

ภาคผนวก ก

ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่และการออกแบบขนาด ESTS

ก.1 ข้อมูลจำเพาะของเซลล์แบตเตอรี่ Toshiba SCiB™ 23 Ah

ภาคผนวกส่วนนี้แนะนำข้อมูลจำเพาะของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไททาเนต (Lithium Titanate Oxide: LTO) รุ่น Toshiba SCiB™ 23 Ah แสดงดังรูปที่ ก.1 ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นฐานในการออกแบบ ESD ใน ESTS สำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรงระดับแรงดันไฟฟ้า 750 โวลต์ ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ การเลือกใช้เซลล์ชนิดดังกล่าวมิได้พิจารณาจากความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว หากแต่พิจารณาร่วมกับสมรรถนะด้านกำลังไฟฟ้า ความทนทานต่อการใช้งานซ้ำ และความเสถียรทางความร้อน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีลักษณะโหลดแบบทรานเซียนต์สูง



รูปที่ ก.1 ลักษณะทางกายภาพของเซลล์แบตเตอรี่ Toshiba SCiB™ 23 Ah

(ที่มาภาพ: <https://www.global.toshiba/www/products-solutions/battery/scib/product-next/product/cell/high-energy.html> [เข้าถึงเมื่อ 19 มีนาคม 2569])

เซลล์ Toshiba SCiB™ 23 Ah เป็นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้วัสดุแอโนดแบบลิเทียมไททาเนต ซึ่งมีคุณลักษณะเด่นในด้านความสามารถในการรองรับกระแสชาร์จและคายประจุในระดับสูงโดยมีการเสื่อมสภาพต่ำเมื่อเทียบกับเคมีแบตเตอรี่ชนิดอื่น นอกจากนี้ โครงสร้างทางเคมีของ LTO ยังส่งผลให้มีความเสถียรทางความร้อนสูง ลดความเสี่ยงของปรากฏการณ์ความร้อนสูงเกินควบคุมและสามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้เซลล์ LTO เหมาะสมต่อการใช้งานในระบบ ESTS ซึ่งต้องรองรับทั้งการจ่ายกำลังไฟฟ้าระดับสูงในช่วงเวลาสั้นและการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าสำหรับอพยพขบวนรถไฟฟ้าในสถานการณ์ไฟดับอย่างมีประสิทธิภาพ

บริบทการใช้งาน LTO ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เซลล์ที่มีความสามารถด้านกำลังไฟฟ้าสูงมีความสำคัญมากกว่าความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากภาระโหลดของขบวนรถไฟฟ้ามีลักษณะเป็นจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ไม่ได้คงที่และเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการเลือกใช้ Toshiba

SCiB™ 23 Ah จึงสอดคล้องกับลักษณะการใช้งานดังกล่าว โดยสามารถรองรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าระดับสูงในช่วงเวลาสั้นได้โดยไม่ทำให้เกิดข้อจำกัดทางความร้อนหรือแรงดันไฟฟ้าตกที่รุนแรงเกินไป

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลจำเพาะของเซลล์แบตเตอรี่ Toshiba SCiB™ 23 Ah

รายการ	ค่า
เคมีแบตเตอรี่	Lithium Titanate Oxide (LTO)
รุ่นเซลล์	Toshiba SCiB™ 23 Ah
รูปทรง	prismatic
ความจุพิกัด	23 Ah
แรงดันไฟฟ้าอิมินัล	2.3 V
กำลังไฟฟ้าอ้างอิง (10s)	1,000 W
ความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้าเชิงมวล	96 Wh/kg
ความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้าเชิงปริมาตร	202 Wh/L
ขนาดต่อเซลล์	W116 × D22 × H106 mm
น้ำหนักต่อเซลล์	~0.55 kg

จากข้อมูลดังกล่าว จะเห็นได้ว่าเซลล์ LTO มีแรงดันไฟฟ้าปกติของเซลล์ต่ำ ส่งผลให้ต้องใช้จำนวนเซลล์แบบอนุกรมจำนวนมากเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าระดับระบบ อย่างไรก็ตาม ข้อเสียในด้านจำนวนเซลล์นี้ถูกชดเชยด้วยความสามารถด้านกำลังไฟฟ้าและความทนทาน ซึ่งเป็นคุณสมบัติหลักที่ต้องการสำหรับ ESD ในงานระบบรถไฟฟาส่งมวลชน

ก.2 การออกแบบแบตเตอรี่แพ็ค

การออกแบบแบตเตอรี่แพ็คในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการภายใต้ข้อกำหนดของระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงระดับแรงดัน 750 โวลต์ โดยใช้เซลล์แบตเตอรี่ Toshiba SCiB™ 23 Ah เป็นเซลล์อ้างอิงในการออกแบบ แบตเตอรี่แพ็คถูกกำหนดให้สามารถรองรับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำหรับการขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟาส่งมวลชนที่ติดตั้งระบบ ESTS และการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้แก่ขบวนรถไฟฟาส่งมวลชนที่ไม่ได้ติดตั้งระบบดังกล่าว กำหนดกรณีศึกษาออกเป็น 3 กรณี ตามระดับภาระของระบบ ESTS ต่อจำนวนขบวนรถไฟฟาส่งมวลชนที่ได้รับพลังงานจากแบตเตอรี่แพ็ค ได้แก่ กรณีที่รองรับขบวนรถไฟฟาส่งมวลชน 1 ขบวน

2 ขบวน และ 3 ขบวน โดยกำหนดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแพ็คเท่ากับ 900 กิโลวัตต์ 1,800 กิโลวัตต์ และ 2,700 กิโลวัตต์ ตามลำดับ ทั้งนี้ กำลังไฟฟ้าต่อเนื่องและพลังงานขั้นต่ำของแพ็คถูกกำหนดให้เพิ่มขึ้นตามจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ได้รับพลังงานไฟฟ้า เพื่อให้การออกแบบสะท้อนภาระโหลดที่เพิ่มขึ้นของระบบอย่างเป็นสัดส่วน

ก.2.1 การกำหนดจำนวนเซลล์แบบอนุกรม

จำนวนเซลล์แบบอนุกรม (Number of series cells: N_S) กำหนดจากแรงดันไฟฟ้านอминаลของแพ็ค (Nominal voltage of pack: V_{pack}) เท่ากับ 750 โวลต์ และแรงดันไฟฟ้านอминаลของเซลล์ (Nominal voltage of cell: V_{cell}) เท่ากับ 2.3 โวลต์ โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\begin{aligned} N_S &= V_{pack} \div V_{cell} \\ &= 750V \div 2.3V \\ &\cong 327\text{cells} \end{aligned}$$

ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้านอминаลของแพ็คที่ได้จากการต่ออนุกรมเซลล์ทั้งหมด 327 ชุด มีค่าจริงเท่ากับ

$$\begin{aligned} V_{pack,actual} &= N_S \times V_{cell} \\ &= 327\text{cells} \times 2.3V \\ &= 752.1V \end{aligned}$$

ค่าดังกล่าวถือว่าเหมาะสมกับการเชื่อมต่อเข้ากับระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงระดับ 750 โวลต์ และยังทำให้สามารถใช้แรงดันไฟฟ้านอминаลของแพ็คเป็นฐานในการคำนวณได้

ก.2.2 การกำหนดจำนวนเซลล์แบบขนาน

การกำหนดจำนวนเซลล์แบบขนาน (Number of parallel cells: N_P) พิจารณาจากพลังงานไฟฟ้าขั้นต่ำที่ต้องการในแต่ละกรณี โดยกรณีฐานกำหนดให้แบตเตอรี่แพ็คต้องมีความจุของเซลล์ (Nominal capacity of cell: Q_{cell}) เท่ากับ 23 แอมป์ชั่วโมง และพลังงานไฟฟ้าขั้นต่ำของแพ็ค (Minimum energy of pack: $E_{pack,min}$) เท่ากับ 65 กิโลวัตต์ชั่วโมง สำหรับรองรับภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้ขบวนรถไฟฟ้าจำนวน 1 ขบวน ดังนั้น เมื่อพิจารณากรณีการแบ่งปันพลังงาน

ให้ขบวนรถไฟฟ้า 2 และ 3 ขบวน พลังงานไฟฟ้าขั้นต่ำของแพ็คจึงกำหนดเป็น 130 กิโลวัตต์ชั่วโมง และ 195 กิโลวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ โดยคงจำนวนเซลล์แบบอนุกรมตามแรงดันไฟฟ้าและเพิ่มเซลล์แบบขนานเพื่อขยายความจุแพ็ค ทั้งนี้ ค่าที่คำนวณได้จะปัดขึ้นเป็นจำนวนเต็ม เพื่อให้พลังงานสำรองไม่น้อยกว่าค่าขั้นต่ำ ซึ่งต้องคำนวณหาความจุของแพ็ค (Capacity of pack: Q_{pack}) ดังนี้

สำหรับ 65 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$\begin{aligned} Q_{pack,65kWh} &= E_{pack,min} \div V_{pack} \\ &= 65kWh \div 750V \\ &= 86.67Ah \end{aligned}$$

สำหรับ 130 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$\begin{aligned} Q_{pack,130kWh} &= E_{pack,min} \div V_{pack} \\ &= 130kWh \div 750V \\ &= 173.33Ah \end{aligned}$$

สำหรับ 195 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$\begin{aligned} Q_{pack,195kWh} &= E_{pack,min} \div V_{pack} \\ &= 195kWh \div 750V \\ &= 260.00Ah \end{aligned}$$

จำนวนเซลล์แบบขนานคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างความจุของแพ็คที่ต้องการกับความจุของเซลล์ ดังนี้

สำหรับ 65 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$\begin{aligned} N_{p,65kWh} &= Q_{pack,65kWh} \div Q_{cell} \\ &= 86.67Ah \div 23Ah \\ &\approx 4cells \end{aligned}$$

สำหรับ 130 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$\begin{aligned} N_{p,130kWh} &= Q_{pack,130kWh} \div Q_{cell} \\ &= 173.33Ah \div 23Ah \\ &\approx 8cells \end{aligned}$$

สำหรับ 195 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$\begin{aligned} N_{p,195kWh} &= Q_{pack,195kWh} \div Q_{cell} \\ &= 260.00Ah \div 23Ah \\ &\approx 12cells \end{aligned}$$

ส่งผลให้ความจุของแพ็ค (Actual capacity of pack: $Q_{pack,actual}$) และพลังงานไฟฟ้าของแพ็ค (Energy of pack: $E_{pack,actual}$) ที่ได้จากการต่อขนานเซลล์ตามที่กำหนดมีค่าจริงเท่ากับ

สำหรับ 65 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$\begin{aligned} Q_{pack,actual,65kWh} &= N_{p,65kWh} \times Q_{cell} \\ &= 4 \times 23Ah \\ &= 92Ah \\ E_{pack,actual,65kWh} &= V_{pack,actual} \times Q_{pack,actual,65kWh} \\ &= 752.1V \times 92Ah \\ &= 69.19kWh \end{aligned}$$

สำหรับ 130 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$\begin{aligned} Q_{pack,actual,130kWh} &= N_{p,130kWh} \times Q_{cell} \\ &= 8 \times 23Ah \\ &= 184Ah \\ E_{pack,actual,130kWh} &= V_{pack,actual} \times Q_{pack,actual,130kWh} \\ &= 752.1V \times 184Ah \\ &= 138.39kWh \end{aligned}$$

สำหรับ 195 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$\begin{aligned} Q_{pack,actual,195kWh} &= N_{p,195kWh} \times Q_{cell} \\ &= 12 \times 23Ah \\ &= 276Ah \\ E_{pack,actual,195kWh} &= V_{pack,actual} \times Q_{pack,actual,195kWh} \\ &= 752.1V \times 276Ah \\ &= 207.58kWh \end{aligned}$$

ก.2.3 การตรวจสอบความสามารถในการรองรับกำลังไฟฟ้าของแพ็ค

ภายหลังจากได้โครงสร้างแพ็คแบบ 327s4p แล้ว ต้องตรวจสอบว่าสามารถรองรับกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak power of pack: P_{peak}) และกำลังไฟฟ้าต่อเนื่อง (Continuous power of pack: P_{cont}) ตามข้อกำหนดของระบบหรือไม่ โดยคำนวณกระแสไฟฟ้าสูงสุด (Peak current of pack: I_{peak}) และกระแสไฟฟ้าต่อเนื่อง (Continuous current of pack: I_{cont}) จากความสัมพันธ์

$$P = V \times I$$

สำหรับ 65 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$\begin{aligned} I_{peak, 65kWh} &= P_{peak, 65kWh} \div V_{pack, actual} \\ &= 900kW \div 752.1V \\ &= 1,196.7A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{cont, 65kWh} &= P_{cont, 65kWh} \div V_{pack, actual} \\ &= 480kW \div 752.1V \\ &= 638.2A \end{aligned}$$

สำหรับ 130 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$\begin{aligned} I_{peak, 130kWh} &= P_{peak, 130kWh} \div V_{pack, actual} \\ &= 1,800kW \div 752.1V \\ &= 2,393.3A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{cont, 130kWh} &= P_{cont, 130kWh} \div V_{pack, actual} \\ &= 960kW \div 752.1V \\ &= 1,276.4A \end{aligned}$$

สำหรับ 195 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$\begin{aligned} I_{peak, 195kWh} &= P_{peak, 195kWh} \div V_{pack, actual} \\ &= 2,700kW \div 752.1V \\ &= 3,590.0A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{cont, 195kWh} &= P_{cont, 195kWh} \div V_{pack, actual} \\ &= 1,440kW \div 752.1V \\ &= 1,914.6A \end{aligned}$$

เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้ารวมของแต่ละกรณีหารด้วยจำนวนเซลล์แบบขนาน จะได้ว่า กระแสต่อสตรึงในกรณีกำลังไฟฟ้าสูงสุดมีค่าประมาณ 299.2 แอมป์ และกรณีกำลังไฟฟ้าต่อเนื่องมีค่าประมาณ 159.6 แอมป์ สำหรับทั้งสามกรณี ดังนั้น การเพิ่มจำนวนเซลล์แบบขนานตามจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้าทำให้การกระแสต่อสตรึงยังคงอยู่ในระดับเดิม แม้กำลังไฟฟ้ารวมของแพ็คจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วน จึงแสดงว่าโครงสร้าง 327s4p 327s8p และ 327s12p สามารถรองรับข้อกำหนดด้านกำลังไฟฟ้าสูงสุดและกำลังไฟฟ้าต่อเนื่องของแต่ละกรณีได้อย่างสอดคล้องกัน

ก.2.4 การคำนวณน้ำหนักรวมของเซลล์ในแพ็ค

จำนวนเซลล์รวมของแพ็คคำนวณได้จากผลคูณของจำนวนเซลล์แบบอนุกรมและแบบขนาน และเมื่ออ้างอิงน้ำหนักต่อเซลล์ประมาณ 0.55 กิโลกรัม น้ำหนักรวมของแพ็คจะมีค่า ดังนี้

สำหรับ 65 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$\begin{aligned} N_{total,65kWh} &= N_S \times N_{P,65kWh} \\ &= 327\text{cells} \times 4\text{cell} \\ &= 1,308\text{cells} \\ W_{total,65kWh} &= N_{total,65kWh} \times W_{cell} \\ &= 1,308\text{cells} \times 0.55\text{kg} \\ &= 719.4\text{kg} \end{aligned}$$

สำหรับ 130 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$\begin{aligned} N_{total,130kWh} &= N_S \times N_{P,130kWh} \\ &= 327\text{cells} \times 8\text{cell} \\ &= 2,616\text{cells} \\ W_{total,130kWh} &= N_{total,130kWh} \times W_{cell} \\ &= 2,616\text{cells} \times 0.55\text{kg} \\ &= 1,438.8\text{kg} \end{aligned}$$

สำหรับ 195 กิโลวัตต์ชั่วโมง

$$\begin{aligned} N_{total,195kWh} &= N_S \times N_{P,195kWh} \\ &= 327\text{cells} \times 12\text{cell} \\ &= 3,924\text{cells} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_{total, 195kWh} &= N_{total, 195kWh} \times W_{cell} \\
 &= 3,924 \text{ cells} \times 0.55 \text{ kg} \\
 &= 2,158.2 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

ทั้งนี้ น้ำหนักดังกล่าวเป็นน้ำหนักของเซลล์เท่านั้น หากรวมอุปกรณ์ประกอบระดับแพ็ค เช่น โครงสร้างกล่องบรรจุ แบตเตอรี่ อุปกรณ์ป้องกัน ระบบจัดการแบตเตอรี่ ระบบระบายความร้อน เป็นต้น น้ำหนักรวมของแพ็คจริงจะสูงกว่าค่าที่แสดงไว้

ก.2.5 สรุปผลการออกแบบแพ็ค

จากการคำนวณข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าการออกแบบแบตเตอรี่แพ็ค Toshiba SCiB™ 23 Ah สำหรับจำลองกรณีการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS ไปยังขบวนรถไฟฟ้ามหานคร สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กรณีตามระดับกำลังไฟฟ้าสูงสุดและจำนวนขบวนรถไฟฟ้ามหานครที่รับพลังงาน โดยโครงสร้างแพ็คที่เหมาะสมคือ 327s4p 327s8p และ 327s12p ตามลำดับ โครงสร้างดังกล่าวให้พลังงานไฟฟ้าของแพ็คประมาณ 69.19 กิโลวัตต์ชั่วโมง 138.39 กิโลวัตต์ชั่วโมง และ 207.58 กิโลวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่าพลังงานไฟฟ้าขั้นต่ำที่กำหนดไว้ที่ 65 กิโลวัตต์ชั่วโมง 130 กิโลวัตต์ชั่วโมง และ 195 กิโลวัตต์ชั่วโมง ตามลำดับ อีกทั้งยังสามารถรองรับกำลังไฟฟ้าสูงสุดของแพ็คเท่ากับ 900 กิโลวัตต์ 1,800 กิโลวัตต์ และ 2,700 กิโลวัตต์ ได้ภายใต้แรงดันไฟฟ้าแพ็คประมาณ 752.1 โวลต์ กล่าวได้ว่า การเพิ่มจำนวนเซลล์แบบขนานตามจำนวนขบวนรถไฟฟ้ามหานครที่ได้รับพลังงานช่วยให้แพ็คสามารถเพิ่มทั้งพลังงานรวมและกำลังไฟฟ้ารวมได้อย่างเป็นสัดส่วน ขณะที่กระแสต่อสตริงยังอยู่ในระดับใกล้เคียงกันในทุกกรณี จึงเหมาะสมสำหรับใช้เป็นโครงสร้างอ้างอิงในการจำลองสมรรถนะของระบบ ESTS ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ แสดงดังตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 สรุปผลการคำนวณของแบตเตอรี่แพ็ค Toshiba SCiB™ 23 Ah

รายการ	โครงสร้าง ESTS เมื่อ ESTS:tr		
	1ESTS : 1tr	1ESTS : 2tr	1ESTS : 3tr
รูปแบบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า	1ESTS : 1tr	1ESTS : 2tr	1ESTS : 3tr
กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแพ็ค	900 kW	1,800 kW	2,700 kW
กำลังไฟฟ้าต่อเนื่องของแพ็ค	480 kW	960 kW	1,440 kW
แรงดันไฟฟ้าของแพ็ค	752.1 V	752.1 V	752.1 V
ความจุไฟฟ้าของแพ็ค	92 Ah	184 Ah	276 Ah

ตารางที่ ก.2 สรุปผลการคำนวณของแบตเตอรี่แพ็ค Toshiba SCiB™ 23 Ah (ต่อ)

รายการ	โครงสร้าง ESTS เมื่อ ESTS:tr		
พลังงานไฟฟ้าของแพ็ค	69.19 kWh	138.39 kWh	207.58 kWh
กระแสไฟฟ้าสูงสุดของแพ็ค	1,196.7 A	2,393.3 A	3,590.0 A
กระแสไฟฟ้าต่อเนื่องของแพ็ค	638.2 A	1,276.4 A	1,914.6 A
จำนวนเซลล์รวมทั้งหมด	1,308 cells	2,616 cells	3,924 cells
จำนวนเซลล์อนุกรม	327 cells	327 cells	327 cells
จำนวนเซลล์ขนาน	4 cells	8 cells	12 cells
โครงสร้างแพ็ค	327s4p	327s8p	327s12p
น้ำหนักเซลล์รวมโดยประมาณ	719.4 kg	1,438.8 kg	2,158.2 kg

ภาคผนวก ข

การคำนวณระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของ ESTS

ข้อจำกัดในทางปฏิบัติของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟที่ติดตั้ง ESTS กับ ขบวนรถไฟที่ไม่ได้ติดตั้งระบบ ประเด็นสำคัญอย่างหนึ่งคือระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกตามแนวระบบจ่ายไฟกระแสตรง 750 โวลต์ โดยอาศัยแบบจำลองความต้านทานเชิงเส้นของสายจ่ายและรางวิ่ง ซึ่งสามารถประมาณแรงดันไฟฟ้าที่ปลายทาง ณ ขบวนรถไฟที่รับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าได้ตามระยะทางการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า โดยในบทที่ 4 และ 5 ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดใช้ระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าไว้ที่ประมาณ 3.5 กิโลเมตร เพื่อใช้เป็นข้อจำกัดร่วมกันในทุกกรณีทดสอบ ซึ่งกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่ปลายทางของขบวนรถไฟที่รับพลังงานไฟฟ้าต้องไม่ต่ำกว่าค่าขั้นต่ำที่ยอมรับได้ภายใต้เงื่อนไขการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าสามารถแสดงรายละเอียดการคำนวณดังต่อไปนี้

$$V_{tr} = V_{ESTS} - I_{tr,max} R_{line}$$

เมื่อ

$$R_{line} = d(R_{cond/km} + \frac{R_{rail/km}}{2})$$

จะได้

$$V_{tr} = V_{ESTS} - I_{tr,max} \times d(R_{cond/km} + \frac{R_{rail/km}}{2})$$

เมื่อต้องการหาระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของ ESTS ($d_{sh,max}$) ให้กำหนด V_{tr} เท่ากับแรงดันไฟฟ้าขั้นต่ำที่ใช้เป็นเกณฑ์ ($V_{sh,min}$) และ V_{ests} เท่ากับ แรงดันไฟฟ้าระดับปกติของระบบ ($V_{sh,nor}$) จัดรูปสมการใหม่

$$d_{sh,max} = \frac{V_{sh,tr} - V_{sh,min}}{I_{tr,max} (R_{cond/km} + \frac{R_{rail/km}}{2})}$$

โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณจะสามารถกำหนดโดยอ้างอิงระบบที่ใช้เป็นกรณีศึกษาได้ดังนี้

$$V_{sh,nor} = 750 \text{ โวลต์}$$

$$V_{sh,min} = 500 \text{ โวลต์}$$

$$\begin{aligned}
 I_{tr,max} &= 1,200 \text{ แอมป์} \\
 R_{cond/km} &= 0.05 \text{ โอห์มต่อกิโลเมตร} \\
 R_{rail/km} &= 0.02 \text{ โอห์มต่อกิโลเมตร}
 \end{aligned}$$

แทนค่าลงในสมการหาค่า d_{max} จะได้

$$\begin{aligned}
 d_{max} &= \frac{750-500}{1,200(0.05 + \frac{0.02}{2})} \\
 &= \frac{250}{72} \\
 &= 3.4722 \\
 d_{max} &\approx 3.5 \text{ กิโลเมตร}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าสูงสุดที่คำนวณได้จากแบบจำลองอย่างง่ายนี้มีค่าประมาณ 3.5 กิโลเมตร

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบกลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบ Case 01 ที่ค่า H เท่ากับ 3.45 นาที และ %ESTS เท่ากับ 25%

