

บทที่ 5

การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

5.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอการจำลองการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้าด้วยระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน ESTS ในระดับโครงข่ายระบบจ่ายไฟเดียวกัน โดยมุ่งประเมินความเป็นไปได้ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าจากขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS ไปยังขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS เพื่อสนับสนุนการอพยพผู้โดยสารไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดของรถไฟฟ้าทุกขบวนแม้เกิดสถานการณ์ไฟดับทั้งโครงข่าย โดยแนวคิดนี้มีความสำคัญต่อการลดความจำเป็นในการติดตั้ง ESTS จำนวนมากภายในระบบ ช่วยแก้ปัญหาในประเด็นข้อจำกัดด้านความไม่คุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์และการงบประมาณที่อาจเพิ่มขึ้นจากการติดตั้ง ESTS สำหรับรถไฟฟ้าทุกขบวนอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้บทนี้ยังพิจารณาบทบาทพื้นฐานของ ESTS ในฐานะแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าสำรองที่ช่วยขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าด้วยความเร็วจำกัด พร้อมกับรองรับการจ่ายไฟฟ้าให้แก่โหนดบริการอื่น ๆ ที่จำเป็นตลอดกระบวนการอพยพ เพื่อหลีกเลี่ยงการหยุดชะงักของขบวนรถไฟฟ้า ซึ่งอาจนำไปสู่เหตุการณ์ไม่พึงประสงค์ที่อาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้โดยสาร สำหรับการออกแบบการทดสอบกำหนดให้ตัวแปรเป็นความถี่การเดินขบวนรถไฟฟ้าและสัดส่วนขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS ต่อจำนวนขบวนรถไฟฟ้าทั้งหมด เพื่อสะท้อนความหนาแน่นของขบวนในระบบและโอกาสในการจับคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในโครงข่ายเดียวกัน ขอบเขตการวิเคราะห์ผลกำหนดด้วยอัตราความสำเร็จที่รถไฟฟ้าทุกขบวนสามารถเคลื่อนที่ต่อไปยังสถานีผู้โดยสารในช่วงไฟดับ รวมถึงปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าสำรองจาก ESTS เพื่อชี้ให้เห็นเงื่อนไขที่เอื้อต่อการลดจำนวนการติดตั้งและการลดขนาดของ ESTS โดยไม่กระทบต่อเป้าหมายการให้บริการขั้นต่ำของระบบ รายละเอียดเงื่อนไขและกรณีทดสอบนำเสนอต่อไปนี้

5.2 เงื่อนไขการทดสอบและการออกแบบการจำลองผล

การกำหนดเงื่อนไขการทดสอบและรูปแบบการจำลองผลถูกออกแบบภายใต้กรอบแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ขณะเกิดสถานการณ์ไฟดับในระดับโครงข่าย โดยมีเป้าหมายเพื่อ

ประเมินความเป็นไปได้ของการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าจากขบวนรถไฟที่ติดตั้ง ESTS ไปสนับสนุนขบวนรถไฟที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS ผ่านโครงข่ายระบบจ่ายไฟ เพื่อให้รถไฟทุกขบวนสามารถอพยพผู้โดยสารไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้ ภายใต้ข้อจำกัดของพลังงานไฟฟ้าสำรองของ ESTS ข้อจำกัดเชิงปฏิบัติการของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า และเงื่อนไขการเดินรถที่สะท้อนความหนาแน่นของขบวนรถไฟตามตารางเวลาเดินรถ นอกจากนี้ การทดสอบยังมุ่งชี้ให้เห็นศักยภาพของแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าดังกล่าวในการลดความจำเป็นของการติดตั้ง ESTS บนขบวนรถไฟให้ครบทุกขบวน โดยพิจารณาว่าสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ที่เปลี่ยนแปลงไปยังสามารถบรรลุเป้าหมายการอพยพผู้โดยสารได้อย่างปลอดภัยและครบถ้วนเพียงใด ด้วยเหตุนี้ การเลือกตัวแปรสำหรับการทดสอบจึงมุ่งเน้นเฉพาะตัวแปรสำคัญที่เป็นกลไกหลักที่ส่งผลโดยตรงต่อความสำเร็จของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า เพื่อให้การวิเคราะห์ผลมีความชัดเจน เชื่อมโยงเชิงเหตุผล และสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ โดยรายละเอียดของตัวแปรทดสอบและกรณีทดสอบจะอธิบายตามลำดับในหัวข้อถัดไป

5.2.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ

จากเป้าหมายการทดสอบที่ต้องการสะท้อนกลไกที่กำหนดความสำเร็จของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าได้อย่างตรงประเด็น การทดสอบนี้จึงกำหนดและจัดลำดับตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบเป็นตัวแปรทดสอบที่ปรับเปลี่ยนค่าเพื่อศึกษาผลต่อการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าและตัวแปรควบคุมที่กำหนดให้คงที่และอยู่นอกข่ายศึกษา เพื่อให้การเทียบผลการทดสอบตีความได้ชัดเจนดังนี้

5.2.1.1 ตัวแปรทดสอบ

การจำลองผลนี้ได้กำหนดตัวแปรทดสอบที่มีการปรับเปลี่ยนค่าเป็นชุด ๆ ภายใต้กรอบการทดสอบเดียวกัน เพื่อสร้างสถานการณ์การเดินรถและสภาวะการทำงานที่หลากหลายซึ่งมีผลต่อความเป็นไปได้ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟ กล่าวคือ ตัวแปรทดสอบถูกใช้สำหรับสะท้อนความแตกต่างของสภาพการปฏิบัติการของระบบรถไฟขนส่งมวลชนให้สอดคล้องกับระบบจริงมากที่สุด เช่น ความหนาแน่นของขบวนรถไฟในระบบ ตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างขบวนรถไฟ ณ ขณะเกิดเหตุไฟดับ ระดับความพร้อมของ ESTS ภายในโครงข่าย เป็นต้น เมื่อกำหนดให้ตัวแปรทดสอบเปลี่ยนค่าได้อย่างเป็นระบบ ผลลัพธ์ที่ได้จะสามารถนำมาเปรียบเทียบกับแนวโน้มการดำเนินการและอธิบายชี้แจงข้อจำกัดของแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในมิติของโอกาสการจับคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าและความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการช่วยเหลือ ซึ่งเป็นแกนสำคัญต่อการประเมินศักยภาพในการลดจำนวนการติดตั้ง ESTS ใน

ระบบ ทั้งนี้ ในหัวข้อนี้จะนำเสนอรายละเอียดของตัวแปรทดสอบแต่ละตัวที่ใช้ในการศึกษา พร้อมอธิบายบทบาทและความสำคัญต่อผลการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS แต่ละชุด ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) ความถี่การเดินขบวนรถหรือระยะห่างการปล่อยขบวนรถ

(Headway: H) เป็นตัวแปรทดสอบหลักที่กำหนดความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าในระบบ ณ ช่วงเวลาหนึ่ง และเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดโอกาสการเกิดคู่แข่งแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS กับขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้งอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อ H มีค่าสั้น จำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่อยู่บนเส้นทางพร้อมกันจะเพิ่มขึ้น ระยะห่างตามแนวเส้นทางระหว่างขบวนรถลดลง และที่น่าจะเป็นที่ขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS จะอยู่ในระยะที่สามารถถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าไปยังขบวนที่ไม่ได้ติดตั้งระบบย่อมเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ความหนาแน่นที่สูงอาจก่อให้เกิดสภาวะความต้องการความช่วยเหลือสะสม เนื่องจากมีขบวนรถไฟฟ้าหลายขบวนต้องพึ่งพาพลังงานไฟฟ้าสำรองจากขบวนที่ติดตั้ง ESTS ในช่วงเวลาใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ภาระการจ่ายพลังงานของ ESTS เพิ่มขึ้น และมีความเสี่ยงต่อข้อจำกัดด้านกำลังไฟฟ้าที่ ESTS สามารถจ่ายได้ รวมถึงทำให้พลังงานไฟฟ้าสำรองลดลงอย่างรวดเร็วจนอาจไม่เพียงพอต่อการสนับสนุนการอพยพของรถไฟฟ้าทุกขบวน ในทางกลับกัน เมื่อ H มีค่ายาวขึ้น จำนวนขบวนรถไฟฟ้าในระบบจะลดลงและระยะห่างระหว่างขบวนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โอกาสในการจับคู่แบ่งปันพลังงานลดลง และบางขบวนอาจอยู่นอกขอบเขตการแบ่งปันพลังงานตามข้อจำกัดเชิงปฏิบัติการ แม้ในภาพรวมพลังงานไฟฟ้าสำรองใน ESTS จะยังคงเหลือเพียงพอก็ตาม

การกำหนด H ในการทดสอบอ้างอิงช่วงค่าที่พบได้จากตารางเดินรถจริง ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่ช่วงเร่งด่วนถึงนอกชั่วโมงเร่งด่วน โดยพิจารณาค่าที่เป็นไปได้หลายระดับ ได้แก่ 3.45 5.4 6 7 และ 8 นาที เพื่อให้ได้สภาวะความหนาแน่นของขบวนที่หลากหลายและสอดคล้องกับการปฏิบัติการจริง อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การเปรียบเทียบผลมีนัยสำคัญในเชิงวิศวกรรม จึงเลือกใช้ค่า H ที่ทำให้จำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ให้บริการในระบบแตกต่างกันอย่างชัดเจน ส่งผลให้การทดสอบนี้กำหนดค่า H เป็น 3 ระดับ ได้แก่ 3.45 6 และ 8 นาทีเป็นกรณีศึกษา เนื่องจากค่า 5.4 และ 7 นาทีให้จำนวนขบวนใกล้เคียงกับกรณี H เท่ากับ 6 นาที และอาจทำให้ความแตกต่างของผลไม่เด่นชัดเท่าที่ควร ทั้งนี้ จำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ให้บริการในระบบ ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง (Total number of trains in service: N_{total}) สามารถประเมินได้ ดังสมการที่ 5.1

$$N_{total} = \frac{T}{H} \quad (5.1)$$

โดย T คือ เวลารอบที่รถไฟฟ้าหนึ่งขบวนเคลื่อนที่ไป-กลับครบหนึ่งรอบ (round-trip time) และ H คือระยะเวลาย่อยระหว่างการปล่อยขบวนรถไฟฟ้าที่ติดกัน สำหรับกรณีศึกษา นี้กำหนดให้ T เท่ากับ 48 นาที ส่งผลให้เมื่อพิจารณา H ที่ 3.45 6 และ 8 นาที จะได้จำนวนขบวนรถไฟฟ้าเฉลี่ยที่ให้บริการพร้อมกันในระบบประมาณ 14 8 และ 6 ขบวนตามลำดับ การกำหนดค่า H ดังกล่าวจึงทำให้สามารถพิจารณาสถานะการให้บริการได้ครอบคลุมทั้งกรณีความหนาแน่นสูงและกรณีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งเป็นฐานสำคัญสำหรับการเปรียบเทียบผลการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า

2) สัดส่วนการติดตั้ง ESTS ต่อจำนวนขบวนรถไฟฟ้าทั้งหมด (ESTS Penetration Ratio: %ESTS) เป็นตัวแปรทดสอบที่บ่งบอกความหนาแน่นของ ESTS ภายในระบบ โดยตรง โดยจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่สามารถทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระดับ %ESTS ที่กำหนดในโครงข่าย เมื่อ %ESTS อยู่ในระดับสูงก็ย่อมส่งผลให้โอกาสที่ขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS จะได้รับพลังงานไฟฟ้าจากขบวนที่ติดตั้งภายในระยะที่กำหนดเพิ่มขึ้น ตลอดจนช่วยลดช่วงเส้นทางที่มีความเสี่ยงต่อการขาดแคลนขบวนที่ติดตั้ง ESTS ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าสำรองในช่วงที่เกิดเหตุไฟดับ อันเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้รถไฟบางขบวนไม่สามารถจับคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าและอาจตกค้างระหว่างสถานีผู้โดยสารได้ แม้ว่าในภาพรวมพลังงานไฟฟ้าสำรองของ ESTS จะยังคงมีอยู่เพียงพอก็ตาม ในทางกลับกัน แม้การเพิ่ม %ESTS จะช่วยเพิ่มความครอบคลุมเชิงพื้นที่และจำนวนคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้าที่เป็นไปได้ แต่ย่อมแลกมาด้วยต้นทุนการติดตั้งและการบำรุงรักษาที่สูงขึ้น ดังนั้น ตัวแปรนี้จึงมีบทบาทสำคัญต่อการตอบโจทย์หลักของการศึกษาในการประเมินศักยภาพของแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าต่อการลดจำนวนการติดตั้ง ESTS โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งระบบให้กับรถไฟฟ้าทุกขบวน

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลดจำนวนการติดตั้ง ESTS ด้วยแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS กำหนดให้ %ESTS เท่ากับร้อยละ 50 ของจำนวนขบวนทั้งหมด เป็นกรณีฐาน และทำการวิเคราะห์ที่ %ESTS เท่ากับร้อยละ 25 และ 75 เพื่อพิจารณาผลกระทบทั้งในกรณีลดและเพิ่มจำนวนอุปกรณ์ภายในโครงข่าย ตลอดจนผลต่อความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่สามารถเกิดขึ้นได้ สำหรับการกำหนดตำแหน่งขบวนที่ติดตั้ง ESTS ใช้วิธีการกระจายอย่างสม่ำเสมอตามลำดับการปล่อยขบวนรถไฟฟ้า ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงที่บางช่วงของเส้นทางจะไม่มีขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS อยู่ใกล้เคียง ตัวอย่างเช่น เมื่อมีขบวนรถไฟฟ้าภายในโครงข่ายรวมทั้งหมด 8 ขบวน หากพิจารณากรณีที่ %ESTS เท่ากับร้อยละ 50 จะมีขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS จำนวน 4 ขบวน และจัดวางสลับกับขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ติดตั้ง เป็นต้น ขณะที่กรณี %ESTS อื่น

ก็มีการจัดวางขบวนรถไฟที่ติดตั้ง ESTS ให้กระจายห่างกันอย่างเหมาะสม เพื่อเพิ่มความครอบคลุมของพื้นที่ให้บริการให้มากที่สุด ทั้งนี้ $\%ESTS$ ไม่สามารถพิจารณาแยกจาก H ได้โดยสมบูรณ์ เนื่องจาก H ที่กำหนดการให้บริการระบบในช่วงเวลานั้นเปลี่ยนแปลงไป ค่า N_{total} ก็ย่อมเปลี่ยนแปลงตามสมการที่ 5.1 ดังนั้น เพื่อให้ทราบจำนวนขบวนรถไฟที่ติดตั้ง ESTS และสามารถจัดสรรตำแหน่งได้อย่างเหมาะสม จึงอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง $\%ESTS$ และ N_{total} ในการคำนวณจำนวนขบวนรถไฟที่ติดตั้ง ESTS (Number of trains equipped with ESTS: N_{ESTS}) ดังสมการที่ 5.2

$$N_{ESTS} = \frac{\%ESTS \times N_{total}}{100} \quad (5.2)$$

5.2.1.2 ตัวแปรควบคุม

การทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟด้วย ESTS นอกจากกำหนดตัวแปรทดสอบ H และ $\%ESTS$ เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความเป็นไปได้ของความสำเร็จของแนวคิดนี้แล้ว ยังได้กำหนดตัวแปรควบคุมสำหรับคงสถานะแวดล้อมของระบบให้สอดคล้องและเป็นมาตรฐานเดียวกันในทุกกรณีการทดสอบ ซึ่งช่วยให้ผลลัพธ์สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจนว่าเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยใดเป็นหลัก และเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้จริง โดยตัวแปรควบคุมครอบคลุมปัจจัยทางกายภาพของระบบทั้งในส่วน of ขบวนรถไฟและโครงข่ายระบบจ่ายไฟ ลักษณะการเดินรถจริง และกฎพื้นฐานทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องตลอดจนการควบคุมความแปรปรวนจากภาระผู้โดยสารที่มีผลต่อมวลของรถไฟและพลังงานไฟฟ้า ผลกระทบระหว่างการอพยพในช่วงที่เกิดไฟดับ นอกจากนี้ ยังรวมถึงรูปแบบการเกิดสถานการณ์ไฟดับของระบบและเงื่อนไขการทำงานของ ESTS ที่กำหนดลำดับขั้นตอนการดำเนินการไว้อย่างชัดเจน หัวข้อนี้นำเสนอรายละเอียดของตัวแปรควบคุมที่ใช้ในการศึกษา พร้อมอธิบายบทบาทและความสำคัญต่อผลการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ดังต่อไปนี้

1) ลักษณะทางกายภาพของระบบรถไฟฟ้ามวลขนส่ง เป็นตัวแปรควบคุมที่กำหนดสมรรถนะการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟและพฤติกรรมการจัดการพลังงานไฟฟ้าของระบบจ่ายไฟในสภาวะปกติและขณะเกิดสถานการณ์ไฟดับ ซึ่งจำเป็นต้องกำหนดให้ตัวแปรนี้มีลักษณะเดียวกันในทุกกรณีการทดสอบ เพื่อให้ผลลัพธ์สะท้อนอิทธิพลของตัวแปรทดสอบที่มีผลต่อการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเป็นหลัก โดยลักษณะทางกายภาพของระบบครอบคลุมสองส่วนสำคัญ ได้แก่ ส่วนของขบวนรถไฟที่กำหนดโครงสร้างและลักษณะการทำงานทั้งหมดของขบวนรถไฟ

เช่น สมการการเคลื่อนที่ มวล รูปร่าง แรงต้านทานต่าง ๆ เป็นต้น ตลอดจนข้อกำหนดและขีดความสามารถของระบบที่สามารถดำเนินการได้จริง และส่วนของโครงข่ายระบบจ่ายไฟที่กำหนดคุณลักษณะเชิงโครงสร้างและพารามิเตอร์พื้นฐานทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง เช่น รูปแบบของระบบจ่ายไฟ การแบ่งตอนของระบบ ตำแหน่งจุดเชื่อมต่อ เป็นต้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการคำนวณการใช้พลังงานไฟฟ้า การสูญเสียพลังงานไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าตกตามระยะทาง และอื่น ๆ ดังนั้น การทดสอบจึงกำหนดใช้ข้อมูลคุณลักษณะจากกรณีศึกษาของระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม เป็นฐานอ้างอิง

2) ภาระผู้โดยสาร (Passenger load level/Assigned Weight: AW)

เป็นตัวแปรควบคุมที่ใช้ระบุระดับภาระบรรทุกของขบวนรถไฟฟ้า ซึ่งกำหนดมวลรวมของรถไฟฟ้าและส่งผลต่อความต้องการพลังงานไฟฟ้าจุดลากระหว่างการเคลื่อนที่โดยตรง ในงานวิศวกรรมระบบรางมักกำหนดระดับ AW เป็นมาตรฐานตั้งแต่ $AW0$ ถึง $AW4$ เพื่อแทนสถานะการบรรทุกของขบวนรถไฟฟ้าตั้งแต่รถเปล่าจนถึงบรรทุกหนาแน่นมาก สำหรับใช้ในการออกแบบและประเมินสมรรถนะในระบบ โดยทั่วไป $AW0$ แทนสถานะรถเปล่าพร้อมให้บริการโดยไม่รวมผู้โดยสาร $AW1$ แทนสถานะผู้โดยสารน้อยที่มีการพิจารณาน้ำหนักขบวนร่วมกับผู้โดยสารนั่งเต็ม $AW2$ แทนสถานะปานกลางที่มีการพิจารณาน้ำหนักขบวนร่วมกับผู้โดยสารนั่งเต็มและผู้โดยสารยืน 4 คนต่อตารางเมตร $AW3$ แทนสถานะค่อนข้างสูงใกล้เคียงการใช้งานจริงในช่วงหนาแน่นที่มีการพิจารณาน้ำหนักขบวนร่วมกับผู้โดยสารนั่งเต็มและผู้โดยสารยืน 6 คนต่อตารางเมตร และ $AW4$ แทนสถานะบรรทุกสูงมากหรือใกล้ขีดจำกัดการรองรับผู้โดยสารที่มีการพิจารณาน้ำหนักขบวนร่วมกับผู้โดยสารนั่งเต็มและผู้โดยสารยืน 8 คนต่อตารางเมตร ในการทดสอบนี้กำหนดให้ AW คงที่ที่ระดับ $AW3$ เพื่อสะท้อนสถานะการให้บริการที่มีความหนาแน่นของผู้โดยสารสอดคล้องกับการใช้งานจริง และเพื่อลดความแปรปรวนที่อาจส่งผลต่อผลการทดสอบ ขณะที่ระดับ $AW0$ ถึง $AW2$ มักใช้สำหรับเทียบสมรรถนะในสถานะการบรรทุกของขบวนรถไฟฟ้าต่ำ ส่วน $AW4$ ใช้แทนกรณีที่ต้องการตรวจสอบสถานะการบรรทุกสูงสุดของขบวนรถไฟฟ้า นอกจากนี้ จากผลการจำลองในตารางที่ 4.6 พบว่าการเปลี่ยนระดับภาระผู้โดยสารไม่ส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าของ ESTS ในช่วงไฟดับอย่างมีนัยสำคัญ

3) โหลดบริการบนขบวนระหว่างเหตุฉุกเฉิน (Auxiliary/Service Loads)

