

การลดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในระบบรถไฟฟ้าโดยใช้ การจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับการติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดบนขบวนรถ

Reducing Peak Demand at Traction Substations in Electric Railway System by Regenerative Energy Management and Onboard Supercapacitor Installation

ชัยยุทธ สัมภาวะคุปต์^{1,*} และ วรยุทธ คัมภีร์วัฒน์²

¹ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก และภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง
วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จังหวัดกรุงเทพมหานคร
²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น

Email: chaiyut.s@cit.kmutnb.ac.th

Chaiyut Sumpavakup^{1,*} and Warayut Kampeerawat²

¹Research 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

²Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand
Email: chaiyut.s@cit.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาผลการติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดบนขบวนรถไฟฟ้าต่อกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขณะทำงาน โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับการควบคุมระบบกักเก็บพลังงานแบบตัวเก็บประจุยิ่งยวด ในการทดสอบได้พิจารณาผลของขนาดพิกัด ESS ต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยระบบทดสอบเลือกใช้ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนรถไฟฟ้า BTS Skytrain สายสีลม ผลการทดสอบพบว่าเมื่อ ESS มีพิกัดสูงขึ้นความสามารถในการกักเก็บพลังงานและการจ่ายกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น สามารถช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่รถไฟและสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าขณะทำงานที่ตำแหน่งรถไฟและสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนมีค่าสูงขึ้น โดยขนาดพิกัดที่เหมาะสมของ ESS คือ 4-6 kWh จะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 1.2-1.8 MW จะช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้ทุกสถานีน้อย 20% เปรียบเทียบกับกรณียังไม่ติดตั้ง ESS และในบางสถานีสามารถลดได้มากที่สุดถึง 60% เปรียบเทียบกับกรณียังไม่ติดตั้ง ESS ซึ่งจะลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในภาพรวมคิดเป็นประมาณ 33% และช่วยยกระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่

สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนให้อยู่ในระดับสูงกว่า 0.95 pu. และยกระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ตำแหน่งรถไฟได้ในระดับสูงกว่า 0.90 pu.

คำสำคัญ: ระบบรถไฟฟ้ามวลชน; การจัดการพลังงานกักเก็บ; การลดกำลังไฟฟ้าสูงสุด

Abstract

This paper presents a study on the effect of installing onboard supercapacitors on the peak demand at traction substations during the train operation by applying regenerative energy management with the control of supercapacitor energy storage systems (ESS). To determine the effect of ESS capacity on the variation of peak power, the case studies based on the BTS Skytrain Silom Line have been performed. The numerical results show that when the capacity of ESS is increased enough, the ability to store energy and supply power is higher. As a result, the peak power at traction substations can considerably decrease and the minimum voltage can be improved. The optimal capacity of the ESS is 4-6 kWh, which can provide the maximum power of 1.2-1.8 MW. Comparing to the case in which the ESS is not installed, the peak power can be reduced by at least 20% at every substation and by up to 60% at some substations and the peak power in the overall can decrease by approximately 33%. Moreover, the minimum voltage at the traction substation and the minimum voltage at the train can be improved to the level higher than 0.95 pu. and 0.90 pu. respectively.

Keywords: Mass Rapid Transit System; Regenerative Energy Management; Peak Reduction

1. บทนำ

ในปัจจุบันการขนส่งสาธารณะทางรางมีความต้องการใช้งานเพิ่มขึ้น หลายประเทศมีการวางแผนขยายเส้นทางของระบบขนส่งมวลชนของตนเองให้ครอบคลุมพื้นที่เขตเมืองทั้งหมด เพื่อที่จะเคลื่อนย้ายผู้โดยสารจำนวนมากในช่วงเวลาเร่งด่วนจำเป็นต้องมีขบวนรถไฟและแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนที่เพียงพอต่อความต้องการ จะทำให้เกิดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (traction substation) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าที่รถไฟเร่งเป็นหลัก ประมาณ 25% ของค่าไฟฟ้าโดยรวม [1] ลักษณะระบบขนส่งทางรางในเมืองจะมีการเร่งความเร็วและเบรกบ่อยซึ่งนำไปสู่กำลังไฟฟ้าคืนกลับที่สูงการเบรกคืนพลังงานกลับ (regenerative braking) เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า ซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้จะขึ้นอยู่กับรอบการขับและกลยุทธ์การควบคุม [2]

เนื่องจากพลังงานคืนกลับเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้น ๆ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดซึ่งมีคุณลักษณะในการอัดประจุและคายประจุได้รวดเร็วจึงถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ในการเก็บพลังงานสำหรับระบบการจัดการพลังงาน [3-5] โดย

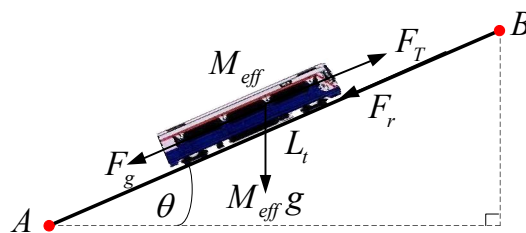
สามารถช่วยเพิ่มการใช้ประโยชน์พลังงานคืนกลับจากการเบรกและลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดขณะรถไฟออกตัว [6-7] พลังงานที่ได้จากการเบรกสามารถจัดการได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System: ESS) ที่มีระบบควบคุมจัดการที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ โดยวัตถุประสงค์ของการควบคุมจัดการ เช่น การรักษาเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าของระบบ [8-9] การลดกำลังไฟฟ้าค่าสูงสุดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนหรือระหว่างการเร่งความเร็วของรถไฟ [3, 10] การประหยัดพลังงาน [11] เป็นต้น งานวิจัยที่นำเสนอกลยุทธ์สำหรับการควบคุมจัดการ เช่น การเขียนกฎ (Rule Based Strategies: RBS) จะเป็นกลยุทธ์ที่ง่ายที่สุดและการกำหนดกฎมักจะขึ้นอยู่กับโหมดการเร่งและโหมดเบรกคืนพลังงานกลับ [1] การหาโครงสร้างความเร็วหรือกำลังไฟฟ้าของรถไฟที่ใช้ในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสม [12] การควบคุมสถานะการประจุ [13] กลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอด (peak demand cutting strategy) [3] เป็นต้น