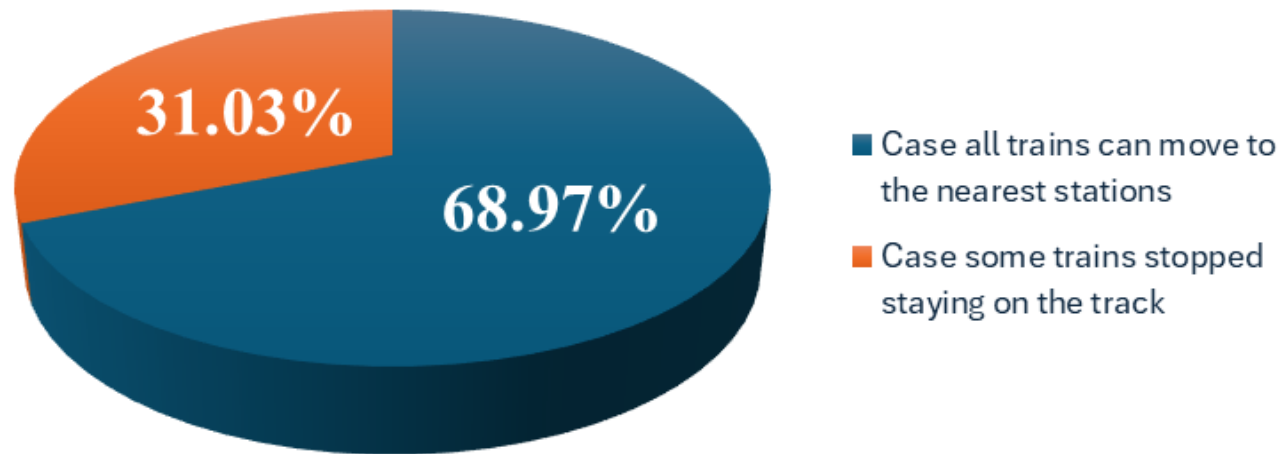
Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
1	YES	44.32	13.02	26.68	21.79	93.32	77.27	1.34	1,800.40	639.83	-
2	YES	35.46	7.39	20.10	16.53	96.21	81.82	1.23	1,652.80	665.65	-
3	YES	31.25	20.43	24.67	20.12	89.52	83.97	1.85	2,506.40	643.78	-
4	YES	42.36	16.38	27.14	21.87	91.60	78.28	1.56	2,102.40	628.83	-
5	YES	34.60	21.20	27.57	22.49	89.13	82.26	1.80	2,439.10	618.49	-
6	YES	40.81	18.72	26.08	21.26	90.40	79.07	1.88	2,539.10	616.75	-
7	YES	39.31	15.24	25.33	20.92	92.18	79.84	1.33	1,786.60	654.40	-
8	YES	34.64	23.42	28.52	23.34	87.99	82.24	1.02	1,369.20	640.65	-
9	YES	35.55	7.46	21.23	17.49	96.17	81.77	1.42	1,920.10	622.06	-
10	NO	38.57	10.16	25.40	20.98	94.79	80.22	1.84	2,487.50	607.75	Train not at station: 2 3
11	YES	27.61	6.25	17.70	14.64	96.79	85.84	1.54	2,077.80	687.64	-
12	NO	32.64	13.68	23.78	19.55	92.98	83.26	1.26	1,694.60	609.81	Train not at station: 4
13	YES	36.30	1.82	18.33	15.38	99.07	81.38	1.50	2,020.50	628.27	-
14	YES	36.62	25.92	29.59	24.23	86.71	81.22	1.40	1,890.90	660.49	-
15	YES	33.24	11.53	19.58	16.34	94.09	82.96	1.37	1,843.70	673.46	-

ตารางที่ ค.1 ผลการทดสอบ Case 01 ที่ค่า H เท่ากับ 3.45 นาที และ %ESTS เท่ากับ 25% (ต่อ)

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
16	NO	33.46	19.26	25.11	20.58	90.12	82.84	1.78	2,399.10	607.94	Train not at station: 6
17	YES	27.76	18.60	23.61	19.22	90.46	85.77	1.29	1,739.00	620.79	-
18	YES	37.37	20.41	26.45	21.51	89.53	80.84	1.61	2,173.50	618.38	-
19	YES	31.57	14.57	23.26	18.88	92.53	83.81	1.44	1,947.20	634.42	-
20	YES	44.01	16.31	28.41	23.29	91.63	77.43	1.86	2,517.30	633.40	-
21	YES	54.17	17.25	29.66	24.32	91.16	72.22	2.12	2,869.80	624.68	-
22	YES	34.55	10.02	19.94	16.51	94.86	82.28	1.94	2,627.50	659.92	-
23	NO	44.34	15.32	26.13	21.45	92.15	77.26	1.61	2,169.40	651.43	Train not at station: 7
24	YES	28.15	11.96	21.04	16.89	93.86	85.56	0.94	1,259.70	621.55	-
25	NO	49.24	15.05	26.61	21.78	92.28	74.75	1.62	2,182.00	642.04	Train not at station: 3 6 13
26	NO	26.38	4.58	15.68	12.87	97.65	86.47	2.11	2,861.50	646.15	Train not at station: 3 11 13
27	NO	28.81	11.15	17.96	14.68	94.28	85.22	1.35	1,814.90	644.01	Train not at station: 2 4 6 9 11
28	NO	14.05	4.58	8.51	7.08	97.65	92.79	1.18	1,589.80	666.48	Train not at station: 2 3 10 13
29	NO	11.65	0.00	3.10	2.62	100.00	94.03	0.88	1,175.50	0.00	Train not at station: 3 4 7 10 11 13 14

หมายเหตุ YES หมายถึง กรณีที่รถไฟฟ้าทุกขบวนอพยพสำเร็จ และ NO หมายถึง กรณีที่มีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

Train movement using ESTS backup Case 01: H 3.45 - ESTS 25%



รูปที่ ค.1 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบ Case 02 ที่ค่า H เท่ากับ 3.45 นาที่ และ %ESTS เท่ากับ 50%

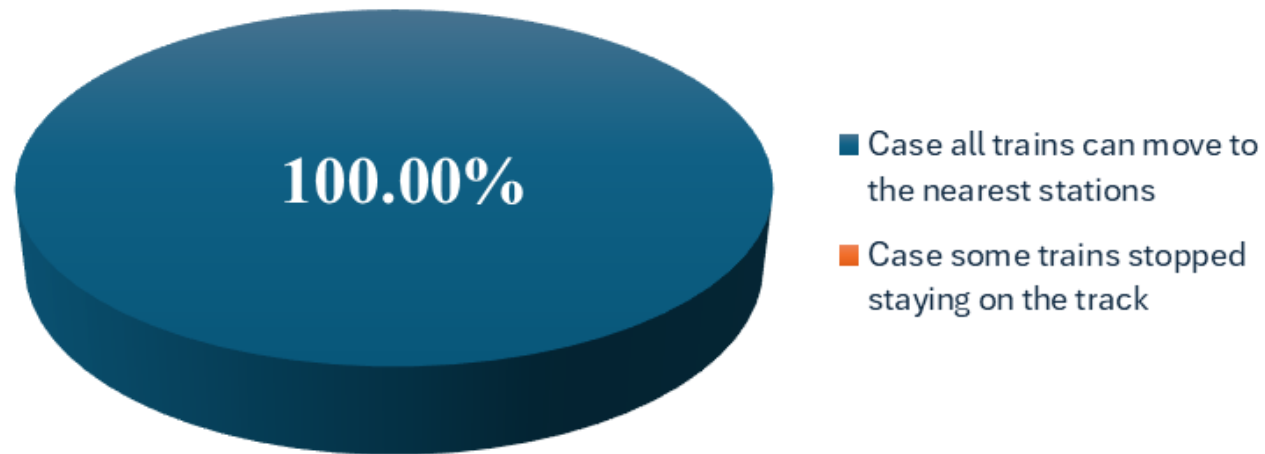
Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
1	YES	27.98	4.21	15.51	12.86	93.90	59.44	0.87	1,200.00	691.69	-
2	YES	24.23	2.30	11.64	9.70	96.67	64.89	0.87	1,200.00	704.27	-
3	YES	27.24	0.46	14.43	12.05	99.33	60.52	0.86	1,171.89	708.84	-
4	YES	25.95	5.94	16.00	13.30	91.39	62.39	0.84	1,139.73	685.95	-
5	YES	27.64	6.08	16.04	13.36	91.19	59.94	0.85	1,155.46	675.73	-
6	YES	24.66	2.69	15.21	12.65	96.10	64.26	0.88	1,200.00	682.88	-
7	YES	34.02	1.92	14.59	12.14	97.21	50.70	0.84	1,136.14	690.32	-
8	YES	26.71	4.10	16.53	13.72	94.06	61.29	0.86	1,200.00	677.69	-
9	YES	31.91	4.93	12.28	10.24	92.85	53.76	0.88	1,200.00	703.73	-
10	YES	25.29	3.74	16.82	14.03	94.59	63.34	0.85	1,156.62	699.18	-
11	YES	17.05	5.10	10.12	8.37	92.61	75.29	0.86	1,171.89	687.20	-
12	YES	23.62	7.67	15.08	12.60	88.89	65.77	0.85	1,151.72	700.98	-
13	YES	33.49	0.47	10.42	8.73	99.33	51.47	0.87	1,200.00	719.17	-
14	YES	28.18	8.89	17.02	14.06	87.12	59.17	0.87	1,200.00	682.35	-
15	YES	19.83	1.22	11.22	9.39	98.23	71.26	0.84	1,136.14	663.52	-

ตารางที่ ค.2 ผลการทดสอบ Case 02 ที่ค่า H เท่ากับ 3.45 นาที และ %ESTS เท่ากับ 50% (ต่อ)

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
16	YES	21.99	2.03	15.91	13.24	97.05	68.13	0.88	1,200.00	699.57	-
17	YES	35.13	2.90	13.83	11.57	95.79	49.09	0.87	1,200.00	710.91	-
18	YES	26.05	0.84	15.49	12.93	98.79	62.24	0.87	1,200.00	689.67	-
19	YES	22.11	1.38	13.64	11.36	98.00	67.96	0.84	1,136.14	686.25	-
20	YES	31.01	5.65	16.49	13.77	91.82	55.06	0.86	1,162.69	698.14	-
21	YES	25.93	0.79	17.22	14.34	98.86	62.42	0.88	1,200.00	673.31	-
22	YES	22.82	3.47	11.47	9.57	94.98	66.93	0.86	1,200.00	688.38	-
23	YES	25.97	2.85	15.35	12.69	95.88	62.37	0.84	1,136.14	680.18	-
24	YES	25.39	0.42	12.51	10.43	99.40	63.20	0.88	1,195.76	707.82	-
25	YES	25.47	8.15	15.95	13.29	88.19	63.09	0.85	1,151.72	678.26	-
26	YES	18.83	1.61	10.04	8.32	97.67	72.70	0.86	1,171.89	689.29	-
27	YES	25.60	6.12	15.63	13.01	91.13	62.89	0.84	1,136.14	692.81	-
28	YES	21.82	1.63	11.56	9.63	97.64	68.38	0.88	1,200.00	693.46	-
29	YES	26.25	2.14	14.60	12.08	96.90	61.95	0.84	1,136.14	684.09	-

หมายเหตุ YES หมายถึง กรณีที่รถไฟฟ้าทุกขบวนอพยพสำเร็จ และ NO หมายถึง กรณีที่มีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

Train movement using ESTS backup Case 02: H 3.45 - ESTS 50%



รูปที่ ค.2 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบ Case 03 ที่ค่า H เท่ากับ 3.45 นาที และ %ESTS เท่ากับ 75%

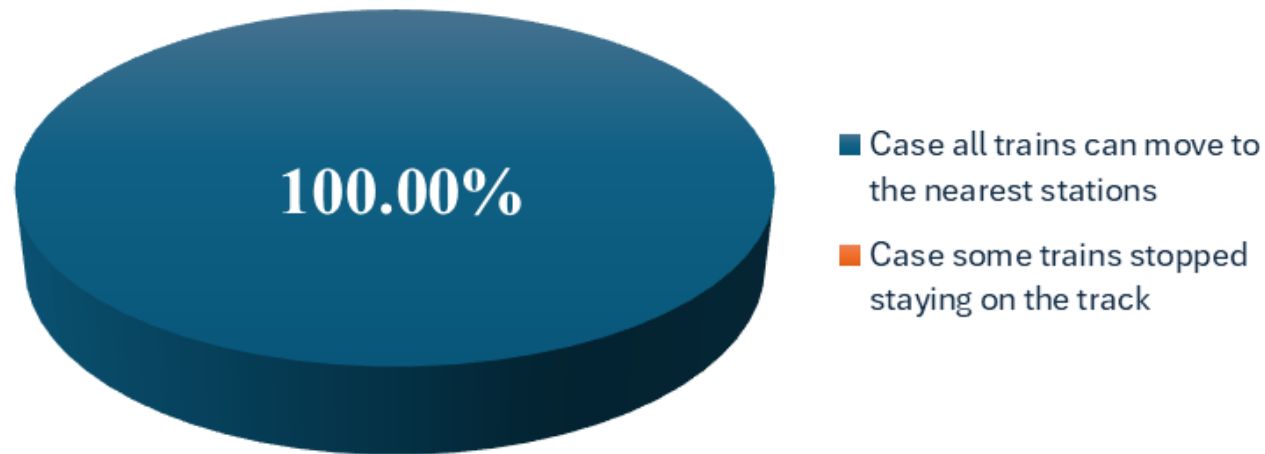
Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
1	YES	31.20	0.00	10.94	9.16	100.00	54.79	0.87	1,200.00	713.47	-
2	YES	20.50	0.24	8.17	6.84	99.65	70.29	0.84	1,136.14	713.55	-
3	YES	27.24	0.00	10.13	8.49	100.00	60.52	0.86	1,171.89	716.82	-
4	YES	20.01	0.00	11.29	9.47	100.00	71.00	0.86	1,200.00	725.61	-
5	YES	29.00	2.75	11.29	9.44	96.01	57.97	0.84	1,144.84	716.67	-
6	YES	23.08	1.46	10.71	8.97	97.88	66.56	0.88	1,200.00	707.12	-
7	YES	25.40	0.51	10.28	8.60	99.26	63.19	0.87	1,200.00	721.12	-
8	YES	31.15	0.00	11.67	9.77	100.00	54.85	0.86	1,200.00	703.68	-
9	YES	33.65	0.00	8.64	7.24	100.00	51.23	0.88	1,200.00	721.00	-
10	YES	18.41	3.36	11.80	9.86	95.14	73.31	0.84	1,136.14	699.69	-
11	YES	19.32	0.00	7.14	5.96	100.00	72.00	0.86	1,200.00	690.73	-
12	YES	20.44	0.28	10.58	8.85	99.59	70.38	0.85	1,151.72	700.79	-
13	YES	31.91	0.00	7.30	6.12	100.00	53.75	0.87	1,200.00	725.86	-
14	YES	31.00	0.00	12.08	10.11	100.00	55.08	0.87	1,200.00	708.21	-
15	YES	27.32	0.09	7.88	6.60	99.87	60.41	0.86	1,171.89	727.12	-

ตารางที่ ค.3 ผลการทดสอบ Case 03 ที่ค่า H เท่ากับ 3.45 นาที่ และ %ESTS เท่ากับ 75% (ต่อ)

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
16	YES	25.79	2.78	11.19	9.35	95.97	62.62	0.88	1,200.00	708.56	-
17	YES	23.04	0.24	9.70	8.13	99.65	66.61	0.87	1,200.00	705.21	-
18	YES	24.80	0.00	10.87	9.11	100.00	64.05	0.87	1,200.00	721.41	-
19	YES	24.95	0.00	9.60	8.04	100.00	63.84	0.86	1,200.00	721.17	-
20	YES	27.38	0.61	11.58	9.70	99.12	60.32	0.88	1,197.95	711.24	-
21	YES	37.03	0.00	12.14	10.17	100.00	46.34	0.88	1,200.00	707.72	-
22	YES	19.37	0.43	8.07	6.76	99.38	71.93	0.86	1,200.00	721.49	-
23	YES	31.33	0.75	10.87	9.10	98.91	54.59	0.86	1,171.89	675.14	-
24	YES	19.36	0.00	8.78	7.34	100.00	71.94	0.88	1,200.00	721.52	-
25	YES	25.38	2.32	11.17	9.32	96.64	63.21	0.87	1,200.00	672.89	-
26	YES	17.15	0.11	7.10	5.95	99.84	75.15	0.86	1,171.89	709.94	-
27	YES	32.26	0.00	11.00	9.21	100.00	53.25	0.87	1,200.00	705.57	-
28	YES	20.79	0.27	8.14	6.82	99.61	69.87	0.87	1,200.00	717.76	-
29	YES	27.99	0.00	10.34	8.67	100.00	59.43	0.86	1,171.89	716.45	-

หมายเหตุ YES หมายถึง กรณีที่รถไฟฟ้าทุกขบวนอพยพสำเร็จ และ NO หมายถึง กรณีที่มีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

Train movement using ESTS backup Case 03: H 3.45 - ESTS 75%



รูปที่ ค.3 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบ Case 04 ที่ค่า H เท่ากับ 6 นาที่ และ %ESTS เท่ากับ 25%

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
1	YES	44.23	13.02	26.69	21.81	93.33	77.32	1.32	1,782.25	662.15	-
2	YES	31.36	7.39	20.15	16.62	96.21	83.92	1.11	1,496.16	681.79	-
3	YES	27.02	20.57	24.72	20.19	89.45	86.14	1.67	2,253.72	663.07	-
4	YES	43.12	16.60	27.27	22.08	91.49	77.89	1.57	2,120.50	627.94	-
5	YES	34.60	21.20	27.57	22.49	89.13	82.26	1.80	2,439.09	618.49	-
6	YES	40.81	18.72	26.08	21.26	90.40	79.07	1.88	2,539.06	616.75	-
7	YES	47.59	15.24	25.42	21.07	92.18	75.60	1.47	1,988.51	665.94	-
8	YES	34.70	23.22	28.56	23.42	88.09	82.20	1.00	1,338.86	674.11	-
9	YES	35.53	8.01	21.24	17.50	95.89	81.78	1.49	2,003.33	622.06	-
10	NO	38.57	10.16	25.40	20.98	94.79	80.22	1.84	2,487.47	607.75	Train not at station: 2 3
11	YES	27.61	6.25	17.70	14.64	96.79	85.84	1.54	2,077.84	687.64	-
12	NO	32.64	13.68	23.78	19.55	92.98	83.26	1.26	1,694.62	609.81	Train not at station: 4
13	YES	36.30	1.82	18.33	15.38	99.07	81.38	1.50	2,020.54	628.27	-
14	YES	36.62	25.92	29.59	24.23	86.71	81.22	1.40	1,890.90	660.49	-
15	YES	33.24	11.53	19.58	16.34	94.09	82.96	1.37	1,843.73	673.46	-

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบ Case 04 ที่ค่า H เท่ากับ 6 นาที และ %ESTS เท่ากับ 25% (ต่อ)

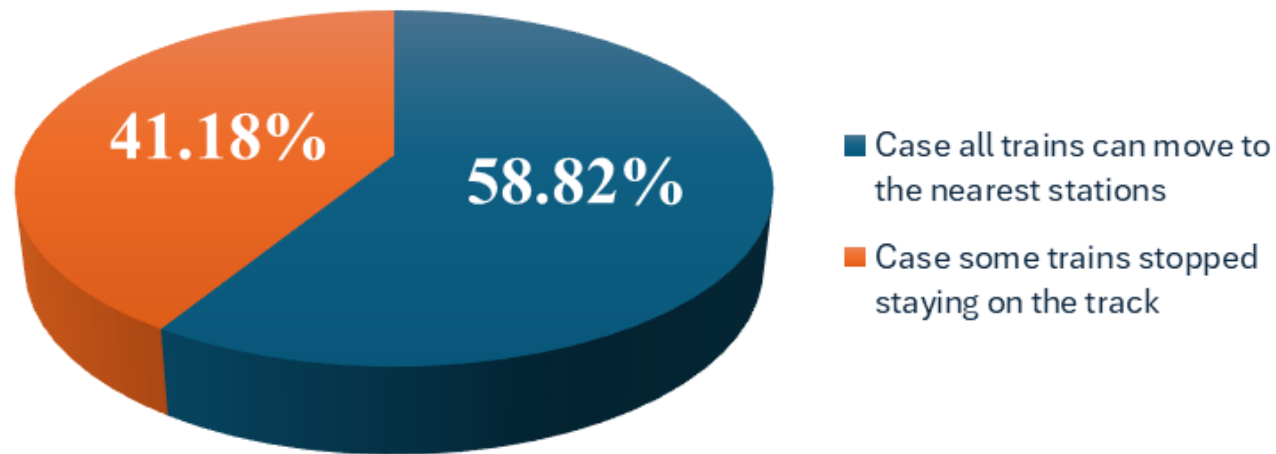
Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
16	NO	33.46	19.26	25.11	20.58	90.12	82.84	1.78	2,399.06	607.94	
17	YES	27.76	18.60	23.61	19.22	90.46	85.77	1.29	1,739.00	620.79	
18	YES	44.85	14.00	26.53	21.64	92.82	77.00	1.75	2,366.75	617.87	-
19	YES	33.33	14.36	23.31	18.97	92.64	82.91	1.36	1,826.66	661.16	-
20	YES	42.05	16.91	28.43	23.32	91.33	78.44	1.88	2,537.09	656.57	-
21	YES	54.11	18.99	29.67	24.34	90.26	72.25	2.11	2,864.57	624.34	-
22	YES	34.55	10.02	19.94	16.51	94.86	82.28	1.94	2,627.53	659.92	-
23	NO	44.34	15.32	26.13	21.45	92.15	77.26	1.61	2,169.40	651.43	Train not at station: 7
24	YES	28.15	11.96	21.04	16.89	93.86	85.56	0.94	1,259.68	621.55	-
25	NO	49.81	14.49	26.61	21.78	92.57	74.46	1.66	2,247.21	642.04	Train not at station: 3 6 13
26	NO	30.85	4.58	15.75	12.97	97.65	84.18	2.21	2,997.57	647.93	Train not at station: 3 11 13
27	NO	28.76	12.10	17.97	14.69	93.79	85.25	1.34	1,800.59	659.29	Train not at station: 2 4 6 9 11
28	NO	13.55	5.11	8.52	7.09	97.38	93.05	1.09	1,466.83	667.62	Train not at station: 2 3 10 13
29	NO	11.65	0.00	3.10	2.62	100.00	94.03	0.88	1,175.52	0.00	Train not at station: 3 4 7 10 11 13 14
30	NO	19.25	0.00	4.81	4.06	100.00	90.13	0.77	1,035.30	0.00	Train not at station: 2 3 4 6 9 11 14

ตารางที่ ค.4 ผลการทดสอบ Case 04 ที่ค่า H เท่ากับ 6 นาที และ %ESTS เท่ากับ 25% (ต่อ)

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
31	NO	10.87	0.00	4.35	3.67	100.00	94.43	0.88	1,175.52	0.00	Train not at station: 2 3 4 7 10 13 14
32	NO	5.33	0.00	2.08	1.75	100.00	97.27	0.94	1,265.16	0.00	Train not at station: 2 3 4 7 9 10 11 13 14
33	NO	13.07	0.00	3.27	2.75	100.00	93.30	0.88	1,175.52	0.00	Train not at station: 3 5 6 11 13 14
34	NO	4.77	0.00	2.35	1.98	100.00	97.56	0.88	1,175.52	0.00	Train not at station: 3 4 7 10 12 13

หมายเหตุ YES หมายถึง กรณีที่รถไฟฟ้าทุกขบวนอพยพสำเร็จ และ NO หมายถึง กรณีที่มีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

Train movement using ESTS backup Case 04: H 6.00 - ESTS 25%



รูปที่ ค.4 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบ Case 05 ที่ค่า H เท่ากับ 6 นาที และ %ESTS เท่ากับ 50%