เป็นตัวแปรควบคุมที่กำหนดภาระการใช้พลังงานไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ ESTS ต้องมีการจ่ายไฟอย่างต่อเนื่องภายใต้สถานการณ์ไฟดับ โดยภาระดังกล่าวแยกจากพลังงานไฟฟ้าสำหรับระบบจุดลากอย่างชัดเจน และส่งผลโดยตรงต่ออัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าสำรองของ ESTS รวมถึงขีดความสามารถในการสนับสนุนการอพยพผู้โดยสารและการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้า ซึ่งปกติภาระ

การใช้พลังงานไฟฟ้าเหล่านี้จะครอบคลุมในส่วนของโหลดระบบแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ ระบบควบคุม ระบบสื่อสารและประกาศ และระบบความปลอดภัยอื่น ๆ ตามขอบเขตที่ระบบกำหนดไว้ ดังนั้น การทดสอบนี้จึงกำหนดให้โหลดบริการมีการดึงกำลังไฟฟ้าที่ค่าคงที่ เท่ากับ 270 กิโลวัตต์ ตลอดทุกกรณีตามข้อมูลในตารางที่ 4.1 เพื่อให้ผลลัพธ์การใช้พลังงานไฟฟ้าของ ESTS ของแต่ละกรณีให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน

4) ข้อจำกัดเชิงปฏิบัติการของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า (Energy-sharing operational constraints) เป็นตัวแปรควบคุมที่ใช้กำหนดขอบเขตความเป็นไปได้ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายในโครงข่ายระบบจ่ายไฟเดียวกัน โดยยึดกรอบมาตรฐาน EN50126/IEC62278 ที่กำหนดช่วงแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับระบบจ่ายไฟของรถไฟไฟฟ้า เพื่อให้การประเมินการแบ่งปันพลังงานอยู่ภายใต้เงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน (British Standards Institution, 2004) กล่าวคือ ณ ตำแหน่งจุดที่ขบวนรถไฟอยู่ต้องมีแรงดันไฟฟ้าไม่น้อยกว่าค่าขั้นต่ำที่กำหนด เพื่อคงสมรรถนะให้กับระบบขับเคลื่อนและรักษาเสถียรภาพของอุปกรณ์ไฟฟ้าบนขบวนให้อยู่ในสภาวะปกติ นอกจากนี้ ช่วงที่ขบวนรถไฟถูกขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS จะมีการจำกัดความเร็วสูงสุดไว้ที่ 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง อันเนื่องมาจากข้อจำกัดด้านกำลังไฟฟ้าที่ระบบสามารถจ่ายได้ การทดลองในวิทยานิพนธ์นี้จึงกำหนดให้การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเกิดขึ้นได้เมื่อขบวนรถไฟที่ติดตั้ง ESTS และขบวนรถไฟที่ไม่ได้ติดตั้งอยู่ในระยะห่างกันไม่เกินรัศมี 3.5 กิโลเมตร ในทุกกรณีทดสอบ โดยรัศมีดังกล่าวกำหนดขึ้นจากข้อจำกัดด้านแรงดันตกในระบบจ่ายไฟกระแสตรง 750 โวลต์ เพื่อให้แรงดันไฟฟ้า ณ ตำแหน่งขบวนรถไฟที่รับพลังงานไม่ต่ำกว่าค่าขั้นต่ำที่กำหนด และทำให้ระบบขับเคลื่อนสามารถทำงานได้อย่างเหมาะสม ทั้งนี้ รัศมี 3.5 กิโลเมตรมีความสอดคล้องในเชิงวิศวกรรมกับการออกแบบระบบจ่ายไฟรถไฟที่ต้องควบคุมแรงดันตก การสูญเสียพลังงานไฟฟ้า และข้อจำกัดเชิงกลไกการทำงานจริงของขบวนรถไฟเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าค่าที่กำหนด (ธนัชชัย กุลวรรณิพงษ์, 2560)

การกำหนดตัวแปรในหัวข้อนี้ได้คัดเลือกเฉพาะปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการประเมินแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS โดยครอบคลุมทั้งตัวแปรทดสอบที่ปรับเปลี่ยนค่าเพื่อสะท้อนสภาวะการปฏิบัติการที่แตกต่างกัน และตัวแปรควบคุมที่คงค่าไว้เพื่อรักษาคุณลักษณะพื้นฐานของระบบรถไฟฟ้ามวลขนและโครงข่ายระบบจ่ายไฟ ภาระผู้โดยสาร ภาระโหลดบริการบนขบวนรถไฟ และข้อจำกัดเชิงปฏิบัติการของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้สอดคล้องกันตลอดการทดสอบ ส่งผลให้ความแตกต่างของผลลัพธ์สามารถตีความได้อย่างตรงประเด็นภายใต้กรอบการ

ประเมินเดียวกัน อีกทั้งเอื้อต่อการจำแนกสาเหตุของกรณีที่ไม่สำเร็จได้ชัดเจนยิ่งขึ้น อันสนับสนุนความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์โดยรวม

5.2.2 การกำหนดกรณีทดสอบและขั้นตอนการจำลอง

จากตัวแปรทดสอบที่กำหนดในหัวข้อ 5.2.1 สามารถออกแบบกรณีทดสอบให้ครอบคลุมทั้งช่วงความหนาแน่นของขบวนการไฟฟ้าและรูปแบบการกระจายของการติดตั้ง ESTS ภายในระบบ เพื่อสะท้อนทั้งโอกาสและข้อจำกัดของการจับคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนการไฟฟ้าอย่างเป็นระบบ ขณะเดียวกัน รูปแบบเหตุการณ์ไฟดับและกระบวนการตอบสนองของ ESTS ถูกกำหนดให้เป็นมาตรฐานเดียวกันในทุกกรณีทดสอบ เพื่อให้ผลการวิเคราะห์และการเปรียบเทียบระหว่างกรณีมีความชัดเจนและเหมาะสม รวมทั้งสนับสนุนการอธิบายความสัมพันธ์เชิงกลไกระหว่างเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบ พฤติกรรมการกระจายพลังงานไฟฟ้า และผลลัพธ์การอพยพของขบวนการไฟฟ้าในแต่ละกรณีได้อย่างเป็นลำดับ การกำหนดเงื่อนไขดังกล่าวช่วยลดผลกระทบจากปัจจัยแวดล้อมที่ไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของ H และ $\%ESTS$ ทำให้สามารถตีความผลการตอบสนองของระบบได้อย่างตรงประเด็นมากขึ้น อีกทั้งยังเอื้อต่อการวิเคราะห์เปรียบเทียบว่า ความแตกต่างของผลการอพยพในแต่ละกรณีเกิดจากความหนาแน่นของขบวนการไฟฟ้าและความครอบคลุมของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเป็นสำคัญ ด้วยเหตุนี้ การออกแบบกรณีทดสอบในส่วนนี้จึงเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการสรุปแนวโน้มสมรรถนะของระบบภายใต้สถานการณ์ไฟดับในหัวข้อต่อไป โดยรายละเอียดกรณีทดสอบและขั้นตอนการจำลองนำเสนอต่อไปนี้

5.2.2.1 การกำหนดกรณีทดสอบ

จากตัวแปรทดสอบ H และ $\%ESTS$ ที่กล่าวไว้ข้างต้น สามารถนำมาสร้างกรณีทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้กรอบเงื่อนไขที่ปรับเปลี่ยนทั้งความหนาแน่นของขบวนการไฟฟ้าและจำนวน ESTS ที่ติดตั้งในโครงข่ายระบบจ่ายไฟเดียวกัน ซึ่งช่วยสะท้อนทั้งโอกาสและข้อจำกัดของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนการไฟฟ้าขณะเกิดไฟดับได้อย่างเป็นระบบ โดยในการทดสอบนี้กำหนดให้ H จำนวน 3 ระดับ ได้แก่ 3.45 6 และ 8 นาที่ ตามช่วงความถี่การเดินขบวนการไฟฟ้าที่ได้จากตารางเดินรถจริง ซึ่งทำให้จำนวนขบวนการไฟฟ้าที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ขณะเดียวกันได้กำหนด $\%ESTS$ ไว้ที่ร้อยละ 25, 50 และ 75 ของจำนวนขบวนการไฟฟ้าทั้งหมด เงื่อนไขทั้งสองมิตินี้ทำให้ได้กรณีทดสอบสำหรับประเมินการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนภายใต้สถานการณ์ไฟดับ อันเอื้อต่อการเปรียบเทียบแนวโน้มการตอบสนองของระบบในเชิงโครงสร้าง และเมื่อจัดเรียงตำแหน่งของ ESTS ใน

ระบบตามหลักการกระจายอย่างสม่ำเสมอให้สอดคล้องกับแต่ละกรณีทดสอบแล้ว จะได้กรณีทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 กรณีทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

กรณี	H (นาที)	N_{total} (ขบวน)	%ESTS (%)	N_{ESTS} (ขบวน)	การจัดวาง
1	3.45 ชั่วโมง เร่งด่วน	14	25	4	$E_1 N_2 N_3 N_4 E_5 N_6 N_7$ $E_8 N_9 N_{10} N_{11} E_{12} N_{13} N_{14}$
2			50	7	$N_1 E_2 N_3 E_4 N_5 E_6 E N_7$ $E_8 N_9 E_{10} N_{11} E_{12} N_{13} E_{14}$
3			75	10	$N_1 E_2 E_3 E_4 N_5 E_6 E_7$ $N_8 E_9 E_{10} E_{11} N_{12} E_{13} E_{14}$
4	6 ชั่วโมง ปกติ	8	25	2	$E_1 N_2 N_3 N_4$ $E_5 N_6 N_7 N_8$
5			50	4	$N_1 E_2 N_3 E_4$ $N_5 E_6 N_7 E_8$
6			75	6	$N_1 E_2 E_3 E_4$ $N_5 E_6 E_7 E_8$
7	8 นอก ชั่วโมง เร่งด่วน	6	25	2	$E_1 N_2 N_3$ $E_4 N_5 N_6$
8			50	3	$N_1 E_2 N_3$ $E_4 N_5 E_6$
9			75	4	$N_1 E_2 E_3$ $N_4 E_5 E_6$

หมายเหตุ N_n คือ รถไฟฟ้าขบวนที่ n ที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS และ E_n คือ รถไฟฟ้าขบวนที่ n ที่ติดตั้ง ESTS

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าแต่ละกรณีทดสอบกำหนดจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS โดยคำนวณจากค่า %ESTS ให้สอดคล้องกับจำนวนขบวนรถไฟฟ้าทั้งหมดที่ปฏิบัติการร่วมกันในระบบภายใต้ค่า H ของกรณีนั้น ๆ และปรับให้อยู่ในรูปของจำนวนเต็มตามข้อจำกัดการเดินรถจริง โดยกรณีทดสอบดังกล่าวครอบคลุมช่วงเงื่อนไขที่ต้องการศึกษาและสามารถใช้เป็นฐานในการเปรียบเทียบผลระหว่างกรณีได้อย่างเป็นระบบ นอกจากนี้ ค่า %ESTS ยังมีผลโดยตรงต่อขนาด

ESTS ที่ควรเลือกติดตั้งในแต่ละกรณีทดสอบ เนื่องจากสัดส่วนระหว่างขบวนรถไฟที่ติดตั้ง ESTS และขบวนรถไฟที่ไม่ได้ติดตั้งระบบเป็นปัจจัยที่กำหนดภาระการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าต่อ ESTS หนึ่งชุด กล่าวคือ หากจำนวนขบวนรถไฟที่ติดตั้ง ESTS มีน้อย ESTS หนึ่งชุดย่อมมีแนวโน้มต้องรองรับขบวนรถไฟที่ต้องการรับการสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าในสัดส่วนที่สูงกว่า ขณะที่กรณีที่มีจำนวนขบวนรถไฟที่ติดตั้ง ESTS มากขึ้น ภาระต่อหนึ่งชุดย่อมมีแนวโน้มลดลง ดังนั้น ความเหมาะสมของขนาด ESTS ที่ติดตั้งในโครงข่ายระบบจ่ายไฟฟ้าจึงได้ขึ้นอยู่กับจำนวนขบวนรถไฟที่ติดตั้งเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับสัดส่วนระหว่างจำนวน ESTS และจำนวนขบวนรถไฟที่ต้องการรับการสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าร่วมด้วย ซึ่งทำให้ขนาด ESTS ที่เหมาะสมในแต่ละกรณีแตกต่างกันตามโครงสร้างของระบบ ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 การกำหนดขนาด ESTS ที่เหมาะสมในแต่ละกรณีทดสอบ

กรณี	H (นาท)	%ESTS (%)	สัดส่วน ESTS ต่อรถไฟ ผู้รับ	ขนาด ESTS ที่ควรรองรับได้		
				กระแสไฟฟ้า สูงสุด (A)	กำลังไฟฟ้า สูงสุด (kW)	พลังงานไฟฟ้า (kWh)
1	3.45	25	1:3	3,590	2,700	195
2	ชั่วโมง	50	1:1	1,200	900	69
3	เร่งด่วน	75	3:1	1,200	900	69
4	6 ชั่วโมงปกติ	25	1:3	3,590	2,700	195
5		50	1:1	1,200	900	69
6		75	3:1	1,200	900	69
7	8	25	1:2	2,400	1,800	130
8	นอกชั่วโมง	50	1:1	1,200	900	69
9	เร่งด่วน	75	2:1	1,200	900	69

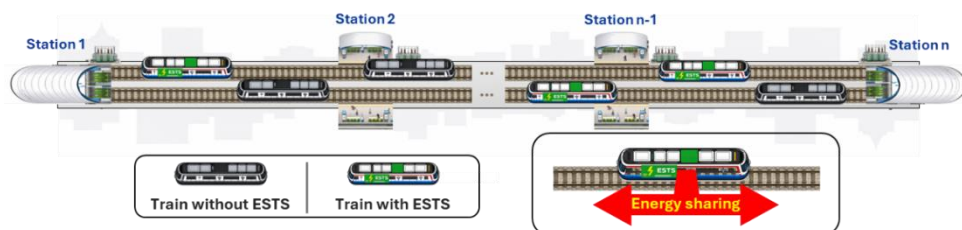
สัดส่วนระหว่างจำนวน ESTS และจำนวนขบวนรถไฟที่ต้องรับการสนับสนุนพลังงานไฟฟ้ามีความสำคัญต่อการออกแบบ ESTS ในแต่ละกรณีทดสอบ ดังแสดงในภาคผนวก ก ทั้งนี้ กรณีทดสอบทั้งหมดจะถูกนำไปใช้กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและลำดับขั้นตอนการจำลองในหัวข้อถัดไป เพื่อให้การประเมินผลลัพธ์เป็นไปภายใต้กรอบเดียวกัน

5.2.2.2 ข้อกำหนดและขั้นตอนการจำลอง

จากกรณีทดสอบที่สรุปในตารางที่ 5.1 และกรอบเงื่อนไขที่กำหนดให้เหมือนกันทุกกรณี เพื่อผลลัพธ์ที่ได้อยู่บนฐานการเปรียบเทียบเดียวกันอย่างเป็นระบบ โดยการจำลองเริ่มต้นภายหลังปล่อยขบวนรถไฟเข้าสู่เส้นทางให้บริการจนครบทุกขบวนตามจำนวนที่คำนวณได้จากค่า H ที่กำหนดในแต่ละกรณีทดสอบ จากนั้นทำการจำลองเหตุการณ์ไฟดับทั้งโครงข่ายเป็นช่วงเวลาทุก 1 นาทีต่อเนื่อง จนถึงเวลาที่รถไฟขบวนแรกเดินทางครบหนึ่งรอบไป-กลับของเส้นทางให้บริการ แนวทางดังกล่าวทำให้ตำแหน่งสัมพัทธ์ของขบวนรถไฟ ณ ขณะเกิดเหตุไฟดับมีความหลากหลายสอดคล้องกับสภาพการปฏิบัติการจริงและเอื้อต่อการพิจารณาการกระจายตัวของ ESTS ภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างได้ชัดเจน โดยเฉพาะการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งขบวนรถไฟและความสามารถในการอพยพผู้โดยสารไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดอย่างปลอดภัย เมื่อถึงเวลาที่กำหนดให้เกิดเหตุไฟดับในแต่ละรอบการจำลอง แบบจำลองจะทำการตัดแหล่งจ่ายไฟหลักออกทั้งโครงข่ายและส่งให้รถไฟทุกขบวนเข้าสู่ลำดับการตอบสนองเหตุฉุกเฉิน โดยกำหนดช่วงหน่วงเวลา 5 นาที ณ ตำแหน่งขณะนั้นที่ขบวนรถไฟหยุดนิ่ง เพื่อแทนเวลาที่ระบบใช้ตรวจสอบ ยืนยันเหตุการณ์ และสั่งการให้ระบบ ESTS เริ่มทำงาน นอกจากนี้การกำหนดช่วงหน่วงเวลายังช่วยให้การจัดเก็บและตีความผลการจำลองทำได้เป็นขั้นตอน เนื่องจากช่วงเวลาการทำงานของระบบในแต่ละสถานะถูกแบ่งออกจากกันอย่างชัดเจน

สำหรับจำนวนขบวนรถไฟที่ติดตั้ง ESTS ในแต่ละกรณีคำนวณจากความสัมพันธ์ตามสมการที่ 5.2 แล้วกำหนดตำแหน่งขบวนรถไฟที่ติดตั้ง ESTS ด้วยหลักการกระจายอย่างสม่ำเสมอตามลำดับการปล่อยขบวนรถไฟทั้งหมด เพื่อลดความเสี่ยงของช่วงเส้นทางบริการที่ไม่มีขบวนรถไฟที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำรองอยู่ในบริเวณที่เหมาะสม ตัวอย่างเช่น เมื่อมีรถไฟรวม 8 ขบวน และกำหนดให้ $\%ESTS = 50\%$ จะได้รถไฟที่ติดตั้ง ESTS มีทั้งหมด 4 ขบวนที่ถูกจัดวางสลับกับขบวนรถไฟที่ไม่ติดตั้ง ESTS เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 5.1 ภายใต้การจัดวางตำแหน่งขบวนรถไฟดังกล่าว ลำดับความการทำงานของ ESTS มีความสำคัญกับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำรองแก่ขบวนรถไฟที่ติดตั้ง ESTS เองก่อน เพื่อขับเคลื่อนรถไฟไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุด จากนั้นจึงพิจารณาการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าไปยังขบวนรถไฟที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS ตามขอบเขตเชิงปฏิบัติการที่กำหนด โดยการขับเคลื่อนขบวนรถไฟด้วยพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS ทั้งหมดจะถูกจำกัดความเร็วไว้ที่ 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เนื่องจากข้อจำกัดด้านกำลังไฟฟ้าที่ ESTS สามารถจ่ายได้ และกำหนดโหลดบริการบนขบวนรถไฟจะคงที่ไว้ที่ 270 กิโลวัตต์ตลอดการจำลอง ทั้งนี้การอนุญาตให้เกิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าถูกกำกับด้วยข้อจำกัดเชิงปฏิบัติการและ

เงื่อนไขตัวแปรเดียวกันทุกกรณี แสดงดังรูปที่ 5.2 เพื่อให้ผลลัพธ์สะท้อนข้อจำกัดจากการกระจายตัวของขบวนรถไฟฟ้าและการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าตามระยะทาง



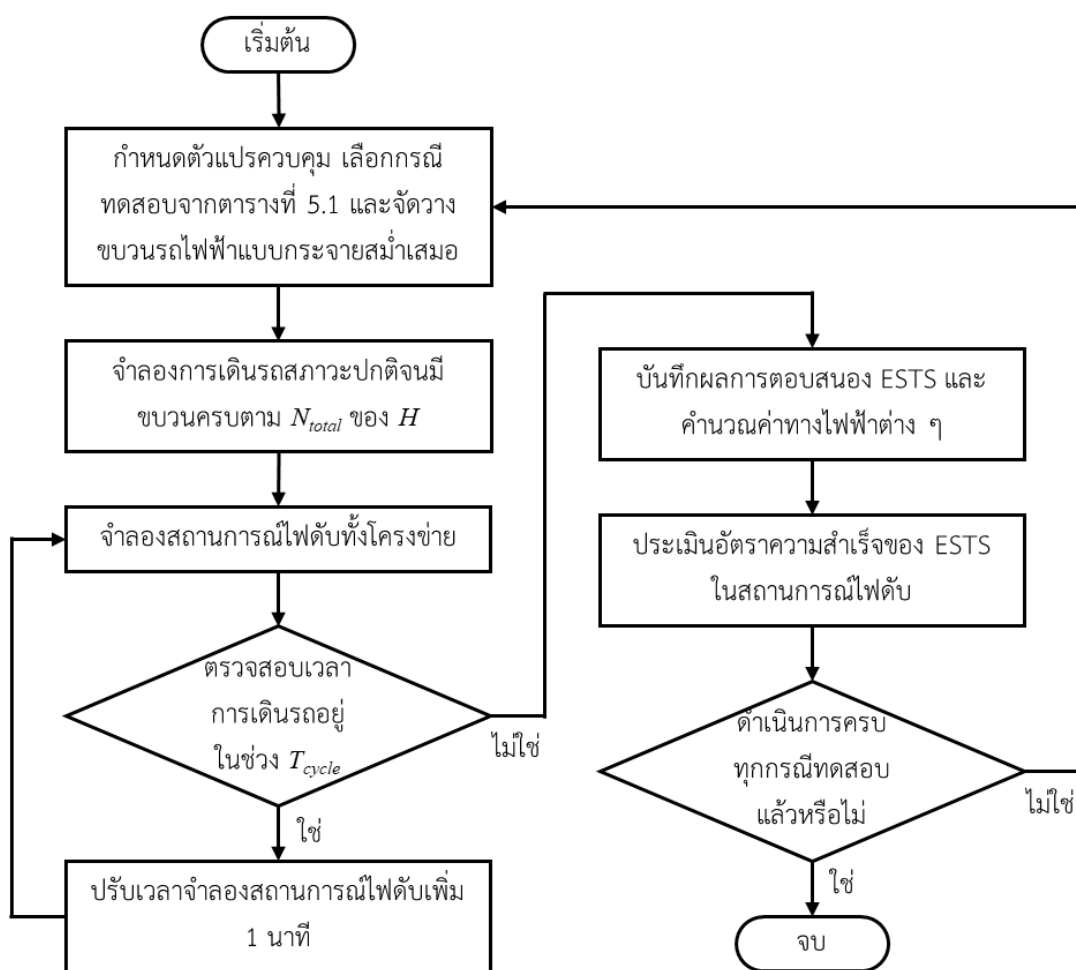
รูปที่ 5.1 การกระจายตำแหน่งของ ESTS ครอบคลุมแนวเส้นทาง