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาการลดความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในระบบรถไฟไฟฟ้ โดยใช้การจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับการติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดบนขบวนรถ โดยศึกษาผลกระทบของขนาดพิกัดของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟต่อการเปลี่ยนแปลงการใช้พลังงานของระบบการทดสอบจะใช้ข้อมูลตัวอย่างของระบบรถไฟฟ้านั่งส่งมวลชนที่ดำเนินการจริง นำมาจำลองผลในโปรแกรมเชิงตัวเลข เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบก่อนติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวด และหลังติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวด รวมถึงการเปลี่ยนขนาดพิกัดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด รายละเอียดที่นำเสนอจะแบ่งเป็น 4 หัวข้อ ได้แก่ แบบจำลองการเคลื่อนที่และสมรรถนะของรถไฟไฟฟ้ การจัดการพลังงานคืนกลับด้วยกลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอด การทดสอบและผลการทดสอบ และสรุปผลการทดสอบ

2. แบบจำลองการเคลื่อนที่และสมรรถนะของรถไฟไฟฟ้

2.1 แบบจำลองและลักษณะสมบัติการเคลื่อนที่ของรถไฟไฟฟ้

การคำนวณทางพลวัตของรถไฟไฟฟ้ เริ่มต้นจากแผนภาพวัตถุอิสระของการเคลื่อนที่ของหัวรถจักรไฟฟ้าที่มีค่าประสิทธิภาพของน้ำหนักกรรถไฟไฟฟ้ (effective vehicle mass: M_{eff}) ดังรูปที่ 1 รถไฟไฟฟ้เคลื่อนที่ไปบนรางวิ่งเพื่อให้การวิเคราะห์อยู่ในรูปทั่วไปรางวิ่งจะถูกยกให้เอียงทำมุมกับแนวราบ ส่งผลให้แรงโน้มถ่วงมีผลต่อการเคลื่อนที่



รูปที่ 1 แผนภาพวัตถุอิสระของการเคลื่อนที่ของรถไฟ [14]

จากรูปที่ 1 กำหนดให้รถไฟฟ้ากำลังเคลื่อนที่ไปตามรางวิ่งที่เอียงทำมุม θ กับแนวระดับ ด้วยความเร่ง α แรงกระทำที่เกี่ยวข้อง คือ แรงฉุดของหัวรถจักร (tractive effort: F_T) และแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าโดยรวม (overall resistance force: R) ซึ่งแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าประกอบด้วยแรงต้านทานการวิ่ง (running resistance force: F_r) แรงต้านทานเกรเดียนต์ (gradient resistance force: F_g) และแรงต้านทานทางโค้ง (curve resistance force: F_c) ดังนั้นสมการพื้นฐานการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าพิจารณาด้วยกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน ดังสมการที่ (1) [3]

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

2.2 การคำนวณกำลังไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้า (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 และอื่น ๆ ดังสมการที่ (2) โดยที่ กำลังไฟฟ้าลากจูงจะขึ้นกับค่าแรงฉุดขบวนรถไฟฟ้า (F_T) ความเร็วของรถไฟฟ้า (v) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์ลากจูง (η) ดังสมการที่ (3) และ P_{ESS} จะมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ประจุของระบบกักเก็บพลังงาน (ESS charge power: P_{charge}) ก็ต่อเมื่อติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานบนขบวนรถและอยู่ในโหมดประจุไฟฟ้า (charging mode) และ จะมีค่าเท่ากับลบกำลังไฟฟ้าที่คายประจุของระบบกักเก็บพลังงาน (ESS discharging power: P_{dis}) ก็ต่อเมื่อติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานบนขบวนรถและอยู่ในโหมดคายประจุไฟฟ้า (discharging mode) และจะมีค่าเป็น 0 เมื่อไม่ได้ติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานบนขบวนรถ

$$P_{tr} = P_{ta} + P_{ESS} + P_{aux} \quad (2)$$

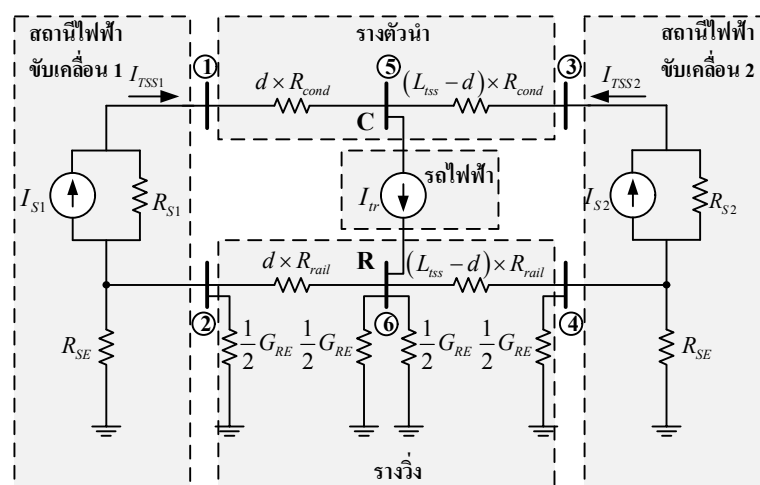
$$P_{ta} = \begin{cases} \frac{F_T}{\eta} \times v & ; \text{ if } F_T \geq 0 \\ \eta F_T \times v & ; \text{ if } F_T < 0 \end{cases} \quad (3)$$