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
1	YES	7.45	0.09	5.18	4.21	99.87	89.20	0.50	672.56	691.32	-
2	YES	30.31	10.76	19.04	15.28	84.40	56.07	0.87	1,200.00	611.97	-
3	NO	28.45	7.00	22.82	18.96	89.85	58.77	0.84	1,139.73	624.37	Train not at station: 7
4	YES	8.37	0.00	2.53	2.09	100.00	87.87	0.84	1,136.14	672.51	-
5	YES	33.93	14.25	24.65	20.01	79.35	50.82	0.84	1,144.84	652.46	-
6	YES	25.68	11.05	16.13	13.37	83.99	62.78	0.87	1,200.00	666.22	-
7	NO	15.17	0.00	6.53	5.42	100.00	78.02	0.84	1,136.14	665.72	Train not at station: 1
8	YES	33.95	8.49	19.67	16.33	87.69	50.80	0.86	1,200.00	691.50	-
9	YES	30.51	1.50	13.23	10.98	97.83	55.79	0.88	1,200.00	628.72	-
10	YES	1.92	0.00	0.82	0.69	100.00	97.21	0.84	1,136.14	0.00	-
11	NO	57.27	15.28	32.06	26.64	77.85	16.99	0.86	1,200.00	613.18	Train not at station: 3
12	YES	21.47	0.00	9.35	7.67	100.00	68.89	0.85	1,151.72	616.68	-
13	YES	11.25	3.25	7.25	5.85	95.29	83.69	0.84	1,136.14	622.46	-
14	NO	29.25	0.00	18.12	14.80	100.00	57.61	0.87	1,200.00	665.08	Train not at station: 1 3
15	YES	25.75	1.41	10.19	8.36	97.95	62.67	0.84	1,139.73	603.88	-

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบ Case 05 ที่ค่า H เท่ากับ 6 นาที และ %ESTS เท่ากับ 50% (ต่อ)

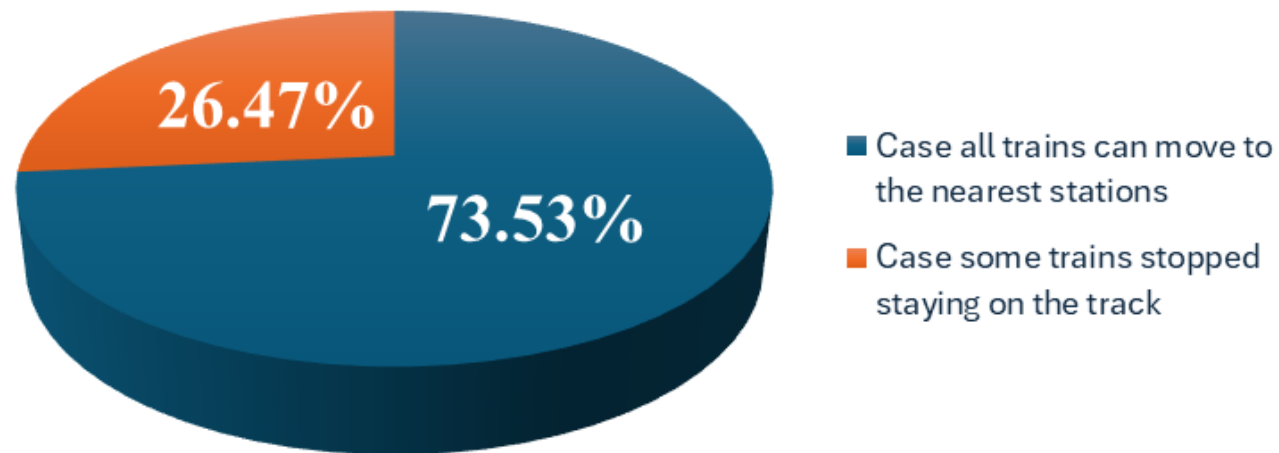
Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
16	YES	8.61	0.00	2.68	2.18	100.00	87.52	0.72	969.18	677.84	-
17	YES	57.24	15.53	36.00	29.97	77.50	17.04	0.84	1,136.14	692.65	-
18	YES	7.43	0.00	4.28	3.58	100.00	89.23	0.86	1,171.89	698.98	-
19	YES	19.17	2.87	11.20	9.09	95.84	72.22	0.88	1,200.00	613.90	-
20	YES	42.06	12.43	25.11	20.77	81.98	39.05	0.87	1,200.00	610.34	-
21	YES	12.59	0.00	6.11	5.11	100.00	81.76	0.88	1,200.00	628.72	-
22	YES	21.10	0.00	8.88	7.20	100.00	69.42	0.86	1,200.00	660.52	-
23	YES	57.27	7.19	34.09	28.33	89.58	16.99	0.84	1,136.14	651.37	-
24	YES	4.47	0.00	1.88	1.55	100.00	93.52	0.84	1,136.14	697.45	-
25	NO	19.78	7.90	13.48	11.02	88.56	71.33	0.86	1,200.00	611.28	Train not at station: 5
26	NO	27.66	0.00	13.44	10.95	100.00	59.91	0.85	1,151.72	626.03	Train not at station: 3
27	YES	7.44	0.28	5.29	4.30	99.59	89.21	0.52	695.86	689.57	-
28	YES	30.04	11.03	18.76	15.07	84.02	56.46	0.87	1,200.00	612.29	-
29	NO	29.51	7.80	23.19	19.26	88.70	57.23	0.84	1,139.73	624.62	Train not at station: 3
30	YES	8.08	0.00	2.48	2.05	100.00	88.29	0.84	1,136.14	675.17	-

ตารางที่ ค.5 ผลการทดสอบ Case 05 ที่ค่า H เท่ากับ 6 นาที และ %ESTS เท่ากับ 50% (ต่อ)

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
31	YES	32.60	12.90	24.17	19.61	81.31	52.75	0.88	1,200.00	651.70	-
32	YES	26.16	11.88	16.76	13.89	82.78	62.09	0.87	1,200.00	670.73	-
33	NO	14.66	0.00	6.41	5.33	100.00	78.75	0.84	1,136.14	665.47	Train not at station: 5
34	YES	34.02	8.56	19.34	16.06	87.60	50.70	0.86	1,200.00	686.26	-

หมายเหตุ YES หมายถึง กรณีที่รถไฟฟ้าทุกขบวนอพยพสำเร็จ และ NO หมายถึง กรณีที่มีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

Train movement using ESTS backup Case 05: H 6.00 - ESTS 50%



รูปที่ ค.5 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$

ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบ Case 06 ที่ค่า H เท่ากับ 6 นาที และ %ESTS เท่ากับ 75%

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
1	YES	20.71	0.00	3.59	3.02	100.00	89.38	0.88	1,175.52	736.38	-
2	YES	19.79	2.66	13.01	10.73	98.64	89.85	0.95	1,275.45	666.07	-
3	YES	28.57	2.32	16.13	13.55	98.81	85.35	0.88	1,179.42	628.39	-
4	YES	7.66	0.00	1.71	1.43	100.00	96.07	0.88	1,175.52	700.28	-
5	YES	34.05	6.60	16.64	13.67	96.61	82.54	0.95	1,281.17	657.32	-
6	YES	22.88	2.79	10.94	9.22	98.57	88.27	0.94	1,267.12	0.00	-
7	NO	15.25	0.00	4.38	3.65	100.00	92.18	0.88	1,175.52	668.39	Train not at station: 1
8	YES	25.59	0.00	13.31	11.22	100.00	86.88	0.95	1,275.45	0.00	-
9	YES	20.09	1.52	8.94	7.53	99.22	89.70	0.94	1,267.12	632.87	-
10	YES	1.94	0.00	0.55	0.46	100.00	99.01	0.88	1,175.52	0.00	-
11	YES	57.52	6.60	22.71	19.07	96.61	70.50	0.95	1,281.17	701.82	-
12	YES	16.54	0.00	6.34	5.32	100.00	91.52	0.91	1,216.73	708.85	-
13	YES	11.32	0.00	4.99	4.17	100.00	94.20	0.88	1,175.52	699.27	-
14	YES	38.39	0.42	17.52	14.70	99.78	80.31	0.94	1,265.16	719.19	-
15	YES	19.41	0.28	6.92	5.80	99.85	90.05	0.94	1,267.12	720.32	-

ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบ Case 06 ที่ค่า H เท่ากับ 6 นาที และ %ESTS เท่ากับ 75% (ต่อ)

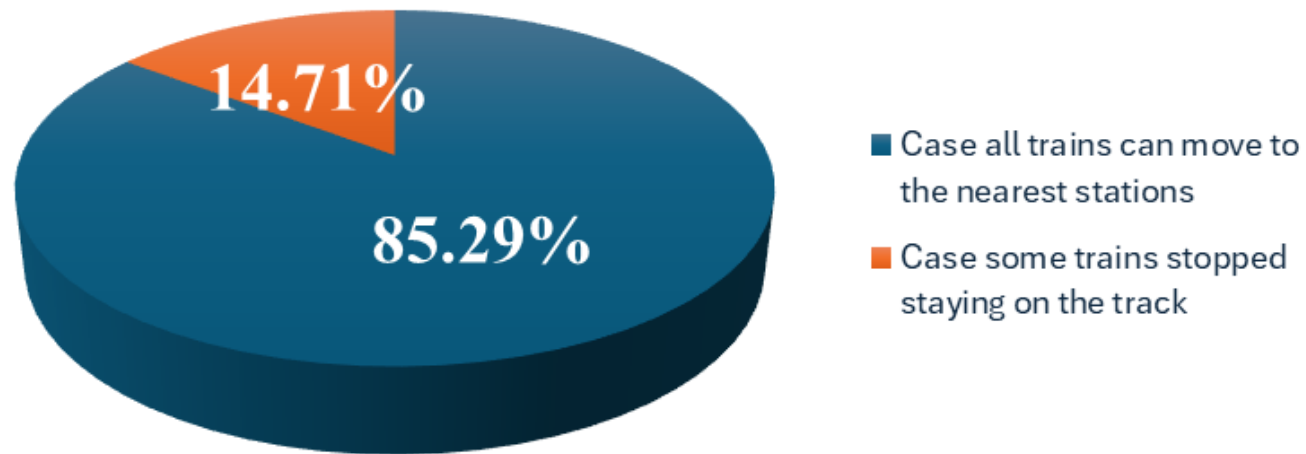
Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
16	YES	6.65	0.00	1.83	1.51	100.00	96.59	0.88	1,175.52	698.43	-
17	YES	29.84	15.60	24.22	20.37	92.00	84.70	0.88	1,175.52	725.14	-
18	YES	7.49	0.00	2.87	2.41	100.00	96.16	0.91	1,216.73	703.99	-
19	YES	18.17	2.84	7.65	6.37	98.55	90.68	0.93	1,254.48	666.41	-
20	YES	42.89	0.00	16.84	14.00	100.00	78.00	0.94	1,267.12	614.25	-
21	YES	12.58	0.00	4.11	3.46	100.00	93.55	0.94	1,267.12	0.00	-
22	YES	21.02	0.00	5.95	4.86	100.00	89.22	0.95	1,275.45	672.84	-
23	YES	35.07	6.99	22.93	19.23	96.41	82.02	0.88	1,175.52	671.66	-
24	YES	6.65	0.00	1.29	1.09	100.00	96.59	0.88	1,175.52	0.00	-
25	NO	18.13	4.81	9.15	7.61	97.53	90.70	0.95	1,281.17	616.72	Train not at station: 5
26	YES	23.14	0.00	11.29	9.44	100.00	88.13	0.94	1,267.12	620.82	-
27	YES	20.66	0.00	3.66	3.08	100.00	89.41	0.88	1,175.52	736.03	-
28	YES	20.24	2.72	12.79	10.55	98.60	89.62	0.95	1,275.45	666.10	-
29	NO	29.67	2.79	15.95	13.40	98.57	84.78	0.88	1,179.42	628.64	Train not at station: 1
30	YES	7.44	0.00	1.68	1.40	100.00	96.19	0.88	1,175.52	700.20	-

ตารางที่ ค.6 ผลการทดสอบ Case 06 ที่ค่า H เท่ากับ 6 นาที และ %ESTS เท่ากับ 75% (ต่อ)

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
31	NO	16.07	5.84	10.52	8.79	97.00	91.76	0.95	1,281.17	656.53	Train not at station: 1 5
32	YES	23.14	3.35	11.38	9.59	98.28	88.13	0.94	1,267.12	0.00	-
33	NO	12.58	0.00	3.58	3.02	100.00	93.55	0.88	1,175.52	0.00	Train not at station: 1 5
34	YES	25.87	0.28	13.09	11.03	99.86	86.73	0.95	1,275.45	0.00	-

หมายเหตุ YES หมายถึง กรณีที่รถไฟฟ้าทุกขบวนอพยพสำเร็จ และ NO หมายถึง กรณีที่มีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

Train movement using ESTS backup Case 06: H 6.00 - ESTS 75%



รูปที่ ค.6 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$

ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบ Case 07 ที่ค่า H เท่ากับ 8 นาที และ %ESTS เท่ากับ 25%

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
1	YES	33.46	14.69	24.07	19.82	88.70	74.27	0.87	1,165.34	666.67	-
2	YES	8.04	2.78	5.41	4.52	97.86	93.82	0.89	1,205.10	687.51	-
3	NO	35.73	20.47	28.10	22.06	84.25	72.51	1.35	1,822.42	615.66	Train not at station: 6
4	YES	52.46	18.32	35.39	29.00	85.91	59.65	1.54	2,090.57	602.26	-
5	YES	14.27	7.21	10.74	8.76	94.45	89.02	0.93	1,254.72	633.10	-
6	NO	28.92	10.71	19.82	15.44	91.76	77.75	1.00	1,342.97	600.44	Train not at station: 2 5
7	NO	32.40	29.79	31.10	25.74	77.08	75.08	0.87	1,165.34	638.39	Train not at station: 2 5
8	NO	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	Train not at station: 6
9	NO	6.20	5.04	5.62	4.73	96.12	95.23	0.87	1,165.34	0.00	Train not at station: 2 3 5 6
10	NO	5.95	0.00	2.97	2.16	100.00	95.42	0.54	727.78	601.50	Train not at station: 2 3
11	NO	7.97	0.28	4.13	3.08	99.78	93.87	0.52	701.85	618.65	Train not at station: 3 6
12	NO	23.77	16.65	20.21	15.56	87.19	81.72	0.60	806.69	619.43	Train not at station: 3 6
13	YES	29.28	26.67	27.98	23.27	79.49	77.47	0.87	1,165.34	627.37	-
14	NO	14.62	0.00	7.31	5.86	100.00	88.75	1.34	1,818.24	600.55	Train not at station: 3 6
15	NO	38.28	33.38	35.83	28.59	74.32	70.56	1.20	1,624.70	620.65	Train not at station: 3

ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบ Case 07 ที่ค่า H เท่ากับ 8 นาที และ %ESTS เท่ากับ 25% (ต่อ)

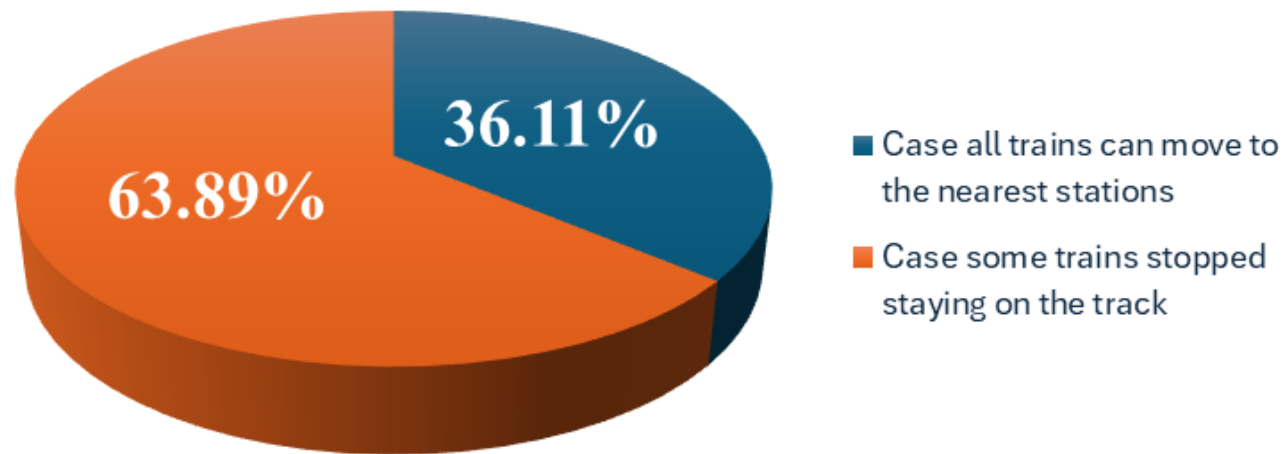
Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
16	YES	23.11	12.50	17.81	14.99	90.38	82.22	0.93	1,254.72	0.00	-
17	NO	30.95	10.07	20.51	16.77	92.25	76.19	1.25	1,684.78	613.48	Train not at station: 2
18	YES	11.74	7.00	9.37	7.87	94.62	90.97	0.94	1,262.92	734.69	-
19	YES	29.03	5.23	17.13	14.39	95.98	77.67	0.89	1,198.40	638.89	-
20	YES	25.55	16.64	21.10	16.60	87.20	80.34	0.87	1,165.34	630.88	-
21	NO	29.78	5.83	17.81	14.18	95.51	77.09	1.09	1,468.09	610.88	Train not at station: 2 3 5
22	NO	16.24	6.65	11.44	9.63	94.89	87.51	0.88	1,184.02	0.00	Train not at station: 5 6
23	NO	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	Train not at station: 2 3 5 6
24	NO	27.90	13.38	20.64	16.73	89.71	78.54	0.93	1,252.79	625.82	Train not at station: 2 5
25	NO	23.33	6.03	14.68	12.19	95.36	82.05	0.87	1,169.16	691.78	Train not at station: 3 6
26	YES	8.65	0.27	4.46	3.62	99.79	93.35	0.74	989.15	682.52	-
27	YES	33.99	14.79	24.39	20.07	88.62	73.85	0.87	1,165.34	667.45	-
28	YES	7.33	3.35	5.34	4.46	97.43	94.36	0.89	1,205.10	687.14	-
29	NO	37.08	20.09	28.59	22.45	84.55	71.47	1.54	2,087.91	617.18	Train not at station: 3
30	NO	52.02	17.66	34.84	28.52	86.41	59.99	1.52	2,068.33	609.96	Train not at station: 5

ตารางที่ ค.7 ผลการทดสอบ Case 07 ที่ค่า H เท่ากับ 8 นาที่ และ %ESTS เท่ากับ 25% (ต่อ)

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
31	YES	14.24	7.01	10.63	8.65	94.61	89.04	0.93	1,254.72	629.06	-
32	NO	30.06	12.05	21.05	16.42	90.73	76.88	1.00	1,343.06	600.73	Train not at station: 2 5
33	NO	29.04	20.34	24.69	20.79	84.36	77.66	0.87	1,165.34	0.00	Train not at station: 2 5 6
34	NO	0.25	0.00	0.12	0.09	100.00	99.81	0.46	610.39	650.24	Train not at station: 3
35	NO	5.83	4.57	5.20	4.37	96.48	95.52	0.87	1,165.34	0.00	Train not at station: 2 3 5 6
36	NO	4.95	0.00	2.47	1.79	100.00	96.19	0.54	728.58	601.70	Train not at station: 2 5 6

หมายเหตุ YES หมายถึง กรณีที่รถไฟฟ้าทุกขบวนอพยพสำเร็จ และ NO หมายถึง กรณีที่มีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

Train movement using ESTS backup Case 07: H 8.00 - ESTS 25%



รูปที่ ค.7 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$

ตารางที่ ค.8 ผลการทดสอบ Case 08 ที่ค่า H เท่ากับ 8 นาที และ %ESTS เท่ากับ 50%

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
1	NO	19.90	0.09	11.40	9.56	99.87	71.17	0.84	1,136.14	0.00	Train not at station: 1 5
2	NO	6.70	0.00	2.69	2.25	100.00	90.28	0.86	1,171.89	0.00	Train not at station: 1
3	YES	27.24	14.17	22.42	18.40	79.46	60.52	0.86	1,200.00	624.65	-
4	YES	32.81	17.44	23.77	19.60	74.73	52.45	0.84	1,136.14	659.12	-
5	YES	14.21	0.00	7.18	5.89	100.00	79.41	0.88	1,200.00	630.12	-
6	YES	24.41	11.16	19.84	16.05	83.82	64.63	0.87	1,200.00	621.72	-
7	NO	27.39	18.73	22.50	17.91	72.86	60.31	0.84	1,139.73	617.54	Train not at station: 1
8	YES	9.79	0.00	3.26	2.74	100.00	85.82	0.86	1,200.00	0.00	-
9	NO	10.34	4.55	6.64	5.57	93.40	85.02	0.84	1,136.14	0.00	Train not at station: 1 3 5
10	YES	5.92	1.16	3.28	2.48	98.32	91.42	0.84	1,136.14	599.03	-
11	YES	19.00	0.00	8.06	6.44	100.00	72.47	0.84	1,139.73	622.84	-
12	YES	27.61	17.78	21.21	17.28	74.23	59.99	0.85	1,151.72	647.09	-
13	YES	27.32	1.20	17.98	14.45	98.26	60.40	0.87	1,200.00	650.74	-
14	YES	25.49	0.00	11.34	9.40	100.00	63.06	0.87	1,200.00	705.13	-
15	NO	34.86	17.66	24.79	20.55	74.41	49.47	0.88	1,200.00	639.98	Train not at station: 3

ตารางที่ ค.8 ผลการทดสอบ Case 08 ที่ค่า H เท่ากับ 8 นาที และ %ESTS เท่ากับ 50% (ต่อ)

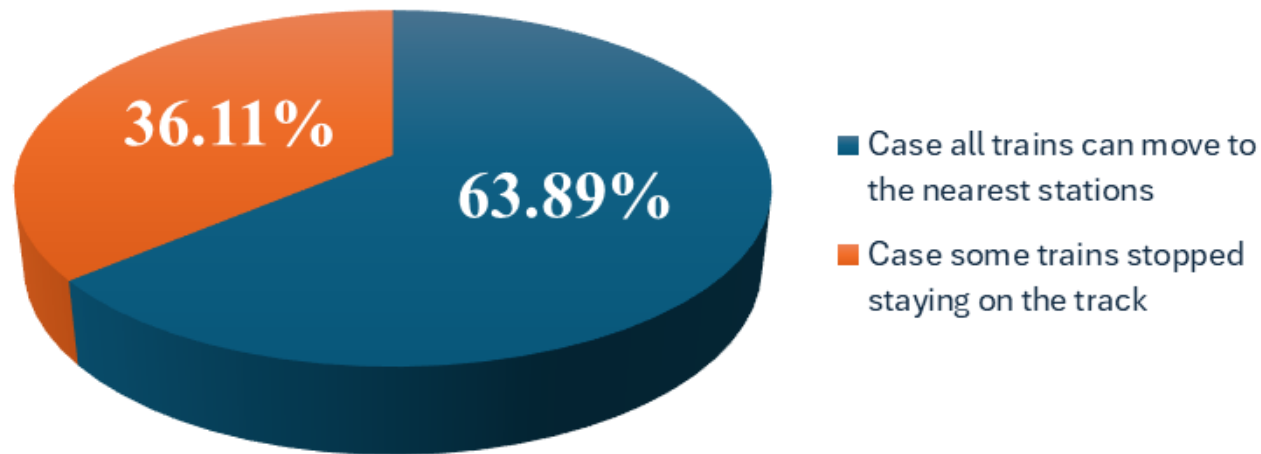
Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
16	YES	23.03	0.00	11.44	9.27	100.00	66.63	0.75	1,011.17	617.00	-
17	NO	17.01	6.17	12.47	10.33	91.06	75.34	0.84	1,136.14	614.81	Train not at station: 3
18	NO	6.70	0.00	2.33	1.95	100.00	90.28	0.86	1,171.89	0.00	Train not at station: 1 3
19	NO	20.28	0.28	9.74	8.16	99.59	70.62	0.84	1,136.14	690.27	Train not at station: 1
20	YES	25.46	1.08	14.37	11.59	98.44	63.11	0.84	1,136.14	616.67	-
21	NO	29.17	12.63	22.01	18.30	81.69	57.73	0.88	1,200.00	624.37	Train not at station: 1
22	YES	22.65	0.00	10.39	8.65	100.00	67.18	0.84	1,136.14	698.49	-
23	YES	33.31	0.00	19.49	15.75	100.00	51.72	0.76	1,032.18	652.46	-
24	YES	25.18	12.43	19.83	16.21	81.98	63.50	0.87	1,200.00	657.91	-
25	NO	20.70	0.00	10.99	8.78	100.00	69.99	0.84	1,139.73	627.49	Train not at station: 3
26	YES	8.92	0.00	3.05	2.55	100.00	87.08	0.86	1,200.00	629.68	-
27	NO	9.81	0.25	5.09	4.27	99.64	85.79	0.84	1,136.14	0.00	Train not at station: 1 5
28	YES	5.70	0.90	3.31	2.55	98.69	91.74	0.84	1,136.14	609.87	-
29	NO	21.47	17.17	19.27	15.34	75.11	68.89	0.84	1,139.73	616.22	Train not at station: 3
30	YES	34.35	17.59	23.27	18.74	74.51	50.21	0.85	1,151.72	611.58	-