รูปที่ 5.2 ตัวแปรทดสอบและตัวแปรควบคุมที่กำหนดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS

เมื่อกำหนดเงื่อนไขและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองครบถ้วนแล้ว ขั้นตอนการทดสอบสามารถสรุปลำดับการดำเนินงานที่สำคัญได้ดังนี้ (1) เลือกกรณีทดสอบจากตารางที่ 5.1 ตั้งค่าตัวแปร และจัดวางขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS ตามหลักการกระจายอย่างสม่ำเสมอ (2)

จำลองการเดินรถในสภาวะปกติจนกระทั่งมีขบวนรถไฟฟ้าเข้าสู่เส้นทางการให้บริการครบตามที่กำหนด (3) จำลองเหตุการณ์ไต่ขบวนโดยปรับเปลี่ยนเวลาเกิดเหตุเพิ่มทีละ 1 นาทีภายในช่วงเวลาที่กำหนด เพื่อให้ตำแหน่งของขบวนรถไฟฟ้า ณ ขณะเกิดเหตุมีความหลากหลาย และใช้พิจารณาการทำงานของ ESTS ทั้งในกระบวนการอพยพของขบวนที่ติดตั้งระบบและการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าสำหรับสนับสนุนการอพยพของขบวนที่ไม่ได้ติดตั้งระบบ (4) บันทึกผลการการทำงานของ ESTS และคำนวณค่าตัวชี้วัดที่จำเป็น ได้แก่ ตำแหน่ง ความเร็ว สถานะการอพยพของรถไฟฟ้าแต่ละขบวน พลังงานไฟฟ้าที่ ESTS ใช้ไป และผลสำเร็จของการอพยพโดยรวม (5) ประเมินอัตราความสำเร็จของแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS และ (6) ปรับปรุงยังกรณีทดสอบถัดไปตามตารางที่ 5.1 แล้วทำซ้ำกระบวนการจำลองจนครบทุกกรณี ซึ่งสามารถสรุปลำดับขั้นตอนโดยรวมได้ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ขั้นตอนการจำลองการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS

การกำหนดกรอบระเบียบวิธีสำหรับการประเมินแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS เริ่มจากการระบุตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งตัวแปรทดสอบและตัวแปรควบคุม เพื่อให้การจำลองสะท้อนสภาพการปฏิบัติการจริงภายใต้เงื่อนไขที่สามารถเปรียบเทียบข้ามกรณีได้ จากนั้นได้ออกแบบกรณีทดสอบตามระดับค่า H และ $\%ESTS$ รวมถึงกำหนดรูปแบบเหตุการณ์ไฟดับ ลำดับการตอบสนองของระบบ และข้อกำหนดเชิงปฏิบัติการที่ใช้เป็นมาตรฐานเดียวกันในทุกกรณี พร้อมกำหนดขั้นตอนการจำลองและการบันทึกตัวชี้วัดสำหรับวิเคราะห์ผลลัพธ์ให้สอดคล้องกันภายใต้กรอบความเป็นไปได้ทางเทคนิคในแง่ความครอบคลุมเชิงพื้นที่และการตอบสนองของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน หัวข้อถัดไปจะนำเสนอผลการทดสอบตามกรณีที่กำหนด เพื่อประเมินศักยภาพข้อจำกัด และแนวโน้มของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ในสถานการณ์ไฟดับ

5.3 การทดสอบ

การทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการภายใต้กรอบข้อกำหนดและเงื่อนไขการจำลองเดียวกันตามที่กำหนดไว้ในหัวข้อ 5.2 โดยกำหนดกรณีทดสอบจากค่า H เพื่อใช้เป็นตัวแทนความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าในโครงข่ายระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 3 ระดับ ได้แก่ ช่วงชั่วโมงเร่งด่วน ($H = 3.45$ นาที) ช่วงชั่วโมงปกติ ($H = 6$ นาที) และช่วงนอกชั่วโมงเร่งด่วน ($H = 8$ นาที) และในแต่ละค่า H กำหนดสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ที่ระดับ 25 50 และ 75 ของจำนวนขบวนรถไฟฟ้าทั้งหมด ส่งผลให้ได้กรณีทดสอบรวมทั้งสิ้น 9 กรณี ซึ่งครอบคลุมทั้งเงื่อนไขที่เอื้อต่อการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าและเงื่อนไขที่มีข้อจำกัดด้านความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของระบบอย่างเหมาะสม สำหรับการจำลองในแต่ละกรณีทดสอบ ได้กำหนดให้แทรกเหตุการณ์ไฟดับทั้งโครงข่ายในหลายช่วงเวลา โดยเลื่อนเวลาเกิดเหตุเพิ่มทีละ 1 นาทีภายในช่วงที่ขบวนรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไป-กลับระหว่างสถานีต้นทางและปลายทางครบหนึ่งรอบ เพื่อให้ได้ตำแหน่งสัมพัทธ์ของขบวนรถไฟฟ้าที่แตกต่างกันเพียงพอ และช่วยให้การประเมินผลครอบคลุมสภาวะการตอบสนองของระบบที่หลากหลายมากขึ้น จึงทำให้ในแต่ละกรณีมีผลการจำลองย่อยหลายเหตุการณ์ ทั้งกรณีที่ขบวนรถไฟฟ้าทุกขบวนสามารถอพยพไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้ครบถ้วน และกรณีที่ยังมีขบวนรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนเส้นทางบริการ ดังนั้น เพื่อให้การนำเสนอผลมีความกระชับและชัดเจน หัวข้อนี้จึงเลือกแสดงเฉพาะเหตุการณ์ตัวอย่างที่เป็นตัวแทนของกรณีอพยพสำเร็จและกรณีไม่สำเร็จในแต่ละกรณีทดสอบ ร่วมกับการสรุปอัตราความสำเร็จของการตอบสนองของระบบ ขณะที่การเปรียบเทียบแนวโน้มโดยรวมของทุกกรณีจะอภิปรายในหัวข้อ 5.4 ต่อไป

5.3.1 การทดสอบช่วงชั่วโมงเร่งด่วน ($H = 3.45$ นาฬิกา)

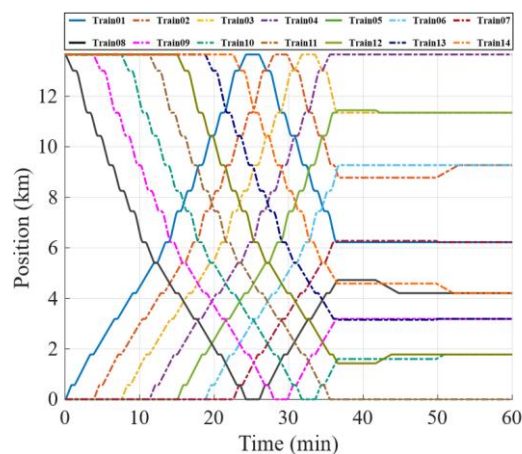
กรณี $H = 3.45$ นาฬิกา ถูกกำหนดให้เป็นตัวแทนสถานะการเดินรถช่วงชั่วโมงเร่งด่วน ซึ่งมีจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบอยู่ในระดับสูง และมีระยะห่างเชิงพื้นที่ระหว่างขบวนรถไฟฟ้าแนวโน้มสั้นลง ส่งผลให้โอกาสเกิดคู่แข่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้ามีมากกว่ากรณีที่ H มีค่าสูงกว่า อย่างไรก็ตาม แม้เงื่อนไขดังกล่าวจะเอื้อต่อการเชื่อมโยงระหว่างขบวนรถไฟฟ้า แต่ความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าที่สูงยังอาจทำให้ ESTS บางชุดต้องรับภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับหลายขบวนในช่วงเวลาใกล้เคียงกันได้ ดังนั้น การทดสอบในกรณีนี้จึงมีความสำคัญต่อการประเมินทั้งศักยภาพของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าและข้อจำกัดของ ESTS ภายใต้สถานะที่ระบบมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าสำรองพร้อมกันหลายตำแหน่ง

การจำลองกรณีนี้มีจำนวนขบวนรถไฟฟ้าปฏิบัติการพร้อมกันเฉลี่ยประมาณ 14 ขบวน ซึ่งถือเป็นกรณีที่มีความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าสูงที่สุดในชุดการทดสอบนี้ การกระจายตัวของขบวนรถไฟฟ้าในโครงข่ายจึงเพิ่มโอกาสให้ขบวนที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS อยู่ภายในระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของขบวนที่ติดตั้ง ESTS มากขึ้น โดยเฉพาะภายใต้เงื่อนไขระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าสูงสุด 3.5 กิโลเมตร อย่างไรก็ตาม ความสำเร็จของการอพยพไม่ได้ขึ้นอยู่กับระยะห่างเพียงอย่างเดียว แต่ยังสัมพันธ์กับตำแหน่งของขบวนรถไฟฟ้าในขณะเกิดเหตุไฟดับ ทิศทางการเคลื่อนที่ สถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุด พลังงานไฟฟ้าคงเหลือของ ESTS และขีดจำกัดด้านกระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าของระบบจ่ายไฟกระแสตรงร่วมด้วย

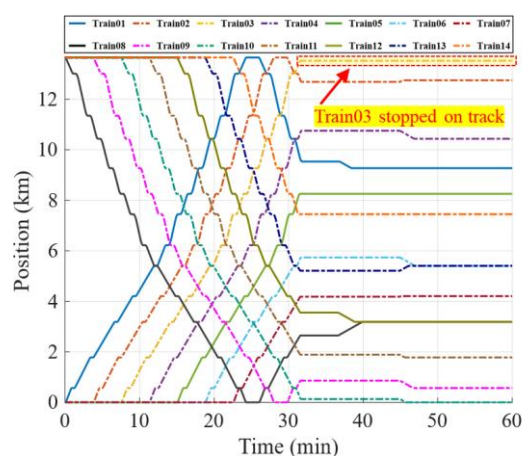
สำหรับการนำเสนอผลในหัวข้อนี้ จะพิจารณากรณีสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ที่แตกต่างกัน ได้แก่ $\%ESTS = 25\ 50$ และ 75 เพื่อเปรียบเทียบผลของจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่มีแหล่งพลังงานสำรองต่อความสามารถในการอพยพ ตัวชี้วัดหลักที่ใช้ในการประเมินประกอบด้วยอัตราความสำเร็จของการอพยพ จำนวนเหตุการณ์ที่ยังมีขบวนรถไฟฟ้าตกค้างบนทางวิ่ง ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขบวนรถไฟฟ้าได้รับ กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ ESTS ต้องจ่าย รวมถึงพลังงานไฟฟ้าที่ถูกใช้ไปในแต่ละชุด ทั้งนี้ การแสดงผลจะเลือกนำเสนอเหตุการณ์ตัวอย่างร่วมกับการสรุปอัตราความสำเร็จของกรณีทดสอบ เพื่อสะท้อนพฤติกรรมของระบบภายใต้สถานะชั่วโมงเร่งด่วน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.3.1.1 กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$

กรณีนี้เป็นการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้สภาวะการเดินรถช่วงชั่วโมงเร่งด่วน โดยกำหนดสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ไว้ที่ร้อยละ 25 ของจำนวนขบวนทั้งหมด ซึ่งเป็นระดับต่ำเมื่อเทียบกับจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบ เงื่อนไขดังกล่าวทำให้ระยะห่างเชิงพื้นที่ระหว่างขบวนรถไฟฟ้ามีแนวโน้มสั้นลงและเอื้อต่อการเกิดคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในบางช่วงเวลา แต่ขณะเดียวกันจำนวน ESTS ที่จำกัดย่อมทำให้ภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าต่อหนึ่งขบวนมีแนวโน้มสูงขึ้น หัวข้อนี้จึงนำเสนอผลการตอบสนองของระบบในกรณีดังกล่าว พร้อมทั้งสรุปอัตราความสำเร็จของการตอบสนอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

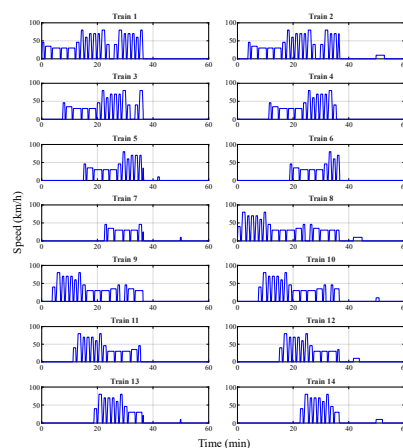


(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

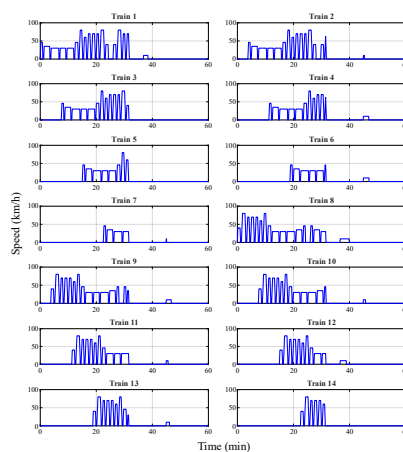


(ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$

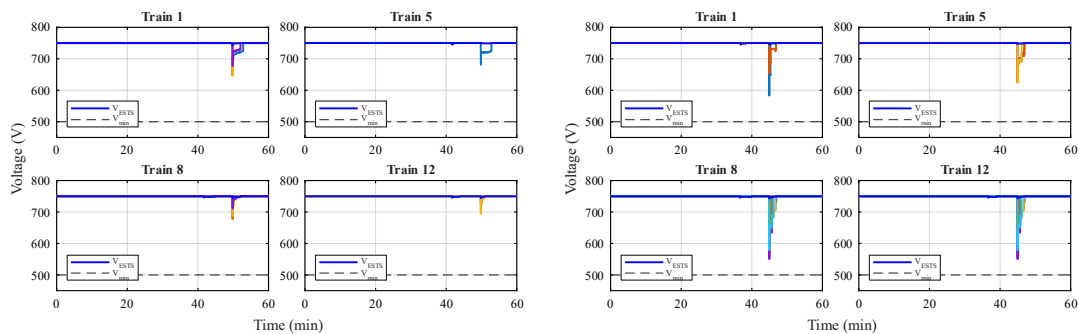


(ก) กรณิรไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร



(ข) กรณิรไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

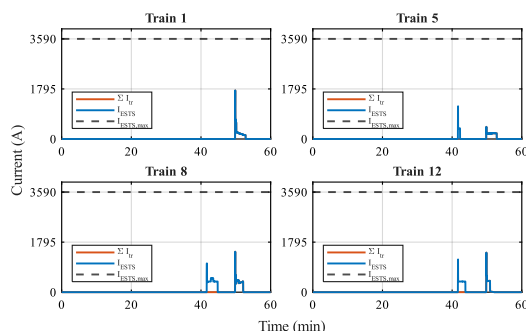
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$



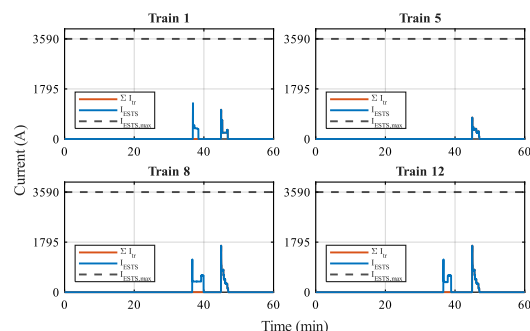
(ก) กรณิรไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

(ข) กรณิรไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.6 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$

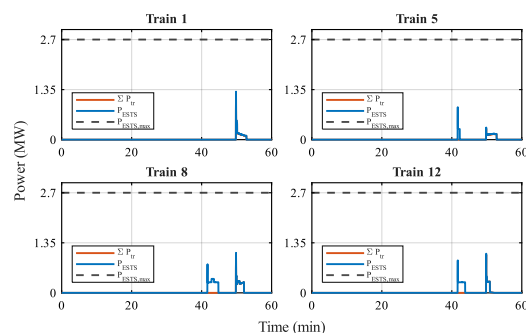


(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

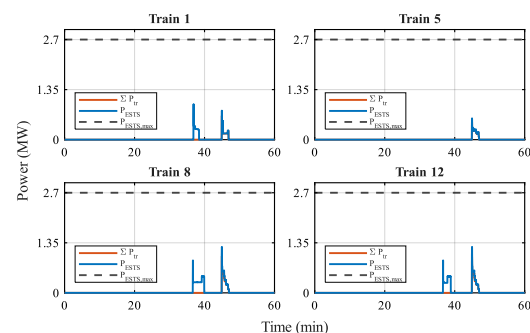


(ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.7 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟแต่ละขบวน กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$

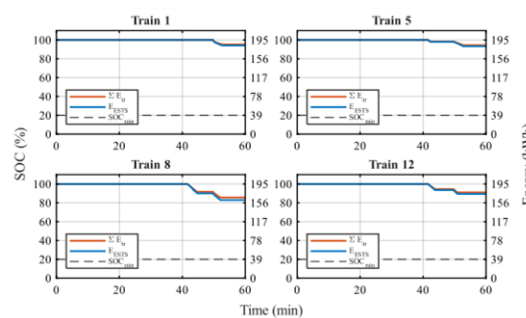


(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

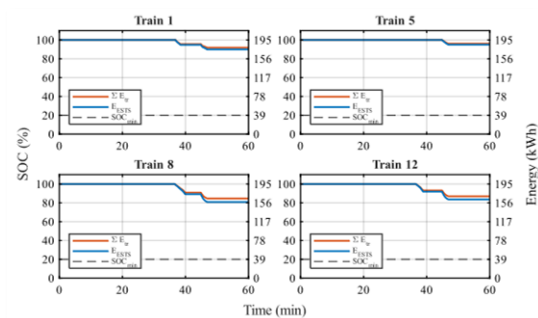


(ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.8 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟแต่ละขบวน กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$



(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

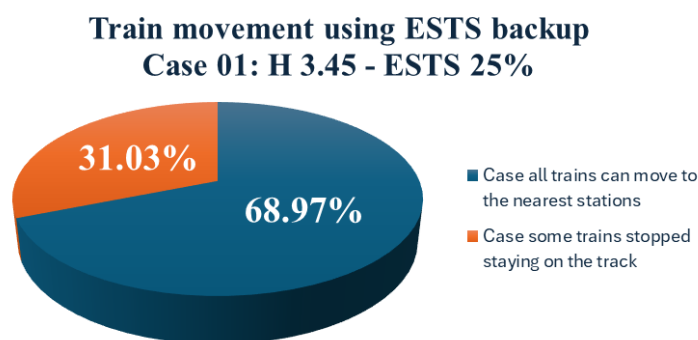


(ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.9 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$

เมื่อพิจารณาผลการจำลองในกรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$ พบว่า ESTS สามารถสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าสำรองสำหรับการอพยพขบวนรถไฟให้สามารถ

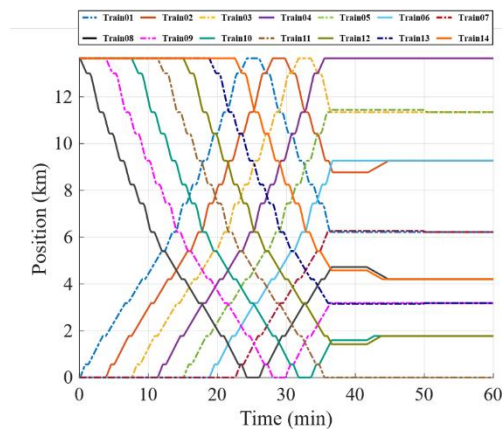
เคลื่อนที่ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้สำเร็จ คิดเป็นร้อยละ 68.97 ของเหตุการณ์ทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 5.10 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า แนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้ามีโอกาสประสบความสำเร็จสูงในสภาวะการเดินรถที่มีความหนาแน่นสูง แม้จะมีการติดตั้ง ESTS ในสัดส่วนที่จำกัด อย่างไรก็ตามยังปรากฏบางเหตุการณ์ที่มีขบวนรถไฟตกรถค้ำบนเส้นทางการให้บริการ โดยสาเหตุหลักสัมพันธ์กับตำแหน่งของขบวนรถไฟที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS ซึ่งอยู่ห่างจากขบวนรถไฟที่ทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเกินระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่กำหนด ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่า ภายใต้สภาวะชั่วโมงเร่งด่วนและสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ในระดับต่ำ ระบบมีศักยภาพในการตอบสนองต่อเหตุไฟดับได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังมีข้อจำกัดด้านความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่ควรได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมในประเด็นนี้