2.3 แบบจำลองระบบจ่ายไฟฟ้าของรถไฟฟ้ากระแสตรง

การวิเคราะห์ระบบจ่ายไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงขนส่งมวลชน ดำเนินการได้โดยอาศัยการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธี โหนด (node analysis) ดังในรูปที่ 2 จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ส่วนสายป้อนซึ่งประกอบด้วยรางตัวนำและรางวิ่ง และส่วนรถไฟฟ้า กำหนดให้มีรถไฟฟ้าวิ่งอยู่

บนราง หนึ่งขบวน ใช้แบบจำลองโพลครดไฟฟ้าในรูปของกระแส โดยที่ d คือ ตำแหน่งที่ขบวนรถไฟอยู่บนรางวิ่ง L_{iss} คือ ระยะห่างระหว่างสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน R_{cond} คือ ค่าความต้านทานรางตัวนำ R_{rail} คือ ค่าความต้านทานรางวิ่ง R_S คือ ค่าความต้านทานลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน I_{TSS} คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟ I_r คือ ค่ากระแสไฟฟ้าของรถไฟ R_{SE} คือ ค่าความต้านทานดินที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และ G_{RE} คือ ค่าความนำไฟฟ้าของรางเทียบกับดิน

การคำนวณผลเฉลยแรงดันไฟฟ้าในระบบรถไฟจะดำเนินการอย่างต่อเนื่อง ใช้ช่วงเวลาคำนวณทุก ๆ 0.1 วินาที ตำแหน่งของรถไฟและกำลังงานไฟฟ้าที่รถไฟรับไปจากสายจ่ายจะเปลี่ยนแปลงไปตามโหมดการทำงานของรถไฟ เช่น โหมดเร่งความเร็ว โหมดรักษความเร็วคงที่ โหมดแล่น หรือโหมดเบรก เป็นต้น

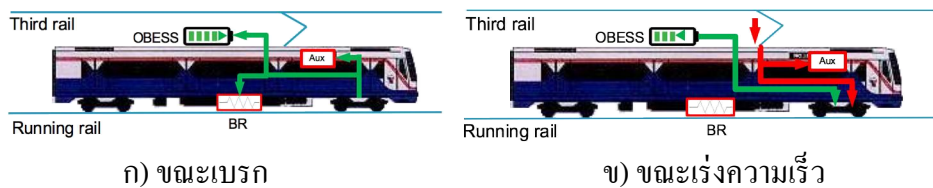


รูปที่ 2 วงจรสมมูลระบบจ่ายไฟฟ้าของระบบรถไฟกระแสตรง 1 ขบวน

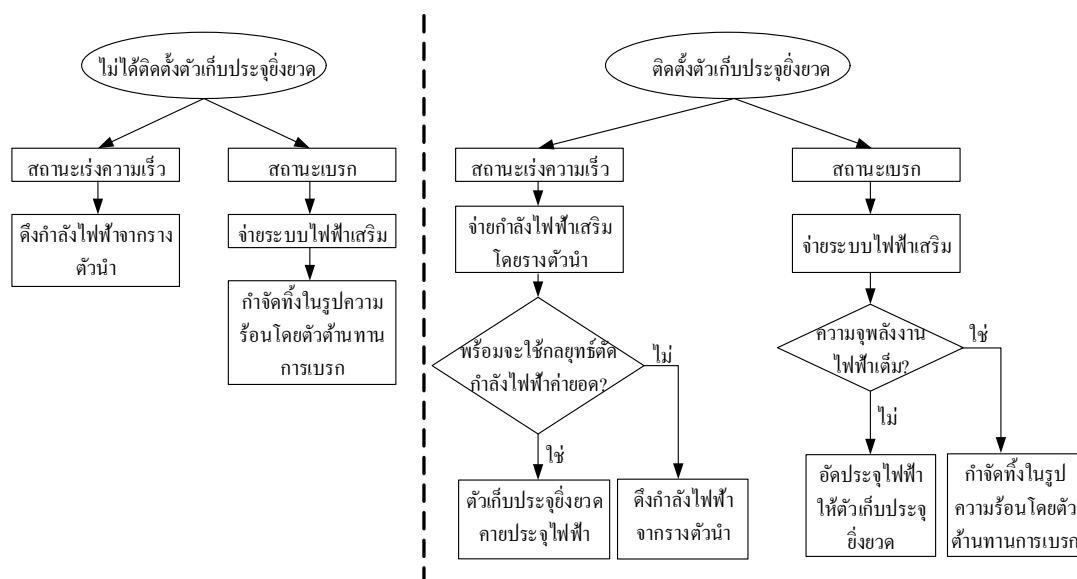
3. การจัดการพลังงานคืนกลับด้วยกลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าคายอด

การจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานบนขบวนรถไฟจะขึ้นอยู่กับวิธีการควบคุมการทำงานของระบบกักเก็บพลังงาน งานวิจัยนี้ใช้วิธีการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับระบบกักเก็บพลังงานบนขบวนรถไฟด้วยกลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าคายอด ซึ่งเป็นกลยุทธ์ที่ผู้วิจัยพัฒนา [3] โดยพิจารณาเฉพาะการไหลของกำลังไฟฟ้าเท่านั้น ไม่คำนึงถึงวงจรหรือการควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์กำลัง การไหลของกำลังไฟฟ้าภายในระบบรถไฟขณะรถไฟอยู่ในสถานะการอัดประจุและคายประจุแสดงดังรูปที่ 3 ขึ้นอยู่กับความต้องการกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟเท่านั้น ดังนั้นขณะที่รถไฟเบรกพลังงานคืนกลับที่ได้จากการเบรกจะถูกจ่ายให้กับระบบไฟฟ้าเสริมก่อนจะถูกอัดประจุเก็บสะสมไว้ที่ ESS ถ้าค่าความจุพลังงานไฟฟ้าของ ESS เต็ม พลังงานที่เหลือจะถูกกำจัดทิ้งไปในรูปของความร้อนโดยตัวต้านทานการเบรกไฟฟ้า เมื่อรถไฟแรงระบบไฟฟ้าเสริมจะดึงพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าผ่านทางรางตัวนำ ในขณะที่กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในระบบขับเคลื่อนจะถูกจ่ายมาจาก ESS เท่านั้น ถ้าพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายโดย ESS ไม่เพียงพอที่จะจ่ายให้รถไฟสำหรับ

การเร่ง พลังงานไฟฟ้าที่ต้องการนั้นจะถูกจ่ายโดยแหล่งจ่ายไฟฟ้าผ่านรางตัวนำ ซึ่งหมายความว่ากำลังไฟฟ้าค่า ยอดของแหล่งจ่ายไฟฟ้าจะถูกชดเชยด้วยพลังงานไฟฟ้าที่เก็บได้จากการเบรกของ ESS แผนภาพการจัด การพลังงานของระบบรถไฟฟ้าที่นำเสนอโดยเทียบกับกรณีไม่ได้ติดตั้ง ESS แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งปกติขณะรถไฟฟ้า เร่งจะดึงไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าผ่านรางตัวนำและขณะรถไฟฟ้าเบรกจะกำหนดให้พลังงานคืนกลับที่ได้จาก เบรกจะถูกจ่ายให้กับระบบไฟฟ้าเสริมก่อนส่วนพลังงานไฟฟ้าที่เหลือจะถูกกำจัดทิ้งไปในรูปของความร้อนโดย ตัวต้านทานการเบรกไฟฟ้า



รูปที่ 3 การไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อจัดการพลังงานคืนกลับด้วยกลยุทธ์การตัดความต้องการกำลังไฟฟ้าค่ายอด [3]



รูปที่ 4 แผนภาพเปรียบเทียบการจัดการพลังงานกรณีไม่ได้ติดตั้งและติดตั้ง ESS

4. การทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 รายละเอียดการทดสอบ

ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดร่ง BTS Skytrain สายสีลม แสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งดัดแปลงภาพมาจาก [15] ถูกนำมาใช้ในการทดสอบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น มีจำนวนสถานีผู้โดยสาร 13 สถานี (สนามกีฬาแห่งชาติ- บางหว้า) ในการจำลองผลกำหนดให้มีขบวนรถไฟฟ้าให้บริการ 1 ขบวน ระยะทางวิ่ง 1 รอบเท่ากับ 26 km และ พารามิเตอร์สำหรับการทดสอบดังแสดงใน [3] ทำการติดตั้งระบบกักเก็บพลังงานบนขบวนรถไฟฟ้า (ESS) คือ ตัว เก็บประจุยิ่งยวดของยี่ห้อ Bombardier รุ่น MITRAC Energy Saver Unit ที่มีพิกัดต่อ 1 โมดูล คือ พลังงานไฟฟ้า 1

kWh จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 300 kW น้ำหนัก 428 kg [16] ตั้งแต่ 1 ถึง 20 โมดูล โดยกำหนด SOC ที่สามารถใช้ได้คือ 20-95% และเปรียบเทียบผลการจำลอง ได้แก่ การใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าและสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน พลังงานคืนกลับจากการเบรก กำลังไฟฟ้าสูงสุดของรถไฟฟ้า สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนและ ESS และแรงดันไฟฟ้าของรถไฟฟ้าและสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

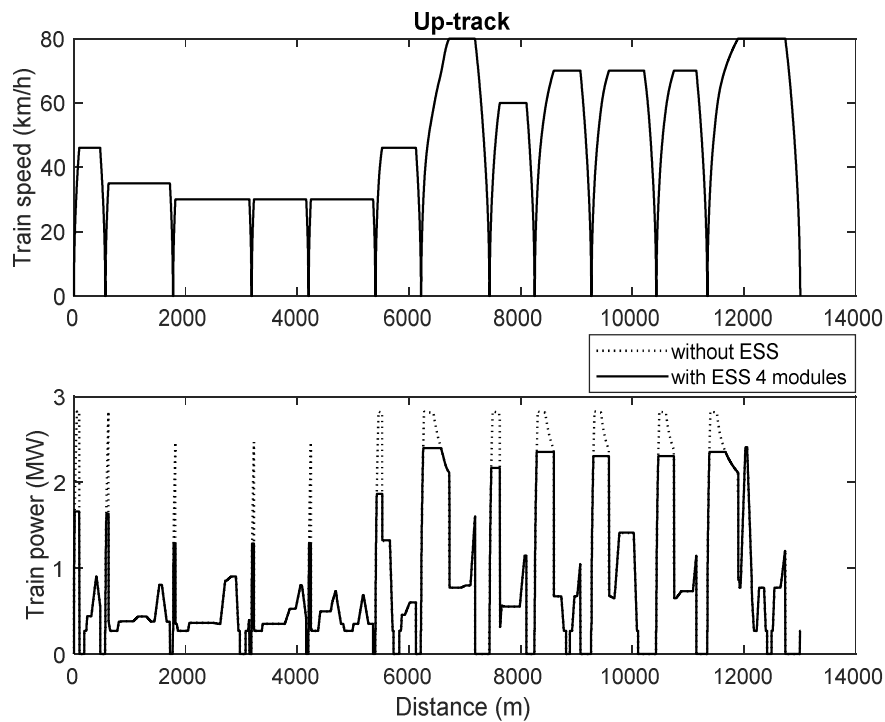


รูปที่ 5 เส้นทางวิ่งของรถไฟฟ้า BTS Skytrain สายสีลม และตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

