

การหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางสำหรับรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

นัชพร สุตพรหม และ ทศพล รัตนนิมิตชัย*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 4422 4401 อีเมล: tosaphol@sut.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.11.013

รับเมื่อ 1 มิถุนายน 2563 แก้ไขเมื่อ 5 สิงหาคม 2563 ตอบรับเมื่อ 24 สิงหาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 18 พฤศจิกายน 2564

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

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการหาตำแหน่ง และขนาดที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง (Wayside Energy Storage System) เพื่อเก็บสะสมพลังงานจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน (Regenerative Braking) ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรง กรณีศึกษารถไฟฟ้าสายสีลมด้วยการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า 1 ขบวน ขนาดที่เหมาะสมของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง 2 ชุด เท่ากับ 4.61 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และ 5.43 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ศึกษาการหาตำแหน่งที่เหมาะสม 2 วิธี โดยพิจารณาตำแหน่งที่เหมาะสมจากการใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และเกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียน้อยที่สุด ได้แก่ วิธีที่ 1 การเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งของระบบเก็บสะสมพลังงาน 2 ชุด แต่ละชุดเปลี่ยนตำแหน่งทุกๆ 1 กิโลเมตร ผลการจำลองพบว่า ตำแหน่งที่เหมาะสม คือ ที่ตำแหน่ง 6 กิโลเมตร และ 10 กิโลเมตร จากสถานีผู้โดยสารต้นทาง การใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงร้อยละ 8.18 และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียลดลงร้อยละ 30.15 วิธีที่ 2 การใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization) ผลการศึกษาพบว่า ตำแหน่งที่เหมาะสม คือ ที่ตำแหน่ง 6.93 กิโลเมตร และ 10.43 กิโลเมตร การใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงร้อยละ 8.37 และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียลดลงร้อยละ 30.35 การหาตำแหน่งที่เหมาะสมด้วยวิธี PSO สามารถช่วยลดกระบวนการจำลองผล และตำแหน่งที่เหมาะสมมีค่าที่ละเอียดมากกว่าวิธีที่ 1 โดยตำแหน่ง และขนาดที่เหมาะสมจะขึ้นกับลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้าขบวนนั้นๆ สามารถประยุกต์แบบจำลองที่นำเสนอในบทความโดยการเปลี่ยนพารามิเตอร์ของรถไฟฟ้า ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้า และรูปแบบการควบคุมการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงาน

คำสำคัญ: การเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน ระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง รถไฟฟ้าขนส่งมวลชน



Optimal Position and Capacity of Wayside Energy Storage System for Mass Rapid Transit

Natchaphon Sutphrom and Tosaphol Ratniyomchai*

School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 4422 4401, E-mail: tosaphol@sut.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.11.013

Received 1 June 2020; Revised 5 August 2020; Accepted 24 August 2020; Published online: 18 November 2021

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

Abstract

This paper presents an optimal position and capacity of Wayside Energy Storage Systems (WESSs) stored a regenerative braking energy for DC mass rapid transit of Silom Line by using a single train simulator. The optimal capacities of 2 WESSs are 4.61 kWh and 5.43 kWh. The study searched for the optimal positions based on 2 methods, i.e. considering the optimal position at the energy supply station and the least energy loss. Method 1: the researcher manually changed two WESSs' positions with a step of 1 km in order to find the optimal positions. The results showed that the optimal positions were at 6 and 10 km away from the departure station with the energy consumption decrease 8.18% and the loss energy decrease 30.15%. Method 2: the researcher employed Particle Swarm Optimization (PSO). The results showed that the optimal positions were at 6.93 and 10.43 km with the energy consumption decrease 8.37% and the loss energy decrease 30.35%. The optimal positions searched by PSO method could shorten the simulation process and define precise position with more accuracy than the first method. Also, the optimal positions and capacities of WESSs were dependent on a train's speed profile and control strategy of energy storage system. To apply the model in this paper to another system can be conducted by changing parameters and system conditions such as a train's parameters, train's speed profile, and control strategy of WESSs.

Keywords: Regenerative Braking, Wayside Energy Storage System, Mass Rapid Transit

Please cite this article as: N. Sutphrom and T. Ratniyomchai, "Optimal position and capacity of wayside energy storage system for mass rapid transit," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 2, pp. 317-331, Apr.-Jun. 2022 (in Thai).

1. บทนำ

รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเข้ามามีบทบาทที่สำคัญสำหรับเมืองหลวงของหลายๆ ประเทศ เนื่องจากรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยล้อเลื่อนบนรางรถไฟซึ่งมีการสูญเสียเนื่องจากความต้านทานการเคลื่อนที่ต่ำ สามารถเคลื่อนย้ายมวลขนได้มากต่อรถไฟฟ้า 1 ขบวน และรถไฟฟ้านับว่าเป็นเทคโนโลยีสะอาด เนื่องจากไม่ก่อให้เกิดมลพิษจากการเผาไหม้ภายในด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนได้รับความนิยมในการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ เช่น การลดพลังงานสูญเสียของระบบ การใช้เทคโนโลยีการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน (Regenerative Braking) ร่วมกับการจัดการการเดินรถให้เหมาะสมเพื่อการใช้พลังงานจากการเบรกจ่ายให้กับรถไฟฟ้าขบวนใกล้เคียงที่ต้องการพลังงานในการเคลื่อนที่ หรือการใช้เทคโนโลยีการเก็บสะสมพลังงานร่วมกับการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานเพื่อสะสมพลังงานดังกล่าวและนำกลับมาใช้เมื่อมีความต้องการใช้พลังงาน [1] การใช้งานของระบบเก็บสะสมพลังงานขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เช่น การติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานบนตัวรถไฟฟ้า (On-board) โดยปกติจะติดตั้งไว้บนหลังคา การติดตั้งที่ตำแหน่งสถานี หรือข้างรางวิ่ง (Stationary or Tracksid) เพื่อลดความต้องการกำลังไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้าคายออกขดเคเซอร์ระดับแรงดันไฟฟ้า ลดการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมโดยการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานบนตัวรถจะสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับรถไฟฟ้าเมื่อไม่มีแหล่งจ่ายได้กรณีเคลื่อนที่ผ่านสถานที่ท่องเที่ยว หรือสถานที่ประวัติศาสตร์ที่ไม่เหมาะกับการติดตั้งระบบจ่ายไฟฟ้า [2]

อุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานที่ใช้ในระบบเก็บสะสมพลังงานสำหรับระบบรถไฟฟ้า เช่น การใช้งานแบตเตอรี่ (Battery) เป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน [3]–[5] การใช้งานล้อตุ่นกำลัง (Flywheel) [3], [6] การศึกษาและนำเสนอการใช้งานระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor) [3], [6]–[8] การติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง (Wayside Energy Storage System) ในระบบรถไฟฟ้าเป็นการติดตั้งอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานไว้ที่ตำแหน่งระหว่างสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนหรือริมทางวิ่ง

เป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาเรื่องน้ำหนัก และพื้นที่การติดตั้ง อุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานบนตัวรถไฟฟ้า การรถไฟใต้ดินเมืองมาดริด (Madrid de Metro) ประเทศสเปน ติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางเพื่อเก็บสะสมพลังงานจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานโดยใช้เทคโนโลยี Siemens Sitras SES สามารถลดความต้องการพลังงานเฉลี่ยร้อยละ 30 ต่อขบวนรถไฟ [6] การทดสอบระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางที่ใช้เทคโนโลยี GIGACELL สำหรับรถไฟฟ้าขนส่งในนครนิวยอร์ก สามารถขดเคเซอร์แรงดันไฟฟ้าตกได้ 55 โวลต์สะสมพลังงานจากการเบรกได้ร้อยละ 71.4 ของพลังงานจากการเบรกทั้งหมด [5] ในประเทศจีนติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้เทคโนโลยี SITRAS-SEC เพื่อป้องกันความผิดพลาดของระบบรถไฟฟ้า Beijing Subway Line 5 [7] ตำแหน่งติดตั้ง และขนาดที่เหมาะสมของระบบเก็บสะสมพลังงานขึ้นกับการควบคุมการทำงาน และลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้า งานวิจัยนี้ศึกษาการหาตำแหน่ง และขนาดของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสำหรับระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียน้อยที่สุด ใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณ และสร้างระบบทดสอบจากการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน กรณีศึกษารถไฟฟ้าสายสีลม (สายสีเขียวเข้ม) 1 ขบวน