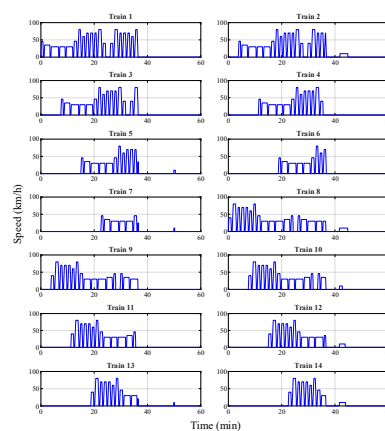
รูปที่ 5.10 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$

5.3.1.2 กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$

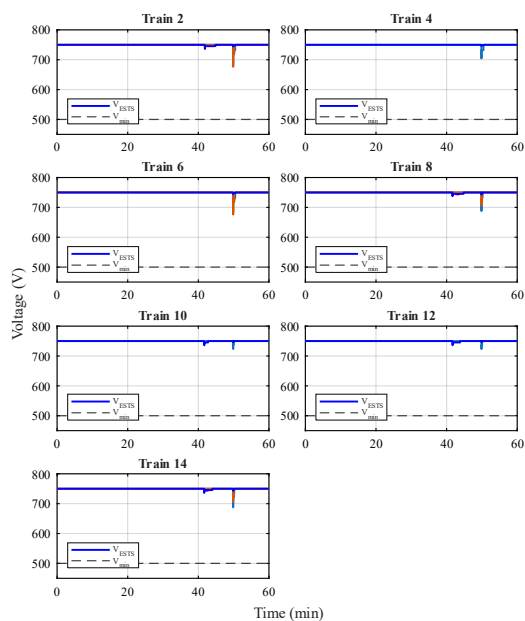
กรณีนี้เป็นการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้สภาวะการเดินรถช่วงชั่วโมงเร่งด่วน โดยกำหนดสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ไว้ที่ร้อยละ 50 ของจำนวนขบวนทั้งหมด ซึ่งเป็นระดับปานกลางเมื่อเทียบกับจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบ เงื่อนไขดังกล่าวทำให้จำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS เพิ่มขึ้นจากกรณีร้อยละ 25 และช่วยให้ความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มดีขึ้น ขณะเดียวกันภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของ ESTS แต่ละชุดมีแนวโน้มกระจายตัวได้เหมาะสมมากขึ้น หัวข้อนี้จึงนำเสนอผลการตอบสนองของระบบในกรณีดังกล่าว พร้อมทั้งสรุปอัตราความสำเร็จของการตอบสนอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้



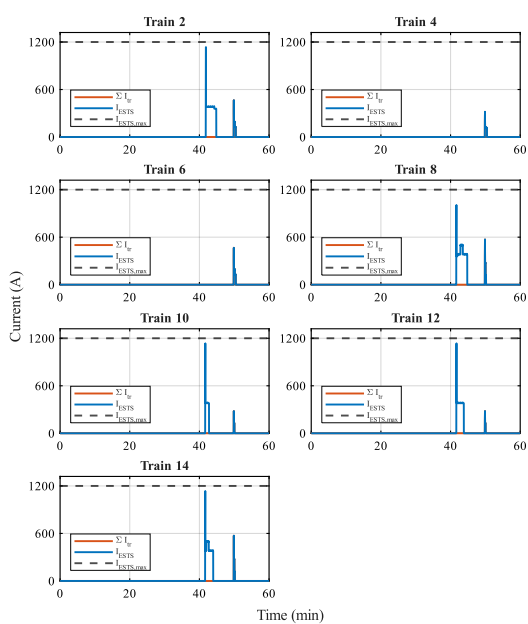
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$



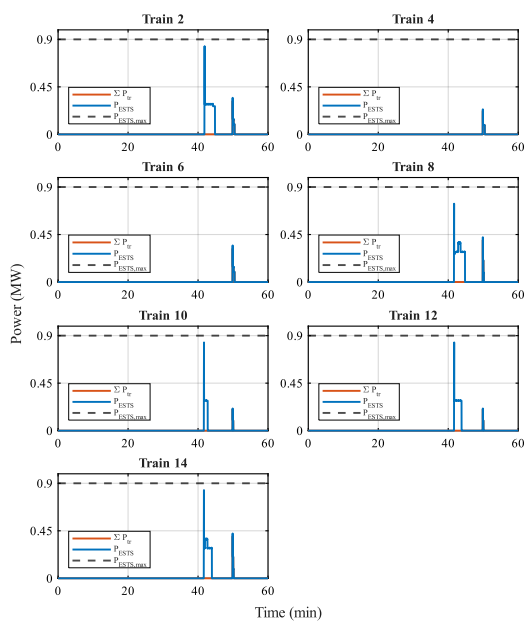
รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$



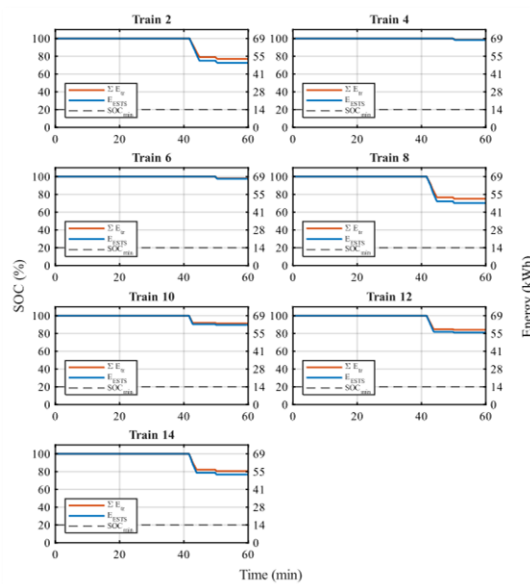
รูปที่ 5.13 แรงดันไฟฟ้า ESTS และแรงไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$



รูปที่ 5.14 กระแสไฟฟ้า ESTS และกระแสไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$



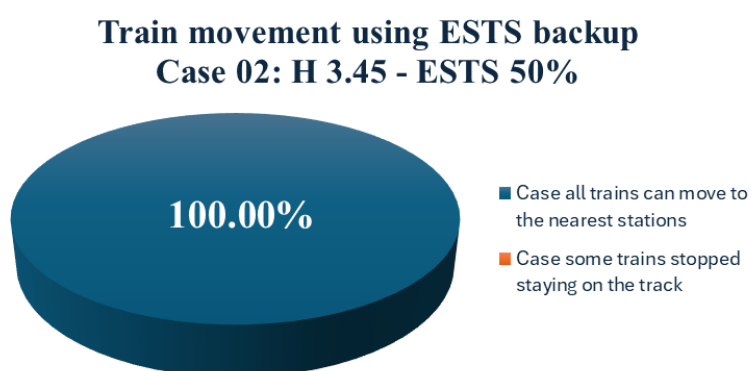
รูปที่ 5.15 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟแต่ละขบวน กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$



รูปที่ 5.16 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$

เมื่อพิจารณาผลการจำลองในกรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$ พบว่า ESTS สามารถสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าสำรองสำหรับการอพยพขบวนรถไฟให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้สำเร็จ คิดเป็นร้อยละ 100.00 ของเหตุการณ์ทั้งหมด แสดง

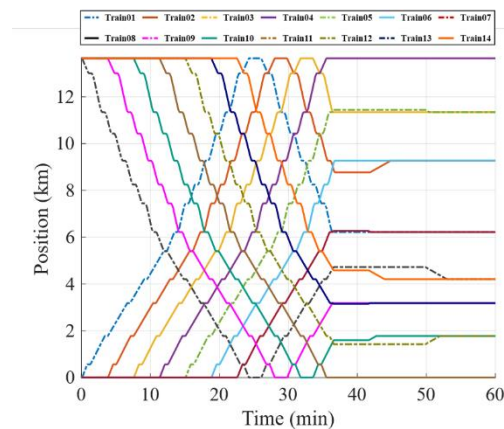
ดังรูปที่ 5.17 ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่า ภายใต้สภาวะชั่วโมงเร่งด่วนและสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ในระดับปานกลาง ระบบมีศักยภาพในการตอบสนองต่อเหตุไฟดับได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้ามีเพียงพอต่อการจับคู่ระหว่างขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้งและไม่ได้ติดตั้ง ESTS ในทุกเหตุการณ์ที่ทำการทดสอบ อีกทั้งยังช่วยให้ภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระจายตัวระหว่าง ESTS หลายชุดได้เหมาะสม ลดแนวโน้มการเกิดคอขวดจากการพึ่งพา ESTS เพียงบางชุดส่งผลให้ภาพรวมการตอบสนองต่อเหตุไฟดับของ ESTS ในกรณีทดสอบนี้สูงขึ้น



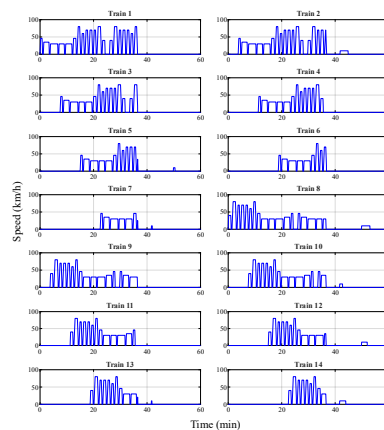
รูปที่ 5.17 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$

5.3.1.3 กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$

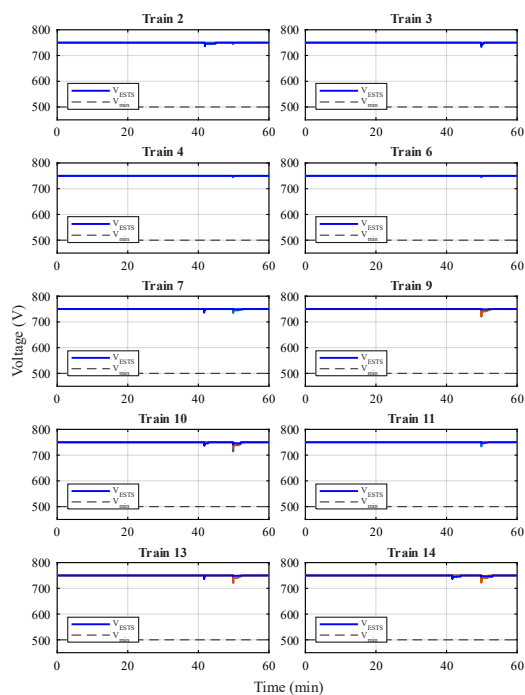
กรณีนี้เป็นการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้สภาวะการเดินรถช่วงชั่วโมงเร่งด่วน โดยกำหนดสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ไว้ที่ร้อยละ 75 ของจำนวนขบวนทั้งหมด ซึ่งเป็นระดับสูงเมื่อเทียบกับจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบ เงื่อนไขดังกล่าวทำให้จำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS เพิ่มขึ้นจากกรณีร้อยละ 25 และ 50 และช่วยให้ครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มดีขึ้น ขณะเดียวกันภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของ ESTS แต่ละชุดมีแนวโน้มกระจายตัวได้ทั่วถึงมากขึ้น หัวข้อนี้จึงนำเสนอผลการตอบสนองของระบบในกรณีดังกล่าว พร้อมทั้งสรุปอัตราความสำเร็จของการตอบสนอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้



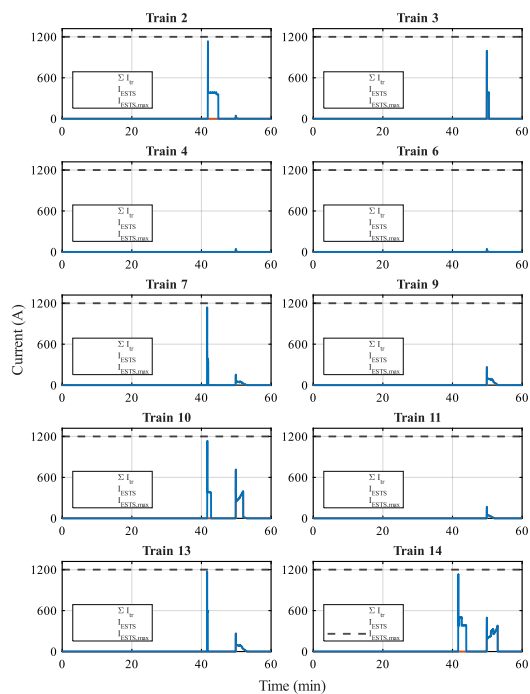
รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$



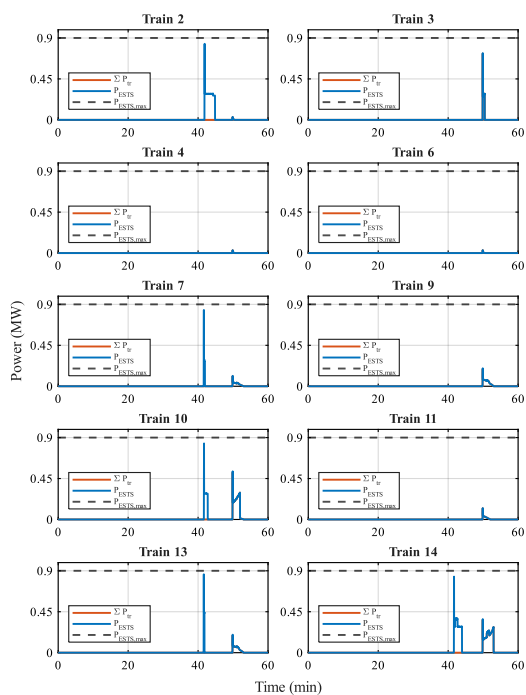
รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$



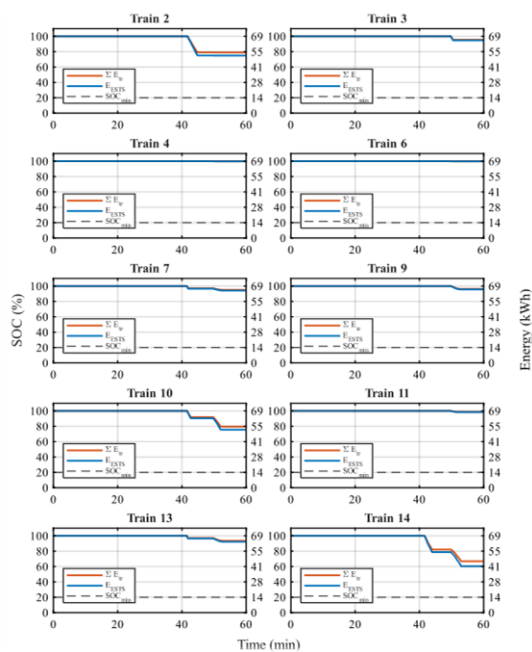
รูปที่ 5.20 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$



รูปที่ 5.21 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$



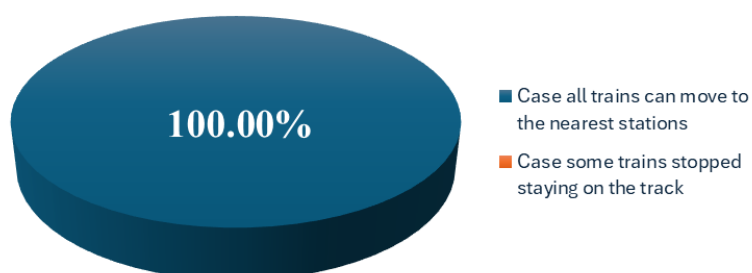
รูปที่ 5.22 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$



รูปที่ 5.23 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$

เมื่อพิจารณาผลการจำลองในกรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$ พบว่า ESTS สามารถสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าสำรองสำหรับการอพยพขบวนรถไฟทำให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้สำเร็จ คิดเป็นร้อยละ 100.00 ของเหตุการณ์ทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 5.24 ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่า ภายใต้สภาวะชั่วโมงเร่งด่วนและสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ในระดับสูง ระบบมีศักยภาพในการตอบสนองต่อเหตุไฟดับได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้ามีเพียงพอต่อการจับคู่ระหว่างขบวนรถไฟที่ติดตั้งและไม่ได้ติดตั้ง ESTS ในทุกเหตุการณ์ที่ทำการทดสอบ อีกทั้งยังช่วยให้ภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระจายตัวระหว่าง ESTS หลายชุดได้เหมาะสม ลดแนวโน้มการเกิดคอขวดจากการพึ่งพา ESTS เพียงบางชุด ส่งผลให้ระบบมีความต่อเนื่องของการตอบสนองต่อเหตุไฟดับสูงขึ้นในภาพรวมของกรณีทดสอบนี้

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



รูปที่ 5.24 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$

5.3.2 การทดสอบช่วงชั่วโมงปกติ ($H = 6$ นาที)

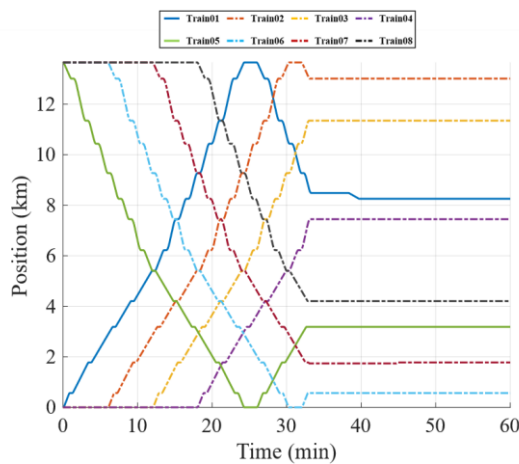
กรณี $H = 6$ นาที ถูกกำหนดให้เป็นตัวแทนสถานะการเดินรถช่วงชั่วโมงปกติ ซึ่งมีจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบอยู่ในระดับปานกลางเมื่อเทียบกับช่วงชั่วโมงเร่งด่วน และมีระยะห่างเชิงพื้นที่ระหว่างขบวนรถไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โอกาสเกิดคู่แข่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้าน้อยลงจากกรณี $H = 3.45$ นาที อย่างไรก็ตาม แม้ความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าที่ลดลงจะช่วยลดแนวโน้มการกระจุกตัวของภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าบน ESTS บางชุด แต่ก็ทำให้ความสำเร็จของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของแหล่งพลังงานไฟฟ้าสำรองในโครงข่ายมากขึ้น ดังนั้น การทดสอบในกรณีนี้จึงมีความสำคัญต่อการประเมินขีดความสามารถของ ESTS ภายใต้สถานะการเดินรถทั่วไป ซึ่งมีจำนวนขบวนรถไฟฟ้าและโอกาสการเชื่อมโยงระหว่างขบวนอยู่ในระดับปานกลาง

การจำลองกรณีนี้มีจำนวนขบวนรถไฟฟ้าปฏิบัติการพร้อมกันเฉลี่ยประมาณ 8 ขบวน ซึ่งต่ำกว่ากรณีชั่วโมงเร่งด่วน แต่ยังเพียงพอสำหรับการพิจารณาความเป็นไปได้ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้าในโครงข่าย การกระจายตัวของขบวนรถไฟฟ้าในกรณีนี้ทำให้บางเหตุการณ์มีขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS อยู่ภายในระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าสูงสุด 3.5 กิโลเมตร ขณะที่บางเหตุการณ์อาจมีระยะห่างเกินกว่าข้อจำกัดที่กำหนด ส่งผลให้ไม่สามารถแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าได้แม้ระบบยังมีพลังงานไฟฟ้าสำรองคงเหลืออยู่ ดังนั้น ผลการทดสอบในกรณี $H = 6$ นาที จึงสามารถสะท้อนความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้า สัดส่วนการติดตั้ง ESTS และข้อจำกัดด้านระยะทางในการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าได้ชัดเจน

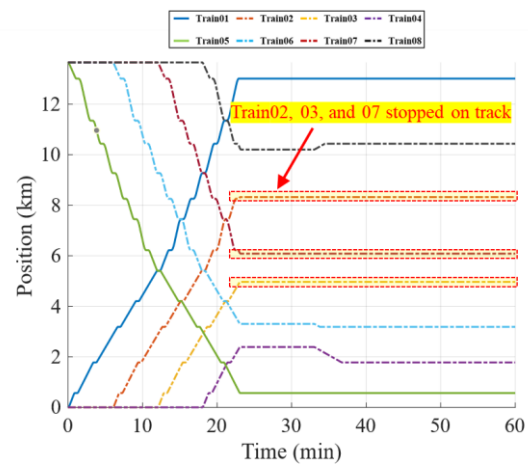
สำหรับการนำเสนอผลในหัวข้อนี้ จะพิจารณากรณีสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ที่แตกต่างกัน ได้แก่ $\%ESTS = 25$ 50 และ 75 เพื่อเปรียบเทียบผลของจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่มีแหล่งพลังงานสำรองต่อความสามารถในการอพยพภายใต้สถานะชั่วโมงปกติ ตัวชี้วัดหลักที่ใช้ในการประเมินประกอบด้วยอัตราความสำเร็จของการอพยพ จำนวนเหตุการณ์ที่ยังมีขบวนรถไฟฟ้าตกค้างบนทางวิ่ง ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขบวนรถไฟฟ้าได้รับ กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ ESTS ต้องจ่ายรวมถึงพลังงานไฟฟ้าที่ถูกใช้ไปในแต่ละชุด ทั้งนี้ การแสดงผลจะเลือกนำเสนอเหตุการณ์ตัวอย่างร่วมกับการสรุปอัตราความสำเร็จของกรณีทดสอบ เพื่อสะท้อนพฤติกรรมของระบบภายใต้สถานะชั่วโมงปกติ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.3.2.1 กรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$