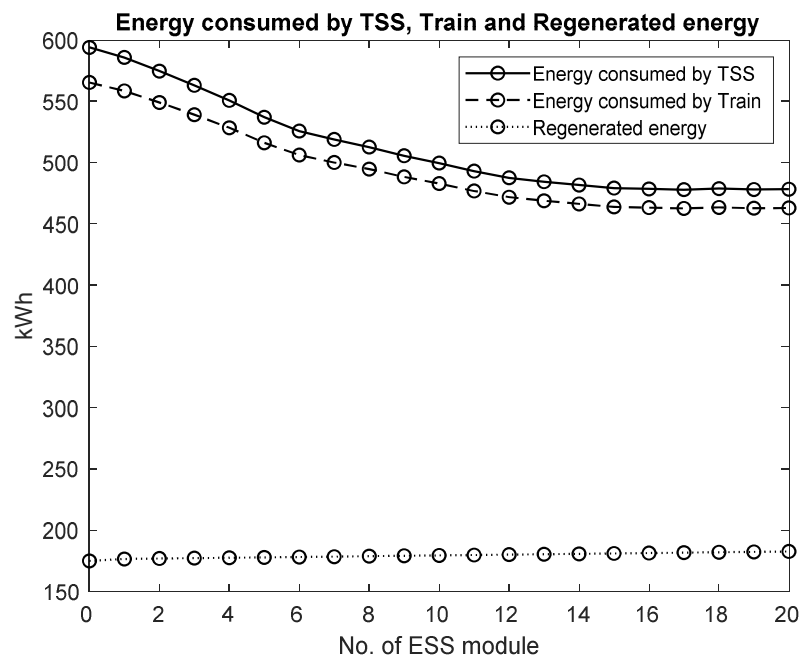
4.2 ผลการทดสอบ

ในการทดสอบนี้ โครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้าที่ถูกกำหนดให้เคลื่อนที่บนเส้นทางขาขึ้น (สถานีสนามกีฬาแห่งชาติ-สถานีบางหว้า) ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งในช่วง 0-6 km รถไฟฟ้าถูกจำกัดความเร็วไว้ที่ความเร็วระดับปานกลางไม่เกิน 50 km/h ทำให้รถไฟฟ้าสามารถเร่งความเร็วถึงความเร็วที่กำหนดได้ในระยะเวลานั้น ส่งผลให้ลักษณะการดึงกำลังไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นในช่วงสั้น ๆ (พิจารณาเส้นประสำหรับกรณียังไม่ติดตั้ง ESS) ในกรณีที่รถมีการติดตั้ง ESS กำลังไฟฟ้าสูงสุดในช่วงดังกล่าวจะถูกจ่ายโดย ESS ทำให้กำลังไฟฟ้าที่รถรับจากแหล่งจ่ายไฟภายนอกมีค่าลดลง โดยในช่วงนี้ ESS จะทำงานในช่วงสั้น ๆ เท่านั้น (พิจารณาเส้นทึบสำหรับกรณีติดตั้ง ESS จำนวน 4 โมดูล) เท่านั้น ในช่วง 6-13 km รถไฟฟ้าถูกจำกัดความเร็วไว้ที่ไม่เกิน 80 km/h รถต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นในการเร่งความเร็วจนถึงความเร็วที่กำหนด ในช่วงนี้ ESS จะมีโอกาสทำงานในช่วงเวลาที่นานขึ้น ทำให้เห็นความแตกต่างของการตัดลดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ชัดเจนขึ้น ในทำนองเดียวกัน เมื่อรถไฟฟ้าขับเคลื่อนในทิศทางขาล่อง (สถานีบางหว้า-สถานีสนามกีฬาแห่งชาติ) รถจะเคลื่อนที่จากตำแหน่ง 13 km ย้อนกลับมาที่ตำแหน่ง 0 km จะเห็นความแตกต่างของการช่วยตัดลดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของ ESS ได้ชัดเจนในช่วงระยะ 13 km จนถึง 6 km

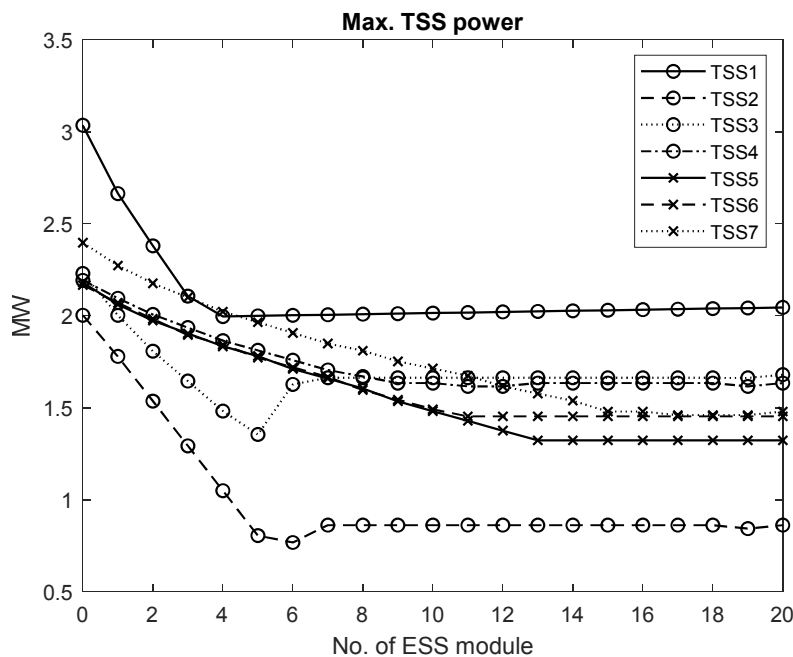
ในกระบวนการตัดลดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดของรถไฟฟ้า แหล่งพลังงานของ ESS มาจากการแปลงพลังงานคืนกลับมาจากระบบเบรก ซึ่งปริมาณพลังงานคืนกลับสูงสุดที่สามารถสร้างได้จากระบบเบรก มีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อเปลี่ยนพิกัดของ ESS สังเกตได้จากแนวโน้มพลังงานคืนกลับสูงสุดเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นน้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 7 เมื่อพิจารณาขนาดพิกัดของ ESS ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ ESS สามารถกักเก็บพลังงานคืนกลับมาใช้ประโยชน์ในช่วงที่ต้องจ่ายค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้มากขึ้น ส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าจ่ายเข้าสู่ระบบ และพลังงานไฟฟ้าที่รถต้องการจากระบบมีแนวโน้มลดลง จนกระทั่งมีค่าเริ่มคงที่เมื่อขนาดพิกัด ESS เพิ่มขึ้นมากกว่า 14 kWh