ตารางที่ ค.8 ผลการทดสอบ Case 08 ที่ค่า H เท่ากับ 8 นาที่ และ %ESTS เท่ากับ 50% (ต่อ)

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
31	YES	12.32	1.63	6.97	5.57	97.64	82.14	0.88	1,200.00	663.60	-
32	YES	25.21	11.99	20.80	17.14	82.62	63.46	0.87	1,200.00	633.74	-
33	YES	28.92	20.11	25.84	21.34	70.85	58.08	0.84	1,136.14	627.43	-
34	NO	0.28	0.00	0.09	0.08	100.00	99.60	0.52	695.86	0.00	Train not at station: 3
35	NO	24.33	5.79	14.87	12.36	91.60	64.74	0.84	1,136.14	614.48	Train not at station: 3 5
36	NO	6.27	0.00	2.45	2.05	100.00	90.91	0.86	1,171.89	0.00	Train not at station: 5

หมายเหตุ YES หมายถึง กรณีที่รถไฟฟ้าทุกขบวนอพยพสำเร็จ และ NO หมายถึง กรณีที่มีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

Train movement using ESTS backup Case 08: H 8.00 - ESTS 50%



รูปที่ ค.8 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$

ตารางที่ ค.9 ผลการทดสอบ Case 09 ที่ค่า H เท่ากับ 8 นาที่ และ %ESTS เท่ากับ 75%

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
1	YES	33.75	0.00	12.09	9.97	100.00	51.09	0.84	1,136.14	676.45	-
2	YES	6.06	0.00	2.68	2.18	100.00	91.22	0.84	1,136.14	688.79	-
3	YES	27.24	8.22	17.13	14.33	88.08	60.52	0.86	1,200.00	704.33	-
4	YES	29.72	11.52	17.68	14.45	83.31	56.93	0.85	1,151.72	666.25	-
5	YES	11.54	1.24	5.34	4.32	98.20	83.27	0.84	1,144.84	647.79	-
6	YES	24.49	11.16	15.39	12.87	83.82	64.50	0.87	1,200.00	633.33	-
7	NO	26.53	2.39	17.04	13.67	96.54	61.55	0.84	1,139.73	617.54	Train not at station: 1
8	YES	9.79	0.00	2.45	2.05	100.00	85.82	0.86	1,200.00	0.00	-
9	NO	24.41	4.55	13.38	11.13	93.40	64.63	0.84	1,136.14	614.81	Train not at station: 1
10	YES	6.70	0.00	2.71	2.27	100.00	90.28	0.86	1,171.89	0.00	-
11	YES	9.94	0.00	6.32	5.29	100.00	85.59	0.86	1,200.00	639.35	-
12	YES	25.46	5.40	16.39	13.74	92.18	63.11	0.85	1,151.72	0.00	-
13	YES	27.32	0.00	13.44	10.78	100.00	60.40	0.88	1,200.00	650.74	-
14	YES	13.98	0.00	8.61	7.21	100.00	79.74	0.87	1,200.00	724.90	-
15	YES	34.86	2.39	19.29	16.07	96.54	49.47	0.84	1,139.73	639.98	-

ตารางที่ ค.9 ผลการทดสอบ Case 09 ที่ค่า H เท่ากับ 8 นาที่ และ %ESTS เท่ากับ 75% (ต่อ)

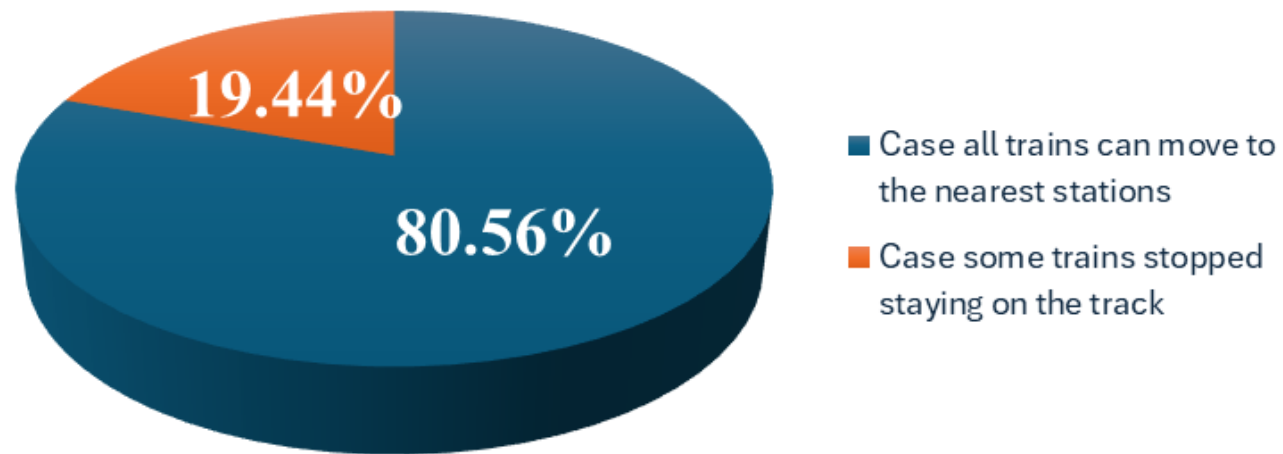
Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
16	YES	13.09	5.79	8.57	6.94	91.62	81.03	0.35	468.15	667.45	-
17	YES	23.00	6.17	11.97	9.96	91.06	66.67	0.84	1,136.14	690.21	-
18	YES	11.65	0.00	4.66	3.89	100.00	83.12	0.86	1,171.89	720.09	-
19	YES	28.12	0.28	8.52	7.07	99.59	59.25	0.84	1,136.14	676.69	-
20	YES	26.47	0.00	11.18	9.36	100.00	61.64	0.84	1,136.14	682.55	-
21	NO	27.99	1.25	16.42	13.61	98.18	59.43	0.88	1,200.00	619.78	Train not at station: 1
22	NO	11.85	0.00	4.75	3.86	100.00	82.83	0.84	1,136.14	663.04	Train not at station: 1 4
23	YES	29.68	4.77	15.16	12.72	93.08	56.99	0.88	1,200.00	0.00	-
24	NO	23.03	0.00	8.87	7.43	100.00	66.63	0.87	1,200.00	0.00	Train not at station: 1 4
25	YES	27.20	1.72	10.03	8.25	97.51	60.58	0.84	1,136.14	624.38	-
26	YES	8.92	0.00	2.30	1.93	100.00	87.08	0.86	1,200.00	0.00	-
27	YES	34.29	0.25	12.37	10.21	99.64	50.31	0.84	1,136.14	675.83	-
28	YES	5.48	0.00	2.62	2.13	100.00	92.06	0.84	1,136.14	688.10	-
29	YES	27.99	7.52	17.39	14.54	89.10	59.43	0.86	1,200.00	704.24	-
30	YES	29.58	11.27	17.73	14.50	83.66	57.13	0.85	1,151.72	666.25	-

ตารางที่ ค.9 ผลการทดสอบ Case 09 ที่ค่า H เท่ากับ 8 นาที่ และ %ESTS เท่ากับ 75% (ต่อ)

Test round	Case success	ESTS							Train		Note.
		E_{max} (kWh)	E_{min} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{max} (%)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)	E_{avg} (kWh)	V_{min} (V)	
31	YES	11.75	1.13	5.30	4.28	98.37	82.97	0.88	1,200.00	648.08	-
32	YES	25.19	12.31	15.81	13.22	82.16	63.49	0.87	1,200.00	633.74	-
33	NO	26.01	2.77	16.73	13.43	95.98	62.31	0.84	1,139.73	616.96	Train not at station: 4
34	YES	8.92	0.00	2.30	1.93	100.00	87.08	0.86	1,200.00	0.00	-
35	NO	24.33	5.21	13.46	11.21	92.45	64.74	0.84	1,136.14	614.48	Train not at station: 4
36	YES	6.27	0.00	2.67	2.23	100.00	90.91	0.86	1,171.89	0.00	-

หมายเหตุ YES หมายถึง กรณีที่รถไฟฟ้าทุกขบวนอพยพสำเร็จ และ NO หมายถึง กรณีที่มีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

Train movement using ESTS backup
Case 09: H 8.00 - ESTS 75%



รูปที่ ค.9 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$

ภาคผนวก ง

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

ง.1 การประชุมวิชาการ

Khemkladmuk, B., & Kulworawanichpong, T. (2021). Analysis of emergency self-traction system for mass rapid transit system. In *Proceedings of the 2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI 2021)* (pp. 207–210). Nakhon Ratchasima, Thailand, 20–22 October 2021

Khemkladmuk, B., & Kulworawanichpong, T. (2025). Emergency self-traction and energy sharing of mass rapid transit system. In *Proceedings of the 48th Electrical Engineering Conference (EECON-48)* (pp. 35–40). Chiang Mai, Thailand.

ง.2 วารสารวิชาการ

Khemkladmuk, B., Techawatcharapaikul, C., & Kulworawanichpong, T. (2026). Emergency power sharing by using a self-traction system in a mass rapid transit railway. *IET Energy Systems Integration*, 8, e70040.
doi: 10.1049/esi2.70040

2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI 2021)
October 20-22, 2021, Nakhon Ratchasima, THAILAND

Analysis of Emergency self-traction system for Mass Rapid Transit System

Banri Khemkladmuk¹ and Thanatchai Kulworawanichpong²
School of Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima 30000 Thailand
banrikhem1937@gmail.com¹ and thanatchai@gmail.com²

Abstract— The problem of power outages that occurs while a train is in service, causing many passengers to be stranded on the train and at the station as well as other serious consequences. The electric train system used in Thailand often encounters such problems. Therefore, this article proposes the simulation using the train movement and basic battery modelling calculation to estimate the energy consumption for energy storage system of the emergency self-traction system design. From the result, it was found that the simulation can calculate the energy consumption used in the electric trains.

Keywords— Train movement, Energy Storage System (ESS), and Emergency Self-Traction System (ESTS)

I. INTRODUCTION

In the past few decades Mass Rapid Transit System (MRTS) has been continuously developed in Bangkok and its vicinities such as the Green Line BTS, MRT Blue Line, Airport Rail link, the BEM purple line, etc. that can be seen today. [1] These systems have many advantages such as system performance, ability to transport passengers, low maintenance costs, environmental friendliness, etc., which are very suitable features for use in this era [2].

The Mass Rapid Transit System relies on electric power to drive the electric train. It is therefore essential that the power supply network design is as safe and stable as possible. However, it is undeniable that any system can not avoid the failure of the system that may be caused by humans, natural disasters, or the system itself at all. As a result, there is a massive power outage in the MRTS, which made it impossible to maintain the train's operating status. When the train stops moving in the middle of the route many passengers are stranded on the train and at the station. In the worst-case scenario, the subway stops in a tunnel, causing panic among passengers and possibly other serious consequences. [3,4] In recent years, there have been frequent blackouts of electric trains such as the Light Green Line BTS, Airport Rail link, MRT Purple Line, etc. [5-7] As shown in Figure 1, this is a warning signal that indicates an urgent solution to this problem. For the safety of passengers, extending the life of the system, and improving system performance of the Mass Rapid Transit System are required.

This article focuses on studying how to install Emergency Self-Traction System (ESTS) for solving

electric train stop in the event of a power outage, which will help ensure that the train moves to safe area with backup energy stored in the ESTS instead of receiving electricity from a normal external power supply. Energy Storage System (ESS) must be designed or chosen to suit the electric train during power outages. Therefore, the model of the electric train movement has been created to incorporate the ESS design into the ESTS.



Fig. 1. the Green Line BTS [8]

II. EMERGENCY SELF-TRACTION SYSTEM

ESTS is a system designed as a backup power supply installed on an electric train for feeding power to the propulsion system in the event of a train running in a non-electric zone or a power outage time. Normally, ETSE consists of three parts: the ESS (battery and super capacitor), a DC/DC converter and an ESTS control system. [2] In this article, only the battery is used as the ESS because the current battery technology is sufficient for recovering the regenerative braking energy and supplying the drive system during a power outage. Thus, the process of installing the equipment in the ESTS system is reduced, and its cost is reduced as well. [9] The bold line shown in Figure 2 represents the direction of power flow and the dashed line represents the direction of the control signal.

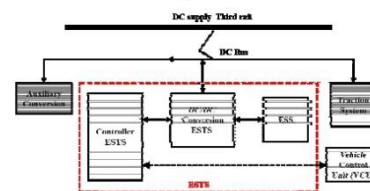


Fig. 2. Emergency self-traction system

2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI 2021)
October 20-22, 2021, Nakhon Ratchasima, THAILAND

TABLE I. CHARACTERISTICS OF ESSES UTILIZED IN RAILWAY SYSTEMS [10]

Technology	Gravimetric energy density (Wh/kg)	Gravimetric power density (W/kg)	Cycle efficiency (%)	Daily self-discharge (%)	Cycle life (cycles)
Flywheel	5-100	400-1500	90-95	100	>21,000
EDLC	5-15	5000-10,000	90-97	10-20	>100,000
Lead-acid	30-50	75-300	80-90	0.05-0.3	500-2,000
Ni-Cd	50-75	150-300	60-83	0.2-0.6	1,500-3,000
Ni-MH	54-120	200-1200	65-70	1-2	1,500-3,000
NaS	150-240	150-230	75-90	15-20	2,000-4,500
ZEBRA	100-120	150-200	90	10-15	>2,500
Li-ion	150-250	500-2000	90-98	0.1-0.3	1,000-10,000
VRFB	10-30	166	75-80	0-10	>16,000
HFC	800-10,000	5-800	20-50	Almost zero	>1,000
SMES	0.5-5	500-2000	94-97	10-15	>100,000

In ESTS operation, ESS is the key to providing renewable energy to the propulsion system in the case of external power system failure via a third rail. The energy stored in the ESS is supplied to the propulsion system through a DC/DC converter controlled by the ESTS control system and vehicle control unit (VCU) mounted on the electric train. In order to supply energy from the ESS to the appropriate voltage for the system, ESS charging will only occur while the electric train is braking or parked at a station when the external power supply is working normally.

III. ENERGY STORAGE SYSTEM

The selection of ESS is also very important to the operation of ESTS. Nowadays ESS is used in a wide variety of electric train applications such as electric double-layer capacitors (EDLC), batteries, and superconducting magnetic energy storage (SMES), etc. Each type of ESS has its advantages and disadvantages, working principles, and functions. Therefore, it is necessary to understand the basic ESS performance, as shown in the Table I. [10].

IV. THE TRAIN MOVEMENT MODEL

A. Train movement calculation

According to the above information, for any type of ESS installed in the electric train, the first thing to know is the energy that electric trains use to move during a power outage or disruption. Calculating this energy is based on Newton's second law, as in equation (1), when considering the various forces acting on the electric train, there are main forces such as rolling resistance force, aerodynamic drag force, and gradient force, as equation (2). Figure 3 shows the free body diagram of the electric train on the inclined path including the mentioned forces exerting on it [11].

$$TE - F_R = M_{eff} \alpha \quad (1)$$

$$F_R = F_{RR} - F_D - F_G \quad (2)$$

where TE is tractive effort (N)
 F_R is resistance forces (N)
 F_{RR} is rolling resistance forces (N)

F_D is aerodynamic drag forces (N)
 F_G is gradient forces (N)
 a is the vehicle acceleration (m/s²)
 M_{eff} is effective mass (ton)

Based on the TE force obtained, it is possible to calculate the required power P and energy E as in equation (3) and (4), respectively [12].

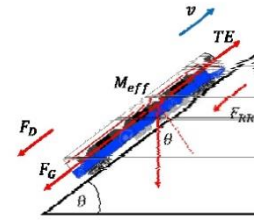


Fig. 3. free body diagram of the electric train

$$P = \frac{TE \times v}{\eta} \quad (3)$$

$$E = P \times t \quad (4)$$

where P is power consumed (kW)
 v is train's speed (m/s)
 η is over all transmission efficiency
 E is energy consumed (kWh)
 t is time (s)

The simulation requires improvements in the speed v and position s of the electric train as it moves in a time step Δt , which are calculated from equation (5) and (6).

$$v_t = v_i + \alpha \Delta t \quad (5)$$

$$s_t = s_i + v_i \Delta t + \frac{1}{2} \alpha \Delta t^2 \quad (6)$$

where v_t is terminal speed (m/s)
 v_i is initial speed (m/s)

2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI 2021)
October 20-22, 2021, Nakhon Ratchasima, THAILAND

S_t is terminal position (m)
 v_i is initial position (m)
 Δt is difference between two time (s)

However, the calculation in equation (1) - (6) are based on the train's motion that consists of four modes: accelerating mode, constant speed mode, coasting mode, and braking mode [13] as shown in Figure 4. Train operation mode depends on the technology and model used to control electric train.

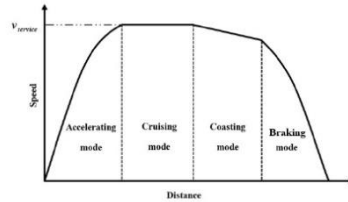


Fig. 4. The electric train's speed control modes

Normally, the electric train's movement starts from acceleration mode to increase its speed from the initial speed to the specified maximum speed ($v_{service}$) with the acceleration $\alpha > 0$. When the speed is equal to the maximum speed the electric train will operate in constant speed or cruising speed mode to maintain the speed within the maximum speed range with acceleration $\alpha = 0$. The train enter coasting mode when it reaches the specified coasting position. In coasting mode, the train movement solely relies on the inertia force $TE = 0$. Finally the system switches to braking mode when approaching the passenger station with acceleration $\alpha < 0$.

B. Battery calculation

The battery ESS is now widely used in electric train systems around the world due to its high energy storage efficiency, compact size, relevant parameters control, and it is secured through the Battery manage system (BMS). The ESS study here chose a simplified model of the battery in a case study, which is calculated from equation (7) - (11). [14]

$$I_d = \frac{P}{V_{B,i}} \quad (7)$$

$$V_{B,i} = R_{B,i} \times (I_{B,i} - I_d) \quad (8)$$

$$E_{B,i} = E_{B,t} - (V_{B,i} \times I_d \times \Delta t) \quad (9)$$

$$I_{B,i} = \frac{E_{B,i}}{V_{B,i} \times \Delta t} \quad (10)$$

$$R_{B,i} = \frac{V_{B,i}}{I_{B,i}} \quad (11)$$

where I_d is battery current rate (A)
 $I_{B,i}$ is initial battery current (A)

$I_{B,t}$ is terminal battery current (A)
 $R_{B,i}$ is initial battery resistance (Ω)
 $R_{B,t}$ is terminal battery resistance (Ω)
 $V_{B,i}$ is initial battery voltage (V)
 $V_{B,t}$ is terminal battery voltage (V)
 $E_{B,i}$ is initial battery energy (kWh)
 $E_{B,t}$ is terminal battery energy (kWh)

The two parts of the calculation are taken to create a combined model. Thus, it is possible to find various parameters that occur during the train movement of the system.

V. SIMULATION RESULT

The train movement simulation in the case of a power outage was done to solve the energy consumption (E) needed for the propulsion system. E will be used for analysis of the system operation and to select the size of the ESS in ESTS installed on the electric train. The conditions used to simulate the movement of electric trains are defined in Table II.

TABLE II. PARAMETERS OF ELECTRIC TRAINS USED IN THE SIMULATION

Specific data	Information
Movement features	
- max. speed	80 km/h
- max. acceleration	0.5 m/s ²
- max. deceleration	0.5 m/s ²
- route distance	1200 m
Electricity	
- battery capacity	180 kWh
- voltage level	750 VDC
- max. traction effort	80 kN
- aux. power	270 kW
Weight	
- tare weight	100 ton
- passenger mass factor	1.3
Efficiencies	70 %
Station	2 stations

The simulation used MATLAB/M-file to solve the motion of the electric train that runs between 2 stations with a distance of 1200 meters. The test cases are divided into 5 levels of service speed: 15 - 55 km/h without bringing all resistances into the calculation. For comparison, the energy consumption results of the simulation are shown in Table III.

TABLE III. COMPARISON OF THE SOLUTION

No.	Service speed (km/h)	Remain E (kWh)	t (min)
1	15	166.67	4.95
2	25	169.71	3.09
3	35	171.35	2.39
4	45	172.82	1.96
5	55	174.27	1.75

From the above table, the remaining energy of the 180 kWh battery during the travelling on the determined route at different speeds is shown in Figure 5. It was found that energy consumption increased with speed in first 200 m. On the contrary, after 200 m energy consumed by the electric train decreased with speed. Therefore, when the electric train runs at lower speed, the system consumes less energy in a short distance. But if the running route

2021 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI 2021)
October 20-22, 2021, Nakhon Ratchasima, THAILAND

has a longer distance, the electric train running at higher speed consumes less energy than running at lower as shown in Figure 6. The difference of energy consumption in a short distance may not be noticeable; however the difference is clearly seen when the travelling time is longer as shown Figure 7.

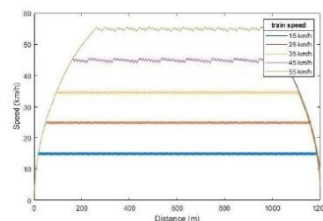


Fig. 5. The electric train's speed - distance

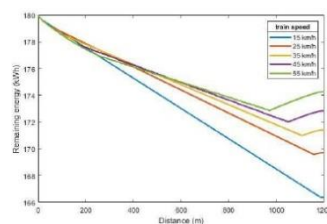


Fig. 6. The battery's remaining energy

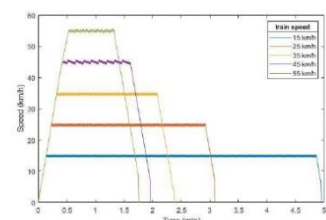


Fig. 7. The electric train's speed - time

VI. CONCLUSION

This paper used the electric train movement and basic battery calculation to help estimate the energy consumption for the battery of ESS used in ESTS design, it was found that the simulation could calculate the energy required for electric trains to travel at different service speed condition from 15 - 55 km/h effectively. It was found that the amount of energy used increases with speed in the case of the train travelling in a short distance. On the contrary, the train consumes more energy at a lower speed for long-

distance travelling. From the results above, it can be concluded that the battery installed in this ETSE must have a size of at least 20 kWh in size. In addition, it can simulate battery charging with a regenerative braking system.

In the future, other relevant condition such as add more longer distance, add more station, gradient etc. will be used to make the calculated energy value more accurate and closer to the actual system.