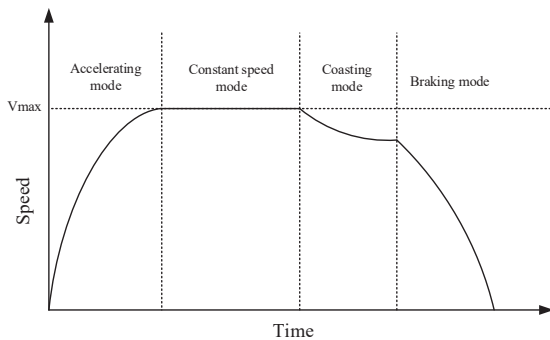
2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสดังที่มีระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง

การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการคำนวณสมรรถนะ และการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า เพื่อหาแรงดูดของมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนตามลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนต้องการ ส่วนที่ 2 เป็นการคำนวณผลเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน

2.2 การคำนวณสมรรถนะและการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

การคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าเริ่มจากการ



รูปที่ 1 โหมดการทำงานของรถไฟฟ้า

จำลองให้รถไฟฟ้าหยุดนิ่งที่ตำแหน่งสถานีผู้โดยสารต้นทาง รถไฟฟ้าจะทำงานในโหมดเร่งเพื่อเคลื่อนที่จากหยุดนิ่งไปยัง สถานีผู้โดยสารถัดไปด้วยแรงฉุดของรถไฟฟ้า สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) [9]

$$F_T = M\alpha + F_R \quad (1)$$

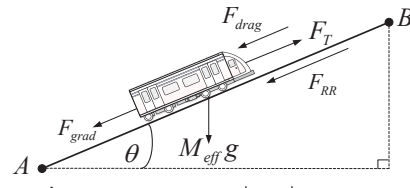
โดยที่ F_T คือ แรงฉุดของรถไฟฟ้า (นิวตัน) M คือ มวลรถไฟฟ้า (กิโลกรัม) α คือ ความเร่ง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง) และ F_R คือ แรงต้านทานการเคลื่อนที่ (นิวตัน)

โหมดการทำงานของรถไฟฟ้าแบ่งตามลักษณะความเร็ว เฉพาะของรถไฟฟ้า สามารถแบ่งโหมดการทำงานของ รถไฟฟ้าได้เป็น 4 โหมด ดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วย

1) โหมดเร่ง (Accelerating Mode) คือ โหมดการทำงานที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร่งจากภาวะหยุดนิ่ง เพื่อเพิ่มความเร็วการเคลื่อนที่ได้ตามลักษณะความเร็วของ ขบวนรถไฟฟ้า โดยความเร่งจะมีค่ามากกว่าศูนย์ และน้อยกว่า หรือเท่ากับความเร็วสูงสุดของรถไฟฟ้าหรือ ($0 < \alpha \leq \alpha_{acc,max}$)

2) โหมดความเร็วคงที่ (Constant Speed Mode) คือ โหมดการทำงานที่รถไฟฟ้ารักษาระดับความเร็วให้คงที่โดยที่ ความเร่งเป็นศูนย์ ($\alpha = 0$) ดังนั้นแรงฉุดของรถไฟฟ้าเท่ากับ แรงต้านทานการเคลื่อนที่ หรือ $F_T = F_R$

3) โหมดการแล่น (Coasting Mode) คือ การที่รถไฟฟ้า มีแรงฉุดของรถไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ ($F_T = 0$) ดังนั้นรถไฟฟ้าจะ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ช้าลงหรือเคลื่อนที่ด้วยความหน่วง เนื่องจากแรงต้านทานการเคลื่อนที่ จะได้ $\alpha = -F_R/M$



รูปที่ 2 แผนภาพการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า

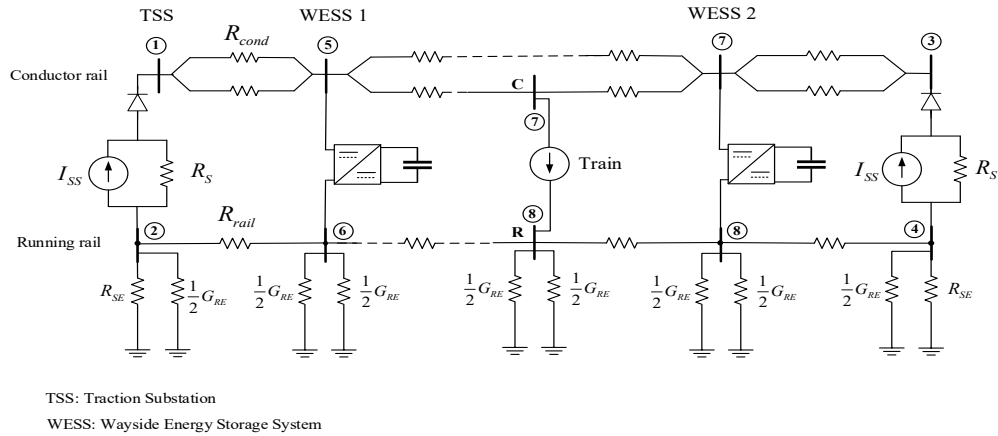
4) โหมดเบรก (Braking Mode) คือ การลดความเร็ว ของรถไฟฟ้าด้วยความหน่วง (Deceleration Rate) เพื่อเข้า จุดที่สถานีผู้โดยสาร หรือการลดความเร็วเพื่อไม่ให้รถไฟฟ้า มีความเร็วเกิดความเร็วที่กำหนดตามลักษณะความเร็วของ รถไฟฟ้า โดยในโหมดนี้ความเร่งจะมีค่าเป็นลบและมีค่า มากกว่า หรือเท่ากับความเร็วสูงสุด หรือ ($\alpha_{dec,max} \leq \alpha < 0$)

แผนภาพการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2 แรงต้านทานการเคลื่อนที่ประกอบด้วยแรงต้านทานการเคลื่อนที่ เนื่องจากแรงเสียดทาน (F_{RR}) แรงต้านเนื่องจากความชัน (F_{grad}) และแรงต้านอากาศ (F_{drag}) โดยแรงต้านทานการเคลื่อนที่ เนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านอากาศ ผู้ผลิตหัวรถจักร นิยมระบุค่าแรงเสียดทาน 2 แรงนี้ ในรูปของสมการเดวิส (Davis Equation) ดังสมการที่ (2) โดยที่สัมประสิทธิ์ของสมการ เดวิส คือ A (กิโลนิวตัน) B (กิโลนิวตัน-ชั่วโมงต่อกิโลเมตร) C (กิโลนิวตัน-ชั่วโมงกำลังสองต่อกิโลเมตรกำลังสอง) และ v คือ ความเร็วของรถไฟฟ้าในหน่วยกิโลเมตรต่อชั่วโมง แรงต้านเนื่องจากความชันคำนวณได้ดังสมการที่ (3) [9] โดยที่ g คือ ความเร่งแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง) และ θ คือ มุมที่กระทำกับแนวระดับในหน่วยองศา

$$F_{RR} + F_{drag} = A + Bv + Cv^2 \quad (2)$$

$$F_{grad} = \pm Mg \sin(\theta) \quad (3)$$

อัตราเร็ว (v) ตำแหน่งของรถไฟฟ้า (s) ที่เคลื่อนที่ ในช่วงเวลา Δt และคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อน ของรถไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (4)–(6) ตามลำดับ P_T คือ กำลัง ไฟฟ้ารถไฟฟ้า η_T คือ ประสิทธิภาพของรถไฟฟ้า และ P_{aux} คือ กำลังไฟฟ้าเสริมของรถไฟฟ้า โดยที่ $P_T > 0$ เมื่อรถไฟฟ้า ทำงานในโหมดขับเคลื่อน และ $P_T < 0$ เมื่อรถไฟฟ้าทำงาน ในโหมดเบรก



