยระบบกักเก็บพลังงาน

การจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานบนขบวนรถจะขึ้นอยู่กับวิธีการควบคุมการทำงานของระบบกักเก็บพลังงาน รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างแผนภาพการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานบนขบวนรถ ระบบการจัดการพลังงานจะเป็นส่วนที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานบนขบวนรถ TCU จะไปควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบลากจูง เช่น จัดการพลังงานที่ได้จากการเบรกไปเก็บไว้ที่ระบบกักเก็บพลังงานบนขบวนรถหรือถ้าระบบกักเก็บพลังงานบนขบวนรถไม่สามารถเก็บพลังงานดังกล่าวได้ก็ให้กำลังไฟฟ้าไหลไปที่ตัวต้านทานการเบรกเพื่อทิ้งพลังงานไปในรูปของความร้อน ACU จะไปควบคุมการจ่ายไฟให้กับระบบไฟฟ้าเสริมในรถไฟฟ้า เช่น ให้ระบบไฟฟ้าเสริมรับไฟจากรางตัวนำหรือรับไฟจากระบบกักเก็บพลังงานบนขบวนรถ

โดยงานวิจัยนี้ใช้วิธีการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานบนขบวนรถด้วยกลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอด ซึ่งเป็นกลยุทธ์ที่ผู้วิจัยพัฒนารายละเอียดแสดงดังใน [4] โดยการไหลของกำลังไฟฟ้าภายในระบบรถไฟฟ้าขณะรถไฟฟ้ายู่ในสถานะการอัดประจุและคายประจุขึ้นอยู่กับความต้องการกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้านั้น ดังนั้นขณะที่รถไฟฟ้ายาเบรกพลังงานคืนกลับที่ได้จากการเบรกจะถูกจ่ายให้กับระบบไฟฟ้าเสริมก่อนจะถูกอัดประจุเก็บสะสมไว้ที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ติดตั้งอยู่บนขบวนรถ ถ้าค่าความจุพลังงานไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเต็ม พลังงานที่เหลือจะถูกกำจัดทิ้งไปในรูปของความร้อนโดยตัวต้านทานการเบรกไฟฟ้า เมื่อรถไฟฟ้ายาแรง ระบบไฟฟ้าเสริมจะดึงพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าผ่านทางรางตัวนำ ในขณะที่กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ



รูปที่ 3 แผนภาพระบบจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับ ESS

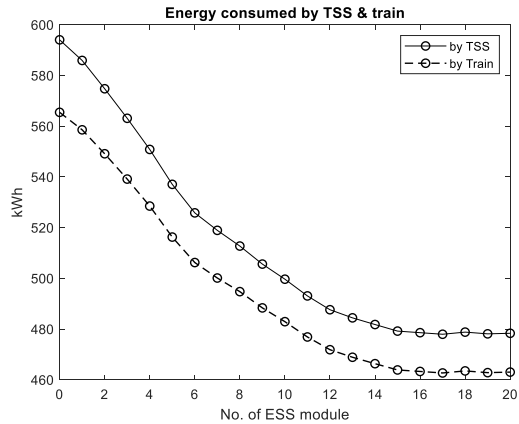
ขับเคลื่อนจะถูกจ่ายมาจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ถ้าพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดยตัวเก็บประจุยิ่งยวดไม่เพียงพอที่จะจ่ายให้รถไฟฟ้าสำหรับการเร่ง พลังงานไฟฟ้าที่ต้องการนั้นจะถูกจ่ายโดยแหล่งจ่ายไฟฟ้าผ่านทางรางตัวนำ ซึ่งหมายความว่ากำลังไฟฟ้าค่ายอดของแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะถูกชดเชยด้วยพลังงานไฟฟ้าที่เก็บได้จากการเบรกของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