REFERENCES

- [1] S. Tripyakaisorn, "How did Thailand develop the public transportation systems?," *Executive Journal*, vol.31, No. 4, pp. 55-58, 2011.
- [2] D. Yuan, S. Gu, J. Liu, Y. Zhang, and C. Lv, "Design and analysis of emergency self-traction system for urban rail transit vehicles," *International Conference on Electrical and Control Engineering* 2012, vol.16, p. 585-591, 2012.
- [3] N. Chovančiková and Z. Dvořák, "Effect of a power failure on rail transport," 13th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport (TRANSCOM 2019), vol.40, p. 1289-1296, May 2019.
- [4] H. H. Alhelou, M. E. H. Golshan, T. C. Njenda, and S. Pierluigi, "A Survey on Power System Blackout and Cascading Events Research Motivations and Challenges," *Energies*, vol.12, No. 4, pp. 1-28, 2019.
- [5] Exclusive experience "BTS power outage" without explanation!, PPTVHD36, 24 November 2017. Available online: <https://www.pptvhd36.com/news/padenron/70276> (accessed on 3 June 2021).
- [6] Airport link power outage on middle route, no light - no air!; Kapook highlight, 22 December 2017. Available online: <https://highlight.kapook.com/view/165617> (accessed on 3 June 2021).
- [7] People flooded at the Bang Yai-Tao Poon train station, lost 1 hour after power outage.; Khaosod online, 3 September 2018. Available online: https://www.khaosod.co.th/breaking-news/news_1527328 (accessed on 3 June 2021).
- [8] Green line train today!; Infoquest, 9 June 2021. Available online: [https://www.infoquest.co.th/tag/Green line train](https://www.infoquest.co.th/tag/Green%20line%20train) (accessed on 10 June 2021).
- [9] G. Rechard and R. Gouttefangeas, "Recovering energy from train braking for traction and grid use," *World Engineers Summit - Applied Energy Symposium & Forum: Low Carbon Cities & Urban Energy Joint Conference (WES-CUE 2017)*, p.61-66, 19-21 July 2017.
- [10] X. Liu and K. Li, "Energy storage devices in electrified railway systems: A review," *Transportation Safety and Environment* 2020, Vol. 2, No. 3, p. 183-201, 2020.
- [11] T. Kulworawanchpong, "Multi-train modeling and simulation integrated with traction power supply solver using simplified Newton-Raphson method," *Journal of Modern Transportation*, pp. 1-11. doi:10.1007/s40534-015-0086-y, September 2015.
- [12] M. Miyoshi, T. Takeba, and M. Miyatake, "Development of an Energy Efficient Train Traffic Control System for saving Electricity," *Computers in Railways (COMPRAIL 2012)*, vol. XIII, pp. 499-510, Sept 2012.
- [13] T. Kulworawanchpong, "Optimising AC electric railway power flow with power electronic control", PhD Thesis, University of Birmingham, UK, November 2003.
- [14] J. Bauman and M. Kazerani, "A Comparative Study of Fuel-Cell-Battery, Fuel-Cell-Ultracapacitor, and Fuel-Cell-Battery-Ultracapacitor Vehicles," *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, vol.57, No. 2, pp. 760-769, 2008.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 48
The 48th Electrical Engineering Conference (EECON-48)
วันที่ 19-21 พฤศจิกายน 2568 ณ โรงแรมสุรินทร์ จังหวัดเชียงใหม่



การขับเคลื่อนตัวเองและการแบ่งปันพลังงานในกรณีฉุกเฉินของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน Emergency Self-Traction and Energy Sharing of Mass Rapid Transit System

บันริ เข็มกลัดมุกข์^{1,2} และ ธนัชชัย กุลรวานิชพงษ์^{1*}

¹สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี banrikhem1937@gmail.com thanath@usut.ac.th*

²สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม banrik@msu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแนวคิดการแบ่งปันพลังงานสำหรับระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน วัตถุประสงค์หลักคือการลดจำนวนหน่วยระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินที่จำเป็น โดยเปิดใช้งานการแบ่งปันพลังงานระหว่างขบวนรถที่ติดตั้งระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินกับขบวนรถที่ไม่มีการติดตั้ง ขณะเดียวกันยังต้องมั่นใจได้ว่าขบวนรถไฟฟ้าทุกขบวนสามารถนำส่งผู้โดยสารไปยังสถานีหรือจุดจอดรถไฟที่ใกล้ที่สุดได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพระหว่างเกิดไฟฟ้าดับ การศึกษาใช้รถไฟฟ้ายางในประเทศไทยเป็นกรณีศึกษา เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของแนวคิดนี้ โดยพิจารณาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ระยะทางระหว่างขบวนรถและสถานี รายละเอียดเฉพาะของขบวนรถ และปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสามารถให้พลังงานสำรองแก่ขบวนรถที่ติดตั้งได้อย่างมีประสิทธิภาพและแบ่งปันพลังงานส่วนเกินให้กับขบวนรถอื่นๆ ที่ไม่มีการติดตั้งในกรณีการแบ่งปันด้วยอัตราความสำเร็จมากถึง 72.41% ซึ่งเน้นย้ำถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ระบบนี้และสนับสนุนการพัฒนาแบบขนานซึ่งยังขึ้นและมีประสิทธิภาพมากขึ้น แม้ว่ายังมีข้อจำกัดบางประการก็ตาม

คำสำคัญ: ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน, ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน, ไฟฟ้าดับ, การแบ่งปันพลังงาน

Abstract

This paper introduces the concept of energy sharing for Emergency Self-Traction Systems (ESTS) in mass rapid transit systems. The main objective is to reduce the number of ESTS units required by enabling energy sharing between trains equipped with ESTS and trains without equipped, while ensuring that all electric trains can safely and efficiently evacuate passengers to the nearest station or train stop during power outages. This study examines the BTS Silom Line in Thailand to evaluate the feasibility of this concept, considering various factors including the number of trains equipped with ESTS, distances between trains and stations, specific train characteristics, and other relevant parameters. The results demonstrate that ESTS can effectively provide backup power to

equipped trains and share surplus energy with other non-equipped trains within the sharing radius, achieving a success rate of 72.41%. This emphasizes the feasibility of implementing this system and contributes to the development of more sustainable and efficient mass rapid transit systems.

Keywords: Mass Rapid Transit Systems, Emergency Self-Traction Systems, Power Outage, Energy-Sharing

1. บทนำ

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (Mass Rapid Transit Systems – MRTS) ได้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญในการยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชนในเมืองใหญ่ ด้วยประสิทธิภาพในการขนส่งผู้โดยสารจำนวนมากได้อย่างตรงเวลา ปลอดภัย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [1] อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญที่ยังคงเป็นความท้าทายคือการรับมือกับสถานการณ์ฉุกเฉิน โดยเฉพาะเหตุการณ์ไฟฟ้าดับที่เกิดจากอุปกรณ์ชำรุดหรือการบำรุงรักษาที่ไม่เพียงพอ ซึ่งส่งผลให้เกิดการหยุดรถไฟกลางทาง อันนำไปสู่การเกิดความไม่สะดวก ความแออัด และการระบายอากาศที่ไม่เพียงพอภายในขบวนรถ โดยสถานการณ์เหล่านี้ล้วนสร้างความไม่พอใจและความไม่มั่นใจให้กับผู้โดยสาร [2]

บทความนี้ได้นำเสนอแนวคิดการนำระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน (Emergency Self-Traction System – ESTS) มาติดตั้งบนขบวนรถ เพื่ออาศัยพลังงานจากระบบนี้ในการจ่ายไฟให้กับระบบสำคัญบนขบวนรถ เช่น ไฟส่องสว่าง เครื่องปรับอากาศ ระบบสื่อสาร เป็นต้น รวมถึงสามารถขับเคลื่อนขบวนรถไปยังสถานีที่ใกล้ที่สุดได้ในระดับความเร็วที่จำกัด [3] อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดด้านต้นทุน การบำรุงรักษา และน้ำหนักของอุปกรณ์ยังเป็นอุปสรรคต่อการติดตั้งระบบนี้ในรถไฟทุกขบวน ด้วยเหตุนี้ จึงได้มีข้อเสนอให้ใช้แนวคิดการแบ่งปันพลังงานจากขบวนรถที่มีการติดตั้ง ESTS ไปยังขบวนรถที่ไม่มี เพื่อให้ทั้งระบบสามารถรับมือกับสถานการณ์ฉุกเฉินได้โดยไม่ต้องติดตั้งระบบในทุกขบวน ทั้งนี้ บทความได้จำลองสถานการณ์หลายรอบเพื่อประเมินความเป็นไปได้ของแนวทางนี้และเสนอข้อคิดเห็นสำหรับการวิจัยและพัฒนาต่อไป

2. การแบ่งปันพลังงานระหว่างขบวนรถด้วย ESTS

ความปลอดภัยและความต่อเนื่องของการให้บริการเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดยเฉพาะในสถานการณ์ที่แหล่งจ่ายไฟต้องหยุดชะงักที่ขบวนรถที่กำลังวิ่งอยู่บนเส้นทาง ซึ่งอาจทำให้

*ผู้ประพันธ์บทความ

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 48

The 48th Electrical Engineering Conference (EECON-48)

วันที่ 19-21 พฤศจิกายน 2568 ณ โรงแรมสุราม่า จังหวัดเชียงใหม่

เกิดความไม่สะดวกและความเสี่ยงต่อความปลอดภัยของผู้โดยสารจากการหยุดนิ่งกลางทางของขบวนรถ ประเด็นการพัฒนาการพัฒนาระบบสำรองพลังงานสำหรับป้องกันปัญหาดังกล่าวจึงเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างยิ่ง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากพื้นที่ข้างทางในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ไม่ว่าจะเป็นบนทางยกระดับหรือในอุโมงค์ใต้ดิน มีพื้นที่จำกัดและคับแคบ การติดตั้งระบบสำรองพลังงานจากอุปกรณ์กักเก็บพลังงานบนขบวนรถ (On-board Energy Storage Devices – ESD) จึงเป็นทางเลือกที่ได้รับความนิยมระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน (Emergency Self-Traction System – ESTS) ถือเป็นระบบที่ตอบโจทย์ในแง่ของพื้นที่ติดตั้งและความสามารถในการขับเคลื่อนตัวเองด้วยพลังงานสำรองในกรณีไฟฟ้าดับ

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากต้นทุนอุปกรณ์ใน ESTS ที่สูง ทำให้การติดตั้งระบบนี้ให้กับรถไฟฟ้าขบวนจึงเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ บทความนี้จึงนำเสนอแนวคิดการแบ่งปันพลังงาน (Energy Sharing) จากขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS ไปยังขบวนที่ไม่มีติดตั้งผ่านทางตัวนำหรือสายส่งเหนือศีรษะที่ถูกตัดไฟฟ้าจากระบบจ่ายไฟฟ้าหลักขณะเกิดไฟดับ เพื่อลดจำนวนอุปกรณ์ ESTS ที่จำเป็นในระบบในขณะที่รถไฟฟ้าขบวนยังสามารถรับพลังงานจากขบวนอื่นที่ติดตั้ง ESTS เพื่อเคลื่อนที่นำผู้โดยสารไปยังสถานีที่ใกล้ที่สุดได้อย่างปลอดภัย แม้จะไม่มี ESTS ติดตั้งในขบวนรถของตนเองก็ตาม แนวคิดดังกล่าวได้รับการประเมินผ่านการจำลองสถานการณ์โดยใช้แบบจำลองทางไฟฟ้าและเงื่อนไขจริงของระบบรถไฟฟ้า

ESTS ที่ถูกนำมาใช้ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนจะมีองค์ประกอบหลักสามส่วน ได้แก่ อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน (ESD) ตัวแปลงพลังงานสองทิศทาง และหน่วยควบคุม [4] ระบบจะเริ่มทำงานเมื่อถูกสั่งการด้วยมือจากเจ้าหน้าที่ขับรถไฟบนขบวนหรือทำงานแบบอัตโนมัติหลังจากที่หน่วยควบคุมตรวจจับได้ว่าขาดการรับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก จากนั้นหน่วยนี้จะประมวลผลและส่งคำสั่งไปยังตัวแปลงพลังงานสองทิศทาง เพื่อดึงพลังงานที่กักเก็บไว้ใน ESD โดยอิงตามสภาพการทำงานของขบวนรถในขณะนั้น [3 – 4] โดยปกติ ESD มักออกแบบให้มีความจุที่เพียงพอสำหรับสำรองไฟเฉพาะระบบไฟฟ้าบางประเภทให้อย่างคงทนต่อไปได้ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ในขณะที่รอการช่วยเหลือเท่านั้น เช่น แสงสว่าง เครื่องปรับอากาศ ประตู เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ด้วยเทคโนโลยี ESD ที่พัฒนาขึ้นอย่างมากในปัจจุบัน บางระบบอาจถูกออกแบบให้มีความสามารถในการเก็บพลังงานได้มากพอที่จะขับเคลื่อนรถไฟให้สามารถอพยพผู้โดยสารไปยังสถานีที่ใกล้ที่สุดก่อนที่ระบบจะหยุดทำงานโดยสมบูรณ์ได้

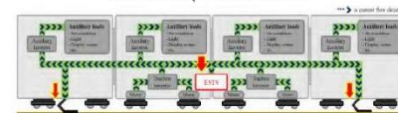
ภาพประกอบต่อไปนี้นำเสนอภาพรวมการทำงานของ ESTS และแนวทางการแบ่งปันพลังงานระหว่างขบวนรถไฟฟ้าในกรณีไฟฟ้าขัดข้อง [5] โดยเริ่มจาก รูปที่ 1 แสดงการอัดประจุ ESTS ในกรณีที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักทำงานภายใต้สภาวะปกติ ซึ่งสามารถอัดประจุได้จากสองแหล่ง ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักและพลังงานย้อนกลับจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Braking) รูปที่ 2 แสดงการคายประจุ ESTS ในกรณีที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักทำงานได้สภาวะปกติ เพื่อการช่วยเหลือพลังงานที่จำเป็นต้องจ่ายจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก รูปที่ 3 แสดงการคายประจุ ESTS ใน



กรณีที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักเกิดขัดข้อง โดย ESTS จะจ่ายพลังงานสำรองให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ บนขบวนรถ รวมถึงขับเคลื่อนรถไฟให้เคลื่อนที่ไปยังสถานที่ปลอดภัย รูปที่ 4 แสดงการคายประจุที่เคลื่อน ESTS ไปยังรถไฟฟ้าขบวนอื่น ๆ ขณะที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักยังทำงานทำงานขัดข้องตามแนวคิดที่เสนอในบทความนี้ และ รูปที่ 5 อธิบายแนวคิดการทำงานของ ESTS สำหรับจ่ายพลังงานสำรองให้กับตนเองและการแบ่งปันพลังงานที่เหลือไปยังรถไฟฟ้าขบวนอื่นผ่านทางตัวนำหรือสายส่งเหนือศีรษะ เพื่อให้สามารถขับเคลื่อนรถไฟขบวนอื่นให้เคลื่อนที่ไปยังสถานที่ปลอดภัย

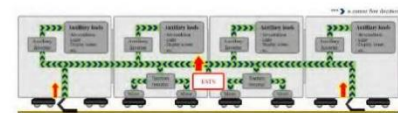


(ก) การอัดประจุจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก

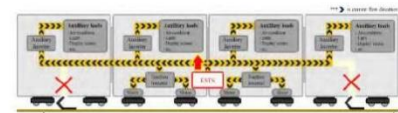


(ข) การอัดประจุจากพลังงานย้อนกลับจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ

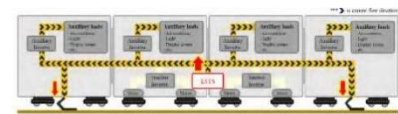
รูปที่ 1 การอัดประจุ ESTS กรณีแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักทำงานปกติ



รูปที่ 2 การอัดประจุ ESTS กรณีแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักทำงานปกติ



รูปที่ 3 การจ่ายพลังงานสำรองให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ บนขบวนรถที่ติดตั้ง ESTS กรณีแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักเกิดขัดข้อง



รูปที่ 4 การแบ่งปันพลังงานจาก ESTS ไปยังรถไฟฟ้าขบวนอื่น กรณีแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักเกิดขัดข้อง

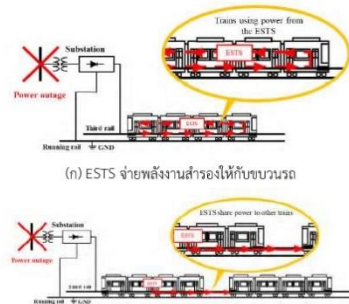
การแบ่งปันพลังงานระหว่างขบวนรถไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเป็นแนวคิดที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการพลังงาน โดยเฉพาะ

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 48

The 48th Electrical Engineering Conference (EECON-48)

วันที่ 19-21 พฤศจิกายน 2568 ณ โรงแรมสุรินทร์ จังหวัดเชียงใหม่

อย่างยิ่งในการมีเงินที่เกิดไฟฟ้าขัดข้อง รถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS จะจ่ายพลังงานสำรองให้กับตนเองเพื่อเคลื่อนย้ายผู้โดยสารไปยังสถานีใกล้เคียงที่สุด จากนั้นจึงเข้าสู่การแบ่งพลังงานเพื่อจ่ายให้รถไฟขบวนอื่นที่ไม่มี ESTS ผ่านรางตัวนำหรือสายส่งเหนือศีรษะ จนกระทั่งรถไฟทุกขบวนสามารถเคลื่อนถึงสถานีและอพยพผู้โดยสารทุกคนอย่างปลอดภัย ระบบจะหยุดทำงานเพื่อรอคำสั่งใหม่หรือการกู้คืนระบบจ่ายไฟฟ้าหลักให้กลับมาเป็นปกติ ทั้งนี้การแบ่งพลังงานต้องอาศัยระยะห่างระหว่างรถไฟที่เหมาะสมและพลังงานสำรองที่เพียงพอ เพื่อให้การแบ่งพลังงานมีประสิทธิภาพและเกิดผลสำเร็จสูงสุด



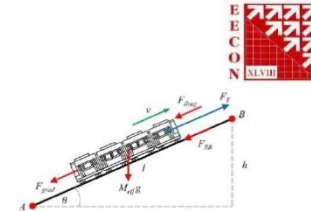
รูปที่ 5 หลักการแบ่งพลังงานโดย ESTS

3. แบบจำลองการแบ่งพลังงานของ ESTS

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการใช้แนวคิดการแบ่งพลังงานโดยใช้ ESTS ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน จะใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แบบจำลองนี้ประกอบด้วยการทำงานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน การทำงานของระบบจ่ายไฟ และการคำนวณ ESTS อย่างง่าย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟ

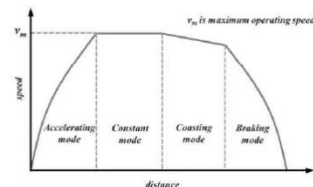
การคำนวณการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟต้องพิจารณาแรงต่าง ๆ ตามกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน ดังสมการที่ (1) โดยใช้แผนภาพอิสระของแรงลัพธ์ (Free-Body Diagram) ในการอธิบาย ดังรูปที่ 6 ขบวนรถไฟที่มีค่าประสิทธิผลของน้ำหนัก (M_{eff}) จะเริ่มเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง (a) เมื่อแรงดูด (F_d) มีค่ามากกว่าแรงต้าน (F_r) ประกอบด้วยแรงเสียดทาน (F_{fric}) แรงต้านอากาศ (F_{drag}) และแรงเสียดทานจากการหมุนกลิ้งบนรางเหล็ก (F_{roll}) โดยทั่วไปแล้วจะคำนวณจากค่าทดสอบของผู้ผลิตขบวนรถไฟ และใช้สมการความเร็วของรถไฟ (v) ร่วมกับสัมประสิทธิ์เดวิส คือ A, B และ C ซึ่งมีหน่วยเป็น kN km/h/km และ $\text{kN h}^2/\text{km}^2$ ตามลำดับ จะเรียกสมการนี้ว่าสมการเดวิส (Davis Equation) ดังสมการที่ (2) [6 – 7]



รูปที่ 6 แผนภาพอิสระของการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟ

$$F_r - T_k = M_{eff} a \quad (1)$$

$$T_k = A + Bv + Cv^2 \quad (2)$$



รูปที่ 7 โหมดการทำงานของขบวนรถไฟ

แรงที่กระทำต่อขบวนรถไฟมีผลโดยตรงต่อการควบคุมลักษณะการเคลื่อนที่และความเร็วของรถไฟ ดังนั้นการจำลองการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟจึงต้องรวมแรงเหล่านี้ไว้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด โดยทั่วไป การเคลื่อนที่ของรถไฟสามารถแบ่งออกเป็น 4 โหมดหลักได้แก่ โหมดเร่งความเร็ว (Accelerating Mode) โหมดความเร็วคงที่ (Cruising Mode) โหมดไหลเฉื่อยหรือการแล่น (Coasting Mode) และโหมดเบรก (Braking Mode) ดังรูปที่ 7 ตลอดช่วงการเคลื่อนที่ ความเร็วและตำแหน่งของรถไฟจะถูกอัปเดต ดังสมการที่ (3 – 4) โดยที่ v_i แทนค่าความเร็วของรถไฟก่อนและหลังการอัปเดต ขณะที่ s_i และ s_r แทนตำแหน่งของรถไฟก่อนและหลังการอัปเดต โดยมี Δt เป็นช่วงเวลาแต่ละรอบการคำนวณ ในงานการศึกษานี้กำหนดให้ใช้ค่า Δt เท่ากับ 0.01 วินาที

$$v_i = v_j + a \Delta t \quad (3)$$

$$s_r = s_i + v_i \Delta t + \frac{1}{2} a \Delta t^2 \quad (4)$$

ประเด็นหลักของการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟเพื่อวิเคราะห์การแบ่งพลังงานโดยใช้ ESTS คือการคำนวณพลังงานที่ใช้ไปของรถไฟ (E_p) โดยที่ E_p และ E_r แสดงถึงการใช้พลังงานก่อนและหลังการอัปเดตตามลำดับ การอัปเดตนี้ต้องอาศัยค่ากำลังของรถไฟ (P_p) ที่ประกอบด้วยการกำลังขับเคลื่อน (P_m) กำลังงานเสริม (P_{acc}) และกำลังย้อนกลับจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ (P_{reg}) โดยที่ P_m ขึ้นอยู่กับ $F_r v$ และประสิทธิภาพ (η) ของรถไฟในการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลของมอเตอร์ขับเคลื่อน ส่วน P_{acc} ขึ้นอยู่กับโหมดต่างๆ บนขบวนรถไฟ เช่น ไฟส่องสว่าง เครื่องปรับอากาศ เป็นต้น สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5 – 7)

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 48
The 48th Electrical Engineering Conference (EECON-48)
วันที่ 19-21 พฤศจิกายน 2568 ณ โรงแรมสุรินทร์ จังหวัดเชียงใหม่



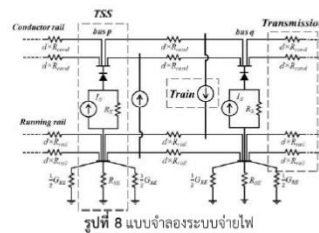
$$E_T = E_r + P_T \Delta t \quad (5)$$

$$P_T = P_u + P_{loss} + P_{reg} \quad (6)$$

$$P_T = \begin{cases} P_u = \frac{F_T}{\eta} \times v, & P_{reg} = 0 & \text{if } F_T \geq 0 \\ P_u = 0, & P_{reg} = F_T \eta \times v & \text{if } F_T < 0 \end{cases} \quad (7)$$

3.2 แบบจำลองการทำงานของระบบจ่ายไฟ

สถานีจ่ายไฟย่อยจะถูกจำลองในรูปของแบบจำลองวงจรสมมูลนอร์ตัน (Norton's Equivalent Circuit) ที่มีแหล่งจ่ายกระแสลัดวงจร I_s และความต้านทานลัดวงจร R_s โดยสถานีจ่ายไฟย่อยนี้จะเชื่อมต่อกับรางตัวนำผ่านไดโอดคอมคิตและเชื่อมต่อกับรางวิ่งที่มีความต้านทานลงดิน R_{se} แบบจำลองดังกล่าวช่วยให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมกรจ่ายไฟของสถานีจ่ายไฟย่อยได้อย่างแม่นยำ [7] ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แบบจำลองระบบจ่ายไฟ