รูปที่ 3 ระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนแบบ Multi-conductor System

$$v(t + \Delta t) = v(t) + a\Delta t \quad (4)$$

$$s(t + \Delta t) = s(t) + v(t)\Delta t + \frac{1}{2}a(\Delta t)^2 \quad (5)$$

$$P_T = \begin{cases} \frac{F_T \times v(t)}{\eta_T} + P_{aux} & \text{if } F_T \geq 0 \\ \eta_T (F_T \times v(t)) + P_{aux} & \text{if } F_T < 0 \end{cases} \quad (6)$$

รถไฟไฟฟ้าเริ่มทำงานในโหมดเบรกเมื่อระยะห่างจากตำแหน่งของรถไฟล่าสุดน้อยกว่า หรือเท่ากับระยะวิกฤติการเบรก (Critical Braking Distance; CBD) คำนวณได้ดังสมการที่ (7) [10] โดยที่ $\alpha_{dec,max}$ คือ ความเร่งเป็นลบมากที่สุด หรืออัตราเร่งสูงสุด (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

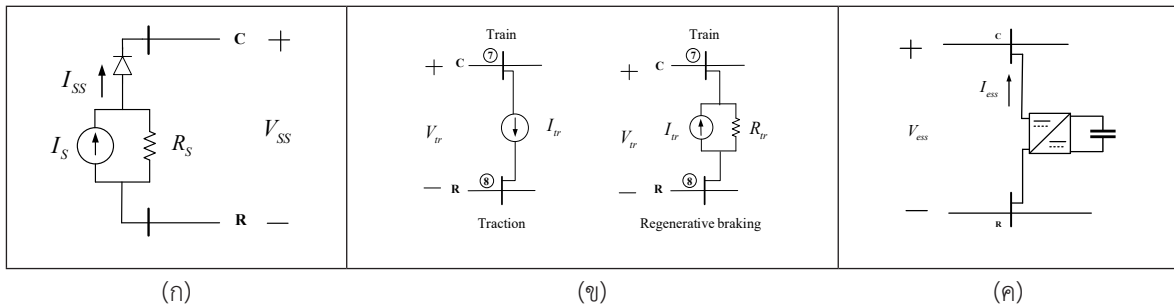
$$CBD = -0.5 \times \frac{v^2}{\alpha_{dec,max}} \quad (7)$$

2.3 การคำนวณผลเฉลี่ยแรงดันของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน

การคำนวณผลเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนเป็นการคำนวณเพื่อทราบพฤติกรรมของระบบไฟฟ้าที่มีโหลดตามลักษณะความเร็ว และโหมดการทำงานของรถไฟไฟฟ้า ส่งผลให้โหลดของระบบไฟฟ้าเป็นโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น สถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนของรถไฟไฟฟ้ากระแสตรงเป็นสถานีเรียงกระแสที่กระแสไฟฟ้าไหลออกจากขั้วบาร์เข้าบวกเท่านั้น และกระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลย้อนกลับได้

เนื่องจากคุณลักษณะของไดโอดเรียงกระแส [9] การสร้างแบบจำลองของระบบจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรงใช้แบบจำลอง Multi-conductor System ดังแสดงในรูปที่ 3 ประกอบไปด้วยสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (TSS) ระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทางที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (WESS) จำนวน 2 ชุด และรถไฟ (Train) แบบจำลอง Multi-conductor System ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อประเมินแรงดันไฟฟ้าที่รางวิ่ง และกระแสไฟฟ้ารั่วไหล เนื่องจากรางวิ่งเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับไปยังสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ผลต่างแรงดันไฟฟ้าส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้ารั่วไหลไปยังโครงสร้างโลหะใต้ดินใกล้เคียง ซึ่งส่งผลเสียต่อโครงสร้างโลหะ [11]

แบบจำลองระบบรถไฟไฟฟ้ามีรางตัวนำและรางวิ่ง 2 ราง คือ รางขาไป (Up-track) และรางขากลับ (Down-track) โดยที่ R_{cond} คือ ความต้านทานรางตัวนำไฟฟ้า R_{rail} คือ ความต้านทานรางวิ่ง R_S คือ ความต้านทานลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน R_{SE} คือ ความต้านทานดินที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน G_{RE} คือ ค่าความนำไฟฟ้าของรางเทียบกับดิน และ I_S คือ ค่ากระแสลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน สามารถคำนวณความต้านทานรางตัวนำไฟฟ้า ($R_{cond,p-q}$) ระหว่างโนด p และ q ดังสมการที่ (8), (9) ถ้าตำแหน่งระหว่างสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนใดๆ ไม่มีโมดูลไฟฟ้าอยู่ระหว่างสถานีไฟฟ้า จะได้ค่าความต้านทานรางตัวนำเท่ากับสมการที่ (8) และถ้าระหว่างสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนใดๆ มีโมดูลไฟฟ้าอยู่ระหว่างสถานีไฟฟ้า



รูปที่ 4 แบบจำลองในระบบไฟฟ้า (ก) แบบจำลองสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (ข) แบบจำลองรถไฟฟ้า (ค) แบบแบบจำลองระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทาง

จะมีค่าเท่ากับสมการที่ (9) โดยที่ $R_{cond,p-q}$ และ d_{p-q} คือ ความต้านทานตัวนำไฟฟ้า (โอห์ม) และระยะทาง (เมตร) ระหว่างโนด p ถึงโนด q ตามลำดับ R_{line} คือ ค่าความต้านทานตัวนำไฟฟ้าต่อหน่วยความยาว (โอห์มต่อเมตร) [9]

$$R_{cond,p-q} = \frac{1}{2}(d_{p-q} \times R_{line}) \quad (8)$$

$$R_{cond,p-q} = d_{p-q} \times R_{line} \quad (9)$$

ความต้านทานรางวิ่ง ($R_{rail,p-q}$) ระหว่างโนด p และ q สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (10) [12] โดยที่ R_{rail} คือ ค่าความต้านทานรางวิ่งต่อหน่วยความยาวในหน่วยโอห์มต่อเมตร

$$R_{rail,p-q} = \frac{d_{p-q} \times R_{rail}}{2} \quad (10)$$

2.3.1 แบบจำลองสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน

แบบจำลองสถานีไฟฟ้ากระแสตรงแทนด้วยวงจรสมมูล Norton ดังรูปที่ 4 (ก) สัญลักษณ์ไดโอดบ่งบอกว่าเป็นสถานีไฟฟ้ามีกระแสไฟฟ้าไหลได้ทิศทางเดียว และไม่สามารถไหลย้อนกลับได้ กระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนเพื่อไปยังโหลดขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (V_{SS}) หรือแรงดันไฟฟ้าระหว่างโนดตัวนำไฟฟ้า (C) และรางวิ่ง (R) สามารถคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (I_{SS}) ดังสมการที่ (11) [9]

$$I_{SS} = I_S - \frac{V_{SS}}{R_S} \quad (11)$$

2.3.2 แบบจำลองรถไฟฟ้า

แบบจำลองของรถไฟฟ้าพิจารณาต่างกัน 2 กรณี ดังรูปที่ 4 (ข) คือ กรณีที่มอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนทำงานในโหมดขับเคลื่อน และโหมดการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงาน โดยการเบรกจ่ายคืนพลังงาน คือ การที่มอเตอร์ไฟฟ้าทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รถไฟฟ้าเบรก และจ่ายพลังงานย้อนกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน แบบจำลองรถไฟฟ้าจะเป็นแบบจำลองแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าต่อขนานกับความต้านทานรถไฟฟ้า เมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดขับเคลื่อนแบบจำลองรถไฟฟ้าจะเป็นแบบจำลองแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า สามารถคำนวณกระแสรถไฟฟ้า (I_{tr}) ได้จากสมการที่ (12) โดยที่ P_T คือ กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าในสมการที่ (6) กระแสรถไฟฟ้ามีค่าเป็นบวกเมื่อรถไฟฟ้าทำงานในโหมดขับเคลื่อน และมีค่าเป็นลบเมื่อรถไฟฟ้าเบรก V_{tr} คือ แรงดันไฟฟ้าที่โนดรถไฟฟ้า และ V_{noload} คือ แรงดันไฟฟ้าไร้โหลดของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน ความต้านทานรถไฟฟ้าขณะใดๆ (R_{tr}) เมื่อรถไฟฟ้าเบรกสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (13)

$$I_{tr} = \begin{cases} \frac{P_T}{V_{tr}} & \text{Tractive} \\ \frac{P_T}{V_{noload}} & \text{Braking} \end{cases} \quad (12)$$

