

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทนำ

บทที่ 6 นำเสนอการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะจากการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ภายหลังการพัฒนาแบบจำลองและการทดสอบแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS สำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนภายใต้สถานการณ์ไฟดับ ผลการศึกษาช่วยให้เห็นทั้งศักยภาพ ข้อจำกัด และเงื่อนไขสำคัญที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบ โดยเฉพาะระยะห่างระหว่างขบวนรถไฟฟ้า สัดส่วนการติดตั้ง ESTS ความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า และภาระทางไฟฟ้าที่ ESTS แต่ละชุดต้องรองรับจริง แม้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จะสามารถใช้ประเมินความเป็นไปได้ และแนวโน้มการตอบสนองของระบบได้อย่างชัดเจน แต่ยังคงมีข้อจำกัดบางประการเมื่อเทียบกับการประยุกต์ใช้ในระบบจริง ดังนั้น บทนี้จึงมุ่งสรุปสาระสำคัญของผลการวิจัยในเชิงวิศวกรรม พร้อมทั้งนำเสนอข้อเสนอแนะสำหรับการต่อยอดงานวิจัยและการพัฒนาแนวทางประยุกต์ใช้ ESTS ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนต่อไปในอนาคต

6.2 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS สำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนภายใต้สถานการณ์ไฟดับทั้งโครงข่าย โดยมีเป้าหมายเพื่อลดความจำเป็นในการติดตั้ง ESTS ให้กับรถไฟฟ้าทุกขบวน ขณะที่ยังคงสามารถสนับสนุนการอพยพผู้โดยสารไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดได้ โดยกำหนดกรณีศึกษาบนระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม ระยะทาง 13.65 กิโลเมตร 14 สถานี และระบบจ่ายไฟกระแสตรง 750 โวลต์ 7 สถานีไฟฟ้าย่อย พร้อมกำหนดกรณีทดสอบจากระยะห่างระหว่างขบวนรถไฟฟ้าและสัดส่วนการติดตั้ง ESTS รวม 9 กรณี จากผลการศึกษาพบว่าสมรรถนะของระบบขึ้นอยู่กับทั้งค่า H และ $\%ESTS$ โดยกรณีที่มียังค่า H ต่ำจะเอื้อต่อการเกิดคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้ามากกว่ากรณีที่มียังค่า H สูง เนื่องจากระยะห่างเชิงพื้นที่ระหว่างขบวนรถไฟฟ้าสั้นกว่า ทำให้ขบวนรถไฟฟ้าที่ไม่ได้ติดตั้ง ESTS มีโอกาสอยู่ในระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า

ของขบวนการไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS ได้มากกว่า ทั้งนี้ กรณี $H = 3.45$ นาติ ให้ค่าอัตราความสำเร็จ เท่ากับร้อยละ 68.97 100.00 และ 100.00 เมื่อ $\%ESTS$ เท่ากับ 25 50 และ 75 ตามลำดับ ขณะที่ กรณี $H = 6$ นาติ ให้ค่าเท่ากับร้อยละ 58.82 73.53 และ 85.29 และกรณี $H = 8$ นาติ ให้ค่าเท่ากับ ร้อยละ 36.11 63.89 และ 80.56 ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนว่าแนวคิดนี้มีศักยภาพสำหรับการประยุกต์ใช้จริงได้ดีในระบบที่มีจำนวนขบวนการไฟฟ้าปฏิบัติการในโครงข่ายมากเพียงพอและมีความหนาแน่นของ ขบวนการสูง