เนื่องจากระบบจ่ายไฟกระแสตรงในระบบรถไฟฟาส่งผลชนมีความซับซ้อนสูง การวิเคราะห์การไหลพลังงานจึงต้องใช้เทคนิคการคำนวณที่เหมาะสม บทความนี้เลือกใช้วิธีการฉีดกระแส (Current Injection Method - CIM) ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของบัสต่างๆ ภายในระบบ กระบวนการวิเคราะห์เริ่มจากการกำหนดแรงดันเริ่มต้นในแต่ละบัสเป็นค่าที่คิดและจัดทำสมการการวิเคราะห์ในดด้วยเมตริกซ์การนำไฟฟ้า $[G]$ และเมตริกซ์กระแส $[I]$ ดังสมการ (8) ในขั้นตอนนี้จะมีการรวมกระแสจากสถานีจ่ายไฟย่อยกับกระแสรถไฟ (I_s) ที่คำนวณมาจากผลหารของ P_T ต่อแรงดัน (V_r) ที่คร่อมตัวนำกับรางวิ่ง ณ ตำแหน่งบัสที่รถไฟกำลังวิ่งอยู่ จากพารามิเตอร์ข้างต้น แบบจำลองจะดำเนินการแก้สมการเพื่อหาค่าผลเฉลยของเมตริกซ์แรงดัน $[V]$ ในแต่ละบัสของระบบ การคำนวณจะทำซ้ำจนกว่าค่าคลาดเคลื่อนของแรงดันในแต่ละบัสจะมีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้

$$[I] = [G][V] \quad (8)$$

3.3 แบบจำลองการคำนวณ ESTS อย่างง่าย

การจำลอง ESTS ที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟสามารถดำเนินการได้โดยใช้แบบจำลองแบบเตอร์แบบง่ายที่มีการอ้างอิงหลักการของวงจรสมมูลนอร์ตัน (Norton Equivalent Circuit) โดยพารามิเตอร์หลักของแบบจำลอง

ประกอบด้วย I_{ESTS} คือ กระแสของ ESTS R_{ESTS} คือ ความต้านทานภายใน ESTS V_{ESTS} คือ แรงดันของ ESTS P_{ESTS} คือ กำลังของ ESTS E_{ESTS} คือ พลังงานที่สามารถใช้ได้จาก ESTS I_d คือ กระแสโหลด η คือ ประสิทธิภาพของโหลด และ SOC คือ ค่าสถานะการชาร์จแทนสัดส่วนพลังงานคงเหลือของ ESTS ซึ่งแต่ละพารามิเตอร์จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ตามสมการ (9 – 15) แบบจำลองนี้ช่วยให้สามารถวิเคราะห์การทำงานของระบบ ESTS เพื่อประเมินความสามารถในการจ่ายพลังงานเบื้องต้นได้อย่างแม่นยำและเป็นระบบ [8]

$$I_{ESTS} = \frac{E_{ESTS}}{V_{ESTS} \times 3600} \quad (9)$$

$$R_{ESTS} = \frac{V_{ESTS}}{I_{ESTS}} \quad (10)$$

$$I_d = \frac{P}{V_{ESTS}} \quad (11)$$

$$V_{ESTS} = R_{ESTS} \times (I_{ESTS} - I_d) \quad (12)$$

$$P_{ESTS} = V_{ESTS} \times I_d \quad (13)$$

$$E_{ESTS} = \frac{P_{ESTS} \times I_{ESTS}}{\eta} \quad (14)$$

$$SOC = \frac{E_{ESTS}}{E_{Res}} \times 100 \quad (15)$$

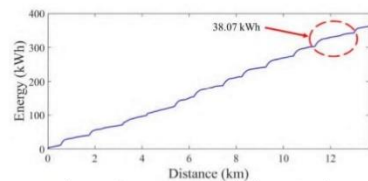
4. แบบจำลองการแบ่งปันพลังงานของ ESTS

แนวคิดการแบ่งปันพลังงานระหว่างขบวนรถไฟด้วย ESTS ได้รับการวิเคราะห์ผ่านกรณีศึกษาของรถไฟฟ้ายูเอเอส สายสีลม ประเทศไทย โดยระบบรถไฟฟาส่งผลชนสายนี้มีระยะทางการให้บริการรวมทั้งหมด 13.65 กิโลเมตร ประกอบด้วยสถานีผู้โดยสารจำนวน 14 แห่งและสถานีจ่ายไฟย่อยจำนวน 7 แห่งที่กระจายตัวตลอดเส้นทาง ดังรูปที่ 9 การจำลองระบบได้ถูกดำเนินการด้วยซอฟต์แวร์ MATLAB/m-file เพื่อคำนวณลักษณะการเคลื่อนที่และการใช้พลังงานของรถไฟแต่ละ ดังรูปที่ 10 ข้อมูลพลังงานที่ได้จากการจำลองมีความสำคัญต่อการประเมินความจุของ ESTS ที่เหมาะสมกับระบบ เพื่อใช้ในการเลือกใช้ ESTS มีขนาดที่เพียงพอสำหรับการสำรองให้กับขบวนรถไฟที่ติดตั้ง ESTS และรถไฟขบวนอื่นที่ไม่ติดตั้งอย่างน้อยหนึ่งขบวนเมื่อเกิดสถานการณ์ไฟดับ ดังนั้น การทดสอบนี้จะนำไปสู่การพิสูจน์ความเป็นไปได้ของแนวคิดการแบ่งปันพลังงานระหว่างขบวนรถไฟด้วย ESTS ตามที่ได้นำเสนอข้างต้น



รูปที่ 9 สถานีตลอดเส้นทางให้บริการรถไฟฟ้ายูเอเอส สายสีลม

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 48
The 48th Electrical Engineering Conference (EECON-48)
วันที่ 19-21 พฤศจิกายน 2568 ณ โรงแรมสุรินทร์ จังหวัดเชียงใหม่



รูปที่ 10 การใช้พลังงานของการเคลื่อนที่ของรถไฟหนึ่งขบวน

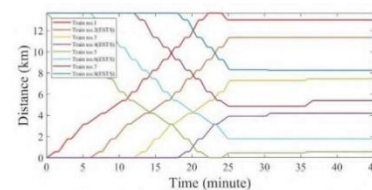
จากผลการจำลองในรูปที่ 10 พบว่าการใช้พลังงานของรถไฟในแต่ละช่วงเส้นทางมีผลต่อการออกแบบความจุของ ESTS โดยช่วงที่ใช้พลังงานสูงสุดคือระหว่างสถานี S10 กับ S11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหากเกิดเหตุไฟฟ้าขัดข้องและรถไฟหยุดกลางเส้นทางระหว่างสถานีดังกล่าว ESTS จะต้องสำรองไฟให้รถไฟมากที่สุดเท่ากับ 19 kWh ต่อขบวน ดังนั้น การออกแบบ ESTS นี้ระบบต้องมีความสามารถในการสำรองพลังงานทั้งหมด 38 kWh เพื่อรองรับการขับเคลื่อนรถไฟ 2 ขบวน ทั้งที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งระบบ เมื่อกำหนดให้จำลองระบบรถไฟขบวนสมวลชนมีรถไฟ 8 ขบวน รับบริการด้วยช่วงเวลาห่างกันทุก 6 นาที และจอดพักที่สถานีละ 20 วินาที สำหรับ ESTS จะเริ่มจ่ายพลังงานหลังเกิดไฟฟ้าดับ 5 นาที และสามารถแบ่งปันพลังงานให้รถไฟขบวนอื่นได้ในรัศมีไม่เกิน 3.5 กม. หากระยะเกินกำหนดหรือพลังงานไม่เพียงพอ จะมีการสลับให้ ESTS จากขบวนอื่นมารับหน้าที่แทนเพื่อให้การบริการมีความต่อเนื่อง

จากผลการจำลองสถานการณ์การไฟฟ้าดับโดยทุก ๆ 1 นาทีหลังจากรถไฟทั้งหมดเข้าสู่เส้นทางบริการทั้งหมด 29 ครั้ง พบว่า รถไฟทุกขบวนสามารถอพยพไปยังสถานีที่ใกล้ที่สุดได้สำเร็จ 21 ครั้ง และยังมีรถไฟบางขบวนตกค้าง 8 ครั้ง ซึ่งคิดเป็นอัตราความสำเร็จทั้งหมด 72.41% ผลลัพธ์นี้สนับสนุนว่าแนวคิดการแบ่งปันพลังงานสามารถลดความเสี่ยงการหยุดชะงักในระบบรถไฟขบวนสมวลชนได้อย่างมีนัยสำคัญ แม้จะไม่ได้มีการติดตั้ง ESTS ให้กับรถไฟทุกขบวนก็ตาม ตัวอย่างผลการทดสอบแสดงได้ดังต่อไปนี้

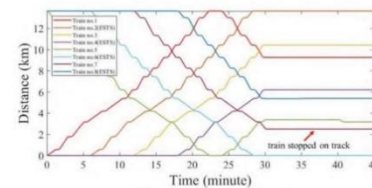
รูปที่ 11 แสดงผลการจำลองสถานการณ์ไฟฟ้าดับ โดยในกรณี (a) ไฟดับนาที่ 25 ESTS ช่วยให้ขบวน 4 และ 8 เคลื่อนที่ จากนั้นแบ่งพลังงานให้ขบวน 3, 5 และ 7 ส่วนในกรณี (b) ไฟดับนาที่ 30 ESTS ขบวน 8 เคลื่อนที่และแบ่งพลังงานให้ขบวน 5 แต่ขบวน 7 ต้องหยุดเนื่องจากไม่มี ESTS ในระยะใกล้ ต่อมารูปที่ 12 แสดงการวิเคราะห์การใช้พลังงานสำรองจาก ESTS ที่ติดตั้งในรถไฟแต่ละขบวนภายใต้สถานการณ์ที่แตกต่างกันในส่วน (a) เป็นกรณีที่รถไฟทุกขบวนสามารถเคลื่อนที่ไปจอดที่สถานีใกล้เคียงได้สำเร็จ ระบบแสดงการทำงานของระบบแบ่งปันพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดย ESTS บนรถไฟขบวน 4 ทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานให้กับขบวน 7 ESTS บนขบวน 6 แบ่งปันพลังงานแก่ขบวน 5 และ ESTS บนขบวน 8 แบ่งปันพลังงานแก่ขบวน 3 ซึ่งยืนยันว่าระบบสามารถดำเนินการตามวัตถุประสงค์ที่ออกแบบไว้ได้ ในทางตรงกันข้าม ส่วน (b) เป็นกรณีที่ยังมีรถไฟบางขบวนต้องหยุดบนเส้นทางให้บริการ ซึ่ง



แสดงให้เห็นข้อจำกัดการแบ่งปันพลังงานของ ESTS โดยมีเพียง ESTS บนรถไฟขบวน 8 เท่านั้นที่ทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานให้กับขบวน 5 ขณะที่ ESTS บนขบวนอื่นไม่ได้มีการใช้พลังงานสำรองแต่อย่างใด การวิเคราะห์ทั้งสองกรณีเผยให้เห็นข้อมูลสำคัญว่า ESTS ของรถไฟแต่ละขบวนมีการใช้พลังงานภายในระบบไม่ถึงครึ่งหนึ่งของความจุทั้งหมด

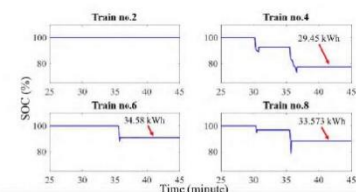


(ก) กรณีที่ขบวนรถทั้งหมดสามารถเคลื่อนที่ไปยังสถานีที่ใกล้ที่สุดได้

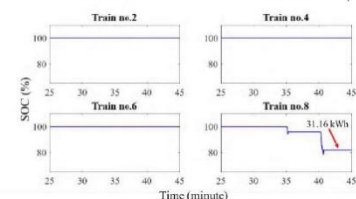


(ข) กรณีที่ขบวนรถบางขบวนหยุดอยู่บนราง

รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและเวลาของการเคลื่อนที่ของขบวนรถในระหว่างที่ไฟฟ้าดับ



(ก) กรณีที่ขบวนรถทั้งหมดสามารถเคลื่อนที่ไปยังสถานีที่ใกล้ที่สุดได้



(ข) กรณีที่ขบวนรถบางขบวนหยุดอยู่บนราง

รูปที่ 12 การใช้พลังงานของแต่ละ ESTS

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 48
The 48th Electrical Engineering Conference (EECON-48)
วันที่ 19-21 พฤศจิกายน 2568 ณ โรงแรมสุรินทร์ จังหวัดเชียงใหม่



5. สรุป

การศึกษานี้นำเสนอแนวคิดการแบ่งปันพลังงานด้วย ESTS ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เพื่อลดจำนวนจำนวนหน่วยติดตั้ง ESTS ที่จำเป็นผ่านกลไกการแบ่งปันพลังงานระหว่างขบวนรถที่ติดตั้ง ESTS กับขบวนรถที่ไม่มีการติดตั้งระหว่างเกิดสถานการณ์ไฟฟ้าดับ แนวทางการติดตั้ง ESTS ให้กับรถไฟฟ้าทุกขบวน ผลการทดสอบจากกรณีศึกษาการไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลมแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถบรรลุอัตราความสำเร็จในการแบ่งปันพลังงาน 72.41% ซึ่งทำให้รถไฟฟ้าทุกขบวนสามารถเดินทางไปถึงสถานีได้หลังเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าดับ ผลการศึกษาดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพเชิงปฏิบัติของแนวคิดการแบ่งปันพลังงานในการเสริมสร้างความมั่นคงและลดความเสี่ยงด้านการหยุดชะงักของระบบขนส่งมวลชนอย่างมีนัยสำคัญ อันนำไปสู่การแสวงหาแนวทางใหม่สำหรับการพัฒนาระบบขนส่งที่มีประสิทธิภาพและความยั่งยืนในระยะยาว นอกจากนี้ การศึกษาในบทความนี้ยังสามารถต่อยอดได้หลากหลายมิติ เช่น ศึกษาการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์เก็บพลังงานต่อสมรรถนะของระบบ การประยุกต์ใช้อุปกรณ์เก็บพลังงานแบบไฮบริดในระบบ เป็นต้น ทั้งหมดนี้มุ่งสนับสนุนการนำ ESTS ไปประยุกต์ใช้จริงในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

เอกสารอ้างอิง

- [1] E. Ratnawati, "MRT as an alternative transportation solution which is environmentally friendly and traffic jam free in Jakarta," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 819, no. 1, July 2021, Article no. 012040, doi:10.1088/1755-1315/819/1/012040.
- [2] M. Eltveld, N. Breyer, J. B. Ingardson, and O. A. Nielsen, "Impacts of long-term service disruptions on passenger travel behaviour: A smart card analysis from the Greater Copenhagen area," in *Proceedings of the Annual Transport Conference at Aalborg University 2021*, Aalborg, Denmark, 2021, pp. 1–6.
- [3] X. Xu, X. Sun, Q. Zhou, X. Jiang, D. Hu, and R. He, "Design and research on the function of lithium-ion batteries emergency traction system for rail vehicles," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 10, no. 12, December 2018, Article no. 1687814018812296, doi:10.1177/1687814018812296.
- [4] D. Yuan, S. Gu, J. Liu, Y. Zhang, and C. Lv, "Design and analysis of emergency self-traction system for urban rail transit vehicles," *Energy Procedia*, vol. 16, pp. 585–591, 2012, doi:10.1016/j.egypro.2012.01.094.
- [5] Y. Nagaura, R. Oishi, M. Shimada, and T. Kaneko, "Battery-powered drive systems: Latest technologies and outlook," *Hitachi Review*, vol. 66, no. 2, pp. 138–144, 2017.
- [6] T. Kulworawanichpong, "Multi-train modeling and simulation integrated with traction power supply solver using simplified Newton-Raphson method," *Journal of Modern Transportation*, vol. 23, pp. 241–251, 2015, doi:10.1007/s40534-015-0086-y.
- [7] K. Mongkoldee, U. Leeton, and T. Kulworawanichpong, "Single train movement modelling and simulation with rail potential consideration," in *Proceedings of the 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, Sapporo, Japan, October 11–13, 2016, pp. 7–12, doi:10.1109/SII.2016.7843967.
- [8] M. F. Robbins, *Ultimate Electronics: Practical Circuit Design and Analysis*, CircuitLab, Inc., 2019. [Online]. Available: <https://ultimaterobotics.com/>. Accessed: June 29, 2024.



บันวิ เช้มกัสดมกต์ ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม เกิดเมื่อวันที่ 19 กรกฎาคม พ.ศ. 2537 ณ จังหวัดกาญจนบุรี ประเทศญี่ปุ่น สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) และวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) จากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2560 และ พ.ศ. 2563 ตามลำดับ ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก ณ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ความสนใจในการวิจัยของเขาคือการออกแบบการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า ระบบขนส่งทางราง ยานยนต์ไฟฟ้า ระบบเก็บพลังงาน และพลังงานหมุนเวียน



นัชชัย กุลวรานิชพงษ์ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา มีความเชี่ยวชาญด้านระบบไฟฟ้ากำลัง ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟ การขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า ระบบการอัดดีสียูธยานยนต์ และการวิเคราะห์คุณภาพพลังงานในระบบขนส่งทางราง เคยมีประสบการณ์ในการวิจัยร่วมกับหน่วยงานภาครัฐและเอกชนทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ มีผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและระบบรางอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาหลักสูตรระดับบัณฑิตศึกษา และให้คำปรึกษาโครงการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบขนส่งมวลชนอีกด้วย

ORIGINAL RESEARCH **OPEN ACCESS**

Emergency Power Sharing by Using a Self-Traction System in a Mass Rapid Transit Railway

 Banri Khemkladmuk¹  | Chanchai Techawatcharapaikul²  | Thanatchai Kulworawanichpong¹ 
¹School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand | ²Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

Correspondence: Thanatchai Kulworawanichpong (thanatchai@gmail.com)

Received: 24 March 2025 | **Revised:** 24 February 2026 | **Accepted:** 8 March 2026

Keywords: energy consumption | energy management systems | load flow

ABSTRACT

Systemwide traction power outages in mass rapid transit systems (MRTSs) can cause trains to stop between stations, leading to service disruption and urgent passenger evacuation requirements. Onboard emergency self-traction systems (ESTSs) can mitigate this risk by enabling a stranded train to reach the nearest station at low speed. However, installing and maintaining ESTS on every train can increase implementation and lifecycle costs, motivating approaches that can ensure evacuation with partial ESTS deployment. This article introduces a power-sharing framework for ESTS in an MRTS. The primary aim is to reduce the number of ESTS units needed by facilitating power sharing between trains equipped with ESTS and those without it, while guaranteeing that all trains can safely and quickly evacuate passengers to the nearest station during a systemwide power outage. This study examines the Bangkok Mass Transit System (BTS) Skytrain Silom Line (dark green line) in Thailand, through computer simulation parameterised by real-world line and operational data, to evaluate the viability of this concept. It analyses variables such as the quantity of trains outfitted with ESTS, the distance from the train to the station where it halted, particular train specifications and additional pertinent aspects. The results reveal that ESTS can efficiently provide backup power to equipped trains and share surplus energy with other trains within the sharing radius with a success rate of 72.41%. This underscores the viability of ESTS operations and aids in the advancement of a more sustainable and efficient MRTS, despite the inherent constraints of ESTS.

1 | Introduction

Over the past decades, mass rapid transit systems (MRTSs) have demonstrated their intrinsic value through exceptionally operational performance [1]. The systems can transport many passengers quickly and efficiently, ensuring punctuality, safety through reliable control and monitoring systems, environmental friendliness by producing zero emissions and more. These performances make MRTS a crucial mechanism that contributes significantly to urban development and enhances the quality of life for individuals in society, especially in large metropolitan areas that face severe traffic congestion issues [2]. However,

although the implementation of MRTS appears to primarily yield positive impacts, resolving and protecting emergency scenarios remains a significant challenge in providing MRTS services [3]. Particularly, inadequate maintenance or malfunctioning equipment can lead to power outages in the system. Power outages frequently lead to mid-route train halts, which can cause passenger discomfort due to darkness, overcrowding and poor ventilation [4, 5]. These have cascading effects on passenger safety, satisfaction and confidence in the reliability of MRTS [6]. Although most modern MRTS use various strategies to manage external factors, they may not be sufficient to ensure the system's safety during large-scale power outages. Therefore,

This is an open access article under the terms of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) License, which permits use and distribution in any medium, provided the original work is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.

© 2026 The Author(s). *IET Energy Systems Integration* published by John Wiley & Sons Ltd on behalf of The Institution of Engineering and Technology and Tianjin University.

a long-term solution to this problem requires investment in improving the electrical infrastructure, regular preventive maintenance and training of employees to effectively handle emergency situations [7, 8].

The emergency self-traction system (ESTS) has been proposed as a promising concept to address this challenge in MRTS. In general terms, ESTS equips trains with onboard high-capacity energy storage devices (ESDs), such as batteries or other energy storage technologies, to store reserve energy during normal operation. When the main power supply fails, the stored energy can be used to provide emergency traction so that the train can continue moving at a reduced speed until it reaches the nearest station, while also supporting essential onboard services such as lighting, ventilation and communication systems. As reported in previous studies, ESTS and related emergency traction schemes can significantly enhance passenger safety and service continuity by avoiding train stops in the middle of the track and by enabling controlled evacuation at platforms [9–15]. At the same time, practical implementation of onboard emergency systems faces several obstacles, including additional investment costs, vehicle space constraints, integration with existing traction equipment and the need for appropriate operational strategies and staff training [16]. Consequently, many existing MRTS lines either lack ESTS entirely or deploy it only on a limited number of trains, which may lead to situations where trains without ESTS remain stranded during a power outage, even though some ESTS-equipped trains still possess unused backup power.

Motivated by the above discussion, the main contributions of this article are threefold. Firstly, this article builds upon previous research on individual-train emergency self-traction systems [9–15], energy-efficiency enhancement through ESS [16–20] and multi-train coordination for energy conservation [21, 22]. This work proposes a network-level ESTS power-sharing concept whereby ESTS-equipped trains serve as a shared backup energy resource to assist nonequipped trains. The concept aims to reduce the requirement for ESTS installation while preserving the ability of all trains to reach the nearest stations for passenger evacuation during a systemwide power outage. Secondly, the feasibility of this proposed concept is studied using an integrated simulation that combines multi-train dynamics, a power network model and a simplified ESTS model representation to quantify evacuation outcomes and backup energy utilisation under network constraints. Thirdly, a BTS Skytrain Silom Line case study is used to demonstrate evacuation performance and system-level utilisation of installed backup energy. Overall, this study consolidates and extends existing directions towards evacuation-oriented, coordinated ESTS operation at the network level, as summarised in Table 1.

Based on the above discussion, this paper is organised as follows: Section 1 provides the introduction and background to the problem, including a review of existing ESTS and ESS applications in MRTS. Section 2 explains the fundamental operating principles of ESTS and the concept of power sharing between trains. Section 3 presents the modelling framework. Section 4

describes the simulation setup and the case study based on the BTS Skytrain Silom Line and reports the numerical results for various power-outage scenarios with and without power sharing. Section 5 concludes the main findings of this research, discusses the practical implications for MRTS operators and gives directions for future work.

2 | ESTS Power-Sharing Concept

Comprehending the fundamental concepts of the ESTS and the notion of power sharing among trains is crucial for facilitating the transfer of stored energy from one train's ESTS to others, so enabling them to go to the nearest station during emergencies, such as widespread power outages. The detailed explanation is as follows.

2.1 | Emergency Self-Traction System

The ESTS is implemented to prevent sudden shutdowns of trains during systemwide power outages. This system provides backup power to specific electrical systems such as lighting, air conditioning and doors, allowing them to continue operating for a short period, ensuring passenger safety by providing air to breathe and preventing passengers from being trapped inside the train while waiting for rescue. Additionally, some systems have the capacity to store sufficient or excess energy to safely propel trains for passenger evacuation to the nearest station before the MRTS completely shuts down [13, 14]. The operation of the ESTS consists of three main components: the ESD, the bidirectional power converter and the control unit [15]. The ESTS initiates operation when the main control system of the MRTS sends a command to the ESTS controller unit. This device subsequently processes and transmits a command to the bidirectional power converter on board the trains, instructing it to either charge or discharge energy into or from the ESD according to the current operating conditions of the MRTS.