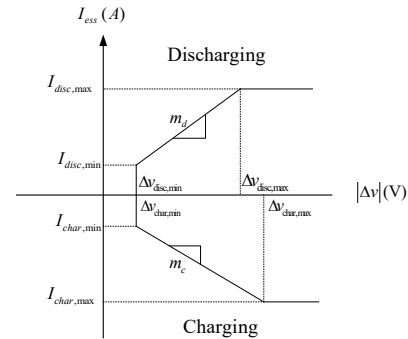
$$R_{tr} = \left| \frac{V_{noload}}{I_{tr}} \right| = \left| \frac{(V_{noload})^2}{P_{tr}} \right| \quad (13)$$

การเบรกของรถไฟฟ้าในงานวิจัยนี้พิจารณาการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานร่วมกับการเบรกแบบพลวัต โดยพลังงานที่จ่ายคืนให้กับระบบไฟฟ้าจะต้องไม่ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่โนดรถไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด U_{min2} ตามมาตรฐาน EN 50163 หรือมีแรงดันไฟฟ้าไม่ต่ำกว่า 500 โวลต์ สำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง 750 โวลต์

2.3.3 แบบจำลองระบบเก็บสะสมพลังงาน

การพิจารณาระบบเก็บสะสมพลังงานแบบปริมาตรในงานวิจัยนี้พิจารณาดำเนินการติดตั้งระหว่างเส้นทางวิ่งของรถไฟฟ้า และไม่ใช่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบปริมาตรเพื่อเก็บสะสมพลังงานจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานของรถไฟฟ้า และนำพลังงานดังกล่าวกลับมาช่วยจ่ายให้กับระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าได้อีกครั้ง แทนการทำให้พลังงานจากการเบรกสูญเสียในรูปของความร้อนผ่านตัวต้านทานการเบรก หรือการเบรกแบบพลวัต งานวิจัยนี้พิจารณาระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน ดังแบบจำลองในระบบไฟฟ้าในรูปที่ 4 (ค) โดยที่ I_{ess} คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกหรือรับเข้าระบบเก็บสะสมพลังงาน และ V_{ess} คือ แรงดันไฟฟ้าที่ระบบเก็บสะสมพลังงาน แบบจำลองดังกล่าวเปรียบเสมือนแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า หรือรับกระแสไฟฟ้า ตามการควบคุมการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงาน งานวิจัยนี้ใช้การควบคุมด้วยวิธีการควบคุมแบบ Piece-wise Linear SOC เป็นการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้า และการรับกระแสไฟฟ้าด้วยระดับความต่างของแรงดันไฟฟ้า (Δv) ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ระบบเก็บสะสมพลังงาน (V_{ess}) และแรงดันไฟฟ้าไรโหลด (V_{noload}) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (14) ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงาน (I_{ess}) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (15)–(19) [13] การควบคุมแบ่งการทำงานออกเป็น 2 โหมด ได้แก่

1) โหมดการจ่ายพลังงาน (Discharging) ระบบเก็บสะสมพลังงานจะจ่ายกระแสไฟฟ้าเท่ากับ $I_{ess, disc}$ เมื่อผลต่าง



รูปที่ 5 การควบคุมแบบ Piece-wise Linear SOC

แรงดันไฟฟ้า Δv มากกว่าหรือเท่ากับแรงดันไฟฟ้าจ่ายกระแสไฟฟ้าต่ำสุด ($\Delta v_{disc,min}$) เมื่อ m_d คือ คุณสมบัติความชันของการจ่ายกระแสไฟฟ้า $I_{disc,min}$ คือ พิกัดจ่ายกระแสไฟฟ้าต่ำสุด $I_{disc,max}$ คือ พิกัดจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงสุด และจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่เมื่อ Δv มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแรงดันจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงสุด ($\Delta v_{disc,max}$)

2) โหมดการสะสมพลังงาน (Charging) ระบบเก็บสะสมพลังงานจะรับกระแสไฟฟ้าเท่ากับ $I_{ess, char}$ เมื่อผลต่างแรงดันไฟฟ้า Δv มากกว่าหรือเท่ากับแรงดันไฟฟ้ารับกระแสไฟฟ้าต่ำสุด ($\Delta v_{char,min}$) ระบบเก็บสะสมพลังงานรับกระแสไฟฟ้ามากที่สุดและมีค่าคงที่ เมื่อ Δv มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแรงดันรับกระแสไฟฟ้าสูงสุด ($\Delta v_{char,max}$) เมื่อ m_c คือ คุณสมบัติความชันของการรับกระแสไฟฟ้า โดยที่ $I_{char,max}$ และ $I_{char,min}$ คือ พิกัดกระแสไฟฟ้าสูงสุดและต่ำสุดของระบบเก็บสะสมพลังงานในโหมดการสะสมพลังงาน ตามลำดับ เมื่อผลต่างแรงดัน Δv ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขการทำงาน กระแสไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานมีค่าเท่ากับศูนย์ แผนภาพการควบคุมแบบ Piece-wise Linear SOC แสดงดังรูปที่ 5

$$\Delta v = |V_{noload} - V_{ess}| \quad (14)$$

- ทำงานในโหมด Discharging

$$I_{ess, disc} = m_d (\Delta v - \Delta v_{disc,min}) \quad (15)$$

$$m_d = \frac{I_{disc,max} - I_{disc,min}}{\Delta v_{disc,max} - \Delta v_{disc,min}} \quad (16)$$



- ทำงานในโหมด Charging

$$I_{ess, char} = m_c (\Delta v - \Delta v_{char, min}) \quad (17)$$

$$m_c = \frac{I_{char, max} - I_{char, min}}{\Delta v_{char, max} - \Delta v_{char, min}} \quad (18)$$

- เมื่อไม่อยู่ในเงื่อนไขการทำงาน

$$I_{ess} = 0 \quad (19)$$

2.3.4 การคำนวณผลเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธีฉีด

กระแสไฟฟ้า (Current Injection Method)

การคำนวณด้วยวิธีฉีดกระแสไฟฟ้าใช้หลักการคำนวณแบบโนด วิธีการฉีดกระแสไฟฟ้าถูกพัฒนาขึ้นสำหรับคำนวณระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนกระแสตรงโดยเฉพาะ โดยใช้สมการกระแสสมดุลเพื่อลดความซับซ้อน และผลเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้ามีความชันสูง [9] สมการการไหลของกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่บัสใดๆ นำเสนอดังสมการที่ (20) โดยที่ V_k คือ แรงดันไฟฟ้าที่บัส k ใดๆ $I_{s,k}$ คือ ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (กรณีพิจารณาบัสสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน) $P_{T,k}$ คือ กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้าที่บัส k ใดๆ และ $G_{k,i}$ คือ เมทริกซ์คอนดักแตนซ์ของตัวนำไฟฟ้าระหว่างบัส k และบัส i [9]

$$\sum_{i=1}^N G_{k,i} V_i = I_{s,k} - \frac{P_{T,k}}{V_k} \quad (20)$$

เมทริกซ์คอนดักแตนซ์ประกอบด้วย $[G_s]$ คือ เมทริกซ์ย่อยคอนดักแตนซ์ที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน $[G_{pq}]$ คือ เมทริกซ์ย่อยคอนดักแตนซ์ของตัวนำไฟฟ้าระหว่างบัส p ถึงบัส q และ $[G_{pp}]$, $[G_{qq}]$ คือ เมทริกซ์ย่อยคอนดักแตนซ์ระหว่างรางวิ่งถึงกราวด์ ดังสมการที่ (21)–(24) และสมการที่ (20) [14] ในรูปของสมการเมทริกซ์แสดงดังสมการที่ (25) [14]

$$[G_s] = \begin{bmatrix} G_s^{(C,C)} & G_s^{(C,R)} \\ G_s^{(R,C)} & G_s^{(R,R)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_s} & -\frac{1}{R_s} \\ -\frac{1}{R_s} & \frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_{SE}} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$[G_{pq}] = \begin{bmatrix} G_{pq}^{(C,C)} & G_{pq}^{(C,R)} \\ G_{pq}^{(R,C)} & G_{pq}^{(R,R)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{cond}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{rail}} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$[G_{pp}]_{RE} = \begin{bmatrix} G_{pp}^{(C,C)} & G_{pp}^{(C,R)} \\ G_{pp}^{(R,C)} & G_{pp}^{(R,R)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} G_{RE} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$[G_{qq}]_{RE} = [G_{pp}]_{RE} \quad (24)$$

การหาผลเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าด้วยวิธีฉีดกระแสไฟฟ้าในแต่ละรอบของการคำนวณมีขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1) เริ่มต้นการคำนวณกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่บัสตัวนำเท่ากับแรงดันไ่ว์โวลต์ของระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน และแรงดันไฟฟ้าที่รางเท่ากับศูนย์

2) สร้างเมทริกซ์คอนดักแตนซ์ และเมทริกซ์กระแสไฟฟ้าของระบบ

3) กำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่บัสระบบเก็บสะสมพลังงานสำหรับรอบการคำนวณใดๆ เป็นไปตามการควบคุมดังรูปที่ 5 แต่สำหรับรอบการคำนวณที่ 1 กำหนดให้กระแสไฟฟ้านี้มีค่าเท่ากับศูนย์

4) คำนวณหาผลเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าจากสมการที่ (25)

5) ถ้าผลเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนของรอบการคำนวณใดๆ มีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าไ่ว์โวลต์หรือมีค่ากระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนต้องตัดโนดสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนดังกล่าวออกจากแบบจำลอง และกลับไปคำนวณดังข้อที่ 2) ถ้าไม่เป็นไปตามข้อ 5) อัปเดตค่าแรงดันไฟฟ้าในรอบที่ผ่านมาด้วยผลเฉลี่ยที่คำนวณได้

6) คำนวณความคลาดเคลื่อนระหว่างผลเฉลี่ยแรงดันไฟฟ้าในรอบก่อนหน้าและรอบปัจจุบัน

7) ถ้าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้หรือแรงดันไฟฟ้าในระบบต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด (500 โวลต์) กรณีรถไฟฟ้าทำงานในโหมดเบรก เริ่มการคำนวณในตำแหน่งถัดไปของรถไฟฟ้าและกลับไปคำนวณที่ข้อ 1)

$$\begin{bmatrix} G_{11}^{(C,C)} & G_{11}^{(C,R)} & G_{12}^{(C,C)} & G_{12}^{(C,R)} & \cdots & G_{1N}^{(C,C)} & G_{1N}^{(C,R)} \\ G_{11}^{(R,C)} & G_{11}^{(R,R)} & G_{12}^{(R,C)} & G_{12}^{(R,R)} & \cdots & G_{1N}^{(R,C)} & G_{1N}^{(R,R)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ G_{N1}^{(C,C)} & G_{N1}^{(C,R)} & \cdots & \cdots & \cdots & G_{NN}^{(C,C)} & G_{NN}^{(C,R)} \\ G_{N1}^{(R,C)} & G_{N1}^{(R,R)} & \cdots & \cdots & \cdots & G_{NN}^{(R,C)} & G_{NN}^{(R,R)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^{(C)} \\ V_1^{(R)} \\ V_2^{(C)} \\ V_2^{(R)} \\ \vdots \\ V_N^{(C)} \\ V_N^{(R)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1^{(C)} - \frac{P_{T,1}}{V_1} \\ -I_1^{(R)} + \frac{P_{T,1}}{V_1} \\ I_2^{(C)} - \frac{P_{T,2}}{V_2} \\ -I_2^{(R)} + \frac{P_{T,2}}{V_2} \\ \vdots \\ I_N^{(C)} - \frac{P_{T,N}}{V_N} \\ -I_N^{(R)} + \frac{P_{T,N}}{V_N} \end{bmatrix} \quad (25)$$

2.4 การหาขนาดที่เหมาะสมของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานแบบปริมาตร

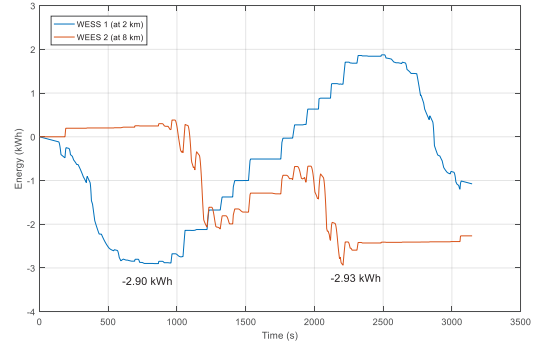
การออกแบบขนาดของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน โดยทั่วไปจะให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจ่ายพลังงาน และแรงดันไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีค่าไม่ต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด [15] หรือจ่ายพลังงานให้สถานะประจุมีค่าไม่ต่ำกว่าร้อยละ 25 ความลึกการคายประจุสูงสุดเท่ากับร้อยละ 75 พลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด (E_{sc}) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (26) และพลังงานที่สามารถจ่ายได้ของระบบเก็บสะสมพลังงาน ($E_{sc,useable}$) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (27)

$$E_{sc} = \frac{1}{2} C_{sc} v_{sc}^2 \quad (26)$$

$$E_{sc,useable} = \frac{1}{2} C_{sc} [v_{sc,max}^2 - (0.5v_{sc,max})^2] \quad (27)$$

โดยที่ C_{sc} คือ ค่าประจุไฟฟ้าในหน่วยฟารัด และ v_{sc} และ $v_{sc,max}$ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าขณะใดๆ และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ตามลำดับ สถานะประจุ (State of Charge; SOC) และความลึกของการคายประจุ (Depth of Discharge; DOD) ของระบบเก็บสะสมพลังงาน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (28), (29)

$$SOC = \frac{E_{sc}}{E_{sc,max}} \times 100 \quad (28)$$



รูปที่ 6 พลังงานที่จ่ายออกและรับเข้าของระบบเก็บสะสมพลังงานเทียบกับเวลา

$$DOD = \left(1 - \frac{SOC}{100}\right) \times 100 \quad (29)$$

การออกแบบขนาดของระบบเก็บสะสมพลังงานพิจารณาจากขนาดของพลังงานที่จ่ายออกต่ำสุดของระบบเก็บสะสมพลังงาน โดยให้พลังงานดังกล่าวเท่ากับร้อยละ 75 ของขนาดตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ใช้ในระบบเก็บสะสมพลังงาน ตัวอย่างเช่น พลังงานที่จ่ายออกและรับเข้าของระบบเก็บสะสมพลังงานเมื่อติดตั้งที่ตำแหน่ง 2 กิโลเมตร และ 8 กิโลเมตร จากสถานีผู้โดยสารแรก แสดงดังรูปที่ 6 จากตัวอย่างดังกล่าว ขนาดของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ต้องติดตั้งที่ตำแหน่ง 2 กิโลเมตร และ 8 กิโลเมตร จะเท่ากับ 3.87 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และ 3.91 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ตามลำดับ

2.5 การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization)

เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค (PSO) เป็นเทคนิคการทำงานที่คล้ายการเคลื่อนที่ของฝูงนกหรือฝูงปลา โดยคำตอบของกลุ่มอนุภาคจะเคลื่อนที่ไปตามอนุภาคที่มีคำตอบใกล้เคียงค่าที่เหมาะสมที่สุด เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดดังกล่าวมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าที่เหมาะสมที่สุดอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีการแบ่งปันข้อมูลร่วมกันระหว่างอนุภาค [16] กลุ่มอนุภาคประกอบไปด้วยอนุภาคย่อย แต่ละอนุภาคเป็นตัวแทนของคำตอบที่ต้องการค้นหา การหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) ทำการสุ่มตำแหน่งแต่ละอนุภาคในกลุ่มประชากร ($\bar{p}_i$) และสุ่มความเร็วของแต่ละอนุภาค ($\bar{v}_i$)

2) ประเมินค่าความเหมาะสมของแต่ละอนุภาค โดยอนุภาคที่เหมาะสมที่สุดจะถูกบันทึกเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคไว้