2.5 วิธีการวิจัย

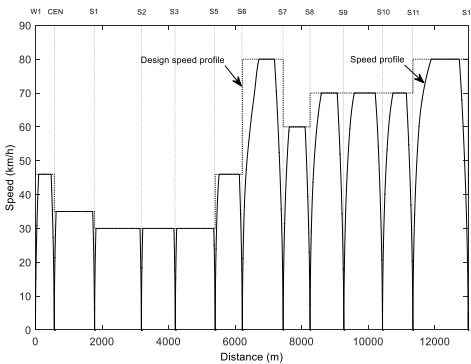
ระบบรถไฟฟ้ายานส่งมวลชนกระแสดตรง BTS Skytrain สายสีลม ถูกนำมาใช้ในการทดสอบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น โดยระบบรถไฟฟ้ายานส่งมวลชนสายสีลม แสดงดังรูปที่ 4 มีจำนวนสถานีผู้โดยสาร 13 สถานี (W1-S12) สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน 7 สถานี ซึ่งมีพิกัด 2550 kVA (CEN, S2, S5, S07) และ 3300 kVA (S9, S11, S12) ในการจำลองผลกำหนดให้มีขบวนรถไฟให้บริการ 1 ขบวน วิ่งขาขึ้นจากสถานี W1 ไป S12 และขาล่องจากสถานี S12 ไป W1 รวมระยะทางวิ่ง 1 รอบเท่ากับ 26 กิโลเมตร กำหนดเส้นโค้งความเร็วในการวิ่งของรถไฟดังรูปที่ 5 และพารามิเตอร์สำหรับการทดสอบดังแสดงใน [14] ทำการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานบนขบวนรถไฟ (ESS) คือ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดของยี่ห้อ Bombardier รุ่น MITRAC Energy Saver Unit ดังรูปที่ 6 [15] ตั้งแต่ 1 ถึง 20 มอดูล (เพิ่มขนาดพิกัด 1-20 กิโลวัตต์ชั่วโมง) โดยกำหนด SOC ที่สามารถใช้ได้คือ 20-95 เปอร์เซ็นต์ และเปรียบเทียบกับ



รูปที่ 4 เส้นทางวิ่งของรถไฟฟ้า BTS Skytrain สายสีลม และตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน



รูปที่ 7 ปริมาณพลังงานไฟฟ้ารวมที่รถไฟรับจากระบบ และพลังงานไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจ่ายเข้าสู่ระบบ



รูปที่ 5 การควบคุมความเร็วตามโครงสร้างความเร็วที่ได้ ออกแบบไว้

3. ผลการทดลอง

พิจารณาพลังงานไฟฟ้ารวมที่รถไฟได้รับจากระบบ และพลังงานที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนต้องจ่ายเข้าสู่ระบบในการทำงาน 1 รอบ แสดงในรูปที่ 7 พบว่า ขนาดของ ESS ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พลังงานที่รถไฟดึงจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และพลังงานที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนต้องจ่ายเข้าสู่ระบบมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน อัตราการลดลงของพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟดึงจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อขนาดพิกัดของ ESS เพิ่มขึ้นในช่วง 1-6 กิโลวัตต์ชั่วโมง (1-6 มอดูล) จากนั้นอัตราการลดลงของพลังงานไฟฟ้ามีค่าลดลง และอัตราการลดลงของปริมาณพลังงานที่รถไฟดึงจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเริ่มมีแนวโน้มคงที่เมื่อ ESS มีขนาดมากกว่า 15 กิโลวัตต์ชั่วโมง (15 มอดูล)

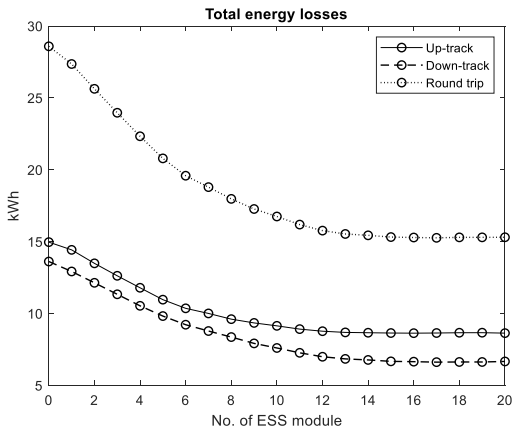
MITRAC Energy Saver Unit	
Installed energy	1 kWh
Max. output power	300 kW
Weight	428 kg