The ESTS is designed to support MRTS operation under both normal mains power-supply conditions and systemwide power-outage conditions, and it performs different functions under each condition [23]. Under normal conditions, the bidirectional converter charges the onboard ESD either from the main traction power supply or from regenerative braking, as illustrated in Figure 1a–1b. In addition, some ESTS configurations can dispatch the stored energy during train departure/acceleration to reduce net energy drawn from the supply, operating on a similar principle to conventional ESS-based regenerative-energy utilisation for energy saving, as illustrated in Figure 2 [16–20]. Under power-outage conditions, the ESTS discharges the ESD to provide low-speed self-traction so that the train can reach the nearest station; during this process, the ESD may be partially recharged via regenerative braking, although the recovered energy is relatively limited due to the low operating speed, as illustrated in Figure 3. Furthermore, the ESTS configuration considered in this study is designed to share power with nearby

TABLE 1 | Summary of related work on ESTS and ESS applications in MRTS.

References	Main contribution
[9]	Proposes a highly reliable propulsion architecture with an onboard UPS for ride-through of power disturbances, including topology and control.
[10]	Provides a comprehensive survey of emergency self-running power supply schemes for rail transit vehicles.
[11]	Models and estimates train traction characteristics under emergency traction considering onboard energy storage devices.
[12]	Designs and investigates lithium-ion-battery-based emergency traction functions for rail vehicles.
[13]	Develops functional operation for emergency train running using battery application within traction power supply systems.
[14]	Provides design and analysis of an emergency self-traction system for urban rail transit vehicles.
[15]	Analyses and optimises control strategies for battery-based emergency traction in urban rail vehicles.
[16]	Compares stationary versus onboard ESS for reducing energy consumption in metro networks.
[17]	Proposes energy-efficient train control with onboard ESS considering stochastic regenerative braking energy (RBE).
[18]	Optimises capacity configuration of regenerative braking energy utilisation systems based on power sharing and energy storage.
[19]	Proposes an ESS approach for regulating maximum demand of traction substations.
[20]	Develops a hybrid ESS to improve regenerative braking utilisation and reduce peak traction power in 3 kV DC railways.
[21]	Optimises metro timetables to improve regenerative braking energy utilisation efficiency.
[22]	Develops energy-efficient multi-train scheduling considering passenger flows and station-side utilisation of regenerative energy.
Proposed study	Proposes a network-level ESTS power-sharing concept in which ESTS-equipped trains act as a shared backup resource for nonequipped trains to enable evacuation to the nearest stations during a systemwide power outage.

nonequipped trains through the traction supply network (overhead catenary lines or conductor rails), enabling those trains to continue moving to the nearest stations and thereby facilitating network-level evacuation with partial ESTS deployment, as illustrated in Figure 4.

The operation of the ESTS may vary depending on the specific application in different MRTSs. Nevertheless, the core concept of ESTS operation lies in storing energy to enable train propulsion during emergencies.

2.2 | Principles of Power Sharing Using ESTS

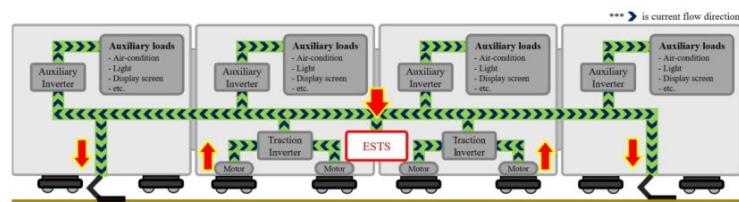
Power sharing between trains is one of the concepts that has been used to manage energy in the MRTS more efficiently and reduce some of the power consumed from the main power supply [17–20]. Two or more trains operating on the same power supply network can carry out this sharing by closely

aligning their headway times in their operating schedules [21, 22, 24, 25]. Because of the various components that ensure effective power sharing of the ESTS, it must have stored backup power in the ESTS greater than its operational needs in emergencies, and the trains involved in power sharing must be within an appropriate proximity distance from the ESTS [26].

Traditional train energy-sharing concepts can be adapted to the ESTS power-sharing mechanism due to their similar structural configurations and operational principles [18, 24]. There are two main stages in the overall sequence of ESTS operation. In Stage 1, the ESTS can be turned on manually or automatically when the main power supply fails. The ESTS then operates in self-traction mode to propel the ESTS-equipped train to the nearest station for passenger evacuation, as illustrated in Figure 5a. When the passengers on this train have been safely evacuated and sufficient backup power remains, the system transitions to Stage 2, as shown in Figure 5b. In this stage, the ESTS switches to power-sharing mode and injects power via conductor rails or overhead



(a) Charging from the main power supply



(b) Charging from regenerative braking

FIGURE 1 | The charging ESD of the ESTS operates under normal mains power supply conditions.

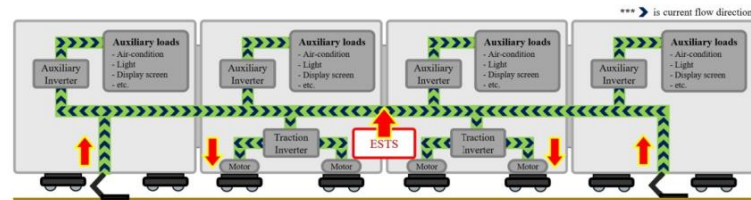


FIGURE 2 | The discharging ESD to the propulsion system of the ESTS operates under normal mains power supply conditions.

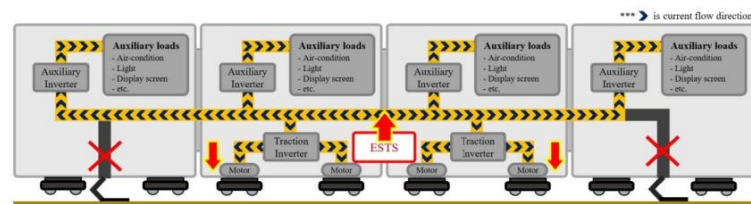


FIGURE 3 | Using energy from the ESTS to propel the train during a power outage.

transmission wires to support other stopped trains within the permitted sharing distance so that they can reach the next station and safely evacuate passengers. After all trains have arrived at stations and no passengers remain onboard, the ESTS power-

sharing process is terminated and the system is shut down until new control commands are issued or the main power supply is restored. This two-stage power-sharing sequence is summarised in the flowchart in Figure 6.

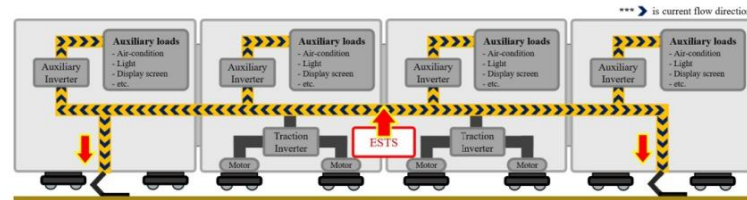
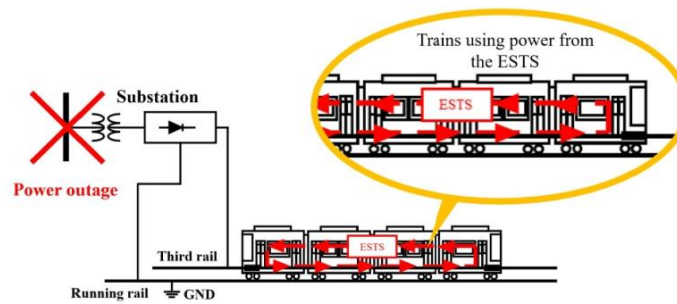
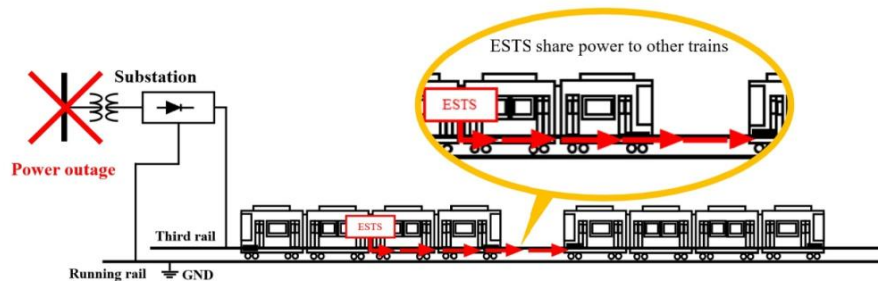


FIGURE 4 | Energy sharing from the ESTS during a power outage.



(a) Stage 1 – self-traction operation



(b) Stage 2 – power-sharing operation

FIGURE 5 | Principles of power sharing using ESTS.

3 | Train Movement Calculation in MRTS

The feasibility analysis of applying the concept of power sharing using the ESTS in MRTS will be based on a model developed through mathematical equations implemented in computer programming. This model incorporates the movement of MRTS, the operation of the power supply system and simplified ESTS calculations. The model is parameterised using real-world line and operational data from the BTS Skytrain Silom Line case

study, and the proposed concept is assessed through computer simulation as follows.

3.1 | The Movement of MRTS Model

The calculation of train movement involves several forces that need to be considered. These forces can be described using a free-body diagram of the train's motion, according to Newton's second law

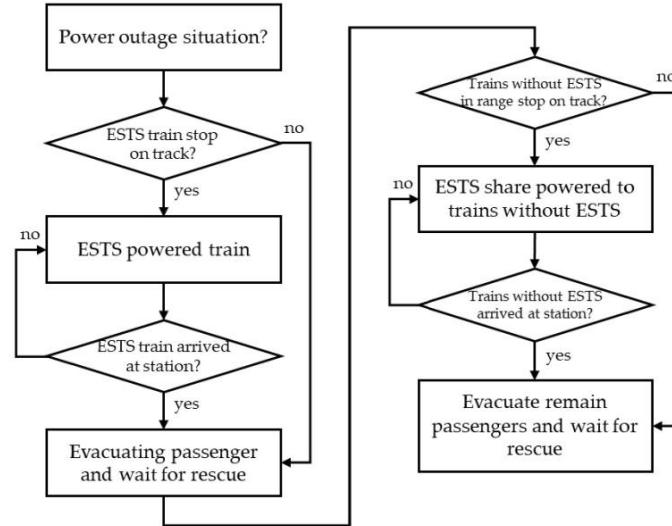


FIGURE 6 | Process of power sharing using ESTS.

of motion, as illustrated in Figure 7 [27] and shown in Equation (1). The train with an effective vehicle mass (M_{eff} , kg) will start moving by acceleration (α , m/s^2) when the pulling force (F_T , N) is strong enough to overcome the resistance (F_R , N). The T_R comprises three main resistance forces: the gravity or gradient forces (F_{grad} , N), the air resistance or dynamic drag forces (F_{drag} , N) and the rolling resistance or frictional forces (F_{RR} , N). However, usually, these forces are calculated using the testing factor provided by the MRTS manufacturer in Equation (2), which is named the Davis equation here. v represents the train speed (km/h), whereas A (kN), B (kNh/km) and C (kNh²/km²) are the Davis coefficients, whose equations are explained in detail in Refs. [27–30].

$$F_T - T_R = M_{eff}\alpha. \quad (1)$$

$$T_R = A + Bv + Cv^2. \quad (2)$$

Forces exerted on a train directly influence the control of its movement characteristics and speed. Consequently, train motion simulations must incorporate these forces to obtain results that closely approximate true values with the highest possible accuracy. Generally, train movement consists of four operational modes: accelerating mode, constant speed mode, coasting mode and braking mode, as illustrated in Figure 8 [29, 31].

Throughout the movement of the train, the speed and position of the train will be updated according to Equations (3) and (4), respectively. Here, v_i and v_f represent the train's speed before and after the update, s_i and s_f represent the train's position before and after the update, and Δt is the time step (set to 0.01 s in this study).

$$v_f = v_i + \alpha\Delta t. \quad (3)$$

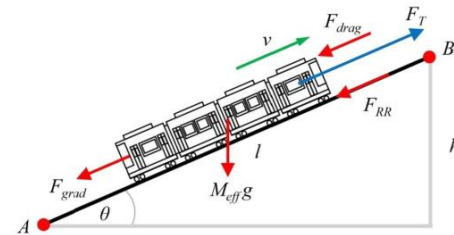


FIGURE 7 | Free-body diagram of train motion calculation.

$$s_f = s_i + v_i\Delta t + \frac{1}{2}\alpha\Delta t^2. \quad (4)$$

The main aspect of train movement simulation for analysing power sharing using the ESTS is the calculation of power and energy consumption for each train. The train power consumption (P_T , W) consists of tractive power (P_{ta} , W), auxiliary power (P_{aux} , W) and regenerative braking power (P_{reg} , W), as in Equation (5). Equation (6) shows that P_{ta} depends on the train's F_T , v and efficiency (η) of converting electrical energy to mechanical energy by the traction motor. P_{aux} is consumed by the train's lighting, air conditioning and signalling equipment. Additionally, the train energy consumption (E_T , Wh) can be calculated using Equation (7), where $E_{T,i}$ and $E_{T,f}$ represent the energy consumption before and after the update, respectively [27].

$$P_T = P_{ta} + P_{aux} + P_{reg} \quad (5)$$

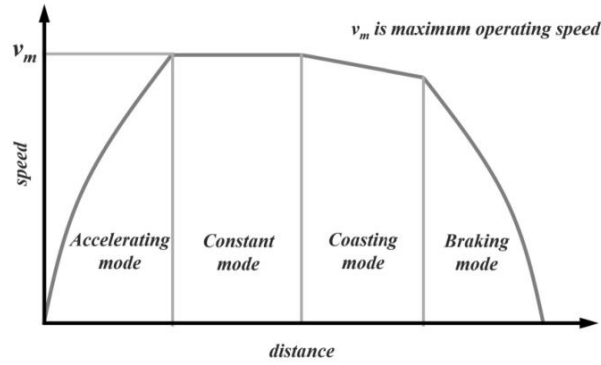


FIGURE 8 | Operational modes of train.

$$P_T = \begin{cases} P_{ta} = \frac{F_T}{\eta} \times v, & P_{reg} = 0 & ; \text{if } F_T \geq 0 \\ P_{ta} = 0, & P_{reg} = F_T \eta \times v & ; \text{if } F_T < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$E_{T,i} = E_{T,i} + P_T \Delta t. \quad (7)$$

All Equations (1–4) in this subsection are not only fundamental for reproducing realistic train motion in the simulations but are also used to derive the traction power demand and energy consumption of each train. Specifically, the simulated speed and position are combined with the traction and auxiliary power models in Equations (5–7) under different operating modes. The resulting power and energy profiles determine how much backup power is required from the ESTS for each train to reach the nearest station under a power-outage scenario, and they are subsequently used in Sections 3.2 and 3.3.

3.2 | The DC Power Supply System in the MRTS Model

The MRTS in urban areas typically operate using DC voltage levels of 600 V or 750 V for train propulsion. Modelling such systems requires incorporating the operational characteristics and structural components of the DC power supply infrastructure. These components include (1) traction substations equipped with diode rectifiers to prevent reverse current flow back into the substation, (2) conductor rails used to supply current from the substation to trains and, in this ESTS, to provide a path for energy sharing to other trains, (3) running rails that serve as the return path for the current and (4) insulation installed to electrically isolate the running rails from the ground [28]. Considering these elements is essential for developing a simulation model that accurately and realistically replicates system performance [29].

The traction substation is represented in the model using Norton equivalent source, which includes a short-circuit current source (I_S , A) and a resistance (R_S , Ω) that characterise the substation. The substation is connected to the conductor rail (C)

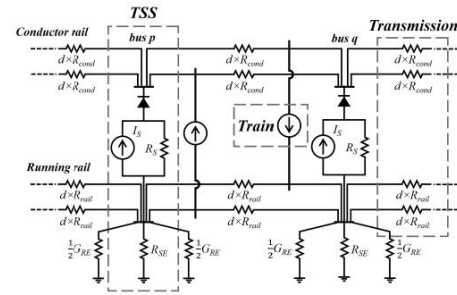


FIGURE 9 | Modelling of DC power supply system in MRTS.

through an ideal diode and to the running rail (R), which has a resistance to ground (R_{SE} , Ω). This configuration is in the TSS section, as illustrated in Figure 9 [27, 28].

The analysis of power flow issues in a highly complex DC power supply system necessitates the use of appropriate computational techniques. This study adopts the current injection method (CIM) to analyse the parameters at various system buses. The process begins by determining the initial voltage at each bus to be zero and formulating the nodal analysis equations. The authors in Refs. [27, 28] provide a detailed explanation of the conductance matrix $[G]$.

$$[I] = [G][V]. \quad (8)$$

The current matrix $[I]$ in Equation (8) is determined by combining the currents from the traction substations and the train current (I_T , A). The I_T is calculated as the ratio of the train's power demand (P_T , W) to the voltage (V_T , V) at the bus where the train is located. From the above parameters, the equations will be solved to determine the voltage matrix $[V]$ for the system buses, which will be processed iteratively until the voltage deviation at each bus is less than the defined tolerance.

3.3 | The Emergency Self-Traction System Model

The simulation that examines the power supply of the ESTS installed on trains, as shown in Figure 2 of Ref. [32], can be run with a simplified battery model that is based on the Norton equivalent circuit in Refs. [32, 33]. The model parameters are interrelated according to Equations (9–12), where I_{ESTS} is the ESTS current (A), E_{ESTS} is the energy available from the ESTS for utilisation (kWh), R_{ESTS} is the internal resistance of the ESTS (Ω), V_{ESTS} is the ESTS voltage (V), and I_d is the load current (A).

$$I_{ESTS} = \frac{E_{ESTS}}{V_{ESTS} \times 3600} \quad (9)$$

$$R_{ESTS} = \frac{V_{ESTS}}{I_{ESTS}} \quad (10)$$

$$I_d = \frac{P_T}{V_{ESTS}} \quad (11)$$

$$V_{ESTS} = R_{ESTS} \times (I_{ESTS} - I_d) \quad (12)$$

4 | Simulation and Results

This simulation is divided into two parts: the simulation of train movement to design a suitable ESTS for the system and the simulation of power sharing of the ESTS during a power outage, as detailed below.

4.1 | The Simulation of Train Movement to Design Suitable ESTS for the System

The simulation of power sharing between trains using the ESTS in this article selects the Bangkok Mass Transit System (BTS) Skytrain Silom Line (dark green line) in Thailand as a case study, as specifically listed in Table 1 of Ref. [34]. This MRTS has a total service distance of 13.65 km, comprising 14 stations (W1–S12) and 7 substations with a 750-V supply, as illustrated in Figure 10 [27, 34]. The train dispatch timetables consist of two patterns: During peak hours, trains are dispatched every 3 min, and during regular operating hours, trains are dispatched every 6 min. This simulation is based on typical operating hours, where each train stops at each station for 20 s. When averaging the number of trains running in the up-track direction (from

Station W1 to S12) and the down-track direction (from Station S12 to W1), there will be a total of 4 trains in each direction.

When simulating the movement of the MRTS using the model developed in MATLAB/m-file, the train's movement characteristics and energy consumption during operation on each section of the service route are determined. Figure 11 shows the train speed profile in service, where the red line represents the speed limit for each section and the blue line represents the actual speed achieved by the train. Figure 12 shows the energy consumed while the train moves between stations, where circular markers indicate the maximum energy consumption points. The maximum energy consumption occurs between Stations S10 and S11 (between distances 11.346–13.009 km) and is calculated as 38.07 kWh from the difference between initial and final energy. These energy consumption data are critical for determining the required capacity of the ESTS, which must provide sufficient backup power for both the train equipped with it and at least one additional train requiring power sharing during an outage, demonstrating the feasibility and effectiveness of the proposed power-sharing principle using the ESTS, as detailed in this article.

Based on the maximum energy consumption calculated above, the optimal ESTS capacity is found by multiplying the number of trains that need power from the ESTS (two trains, one with ESTS and one without) by half of the energy needed for a train to travel the longest route, which in the worst case of a power outage is 19 kWh (half of 38 kWh). Consequently, the ESTS is designed to have a minimum capacity of 38 kWh to ensure sufficient energy storage for MRTS operations under the specified conditions, considering the worst-case scenario in which a train equipped with the ESTS and another train requiring power sharing simultaneously stop at the midpoint of the longest section of the route.

After the determination of optimal capacity and the specifications of the lithium titanium oxide (LTO) battery (i.e., popularly used for train propulsion [35, 36]), the ESTS was designed to achieve feasible parameters and refers to specifications specified by Toshiba's product example data [37]. The chosen ESTS has a 52-kWh structure with a total of 981 battery modules in the system (3 in parallel/327 in series). The installation of the ESTS on the train resulted in an increased load of 539.55 kg, leading to higher energy consumption during the train's operation. However, the

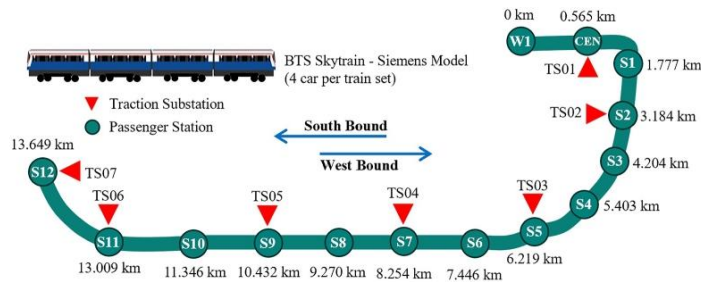


FIGURE 10 | List of passenger stations.

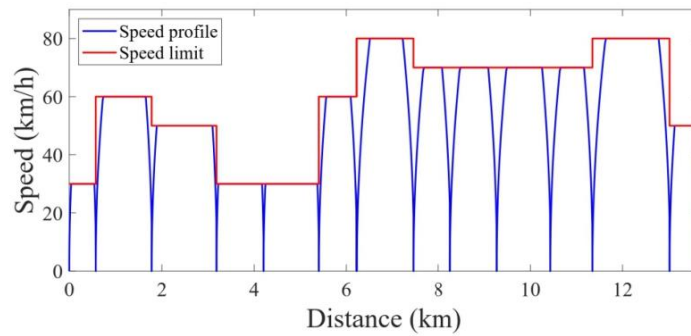


FIGURE 11 | The train speed profile in service.

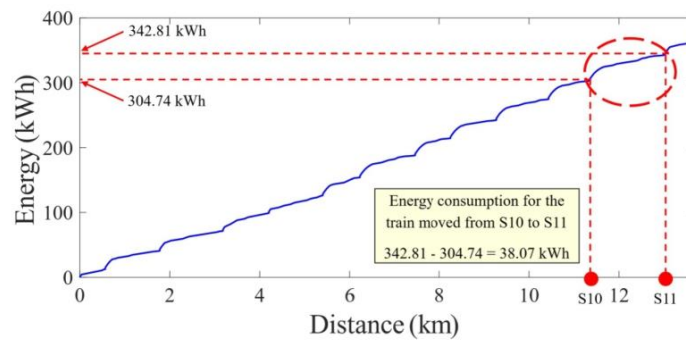


FIGURE 12 | Energy consumption of train movement.

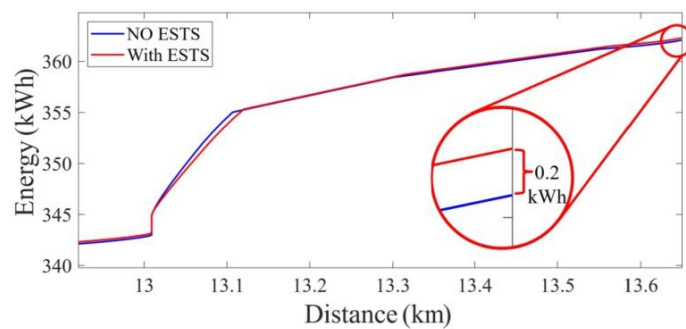


FIGURE 13 | Comparison of energy consumption before and after ESTS installation.

increase in energy consumption is only 0.2 kWh above normal. Therefore, the implementation of the ESTS has a small impact on energy efficiency, as illustrated in Figure 13.