เมื่อพิจารณาผลกระทบการทำงานของระบบพบว่าความสำเร็จของการตอบสนองเกิดจากการที่ ขบวนการไฟฟ้าที่ติดตั้ง ESTS กระจายตัวอยู่ในระยะที่สามารถแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าให้กับขบวนการ ไฟฟ้าที่ต้องการรับการสนับสนุนได้ ในทางตรงกันข้าม ความล้มเหลวของระบบเกิดจากข้อจำกัดเชิง พื้นที่ที่ทำให้ไม่สามารถสร้างคู่แบ่งปันพลังงานไฟฟ้าได้ครบทุกขบวนการ แม้ว่า ESTS จะยังมีพลังงาน ไฟฟ้าสำรองคงเหลืออยู่ก็ตาม นอกจากนี้ การวิเคราะห์ภาระทางไฟฟ้าของระบบยังยืนยันว่า ESTS แต่ละชุดไม่ได้รับการกระจายไฟเท่ากันในทุกกรณี โดยกรณีที่ $\%ESTS$ ต่ำ ภาระด้านพลังงานไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้ามักกระจุกตัวอยู่ที่ ESTS บางชุด เช่น กรณี $H = 3.45$ นาติ ที่มีค่า $E_{max} = 54.17$ กิโลวัตต์ชั่วโมง $E_{avg} = 29.66$ กิโลวัตต์ชั่วโมง $P_{peak} = 2.12$ เมกะวัตต์ และ $I_{peak} = 2,869.80$ แอมป์ ขณะที่กรณี $H = 6$ นาติ ที่มีค่า $E_{max} = 54.11$ กิโลวัตต์ชั่วโมง $E_{avg} = 29.67$ กิโลวัตต์ชั่วโมง $P_{peak} = 2.21$ เมกะวัตต์ และ $I_{peak} = 2,997.57$ แอมป์ เป็นต้น ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า การเพิ่ม $\%ESTS$ มีแนวโน้มช่วยลดและกระจายภาระการจ่ายไฟของ ESTS ได้ดีขึ้น แม้แนวโน้มดังกล่าวจะไม่แปรผัน ตรงกับจำนวน ESTS ที่เพิ่มขึ้นในทุกกรณี

การออกแบบการติดตั้ง ESTS ที่เหมาะสมจึงไม่ควรพิจารณาเฉพาะจำนวน ESTS หรือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าสำรองรวมของระบบเพียงด้านเดียว แต่ควรพิจารณาร่วมกันทั้งความหนาแน่น ของขบวนการไฟฟ้า ความครอบคลุมเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า และการกระจายภาระการ ใช้งานของ ESTS ผลการศึกษายังยืนยันว่าแนวคิดนี้เหมาะกับระบบที่มีความหนาแน่นของขบวนการ ไฟฟ้าสูง แต่อาจยังไม่เหมาะกับระบบที่มีจำนวนขบวนการไฟฟ้าในโครงข่ายน้อยหรือมีระยะห่าง ระหว่างขบวนการมาก โดยผลการทดลองสนับสนุนว่า กรณี $H = 3.45$ นาติ ในทุกระดับของ $\%ESTS$ และกรณี $H = 6$ นาติ ที่มี $\%ESTS \geq 50\%$ เป็นช่วงการทำงานที่ให้สมดุลเหมาะสม เนื่องจากเป็นกรณี ที่ระบบมีอัตราความสำเร็จของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าไม่ต่ำกว่าร้อยละ 80 และสามารถลดความ จำเป็นในการใช้ ESTS ขนาดสูงเกินไปต่อหนึ่งชุดได้อย่างชัดเจน ในทางตรงกันข้าม สำหรับระบบที่มี ความหนาแน่นของขบวนการต่ำ อาจจำเป็นต้องเพิ่มสัดส่วนการติดตั้ง ESTS หรือพิจารณามาตรการเสริม

ร่วมเพื่อสนับสนุนการอพยพขบวนรถไฟฟ้ายกเลิกไฟดับ ดังนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ยืนยันทั้ง ศักยภาพ ข้อจำกัด และความเป็นไปได้ของแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ในระดับ โครงข่าย สำหรับการออกแบบระบบรถไฟฟ้ายกเลิกไฟดับที่มีความยืดหยุ่น ปลอดภัย และคุ้มค่ามากขึ้นภายใต้สถานการณ์ไฟดับในอนาคต

6.3 ข้อเสนอแนะ

จากการยืนยันถึงความเป็นไปได้ของแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้ายกเลิกไฟดับด้วย ESTS ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ หากมีการศึกษาต่อยอดในอนาคต ควรมุ่งเน้นการพัฒนาองค์ความรู้จากการประเมินเชิงความเป็นไปได้ไปสู่การกำหนดแนวทางการออกแบบและการประยุกต์ใช้ในระบบจริงอย่างเป็นรูปธรรมยิ่งขึ้น ทั้งในแง่ของแบบจำลอง กลยุทธ์ควบคุม การบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้า และการวิเคราะห์ผลกระทบในเชิงระบบ โดยข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อไปสามารถสรุปได้ดังนี้