3) ปรับปรุงความเร็วของอนุภาคดังสมการที่ (30) โดยที่ ρ_p และ ρ_g เป็นตัวแปรสุ่ม $\bar{p}_{gbest,i}$ และ $\bar{p}_{pbest,i}$ คือ ค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดแบบวงกว้าง และของอนุภาค ตามลำดับ

$$\bar{v}_i(t) = \bar{v}_i(t-1) + \rho_p [\bar{p}_{pbest,i} - \bar{p}_i(t)] + \dots \\ \rho_g [\bar{p}_{gbest,i} - \bar{p}_i(t)] \quad (30)$$

4) ทำการปรับค่าเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาค ดังสมการที่ (31)

$$\bar{p}_i(t) = \bar{p}_i(t-1) + \bar{v}_i(t) \quad (31)$$

5) ทำการปรับค่าตัวแปรเวลา $t = t + 1$

6) วนรอบการทำงานจนกระทั่งเป็นไปตามเงื่อนไขหยุดที่ยอมรับได้

การหาตำแหน่งติดตั้งของระบบเก็บสะสมพลังงานด้วยเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ หาดำเนินการติดตั้งของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ส่งผลให้ระบบเก็บสะสมพลังงานสามารถช่วยจ่ายพลังงานตามการควบคุมการทำงาน เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนให้มีค่าน้อยที่สุด และเกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่น้อยที่สุด ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังสมการที่ (32) โดยที่ $v_{sub,n}$ และ $i_{sub,n}$ คือ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ n ใดๆ พลังงานไฟฟ้าสูญเสีย (E_{loss}) ที่พิจารณา ได้แก่ พลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานที่ไม่สามารถเก็บสะสมในระบบเก็บสะสมพลังงานได้ ($E_{b,waste}$) และพลังงานสูญเสียเนื่องจากความต้านทานภายในตัวนำ ($E_{loss,line}$) ดังสมการที่ (33)

$$E = \sum_{n=0}^{N_{sub}} \int_0^T v_{sub,n}(t) \cdot i_{sub,n}(t) dt + E_{loss} \quad (32)$$

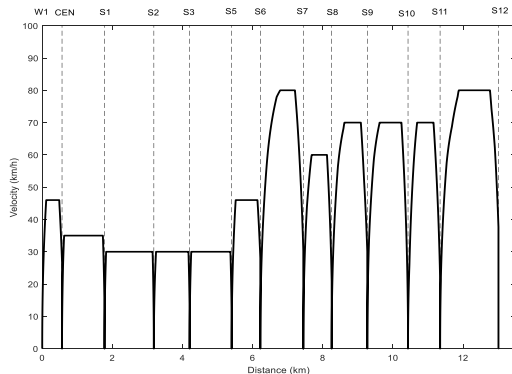
$$E_{loss} = E_{b,waste} + E_{loss,line} \quad (33)$$

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทางสำหรับรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน กระแสตรง

การติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทางที่ติดตั้งตำแหน่งระหว่างเส้นทางทางวิ่งของรถไฟฟ้า ตำแหน่งติดตั้งส่งผลต่อพฤติกรรมการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงานตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่ต้องการ เช่น การติดตั้งที่ตำแหน่งเกิดแรงดันไฟฟ้าตกเพื่อชดเชยแรงดันไฟฟ้า การติดตั้งที่ตำแหน่งใกล้กับสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน เพื่อให้ขนาดของระบบเก็บสะสมพลังงานมีขนาดเล็ก ส่งผลให้ต้นทุนในการติดตั้งต่ำ [17], [15] การติดตั้งที่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างสถานี เพื่อลดพลังงานสูญเสียและลดการใช้พลังงานจากสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน [18], [19] ขนาดของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ติดตั้งเป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึง โดยการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่เหมาะสมไม่ควรมีขนาดใหญ่จนเกินไป จะส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งที่สูง หรือการพิจารณาความลึกของการคายประจุของระบบเก็บสะสมพลังงานเพื่อการใช้งานอย่างเต็มประสิทธิภาพ [20] เป็นต้น

งานวิจัยนี้ศึกษาการหาตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทาง เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนน้อยที่สุด และลดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียรวมของระบบด้วยการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 1 ขบวน เคลื่อนที่จากสถานีต้นทางถึงสถานีปลายทาง และเคลื่อนที่กลับมาที่สถานีต้นทางอีกครั้ง พลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่พิจารณา ได้แก่ พลังงานไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากการเบรก หรือพลังงานไฟฟ้าที่ไม่สามารถเก็บสะสมในระบบเก็บสะสมพลังงานได้ และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความต้านทานตัวนำไฟฟ้า พารามิเตอร์ของรถไฟฟ้าที่ใช้ในการจำลองแสดงในตารางที่ 1 และลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 7 รถไฟฟ้าเคลื่อนที่เป็นระยะทาง 13 กิโลเมตร 13 สถานีผู้โดยสาร (W1 ถึง S12)



รูปที่ 7 ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้า

ตำแหน่งสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนแสดงดังรูปที่ 8

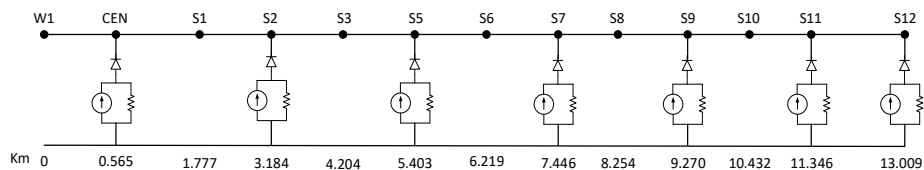
3.1.1 ผลการหาขนาดที่เหมาะสมของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานแบบบริมทาง 2 ชุด

การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าที่ติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทาง 2 ชุด ได้แก่ ชุดแรกอยู่ระหว่างครึ่งแรกของเขตจ่ายไฟฟ้า หรือระยะทางระหว่าง 0-6 กิโลเมตร จากสถานีผู้โดยสารแรก และชุดที่สองอยู่ในระยะทางครึ่งหลังของเขตจ่ายไฟฟ้า หรือระยะทางระหว่าง 7-13 กิโลเมตร จำลองการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงาน เช่น กรณีชุดที่ 1 ติดตั้ง

ที่ตำแหน่ง 0 กิโลเมตร จำลองการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานชุดที่ 2 ตั้งแต่ตำแหน่งที่ 7 กิโลเมตร - 13 กิโลเมตร และกรณีชุดที่ 1 ติดตั้งที่ตำแหน่ง 1 กิโลเมตร จะจำลองการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานชุดที่ 2 ตั้งแต่ตำแหน่งที่ 7 กิโลเมตร - 13 กิโลเมตร เช่นเดียวกัน ผลการออกแบบขนาดของระบบเก็บสะสมพลังงานใหญ่ที่สุดเมื่อระบบเก็บสะสมพลังงานชุดที่ 1 ติดตั้งที่ตำแหน่งใดๆ แสดงดังรูปที่ 9 เพื่อให้ระบบเก็บสะสมพลังงานสามารถจ่ายพลังงานได้สูงสุดทุกกรณี ขนาดที่เหมาะสมของระบบเก็บสะสมพลังงานเท่ากับ 4.61 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และ 5.43 กิโลวัตต์-ชั่วโมง สำหรับระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทางชุดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

3.1.2 การเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงาน 2 ชุด

จำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าโดยกำหนดสถานะประจุเริ่มต้นของระบบเก็บสะสมพลังงานเท่ากับร้อยละ 100 ติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทาง 2 ชุด ได้แก่ ชุดแรกอยู่ระหว่างครึ่งแรกของเขตจ่ายไฟฟ้า และชุดที่สองอยู่ระหว่างครึ่งหลังของเขตจ่ายไฟฟ้า พารามิเตอร์ควบคุมการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงาน แสดงดังตารางที่ 2 จากผลการจำลองติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงาน 2 ชุด ด้วยขนาด



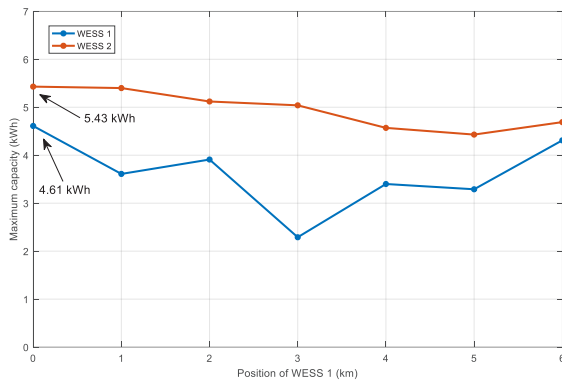
รูปที่ 8 ตำแหน่งสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของรถไฟฟ้าที่ใช้ในแบบจำลอง