รูปที่ 6 โครงร่างความเร็วของการเคลื่อนที่รถไฟขาขึ้น (สนามกีฬาแห่งชาติ-บางหว้า) และเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของรถไฟ กรณีไม่ติดตั้งและติดตั้ง ESS จำนวน 4 โมดูล



รูปที่ 7 ปริมาณพลังงานรวมที่สถานีไฟฟ้าจ่ายเข้าสู่ระบบ พลังงานรวมที่รถรับจากระบบ และพลังงานคืนกลับสูงสุดที่สามารถสร้างได้จากระบบเบรก



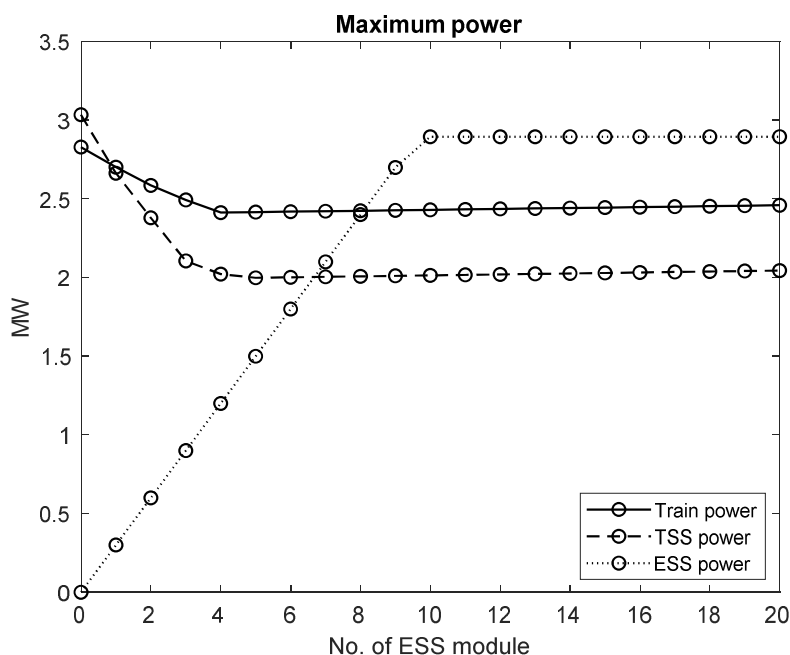
รูปที่ 8 กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนแต่ละสถานี

พิจารณากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนในกรณียังไม่ติดตั้ง ESS พบว่าในกรณีรถ 1 ขบวนขับเคลื่อนบนเส้นทาง 1 รอบ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนอยู่ในช่วง 2-3 MW โดยค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่ง TSS1 และมีค่าต่ำที่สุดที่ตำแหน่ง TSS2 ดังแสดงในรูปที่ 8

หลังจากติดตั้ง ESS พบว่าในช่วงขนาดพิกัด ESS 1-5 kWh (จ่ายกำลังสูงสุดได้ 0.3-1.5 MW) สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้โดยมีผลกับทุกสถานี ทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละสถานีลดลงอย่างน้อย 20 %จากกรณีไม่ติดตั้ง ESS ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดจะอยู่ในช่วง 0.8-2 MW ซึ่งการทำงานของ ESS มีผลค่อนข้างชัดเจนกับสถานีไฟฟ้า TSS1-TSS3 โดยช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ตำแหน่ง TSS2 ได้มากที่สุดถึง 60%

ในช่วงขนาดพิกัด ESS 5-9 kWh (จ่ายกำลังสูงสุดได้ 1.5-2.7 MW) ESS ไม่ช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน TSS1-TSS3 แต่ยังสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน TSS4-TSS7 เนื่องจากโดยปกติ TSS4-TSS7 ต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าในปริมาณสูงเพื่อขับเคลื่อนรถในช่วงความเร็วพิกัดที่สูงกว่า