กรณีนี้เป็นการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้สภาวะการเดินรถช่วงชั่วโมงปกติ โดยกำหนดสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ไว้ที่ร้อยละ 25 ของจำนวนขบวนทั้งหมด ซึ่งเป็นระดับต่ำเมื่อเทียบกับจำนวนขบวนรถไฟที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบ เงื่อนไขดังกล่าวทำให้ระยะห่างเชิงพื้นที่ระหว่างขบวนรถไฟเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับช่วงชั่วโมงเร่งด่วน และส่งผลให้อโอกาสในการเกิดคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าลดลง ขณะเดียวกันจำนวน ESTS ที่จำกัดย่อมทำให้ภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าต่อหนึ่งชุดมีแนวโน้มสูงขึ้น หัวข้อนี้จึงนำเสนอผลการตอบสนองของระบบในกรณีดังกล่าว พร้อมทั้งสรุปอัตราความสำเร็จของการตอบสนอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

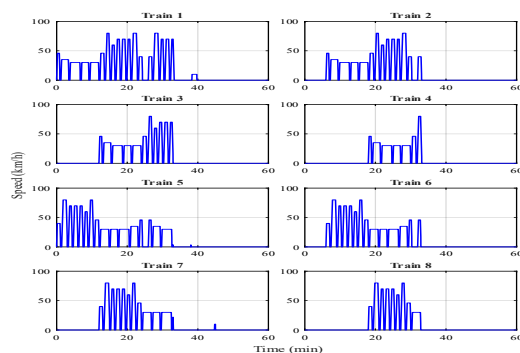


(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

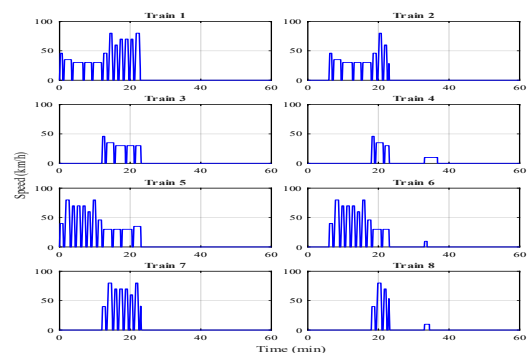


(ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$

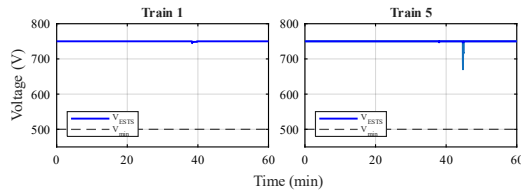


(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

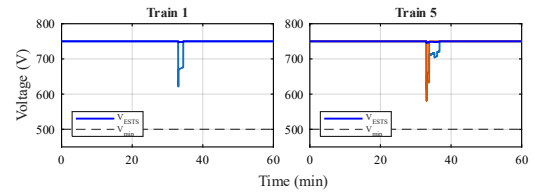


(ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$

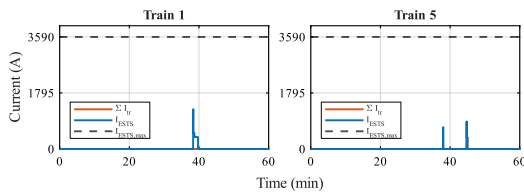


(ก) กรณิธรไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

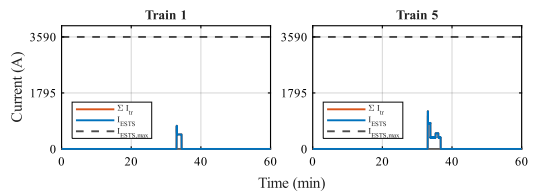


(ข) กรณิธรไฟฟ้าบางขบวนตกค้ำงบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.27 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณิ $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 25\%$

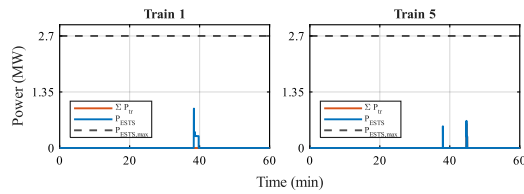


(ก) กรณิธรไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

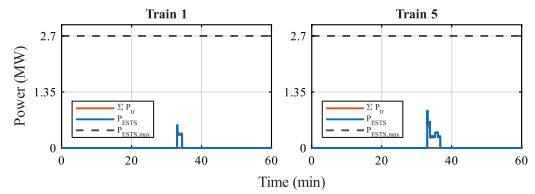


(ข) กรณิธรไฟฟ้าบางขบวนตกค้ำงบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.28 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณิ $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 25\%$

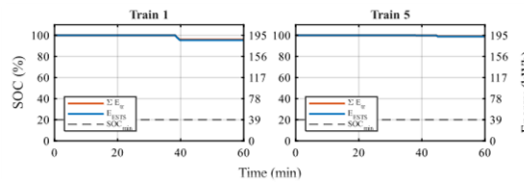


(ก) กรณิธรไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

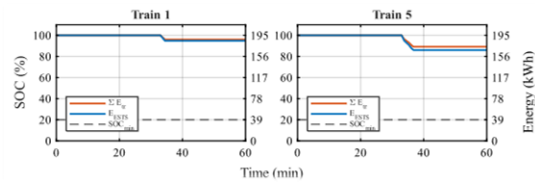


(ข) กรณิธรไฟฟ้าบางขบวนตกค้ำงบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.29 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณิ $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 25\%$



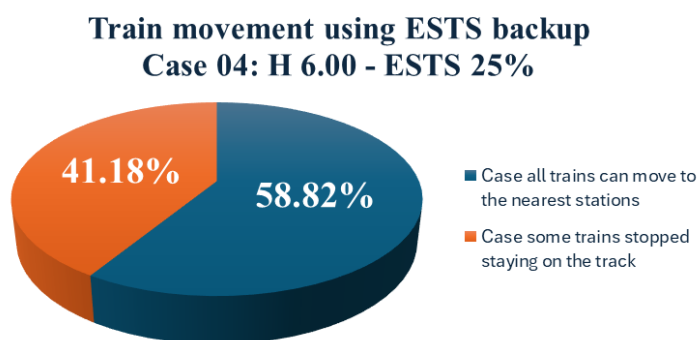
(ก) กรณิธรไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร



(ข) กรณิธรไฟฟ้าบางขบวนตกค้ำงบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.30 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณิ $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 25\%$

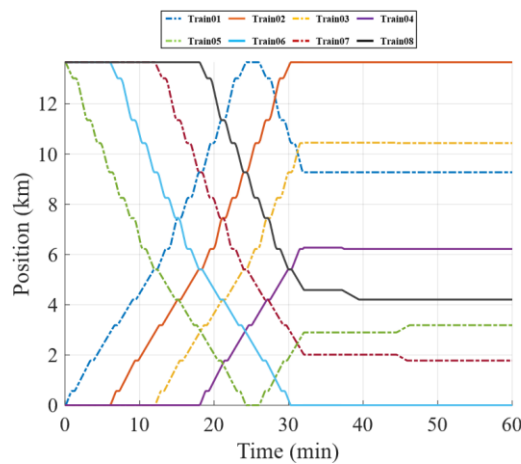
เมื่อพิจารณาผลการจำลองในกรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$ พบว่า ESTS สามารถสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าสำรองสำหรับการอพยพขบวนรถไฟให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้สำเร็จ คิดเป็นร้อยละ 58.82 ของเหตุการณ์ทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 5.31 โดยยังปรากฏหลายเหตุการณ์ที่มีขบวนรถไฟตักค้างบนเส้นทางการให้บริการ ซึ่งสาเหตุหลักสัมพันธ์กับตำแหน่งของขบวนรถไฟที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS ซึ่งอยู่ห่างจากขบวนรถไฟที่ทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเกินระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่กำหนด ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่าภายใต้สภาวะชั่วโมงปกติและสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ในระดับต่ำ ระบบมีศักยภาพในการตอบสนองต่อเหตุไฟดับได้ในระดับที่ยังจำกัด และยังมีข้อจำกัดด้านความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่ควรได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมในประเด็นนี้



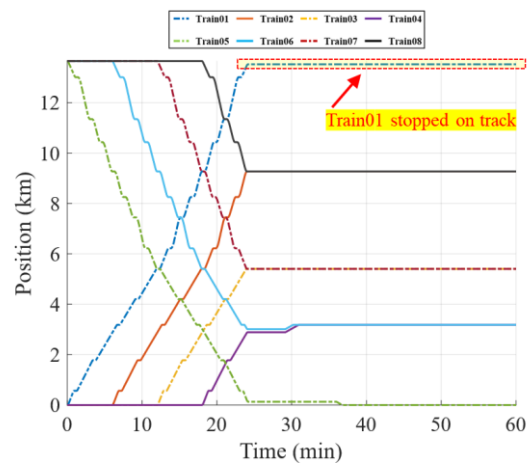
รูปที่ 5.31 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$

5.3.2.2 กรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$

กรณีนี้เป็นการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้สภาวะการเดินทางช่วงชั่วโมงปกติ โดยกำหนดสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ไว้ที่ร้อยละ 50 ของจำนวนขบวนทั้งหมด ซึ่งเป็นระดับปานกลางเมื่อเทียบกับจำนวนขบวนรถไฟไฟฟ้าที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบ เงื่อนไขดังกล่าวทำให้จำนวนขบวนรถไฟไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS เพิ่มขึ้นจากกรณีร้อยละ 25 และช่วยให้ครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าดีขึ้น ขณะเดียวกันภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของ ESTS แต่ละชุดมีแนวโน้มกระจายตัวเหมาะสมมากขึ้น หัวข้อนี้จึงนำเสนอผลการตอบสนองของระบบ พร้อมทั้งสรุปอัตราความสำเร็จของการตอบสนอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

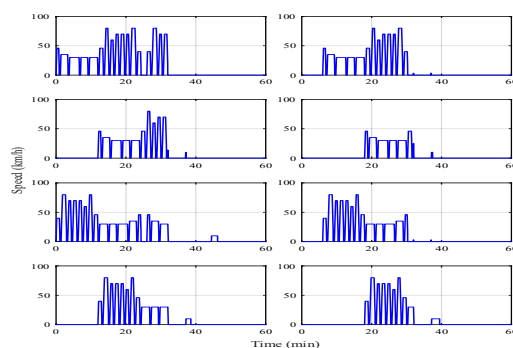


(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

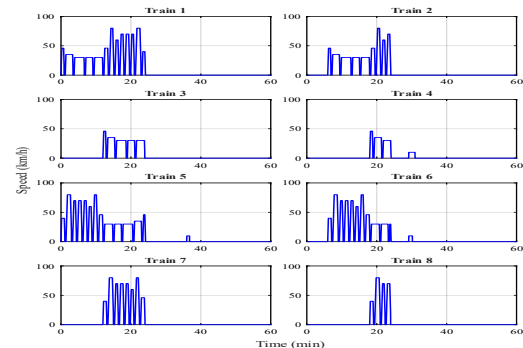


(ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$

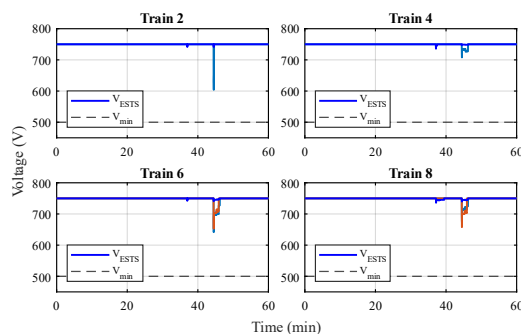


(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

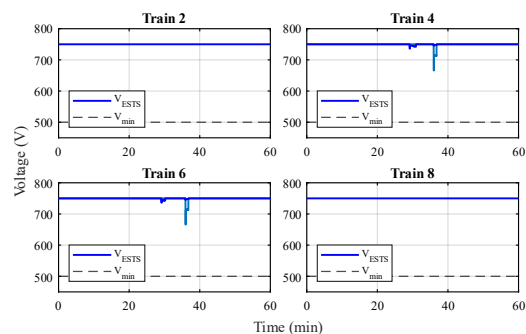


(ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

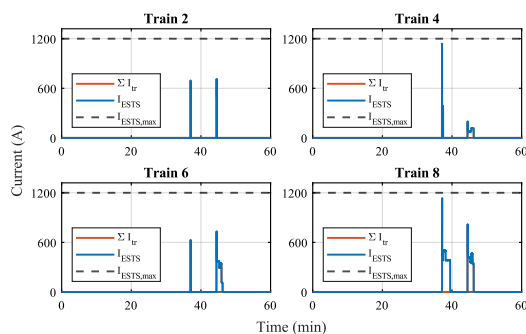
รูปที่ 5.33 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$



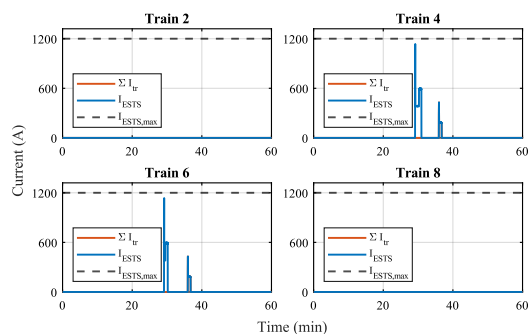
(ก) กรณิรณไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร



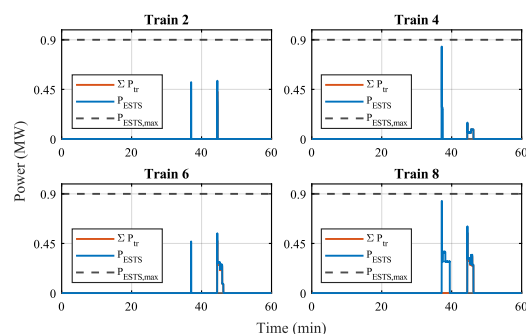
(ข) กรณิรณไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.34 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$ 

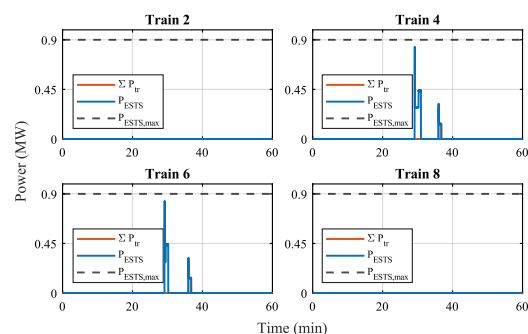
(ก) กรณิรณไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร



(ข) กรณิรณไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

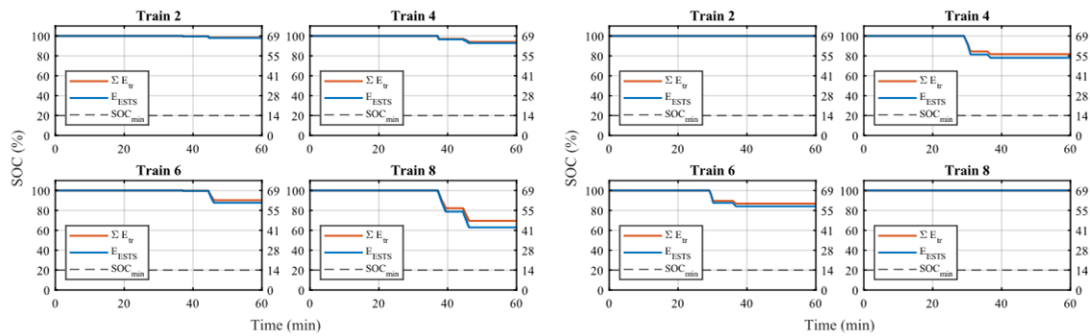
รูปที่ 5.35 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$ 

(ก) กรณิรณไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร



(ข) กรณิรณไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.36 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$

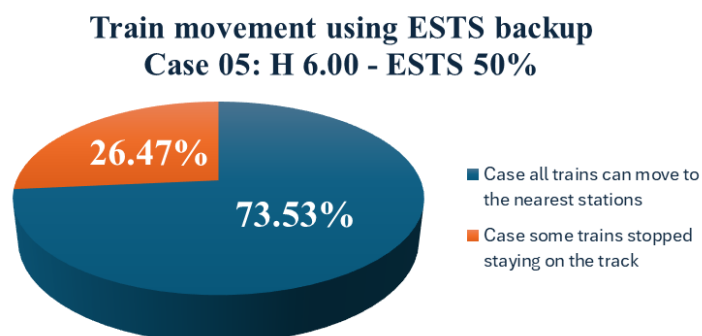


(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

(ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

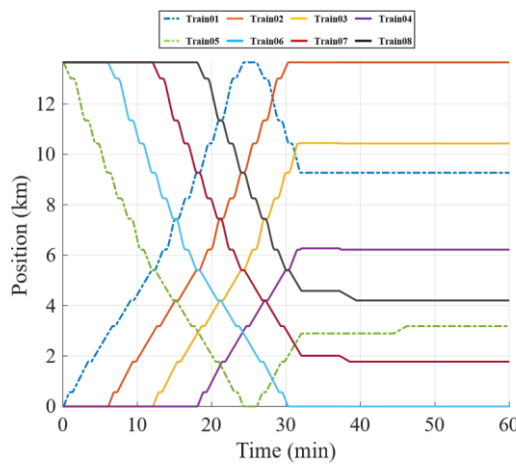
รูปที่ 5.37 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$

เมื่อพิจารณาผลการจำลองในกรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$ พบว่า ESTS สามารถสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าสำรองสำหรับการอพยพขบวนรถไฟให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้สำเร็จ คิดเป็นร้อยละ 75.53 ของเหตุการณ์ทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 5.38 อย่างไรก็ตาม ยังปรากฏบางเหตุการณ์ที่มีขบวนรถไฟตกค้างบนเส้นทางการให้บริการ โดยสาเหตุหลักสัมพันธ์กับตำแหน่งของขบวนรถไฟที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS ซึ่งอยู่ห่างจากขบวนรถไฟที่ทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเกินระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่กำหนด ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่าภายใต้สภาวะชั่วโมงปกติและสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ในระดับปานกลาง ระบบมีศักยภาพในการตอบสนองต่อเหตุไฟดับได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังมีข้อจำกัดด้านความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่ควรได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมในประเด็นนี้

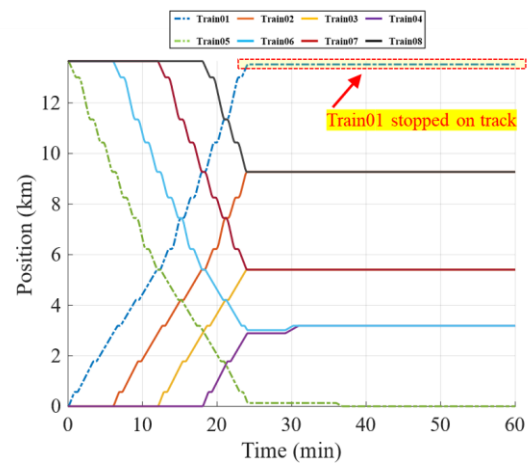
รูปที่ 5.38 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$

5.3.2.3 กรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$

กรณีนี้เป็นการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้สภาวะการเดินรถช่วงชั่วโมงปกติ โดยกำหนดสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ไว้ที่ร้อยละ 75 ของจำนวนขบวนทั้งหมด ซึ่งเป็นระดับสูงเมื่อเทียบกับจำนวนขบวนรถไฟฟ้ที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบ เงื่อนไขดังกล่าวทำให้จำนวนขบวนรถไฟฟ้ที่ติดตั้ง ESTS เพิ่มขึ้นจากกรณีร้อยละ 25 และ 50 และช่วยให้ครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าดีขึ้น ขณะเดียวกันภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของ ESTS แต่ละชุดมีแนวโน้มกระจายตัวทั่วถึงมากขึ้น หัวข้อนี้จึงนำเสนอผลการตอบสนองของระบบ พร้อมทั้งสรุปอัตราความสำเร็จของการตอบสนอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

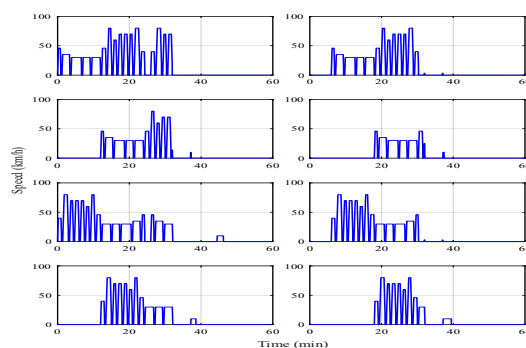


(ก) กรณีรถไฟฟ้ทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

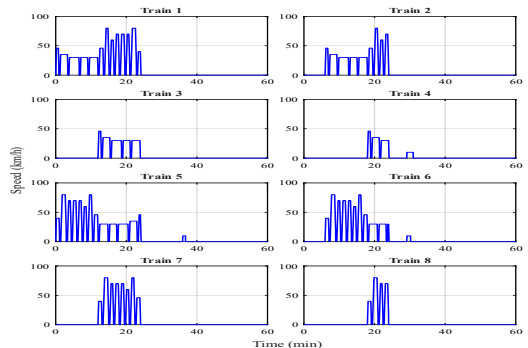


(ข) กรณีรถไฟฟ้บางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.39 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$