Train Parameters			Power System Parameter		
Weight	228 ton		No load voltage	790 Vdc	
Movement Feature	Max. speed	80 km/h	Resistance	Third rail resistance (mΩ/km)	8.23
	Max. acceleration	0.87 m/s ²		Running rail resistance (mΩ/km)	40.46
	Max. deceleration	1 m/s ²		Conductivity to earth (S/km)	0.10
Efficiency	84.50%			Short-circuit resistance (mΩ)	14.70
Auxiliary Power	Constant load	270 kW			
Train Resistance	a = 4025, b = 118.67, c = 0.871				

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์การควบคุม Piece-wise Linear SOC

Discharging					Charging				
m_d	$I_{disc,min}$ (A)	$I_{disc,max}$ (A)	$\Delta v_{disc,min}$ (V)	$\Delta v_{disc,max}$ (V)	m_c	$I_{char,min}$ (A)	$I_{char,max}$ (A)	$\Delta v_{char,min}$ (V)	$\Delta v_{char,max}$ (V)
11.4	0	1000	2	158	6.3	10	1000	0	158

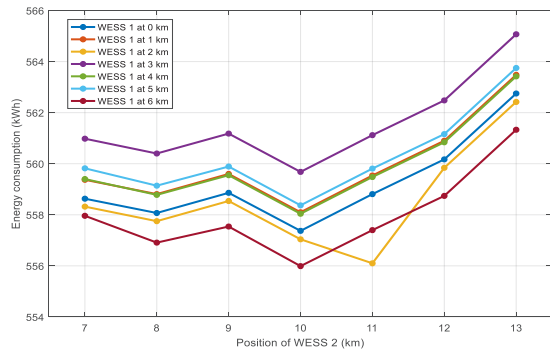


รูปที่ 9 ขนาดของระบบเก็บสะสมพลังงาน

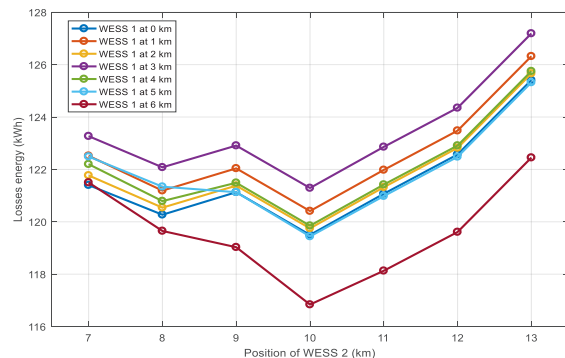
เท่ากับ 4.61 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และ 5.43 กิโลวัตต์-ชั่วโมง การใช้พลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียแสดงดังรูปที่ 10, 11 ตำแหน่งติดตั้งของระบบเก็บสะสมพลังงานที่ส่งผลให้การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนน้อยที่สุดเท่ากับ 556 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียน้อยที่สุดเท่ากับ 116.84 กิโลวัตต์-ชั่วโมง เมื่อติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานชุดที่ 1 ที่ตำแหน่ง 6 กิโลเมตร และชุดที่ 2 ที่ตำแหน่ง 10 กิโลเมตร

3.1.3 การใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค

พารามิเตอร์สำหรับการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด กำหนดให้จำนวนอนุภาคเท่ากับ 2 ขนาดของกลุ่มประชากรเท่ากับ 20 จำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าด้วยโปรแกรม MATLAB หาดำเนินการที่เหมาะสมด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคทั้งหมด 20 ครั้ง เพื่อหาผลเฉลยที่ดีที่สุด กำหนดขนาดระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทาง เท่ากับ 4.61 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และ 5.43 กิโลวัตต์-ชั่วโมง สำหรับระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทางชุดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบเก็บสะสมพลังงาน 2 ชุด จากการใช้เทคนิค PSO



รูปที่ 10 การใช้พลังงานสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (กรณีเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้ง)



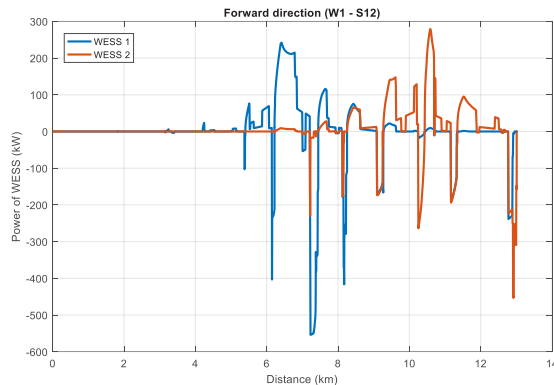
รูปที่ 11 พลังงานสูญเสีย (กรณีเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้ง)

คือ ที่ตำแหน่ง 6.93 กิโลเมตร และ 10.43 กิโลเมตร จากสถานีผู้โดยสารแรก กำหนดสถานะประจุเริ่มต้นของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานเท่ากับร้อยละ 100

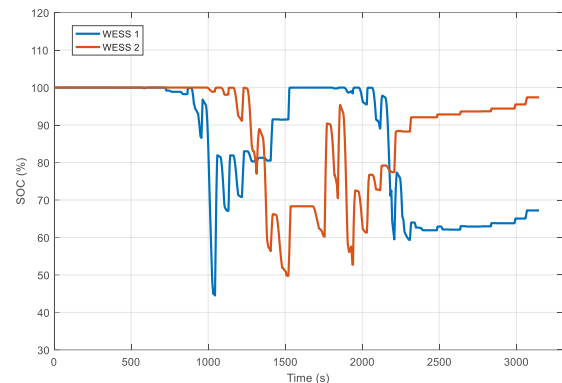
ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าสายสีลมกรณีมีและไม่มีระบบเก็บสะสมพลังงานแบบบริมทางแสดงดังตารางที่ 3 จากผลการจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนลดลง 50.71 กิโลวัตต์-ชั่วโมง หรือสามารถลดการใช้พลังงานได้ร้อยละ 8.37 พลังงานสูญเสียจากการเบรกแบบจ่ายคืนพลังงานลดลง 50.77 กิโลวัตต์-

ตารางที่ 3 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า กรณีมีและไม่มีระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง

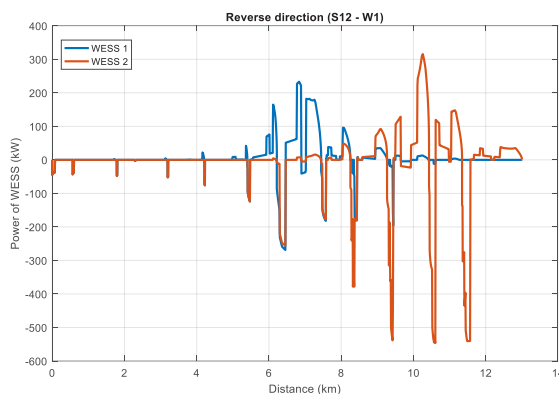
Case	E_{sub} (kWh)	$E_{charged}$ (kWh)		$E_{discharged}$ (kWh)		$E_{loss,line}$ (kWh)	$E_{b,waste}$ (kWh)	DOD_{max} (%)		SOC_{end} (%)	
		WESS 1	WESS 2	WESS 1	WESS 2			WESS 1	WESS 2	WESS 1	WESS 2
Without WESS	605.54	-	-	-	-	17.03	150.25	-	-	-	-
With WESS	554.83	6.64	9.30	8.15	9.44	16.00	100.51	55.51	50.22	67.21	97.39



รูปที่ 12 กำลังไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง กรณีเคลื่อนที่จาก W1 ถึง S12



รูปที่ 14 สถานะประจุของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงาน



รูปที่ 13 กำลังไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง กรณีเคลื่อนที่จาก S12 ถึง W1