Furthermore, a comparison of train propulsion energy consumption at different speeds while incorporating the regenerative

braking function reveals that higher speeds lead to greater energy recovery from braking. Therefore, the operation of the train powered by the ESTS is constrained to the maximum service speed specified, as illustrated in Figure 11. However, within the speed range of 40–60 km/h, energy consumption remains relatively consistent, as illustrated in Figure 14.

4.2 | Simulation of Power Sharing Using ESTS

This simulation samples power-outage scenarios at one-minute intervals, starting when all trains enter the service route and ending when the first train completes a round trip between the

departure and destination stations. This time window represents a balanced proportion of trains equipped with ESTS and those without. Subsequently, the ESTS begins supplying backup power to the equipped trains 5 min after the occurrence of a power outage. Once these trains have completely moved to the nearest

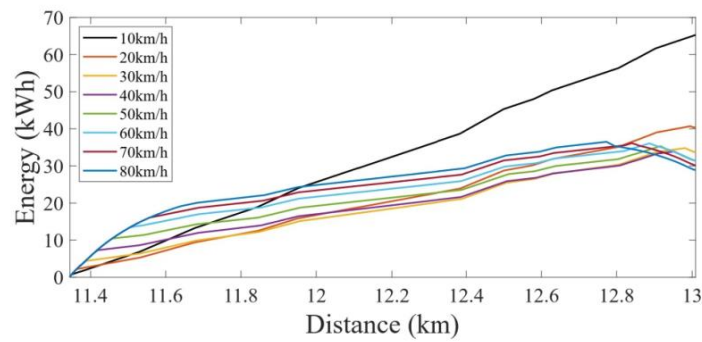
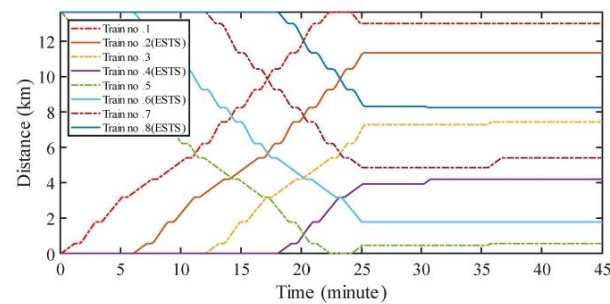
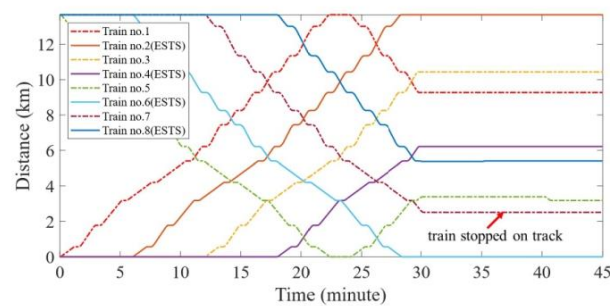


FIGURE 14 | Energy consumption of trains at different speeds.

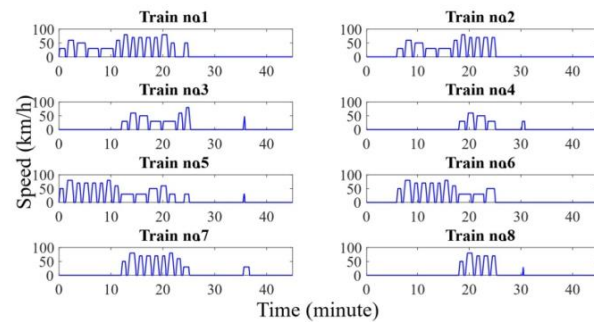


(a) Case where all trains can move to the nearest stations

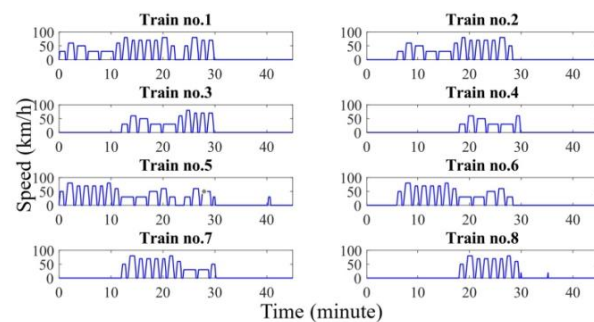


(b) Case where some trains stopped staying on the track

FIGURE 15 | Position-time relationship of train movement during a power outage.



(a) Case where all trains can move to the nearest stations



(b) Case where some trains stopped staying on the track

FIGURE 16 | Speed-time relationship of train movement during a power outage.

station, the ESTS switches to power-sharing mode and allocates the remaining energy to other trains in need of assistance. The maximum service distance for power sharing is set to 3.5 km along the track between an ESTS-equipped train and another train, due to the limitations of DC power transmission [26]. If the backup power capacity of an ESTS is insufficient or the service distance for power sharing exceeds this range, the responsibility for power sharing is transferred to other ESTS units within the same MRTS network.

Figures 15 and 16 illustrate the operation details of the MRTS with ESTS during a power outage using graphical representations of the position-time and speed-time relationships of each train along the service route, which provide a comprehensive understanding of the situation. In Case (a), all trains successfully move to the nearest stations. This is observed from changes in train positions and the various velocities during movement. After a power outage, Trains 4 and 8 initially move to the nearest stations, drawing backup power from their onboard ESTS at around minute 30, whereas Train 6 is already stopped at

a station. Subsequently, the ESTS on Train 4 shares power with Train 7, the ESTS on Train 6 shares power with Train 5, and the ESTS on Train 8 shares power with Train 3 at around minute 35. The remaining trains are already stationary at stations and therefore do not require additional energy. In Case (b), some trains remain stopped on the track. Train 8 first moves to the nearest station at around minute 35 using its own ESTS and then shares its remaining energy with Train 5 at around minute 40. However, Train 7 remains on the track because it is outside the permitted range for power sharing using ESTS. The result can be seen from the position of Train 7, which stays almost unchanged throughout the power-outage period.

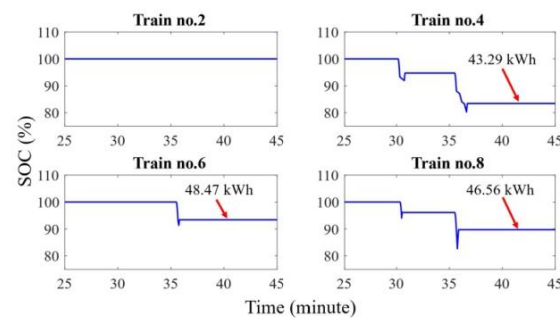
The utilisation of backup power in each ESTS-equipped train differs between the two power-outage cases. In Case (a), the ESTS units on Trains 4 and 8 are used for both self-traction and power-sharing, whereas the ESTS on train six operates only in power-sharing mode. In Case (b), only the ESTS on train eight is used for self-traction and power-sharing modes. In both cases, the energy drawn from each ESTS remains below 50% of its

installed capacity, suggesting that some reduction in ESTS capacity may be feasible in future implementations, as illustrated in Figure 17.

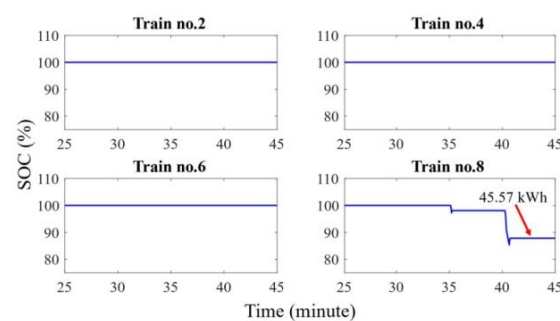
The simulation of ESTS operation at various points during one round-trip cycle with all trains in service shows clear differences between cases with and without power sharing. In a normal ESTS installation where each unit supplies only its host train, ESTS-equipped trains generally reach the nearest stations, whereas several nonequipped trains remain stranded between stations until the power supply is restored. Applying the proposed ESTS power-sharing strategy significantly reduces the number of stranded trains. The overall operational success rate, defined as the proportion of power-outage situations in which all trains can reach the nearest stations, reaches 72.41%, as illustrated in Figure 18. These results demonstrate that ESTS power sharing can substantially mitigate the problem of passengers being trapped inside trains or facing other adverse conditions during main power supply outages. However, nonequipped trains may remain on the track due to their location outside the permissible range for

receiving power from any ESTS-equipped train. This limitation suggests that further research is needed on the placement of ESTS units and train movement control strategies in MRTS operations to enhance the effectiveness of ESTS power sharing in the future. To support the further application of the findings of this article in existing MRTS operations, Table 2 compares the proposed method with previous studies on ESTS and ESS for emergency traction in MRTS [9–16].

As summarised in Table 2, most related studies focus on single-train emergency operations or ESS designs for energy savings in normal service [38]. Although several studies consider power-outage scenarios, none of them implement onboard power sharing between multiple trains in an MRTS network. In contrast, the proposed study considers power-outage scenarios involving both ESTS-equipped and nonequipped trains on a real MRTS line and introduces an ESTS power-sharing concept in which equipped trains support other trains within a defined distance. This study fills a gap by quantifying backup-energy usage and network-level evacuation performance.



(a) Case where all trains can move to the nearest stations



(b) Case where some trains stopped staying on the track

FIGURE 17 | Energy usage of each ESTS.

Train movement using ESTS backup energy during power outages

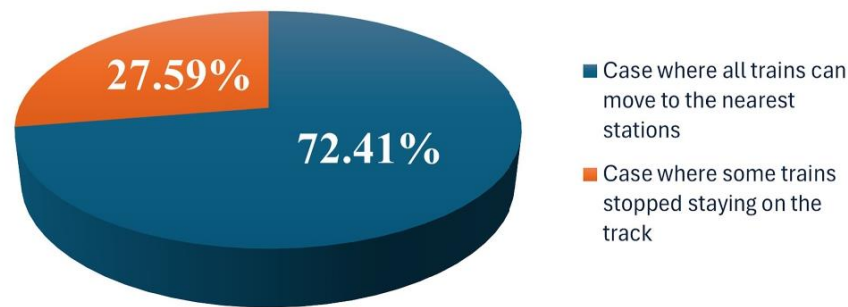


FIGURE 18 | Operational success rate of ESTS power sharing.

TABLE 2 | Comparison of the proposed study with related studies.

References	Article focus	Power outage	System	Method	Power sharing
[9]	Onboard UPS/propulsion ride-through for a single train	Yes	Single-train	Laboratory	No
[10]	Survey of emergency self-running power supply schemes	Yes	Single-train	Review	No
[11]	Emergency traction modelling considering onboard ESD	Yes	Single-train	Simulation	No
[12]	Li-ion battery emergency traction system function (design study)	Yes	Single-train	Simulation	No
[13]	Battery application for emergency train running within traction power supply	Yes	Single-train	Field test	No
[14]	ESTS design and analysis	Yes	Single-train	Simulation	No
[15]	Optimised control of emergency traction using storage battery	Yes	Single-train	Simulation	No
[16]	Stationary versus onboard ESS for metro energy-consumption reduction	No	Network-level	Simulation	No
[17]	Energy-efficient train control with onboard ESS	No	Single-train	Simulation	No
[18]	Regenerative braking energy utilisation system sizing based on power sharing and energy storage	No	Network-level	Simulation	Yes
[19]	ESS for regulating maximum demand of traction substations	No	Network-level	Simulation	No
[20]	Hybrid ESS for regenerative braking utilisation and peak power decrease	No	Network-level	Simulation	No
[21]	Metro timetable optimisation for improving regenerative braking energy utilisation	No	Network-level	Simulation	Indirect (coordination via scheduling)
[22]	Energy-efficient multi-train scheduling with passenger flows and station-side utilisation of regenerative energy	No	Network-level	Simulation	Indirect (coordination via scheduling)
This work	Network-level ESTS power sharing in MRTS	Yes	Network-level	Simulation	Yes (ESTS power sharing between trains)

5 | Conclusion

The concept of power sharing between trains using ESTS has been presented in this article with the aim of minimising the number of ESTS installations in MRTS while preserving the capability to evacuate passengers to the nearest stations during power outages. The analysis and simulations show that ESTS units can effectively share power through the existing conductor rail system with other trains located within the permitted service distance and can provide sufficient backup power for equipped trains, yielding an overall operational success rate of 72.41% in the studied scenarios. Although the current scheme is constrained by the limited power-sharing distance and by the fact that each ESTS can support only one additional train at a time, the results indicate that the proposed approach can substantially alleviate the problem of stranded trains and trapped passengers during outages. Overall, power sharing through the ESTS can reduce installation and maintenance costs while also increasing the flexibility of energy management within the system by utilising power recovered through regenerative braking. Promoting the use of ESTS in MRTS therefore has the potential to enhance safety, reliability and affordability and to contribute to the development of more sustainable MRTS.

Despite these benefits, this study has several limitations that point to directions for future research. First, the ESTS is modelled using a simplified equivalent-circuit representation without explicitly considering detailed aspects such as protection coordination, converter dynamics, control features etc. Second, the train movement and energy models do not account for variations in passenger loads, degraded track conditions and detailed auxiliary load profiles. Finally, all results are obtained through simulation, and hardware-in-the-loop experiments, as well as field tests, will be required to validate the proposed framework and address practical issues such as communication delays, protection settings and safety constraints before deploying ESTS power sharing in real MRTS networks.

Funding

This work was supported by Suranaree University of Technology (SUT), Thailand (Research and Development Fund) (Grant IRD7-711-68-12-61) and Thailand Science Research and Innovation (TSRI), and National Science, Research and Innovation Fund (NSRF) (Grant FRB660073/0164).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

Data Availability Statement

The data that support the findings of this study are available upon request from the corresponding author. The data are not publicly available due to privacy or ethical restrictions.

References

1. C. Wu, S. Lu, F. Xue, L. Jiang, M. Chen, and J. Yang, "A Two-Step Method for Energy-Efficient Train Operation, Timetabling, and On-board Energy Storage Device Management," *IEEE Transactions on*

Transportation Electrification 7, no. 3 (September 2021): 1822–1833, <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3059111>.

2. C. Wu, S. Lu, F. Xue, L. Jiang, and M. Chen, "Optimal Sizing of Onboard Energy Storage Devices for Electrified Railway Systems," *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 6, no. 3 (September 2020): 1301–1311, <https://doi.org/10.1109/TTE.2020.2996362>.

3. Y. Jiang, R. Zhang, and B. Wang, "Scenario-Based Approach for Emergency Operational Response: Implications for Reservoir Management Decisions," *International Journal of Disaster Risk Reduction* 80, no. 1 (October 2022): 103192, <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103192>.

4. S. Lin, X. Sun, Q. Yu, D. Feng, and Z. He, "Risk Assessment for Traction Power Supply System Considering the Influence of Multiple Meteorological Factors," *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 9, no. 2 (June 2023): 2645–2658, <https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3212054>.

5. Y. Ying, Z. Tian, M. Wu, Q. Liu, and P. Tricoli, "Capacity Configuration Method of Flexible Smart Traction Power Supply System Based on double-layer Optimization," *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 9, no. 3 (Sept. 2023): 4571–4582, <https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3244551>.

6. N. Chovančíková and Z. Dvořák, "Effect of a Power Failure on Rail Transport," *Transportation Research Procedia* 40 (July 2019): 1289–1296, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.179>.

7. C. Wang, C. Zhang, L. Luo, X. Qi, and J. Kong, "Optimal Resilience and Risk-Driven Strategies for Pre-Disaster Protection of Electric Power Systems Against Uncertain Disaster Scenarios," *Energies* 17, no. 15 (June 2024): 3619, <https://doi.org/10.3390/en17153619>.

8. J. Luc, S. Gao, X. Wei, Z. Tian, and X. Wang, "Parallel-Reinforcement-Learning-Based Online Energy Management Strategy for Energy Storage Traction Substations in Electrified Railroad," *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 10, no. 1 (March 2024): 2112–2123, <https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3288639>.

9. H. Mohammadi Pirouz and A. Hajizadeh, "A Highly Reliable Propulsion System With Onboard Uninterruptible Power Supply for Train Application: Topology and Control," *Sustainability* 12, no. 10 (May 2020): 3943, <https://doi.org/10.3390/su12103943>.

10. Y. Zhu, T. Qiu, J. Gao, S. Li, and L. Diao, "A Survey of Emergency Self-Running Power Supply Schemes for Rail Transit Vehicles," in *Proceedings of the 9th Frontier Academic Forum of Electrical Engineering Lecture Notes in Electrical Engineering*, (2021), 185–202.

11. J. Wang, Y. Hu, D. Huang, Y. Zhang, and J. Fang, "Modeling and Estimation of Train Traction Characteristics Under Emergency Traction Considering On-Board Energy Storage Devices," in *2023 IEEE 12th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS)*, (2023), 350–355.

12. X. Xu, X. Sun, Q. Zhou, X. Jiang, D. Hu, and R. He, "Design and Research on the Function of Lithium-Ion Batteries Emergency Traction System for Rail Vehicles," *Advances in Mechanical Engineering* 10, no. 12 (December 2018): 1687814018812296, <https://doi.org/10.1177/1687814018812296>.

13. H. Takahashi, Y. Kume, K. Honda, H. Kawatsu, J. Kaminishi, and Y. Shimizu, "The Function Development for Emergency Train Running by Battery Application in Traction Power Supply System," in *2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, (2016), 1137–1140.

14. D. Yuan, S. Gu, J. Liu, Y. Zhang, and C. Lv, "Design and Analysis of Emergency Self-Traction System for Urban Rail Transit Vehicles," *Energy Procedia* 16, no. Part A (2012): 585–591, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.094>.

15. K. Wang, Q. Ge, and Y. Li, "Analysis and Optimized Control of Emergency Traction by Storage Battery for Urban Rail Transit Vehicle," in *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, (2014), 175–179.

16. R. Barrero, X. Tackoen, and J. van Mierlo, "Stationary or Onboard Energy Storage Systems for Energy Consumption Reduction in a Metro Network," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit* 224, no. 3 (April 2010): 207–225, <https://doi.org/10.1243/09544097JRR2322>.
17. C. Wu, S. Lu, Z. Tian, F. Xue, and L. Jiang, "Energy-Efficient Train Control With Onboard Energy Storage Systems Considering Stochastic Regenerative Braking Energy," *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 11, no. 1 (2025): 257–274, <https://doi.org/10.1109/TTE.2024.3389960>.
18. F. Zhou, Z. Tang, D. Tan, and Y. Xie, "Capacity Configuration Optimization of Regenerative Braking Energy Utilization System for Electrified Railways Based on Power Sharing and Energy Storage," *Electric Power Systems Research* 239 (2025): 111275, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.111275>.
19. F. Zhou, Z. Tang, X. Zhang, L. Chou, and D. Tan, "An Energy Storage System for Regulating the Maximum Demand of Traction Substations," *Energies* 18, no. 1 (2025): 131, <https://doi.org/10.3390/en18010131>.
20. A. Szlag, W. Jefimowski, T. Maciolek, A. Nikitenko, M. Wiecezorek, and M. Lewandowski, "Hybrid Energy Storage System for Regenerative Braking Utilization and Peak Power Decrease in 3 kV DC Railway Electrification System," *Electronics* 14, no. 9 (2025): 1752, <https://doi.org/10.3390/electronics14091752>.
21. Z. Zhang, H. Zhao, X. Yao, Z. Xing, and X. Liu, "Metro Timetable Optimization for Improving Regenerative Braking Energy Utilization Efficiency," *Journal of Cleaner Production* 450 (2024): 141970, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141970>.
22. Q. Xu, W. Liu, X. Zhang, Z. Tian, and H. Geng, "Energy-Efficient Multi-Train Scheduling Considering Dynamic Passenger Flows and Station-Side Utilization of Regenerative Energy," *Energy* 340 (2025): 139301, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139301>.
23. Y. Nagaura, R. Oishi, M. Shimada, and T. Kaneko, "Battery-Powered Drive Systems: Latest Technologies and Outlook," *Hitachi Review* (2017): 138–144.
24. X. Sun, H. Lu, and H. Dong, "Energy-Efficient Train Control by Multi-Train Dynamic Cooperation," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 18, no. 11 (November 2017): 3114–3121, <https://doi.org/10.1109/ITITS.2017.2682270>.
25. J. Chen, Y. Zhao, M. Wang, K. Wang, Y. Huang, and Z. Xu, "Power Sharing and Storage-Based Regenerative Braking Energy Utilization for Sectioning Post in Electrified Railways," *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 10, no. 2 (2024): 2677–2688, <https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3295089>.
26. M. S. Elbelkasi, E. Badran, and M. Abdel-Rahman, "Overview of DC and AC Electric Railway Systems Considering Energy Efficiency Enhancement Methods," *Port-Said Engineering Research Journal* 24, no. 1 (March 2019): 128–140, <https://doi.org/10.21608/psrj.2019.18206.1012>.
27. C. Sumpavakup, S. Suwannakijborihan, T. Ratniyomchai, and T. Kulworawanichpong, "Peak Demand Cutting Strategy With an On-Board Energy Storage System in Mass Rapid Transit," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering* 42, no. 1 (February 2018): 49–62, <https://doi.org/10.1007/s40998-018-0048-6>.
28. T. Kulworawanichpong, "Multi-Train Modeling and Simulation Integrated With Traction Power Supply Solver Using Simplified Newton–Raphson Method," *Journal of Modern Transportation* 5, no. 6 (October 2015): 241–251, <https://doi.org/10.1007/s40534-015-0086-y>.
29. M. Chymera and C. J. Goodman, "The Calculation of Train Performance," in *IET 13th Professional Development Course on Electric Traction Systems*, (2014), 1–13.
30. X. Li and Y. Liu, "A Hybrid Data and Mechanism Model-Driven Digital Twin Modelling Approach for Novel Traction Power Systems," *Urban Rail Transit* 11, no. 2 (2025): 221–233, <https://doi.org/10.1007/s40864-024-00236-2>.
31. S. Watanabe and T. Koseki, "Train Group Control for Energy-Saving DC-Electric Railway Operation," in *2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA)*, (2014), 1334–1341.
32. C. Jobsoongnarn, T. Ratniyomchai, and T. Kulworawanichpong, "Energy Consumption Study of Rapid Charging of Catenary Free Light Rail Transit," in *2020 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)*, (2020), 13–16.
33. G. Cipolletta, A. Delle Femine, D. Gallo, M. Luiso, and C. Landi, "Design of a Stationary Energy Recovery System in Rail Transport," *Energies* 14, no. 9 (May 2021): 2560, <https://doi.org/10.3390/en14092560>.
34. 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," *Energy Procedia* 138 (October 2017): 795–800, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.070>.
35. J. Olmos, I. Gandiaga, D. Lopez, X. Larrea, T. Nieva, and I. Aizpuru, "Li-Ion Battery-Based Hybrid Diesel-Electric Railway Vehicle: In-Depth Life Cycle Cost Analysis," *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 71, no. 6 (June 2022): 5715–5726, <https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3128754>.
36. M. Saeed, F. Briz, J. M. Guerrero, et al., "Onboard Energy Storage Systems for Railway: Present and Trends," *IEEE Open Journal of Industry Applications* 4 (2023): 238–259, <https://doi.org/10.1109/OJIA.2023.3293059>.
37. Toshiba, *SCiB™ Rechargeable Lithium-ion Battery Catalog*, Toshiba Corporation, 2023. Accessed: Jan. 27, 2025, <https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/battery/scib.html>.
38. J. Yuan, L. Peng, H. Zhou, D. Gan, and K. Qu, "Recent Research Progress and Application of Energy Storage System in Electrified Railway," *Electric Power Systems Research* 226 (2024): 109893, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109893>.

25168401, 2026, 1, Downloaded from <https://researchonline.ljbrary.wiley.com/doi/10.1049/esj2.70040>. By SEA ORCID (Thailand). Wiley Online Library on [14/04/2026]. See the Terms and Conditions (<https://onlinelibrary.wiley.com/terms-and-conditions>) on Wiley Online Library for rules of use. OA articles are governed by the applicable Creative Commons License