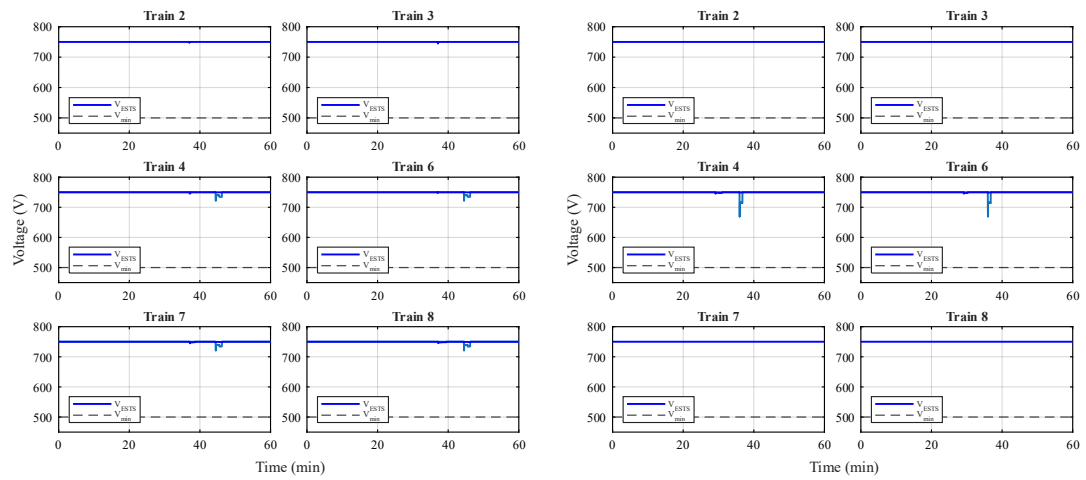


(ก) กรณีรถไฟฟ้ทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร



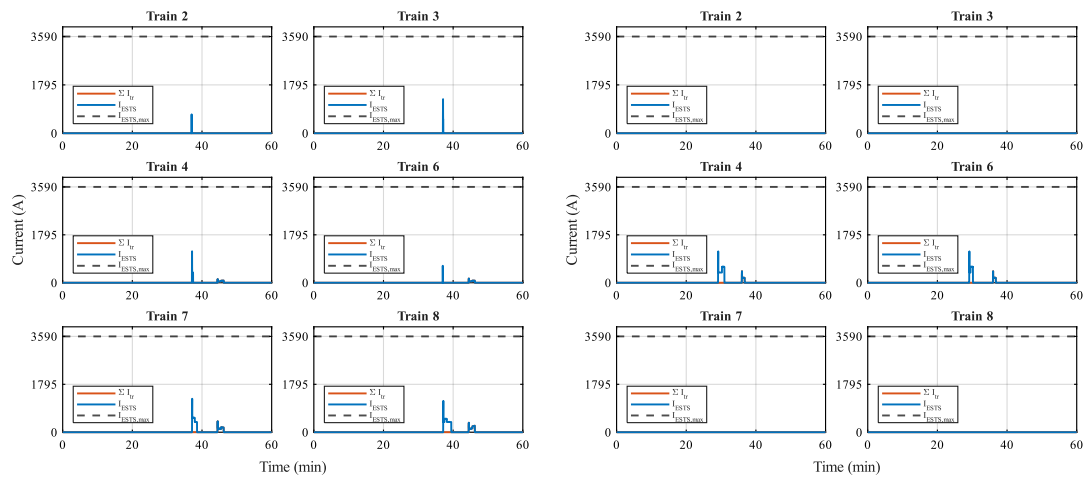
(ข) กรณีรถไฟฟ้บางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.40 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$



(ก) กรณิรไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

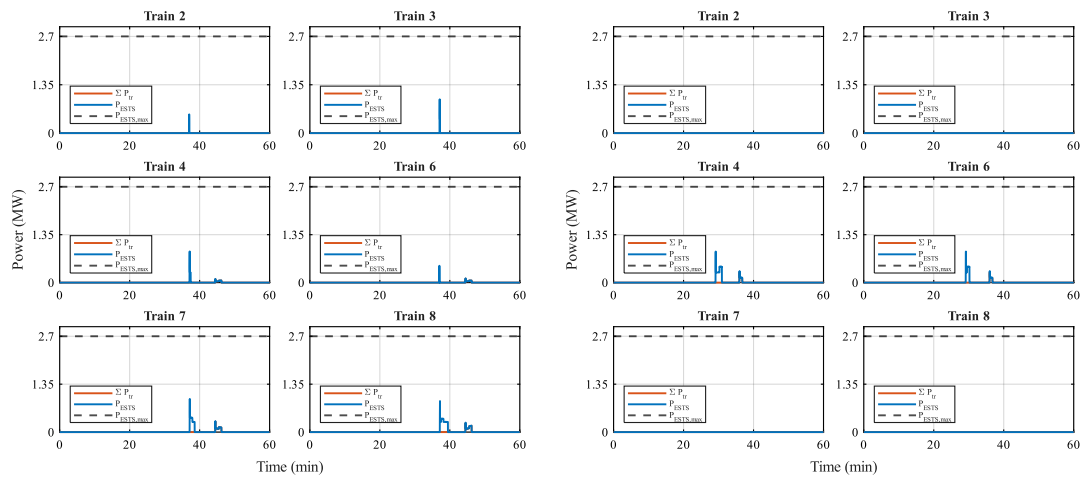
(ข) กรณิรไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.41 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$ 

(ก) กรณิรไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

(ข) กรณิรไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

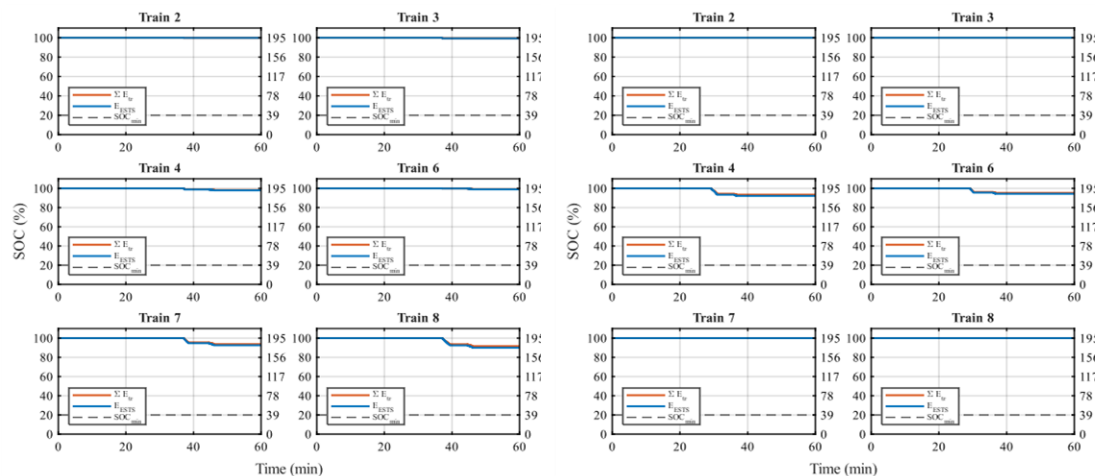
รูปที่ 5.42 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$



(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

(ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.43 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟแต่ละขบวน กรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$



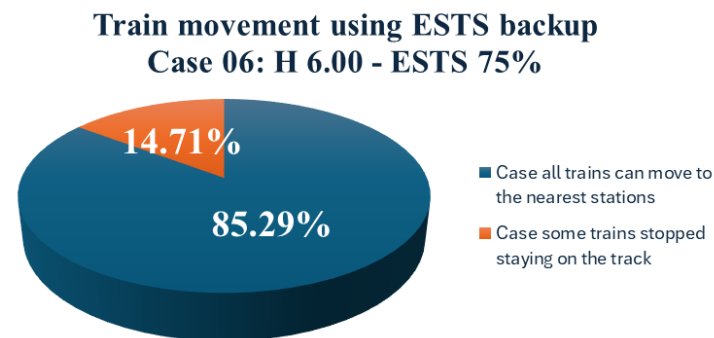
(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

(ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.44 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$

เมื่อพิจารณาผลการจำลองในกรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$ พบว่า ESTS สามารถสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าสำรองสำหรับการอพยพขบวนรถไฟให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้สำเร็จ คิดเป็นร้อยละ 85.29 ของเหตุการณ์ทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 5.45 อย่างไรก็ตาม ยังปรากฏบางเหตุการณ์ที่มีขบวนรถไฟตกค้างบนเส้นทาง การให้บริการ โดยสาเหตุหลักสัมพันธ์กับตำแหน่งของขบวนรถไฟที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS ซึ่งอยู่ห่างจาก

ขบวนรถไฟที่ทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเกินระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่กำหนด ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่าภายใต้สภาวะชั่วโมงปกติและสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ในระดับสูง ระบบมีศักยภาพในการตอบสนองต่อเหตุไฟดับได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังมีข้อจำกัดด้านความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่ควรได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมในประเด็นนี้



รูปที่ 5.45 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 6$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$

5.3.3 การทดสอบช่วงนอกชั่วโมงเร่งด่วน ($H = 8$ นาฬิกา)

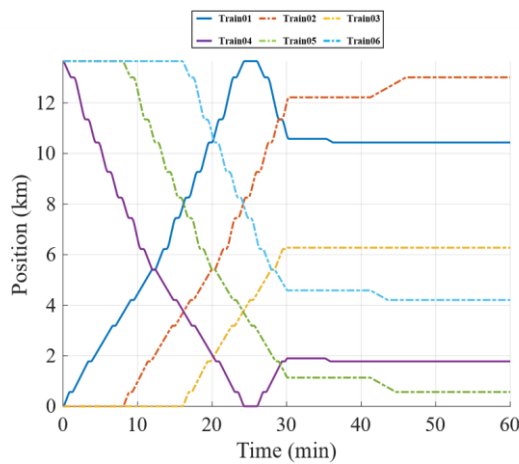
กรณี $H = 8$ นาฬิกา ถูกกำหนดให้เป็นตัวแทนสภาวะการเดินทางนอกชั่วโมงเร่งด่วน ซึ่งมีจำนวนขบวนรถไฟที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบอยู่ในระดับต่ำเมื่อเทียบกับช่วงชั่วโมงเร่งด่วน และช่วงชั่วโมงปกติ อีกทั้งยังมีระยะห่างเชิงพื้นที่ระหว่างขบวนรถไฟเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ส่งผลให้โอกาสเกิดคู่แข่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟลดลงจากกรณี $H = 3.45$ นาฬิกา และ $H = 6$ นาฬิกา อย่างไรก็ตาม แม้ความหนาแน่นของขบวนรถไฟที่ลดลงจะช่วยลดแนวโน้มการกระจุกตัวของภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าบน ESTS บางชุด แต่ก็ทำให้ความสำเร็จของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของแหล่งพลังงานไฟฟ้าสำรองในโครงข่ายมากขึ้น ดังนั้น การทดสอบในกรณีนี้จึงมีความสำคัญต่อการประเมินข้อจำกัดของ ESTS ภายใต้สภาวะที่ระบบมีจำนวนขบวนรถไฟน้อยและมีโอกาสการเชื่อมโยงระหว่างขบวนจำกัด

การจำลองกรณีนี้มีจำนวนขบวนรถไฟที่ปฏิบัติการพร้อมกันเฉลี่ยประมาณ 6 ขบวน ซึ่งเป็นกรณีที่มีความหนาแน่นของขบวนรถไฟต่ำที่สุดในชุดการทดสอบนี้ การกระจายตัวของขบวนรถไฟในโครงข่ายจึงมีแนวโน้มทำให้ขบวนที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS อยู่ห่างจากขบวนที่ติดตั้ง ESTS มากขึ้น และในบางเหตุการณ์อาจอยู่นอกระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าสูงสุด 3.5 กิโลเมตร ส่งผลให้ไม่สามารถรับพลังงานไฟฟ้าสำรองได้ แม้ระบบยังมี ESTS และพลังงานไฟฟ้าคงเหลืออยู่ก็ตาม กรณี $H = 8$ นาฬิกา จึงเป็นเงื่อนไขสำคัญสำหรับตรวจสอบขีดจำกัดของแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า โดยเฉพาะผลของระยะห่างเชิงพื้นที่ต่อความสามารถในการอพยพขบวนรถไฟไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุด

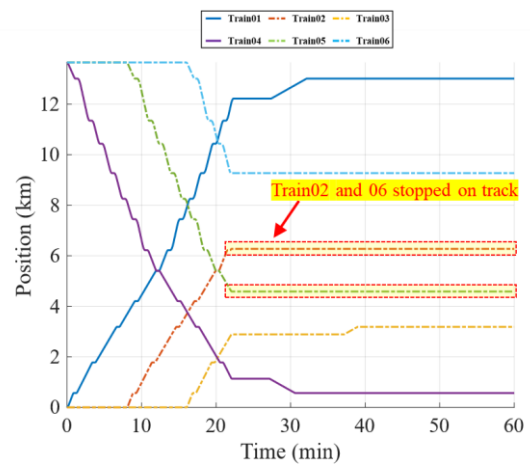
สำหรับการนำเสนอผลในหัวข้อนี้ จะพิจารณากรณีสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ที่แตกต่างกัน ได้แก่ $\%ESTS = 25$ 50 และ 75 เพื่อเปรียบเทียบผลของจำนวนขบวนรถไฟที่มีแหล่งพลังงานสำรองต่อความสามารถในการอพยพภายใต้สภาวะนอกชั่วโมงเร่งด่วน ตัวชี้วัดหลักที่ใช้ในการประเมินประกอบด้วยอัตราความสำเร็จของการอพยพ จำนวนเหตุการณ์ที่ยังมีขบวนรถไฟตกค้างบนทางวิ่ง ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขบวนรถไฟได้รับ กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ ESTS ต้องจ่ายรวมถึงพลังงานไฟฟ้าที่ถูกใช้ไปในแต่ละชุด ทั้งนี้ การแสดงผลจะเลือกนำเสนอเหตุการณ์ตัวอย่างร่วมกับการสรุปอัตราความสำเร็จของกรณีทดสอบ เพื่อสะท้อนพฤติกรรมและข้อจำกัดของระบบภายใต้สภาวะนอกชั่วโมงเร่งด่วน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.3.3.1 กรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$

กรณีนี้เป็นการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้สภาวะการเดินรถช่วงนอกชั่วโมงเร่งด่วน โดยกำหนดสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ไว้ที่ร้อยละ 25 ของจำนวนขบวนทั้งหมด ซึ่งเป็นระดับต่ำเมื่อเทียบกับจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบ เงื่อนไขดังกล่าวทำให้ระยะห่างเชิงพื้นที่ระหว่างขบวนรถไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และส่งผลให้โอกาสในการเกิดคู่แข่งพลังงานไฟฟ้าลดลง ขณะเดียวกันจำนวน ESTS ที่จำกัดย่อมทำให้ภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าต่อหนึ่งขบวนมีแนวโน้มสูงขึ้น หัวข้อนี้จึงนำเสนอผลการตอบสนองของระบบในกรณีดังกล่าว พร้อมทั้งสรุปอัตราความสำเร็จของการตอบสนอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

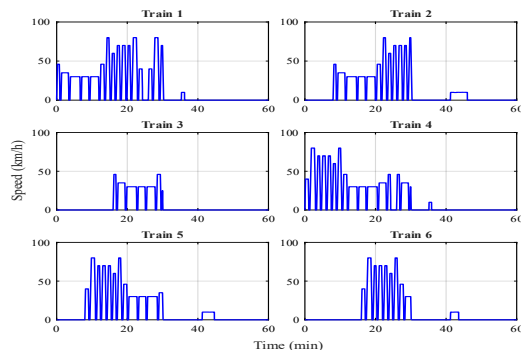


(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

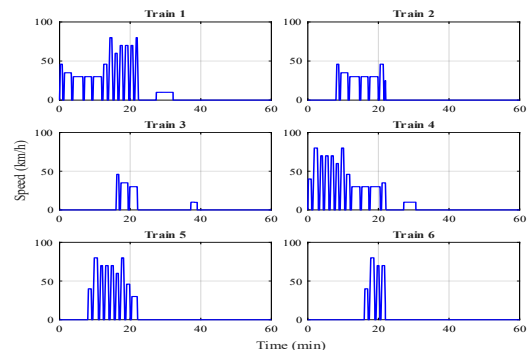


(ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.46 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$

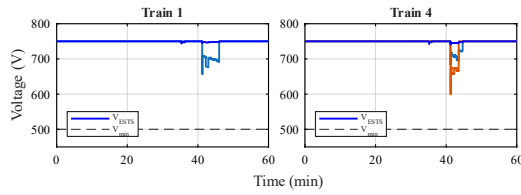


(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

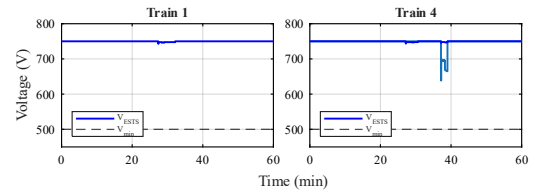


(ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.47 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$

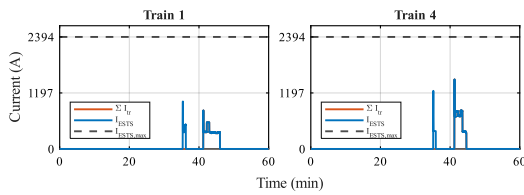


(ก) กรณิรไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

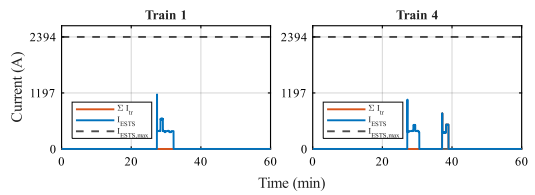


(ข) กรณิรไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.48 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$

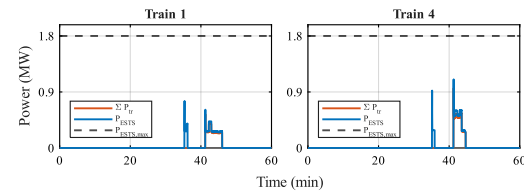


(ก) กรณิรไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

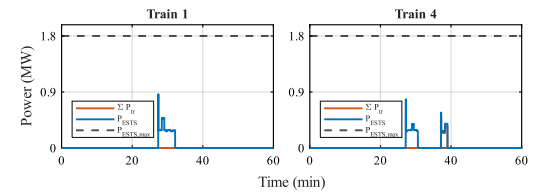


(ข) กรณิรไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.49 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$

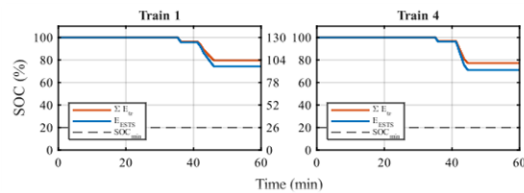


(ก) กรณิรไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

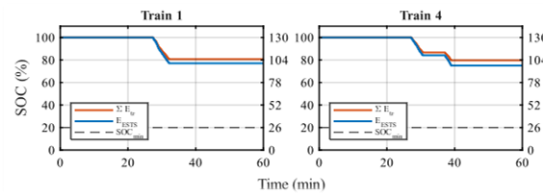


(ข) กรณิรไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.50 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$



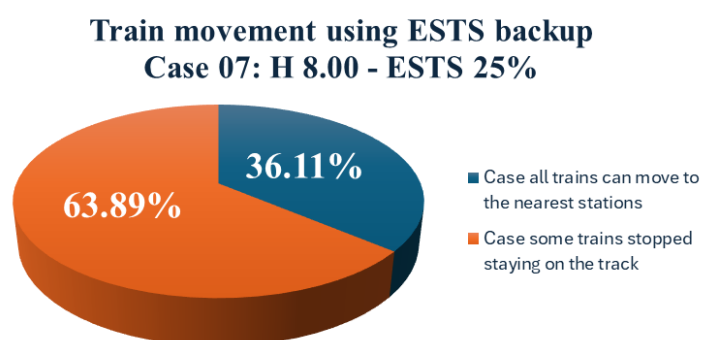
(ก) กรณิรไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร



(ข) กรณิรไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.51 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$

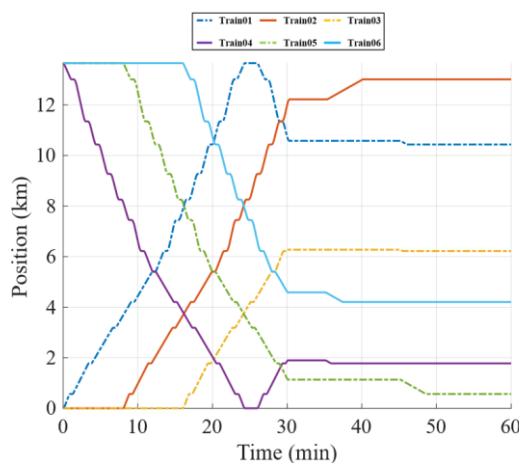
เมื่อพิจารณาผลการจำลองในกรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$ พบว่า ESTS สามารถสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าสำรองสำหรับการอพยพขบวนรถไฟทำให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้สำเร็จ คิดเป็นร้อยละ 36.11 ของเหตุการณ์ทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 5.52 โดยยังปรากฏหลายเหตุการณ์ที่มีขบวนรถไฟตกรางบนเส้นทางการให้บริการ ซึ่งสาเหตุหลักสัมพันธ์กับตำแหน่งของขบวนรถไฟที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS และอยู่ห่างจากขบวนรถไฟที่ทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเกินระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่กำหนด ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่าภายใต้สภาวะนอกชั่วโมงเร่งด่วนและสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ในระดับต่ำ ระบบมีศักยภาพในการตอบสนองต่อเหตุไฟดับได้ในระดับที่ยังจำกัด และยังมีข้อจำกัดด้านความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่ควรได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมในประเด็นนี้