ประการแรก ควรพัฒนาแบบจำลองให้สามารถสะท้อนพฤติกรรมของระบบได้ละเอียดขึ้นทั้งในด้านการควบคุม การจัดลำดับความสำคัญของการช่วยเหลือ และข้อจำกัดทางไฟฟ้าแบบเวลาจริง โดยเฉพาะความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของขบวนรถไฟฟ้ายกเลิกไฟดับ สถานะประจุของ ESTS ภาระโหลดบนขบวนรถไฟฟ้ายกเลิกไฟดับ และการตัดสินใจเริ่มหรือยุติการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า ความสำเร็จของระบบไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเพียงพอของพลังงานไฟฟ้าสำรองเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเชิงพื้นที่ของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้ายกเลิกไฟดับด้วย ดังนั้น การพัฒนาแบบจำลองที่สามารถวิเคราะห์ประเด็นดังกล่าวได้ละเอียดขึ้นจะช่วยให้ผลการประเมินมีความใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น

ประการที่สอง ควรศึกษาการออกแบบ ESTS ในระดับโครงข่ายอย่างเป็นระบบมากขึ้น โดยเฉพาะการหาตำแหน่งที่เหมาะสมของจำนวน ตำแหน่ง และขนาด ESTS ภายใต้เงื่อนไขการเดินรถที่แตกต่างกัน เนื่องจากการเพิ่มจำนวน ESTS ช่วยเพิ่มสมรรถนะของแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าได้จริง แต่ผลตอบแทนจากการเพิ่มจำนวน ESTS อาจไม่เป็นเชิงเส้นเสมอไป กล่าวคือ ในบางกรณีการติดตั้ง ESTS มากเกินความจำเป็นอาจทำให้ ESTS บางชุดแทบไม่ถูกใช้งาน ขณะที่หากติดตั้งน้อยเกินไป ภาระทางไฟฟ้าจะกระจุกตัวอยู่ที่ ESTS บางชุดอย่างเด่นชัด ดังนั้น ในการศึกษาต่อไปควรพิจารณาแนวทางการออกแบบในระดับระบบ เช่น การเลือกติดตั้ง ESTS ในขบวนที่มีบทบาทเชิง

โครงข่ายสูง การกำหนดขนาด ESTS ให้แตกต่างกันตามบทบาทของขบวน หรือการพิจารณากลยุทธ์การกระจายตำแหน่งของ ESTS ให้เหมาะสมกับลักษณะการเดินรถของระบบ เพื่อให้ได้สมดุลระหว่างสมรรถนะ ความปลอดภัย และความคุ้มค่าทางวิศวกรรม

ประการที่สาม ควรต่อยอดไปสู่การพิจารณาความเป็นไปได้ในการใช้งานจริงในมิติที่กว้างขึ้น ทั้งด้านระบบควบคุม การสื่อสารระหว่างขบวนรถไฟฟ้า การป้องกันทางไฟฟ้า และความปลอดภัยของการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้า รวมถึงควรศึกษามาตรการเสริมสำหรับสถานะที่มีจำนวนขบวนรถไฟฟ้าในโครงข่ายน้อยหรือมีระยะห่างระหว่างขบวนมาก ควบคู่กับการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์และความคุ้มค่าการลงทุนร่วมกับผลด้านสมรรถนะ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายและการออกแบบระบบในทางปฏิบัติ ดังนั้น หากสามารถพัฒนาประเด็นดังกล่าวเพิ่มเติมได้ จะช่วยยกระดับจากแนวคิดเชิงวิจัยที่มุ่งลดความจำเป็นในการติดตั้ง ESTS ให้ครบทุกขบวน ไปสู่แนวทางการออกแบบและการบริหารจัดการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีทั้งความปลอดภัย ประสิทธิภาพ และความคุ้มค่าในการใช้งานจริงในอนาคต