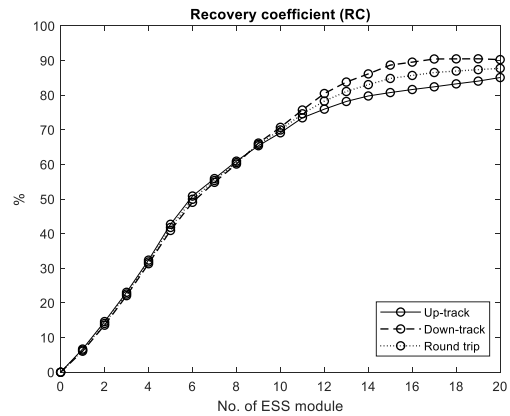
รูปที่ 6 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสำหรับการจำลองผล

ผลการจำลอง ได้แก่ การใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าและสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน พลังงานไฟฟ้าสูญเสียโดยรวม รวมถึงการประหยัดพลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพการใช้พลังงานคืนกลับ ซึ่งพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การคืนพลังงานกลับ (Energy Recovery Coefficient; RC) [4]

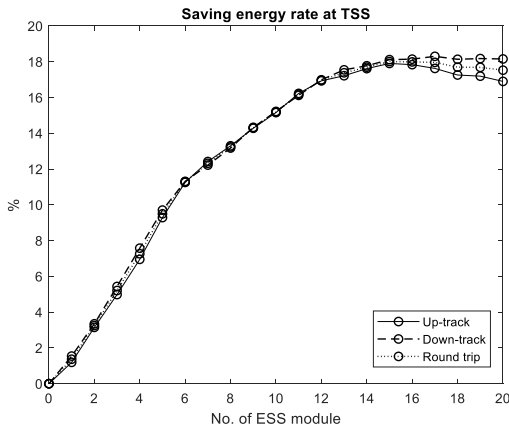
พิจารณาพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบจ่ายไฟในกรณีที่ยังไม่ติดตั้ง ESS พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบจ่ายไฟมีค่าประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ ของพลังงานที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจ่ายให้รถไฟ พลังงานไฟฟ้าสูญเสียในเส้นทางขาขึ้นมีค่าสูงกว่าเส้นทางขาล่อง เมื่อติดตั้ง ESS และเพิ่มขนาด ESS พลังงานไฟฟ้าสูญเสียในเส้นทางขาขึ้นและขาล่องมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน แสดงในรูปที่ 8 เมื่อพิจารณาพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในเส้นทาง 1 รอบ พบว่า การติดตั้ง ESS ลดพลังงาน



รูปที่ 8 พลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมในระบบจ่ายไฟ



รูปที่ 10 พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้



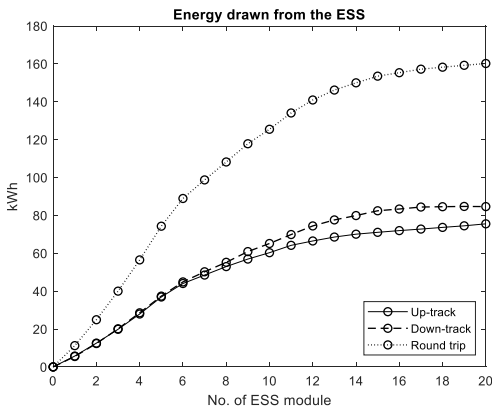
รูปที่ 9 พลังงานไฟฟ้าที่ ESS ปล่อยให้รถไฟ