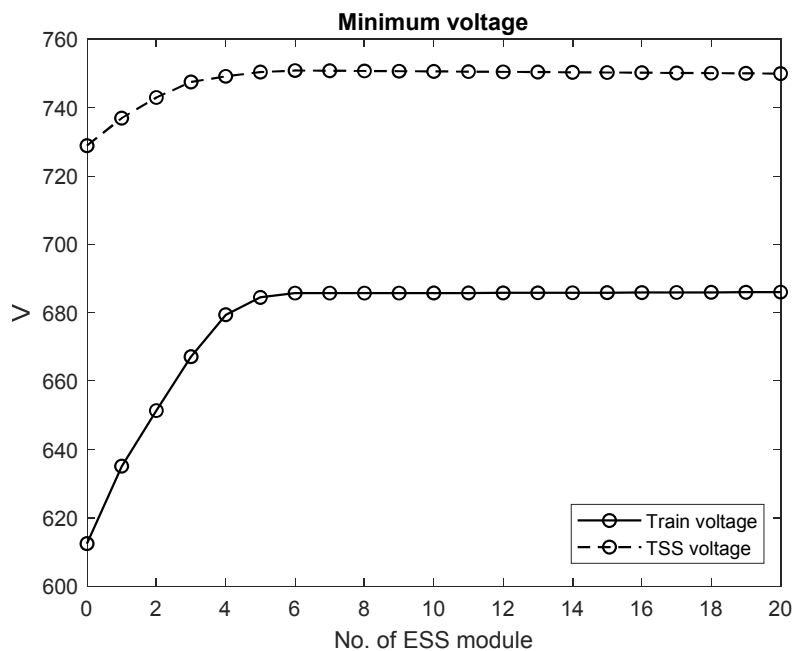
ในช่วงขนาดพิกัด ESS 9-13 kWh (จ่ายกำลังสูงสุดได้ 2.7-3.9 MW) ESS ช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน TSS5-TSS7 เท่านั้น เมื่อพิกัด ESS เกิน 13 kWh (จ่ายกำลังสูงสุดได้มากกว่า 3.9 MW) ช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน TSS7 เท่านั้น และ ESS เริ่มไม่มีผลต่อการลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สถานีไฟฟ้าเมื่อพิกัด ESS เกิน 15 kWh



รูปที่ 9 กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่รถไฟ กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่จ่ายโดย ESS

พิจารณากำลังไฟฟ้าสูงสุดในภาพรวม ในกรณีที่ยังไม่ติดตั้ง ESS กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่รถไฟดึงจากระบบมีค่าประมาณ 2.8 MW และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจ่ายให้ระบบมีค่าประมาณ 3 MW ดังแสดงในรูปที่ 9 เมื่อติดตั้ง ESS ขนาด 1-4 kWh (1-4 โมดูล) ESS จะมีค่าพิกัดกำลังในช่วง 0.3-1.2 MW ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่รถไฟดึงจากระบบมีค่าลดลงอยู่ที่ประมาณ 2.5 MW (ลดลงประมาณ 10%) และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจ่ายให้ระบบมีค่าลดลงเหลือประมาณ 2 MW (ลดลงประมาณ 33%) และเมื่อเพิ่มขนาดติดตั้ง ESS มากกว่า 4 kWh (4 โมดูล) พบว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่รถไฟดึงจากระบบ และกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ในขณะที่กำลังไฟสูงสุดที่จ่ายโดย ESS จะเริ่มคงที่ขนาดติดตั้ง ESS มากกว่า 10 kWh (10 โมดูล) จ่ายกำลังสูงสุดได้ประมาณ 3 MW ซึ่งมีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนจ่ายให้ระบบนั่นเอง

เมื่อพิจารณาระดับแรงดันต่ำสุดที่เกิดขึ้นขณะรถไฟขับเคลื่อนบนเส้นทาง โดยเปรียบเทียบกับระดับแรงดันปกติอยู่ที่ 750 V พบว่าในกรณีที่ยังไม่ติดตั้ง ESS แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ตำแหน่งรถไฟมีค่าประมาณ 610 V (ประมาณ 0.81 pu.) และแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนค่าประมาณ 710 V (ประมาณ 0.95 pu.) ในกรณีที่ติดตั้ง ESS ค่าแรงดันต่ำสุดจะมีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยเมื่อติดตั้ง ESS ขนาด 1-6 kWh (1-6 โมดูล) แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ตำแหน่งรถไฟมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ที่ค่าประมาณ 680 V (ประมาณ 0.9 pu.) และแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนมีค่าประมาณ 750 V (ประมาณ 1.0 pu.) เมื่อติดตั้ง ESS ขนาดมากกว่า 4 kWh (4 โมดูล) แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดมีการเปลี่ยนแปลงในอัตราที่ต่ำมาก และเมื่อติดตั้ง ESS ขนาดมากกว่า 6 kWh (6 โมดูล) เริ่มไม่มีผลต่อการปรับปรุงค่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด



รูปที่ 10 แรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ตำแหน่งรถไฟ และแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

4.3 อภิปรายผลการทดสอบ

จากการทดสอบ ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดโดยใช้ ESS ได้แก่ โครงร่างความเร็วในการขับเคลื่อนรถไฟ และขนาดพิกัดของ ESS เพื่อดูผลการลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน รวมถึงแรงดันขณะทำงาน เนื่องจากกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นในช่วงเร่งของรถเพื่อไปถึงความเร็วสูงสุด ดังนั้นโครงร่างความเร็วในการขับเคลื่อนรถที่มีช่วงเร่งที่ยาวนานกว่า (พิกัดความเร็วสูง) รวมถึงมีพฤติกรรมการเร่งและเบรกบ่อยครั้ง (ระบบรถไฟฟ้ามหานคร) ESS จะมีโอกาสกักเก็บและใช้ประโยชน์พลังงานคืนกลับในกระบวนการลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้มากขึ้น