ชั่วโมง หรือคิดเป็นร้อยละ 30.35 รูปที่ 12, 13 แสดงกำลังไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทาง กรณีรถไฟฟ้าเคลื่อนที่จากสถานีผู้โดยสาร W1 ถึง S12 และกรณีเคลื่อนที่จากสถานีผู้โดยสาร S12 ถึง W1 ตามลำดับ จากรูป กำลังไฟฟ้าของระบบเก็บสะสมพลังงานมีค่า

เป็นบวกเมื่อระบบเก็บสะสมพลังงานจ่ายพลังงาน และมีค่าเป็นลบกรณีระบบเก็บสะสมพลังงานสะสมพลังงาน ระบบเก็บสะสมพลังงานสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ในช่วงระยะทาง 3 กิโลเมตร ก่อนและหลังตำแหน่งติดตั้ง หรือระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เป็นช่วงระยะทาง 6 กิโลเมตร เมื่อระบบเก็บสะสมพลังงานมีพารามิเตอร์ควบคุมการทำงานดังตารางที่ 2 สถานะประจุของระบบเก็บสะสมพลังงานทั้งสองชุดตลอดการเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 14 ระบบเก็บสะสมพลังงานชุดที่ 1 และ 2 มีความลึกการคายประจุสูงสุดร้อยละ 55.51 และร้อยละ 50.22 ตามลำดับ สถานะประจุสุดท้ายเมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่กลับมาที่สถานีผู้โดยสารแรกอีกครั้งเท่ากับร้อยละ 67.21 และร้อยละ 97.39

4. สรุป

งานวิจัยฉบับนี้ศึกษาการหาตำแหน่ง และขนาดที่เหมาะสมสำหรับระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสดร โดยจำลองการ



เคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า คำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ใช้ข้อมูลของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสายสีลมเป็นกรณีศึกษา ขนาดที่เหมาะสมสำหรับระบบเก็บสะสมพลังงาน 2 ชุด ได้แก่ 4.61 และ 5.43 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ศึกษาการหาตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบเก็บสะสมพลังงาน 2 ตำแหน่ง ผลการจำลองพบว่า ตำแหน่งที่ส่งผลให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และเกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย น้อยที่สุดเมื่อติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานที่ตำแหน่ง กิโลเมตรที่ 6 และ 10 จากสถานีไฟฟ้าต้นทาง (W1) เมื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมด้วยวิธีการกระจายการติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานทุกๆ 1 กิโลเมตร การใช้พลังงานไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนลดลงร้อยละ 8.18 และพลังงานไฟฟ้าสูญเสียลดลง ร้อยละ 30.15 กรณีใช้วิธี PSO สามารถระบุตำแหน่งติดตั้งได้ละเอียดมากกว่าผลการหาตำแหน่งที่เหมาะสม คือ ที่ตำแหน่ง 6.93 กิโลเมตร และ 10.43 กิโลเมตร การใช้พลังงานจากสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อนลดลงร้อยละ 8.37 และพลังงานสูญเสียลดลงร้อยละ 30.35 ตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางของระบบรถไฟฟ้าขึ้นกับ ลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้าขบวนนั้นๆ เนื่องจากลักษณะ ความเร็วที่เปลี่ยนไป ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้า ขับเคลื่อนเปลี่ยนไป หรือกล่าวได้ว่าระบบรถไฟฟ้าที่มีลักษณะ ความเร็วที่ต่างกันมีตำแหน่ง และขนาดที่เหมาะสมสำหรับ ติดตั้งระบบเก็บสะสมพลังงานแบบริมทางที่แตกต่างกัน สามารถ ประยุกต์แบบจำลองที่นำเสนอในบทความนี้เพื่อหาตำแหน่ง และขนาดที่เหมาะสมสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรงที่มี ลักษณะความเร็วเฉพาะโดยการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของ รถไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน รูปแบบการทำงานของ ระบบเก็บสะสมพลังงาน และลักษณะความเร็วของรถไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Kampeerawat and T. Koseki, "A strategy for utilization of regenerative energy in urban railway system by application of smart train scheduling and wayside energy storage system," in *Proceedings 2017 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies 2017 AEDCEE*, pp. 795–800, 2017.
- [2] T. Ratniyomchai, S. Hillmanssen, and P. Tricoli, "Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways," in *Proceedings IET Electrical Systems in Transportation*, pp. 9–20, 2013.
- [3] A. Okui, S. Hase, H. Shigeeda, T. Konishi, and T. Yoshi, "Application of energy storage system for railway transportation in Japan," in *Proceedings The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA*, Sapporo, Japan, 2010.
- [4] H. Hayashiya, T. Suzuki, M. Hino, D. Hara, M. Tojo, S. Shimada, K. Kudo, T. Kato, and H. Takahashi, "Effect evaluation of Li-ion battery for regenerative energy utilization in traction power supply system," in *Proceedings 2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*, Geneva, Switzerland, 2015.
- [5] K. Ogura, K. Nishimura, T. Matsumura, C. Tonda, E. Yoshiyama, M. Andriani, W. Francis, R. A. Schmitt, A. Visgotis, and N. Gianfrancesco, "Test results of a high capacity wayside energy storage system using Ni-MH batteries for DC electric railway at New York city transit," in *Proceedings 2011 IEEE Green Technologies Conference (IEEE-Green)*, Baton Rouge, LA, USA, 2011.
- [6] P. Radcliffe, J. S. Wallace, and L. H. Shu, "Stationary applications of energy storage technologies for transit systems," in *Proceedings 2010 IEEE Electrical Power & Energy Conference*, Halifax, NS, Canada, 2010.
- [7] Z. Yang, H. Xia, B. Wang, and F. Lin, "An overview on braking energy regeneration technologies

- in Chinese urban railway transportation,” in *Proceedings 2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA)*, Hiroshima, Japan, 2014.
- [8] A. Castaings, H. Caron, H. Kharrat, A. Ovalle, and B. Vulturescu, “Energy storage system based on supercapacitors for a 750 V DC railway power supply,” in *Proceedings 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, Nottingham, UK, 2018.
- [9] T. Kulworawanichpong, *Railway Electrification*, Nakhon Ratchasima: The Center for Library Resources and Educational Media, 2018 (in Thai).
- [10] C. Sumpavakup and T. Kulworanichpong, “Optimizing train speed profile for a mass transit system using differential evolution,” *The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King’s Patronage*, vol. 25, no. 4, pp. 59–69, 2014 (in Thai).
- [11] K. Mongkoldee, U. Leeton, and T. Kulworawanichpong, “Single train movement modelling and simulation with rail potential consideration,” in *Proceedings 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, 2016.
- [12] A. Finlayson, C. J. Goodman, and R. D. White, “Investigation into the computational techniques of power system modelling for a DC railway,” in *Proceedings WIT Transaction on The Built Environment*, 2006.
- [13] T. Ratniyomchai, “Optimal design and control of stationary electrochemical double-layer capacitors for light railways,” School of Engineering, Department of Electronic, Electrical and Systems Engineering, The University of Birmingham, UK, 2016.
- [14] C. Sumpavakup, “Peak-cutting strategy for regenerative energy management incorporating edlc in mass rapid transit,” M.S. thesis, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Suranaree University of Technology, 2017 (in Thai).
- [15] T. Ratniyomchai, S. Hillmansen, and P. Tricoli, “Optimal capacity and positioning of stationary supercapacitors for light rail vehicle systems,” presented at the *2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, Ischia, Italy, 2014.
- [16] A. Srikaew, *Computational Intelligence*, Bangkok, 2009 (in Thai).
- [17] V. Calderaro, V. Galdi, G. Graber, and A. Piccolo, “Siting and sizing of stationary SuperCapacitors in a Metro Network,” in *Proceedings AEIT Annual Conference 2013*, 2013.
- [18] T. Ratniyomchai, S. Hillmansen, and P. Tricoli, “Energy loss minimisation by optimal design of stationary supercapacitors for light railways,” in *Proceedings 2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, 2015.
- [19] V. Calderaro, V. Galdi, G. Graber, and A. Piccolo, “Optimal siting and sizing of stationary supercapacitors in a metro network using PSO,” in *Proceedings 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2015.
- [20] U. Sirmelis, J. Zakis, and L. Grigans, “Optimal supercapacitor energy storage system sizing for traction substations,” in *Proceedings 2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, 2015.