ไฟฟ้าสูญเสียได้สูงสุดประมาณ 44 เปอร์เซ็นต์ โดยอัตราการลดลงของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อขนาดพิกัดของ ESS เพิ่มขึ้นในช่วง 1-6 กิโลวัตต์ชั่วโมง (1-6 มอดูล) จากนั้นอัตราการลดลงของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียมีค่าลดลง และพลังงานที่รถไฟดึงจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเริ่มคงที่เมื่อ ESS มีขนาดมากกว่า 15 กิโลวัตต์ชั่วโมง (15 มอดูล)

พิจารณาพลังงานไฟฟ้าที่ ESS จ่ายให้กับรถไฟในการทำงาน 1 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่า ในช่วง ESS ขนาดพิกัด 1-6 กิโลวัตต์ชั่วโมง (1-6 มอดูล) ปริมาณพลังงานไฟฟ้าจ่ายต่อขนาดของ ESS มีค่าเฉลี่ยประมาณ 15 กิโลวัตต์ชั่วโมง ต่อ ESS 1 กิโลวัตต์ชั่วโมง ในช่วง ESS ขนาดพิกัด 6-14

กิโลวัตต์ชั่วโมง (6-14 มอดูล) ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายต่อขนาดของ ESS มีค่าเฉลี่ยประมาณ 12 กิโลวัตต์ชั่วโมง ต่อ ESS 1 กิโลวัตต์ชั่วโมง ในช่วง ESS ขนาดพิกัดมากกว่า 14 กิโลวัตต์ชั่วโมง (14 มอดูล) ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายต่อขนาดของ ESS มีค่าน้อยลงจนคงที่ที่ค่าประมาณ 8 กิโลวัตต์ชั่วโมง ต่อ ESS 1 กิโลวัตต์ชั่วโมง เมื่อพิจารณาการจ่ายพลังงานไฟฟ้าในช่วงขาขึ้นและขาล่องแยกกันพบว่า ในช่วง ESS ขนาดพิกัด 1-6 กิโลวัตต์ชั่วโมง (1-6 มอดูล) การจ่ายพลังงานไฟฟ้าของ ESS ในช่วงขาขึ้นและขาล่องมีค่าใกล้เคียงกัน ในช่วง ESS ขนาดพิกัดมากกว่า 6 กิโลวัตต์ชั่วโมง (6 มอดูล) ESS จ่ายพลังงานในช่วงขาล่องมากกว่าช่วงขาขึ้น

พิจารณาการประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการติดตั้ง ESS ในกรณีรถไฟ 1 ขบวนขับเคลื่อนบนเส้นทาง 1 รอบ พบว่า สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ เมื่อติดตั้ง ESS ขนาด 15 กิโลวัตต์ชั่วโมง (15 มอดูล) เมื่อติดตั้ง ESS ขนาดมากกว่า 15 กิโลวัตต์ชั่วโมง อัตราการประหยัดพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากผลของน้ำหนัก ESS ที่เพิ่มมากขึ้น ดังผลที่แสดงในรูปที่ 10 ถ้าพิจารณาแยกเส้นทางขาขึ้นและขาล่องพบว่า เมื่อติดตั้ง ESS ขนาดไม่เกิน 15 กิโลวัตต์ชั่วโมง สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อติดตั้ง ESS ขนาดมากกว่า 15 กิโลวัตต์ชั่วโมง จะสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าในช่วงขาล่องได้ดีกว่าพิจารณาประสิทธิภาพ



รูปที่ 11 ประสิทธิภาพการใช้พลังงานคืนกลับ

การใช้พลังงานคืนกลับที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการติดตั้ง ESS ในกรณีรถไฟ 1 ขบวนขับเคลื่อนบนเส้นทาง 1 รอบ พบว่าสามารถใช้พลังงานคืนกลับได้มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อติดตั้ง ESS ขนาด 6 กิโลวัตต์ชั่วโมง (6 มอดูล) และสามารถคืนพลังงานคืนกลับได้มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ เมื่อติดตั้ง ESS ขนาด 14 กิโลวัตต์ชั่วโมง (14 มอดูล) ขึ้นไป เมื่อติดตั้ง ESS ขนาดมากกว่า 14 กิโลวัตต์ชั่วโมง ประสิทธิภาพการใช้พลังงานคืนกลับที่เพิ่มขึ้นน้อยมากและมีแนวโน้มคงที่ ดังผลที่แสดงในรูปที่ 11 ถ้าพิจารณาแยกเส้นทางขาขึ้นและขาล่องพบว่า เมื่อติดตั้ง ESS ขนาดไม่เกิน 10 กิโลวัตต์ชั่วโมง (10 มอดูล) ประสิทธิภาพการใช้พลังงานคืนกลับมีค่าใกล้เคียงกันแต่เมื่อติดตั้ง ESS ขนาดมากกว่า 10 กิโลวัตต์ชั่วโมง จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานคืนกลับในช่วงขาล่องได้ดีกว่า โดยได้สูงสุดถึง 90 เปอร์เซ็นต์

การใช้พลังงานจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนมีแนวโน้มลดลง ทำให้ลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบจ่ายไฟได้มากขึ้น แปรผันตามขนาดของ ESS สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น แต่เมื่อ ESS มีขนาดใหญ่ขึ้น น้ำหนักของ ESS ที่สูงขึ้น จะเป็นภาระของรถไฟ มีผลทำให้รถไฟต้องดึงพลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้น ESS ขนาดใหญ่เกินไป อาจทำให้ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานไฟฟ้าลดลง

เมื่อ ESS มีขนาดใหญ่ขึ้นประสิทธิภาพการใช้พลังงานคืนกลับจะมากขึ้น เมื่อ ESS มีขนาดใหญ่พอจะสามารถใช้

พลังงานคืนกลับได้เกือบทั้งหมดช่วยลดพลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในตัวต้านทานเบรก ส่งผลให้สามารถลดขนาดพิกัดตัวต้านทานเบรกหรือยืดอายุการใช้งานของตัวต้านทานเบรกได้

จากผลการทดสอบ พิจารณาในกรณีมีรถไฟเพียง 1 ขบวน และวิเคราะห์เฉพาะประเด็นด้านประสิทธิภาพเชิงพลังงานเท่านั้น ดังนั้นบทความนี้จึงอภิปรายผลการวิเคราะห์ที่ด้านพลังงานเท่านั้น ในกรณีศึกษาที่พิจารณา รถไฟฟ้าทำงานร่วมกันหลายขบวน และการพิจารณาผลกระทบด้านอื่นๆ เช่น ด้านแรงดัน และการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้า จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ระบบและอภิปรายเพิ่มเติม เพื่อใช้ในการอธิบายระบบให้ใกล้เคียงการดำเนินการจริงมากขึ้น

4. สรุป

การติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดบนขบวนรถไฟมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานให้สูงขึ้น และเนื่องจากพิกัดกำลังที่ค่อนข้างสูงทำให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถช่วยในการลดกำลังไฟฟ้าขณะทำงานและส่งผลต่อการรักษาระดับแรงดันด้วย บทความนี้ได้ศึกษาผลของขนาด ESS ต่อการเปลี่ยนแปลงการใช้พลังงานของระบบพบว่า เมื่อ ESS มีขนาดเหมาะสมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระบบให้สูงขึ้น ส่งผลให้ลดการใช้พลังงานจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนและลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบจ่ายไฟ เมื่อเพิ่มขนาด ESS จนถึงพิกัดค่าหนึ่งประสิทธิภาพการใช้พลังงานจะเริ่มคงที่หรือเพิ่มขึ้นน้อยมาก จากผลการทดสอบเพื่อการประหยัดพลังงาน ควรเลือกติดตั้ง ESS ขนาดไม่เกิน 15 กิโลวัตต์ชั่วโมง ซึ่งจะประหยัดพลังงานรวมได้สูงสุดประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ สามารถคืนพลังงานคืนกลับได้มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ และลดพลังงานสูญเสียในระบบส่งพลังงานได้สูงสุดประมาณ 44 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ การพิจารณาเลือกขนาดของ ESS เพื่อตอบสนองวัตถุประสงค์ที่หลากหลายพร้อมกัน จำเป็นต้องใช้เงื่อนไขการตัดสินใจที่ซับซ้อนมากขึ้น รวมถึงประเด็นเรื่องความคุ้มค่าในการลงทุนด้วย นอกจากนี้ กรณีศึกษาสำหรับระบบที่รถไฟทำงานร่วมกันหลายขบวน

การพิจารณาผลกระทบด้านอื่นๆ จะได้มีการศึกษาและ
นำเสนอผลการวิเคราะห์ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Xu, W. Li, K. Xu, and Z. Song, "An intelligent regenerative braking strategy for electric vehicles," *Energies*, vol. 4, no. 9, pp. 1461–1477, 2011.
- [2] M. Jarnut, J. Kaniewski, and V. Protsiuk, "Energy storage system for peak-power reduction of traction substation," in *Proceedings of Innovative Materials and Technologies in Electrical Engineering*, Sulecin, Poland, 2018, pp. 1–5.
- [3] F. Perez, A. Iovine, G. Damm, L. Galai-Dol, and P. F. Ribeiro, "Stability analysis of a DC microgrid for a smart railway station integrating renewable sources," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 28, no. 5, pp. 1–15, 2019.
- [4] C. Sumpavakup, T. Ratniyomchai, and T. Kulworawanichpong, "Optimal energy saving in DC railway system with on-board energy storage system by using peak demand cutting strategy," *Journal of Modern Transportation*, vol. 25, no. 4, pp. 223–235, 2017.
- [5] Q. Qin, T. Guo, F. Lin, and Z. Yang, "Energy transfer strategy for urban rail transit battery energy storage system to reduce peak power of traction substation," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 12, pp. 11714–11724, 2019.
- [6] M. Xu, Q. Liu, C. Mao, Q. Wang and P. Sun, "Energy-efficient control of energy storage tram with signaling constraints," in *Proceedings of the 37th Chinese Control Conference*, Wuhan, China, 2018, pp. 7742–7747.
- [7] Y. Takeuchi, T. Ogawa, K. Sato, H. Morimoto, and T. Saito, "Optimal control method of an energy storage system for energy saving," in *Proceedings of International Power Electronics Conference*, Niigata, Japan, 2018, pp. 3265–3272.
- [8] S. Wei, J. Jiang, N. Murgovski, J. Sjöberg, W. Zhang, C. Zhang, and X. Hu "Optimisation of a catenary-free tramline equipped with stationary energy storage systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 3, pp. 2449–2462, 2020.
- [9] H. Al-Ezee, C. Gould, and S.B. Tennakoon, "Novel method for energy management for catenary free system operation," in *Proceedings of 53rd International Universities Power Engineering Conference*, Glasgow, UK, pp. 1–6, 2018.
- [10] C. Wu, S. Lu, F. Xue, L. Jiang, and J. Yang, "Optimization of speed profile and energy interaction at stations for a train vehicle with on-board energy storage device," in *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Changshu, China, 2018, pp. 1–6.
- [11] Y. Yoshida and S. Arai, "Charge control of regenerative power for energy saving in railway systems," in *Proceedings of IEEE International Conference on Agents*, Singapore, 2018, pp. 69–74.
- [12] S. Eziani and M. Ouassaid, "State of charge estimation of supercapacitor using artificial neural network for onboard railway applications," in *Proceedings of the 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference*, Rabat, Morocco, 2018,



- pp. 1–6.
- [13] C. Sumpavakup and T. Kulworawanichpong, “Multi-train movement simulation using MATLAB object-oriented programming,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 763, pp. 153–158, 2015.
- [14] C. Sumpavakup, S. Suwannakijborihan, T. Ratniyomchai, and T. Kulworawanichpong, “Peak demand cutting strategy with on-board energy storage system in mass rapid transit,” *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, vol. 42, pp. 49–62, 2018.
- [15] Bombardier Inc. *EcoActive Technology-MITRAC Energy Saver*. datasheet, Zurich, Switzerland, 2009.