พิจารณาผลของขนาดพิกัด ESS เมื่อ ESS มีพิกัดสูงขึ้นความสามารถในการกักเก็บพลังงานและการจ่ายกำลังไฟฟ้าก็จะสูงขึ้น สามารถช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่รถไฟและสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าขณะทำงานที่ตำแหน่งรถไฟและสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนมีค่าสูงขึ้น การพิจารณาขนาดพิกัดของ ESS ที่เหมาะสมเพื่อช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดและปรับปรุงค่าแรงดันไฟฟ้า ควรพิจารณาพิกัดกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมของ ESS จากผลการทดสอบบนระบบทดสอบ ขนาดพิกัดที่เหมาะสมของ ESS คือ 4-6 kWh จะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 1.2-1.8 MW จะช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้ทุกสถานีอย่างน้อย 20% เปรียบเทียบกับกรณียังไม่ติดตั้ง ESS และในบางสถานีสามารถลดได้มากที่สุดถึง 60% เปรียบเทียบกับกรณียังไม่ติดตั้ง ESS ซึ่งจะลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในภาพรวมคิดเป็นประมาณ 33% และช่วยรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้มากกว่า 0.95 pu. และแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ตำแหน่งรถไฟได้มากกว่า 0.90 pu. สำหรับการเลือก ESS

ที่มีพิกัดสูงขึ้นไปพบว่ามีผลต่อการลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดและปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าก่อนข้างน้อย หรือไม่มีผลเลยเมื่อเลือก ESS ที่มีพิกัดสูงเกินไป

5. สรุปผลการทดสอบ

บทความนี้ได้ศึกษาผลการติดตั้งตัวเก็บประจุยิ่งยวดบนขบวนรถไฟ เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดขณะทำงาน โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการจัดการพลังงานคืนกลับร่วมกับการควบคุมระบบกักเก็บพลังงานแบบตัวเก็บประจุยิ่งยวด ส่งผลให้ช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ ตำแหน่งรถไฟและสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน รวมถึงช่วยปรับปรุงแรงดันขณะทำงาน การทดสอบได้พิจารณาผลของขนาดพิกัด ESS ต่อการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด โดยระบบทดสอบเลือกใช้ระบบรถไฟฟ้ามหานครรถไฟฟ้า BTS Skytrain สายสีลม ผลการทดสอบพบว่าเมื่อ ESS มีพิกัดสูงขึ้นไปความสามารถในการกักเก็บพลังงานและการจ่ายกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น สามารถช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่รถไฟและสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าขณะทำงานที่ตำแหน่งรถไฟและสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนมีค่าสูงขึ้น โดยขนาดพิกัดที่เหมาะสมของ ESS คือ 4-6 kWh จะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ 1.2-1.8 MW จะช่วยลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้ทุกสถานีอย่างน้อย 20% เปรียบเทียบกับกรณียังไม่ติดตั้ง ESS และในบางสถานีสามารถลดได้มากที่สุดถึง 60% เปรียบเทียบกับกรณียังไม่ติดตั้ง ESS ซึ่งจะลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดในภาพรวมคิดเป็นประมาณ 33% และช่วยรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนได้มากกว่า 0.95 pu. และแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดที่ตำแหน่งรถไฟได้มากกว่า 0.90 pu. ทั้งนี้การพิจารณาเลือกขนาดของ ESS ในการทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเป็นหลัก โดยยังไม่พิจารณาเรื่องการประหยัดพลังงาน และความคุ้มค่าในการลงทุน ซึ่งประเด็นดังกล่าวจะมีการศึกษาต่อไปโดยต้องใช้เงื่อนไขการทดสอบและตัดสินใจที่ซับซ้อนมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Battistelli, F. Ciccirelli, D. Lauria and D. Proto, "Optimal design of DC electrified railway stationary storage system," International Conference on Clean Electrical Power, Italy, 2009, pp. 739-745.
- [2] G. Xu, W. Li, K. Xu and Z. Song, "An intelligent regenerative braking strategy for electric vehicles," Energies, Vol. 4, No. 9, 2011, pp. 1461-1477.
- [3] 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, 2017, pp. 223-235.
- [4] K.S. Jaysree, G. Ezhilarasan, K. Monish, V. Arundhilipan and G. Sumalatha, "Battery Less Power Conditioner Using a Super Capacitor," International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 5, No. 12, 2014, pp. 214-218.

- [5] H. Chen, Y. Che, R. Fu, X. Wang, X. Lv and H. Zhu, "Study on Regenerative Braking Energy Utilization and Power Quality Control in Electrified Railways," 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), China, 2018, pp. 1-6.
- [6] D. Iannuzzi, "Improvement of the energy recovery of traction electrical drives using supercapacitors," 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, Poznan, 2008, pp. 1469-1474.
- [7] L. Kunpeng et al., "Development of Train Regenerative Braking Ground Absorbing Device based on Super Capacitor Energy Storage," 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia, Korea (South), 2019, pp. 2046-2051.
- [8] M. Jarnut, J. Kaniewski and V. Protsiuk, "Energy storage system for peak-power reduction of traction substation," Innovative Materials and Technologies in Electrical Engineering, Poland, 2018, pp. 1-5.
- [9] 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, 2020, pp. 1802-1816.
- [10] 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, 2019, pp. 11714-11724.
- [11] W. Liu, J. Xu and J. Tang, "Study on control strategy of urban rail train with on-board regenerative braking energy storage system," 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, China, pp. 3924-3929.
- [12] 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," IEEE Intelligent Vehicles Symposium, China, 2018, pp. 1-6.
- [13] S. Eziani and M. Ouassaid, "State of Charge Estimation of Supercapacitor Using Artificial Neural Network for Onboard Railway Applications," International Renewable and Sustainable Energy Conference, Morocco, 2018, pp. 1-6.
- [14] C. Sumpavakup and T. Kulworawanichpong, "Multi-train movement simulation using MATLAB object-oriented programming," Applied Mechanics and Materials, Vol. 763, 2015, pp. 153-158.
- [15] Silom Line [Online], Available: https://www.wikiwand.com/en/Silom_line [24 พฤศจิกายน 2563].
- [16] Bombardier Inc., EcoActive Technology-MITRAC Energy Saver, datasheet, Zurich, Switzerland, 2009.