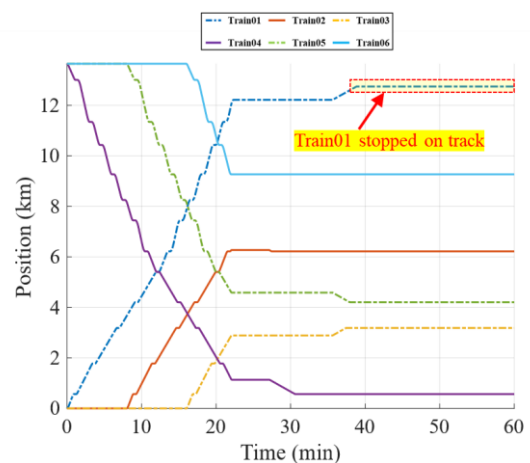
รูปที่ 5.52 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$

5.3.3.2 กรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$

กรณีนี้เป็นการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้สภาวะการเดินรถช่วงนอกชั่วโมงเร่งด่วน โดยกำหนดสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ไว้ที่ร้อยละ 50 ของจำนวนขบวนทั้งหมด ซึ่งเป็นระดับปานกลางเมื่อเทียบกับจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบ เงื่อนไขดังกล่าวทำให้จำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS เพิ่มขึ้นจากกรณีร้อยละ 25 และช่วยให้ครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าดีขึ้น ขณะเดียวกันภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของ ESTS แต่ละชุดมีแนวโน้มกระจายตัวเหมาะสมมากขึ้น หัวข้อนี้จึงนำเสนอผลการตอบสนองของระบบ พร้อมทั้งสรุปอัตราความสำเร็จของการตอบสนอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

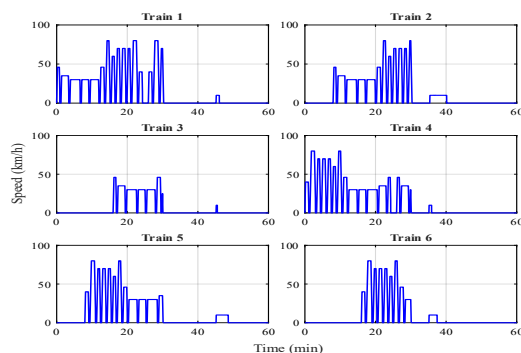


(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

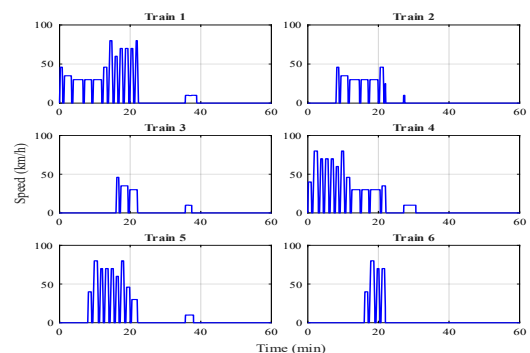


(ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.53 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$

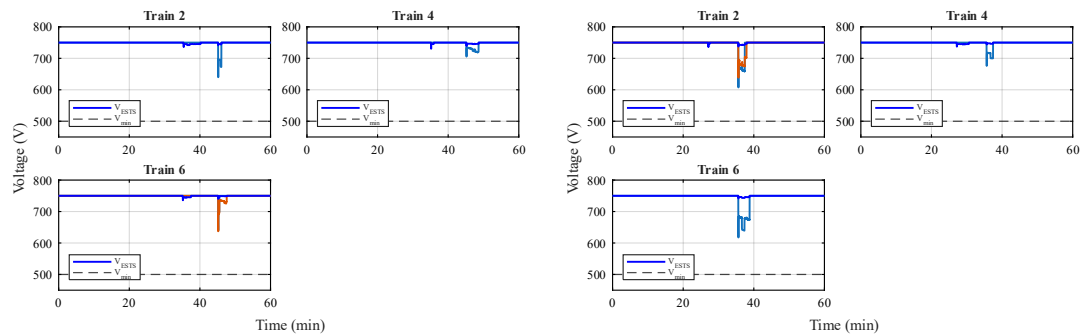


(ก) กรณีรถไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร



(ข) กรณีรถไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

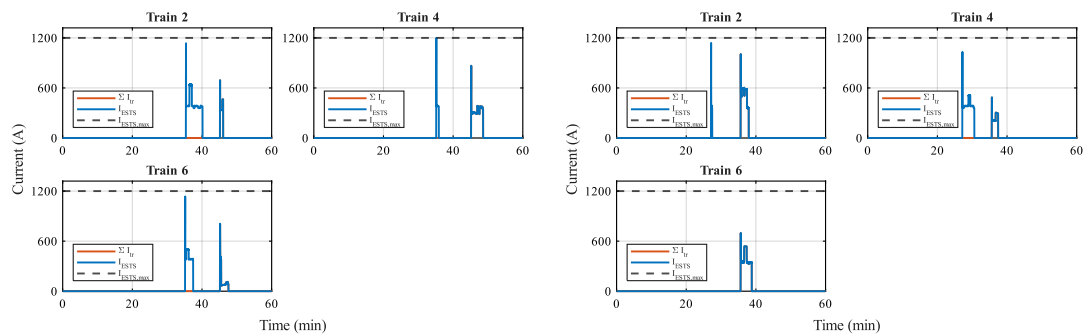
รูปที่ 5.54 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$



(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

(ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

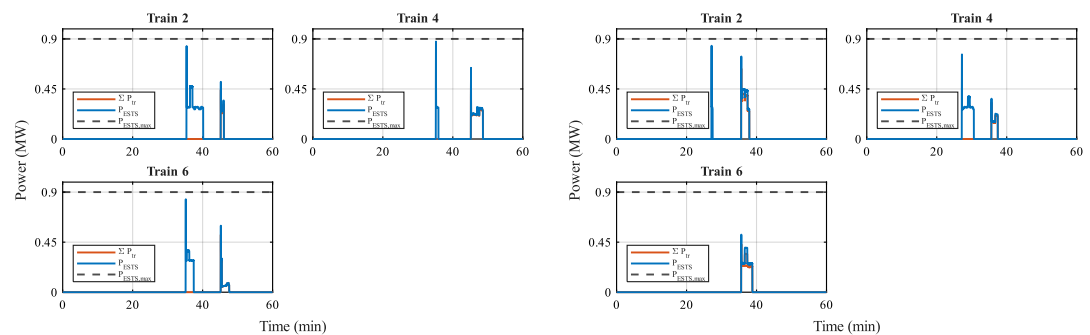
รูปที่ 5.55 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟแต่ละขบวน กรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$



(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

(ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

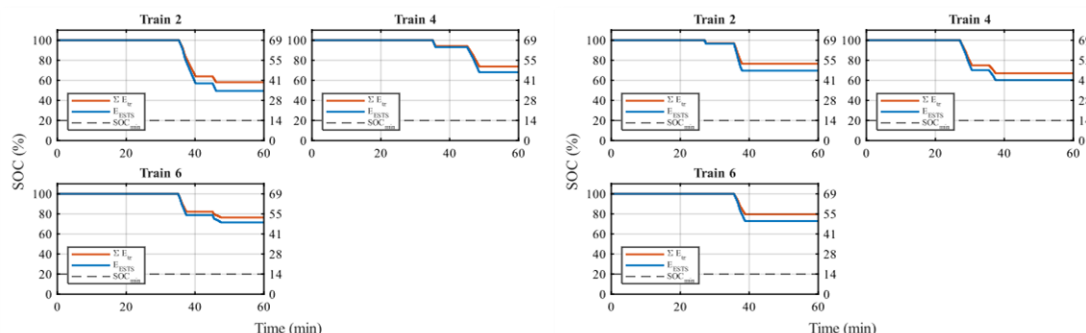
รูปที่ 5.56 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟแต่ละขบวน กรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$



(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

(ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.57 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟแต่ละขบวน กรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$

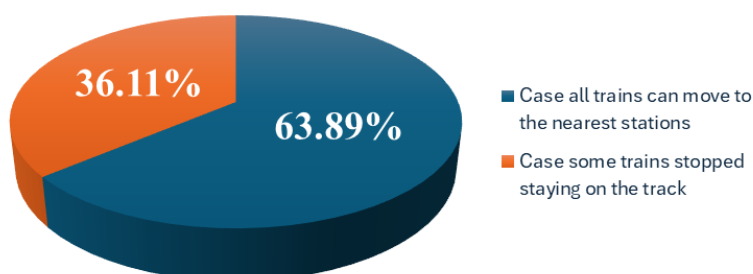


(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.58 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$

เมื่อพิจารณาผลการจำลองในกรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$ พบว่า ESTS สามารถสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าสำรองสำหรับการอพยพขบวนรถไฟให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้สำเร็จ คิดเป็นร้อยละ 63.89 ของเหตุการณ์ทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 5.59 โดยยังปรากฏหลายเหตุการณ์ที่มีขบวนรถไฟตกค้างบนเส้นทางการให้บริการ ซึ่งสาเหตุหลักสัมพันธ์กับตำแหน่งของขบวนรถไฟที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS และอยู่ห่างจากขบวนรถไฟที่ทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเกินระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่กำหนด ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่าภายใต้สภาวะนอกชั่วโมงเร่งด่วนและสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ในระดับปานกลาง ระบบมีศักยภาพในการตอบสนองต่อเหตุไฟดับได้ในระดับที่ยังจำกัด และยังมีข้อจำกัดด้านความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่ควรได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมในประเด็นนี้

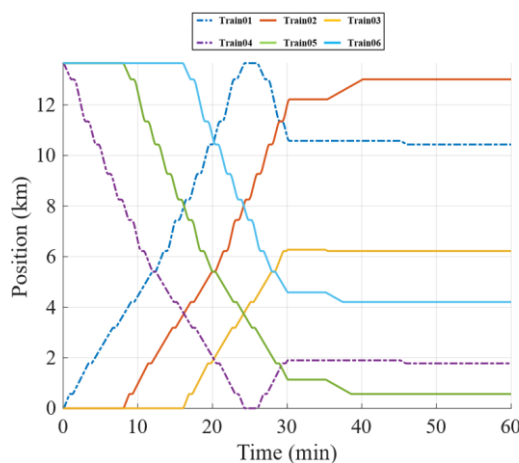
Train movement using ESTS backup
Case 08: H 8.00 - ESTS 50%



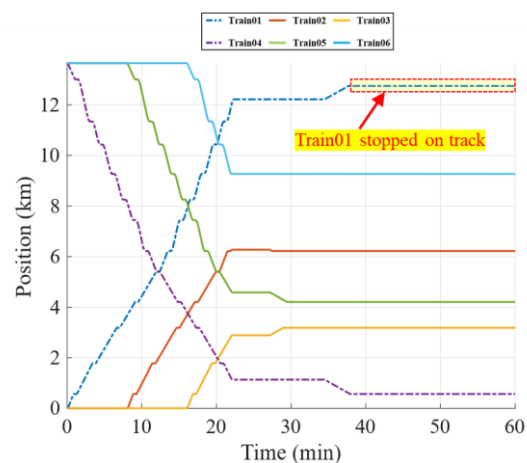
รูปที่ 5.59 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 50\%$

5.3.3.3 กรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$

กรณีนี้เป็นการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้สภาวะการเดินรถช่วงนอกชั่วโมงเร่งด่วน โดยกำหนดสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ไว้ที่ร้อยละ 75 ของจำนวนขบวนทั้งหมด ซึ่งเป็นระดับสูงเมื่อเทียบกับจำนวนขบวนรถไฟไฟฟ้าที่ปฏิบัติการพร้อมกันในระบบเงื่อนไขดังกล่าวทำให้จำนวนขบวนรถไฟที่ติดตั้ง ESTS เพิ่มขึ้นจากกรณีร้อยละ 25 และ 50 และช่วยให้ความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าดีขึ้น ขณะเดียวกันภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของ ESTS แต่ละชุดมีแนวโน้มกระจายตัวทั่วถึงมากขึ้น หัวข้อนี้จึงนำเสนอผลการตอบสนองของระบบ พร้อมทั้งสรุปอัตราความสำเร็จของการตอบสนอง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

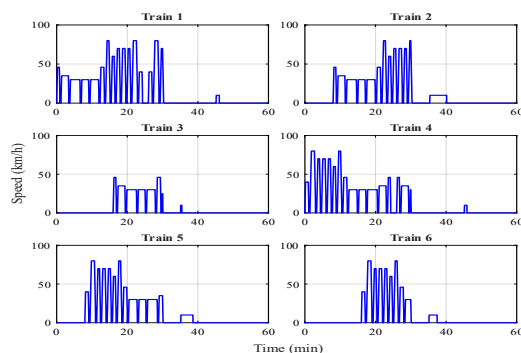


(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

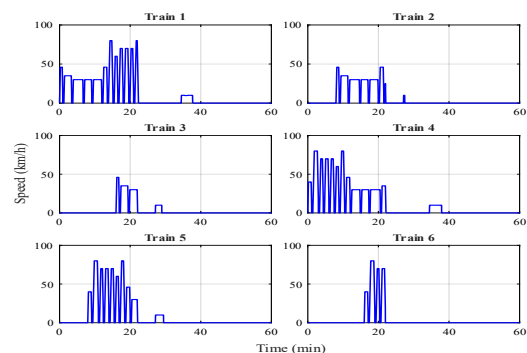


(ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.60 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$

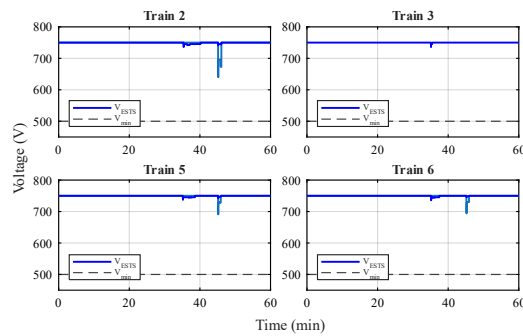


(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

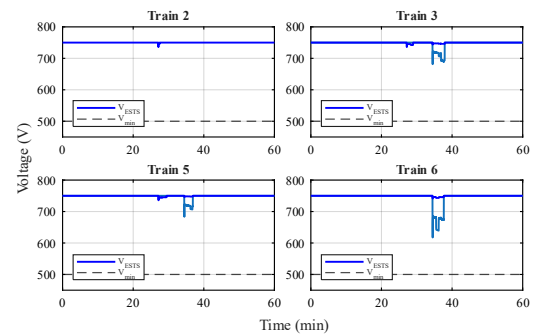


(ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.61 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$

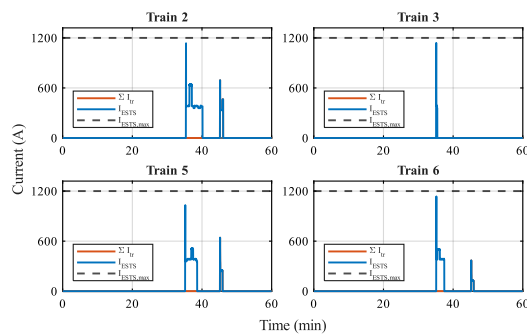


(ก) กรณิรณไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

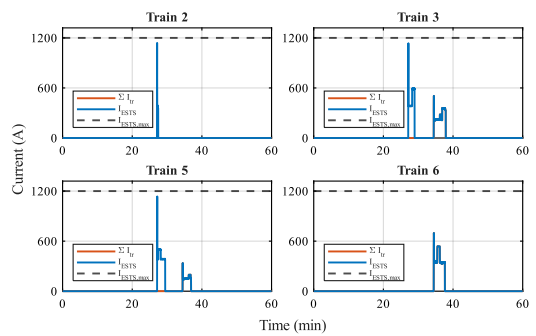


(ข) กรณิรณไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.62 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$

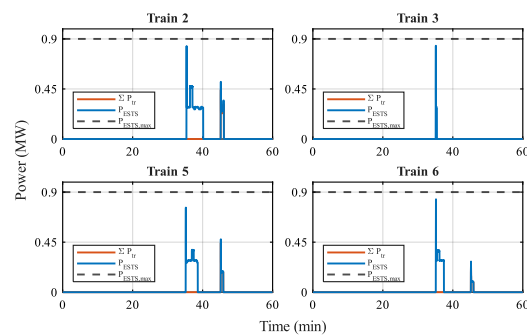


(ก) กรณิรณไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร

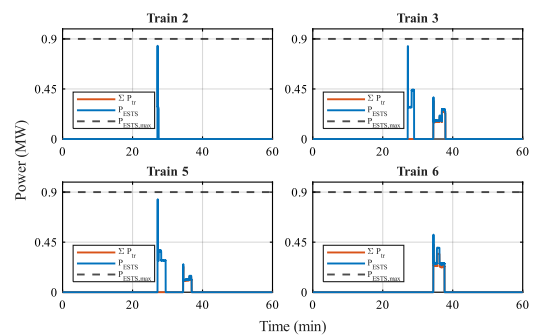


(ข) กรณิรณไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.63 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$

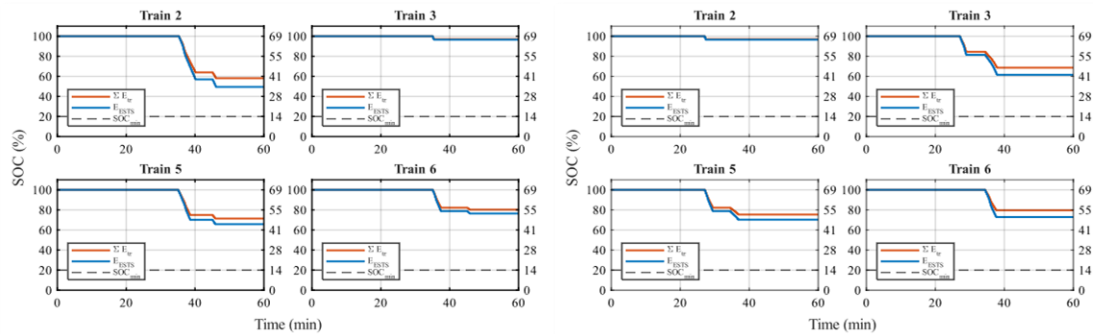


(ก) กรณิรณไฟฟ้าทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร



(ข) กรณิรณไฟฟ้าบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

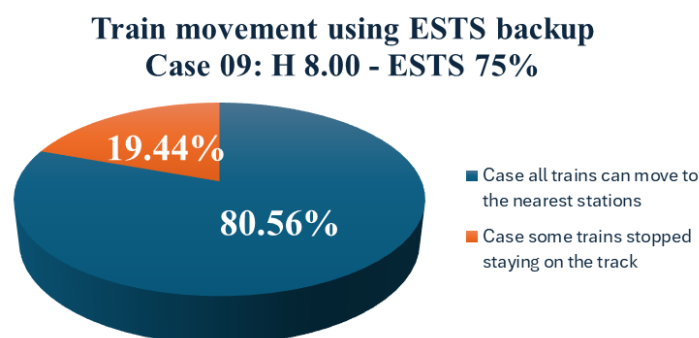
รูปที่ 5.64 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$



(ก) กรณีรถไฟทุกขบวนจอดที่สถานีผู้โดยสาร (ข) กรณีรถไฟบางขบวนตกค้างบนทางวิ่ง

รูปที่ 5.65 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$

เมื่อพิจารณาผลการจำลองในกรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$ พบว่า ESTS สามารถสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าสำรองสำหรับการอพยพขบวนรถไฟให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้สำเร็จ คิดเป็นร้อยละ 80.56 ของเหตุการณ์ทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 5.66 อย่างไรก็ตาม ยังปรากฏบางเหตุการณ์ที่มีขบวนรถไฟตกค้างบนเส้นทาง การให้บริการ โดยสาเหตุหลักสัมพันธ์กับตำแหน่งของขบวนรถไฟที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS ซึ่งอยู่ห่างจากขบวนรถไฟที่ทำหน้าที่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเกินระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่กำหนด ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่าภายใต้สภาวะนอกชั่วโมงเร่งด่วนและสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ในระดับสูง ระบบมีศักยภาพในการตอบสนองต่อเหตุไฟดับได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังมีข้อจำกัดด้านความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่ควรได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมในประเด็นนี้



รูปที่ 5.66 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 8$ นาที และ $\%ESTS = 75\%$

จากผลการทดสอบทั้ง 9 กรณี พบว่า การตอบสนองของระบบแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS มีความแตกต่างกันตามค่า H และสัดส่วนการติดตั้ง ESTS อย่างชัดเจน โดยกรณีที่มีระยะห่างระหว่างขบวนรถไฟสายและจำนวน ESTS ในระบบมากขึ้น มีแนวโน้มเอื้อต่อการเกิดคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าและช่วยเพิ่มอัตราความสำเร็จของการอพยพขบวนรถไฟได้มากกว่า ในขณะที่กรณีที่มีระยะห่างระหว่างขบวนรถไฟมากขึ้น แม้ภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของ ESTS บางชุดจะมีแนวโน้มลดการกระจุกตัวลง แต่ข้อจำกัดด้านความครอบคลุมเชิงพื้นที่กลับมีบทบาทเด่นชัดมากขึ้นต่อผลการตอบสนองของระบบ ดังนั้น ผลการทดสอบในหัวข้อนี้จึงสะท้อนให้เห็นทั้งศักยภาพและข้อจำกัดของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้เงื่อนไขการเดินรถที่แตกต่างกัน ซึ่งจะนำไปสู่การอภิปรายเชิงเปรียบเทียบและเชิงวิศวกรรมในหัวข้อ 5.4 ต่อไป

5.4 การอภิปรายผลการทดสอบ

ผลการทดสอบในหัวข้อ 5.3 แสดงให้เห็นว่า การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้สถานการณ์ไฟดับของระบบรถไฟฟาส่งมวลชนไม่ได้ขึ้นอยู่กับจำนวน ESTS หรือปริมาณพลังงานไฟฟ้าสำรองรวมของระบบเพียงด้านเดียว แต่ยังมีประเด็นความหนาแน่นของขบวนรถไฟในระบบสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ที่ความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า และภาระทางไฟฟ้าที่ ESTS แต่ละชุดต้องรองรับได้จริงเกี่ยวข้องด้วย แม้บางกรณีระบบจะยังมีพลังงานไฟฟ้าสำรองคงเหลืออยู่ แต่หากขบวนรถไฟที่ต้องการรับการสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าอยู่นอกระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่กำหนด ระบบก็ยังไม่สามารถอพยพรถไฟได้ครบทุกขบวน ในทางตรงกันข้าม หากตำแหน่งของขบวนรถไฟในโครงข่ายเอื้อต่อการจับคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้า แม้จำนวน ESTS จะอยู่ในระดับไม่สูงมาก ระบบก็ยังสามารถตอบสนองต่อเหตุไฟดับได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น การอภิปรายผลในหัวข้อนี้จึงมุ่งวิเคราะห์ทั้งในมิติของสมรรถนะระดับระบบ มิติทางไฟฟ้าของ ESTS และข้อพิจารณาเชิงออกแบบในระดับระบบควบคู่กัน เพื่อให้การตีความผลการทดสอบมีความชัดเจนและเชื่อมโยงไปสู่การประยุกต์ใช้จริงได้มากยิ่งขึ้น

5.4.1 ผลของ H และ %ESTS ต่อสมรรถนะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของระบบ

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบตามค่า H ดังตารางที่ 5.2 พบว่า ความหนาแน่นของขบวนรถไฟเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดโอกาสเกิดคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้า กรณี $H = 3.45$ นาที มีขบวนรถไฟปฏิบัติการพร้อมกันเฉลี่ย 14 ขบวน ให้ผลการตอบสนองดีที่สุดในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยมีอัตราความสำเร็จเท่ากับร้อยละ 68.97 100.00 และ 100.00 ที่ %ESTS เท่ากับ 25 50 และ

75 ตามลำดับ ขณะที่กรณี $H = 6$ นาที มีขบวนการไฟฟ้าปฏิบัติการเฉลี่ย 8 ขบวนการให้อัตราความสำเร็จลดลงเป็นร้อยละ 58.82 73.53 และ 85.29 และกรณี $H = 8$ นาที มีขบวนการไฟฟ้าปฏิบัติการเฉลี่ย 6 ขบวนการให้อัตราความสำเร็จลดลงเป็นร้อยละ 36.11 63.89 และ 80.56 ตามลำดับ ผลดังกล่าวสะท้อนว่า เมื่อ H เพิ่มขึ้น ระยะห่างเชิงพื้นที่ระหว่างขบวนการไฟฟ้ามากขึ้น ทำให้โอกาสที่ขบวนการไฟฟ้าที่ต้องการรับพลังงานไฟฟ้าจะอยู่ภายในรัศมีการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า 3.5 กิโลเมตรลดลง แม้ระบบยังมี ESTS และพลังงานไฟฟ้าสำรองคงเหลืออยู่ก็ตาม อย่างไรก็ตาม การเพิ่มสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ช่วยชดเชยข้อจำกัดดังกล่าวได้บางส่วน เนื่องจากเพิ่มจำนวนแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำรองและเพิ่มความเป็นไปได้ที่ขบวนการไฟฟ้าที่ตกค้างจะอยู่ใกล้กับ ESTS อย่างน้อยหนึ่งชุด ดังนั้น ค่า H และ %ESTS จึงควรพิจารณาร่วมกันในการออกแบบการติดตั้ง ESTS ให้เหมาะสมกับรูปแบบการเดินรถ

ตารางที่ 5.3 สรุปผลการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS สำหรับ 9 กรณีทดสอบ

กรณี	H (นาที)	%ESTS (%)	Success (%)	สัดส่วน ESTS ต่อรถไฟฟ้าผู้รับ	ขนาด ESTS ที่ควรรองรับ (กำลังไฟฟ้า/กระแสไฟฟ้า/พลังงานไฟฟ้า)
1	3.45	25	68.97	1:3	2.7 MW / 3,590 A / 195 kWh
2	3.45	50	100.00	1:1	0.9 MW / 1,200 A / 69 kWh
3	3.45	75	100.00	3:1	0.9 MW / 1,200 A / 69 kWh
4	6	25	58.82	1:3	2.7 MW / 3,590 A / 195 kWh
5	6	50	73.53	1:1	0.9 MW / 1,200 A / 69 kWh
6	6	75	85.29	3:1	0.9 MW / 1,200 A / 69 kWh
7	8	25	36.11	1:2	1.8 MW / 2,400 A / 130 kWh
8	8	50	63.89	1:1	0.9 MW / 1,200 A / 69 kWh
9	8	75	80.56	2:1	0.9 MW / 1,200 A / 69 kWh

ตารางที่ 5.4 ผลของการเพิ่ม %ESTS ต่ออัตราความสำเร็จในแต่ละค่า H

H (นาที)	Success rate %ESTS = 25 (%)	Success rate %ESTS = 50 (%)	Success rate %ESTS = 75 (%)	เพิ่ม %ESTS จาก 25 → 50	เพิ่ม %ESTS จาก 50 → 75
3.45	68.97	100.00	100.00	10.34%	0.00%
6	58.82	73.53	85.29	47.06%	5.88%
8	36.11	63.89	80.56	30.00%	13.89%

จากทั้งสองตารางเมื่อพิจารณาผลของ $\%ESTS$ ภายในแต่ละ H จะพบว่า การเพิ่ม $\%ESTS$ จากร้อยละ 25 เป็นร้อยละ 50 ทำให้เห็นผลสมรรถนะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าชัดเจนกว่า การเพิ่มจากร้อยละ 50 เป็นร้อยละ 75 ในทุกค่า H โดยในกรณี $H = 3.45$ นาที อัตราความสำเร็จเพิ่มขึ้น 10.34 จุดร้อยละ จากร้อยละ 89.66 เป็น 100.00 และไม่เพิ่มขึ้นอีกเมื่อเพิ่มเป็นร้อยละ 75 ขณะที่กรณี $H = 6$ นาที อัตราความสำเร็จเพิ่มขึ้น 47.06 จุดร้อยละ จากร้อยละ 41.18 เป็น 88.24 และเพิ่มขึ้นอีกเพียง 5.88 จุดร้อยละ เมื่อเพิ่มเป็นร้อยละ 75 และกรณี $H = 8$ นาที อัตราความสำเร็จเพิ่มขึ้น 30.00 จุดร้อยละ จากร้อยละ 38.89 เป็น 63.89 และเพิ่มขึ้นอีก 13.89 จุดร้อยละ เมื่อเพิ่มเป็นร้อยละ 75 แนวโน้มดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า $\%ESTS = 50$ เป็นระดับที่ช่วยเพิ่มความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของแหล่งพลังงานไฟฟ้าสำรองได้ดีในหลายกรณี ขณะที่การเพิ่ม $\%ESTS$ ต่อจากระดับดังกล่าวยังช่วยเพิ่มสมรรถนะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าได้แต่ผลเพิ่มจะเริ่มลดลง โดยเฉพาะในกรณีที่ข้อจำกัดหลักของระบบเปลี่ยนจากข้อจำกัดด้านจำนวน ESTS ไปเป็นข้อจำกัดด้านระยะห่างของขบวนรถไฟในโครงข่ายเมื่อเชื่อมโยงผลดังกล่าวกับโครงสร้างของกรณีทดสอบ จะเห็นได้ว่า ค่า H ทำหน้าที่กำหนดความเป็นไปได้เชิงพื้นที่ของการจับคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้า ขณะที่ $\%ESTS$ ทำหน้าที่กำหนดความหนาแน่นของแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำรองภายในระบบ ดังนั้น สมรรถนะของการตอบสนองจึงเป็นผลรวมของทั้งสองปัจจัยมากกว่าการพิจารณาแยกออกจากกัน

5.4.2 ภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของ ESTS

จากข้อมูลทางไฟฟ้าจากผลการทดลอง พบว่า ESTS ในแต่ละกรณีมีลักษณะการรับภาระโหลดที่แตกต่างกัน ทั้งในด้านพลังงานไฟฟ้าสูงสุดต่อชุด (E_{max}) พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อชุด (E_{avg}) สถานะประจุต่ำสุด (SOC_{min}) กำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{peak}) และกระแสไฟฟ้าสูงสุด (I_{peak}) ของ ESTS แสดงดังตารางที่ 5.4 โดยเฉพาะกรณีที่ $\%ESTS$ ต่ำ จะมีค่า E_{max} P_{peak} และ I_{peak} ของ ESTS บางชุดสูงกว่าค่าเฉลี่ยของระบบ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าไม่ได้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในทุกชุด แต่มีลักษณะกระจุกตัวอยู่ที่ ESTS บางชุดเท่านั้น ขณะที่กรณีที่ $\%ESTS$ เพิ่มขึ้น ภาระโหลดดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงและกระจายตัวได้เหมาะสมมากขึ้น ทำให้ระดับการใช้งาน ESTS แต่ละชุดอยู่ใกล้เคียงกันมากขึ้น และช่วยลดโอกาสที่บางชุดจะเข้าใกล้ข้อจำกัดด้านพลังงานไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า หรือกระแสไฟฟ้าสูงสุด และสนับสนุนให้การจัดสรรพลังงานไฟฟ้าของระบบมีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนว่าสมรรถนะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณพลังงานไฟฟ้าสำรองรวมเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับภาระการกระจายภาระทางไฟฟ้าระหว่าง ESTS แต่ละชุดร่วมด้วย

ตารางที่ 5.5 ผลเชิงไฟฟ้าของการทดสอบแต่ละกรณี

กรณี	H (นาทิจ)	%ESTS	E_{max} (kWh)	E_{avg} (kWh)	SOC_{min} (%)	P_{peak} (MW)	I_{peak} (A)
1	3.45	25	52.96	29.26	72.84	1.67	2,260.28
2	3.45	50	35.80	17.18	48.12	0.88	1,200.00
3	3.45	75	35.98	12.14	47.86	0.88	1,200.00
4	6	25	65.61	51.19	66.35	1.53	2,064.60
5	6	50	55.18	35.97	20.00	0.88	1,200.00
6	6	75	32.71	24.87	83.23	1.41	1,903.95
7	8	25	51.51	34.59	60.37	1.26	1,708.71
8	8	50	34.86	25.51	49.47	0.88	1,200.00
9	8	75	34.29	17.90	50.31	0.88	1,200.00

พิจารณາตารางที่ 5.5 พบว่ากรณี $H = 3.45$ นาทิจ เมื่อมี %ESTS = 25 มีค่า $E_{max} = 52.96$ กิโลวัตต์ชั่วโมง $P_{peak} = 1.67$ เมกะวัตต์ และ $I_{peak} = 2,260.28$ แอมป์ ซึ่งสูงกว่ากรณีที่ระบบมี ESTS เป็นจำนวนร้อยละ 50 และ 75 โดยทั้งสองกรณีนี้มีค่า P_{peak} สูงสุดเพียง 0.88 เมกะวัตต์ และ I_{peak} ไม่เกิน 1,200.00 แอมป์ ส่วนในกรณี $H = 6$ นาทิจ เมื่อมี %ESTS = 25 จะมีภาระการจ่ายไฟสูงสุดเช่นกัน โดยมีค่า $E_{max} = 65.61$ กิโลวัตต์ชั่วโมง $P_{peak} = 1.53$ เมกะวัตต์ และ $I_{peak} = 2,064.60$ แอมป์ ซึ่งสูงกว่ากรณีที่ระบบมี ESTS เป็นจำนวนร้อยละ 50 และ 75 โดยกรณีร้อยละ 75 ยังมีค่า $P_{peak} = 1.41$ เมกะวัตต์ และ $I_{peak} = 1,903.95$ แอมป์ ในบางเหตุการณ์ สะท้อนว่า ESTS บางชุดยังอาจรับภาระการจ่ายไฟให้กับรถไฟฟ้าหลายขบวนเกิดขึ้น และกรณี $H = 8$ นาทิจ แม้โอกาสเกิดภาระการจ่ายไฟโดยรวมจะลดลง แต่กรณีที่ %ESTS = 25 ยังคงมีค่า $E_{max} = 51.51$ กิโลวัตต์ชั่วโมง $P_{peak} = 1.26$ เมกะวัตต์ และ $I_{peak} = 1,708.71$ แอมป์ ขณะที่ร้อยละการติดตั้ง ESTS อีกสองกรณีจะมีค่า P_{peak} สูงสุดเพียง 0.88 เมกะวัตต์ และ I_{peak} ไม่เกิน 1,200.00 แอมป์ เท่านั้น นอกจากนี้ ค่า SOC_{min} ยังมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่แตกต่างกันไป โดยไม่ขึ้นกับค่า P_{peak} และ I_{peak} ที่บ่งบอกถึงจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่รับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าว่ามากหรือน้อย

ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าภาระทางไฟฟ้าของ ESTS ที่ต้องจ่ายไฟให้กับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ โดยเป็นผลรวมของค่า H สัดส่วนการติดตั้ง %ESTS และรูปแบบการกระจายตำแหน่งของ ESTS ในระบบ กล่าวคือ กรณีที่ %ESTS ต่ำมักทำให้

ภาระการจ่ายไฟของ ESTS กระจุกตัวอยู่เพียงบางชุด ขณะที่การเพิ่ม $\%ESTS$ ช่วยลดภาระดังกล่าว และทำให้การกระจายภาระเหมาะสมขึ้น แต่ไม่ได้รับประกันว่าค่าทางไฟฟ้าทุกตัวจะเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกับการเพิ่มจำนวน ESTS เสมอไป เนื่องจากยังมีอิทธิพลของตำแหน่งขบวนรถไฟฟ้า และรูปแบบการตอบสนองของระบบเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้น การประเมินสมรรถนะของ ESTS ในระบบจึงควรพิจารณาให้ครอบคลุม E_{max} E_{avg} SOC_{min} P_{peak} และ I_{peak} เพื่อให้สามารถสะท้อนภาระที่ ESTS ต้องรองรับจริง และนำไปสู่ข้อพิจารณาเชิงออกแบบได้อย่างเหมาะสม

5.4.3 ข้อพิจารณาเชิงออกแบบและความเป็นไปได้ในการใช้จริง

จากการวิเคราะห์ในหัวข้อก่อนหน้านี้สามารถสรุปได้ว่า แนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS สามารถสนับสนุนการอพยพของขบวนรถไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS และไม่ได้ติดตั้งระบบได้ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม โดยผลการทดสอบเชิงตัวเลขแสดงให้เห็นว่าระดับความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้ามีผลโดยตรงต่อความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้ ESTS กล่าวคือ กรณี $H = 3.45$ นาที ซึ่งมีขบวนรถไฟฟ้าปฏิบัติการพร้อมกันเฉลี่ย 14 ขบวน ให้ค่าอัตราความสำเร็จเท่ากับร้อยละ 89.66 100.00 และ 100.00 เมื่อ $\%ESTS$ เท่ากับ 25 50 และ 75 ตามลำดับ ขณะที่กรณี $H = 6$ นาที ซึ่งมีขบวนรถไฟฟ้าปฏิบัติการเฉลี่ย 8 ขบวน ให้อัตราความสำเร็จเท่ากับร้อยละ 41.18 88.24 และ 94.12 ตามลำดับ และกรณี $H = 8$ นาที ซึ่งมีขบวนรถไฟฟ้าปฏิบัติการเฉลี่ยเพียง 6 ขบวน ให้อัตราความสำเร็จเท่ากับร้อยละ 38.89 63.89 และ 77.78 ตามลำดับ ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า ภายใต้เงื่อนไขของโครงข่ายและระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า 3.5 กิโลเมตร แนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS จะมีความเหมาะสมมากขึ้นเมื่อระบบมีขบวนรถไฟฟ้าปฏิบัติการอย่างน้อยประมาณ 8 ขบวนร่วมกับการติดตั้ง ESTS ไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 หรือหากต้องการคงสัดส่วนการติดตั้ง ESTS ไว้ต่ำ เช่น ร้อยละ 25 ระบบควรมีความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าสูงใกล้เคียงกรณี $H = 3.45$ นาที จึงจะสามารถรักษาโอกาสการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้อยู่ในระดับสูงได้

อย่างไรก็ตาม ความเป็นไปได้ในการนำแนวคิดนี้ไปใช้จริงควรพิจารณาร่วมกับเงื่อนไขการเดินรถของระบบเป้าหมายด้วย โดยผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าแนวคิดนี้เหมาะกับระบบที่มีความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าสูง เนื่องจากมีโอกาสเกิดคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนมากกว่า และทำให้ ESTS ที่ติดตั้งบนรถไฟฟ้าเพียงบางขบวนสามารถครอบคลุมพื้นที่การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในทางตรงกันข้าม แนวคิดนี้อาจยังไม่เหมาะกับสถานะที่มีจำนวนขบวนรถไฟฟ้าในโครงข่ายน้อยหรือมีระยะห่างระหว่างขบวนมาก เช่น กรณี $H = 8$ นาที ซึ่งแม้เพิ่ม $\%ESTS$ เป็นร้อยละ 75 แล้ว อัตราความสำเร็จยังอยู่ที่ร้อยละ 77.78 และต่ำกว่ากรณี H ที่

สั้นกว่าอย่างชัดเจน สะท้อนว่าข้อจำกัดหลักไม่ได้อยู่ที่พิกัดของ ESTS เพียงอย่างเดียว แต่อยู่ที่โอกาสในการเชื่อมโยงเพื่อแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในโครงข่ายด้วย ดังนั้น หากต้องการประยุกต์ใช้แนวคิดนี้ในระบบที่มีความหนาแน่นของขบวนต่ำ อาจจำเป็นต้องเพิ่มสัดส่วนการติดตั้ง ESTS พิจารณาการกระจายตำแหน่งของ ESTS ให้เหมาะสมกับบทบาทเชิงโครงข่ายของรถไฟแต่ละขบวน หรือพัฒนากลยุทธ์ควบคุมเสริมเพื่อเพิ่มโอกาสในการเชื่อมโยงระหว่างขบวนภายใต้สถานการณ์ไฟดับ ผลการวิจัยนี้จึงไม่ได้เพียงเสนอแนวคิดเชิงทฤษฎีเท่านั้น แต่ยังให้กรอบเชิงวิศวกรรมสำหรับพิจารณาว่าแนวคิดดังกล่าวควรถูกออกแบบและประยุกต์ใช้ภายใต้เงื่อนไขใด จึงจะเกิดประสิทธิผลสูงสุดสำหรับระบบรถไฟฟาส่งมวลชนที่มีความยืดหยุ่นและคุ้มค่ามากขึ้นในอนาคต

5.5 สรุป

การทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ภายใต้สถานการณ์ไฟดับของระบบรถไฟฟาส่งมวลชน โดยกำหนดเงื่อนไขด้านระยะห่างระหว่างขบวนรถไฟและสัดส่วนการติดตั้ง ESTS เป็นกรอบการทดสอบ พบว่าสมรรถนะของระบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของขบวนรถไฟ ความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า และสัดส่วนของขบวนรถไฟที่สามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำรองได้ โดยกรณีที่มีค่า H ต่ำและมี $\%ESTS$ ในระดับที่สูง จะช่วยเพิ่มโอกาสในการจับคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าและเพิ่มอัตราความสำเร็จของการอพยพขบวนรถไฟไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุด ซึ่งสะท้อนว่าแนวคิดนี้มีศักยภาพสำหรับการประยุกต์ใช้จริงในระบบที่มีจำนวนขบวนรถไฟปฏิบัติการณ์ในโครงข่ายมากเพียงพอ อย่างไรก็ตาม แม้ระบบจะยังมีพลังงานไฟฟ้าสำรองคงเหลืออยู่ แต่หากขบวนรถไฟที่ต้องการรับการสนับสนุนพลังงานไฟฟ้าอยู่นอกระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่กำหนด ก็อาจเกิดการตกค้างบนเส้นทางการให้บริการได้ ขณะเดียวกัน การวิเคราะห์ภาระจ่ายไฟของ ESTS ยังแสดงให้เห็นว่า ESTS แต่ละชุดไม่ได้รับภาระเท่ากันในทุกกรณี ซึ่งมีความสำคัญต่อการกำหนดขนาดความจุ สัดส่วนการติดตั้ง และข้อพิจารณาเชิงออกแบบของระบบในทางปฏิบัติ โดยเฉพาะในสถานะที่มีจำนวนขบวนรถไฟในโครงข่ายน้อยหรือมีระยะห่างระหว่างขบวนมาก ดังนั้น ผลการศึกษาในบทนี้จึงช่วยยืนยันทั้งศักยภาพ ข้อจำกัด และเงื่อนไขสำคัญของการประยุกต์ใช้ ESTS เพื่อสนับสนุนการอพยพขบวนรถไฟภายใต้หลักการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในสถานการณ์ไฟดับ และเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะในบทถัดไป