

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

การศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการขยายความและอธิบายรายละเอียดในส่วนเนื้อหาที่ได้ทำการศึกษาจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เพื่อสร้างองค์ความรู้และความเข้าใจพื้นฐานที่จำเป็นในการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ทั้งหมด 8 หัวข้อ ได้แก่ ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและระบบจ่ายไฟ พลวัตการเคลื่อนที่ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เทคนิคการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนด้วยวิธีการฉีดกระแส ปัญหาไฟดับและผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน และผลกระทบแรงดันไฟฟ้าตกและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในโครงข่ายระบบจ่ายไฟ ซึ่งจะกล่าวโดยสรุปสำหรับส่วนเนื้อหาที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อความกระชับ ชัดเจน และเข้าใจง่ายของเนื้อหาทั้งหมดที่ได้หยิบยกมาในบทนี้

3.2 ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและระบบจ่ายไฟ

3.2.1 ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (Mass rapid transit system: MRTS) เป็นศัพท์ที่ใช้สำหรับเรียก รถไฟฟ้าในเมือง (Subway) รถไฟฟ้ารางหนัก (Heavy rail) เมโทร (metro) และรถไฟฟ้าใต้ดิน (Underground) มารวมเข้าด้วยกัน เนื่องจากรถไฟฟ้าเหล่านี้มีโครงสร้างและลักษณะการทำงานส่วนใหญ่ที่มีความคล้ายคลึงกัน (Wright and Fjellstrom, 2005) การทำงานพื้นฐานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนจะมีรูปแบบที่เหมือนกับระบบรถไฟแบบดั้งเดิม แตกต่างกันเพียงระบบดั้งเดิมนั้นมีเครื่องยนต์ต้นกำลัง (prime mover) ติดตั้งอยู่บนขบวนรถในขณะที่ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้าที่รับมาจากสถานีจ่ายไฟภายนอกเป็นส่วนขับเคลื่อน จึงเป็นเหตุที่ว่า

ทำไมระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนต้องมีสถานีจ่ายไฟย่อยที่ใช้สำหรับลดแรงดันไฟฟ้าที่รับมาจากระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงให้มีค่าที่เหมาะสมก่อนที่จะส่งไปขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าผ่านระบบป้อนไฟฟ้า (feeding system) อีกทีหนึ่ง (นคร จันทพร, 2555) อย่างไรก็ตามการใช้งานระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีข้อได้เปรียบหลายประการเมื่อเทียบกับระบบรถไฟแบบดั้งเดิม เช่น การทำงานของรถไฟฟ้าแต่ละรูปแบบจะมีความตรงเวลาและสามารถทำเวลาได้ดีถึงแม้ในช่วงเวลาที่เร่งด่วน มีความจุและความถี่ของการให้บริการที่เพียงพอต่อความต้องการของผู้โดยสาร มีความน่าเชื่อถือในการให้บริการที่สูง ไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศและเสียง ส่งเสริมการอนุรักษ์สภาพแวดล้อมให้ดีขึ้น ลดอุบัติเหตุระหว่างการให้บริการด้วยเส้นทางวิ่งเฉพาะที่ไม่ต้องใช้ร่วมกับระบบขนส่งประเภทอื่น ๆ และระบบควบคุมการเดินรถด้วยคอมพิวเตอร์ สามารถอำนวยความสะดวกและลดความเครียดของผู้โดยสารจากปัญหาการจราจร กระจายความเจริญไปยังเมืองต่าง ๆ ที่เส้นทางวิ่งของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนตัดผ่าน เป็นต้น (Brenna, Foiadelli, and Zaninelli, 2018) ทำให้ในปัจจุบันระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกลายเป็นระบบขนส่งสาธารณะหลักที่มีสถิติการใช้บริการสูงสุดสำหรับรับส่งผู้โดยสารในเขตเมืองต่าง ๆ ทั่วโลก (Bao, 2018) แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ให้บริการรับส่งผู้โดยสารทั่วโลก

โดยทั่วไประบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแต่ละระบบมักมีโครงสร้างพื้นฐานที่คล้ายคลึงกัน ประกอบด้วย ขบวนรถไฟฟ้า ทางวิ่งรถไฟฟ้า สถานีผู้โดยสาร สถานีจ่ายไฟย่อย โรงจอดและศูนย์ซ่อมบำรุงรถ และศูนย์ควบคุมการเดินรถ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1.1 ขบวนรถไฟฟ้า (Train)

ขบวนรถไฟฟ้าสามารถจำแนกออกตามรูปแบบระบบลากจูงที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้า ได้แก่ ระบบลากจูงแบบรวมศูนย์ (Centralized traction system) เป็นรูปแบบที่ใช้หัวรถจักรไฟฟ้า (Electric locomotive) อย่างน้อยหนึ่งชุดสำหรับส่งกำลังขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้า ในขณะที่ตู้โดยสารอื่น ๆ จะไม่มีการติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อน โดยการติดตั้งหัวรถจักรไฟฟ้าสามารถอยู่ที่ตำแหน่งด้านหน้าสุดหรือด้านหลังสุดของขบวนรถไฟฟ้าก็ได้ และระบบลากจูงแบบแยกส่วน (decentralized traction system) เป็นรูปแบบที่มีการติดตั้งห้องควบคุมหรือห้องคนขับไว้ที่ปลายทั้งสองด้านของขบวนรถไฟฟ้า สำหรับมอเตอร์ขับเคลื่อนจะถูกติดตั้งในลักษณะแบบที่กระจายทั่วไปขบวนรถไฟฟ้าในส่วนต่าง ๆ ไม่รวมกันอยู่ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งเหมือนรูปแบบแรก เรียกแบบนี้ว่า รถไฟฟ้าชุด (Electric Multiple Unit: EMU) แสดงดังรูปที่ 3.2–3.3 ซึ่งทั่วไปตู้โดยสารของขบวนรถไฟฟ้าจะมีลักษณะต่อพ่วงกันประมาณ 3-10 ตู้ต่อขบวน และมักใช้ล้อเหล็กแบบครีปสำหรับประกอบการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าให้อยู่บนเส้นทางวิ่ง (Garre and Gabaldon, 2019)



(ก) ระบบลากจูงแบบรวมศูนย์



(ข) ระบบลากจูงแบบแยกส่วน

รูปที่ 3.2 ขบวนรถไฟฟ้า

(ที่มาภาพ: <https://www.pinterest.com/pin/764626842996904360/> [เข้าถึงเมื่อ 16 พฤษภาคม 2568])



(ก) ระบบลากจูงแบบรวมศูนย์



(ข) ระบบลากจูงแบบแยกส่วน

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างขบวนรถไฟฟ้า

(ที่มาภาพ: <https://en.wikipedia.org/wiki/ChS8> และ <https://www.railjournal.com/rolling-stock/british-battery-electric-multiple-unit-on-test/> [เข้าถึงเมื่อ 16 พฤษภาคม 2568])

3.2.1.2 ทางวิ่งรถไฟไฟฟ้า (Track)

ทางวิ่งถูกออกแบบขึ้นสำหรับรองรับน้ำหนักของขบวนรถไฟที่วิ่งบนรางก่อนถ่ายเทลงสู่พื้นดินและกำหนดแนวทางวิ่งของขบวนรถไฟให้วิ่งไปตามทิศทางที่ต้องการ ซึ่งสามารถจำแนกได้ตามโครงสร้างที่มีการใช้งานทั้งหมด 2 รูปแบบ ได้แก่ ทางวิ่งรถไฟแบบใช้หินโรยทาง (Ballast track) ประกอบด้วย ราง (rail) หมอน (Sleeper) เครื่องยึดเหนี่ยวราง (Fastening) หินโรยทาง (Ballast) และคันทาง (Formation) และทางวิ่งรถไฟแบบไม่ใช้หินโรยทาง (Ballastless track or Slab track) ประกอบด้วย ราง (rail) หมอนหรือแท่นคอนกรีต (Sleeper or Slab) เครื่องยึดเหนี่ยวราง (Fastening) และแผ่นพื้นคอนกรีต (Concrete slab) แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยขนาดความกว้างของรางในระบบรถไฟฟ้ามวลชนที่ใช้กันทั่วโลกมีอยู่ 2 ขนาด ได้แก่ รางเมตรเกจ (Meter gauge) ที่มีความกว้าง 1.000 เมตร และรางมาตรฐานเกจ (Standard gauge) ที่มีความกว้าง 1.435 เมตร การสร้างรางวิ่งรถไฟฟ้ามักอยู่ในตำแหน่งที่แยกออกจากการจราจรประเภท



(ก) แบบใช้หินโรยทาง



(ข) แบบไม่ใช้หินโรยทาง

รูปที่ 3.4 ทางวิ่งรถไฟไฟฟ้า

(ที่มาภาพ: <https://www.sathyamonline.com/l-news/railway-track-8578084> และ <https://www.vossloh.com/en-us/vossloh-north-america> [เข้าถึงเมื่อ 16 พฤษภาคม 2568])



(ก) ทางวิ่งใต้ดิน



(ข) ทางวิ่งบนพื้นดิน



(ค) ทางวิ่งยกระดับ

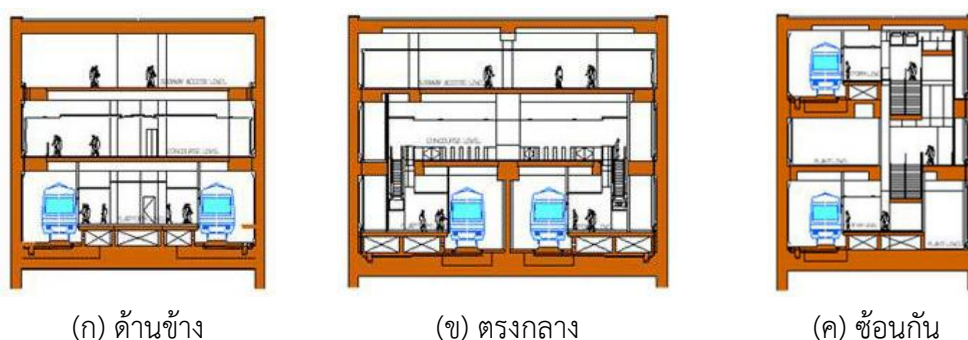
รูปที่ 3.5 ตำแหน่งการสร้างรางวิ่งรถไฟไฟฟ้า

(ที่มาภาพ: <https://metro.bemplc.co.th/MRT-System-Line?pid=3#> https://th.pngtree.com/freebackground/japanese-train-tracks-running-down-the-street_2464239.html และ <https://mgonline.com/onlinection/detail/9610000110403> [เข้าถึงเมื่อ 16 พฤษภาคม 2568])

อื่น ๆ อย่างชัดเจน ไม่ว่าจะเป็น ทางวิ่งใต้ดิน ทางวิ่งบนพื้นดิน และทางวิ่งยกระดับ แสดงดังรูปที่ 3.5 (สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, 2561)

3.2.1.3 สถานีผู้โดยสาร (Station)

สถานีผู้โดยสารเป็นอาคารที่ให้บริการด้านการขนส่งสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ซึ่งมีชานชาลาเป็นจุดจอด แวะพัก และเปลี่ยนขบวนระหว่างการเดินทางของรถไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีบริการเสริม ได้แก่ การขายตั๋ว ศูนย์ประชาสัมพันธ์ ห้องรอฝากสัมภาระ และร้านค้า ดังนั้นการกำหนดรูปแบบโครงสร้างของสถานีรถไฟฟ้าจะต้องคำนึงถึงการวางลักษณะชานชาลาเพื่อให้เกิดความสะดวกและการใช้พื้นที่เหมาะสมมากที่สุด ซึ่งสามารถวางรูปแบบของชานชาลาได้ 3 รูปแบบ คือ แบบชานชาลาด้านข้าง (Side Platform) ชานชาลาตรงกลาง (Central Platform) และชานชาลาซ้อนกัน (Stack Platform) แสดงดังรูปที่ 3.6 (Puttipakorn and Upala, 2018)



รูปที่ 3.6 รูปแบบการวางชานชาลาของสถานีผู้โดยสาร

(ที่มาภาพ: Puttipakorn and Upala, 2018)



รูปที่ 3.7 สถานีจ่ายไฟย่อย

(ที่มาภาพ: https://en.wikipedia.org/wiki/Traction_substation [เข้าถึงเมื่อ 16 พฤษภาคม 2568])

3.2.1.4 สถานีจ่ายไฟย่อย (Substation)

สถานีจ่ายไฟย่อยเป็นแหล่งกระจายพลังงานไฟฟ้าที่รับมาจากสถานีจ่ายไฟภายนอกโดยการปรับลดแรงดันไฟฟ้าที่รับมาจากระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงให้มีค่าที่เหมาะสมก่อนที่จะส่งไปขับเคลื่อนขบวนรถไฟไฟฟ้าและโหลดต่าง ๆ ผ่านระบบป้อนไฟฟ้า (feeding system) ที่มีลักษณะเป็นรางสามหรือหน้าสัมผัสเหนือศีรษะ แสดงดังรูปที่ 3.7 (Kulworawanichpong, 2015)

3.2.1.5 โรงจอดและศูนย์ซ่อมบำรุงรถ (Depot and Workshop)

โรงจอดและศูนย์ซ่อมบำรุงรถเป็นอาคารสำหรับจอดและซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าแต่ละขบวนให้อยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.8 เพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับให้บริการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนได้อย่างเต็มประสิทธิภาพและเกิดความปลอดภัยสูงสุดในแต่ละวัน โดยมีมาตรฐาน EN50126/IEC62278 ที่ถูกนำมาใช้ควบคุมคุณภาพการซ่อมบำรุง เรียกว่า ความน่าเชื่อถือ ความพร้อมใช้ ความสามารถในการซ่อมบำรุง และความปลอดภัยของระบบ (Reliability Availability Maintainability and Safety: RAMS) การซ่อมบำรุงนี้สามารถแบ่งออกเป็น 4 ระดับ ได้แก่ (1) การตรวจสอบประจำวัน (2) การตรวจสอบด้วยเครื่องมือพิเศษและการเปลี่ยนอุปกรณ์ (3) การซ่อมบำรุงตามวาระ และ (4) การซ่อมบำรุงใหญ่ นอกจากนี้ในส่วนของโรงจอดและศูนย์ซ่อมบำรุงรถยังมีการทำงานที่ครอบคลุมไปถึงการซ่อมบำรุงทางวิ่งรถไฟฟ้าอีกด้วย (National Academy of Sciences, Engineering, and Medicine, 2012)



รูปที่ 3.8 โรงจอดและศูนย์ซ่อมบำรุงรถ

(ที่มาภาพ: <https://railsystem.net/train-depot-area/> [เข้าถึงเมื่อ 17 พฤษภาคม 2568])

3.2.1.6 ศูนย์ควบคุมการเดินรถ (Operation Control Center)

ศูนย์ควบคุมการเดินรถมีสถานที่ตั้งอยู่ตำแหน่งเดียวกับโรงจอดและศูนย์ซ่อมบำรุงรถ ทำหน้าที่หลักในการควบคุมการเดินรถให้ตรงตามตารางเวลาและดูแลความปลอดภัย

ระหว่างการเดินทางให้มีประสิทธิภาพสูงสุด แสดงดังรูปที่ 3.9 ซึ่งในปัจจุบันรถไฟฟ้าหลายสายได้มีการควบคุมการทำงานภายใต้ระบบควบคุมรถอัตโนมัติ (Automatic Train Control: ATC) ที่ทางบริษัทเจ้าของเทคโนโลยีระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนพัฒนาขึ้นมา โดยทั่วไประบบ ATC มีองค์ประกอบย่อยทั้งหมด 3 ระบบ ได้แก่ (1) ระบบควบคุมการเดินรถอัตโนมัติ (Automatic Train Operation: ATO) ทำหน้าที่ควบคุมและดูแลในส่วนการทำงานต่าง ๆ ของขบวนรถไฟฟ้า เช่น การขับเคลื่อนรถไฟฟ้า การควบคุมความเร็วของรถไฟฟ้า การเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสาร ตรวจสอบสถานะการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ติดตั้งบนรถไฟฟ้า เป็นต้น (2) ระบบป้องกันอัตโนมัติ (Automatic Train Protection: ATP) ทำหน้าที่ป้องกันด้านความปลอดภัยต่าง ๆ และ (3) ระบบกำกับการเดินรถอัตโนมัติ (Automatic Train Supervision: ATS) ทำหน้าที่คอยควบคุมการวิ่งของรถไฟฟ้าให้สอดคล้องกับตารางการเดินรถที่ถูกกำหนดเอาไว้ด้วยการส่งข้อมูลต่าง ๆ ไปยังศูนย์ควบคุมการเดินรถ เช่น ความเร็วของรถไฟฟ้าแต่ละขบวน ติดตามตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า มาตราการควบคุมการเดินรถในกรณีที่ระบบการเดินรถหลักมีเหตุขัดข้องเกิดขึ้น เป็นต้น อย่างไรก็ตามรายละเอียดปลีกย่อยในการทำงานจะมีความแตกต่างกันตามการออกแบบในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแต่ละระบบ (นคร จันทพร, 2555)

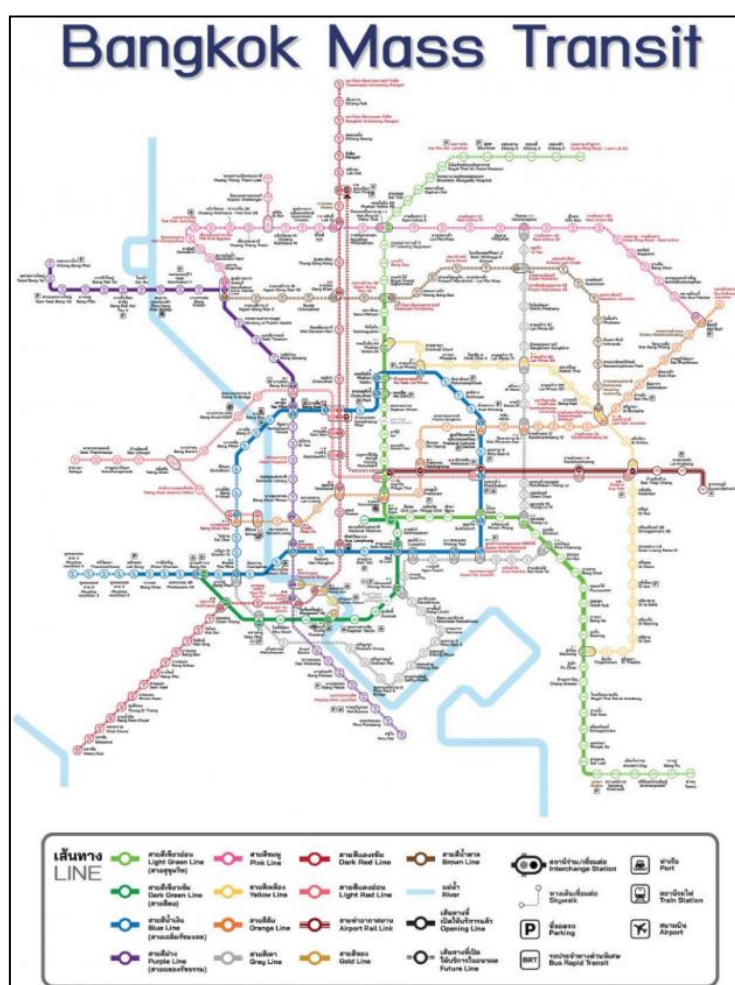


รูปที่ 3.9 ศูนย์ควบคุมการเดินรถ

(ที่มาภาพ: <https://www.bts.co.th/library/system-security.html> [เข้าถึงเมื่อ 17 พฤษภาคม 2568])

ด้วยโครงสร้างพื้นฐานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนดังที่แสดงข้างต้น ทำให้มีการกำหนดรูปแบบการวิ่งของรถไฟฟ้าให้มีความเร็วเฉลี่ยต่อการเดินทางประมาณ 32–80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงและสามารถทำความเร็วสูงสุดได้อยู่ที่ 72–130 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีผู้โดยสารแต่ละสถานีอยู่ห่างกันประมาณ 1–3 กิโลเมตร แต่สำหรับระบบที่ทันสมัยมากขึ้นสามารถพิจารณาการวางตำแหน่งของสถานีผู้โดยสารตามความเหมาะสมต่าง ๆ เช่น สถานีผู้โดยสารต้องอยู่

บริเวณใจกลางเมืองใหญ่ที่มีความเจริญ ความสะดวกสบายของผู้ที่ต้องการใช้บริการระบบ เป็นต้น (ธนัชชัย กุลวรรณิพงษ์, 2560) จึงทำให้ตลอดหลายทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการพิสูจน์ให้เห็นในหลายประเทศ ไม่ว่าจะเป็น สหรัฐอเมริกา อังกฤษ ญี่ปุ่น จีน และอื่น ๆ แล้วว่าระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสามารถดึงดูดผู้โดยสารคนส่วนบุคคลจำนวนมากให้หันมาใช้บริการระบบขนส่งสาธารณะได้มากขึ้น เนื่องจากระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสามารถทำความเร็วได้สูงในช่วงที่เร่งด่วนและมีความถี่ในการให้บริการที่เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้บริการ (Bao, 2018)



รูปที่ 3.10 เส้นทางระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล
(ที่มาภาพ: <https://www.thailandplus.tv/archives/468882> [เข้าถึงเมื่อ 17 พฤษภาคม 2568])

ในประเทศไทยเองได้มีการนำระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเข้ามาให้บริการในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลตั้งแต่ปีพุทธศักราช 2542 และมีการขยายเส้นทางให้บริการ

ภายใต้ "โครงการแผนแม่บท การขนส่งมวลชนระบบรางในเขตกรุงเทพมหานครและพื้นที่ต่อเนื่อง" ทำให้ในปัจจุบันมีเส้นทางการให้บริการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนรวมทั้งสิ้น 12 เส้นทาง แสดงดังรูปที่ 3.10 (สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, 2553) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับเทคโนโลยีต่าง ๆ ที่มีส่วนช่วยในการยกระดับการทำงานของระบบนี้จากองค์กรต่าง ๆ ทั้งภาครัฐและเอกชนอย่างจริงจัง

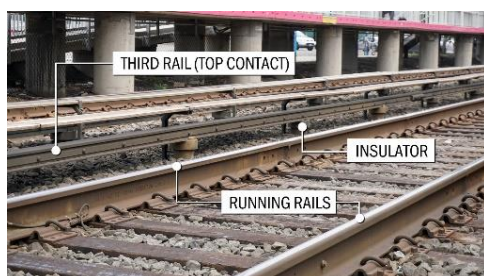
3.2.2 ระบบจ่ายไฟสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

การจ่ายไฟสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (Mass rapid transit system electrification) ถูกแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ระบบจ่ายไฟกระแสสลับ (AC electrification system) และระบบจ่ายไฟกระแสตรง (DC electrification system) แต่ละรูปแบบมีความสามารถในการผลิตและจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไป (White, 2011; Siemens, 2020) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการทำงาน ข้อกำหนดด้านความเร็ว และระยะเส้นทางวิ่งของรถไฟฟ้า โดยจะสามารถสรุปลักษณะการทำงานของระบบจ่ายไฟแต่ละแบบได้ดังต่อไปนี้

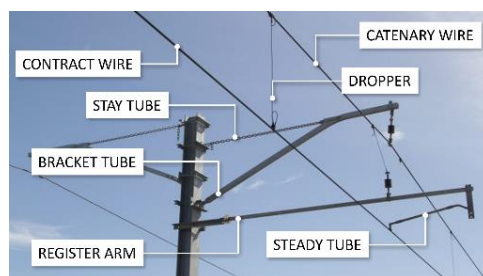
3.2.2.1 ระบบจ่ายไฟกระแสตรง

ระบบจ่ายไฟกระแสตรงเป็นเครือข่ายสถานีจ่ายไฟย่อยที่รับพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับจากระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงภายนอก ก่อนที่จะทำการปรับลดค่าแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าที่เหมาะสมและแปลงให้อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงด้วยหม้อแปลงแบบเรียงกระแส (Rectifier transformer) แล้วส่งไปขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าและโหนดต่าง ๆ ภายในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนผ่านระบบบ่อนไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นรางที่สาม (Third rail) ในกรณีที่ระบบใช้แรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 750 โวลต์ หรือสายจ่ายเหนือศีรษะ (Overhead line) ในกรณีที่ใช้แรงดันไฟฟ้าสูงกว่า 750 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 3.11 ระบบจ่ายไฟประเภทนี้ทำงานในย่านแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าไม่สูงมากนัก จึงต้องมีการติดตั้งจุดกระจายไฟฟ้าหรือสถานีจ่ายไฟย่อยไว้ที่ระยะทางทุก 2.5-5 กิโลเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่เดินที่ให้บริการอยู่ในระบบ สำหรับการป้อนพลังงานไฟฟ้าจากระบบจ่ายไฟกระแสตรงเข้าสู่ขบวนรถไฟฟ้าต้องอาศัยอุปกรณ์รับกระแสไฟฟ้า (Collector shoes) ที่ยื่นสัมผัสกับรางที่สาม เพื่อให้พลังงานไฟฟ้าจากรางที่สามไหลไปจ่ายให้กับโหนดต่าง ๆ บนขบวนรถไฟฟ้าและกลับมาครบวงจรที่รางวิ่ง แสดงดังรูปที่ 3.12 โดยอุปกรณ์รับกระแสไฟฟ้าที่มีการใช้งานในปัจจุบันมีทั้งแบบที่รับพลังงานไฟฟ้าจากด้านบน (top contact) แบบที่รับพลังงานไฟฟ้าจากด้านข้าง (side contact) และแบบที่รับพลังงานไฟฟ้าจากด้านล่าง (bottom contact) แสดงดังรูปที่ 3.13 ซึ่งแต่ละแบบมีทั้งข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม แนวทางการนำมา

ประยุกต์ใช้ และข้อกำหนดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตามอุปกรณ์รับกระแสไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมใช้งานมากที่สุดในปัจจุบัน คือ แบบที่รับพลังงานไฟฟ้าจากด้านล่าง เนื่องจากมีโอกาสที่สิ่งแปลกปลอมจะเข้าไปแทรกระหว่างรางที่สามกับอุปกรณ์รับกระแสไฟฟ้าจนเป็นเหตุทำให้เกิดความขัดข้องมีน้อยกว่าแบบอื่น ๆ (นคร จันทพร, 2555)



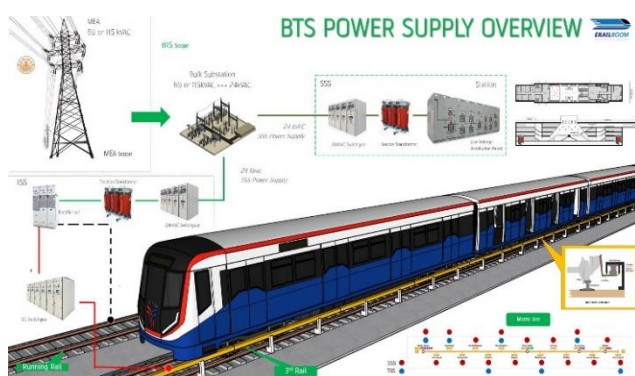
(ก) รางที่สาม



(ข) สายจ่ายเหนือศีรษะ

รูปที่ 3.11 ระบบป้อนไฟฟ้าแบบ Third rail และ Overhead line

(ที่มาภาพ: <https://asia.chemtronics.com/maintenance-of-electrical-and-electronic-systems-in-trains> และ <https://indiarailinfo.com/faq/post/1849> [เข้าถึงเมื่อ 18 พฤษภาคม 2568])

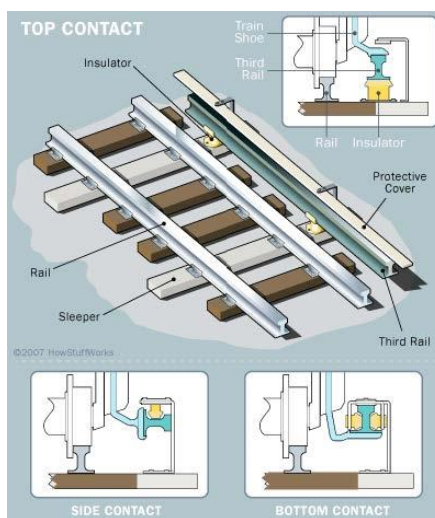


รูปที่ 3.12 ระบบจ่ายไฟกระแสตรง

(ที่มาภาพ: <https://www.facebook.com/ERailsRoom/> [เข้าถึงเมื่อ 18 พฤษภาคม 2568])

การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยรางที่สามจะถูกนำมาใช้กับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนความเร็วต่ำที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าในการทำงานอยู่ในช่วง 600 และ 750 โวลต์ เท่านั้น แต่สำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนความเร็วสูงที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงานเพิ่มขึ้นมาเป็น 1,500 หรือ 3,000 โวลต์ รูปแบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจะถูกดำเนินการผ่านสายจ่ายเหนือ

ศีรษะแทน เนื่องจากการใช้แรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงขึ้นอาจมีความเสี่ยงที่จะเกิดการโดดข้ามของกระแสไฟฟ้าจากรางที่สามไปยังรางวิ่ง ดังนั้นเพื่อให้แน่ใจว่าระหว่างตัวนำกับรางวิ่งมีระยะห่างที่มากพอที่จะป้องกันการกระโดดข้ามของกระแสไฟฟ้าและลดปัญหาเรื่องการหาฉนวนไฟฟ้าอีกด้วย อย่างไรก็ตาม การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านรางที่สามยังถือว่าเป็นรูปแบบที่มีการใช้งานมากที่สุดในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแบบกระแสตรงในปัจจุบัน โดยรางที่สามที่ถูกนำมาใช้นี้จะต้องมีความมั่นคงปลอดภัย การใช้งานรางที่สามในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนทั่วไปจึงมักติดตั้งรางที่สามตามเส้นทางวิ่งของรถไฟฟ้าโดยมีอุปกรณ์จับยึดรางในระยะทุก ๆ 5 เมตร แต่เนื่องจากการติดตั้งนี้จะมีลักษณะอยู่ในพื้นที่โล่งแจ้งและไม่มีฉนวนหุ้มรางที่สาม ซึ่งอาจเสี่ยงต่อการที่คน สัตว์ และสิ่งของจะเข้ามาในบริเวณรางที่สามอยู่ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยสูงสุดการนำรางที่สามมาใช้งานจึงต้องเป็นทางวิ่งใต้ดินและทางวิ่งยกระดับเท่านั้น และควรที่จะหาอุปกรณ์หรือหาที่กำบังรางที่สามให้มิดชิดที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์, 2560)



รูปที่ 3.13 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์รับกระแสไฟฟ้า

(ที่มาภาพ: <https://ashkanhh.mit.edu/research-projects/current-collecting-shoegear-system-and-third-rail-interactions> [เข้าถึงเมื่อ 18 พฤษภาคม 2568])

จากข้อมูลข้างต้น การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยรางที่สามจะถูกนำมาใช้กับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนความเร็วต่ำที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าในการทำงานอยู่ในช่วง 600 และ 750 โวลต์ เท่านั้น แต่สำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนความเร็วสูงที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทำงานเพิ่มขึ้นมาเป็น 1,500 หรือ 3,000 โวลต์ รูปแบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจะถูกดำเนินการผ่าน

สายจ่ายเหนือศีรษะแทน เนื่องจากการใช้แรงดันไฟฟ้าที่มีค่าสูงขึ้นอาจมีความเสี่ยงที่จะเกิดการโดดข้ามของกระแสไฟฟ้าจากรางที่สามไปยังรางวิ่ง ดังนั้นเพื่อให้แน่ใจว่าระหว่างตัวนำกับรางวิ่งมีระยะห่างที่มากพอที่จะป้องกันการกระโดดข้ามของกระแสไฟฟ้าและลดปัญหาเรื่องการหาฉนวนไฟฟ้าอีกด้วย อย่างไรก็ตาม การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านรางที่สามยังถือว่าเป็นรูปแบบที่มีการใช้งานมากที่สุดในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแบบกระแสตรงในปัจจุบัน โดยรางที่สามที่ถูกนำมาใช้นี้จะต้องมีความมั่นคงปลอดภัย การใช้งานรางที่สามในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนทั่วไปจึงมักติดตั้งรางที่สามตามเส้นทางวิ่งของรถไฟฟ้าโดยมีอุปกรณ์จับยึดรางในระยะทุก ๆ 5 เมตร แต่เนื่องจากการติดตั้งนี้จะมีลักษณะอยู่ในพื้นที่โล่งแจ้งและไม่มีฉนวนหุ้มรางที่สาม ซึ่งอาจเสี่ยงต่อการที่คน สัตว์ และสิ่งของจะเข้ามาในบริเวณรางที่สามอยู่ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยสูงสุดการนำรางที่สามมาใช้งานจึงต้องเป็นทางวิ่งใต้ดินและทางวิ่งยกระดับเท่านั้น และควรที่จะหาอุปกรณ์หรือหาที่กำบังรางที่สามให้มิดชิดที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์, 2560)

ตารางที่ 3.1 แรงดันมาตรฐานสำหรับระบบจ่ายไฟของรถไฟฟ้าตามมาตรฐาน EN 50163:200

Electrification system	Lowest permanent voltage U_{min1} (V)	Lowest non-permanent voltage U_{min2} (V)	Nominal voltage U_n (V)	Highest permanent voltage U_{max1} (V)	Highest non-permanent voltage U_{max2} (V)
D.C. (mean values)	400	400	600 ^a	720	800
	500 ^c	500	750	900 ^c	1,000
	1,000	1,000	1,500	1,800 ^c	1,950
	2,000	2,000	3,000	3,600	3,900 ^b
A.C. (r.m.s. values)	11,000	12,000	15,000	17,250	18,000
	17,500 ^c	19,000 ^c	25,000	27,500 ^c	29,000
Special national conditions for France, see Annex B.					
a. Future D.C. traction system for tramways and local railways should conform with a system nominal voltage of 750V.					
b. Special national conditions for Belgium, see Annex B.					
c. Special national conditions for United Kingdom, see Annex B.					

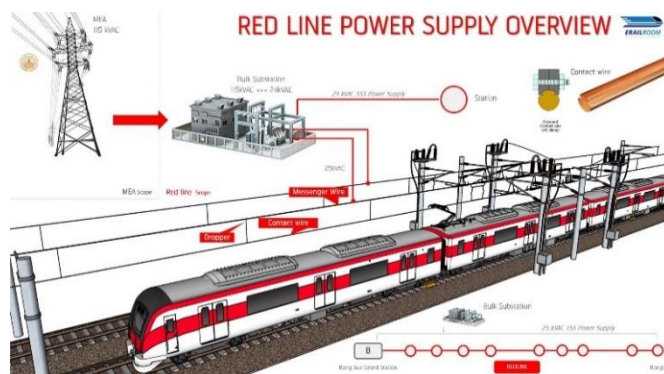
ปัจจุบันแรงดันไฟฟ้ามาตรฐานที่ถูกนำมาใช้งานกับระบบจ่ายไฟกระแสตรงในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีทั้งหมด 4 ระดับตามมาตรฐาน EN50163/IEC60850 ได้แก่ 600 750 1,500 และ 3,000 โวลต์ แสดงดังตารางที่ 3.1 ซึ่งจากตารางดังกล่าวมีการกำหนดว่าระดับแรงดันไฟฟ้าทำงานปกติแต่ละระดับของระบบการจ่ายไฟกระแสตรงต้องมีค่าอยู่ในช่วง U_{min1} ถึง U_{min2} และมีข้อกำหนดเพิ่มเติมอื่น ๆ ได้แก่ กรณีที่ระดับแรงดันไฟฟ้าทำงานมีค่าอยู่ระหว่าง U_{max1} ถึง U_{max2} จะสามารถคงค่าแรงดันไฟฟ้าดังกล่าวไว้ได้ไม่เกิน 5 นาที กรณีที่ระดับแรงดันไฟฟ้าทำงานมีค่าอยู่ระหว่าง U_{min1} ถึง U_{min2} จะสามารถคงค่านั้นไว้ได้ไม่เกิน 2 นาที กรณีที่สถานีจ่ายไฟกระแสตรงทำงานด้วยแรงดันไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าขณะไร้โหลดของหม้อแปลงแบบเรียงกระแสที่มีค่าไม่ควรเกิน U_{max2} และกรณีที่ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีการทำงานแบบเรียกคืนพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับจากการเบรก แรงดันไฟฟ้าทำงานในขณะนั้นอาจจะมีค่าเกิน U_{max2} ได้ชั่วคราว (British Standards Institution, 2004)

3.2.2.2 ระบบจ่ายไฟกระแสสลับ

ระบบจ่ายไฟกระแสสลับเป็นระบบจ่ายไฟสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับระบบการจ่ายไฟกระแสตรง ซึ่งก็หมายความว่าเครือข่ายสถานีจ่ายไฟย่อยจะต้องรับพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับจากระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงภายนอก แล้วทำการปรับลดค่าแรงดันไฟฟ้าให้มีค่าที่เหมาะสมและส่งไปขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าหรือโหลดอื่น ๆ ภายในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนผ่านระบบป้อนไฟฟ้าที่มีลักษณะสายจ่ายเหนือศีรษะ โดยปัจจุบันระดับแรงดันไฟฟ้าที่นิยมใช้ในระบบจ่ายไฟกระแสสลับมีขนาด 15 กิโลโวลต์ ที่ 16.7 เฮิร์ตซ์ และ 25 กิโลโวลต์ ที่ 50/60 เฮิร์ตซ์ แสดงดังรูปที่ 3.14 อุปกรณ์รับกระแสไฟฟ้าที่ถูกนำมาใช้ในระบบจ่ายไฟประเภทนี้ เรียกว่า แพนโทกราฟ (pantograph) แสดงดังรูปที่ 3.15 ซึ่งปกติแล้วแพนโทกราฟจะถูกนำมาติดตั้งไว้บนหลังคาของรถไฟฟ้าและจะยกขึ้นไปสัมผัสกับสายแคทีนารี (catenary) เพื่อรับพลังงานไฟฟ้ามาใช้บนรถไฟฟ้าและไหลกลับครบวงจรผ่านรางวิ่งของระบบ

เนื่องจากระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแบบกระแสสลับมีแรงดันไฟฟ้าทำงานที่มีค่าสูง ส่งผลให้พิธีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของระบบมีความไกลมากเช่นกัน ดังนั้นการสร้างสถานีจ่ายไฟย่อยแต่ละจุดจึงถูกสร้างขึ้นให้ห่างกันได้ถึง 20-60 กิโลเมตร ขึ้นอยู่กับระบบจ่ายไฟที่เลือกใช้และความหนาแน่นของขบวนรถไฟฟ้าที่ให้บริการบนทางวิ่งรถไฟฟ้า จึงทำให้ต้นทุนการติดตั้งระบบป้อนไฟฟ้าต่ำกว่าแบบใช้ระบบจ่ายไฟกระแสตรงด้วยเหตุผลที่ว่าสถานีจ่ายไฟย่อยในระบบน้อยกว่า อย่างไรก็ตามการเลือกใช้ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรงหรือกระแสสลับมักขึ้นอยู่กับ

วิเคราะห์ภาพรวมความคุ้มค่าในการใช้งานระบบจ่ายไฟแต่ละประเภท เช่น รถไฟฟ้าบีทีเอสควรเลือกใช้ระบบจ่ายไฟกระแสตรง เนื่องจากระบบนี้ถูกออกแบบให้สามารถรองรับการเดินรถพร้อมกันได้ถึง 40 ขบวนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง หรือระยะห่างระหว่างขบวนรถ (headway) 90 วินาที หากเลือกใช้ระบบจ่ายไฟกระแสตรงจะช่วยให้มีการลดต้นทุนต่าง ๆ ได้ ในขณะที่รถไฟฟ้าความเร็วสูงควรเลือกใช้ระบบจ่ายไฟกระแสสลับ เนื่องจากระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีลักษณะการให้บริการแบบวิ่งทางไกล จึงทำให้มีขบวนรถไฟฟ้าที่วิ่งบนเส้นทางเดียวกันมีความหนาแน่นต่ำ ระยะห่างระหว่างขบวนรถไฟฟ้าอยู่ที่ 5-10 นาที และมีจำนวนสถานีจ่ายไฟน้อยที่ต้องใช้น้อยกว่าเช่นกัน เป็นต้น (นิตยสารวิศวกรรมฯ, 2560)



รูปที่ 3.14 ระบบจ่ายไฟกระแสสลับ

(ที่มาภาพ: <https://www.facebook.com/ERailsRoom/> [เข้าถึงเมื่อ 19 พฤษภาคม 2568])



รูปที่ 3.15 แผนโทกราฟ

(ที่มาภาพ: <https://www.flickr.com/photos/aucklandtransport/12940899704/in/photostream/> [เข้าถึงเมื่อ 19 พฤษภาคม 2568])

3.2.3 ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทย

การขนส่งมวลชนระบบรางในประเทศไทยสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่ ระบบรถไฟทางไกล และระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดยระบบรถไฟทางไกลเป็นระบบที่อยู่ภายใต้ความรับผิดชอบของการรถไฟแห่งประเทศไทย ซึ่งปัจจุบันมีระยะทางที่เปิดให้บริการทั่วประเทศรวมทั้งสิ้น 4,346 km ใช้รางวิ่งที่มีความกว้างขนาด 1 เมตร และมีรูปแบบการใช้รถจักรสำหรับขับเคลื่อนขบวนรถไฟอยู่ทั้งหมด 3 ประเภท ได้แก่ (1) รถจักรดีเซลไฟฟ้า (diesel electric locomotives) เป็นรถจักรที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซลในการผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าของขบวนรถไฟ (2) รถจักรดีเซลไฮดรอลิก (diesel hydraulic locomotives) เป็นรถจักรที่ใช้ระบบไฮดรอลิกในการขับเคลื่อนขบวนรถไฟ และ (3) รถดีเซลราง (diesel multiple units) เป็นระบบที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซลขับเคลื่อนขบวนรถไฟด้วยตนเอง ส่วนระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเป็นระบบที่อยู่ภายใต้ความรับผิดชอบของ 3 หน่วยงาน ได้แก่ การรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) และสำนักการจราจรและขนส่ง กรุงเทพมหานคร (สจส.) แต่หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีเพียง 2 หน่วยงาน คือ การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย และกรุงเทพมหานคร โดยระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ใช้งานในปัจจุบันมีอยู่หลายสาย (ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์, 2560) ดังต่อไปนี้

3.2.3.1 การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย

การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (Mass Rapid Transit Authority of Thailand: MRTA) เรียกโดยย่อว่า "รฟม." เป็นหน่วยงานรัฐวิสาหกิจที่สังกัดกระทรวงคมนาคมทำหน้าที่จัดให้มีการบริการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในเขตกรุงเทพฯและปริมณฑล และจังหวัดอื่น ๆ โดยการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทยได้เปิดให้บริการขนส่งด้วยรถไฟฟ้าใต้ดินสายแรกของประเทศไทยที่ใช้ชื่อว่า "รถไฟฟ้ามหานคร (Metropolitan Rapid Transit: MRT)" ซึ่งแบ่งได้เป็นหลายสาย ได้แก่

1) รถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคล หรือ สายสีน้ำเงิน เป็นโครงการระบบขนส่งมวลชนเร็ว รุ่น ซีเมนส์ โมดูลาร์ เมโทร (Siemens Modular Metro) ที่ให้บริการตั้งแต่สถานีท่าพระ-พุทธมณฑล สาย 4 มีสถานีผู้โดยสาร 38 สถานี ระยะทางทั้งหมด 47 กิโลเมตร รถไฟฟ้าในระบบนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง บนทางวิ่งที่มีลักษณะเป็นทางวิ่งยกระดับและทางวิ่งใต้ดินที่ติดตั้งรางมาตรฐานขนาดกว้าง 1.435 เมตร โดยขบวนรถไฟฟ้าที่ใช้มีขนาดใหญ่มากทั้งหมด 19 ขบวน ขบวนละ 3 ตู้โดยสาร และสามารถจุผู้โดยสารได้ถึง 320 คนต่อขบวน

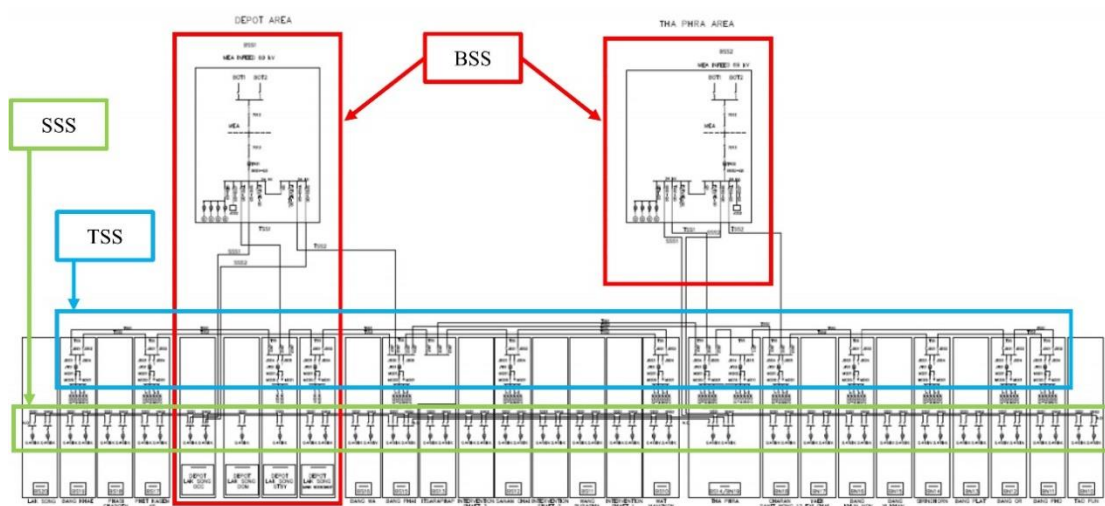
2) รถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม หรือ สายสีม่วง เป็นโครงการระบบแบบขนส่งมวลชนเร็ว รุ่น เจเทรค ซัสติน่า (J-TREC Sustina) ที่ให้บริการตั้งแต่สถานีคลองบางไผ่-ครุ ใน รวมสถานีผู้โดยสาร 16 สถานี ระยะทางทั้งหมด 23.6 กิโลเมตร โดยรถไฟฟ้าในระบบนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง บนทางวิ่งที่มีลักษณะเป็นทางวิ่งยกระดับและทางวิ่งใต้ดิน ที่ติดตั้งรางมาตรฐานขนาดกว้าง 1.435 เมตร โดยขบวนรถไฟฟ้าที่ใช้จะมีขนาดใหญ่ ทั้งหมด 21 ขบวน ขบวนละ 3 ตู้โดยสาร และสามารถจุผู้โดยสารได้ถึง 320 คนต่อขบวน

3) รถไฟฟ้ามหานคร สายสีเหลือง เป็นโครงการระบบแบบ รางเดี่ยว รุ่น อัลสตอม อินโนเวีย โมโนเรล 300 (Innovia Monorail 300) ที่ให้บริการตั้งแต่สถานีศูนย์ราชการ นนทบุรี-มีนบุรี มีสถานีผู้โดยสาร 23 สถานี ระยะทางทั้งหมด 28.7 กิโลเมตร รถไฟฟ้าในระบบนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง บนทางวิ่งที่มีลักษณะเป็นทางวิ่งยกระดับที่ติดตั้งรางเดี่ยว โดยขบวนรถไฟฟ้าที่ใช้เป็นแบบวางคร่อมราง (straddle-beam monorail) ทั้งหมด 30 ขบวน ขบวนละ 4 ตู้โดยสาร สามารถจุผู้โดยสารได้ถึง 356 คนต่อขบวน

4) รถไฟฟ้ามหานคร สายสีชมพู เป็นโครงการระบบแบบ รางเดี่ยว รุ่น อัลสตอม อินโนเวีย โมโนเรล 300 (Innovia Monorail 300) ที่ให้บริการตั้งแต่สถานีแคราย-มีนบุรี มีสถานีผู้โดยสาร 32 สถานี ระยะทางทั้งหมด 34.5 กิโลเมตร รถไฟฟ้าในระบบนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง บนทางวิ่งที่มีลักษณะเป็นทางวิ่งยกระดับที่ติดตั้งรางเดี่ยว โดยขบวนรถไฟฟ้าที่ใช้เป็นแบบวางคร่อมราง (straddle-beam monorail) ทั้งหมด 42 ขบวน ขบวนละ 4 ตู้โดยสาร สามารถจุผู้โดยสารได้ถึง 356 คนต่อขบวน กล่าวได้ว่าระบบนี้จะมีลักษณะเหมือนกับรถไฟฟ้ามหานคร สายสีเหลือง นั่นเอง

จากข้อมูลข้างต้น พบว่า รถไฟฟ้ามหานครที่มีการใช้งานในประเทศไทย ปัจจุบัน ล้วนอาศัยพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าในการทำงานอยู่ที่ 750 โวลต์ ทั้งสิ้น ระบบจ่ายไฟที่ถูกนำมาใช้งานในส่วนนี้จึงต้องมีการแปลงทั้งประเภทและระดับของพลังงานไฟฟ้าที่รับมาจากการไฟฟ้านครหลวงให้มีค่าที่เหมาะสมกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแต่ละระบบ โดยขั้นตอนการทำงานของระบบจ่ายไฟในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนรูปแบบนี้ได้กระจายหน้าที่การทำงานให้กับสถานีจ่ายไฟย่อยทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ เริ่มต้นสถานีไฟฟ้าแม่ข่าย (Buck substation: BSS) จะทำการปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 69 กิโลโวลต์ ที่รับมาจากการไฟฟ้านครหลวงให้มีขนาดลดลงเหลือ 24kV ด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า แล้วส่งต่อไปยังสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (Traction substation: TSS) ที่มีหม้อแปลงระบบขับเคลื่อน (traction transformer) ทำหน้าที่ปรับลดระดับ

แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับอีกครั้งจากขนาด 24 กิโลโวลต์ เป็น 585 โวลต์ และมีอุปกรณ์เรียงกระแส (rectifier) แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 585 โวลต์ เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 750 โวลต์ เพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ได้ให้กับรถไฟฟ้าแต่ละขบวนผ่านรางที่สาม ซึ่งเปรียบรางที่สามเป็น ขั้วบวกและรางวิ่งเป็นขั้วลบในขณะที่ขบวนรถไฟฟ้าถูกแทนด้วยโพลของระบบ และในขณะเดียวกัน สถานีไฟฟ้าบริการ (Service Substation: SSS) จะรับพลังงานไฟฟ้าบางส่วนที่ผ่านการปรับลดระดับแรงดันไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าแม่ข่ายมาทำการปรับลดระดับแรงดันไฟฟ้าอีกหนึ่งขั้นจนได้แรงดันไฟฟ้าที่กำหนด แล้วจึงนำไปจ่ายให้กับสถานีผู้โดยสาร ระบบอาณัติสัญญาณ และโพลอื่นในระบบ ตัวอย่างระบบจ่ายไฟกระแสตรงของรถไฟฟ้ามหานคร สายสีน้ำเงิน แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ตัวอย่างระบบจ่ายไฟกระแสตรงของรถไฟฟ้ามหานคร สายสีน้ำเงิน

(ที่มาภาพ: ชัยยุทธ์ สัมภาษณ์, 2560)

3.2.3.2 สำนักการจราจรและขนส่ง กรุงเทพมหานคร

สำนักการจราจรและขนส่ง กรุงเทพมหานคร (Bangkok Metropolitan Administration: BMA) เรียกโดยย่อว่า "สจส." รับผิดชอบดูแลรถไฟฟ้าเฉลิมพระเกียรติ 6 รอบพระชนมพรรษา หรือที่รู้จักอย่างกว้างขวางในชื่อ รถไฟฟ้าบีทีเอส (BTS Skytrain) เป็นระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเร็วที่ใช้ทางวิ่งของรถไฟฟ้าแบบยกระดับแห่งแรกของประเทศไทย เปิดให้บริการในพื้นที่ กรุงเทพมหานคร จังหวัดสมุทรปราการ และจังหวัดปทุมธานี ตั้งแต่วันที่ 5 ธันวาคม พ.ศ.2542 โดยบริษัท ระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด (มหาชน) (Bangkok Mass Transit System Public Company Limited: BTSC) ปัจจุบันรถไฟฟ้าบีทีเอสมีเส้นทางที่ให้บริการอยู่ทั้งหมด 2 เส้นทาง รวม

ระยะทางทั้งสิ้น 68.25 km ในขณะที่มีจำนวนสถานีผู้โดยสาร 61 สถานี (สมพงษ์ ศิริโสภณศิลป์, วิชา รัช สัญญาลักษณ์ฤชัย และ วิรัช หิรัญ, 2554) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

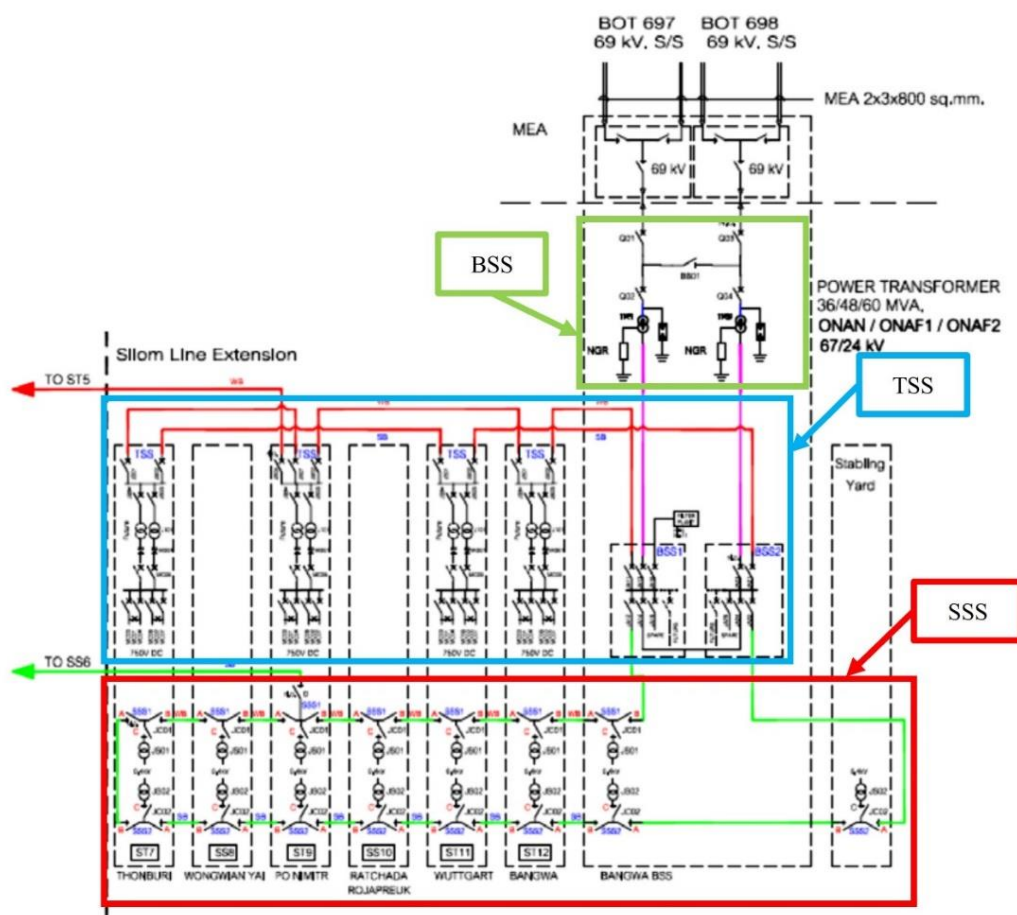
1) รถไฟฟ้าบีทีเอส สายสุขุมวิท (สายสีเขียวอ่อน) หรือรถไฟฟ้าเฉลิมพระเกียรติ สาย 1 เป็นโครงการระบบขนส่งมวลชนเร็ว รุ่น ซีเมนส์ โมดูลาร์ เมโทร (Siemens Modular Metro) ซีเมนส์ โบซันคายา (Siemens Bozankaya) ซีเอ็นอาร์ ฉางชุน (CNR Changchun Railway Vehicles) และซีอาร์อาร์ซี ฉางชุน (CRRC Changchun Railway Vehicles) ที่ให้บริการตั้งแต่สถานีวงแหวน-ลำลูกกา มีสถานีผู้โดยสาร 47 สถานี ระยะทางทั้งหมด 53.58 กิโลเมตร รถไฟฟ้าในระบบนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง บนทางวิ่งที่มีลักษณะเป็นทางวิ่งยกระดับที่ติดตั้งรางคูมาตรฐานขนาดกว้าง 1.435 เมตร

2) รถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม (สายสีเขียวเข้ม) หรือรถไฟฟ้าเฉลิมพระเกียรติ สาย 2 เป็นโครงการระบบขนส่งมวลชนเร็ว รุ่น ซีเมนส์ โมดูลาร์ เมโทร (Siemens Modular Metro) ซีเมนส์ โบซันคายา (Siemens Bozankaya) ซีเอ็นอาร์ ฉางชุน (CNR Changchun Railway Vehicles) และซีอาร์อาร์ซี ฉางชุน (CRRC Changchun Railway Vehicles) ที่ให้บริการตั้งแต่สถานีสนามกีฬาแห่งชาติ-บางหว้า มีสถานีผู้โดยสาร 14 สถานี ระยะทางทั้งหมด 14.67 กิโลเมตร รถไฟฟ้าในระบบนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง บนทางวิ่งที่มีลักษณะเป็นทางวิ่งยกระดับที่ติดตั้งรางคูมาตรฐานขนาดกว้าง 1.435 เมตร

3) รถไฟฟ้าสายสีทอง เป็นโครงการระบบขนส่งมวลชนรอง รุ่นบอมบาร์ดิเอร์ อินโนเวีย เอพีเอ็ม 300 (Bombardier Innovia APM 300) ที่ให้บริการตั้งแต่สถานีกรุงธนบุรี-คลองสาน มีสถานีผู้โดยสาร 3 สถานี ระยะทางทั้งหมด 2.7 กิโลเมตร รถไฟฟ้าในระบบนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง บนทางวิ่งที่มีลักษณะเป็นทางวิ่งยกระดับที่ติดตั้งรางนำทาง เนื่องจากขบวนรถวิ่งด้วยล้อยางบนพื้นคอนกรีต

จากข้อมูลของรถไฟฟ้าบีทีเอสทั้ง 2 สายและรถไฟฟ้าสายสีทองจะเห็นได้ว่ารถไฟฟ้าแต่ละขบวนทำงานด้วยพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระดับแรงดันไฟฟ้า 750 โวลต์ ระบบจ่ายไฟที่ถูกนำมาใช้งานในระบบเหล่านี้จึงเป็นระบบจ่ายไฟกระแสตรงที่มีลักษณะคล้ายกับรถไฟฟ้านครหลวง ซึ่งประกอบไปด้วยสถานีจ่ายไฟย่อยทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ เริ่มต้นสถานีไฟฟ้าแม่ข่าย (Buck substation: BSS) สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน (Traction substation: TSS) และสถานีไฟฟ้าบริการ (Service Substation: SSS) แสดงดังรูปที่ 3.17 พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากสถานีไฟฟ้าย่อยเหล่านี้จะถูก

ส่งเข้ามายังขบวนรถไฟฟ้า แล้วทำการแปลงจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 400 โวลต์ ผ่านวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้า (Converter units) เพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้านี้ให้กับชุดมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าต่อไป ซึ่งปัจจุบันในประเทศไทยได้มีการใช้งานเทคโนโลยีระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรงทั้งหมด 2 รูปแบบ คือ แบบซีเมนส์ และแบบซีเอ็นอาร์ แสดงดังรูปที่ 3.18 โดยรูปแบบการทำงานของทั้งสองระบบถูกออกแบบมาให้มีการทำงานที่เหมาะสมและครอบคลุมความต้องการพื้นฐาน เช่น ขบวนรถไฟฟ้ามีความสวยงาม และความสามารถในการบรรจุผู้โดยสารมากกว่า 50,000 คนต่อชั่วโมงต่อทิศทาง การควบคุมระบบใช้คอมพิวเตอร์สั่งการทั้งหมด ระบบอาณัติสัญญาณถูกออกแบบให้มีความปลอดภัยสูงสามารถทำงานได้แม้ระบบส่วนใหญ่ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนทำงานขัดข้อง ระบบปฏิบัติการเดินรถมีการควบคุมต่าง ๆ รองรับความปลอดภัยในทุกด้าน เป็นต้น



รูปที่ 3.17 ตัวอย่างระบบจ่ายไฟกระแสตรงของรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีเขียวเข้ม ส่วนต่อขยาย

(ที่มาภาพ: ชัยยุทธ สัมภาวะคุปต์, 2560)

1) แบบซีเมนส์ (Siemens model): ขบวนรถไฟฟ้าโมเดลนี้จะเป็นแบบ 4 ตู้ มีทั้งสิ้น 35 ขบวน ซึ่งประกอบด้วย ตู้รถไฟฟ้ามีระบบขับเคลื่อน (motor cars) ที่ด้านหน้าและท้ายของขบวนรถไฟฟ้า และตู้รถไฟฟ้าแบบไม่มีระบบขับเคลื่อน (trailer cars) 2 ตู้อยู่ตรงกลางของขบวนรถไฟฟ้าตามชนิด ดังต่อไปนี้ (1) ตู้รถไฟฟ้าแบบ A-Car มีระบบขับเคลื่อนและห้องคนขับ (driving cab) และ (2) ตู้รถไฟฟ้าแบบ C-Car ไม่มีระบบขับเคลื่อนและห้องคนขับ แต่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้า สำหรับระบบปรับอากาศและระบบแสงสว่าง ระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 750 โวลต์ จากรางที่สามผ่านชุดแปลงกระแสไฟฟ้าสลับระบบขับเคลื่อน เพื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับชุดมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ติดตั้งอยู่บนเพลาล้อของรถ A-car ทั้งสองตู้ ในทำนองเดียวกันตู้รถไฟฟ้า C-car ทั้งสองตู้ ตรงกลางได้รับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 750 โวลต์ จากรางที่สาม แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 400 โวลต์ และไฟฟ้ากระแสตรง 110 โวลต์ เพื่อใช้ในระบบปรับอากาศ และอัดประจุให้แบตเตอรี่ ตามลำดับ ขบวนรถไฟฟ้า 4 ตู้ มีความยาวตลอดทั้งขบวน 86.6 เมตร และกว้าง 3.12 เมตร รองรับผู้โดยสารได้สูงสุดจำนวน 1,490 คน (มีผู้โดยสารนั่งเต็มทุกที่นั่งและยืน) ที่น้ำหนักบรรทุกทุก (load condition) 8 คนต่อตารางเมตร จำนวนที่นั่งผู้โดยสาร 42 ที่นั่งต่อตู้ และ 168 ที่นั่งทั้งขบวน มีประตูโดยสารเลื่อนเปิดปิดด้านนอกตัวรถ (sliding door) ควบคุมการทำงานด้วยระบบควบคุมกบomotorไฟฟ้า มีความกว้างเมื่อเปิดสุด 1.4 เมตร จำนวน 16 บานต่อด้านตัวรถทำด้วยเหล็กปลอดสนิม ติดตั้งระบบปรับอากาศ พร้อมหน้าต่างชนิดกันแสง



รูปที่ 3.18 เทคโนโลยีระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทย

(ที่มาภาพ: <https://www.oknation.net/post/detail/634ed1a050f961ab20f3f885>

[เข้าถึงเมื่อ 19 พฤษภาคม 2568])

2) แบบซีเอ็นอาร์ (CNR model): ขบวนรถไฟฟ้าโมเดลนี้เป็นขบวนใหม่รุ่นล่าสุดจะเป็นแบบ 4 ตู้ มีทั้งสิ้น 12 ขบวน ประกอบด้วยตู้รถไฟฟ้าไม่มีระบบขับเคลื่อนมีห้องขับเรียกว่า TC-Car หรือ Trailer Car จำนวนสองตู้ที่อยู่ด้านหน้าและด้านหลังขบวน และตู้รถไฟฟ้าแบบ

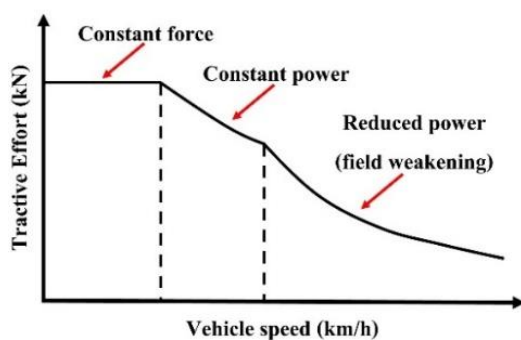
มีระบบขับเคลื่อนแต่ไม่มีห้องขับเคลื่อนเรียกว่า M-Car หรือ Motor Car จำนวนสองตู้อยู่ตรงกลางขบวน ตู้รถไฟฟ้า TC-car แต่ละตู้ติดตั้งระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า ACM ขนาด 140 กิโลวัตต์แอมป์ 3 เฟส 400 โวลต์ ACM แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 750 โวลต์ จากรางที่สามไปเป็น 3 เฟส 400 โวลต์ เพื่อจ่ายให้กับระบบปรับอากาศ ระบบลมอัด ระบบแสงสว่างภายในและภายนอก และโหลตต่าง ๆ นอกจากนั้นแล้ว ACM ยังติดตั้งเครื่องประจุไฟขนาด 22 กิโลวัตต์ 110 โวลต์ สำหรับแบตเตอรี่ของตู้รถไฟฟ้า TC-car สำหรับตู้รถไฟฟ้า M-car เป็นตู้รถไฟฟ้าที่ขับเคลื่อน และไม่มีห้องขับเคลื่อน แต่ละตู้ติดตั้งระบบขับเคลื่อนที่เรียกว่า MCM เพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ขับเคลื่อน ตู้รถไฟฟ้า M-car ที่ได้รับไฟฟ้า 750 โวลต์ จากรางจ่ายกระแสไฟฟ้าที่สาม ความยาวตลอดทั้งขบวน 87.25 เมตร และกว้าง 3.12 เมตร ตู้รถไฟฟ้า TC-car และ M-car มีที่นั่ง 42 ที่นั่ง รองรับผู้โดยสารได้สูงสุด ที่น้ำหนักรถทุก 8 คนต่อตารางเมตร ผู้โดยสารสูงสุดของแต่ละตู้รถไฟฟ้า TC-car และ M-car คือ 361 คน และ 384 คน ตามลำดับ จำนวนผู้โดยสารทั้งขบวนสูงสุด 1,490 คน ตัวรถทำจากเหล็กปลอดสนิม มีน้ำหนักเบาโครงสร้างเป็นแบบชิ้นรูปเชื่อมประกอบแต่ละตู้รถไฟฟ้าติดตั้งเครื่องปรับอากาศแบบติดตั้งบนหลังคาจำนวนสองเครื่องใช้น้ำยาทำความเย็น R407C ที่ไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม การควบคุมอุณหภูมิภายในห้องโดยสารใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติ (TCMS) ประมวลผลโดยผู้โดยสารติดตั้งแต่ละด้านของตู้รถไฟฟ้า 4 บาน ควบคุมและสั่งการด้วยระบบไฟฟ้าแบบเลื่อนปิดเปิดด้านนอกตัวรถ

รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีพิกัดกำลังไฟฟ้าประมาณ 1–2 เมกะวัตต์ ต่อขบวนรถ ทั้งรถไฟฟ้ามหานครและบีทีเอสรับพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงผ่านรางที่สามที่ระดับแรงดัน 750 โวลต์ ยกเว้น ระบบขนส่งทางรถไฟเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ (Suvarnabhumi Airport Rail Link: SARL) ที่รับพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่ระดับแรงดัน 25 กิโลวัตต์ 50 เฮิร์ต ผ่านตัวนำสายจ่ายเหนือศีรษะ ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนนี้มีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา ระยะห่างระหว่างขบวนรถสองขบวนประมาณ 120 วินาที เมื่อมีรถวิ่งอยู่ในระบบไฟฟ้าหลายขบวนบางขบวนดึงกำลังไฟฟ้าเต็มพิกัดเพื่อเร่งความเร็ว บางขบวนอาจจะเบรก บางขบวนเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อย ส่งผลให้คุณสมบัติของโหลตรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งแตกต่างจากโหลตของสถานีจ่ายไฟทั่วไปของการไฟฟ้ามหานครหลวง

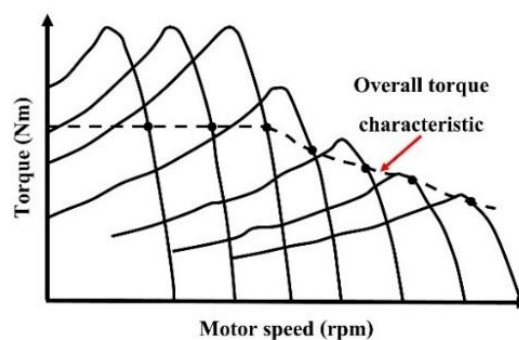
3.3 พลวัตการเคลื่อนที่ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

การเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเป็นพื้นฐานที่มีความสำคัญสำหรับนำไปประกอบการพิจารณาข้อมูลในส่วนอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ไม่ว่าจะเป็น การจัดการการเบรกแบบจ่ายคืน

พลังงานไฟฟ้า การออกแบบระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน เป็นต้น ซึ่งต้องอาศัยการพิจารณาภาพรวมของพฤติกรรมการทำงานของขบวนรถไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส หรือมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเป้าหมายที่กำลังพิจารณาว่าเป็นเทคโนโลยีแบบใดและมีรายละเอียดอย่างไร ดังนั้นการจำลองจึงต้องการลักษณะสมบัติการทำงานของรถไฟฟ้าในรูปของแรงฉุดลาก (tractive force: TE) ที่เกิดจากแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าส่งกำลังขับเคลื่อนผ่านเฟืองทดไปยังล้อ มากกว่าการนำลักษณะสมบัติเส้นโค้งแรงบิดและความเร็วรอบ (torque speed curve) ของมอเตอร์ไฟฟ้ามาใช้งานโดยตรง แสดงดังรูปที่ 3.19(ข) โดยปกติแรงฉุดลากจะถูกนำมาแสดงในรูปแบบที่ผ่านการปรับคูณด้วยอัตราทดของเฟืองให้เหมาะกับการนำไปคำนวณการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว ค่าที่ได้จึงสามารถนำมาแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉุดลากหน่วยนิวตัน (N) ที่แปรผันตรงกับความเร็วการเคลื่อนที่เชิงเส้นของรถไฟฟ้าในหน่วย เมตรต่อวินาที (m/s) หรือกิโลเมตรต่อชั่วโมง (km/h) แสดงดังรูปที่ 3.19(ก) โดยไม่ต้องคำนึงถึงรูปแบบของมอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อน อินเวอร์เตอร์ และระบบจ่ายไฟฟ้าเป็นชนิดกระแสตรงหรือกระแสสลับ เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวถูกนำมาคิดเป็นส่วนหนึ่งของตัวปรับคูณที่ใช้กำหนดลักษณะคุณสมบัติของแรงฉุดลากแล้ว (ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์, 2560)



(ก) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงฉุดลาก



(ข) เส้นโค้งแรงบิดและความเร็วรอบ

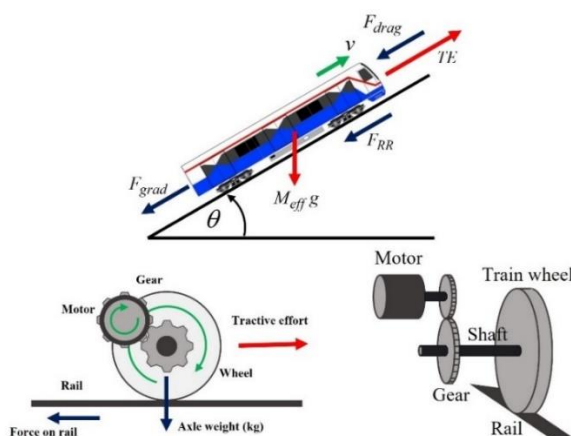
รูปที่ 3.19 ลักษณะสมบัติของแรงฉุดลากของขบวนรถไฟฟ้า

ตามนิยามกราฟแรงฉุดหัวลากมาตรฐานของสหภาพรถไฟระหว่างประเทศ (International Union of Railways: UIC) จะมีตัวแปรความเร็วฐาน (base speed: v_n) เป็นความเร็วสุดท้ายที่แรงฉุดลากจะสามารถคงค่าสถานะการทำงาน ณ ขณะนั้นไว้ได้ ก่อนที่แรงฉุดลากนี้จะมีค่าปรับเปลี่ยนตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วมีค่าเกิน v_n การทำงานจะเปลี่ยนจากช่วงแรงฉุดลากคงที่

(constant force region) เป็นช่วงกำลังงานคงที่ (constant power region) และหากความเร็วเกิน v_2 การทำงานของระบบจะเปลี่ยนจากช่วงกำลังงานคงที่เป็นกำลังงานมีค่าน้อยลง (reduced power) แสดงดังรูปที่ 3.19(ก)

$$TE - R = M_{eff} \alpha \quad (3.1)$$

โดยทั่วไปการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้างานเกิดขึ้นครั้งแรกเมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าได้รับพลังงานไฟฟ้ามากพอที่จะสร้างแรงฉุดลากเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้างานโดยรวม (Overall resistance: R) ดังสมการที่ 3.1 จากนั้นแรงลัพธ์ที่เหลือจะถูกใช้เป็นแรงส่งสำหรับเร่ง (α) ความเร็วให้รถไฟฟ้างานเคลื่อนที่ต่อไป ในการพิจารณาแรงลัพธ์ในส่วนนี้จะใช้หลักการคำนวณทางพลวัตของรถไฟฟ้างาน (train vehicle dynamic) ซึ่งเริ่มต้นด้วยการสร้างแผนภาพวัตถุอิสระสำหรับการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้างานที่มีมวลประสิทธิผล (effective vehicle mass: M_{eff}) บนรางวิ่งยกระดับเอียงทำมุม (θ) กับแนวราบ ตามกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน แสดงดังรูปที่ 3.20 (Chymera and Goodman, 2012)



รูปที่ 3.20 แผนภาพวัตถุอิสระแสดงการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้างาน

จากรูปที่ 3.20 เมื่อทำการแจกแจงรายละเอียดแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้างานทั้งหมดที่เกิดขึ้น สามารถแยกแรงนี้ออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ แรงเสียดทานด้านทาน (frictional force or rolling resistance: F_{RR}) แรงต้านทานอากาศ (aerodynamic drag force: F_{drag}) และแรงต้านทานโน้มถ่วง (gravitational or gradient force: F_{grad}) ดังสมการที่ 3.2

$$R = F_{RR} + F_{drag} + F_{grad} \quad (3.2)$$

F_{RR} เป็นแรงต้านที่เกิดจากแรงเสียดทานที่สำคัญ 3 ประเภท คือ แรงเสียดทานจากแบริ่ง (bearing torque) แรงเสียดทานจากเฟืองทด (gear teeth friction) และแรงเสียดทานจากระบบเบรก (brake pad) อย่างไรก็ตามแรงต้านการเคลื่อนที่ประเภทนี้สามารถคำนวณจากสมการมาตรฐานอย่างง่าย ดังสมการที่ 3.3 โดยสมการนี้มีค่าสัมประสิทธิ์ f_0 ที่แปรเปลี่ยนตามลักษณะการใช้งานล้อกับทางวิ่งของรถไฟฟ้า เช่น ล้อเหล็กกับรางมีค่าประมาณ 0.001 ล้อยางกับพื้นถนนมีค่าประมาณ 0.006-0.01 เป็นต้น ในขณะที่สัมประสิทธิ์ f_l สามารถละทิ้งได้ ดังนั้นค่า f_0 จึงเป็นตัวแปรหลักในการกำหนดค่า F_{RR}

$$F_{RR} = f_{RR} W_{axle} = (f_0 + f_l v) W_{axle} \quad (3.3)$$

โดย f_{RR} f_0 และ f_l คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน

W_{axle} คือ ค่าน้ำหนักโหลดของแกนขับเคลื่อน (axle load)

F_{drag} เป็นแรงต้านที่แปรผันตามโครงสร้างส่วนหน้าของรถไฟฟ้า เนื่องจากพื้นที่ข้างหน้าของรถไฟฟ้าเป็นส่วนที่ต้องรับแรงดันอากาศขณะที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ การคำนวณแรงต้านนี้สามารถหาได้จากสมการที่ 3.4

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \rho_{air} C_d A_F v_{air}^2 \quad (3.4)$$

โดย ρ_{air} คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ

C_d คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ

v_{air} คือ ค่าความเร็วสัมพัทธ์ของการไหลของอากาศเทียบกับความเร็วของขบวนรถไฟฟ้า

A_F คือ ค่าพื้นที่ด้านหน้าของรถจักรไฟฟ้าที่ฉายให้ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของอากาศ

F_{grad} เป็นแรงต้านการเคลื่อนที่ที่เกิดผลมาจากมวลของรถไฟฟ้าที่เคลื่อนที่บนรางวิ่งในแนวเอียงทำมุม θ กับพื้น แรงต้านการเคลื่อนที่ในส่วนนี้สามารถส่งผลในลักษณะเสริมหรือต้านการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทิศทางการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าว่าขึ้นเนินหรือลงเนิน โดยทั่วไป

รางวิ่งมักมีความชันที่น้อยมากและเปลี่ยนแปลงอยู่บ่อยครั้งในแต่ละจุด การพิจารณาแรงต้านโน้มถ่วง จึงสมมติให้รถไฟเป็นจุดมวล (mass point) เพื่อจัดสมการให้อยู่ในรูปอย่างง่าย ดังสมการที่ 3.5

$$F_{grad} = \pm M_{eff} g \sin \theta \quad (3.5)$$

นอกจากนี้ขณะที่รถไฟเคลื่อนที่บนทางโค้งของรางวิ่งจะทำให้เกิดแรงต้านเพิ่มเติมอีกประเภทหนึ่ง คือ แรงสู่ศูนย์กลาง โดยทางการในส่วนนี้จะรวมไปถึงมวลรถเปล่าและมวลในส่วนที่แปลงมาจากโมเมนต์ความเฉื่อยของโครงสร้างที่เชื่อมกับเพลากลางของมอเตอร์ไฟฟ้าของรถไฟฝรั่งเศส (Société National des Chemins de fer Français: SNCF) ได้กำหนดให้แรงต้านประเภทนี้มีค่าเท่ากับ $800/r$ เมื่อกำหนดให้ r คือ รัศมีของทางโค้งในหน่วย เมตร (m) และแรงต้านมีหน่วยเป็น นิวตัน (N) และทางการรถไฟเยอรมัน (Deutsche Bahn: DB) กำหนดให้แรงต้านประเภทนี้มีค่าเท่ากับ $650/(r - 30)$ ในกรณีที่ $r \geq 300$ เมตร และมีค่าเท่ากับ $650/(r - 55)$ ในกรณีที่ $r < 300$ เมตร

และอีกสมบัติความสำคัญที่มีผลต่อการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟ คือ มวลของรถไฟและมวลบรรทุก สำหรับการคำนวณในส่วนนี้เพื่อไม่ให้เกิดความซับซ้อนจนเกินไป จะมีการใช้ตัวประกอบมวลประสิทธิผล (effective mass coefficient: λ_{eff}) แทนผลรวมของน้ำหนักบรรทุก ได้แก่ มวลของผู้โดยสาร (passenger mass: M_{psg}) มวลของสินค้า (freight mass: M_{frgt}) และมวลสมมูลจากโมเมนต์ความเฉื่อยของการหมุน (rotational inertia equivalent mass: M_{rot}) แล้วเทียบอัตราส่วนกับมวลรถเปล่า (tare mass: M_{tare}) (ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์, 2560) ดังสมการต่อไปนี้

$$M_{eff} = M_{tare} (1 + \lambda_{eff}) \quad (3.6)$$

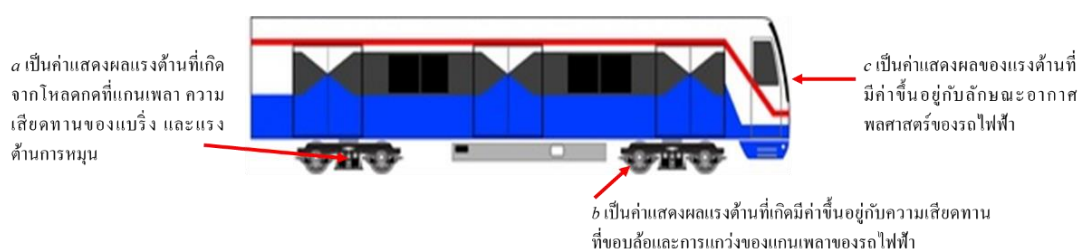
$$\lambda_{eff} = \frac{M_{psg} + M_{frgt} + M_{rot}}{M_{tare}} \quad (3.7)$$

โดยค่ามาตรฐานของ λ_{eff} สำหรับรถไฟขนส่งสินค้ามีค่าประมาณ 0.03 - 0.04 รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีค่าประมาณ 0.08 - 0.12 และหัวรถจักรไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.15 - 0.3 นอกจากนี้ค่าความเร่งของรถไฟในการบริการประเภทต่าง ๆ จะมีความแตกต่างกัน เพื่อใช้อ้างอิงในการพิจารณาผลให้มีความสอดคล้องกับการทำงานจริง สามารถสรุปค่าความเร่งมาตรฐานสำหรับใช้ในระบบรถไฟขนส่งมวลชน ดังตารางที่ 3.2 (ธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์, 2560)

ตารางที่ 3.2 ค่าความเร่งมาตรฐานสำหรับใช้กับรถไฟ

ประเภทรถไฟ	ความเร่ง (m/s ²)
รถไฟบรรทุกสินค้าหนัก (Freight train)	0.02-0.2
รถไฟโดยสาร (Passenger train)	0.3-0.4
รถไฟด่วนระยะไกล (Express long-distance train)	0.4-0.7
รถไฟชานเมือง (Suburban train)	0.8-1.2
รถไฟขนส่งมวลชนและรางเบา (Metro and light rail train)	1.0-3.0

อย่างไรก็ตามเพื่อให้การคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟสามารถทำได้ง่ายขึ้น ทางผู้ผลิตระบบรถไฟขนส่งมวลชนนิยมระบุค่าแรงเสียดทานด้านการเคลื่อนที่ F_{RR} และแรงต้านทานอากาศ F_{drag} ในรูปของสมการกำลังสอง เรียกว่า สมการเดวิส (Davis equation) ดังสมการที่ 3.8 สมการนี้ได้จากการประมาณค่าเส้นโค้ง (curve fitting) ข้อมูลทดสอบของระบบรถไฟขนส่งมวลชนเพื่อความสะดวกในการคำนวณ การรถไฟในประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกได้ทำการพัฒนาสมการเดวิสสำหรับใช้คำนวณแรงต้านการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมกับการให้บริการระบบรถไฟขนส่งมวลชนในประเทศนั้น ๆ เมื่อสัมประสิทธิ์ a เป็นค่าแสดงผลความต้านทานที่เกิดจากโหลดกดที่แกนเพลลา ความเสียดทานของเบร้ง และแรงต้านการหมุน สัมประสิทธิ์ b เป็นค่าแสดงผลความต้านทานที่มีค่าขึ้นอยู่กับความเสียดทานที่ขอบล้อและการแกว่งของแกนเพลลาของรถไฟ และสัมประสิทธิ์ c เป็นค่าแสดงผลของความต้านทานที่มีค่าขึ้นอยู่กับลักษณะอากาศพลศาสตร์ของรถไฟ สามารถพิจารณาได้ดังรูปที่ 3.21 (ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์, 2560)



รูปที่ 3.21 สัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ในระบบขนส่งมวลชนตามสมการเดวิส

สำหรับการปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถไฟสามารถดำเนินการได้จากการคำนวณ v_i กับ v_{i+1} คือ ความเร็วรถไฟก่อนและหลังการปรับปรุง Δt คือ ช่วงเวลาที่พิจารณา

การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า (time step) และ s_i กับ s_{i+1} คือ ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าก่อนและหลังการปรับปรุง ดังสมการที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ

$$v_{i+1} = v_i + a\Delta t \quad (3.9)$$

$$s_{i+1} = s_i + v_i\Delta t + \frac{1}{2}a\Delta t^2 \quad (3.10)$$

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนรถไฟฟ้า (train power consumption: P_{tr}) ให้สามารถทำงานได้จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน ได้แก่ กำลังไฟฟ้าฉุดลาก (tractive power: P_{ta}) และกำลังไฟฟ้าเสริม (auxiliary power: P_{aux}) ดังสมการที่ 3.11 โดยกำลังไฟฟ้าฉุดลากจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่า TE v และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นกลของมอเตอร์ไฟฟ้า (η) ดังสมการที่ 3.12 และกำลังไฟฟ้าเสริมสำหรับจ่ายให้กับโหลดต่าง ๆ บนรถไฟฟ้า เช่น ระบบแสงสว่าง ระบบเครื่องปรับอากาศ ระบบไฟสัญญาณ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนรถไฟฟ้า (train energy consumption: E_{tr}) ดังสมการที่ 3.13 เมื่อ $E_{tr,i}$ กับ $E_{tr,i+1}$ คือ พลังงานไฟฟ้าก่อนและหลังการปรับปรุง (Zhang, Wu, and Liu, 2017)

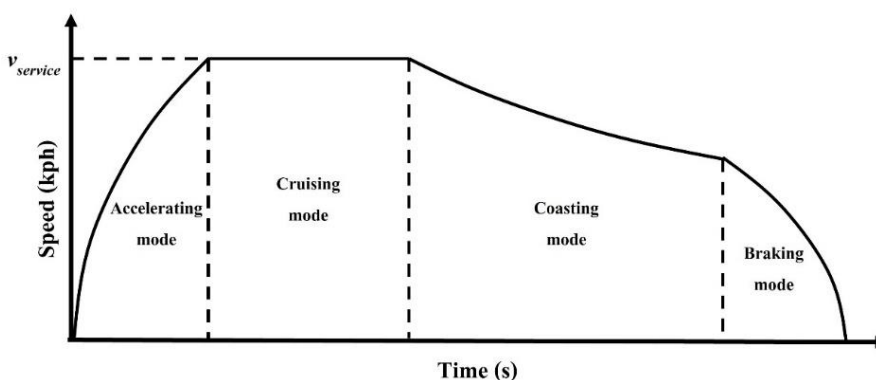
$$P_{tr} = P_{ta} + P_{aux} \quad (3.11)$$

$$P_{ta} = \begin{cases} \frac{TE}{\eta} \times v & ; \text{if } TE \geq 0 \\ \eta TE \times v & ; \text{if } TE < 0 \text{ with regenerative brake} \\ 0 & ; \text{if } TE < 0 \text{ without regenerative brake} \end{cases} \quad (3.12)$$

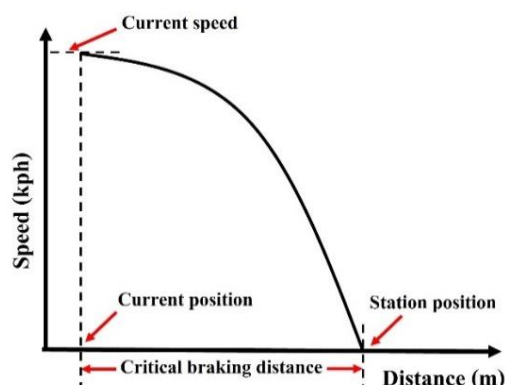
$$E_{tr,i+1} = E_{tr,i} + P_{tr}\Delta t \quad (3.13)$$

หลังจากพิจารณาการเคลื่อนที่พื้นฐานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนดังสมการต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น จะสามารถสร้างลักษณะสมบัติเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว-เวลาของรถไฟฟ้า (train's speed-time curve) หรือเส้นโครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้า (speed profile) ที่เคลื่อนที่ตามรางวิ่งระหว่างสถานีผู้โดยสาร 2 สถานี แสดงดังรูปที่ 3.22 เส้นโค้งนี้แสดงโหมดการ

ทำงานของรถไฟฟ้าทั้งหมด 4 โหมด ได้แก่ โหมดเร่งความเร็ว (accelerating mode) โหมดการเคลื่อนที่คงที่ (cruising or constant-speed mode) โหมดการแล่นด้วยความเฉื่อย (coasting mode) และโหมดการเบรก (braking mode) อย่างไรก็ตามรูปแบบการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าอาจจะมีการสลับโหมดไปตามวัตถุประสงค์การใช้งานที่ต้องการ เช่น หากต้องการประหยัดพลังงานไฟฟ้า อาจจะต้องควบคุมให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยโหมดการใช้แรงเฉื่อย ควบคุมรถไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ด้วยโหมดการรักษาความเร็วที่ความเร็วสูงสุดเป็นเวลานานเมื่อต้องการใช้เวลาในการเคลื่อนที่ให้น้อยที่สุด เป็นต้น



รูปที่ 3.22 เส้นโครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้า



รูปที่ 3.23 ระยะวิกฤตการเบรก

จากรูปที่ 3.22 ปกติรถไฟฟ้าจะเริ่มเคลื่อนที่ออกจากสถานีผู้โดยสารต้นทางด้วยโหมดเร่งความเร็ว ซึ่งมีความเร่งในการเคลื่อนที่เป็นค่าบวก ($\alpha > 0$) จนกระทั่งรถไฟฟ้ามีความเร็วเท่ากับ

ความเร็วทำงาน (service speed: $v_{service}$) รถไฟฟ้าจะปรับลดความเร็วให้มีค่าเท่ากับศูนย์ ($\alpha = 0$) และเข้าสู่โหมดการรักษาระดับความเร็วเพื่อรักษาระดับความเร็วให้คงที่ จากนั้นเมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปถึงตำแหน่งเริ่มทำงานของโหมดการใช้แรงเฉื่อยที่ออกแบบไว้ รถไฟฟ้าจะตัดแรงฉุดลากของมอเตอร์ไฟฟ้าออกและปล่อยให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยโมเมนตัมที่ความเร็วมีค่าเป็นลบ ($\alpha < 0$) อย่างไรก็ตามหากรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ลงเนินก็อาจจะทำให้ความเร็วมีค่าเป็นบวกได้ และสุดท้ายรถไฟฟ้าจะเปลี่ยนเป็นโหมดการเบรกในขณะที่ยังเคลื่อนที่มาถึงระยะที่ต้องทำการเบรก เรียกว่า ระยะวิกฤตการเบรก (Critical braking distance: CBD) แสดงดังรูปที่ 3.23 เพื่อเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสารปลายทางด้วยความเร็วที่เป็นลบ ($\alpha < 0$) ดังสมการที่ 3.14 (ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์, 2560)

$$CBD = -0.5 \times \frac{v^2}{\alpha} \quad (3.14)$$

3.4 เทคนิคการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนด้วยวิธีการฉีดกระแส

การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow Analysis) เป็นกระบวนการคำนวณค่าทางไฟฟ้า ณ จุดต่าง ๆ ภายในโครงข่ายระบบจ่ายไฟ เช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า การใช้พลังงานไฟฟ้ารวม การสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในระบบ เป็นต้น เพื่อสนับสนุนการพิจารณาและวางแผนโครงข่ายขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อนสูงอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มักประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟและโหลดอยู่หลายจุดตลอดทั้งระบบ และยังมีลักษณะของโหลดที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น (ตามรูปแบบการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าที่แตกต่างกัน) อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์จะขึ้นอยู่กับข้อมูลเชิงพลวัตการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าและเทคนิคการคำนวณที่เหมาะสมกับระบบ (Triwijaya, Pradipta, and Wati, 2023)

การปฐกษัตริ์กรรมในบทที่ 2 แสดงให้เห็นว่าเทคนิคดังกล่าวถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนทั้งแบบระบบไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current: DC) และไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating current: AC) อย่างแพร่หลาย เช่น วิธีเกาส์-ไซด์เดล (Gauss-Seidel Method) วิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Method) วิธีฟาสต์ดีคัปเปิล (Fast Decoupled Method) วิธีขยับถอยหลัง-เดินหน้า (Backward/Forward Sweep Method) วิธีการฉีดกระแส

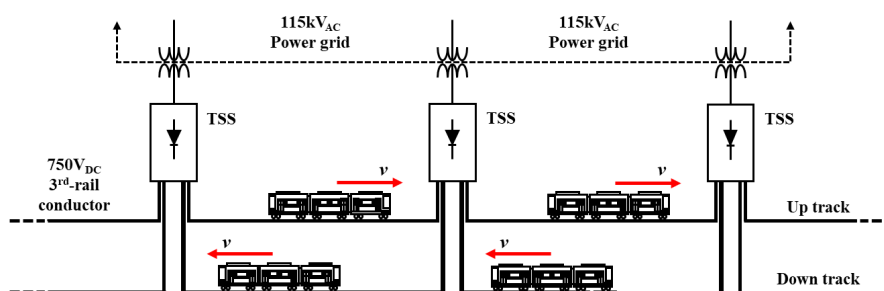
(Current Injection Method) เป็นต้น โดยแต่ละเทคนิคก็จะมีข้อดี ข้อจำกัด และการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันออกไป (Triwijaya, Pradipta, and Wati, 2023; Kile, Uhlen, Warland, and Kjölle, 2014) แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การเปรียบเทียบเทคนิคการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า

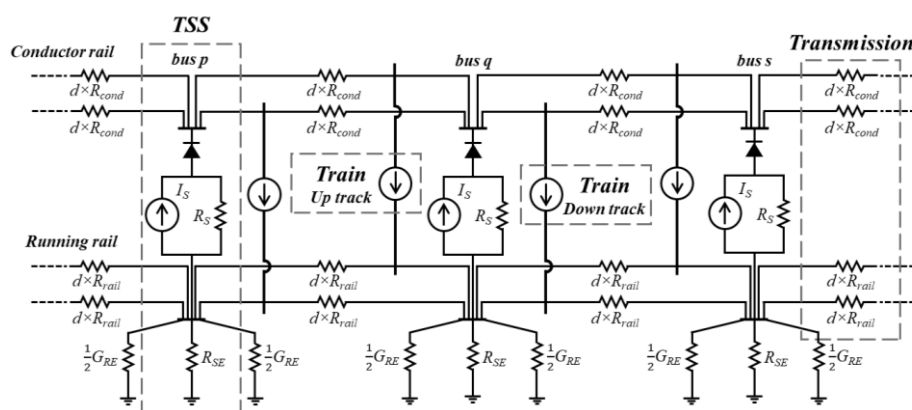
เทคนิค	ข้อดี	ข้อเสีย	เหมาะกับระบบ
วิธีเกาส-ไฮเดล	- ง่าย - ใช้หน่วยความจำน้อย	- คอนเวอร์จช้า - ไม่เหมาะกับระบบขนาดใหญ่	- AC - DC (ระบบเล็ก)
วิธีนิวตัน-ราฟสัน	- แม่นยำสูง - คอนเวอร์จเร็ว	- ต้องใช้เมทริกซ์จาโคเบียน - ใช้หน่วยความจำมาก	- AC - DC (โหลดคงที่)
วิธีหยั่งถอยหลัง-เดินหน้า	- คอนเวอร์จเร็วมากในระบบ radial - เหมาะกับโหลดไม่เชิงเส้น	- ไม่เหมาะกับระบบที่ซับซ้อน - ต้องจัดลำดับโนด	- AC (ระบบจำหน่ายไฟฟ้า) - DC
วิธีวิธีฟาสต์คัลเปิล	- คอนเวอร์จเร็วมาก - ใช้หน่วยความจำน้อย - เหมาะกับระบบที่ซับซ้อน	- ใช้กับระบบ DC ไม่ได้ - ความแม่นยำต่ำ	AC (ระบบใหญ่)
วิธีการฉีดกระแส	- ง่าย - เหมาะกับโหลดกระแส	- ไม่เหมาะกับโหลดกำลังคงที่	- AC (กรณีพิเศษ) - DC

เมื่อนำเทคนิคการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 3.3 มาเทียบหาความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้กับโครงข่ายระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน พบว่าวิธีการฉีดกระแสเป็นเทคนิคที่เหมาะสมที่สุดในการคำนวณของกำลังไฟฟ้า เนื่องจากเทคนิคนี้ถูกคิดค้นขึ้นมาสำหรับวิเคราะห์ระบบที่มีลักษณะเป็นแบบไฟฟ้ากระแสตรง โดยหลักการของเทคนิคนี้อาศัยพื้นฐานกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Current Law: KCL) ในการกำหนดกระแสไฟฟ้าที่เข้าและออกแต่ละโนดหรือบัสของระบบ แล้วสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในรูปแบบของเมทริกซ์แอดมิตแตนซ์แทนการใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเหมือนวิธีการทั่วไป เช่น วิธีเกาส์-ไฮเดล วิธีนิวตัน-ราฟสัน วิธีฟาสต์คัลเปิล เป็นต้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์ระบบได้อย่างแม่นยำ รวดเร็ว และลู่เข้าสู่คำตอบได้ง่ายกว่าวิธีอื่น (Triwijaya, Pradipta, and Wati, 2023)

กระบวนการในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าจะนำคุณสมบัติการทำงานและโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ปกติมักประกอบด้วย ขบวนรถไฟฟ้าหลายขบวนที่วิ่งให้บริการภายในระบบ สถานีไฟฟ้าย่อยแบบวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดที่มีการป้องกันกระแสไฟฟ้าที่อาจจะไหลย้อนกลับสู่สถานีไฟฟ้าย่อย ขนาด 600–750 โวลต์ ที่ติดตั้งกระจายอยู่ตามเส้นทางวิ่งทุก ๆ 1–3 กิโลเมตร ร่างตัวนำที่ใช้ป้อนกระแสให้กับรถไฟฟ้า ร่างวิ่งที่เป็นเส้นทางกลับกระแสไฟฟ้า และฉนวนคั่นระหว่างร่างวิ่งกับดิน แสดงดังรูปที่ 3.24 โดยการประมวลผลการทำงานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนด้วยวิธีการฉีดกระแส จะต้องทำการแปลงองค์ประกอบทั้งหมดภายในโครงข่ายให้อยู่ในรูปของแบบจำลองพาย (π -model) (Kulworawanichpong, 2015; Mongkoldee, Leeton, and Kulworawanichpong, 2016) เพื่อนำไปดำเนินการพิจารณาด้วยหลักการทางคณิตศาสตร์ให้ได้ผลที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด แสดงดังรูปที่ 3.25 ซึ่งประกอบด้วยรายละเอียดที่ต้องพิจารณาดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.24 โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน



รูปที่ 3.25 แบบจำลองระบบจ่ายไฟกระแสตรงของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

ส่วนสถานีไฟฟ้าย่อย: มีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายกระแส Norton's equivalent source) ในแบบจำลองนี้ ซึ่งมีลักษณะการวางตัวแปรกระแสลัดวงจร (I_{ss}) และความต้านทาน (R_{ss}) ของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีการเชื่อมต่อกับรางตัวนำ (C) ผ่านไดโอดในอุดมคติ และรางวิ่ง (R) ที่มีความต้านทานต่อสายดิน (R_{SE}) ตามที่แสดงในส่วนสถานีจ่ายไฟ

ส่วนสายส่งไฟฟ้า: สามารถจัดให้อยู่ในรูปของแบบจำลองพายที่ประกอบด้วย รางตัวนำ รางวิ่ง และฉนวนระหว่างรางวิ่งกับดิน โดยในแบบจำลองนี้จะวางความต้านทานรางตัวนำ (Conductor rail resistance: R_{cond}) และความต้านทานรางวิ่ง (Running rail resistance: R_{rail}) ตามเส้นทางวิ่งของรถไฟ และเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจะวางตัวนำรางวิ่งกับดิน (Rail-to-earth conductance: G_{RE}) ที่หารครึ่งไว้ในตำแหน่งขอบทั้งสองด้านของรางวิ่ง

ส่วนรถไฟไฟฟ้า: ถูกแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่คร่อมระหว่างรางตัวนำและรางวิ่งในวิธีการฉีดกระแสที่นำมาคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

กระบวนการในการพิจารณาค่าทางไฟฟ้าบัสต่าง ๆ ภายในของโครงข่ายจะเริ่มต้นจากการกำหนดแรงดันไฟฟ้าของแต่ละบัสให้มีค่าเท่ากับศูนย์และสร้างสมการวิเคราะห์โหนด แสดงดังสมการที่ 3.15 ในขณะที่เมทริกซ์ค่าความนำ $[G]$ จะถูกสร้างขึ้นจากการควบรวมเมทริกซ์ค่าความนำย่อยระหว่างคู่บัส p กับ q หรือ q กับ s ได้แก่ เมทริกซ์ค่าความนำสถานีไฟฟ้าย่อย เมทริกซ์ค่าความนำของรางตัวนำกับรางวิ่ง และเมทริกซ์ค่าความนำของรางวิ่งกับดิน แสดงดังสมการที่ 3.16 เมื่อ $G_{pq}^{(C,C)}$ เป็นค่าความนำของรางตัวนำกับรางตัวนำ $G_{pq}^{(C,R)}$ และ $G_{pq}^{(R,C)}$ เป็นค่าความนำของรางตัวนำกับรางวิ่ง และ $G_{pq}^{(R,R)}$ เป็นค่าความนำของรางวิ่งกับรางวิ่ง (Kulworawanichpong, 2015)

$$[I] = [G][V] \quad (3.15)$$

$$\begin{bmatrix} I_1^{(C)} \\ I_1^{(R)} \\ I_2^{(C)} \\ I_2^{(R)} \\ \vdots \\ I_N^{(C)} \\ I_N^{(R)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{1,1}^{(C,C)} & G_{1,1}^{(C,R)} \\ G_{1,1}^{(R,C)} & G_{1,1}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} G_{1,2}^{(C,C)} & G_{1,2}^{(C,R)} \\ G_{1,2}^{(R,C)} & G_{1,2}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} G_{1,N}^{(C,C)} & G_{1,N}^{(C,R)} \\ G_{1,N}^{(R,C)} & G_{1,N}^{(R,R)} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} G_{2,1}^{(C,C)} & G_{2,1}^{(C,R)} \\ G_{2,1}^{(R,C)} & G_{2,1}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \ddots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \ddots & \begin{bmatrix} G_{N-1,N}^{(C,C)} & G_{N-1,N}^{(C,R)} \\ G_{N-1,N}^{(R,C)} & G_{N-1,N}^{(R,R)} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} G_{N,1}^{(C,C)} & G_{N,1}^{(C,R)} \\ G_{N,1}^{(R,C)} & G_{N,1}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} G_{N,N-1}^{(C,C)} & G_{N,N-1}^{(C,R)} \\ G_{N,N-1}^{(R,C)} & G_{N,N-1}^{(R,R)} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} G_{N,N}^{(C,C)} & G_{N,N}^{(C,R)} \\ G_{N,N}^{(R,C)} & G_{N,N}^{(R,R)} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^{(C)} \\ V_1^{(R)} \\ V_2^{(C)} \\ V_2^{(R)} \\ \vdots \\ V_N^{(C)} \\ V_N^{(R)} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

สำหรับเมตริกซ์กระแสไฟฟ้า $[I]$ ในสมการที่ 3.15 สามารถหาได้จากการนำกระแสไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าย่อยและกระแสไฟฟ้าของรถไฟฟ้า (I_{tr}) มาคำนวณร่วมกัน โดยที่กระแสไฟฟ้าของรถไฟฟ้าเป็นผลหารระหว่างกำลังไฟฟ้า (P_{tr}) กับแรงดันไฟฟ้า (V_{tr}) ที่รถไฟใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านบัสที่กำลังพิจารณา กระบวนการต่าง ๆ ข้างต้น จะนำไปสู่การแก้สมการเพื่อหาค่าเมตริกซ์แรงดันไฟฟ้าของบัส $[V]$ ซึ่งจะถูกดำเนินการในลักษณะนี้ซ้ำ ๆ อยู่หลายรอบจนกว่าค่าคาดเคลื่อนของผลเฉลยค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัสจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ (Mongkoldee, Leeton, and Kulworawanichpong, 2016)

นอกจากนี้ การเกิดพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเป็นปัญหาหลักที่มักถูกกล่าวถึงบ่อยในการพิจารณาการทำงานของระบบจ่ายไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนทุกระบบ โดยสาเหตุที่มีผลต่อการเกิดการสูญเสียมีด้วยกันหลายปัจจัย เช่น ประสิทธิภาพในการทำงานของมอเตอร์ ความต้านทานของสายส่ง การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น ดังนั้นการคำนวณในส่วนของการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้ในการจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน อย่างไรก็ตามในที่นี้ได้เลือกใช้วิธีคำนวณค่าการสูญเสียจากผลรวมของพลังงานไฟฟ้าที่สถานีจ่ายไฟขับเคลื่อนลบด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้า แสดงดังสมการที่ 3.17 สำหรับค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียสามารถคำนวณได้จากค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียคูณกับช่วงเวลาที่ใช้ในการพิจารณา แล้วนำมาบวกสะสมกับค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียที่คำนวณก่อนหน้านี้ เพื่อประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่างค่าที่ส่งออกจากสถานีจ่ายไฟและค่าที่ใช้จริงในการขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้า แสดงดังสมการที่ 3.18

$$P_{loss}(i+1) = \sum_{k=1}^{Nsub} P_{SS,k}(i) - \sum_{k=1}^{Ntrain} P_{tr,k}(i) \quad (3.17)$$

$$E_{loss}(i+1) = E_{loss}(i) + P_{loss}(i+1) \times \Delta t \quad (3.18)$$

3.5 ปัญหาไฟดับและผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

ปัจจุบันในหลายประเทศทั่วโลกมีอัตราการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นสัญญาณที่บ่งบอกว่าแต่ละประเทศต่างหันมาให้ความสนใจที่จะพัฒนาเทคโนโลยีและฐานเศรษฐกิจที่จำเป็นต่อการยกระดับความเป็นอยู่ของมนุษยชาติให้เจริญยิ่งขึ้น ไม่ว่าจะเป็น การศึกษา การแพทย์ การคมนาคม การขนส่งสินค้าและบริการ อุตสาหกรรมการผลิต และอื่น ๆ รวมไปถึงการบริหารและรักษา

ความมั่นคงของประเทศนั่นเอง (Nowakowski, Olczykowski, and Wojciechowski, 2017) จึงไม่อาจปฏิเสธได้ว่ายุคนี้ไฟฟ้าเข้ามามีบทบาทสำคัญและกลายเป็นสิ่งที่ทรงอิทธิพลที่สุดต่อการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ อย่างไรก็ตามสำหรับการใช้พลังงานตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันต้องเผชิญกับปัญหาการขัดข้องมาอย่างยาวนาน โดยปัญหานี้จะส่งผลกระทบต่อผู้ผลิตและผู้ใช้ไฟฟ้าในหลาย ๆ มิติ เช่น คอมพิวเตอร์รีเซตตัวเองขณะทำงานจนนำไปสู่การเสียข้อมูล เครือข่ายอินเทอร์เน็ตภายในองค์กรล่มไม่สามารถเชื่อมต่อได้ เกิดความวิตกกังวลที่กระทบถึงทัศนวิสัย ไฟจราจรไม่ทำงานทำให้เกิดอุบัติเหตุทางท้องถนน ผู้คนถูกขังในพื้นที่ที่มีอากาศจำกัด เป็นต้น ทั้งนี้ผลกระทบที่กล่าวมาจะมีความรุนแรงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขอบเขตของสถานการณ์การขัดข้องและระยะเวลาที่เกิดปัญหา (Chovančíková and Hoterová, 2021) จึงนำมาซึ่งบทเรียนและการพัฒนามาตรการรับมือที่ดีขึ้น การศึกษาปัญหาการขัดข้องในระบบรถไฟฟ้าจึงเป็นกรณีศึกษาที่สะท้อนความท้าทายที่อาจจะต้องเผชิญในอนาคต แสดงดังรูปที่ 3.26 โดยในส่วนนี้จึงได้มีการกล่าวถึงสาเหตุ ผลกระทบ แผนการรับมือที่มีการใช้จริง และกรณีศึกษาของสถานการณ์ไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในปัจจุบันดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.26 ปัญหาไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

(ที่มาภาพ: <https://www.pptvhd36.com/news/ประเด็นร้อน/70276> และ

https://www.khaosod.co.th/breaking-news/news_7626345 [เข้าถึงเมื่อ 21 พฤษภาคม 2568])

3.5.1 สาเหตุของปัญหาไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

ปัญหาไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุทั้งปัจจัยภายในและภายนอกระบบ ซึ่งมักมีความซับซ้อนในการรับมือและป้องกันการเกิดของปัญหา แม้

เป็นสาเหตุเล็ก ๆ แต่ก็ล้วนสามารถลุกลามจนกลายเป็นความล้มเหลวขนาดใหญ่ที่ส่งผลกระทบต่อทั้งระบบได้ (Chovančíková and Dvořák, 2019; Fabella and Szymczak, 2021) โดยสาเหตุที่มักนำไปสู่ปัญหาไฟดับจะมีอยู่หลายประการ ดังต่อไปนี้

3.5.1.1 ความล้มเหลวของระบบจ่ายไฟหลัก

ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนพึ่งพาโครงข่ายระบบจ่ายไฟจากแหล่งจ่ายไฟหลักภายนอก เมื่อเกิดปัญหาจะส่งผลกระทบต่อระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนทั้งหมดโดยตรง ซึ่งปกติแล้วมักเกิดจากหลายสาเหตุต่าง ๆ ได้แก่ ความผิดปกติในโครงข่ายระบบจ่ายไฟหลัก ความไม่สมดุลระหว่างอุปสงค์และอุปทานของการจ่ายไฟภายในโครงข่ายเดียวกัน เป็นต้น

3.5.1.2 ผลกระทบจากภัยธรรมชาติ

ภัยธรรมชาติที่รุนแรงจนยากต่อการควบคุมเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบเกิดการหยุดชะงัก โดยภัยธรรมชาติเหล่านี้จะมีอยู่หลายรูปแบบ เช่น พายุ น้ำท่วม แผ่นดินไหว ไฟป่า เป็นต้น

3.5.1.3 อุบัติเหตุที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างระบบจ่ายไฟ

อุบัติเหตุในที่นี้อาจเกิดจากมนุษย์เป็นผู้ก่อโดยไม่เจตนา ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบจ่ายไฟจนนำไปสู่ปัญหาไฟดับ เช่น อุบัติเหตุทางรถยนต์ อุบัติเหตุรถยนต์ชนเสาไฟฟ้า ความผิดพลาดของศูนย์ควบคุม เป็นต้น

3.5.1.4 สัตว์ที่ขึ้นเกาะหรือพาดบนสายส่ง

สัตว์จำพวกนก งู หรือกระรอกที่ปีนป่ายบนเสาไฟฟ้าหรือสายส่ง อาจนำไปสู่การเกิดไฟฟ้าลัดวงจรและความล้มเหลวในระบบจ่ายไฟ

3.5.1.5 สภาพแวดล้อมที่ทรุด

มลภาวะทางอากาศ ฝุ่นละออง คราบสกปรก และกรดน้ำแข็งที่สะสมบนลูกถ้วยฉนวน ทำให้เกิดการกระโดดของกระแสไฟฟ้าที่นำไปสู่การลัดวงจรและไฟดับได้ โดยเฉพาะในพื้นที่อุตสาหกรรมหรือเขตเมืองที่มีมลพิษสูง

3.5.1.6 หน่วยงานที่บริการไฟฟ้าทำการตัดไฟในระบบจ่ายไฟ

การดับไฟตามแผนโดยแจ้งล่วงหน้าเพื่อซ่อมบำรุงหรือปรับปรุงระบบเป็นสาเหตุที่ทำให้หน่วยโหลดต่าง ๆ ไม่มีพลังงานไฟฟ้า แม้จะทำให้เกิดความไม่สะดวกหรือขาดความต่อเนื่องในการใช้งาน แต่เป็นสิ่งจำเป็นเพื่อความปลอดภัยและเสถียรภาพของระบบจ่ายไฟระยะยาว

3.5.2 ผลกระทบของปัญหาไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

สำหรับการขับเคลื่อนระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้าอย่างเต็มรูปแบบ เมื่อเกิดไฟดับขึ้นในระบบขณะที่ขบวนรถไฟฟ้าให้บริการรับส่งผู้โดยสารอยู่ จะส่งผลกระทบต่อ การดำเนินการและผู้ใช้บริการระบบไม่มากนักน้อย โดยปัญหาที่มักพบเห็นได้บ่อยครั้งขณะที่เกิดไฟดับในระบบมีอยู่หลายประเด็น (Yuana, Gua, Liua, Zhanga, and Lv, 2012; Xu et al., 2018) ดังต่อไปนี้

3.5.2.1 การหยุดชะงักในการให้บริการระบบ

ขบวนรถไฟฟ้าหยุดชะงักบนเส้นทางให้บริการเนื่องจากไม่มีกำลังไฟฟ้ามาช่วยในการขับเคลื่อนระบบทำงานต่อไปได้ ซึ่งทำให้เกิดการล่าช้าหรืออาจจะต้องยกเลิกการให้บริการขนส่งในช่วงเวลานั้น แสดงดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 การหยุดชะงักในการให้บริการระบบ

(ที่มาภาพ: <https://highlight.kapook.com/view/134389/> [เข้าถึงเมื่อ 21 พฤษภาคม 2568])



รูปที่ 3.28 ผู้โดยสารตกค้างบนขบวนรถไฟฟ้าหรือสถานีผู้โดยสาร

(ที่มาภาพ: <https://www.sanook.com/news/7513446/> [เข้าถึงเมื่อ 21 พฤษภาคม 2568])

3.5.2.2 ผู้โดยสารตกค้างบนขบวนรถไฟหรือสถานีผู้โดยสาร

การหยุดทำงานอย่างกะทันหันของระบบอาจทำให้ผู้โดยสารจำนวนมากถูกขังอยู่บนขบวนรถไฟหรือตกค้างตามสถานีต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.28 โดยเฉพาะผู้โดยสารที่มีโรคประจำตัวอาจได้รับผลกระทบขณะติดค้าง นอกจากนี้ หากรถไฟหยุดอยู่ในอุโมงค์ใต้ดินหรือบนทางยกระดับ ก็อาจทำให้ผู้โดยสารเกิดความตื่นตระหนก ขาดอากาศหายใจ และได้รับผลกระทบร้ายแรงอื่น ๆ

3.5.2.3 ผลกระทบต่อหน้าที่การงานของผู้โดยสาร

ผู้โดยสารที่ติดอยู่บนขบวนรถไฟอาจต้องสูญเสียโอกาสในการดำเนินภารกิจสำคัญต่าง ๆ นานเท่ากับระยะเวลาที่ระบบหยุดทำงานหรือจนกว่าจะได้รับการช่วยเหลือ

3.5.2.4 ผลกระทบต่อสุขภาพจิตของผู้โดยสาร

ระหว่างที่ระบบหยุดทำงานอาจทำให้ผู้โดยสารเกิดความเครียดสะสมหรือความวิตกกังวลได้

3.5.2.5 ระบบรถไฟขนส่งมวลชนสูญเสียความเชื่อมั่น

การหยุดทำงานอย่างกะทันหันของการขนส่งไม่ว่าจะในระยะเวลาที่สั้นหรือยาว มักนำไปสู่การลดทอนความเชื่อมั่นที่มีต่อระบบของผู้ใช้บริการเป็นจำนวนมาก และอาจส่งผลกระทบยาวต่อการพัฒนาและการเติบโตของระบบในอนาคต

3.5.2.6 ความเสียหายต่ออุปกรณ์

การจ่ายไฟที่ไม่สม่ำเสมอและการฟิ้นคืนของระบบจ่ายไฟอย่างกะทันหันอาจทำให้อุปกรณ์บางชิ้นส่วนในระบบได้รับความเสียหาย

3.5.2.7 ผลกระทบทางเศรษฐกิจและสังคม

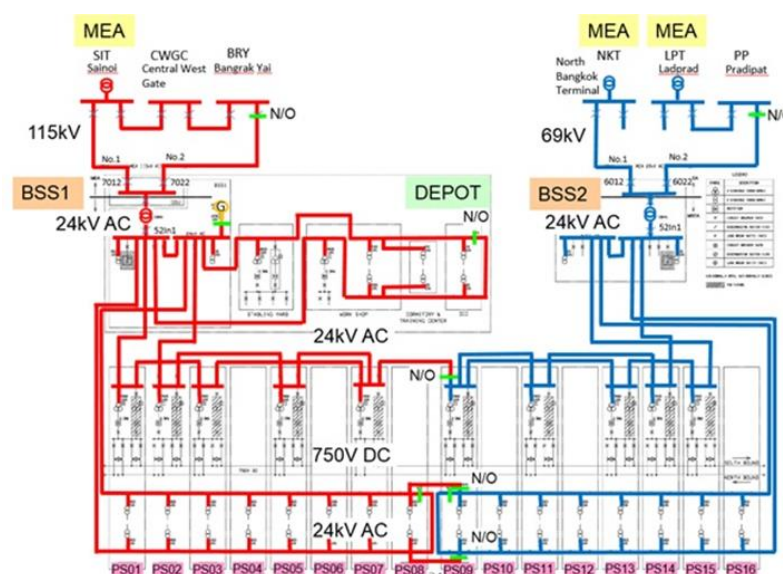
เกิดการชะลอตัวทางเศรษฐกิจในบริเวณที่การขนส่งมวลชนให้บริการอยู่ เนื่องจากการคมนาคมเกิดการติดขัดไม่สามารถดำเนินการต่อได้ในช่วงที่การขนส่งหยุดทำงาน

3.5.3 มาตรการในการรับมือปัญหาไฟดับในระบบรถไฟขนส่งมวลชน

จากปัญหาไฟดับที่เกิดขึ้นกับการขนส่งมวลชนในหลายทศวรรษที่ผ่านมา หลายองค์กรที่เกี่ยวข้องได้เล็งเห็นถึงผลกระทบของปัญหาต่อการให้บริการระบบ ความปลอดภัยของผู้โดยสาร และความเชื่อมั่นของสาธารณชน จึงได้มีการเร่งหาทางแก้ไขและป้องกันปัญหาอย่างจริงจัง ปัจจุบันจึงมีมาตรการป้องกันปัญหาไฟฟ้ขัดข้องในการขนส่งประเภทนี้อยู่หลายแนวทาง ดังนี้

3.5.3.1 การจ่ายไฟแบบระบบคู่ขนาน

การจ่ายไฟแบบระบบคู่ขนาน (Dual Power Supply) ถือเป็นพื้นฐานการออกแบบระบบจ่ายไฟที่มีความทนทานต่อความล้มเหลว ซึ่งจะมีการรับพลังงานไฟฟ้าจากสถานีจ่ายไฟหลักสองแหล่งที่ตั้งอยู่คนละเขตเข้าสู่วงแหวนไฟฟ้า (Ring Networks) เดียวกัน เพื่อให้มีการสับเปลี่ยนแปลงรับพลังงานไฟฟ้าจากสถานีจ่ายไฟหลักหนึ่งไปเป็นอีกสถานีจ่ายไฟหนึ่งกรณีที่เกิดความผิดปกติขึ้น ทำให้สามารถช่วยลดความเสี่ยงจากไฟดับในการขนส่งมวลชนได้มากกว่า 70% โดยปัจจุบันมีเส้นทางการขนส่งที่ใช้มาตรการนี้เพียง 3 สาย ได้แก่ สายสีม่วง สายสีเขียว และสายสีชมพูเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 3.29 (กรมการขนส่งทางราง, 2563)



รูปที่ 3.29 การจ่ายไฟแบบระบบคู่ขนาน

(ที่มาภาพ: <https://www.drt.go.th/library/ระบบการจ่ายไฟฟ้าสำหรับ-2> [เข้าถึงเมื่อ 21 พฤษภาคม 2568])

3.5.3.2 ระบบสำรองไฟฟ้าและการจัดการพลังงานไฟฟ้าฉุกเฉิน

ระบบสำรองไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพเป็นอีกหนึ่งองค์ประกอบที่สำคัญในการรับมือกับเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดยเครื่องสำรองกำลังไฟฟ้าต่อเนื่อง (Uninterruptible Power Supply: UPS) ที่ออกแบบอย่างเหมาะสมสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบสำคัญได้อย่างต่อเนื่องในระหว่างที่เกิดไฟฟ้าขัดข้อง เช่น ระบบอาณัติสัญญาณ ระบบควบคุมการเดินรถ ระบบสื่อสารฉุกเฉิน เป็นต้น นอกจากนี้ในปัจจุบันยังมีการนำเทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage Systems) สมัยใหม่อย่างแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเข้ามาช่วยเพิ่ม

ประสิทธิภาพของระบบสำรองไฟฟ้า ลดพื้นที่ติดตั้ง และลดต้นทุนการบำรุงรักษาในระยะยาวอีกด้วย (ABB Switzerland Ltd., 2021)

3.5.3.3 การบำรุงรักษาเชิงป้องกันและการตรวจสอบสภาพอุปกรณ์

การบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่มีประสิทธิภาพช่วยลดความเสี่ยงจากความล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อาจก่อให้เกิดปัญหาไฟดับได้ ซึ่งปกติในการให้บริการการขนส่งมวลชนจะต้องมีการตรวจสอบอุปกรณ์ตามกำหนดเวลา การทดสอบประสิทธิภาพของระบบป้องกัน และการเปลี่ยนชิ้นส่วนที่เสื่อมสภาพก่อนที่จะเกิดความล้มเหลว เป็นองค์ประกอบสำคัญของแผนบำรุงรักษาที่มีประสิทธิภาพ (Lin et al., 2020)

3.5.3.4 การป้องกันผลกระทบจากสภาพแวดล้อมและการรบกวนภายนอก

ปัจจัยภายนอกเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดปัญหาไฟดับในการขนส่งประเภทนี้ ซึ่งเกิดได้จากการรบกวนของสัตว์หรือภัยธรรมชาติเป็นหลัก เช่น สัตว์ฟันแทะกัดสาย การพาดบนสายส่งของสัตว์เลื้อยคลาน ไฟผ่า น้ำท่วม เป็นต้น ดังนั้น มาตรการป้องกันที่พบเห็นได้บ่อยจึงทำการปิดผนึกช่องว่างในตู้อุปกรณ์อย่างมิดชิด ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน การออกแบบระบบสายส่งที่เหมาะสม การเสริมความแข็งแรงของโครงสร้าง และการออกแบบระบบระบายน้ำที่มีประสิทธิภาพ (Andrusca, Adam, Dragomir, and Lunca, 2021)

3.5.3.5 การฝึกอบรมด้านความปลอดภัยเพื่อพัฒนาบุคลากร

การรับมือกับปัญหาไฟฟ้าขัดข้องที่อาจเกิดขึ้นในการขนส่งมวลชน ต้องอาศัยความพร้อมด้านระบบและบุคลากรที่มีความรู้ความสามารถที่เหมาะสมเป็นกุญแจสำคัญ การฝึกอบรมด้านความปลอดภัยทางไฟฟ้า การบำรุงรักษาอุปกรณ์ และการตอบสนองต่อเหตุฉุกเฉินช่วยให้พนักงานสามารถปฏิบัติงานได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพเมื่อเกิดเหตุการณ์จริงขึ้น การเตรียมความพร้อมเหล่านี้ควรครอบคลุมทั้งการซ้อมบนโต๊ะ การซ้อมเสมือนจริง และการซ้อมเต็มรูปแบบที่มีการอพยพผู้โดยสารและการใช้อุปกรณ์ฉุกเฉินจริง (Bai and Chen, 2024)

3.5.3.6 เทคโนโลยีสำหรับระบบเฝ้าระวังและการจัดการเหตุการณ์ไฟดับ

ระบบเฝ้าระวังและการจัดการเหตุการณ์ที่มีประสิทธิภาพช่วยให้สามารถตรวจจับและตอบสนองต่อความผิดปกติได้อย่างรวดเร็ว โดยระบบที่ทันสมัยสามารถแจ้งเตือนเมื่อตรวจพบความผิดปกติ จัดการเหตุการณ์ตามข้อมูลในคู่มือ และให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาแก่เจ้าหน้าที่ที่ปฏิบัติงานได้อย่างรวดเร็วและถูกต้องที่สุด รวมถึงช่วยลดผลกระทบต่อการให้บริการเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน (Andrusca, Adam, Dragomir, and Lunca, 2021)

3.5.3.7 กรณีศึกษาการเกิดไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทย

จากการสืบค้นสถิติข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปัญหาไฟดับที่เกิดขึ้นในการขนส่งมวลชนในประเทศไทยในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา (ตั้งแต่ปี 2564-ปัจจุบัน) สามารถสรุปเป็นตารางยอดสถิติการเกิดปัญหาไฟดับของการขนส่งมวลชนในแต่ละปี และยอดสถิติการเกิดปัญหาไฟดับของการขนส่งมวลชนรายสายของรถไฟฟ้า (กรมการขนส่งทางราง, 2568; คมชัดลึกออนไลน์, 2568) ดังนี้

ตารางที่ 3.4 ยอดสถิติการเกิดปัญหาไฟดับของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในแต่ละปี

ปี (พ.ศ.)	จำนวนครั้ง	เหตุการณ์สำคัญ
2564	9	- ระบบจ่ายไฟขัดข้อง - อุปกรณ์ของรางจ่ายไฟขัดข้อง - อื่น ๆ
2565	3	- ระบบจ่ายไฟขัดข้อง - อุปกรณ์ของรางจ่ายไฟขัดข้อง
2566	6	- ระบบจ่ายไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวง - ระบบจ่ายไฟขัดข้อง
2567	3	- ระบบจ่ายไฟขัดข้อง
2568	1	- อุปกรณ์ของรางจ่ายไฟขัดข้อง

ตารางที่ 3.5 ยอดสถิติการเกิดปัญหาไฟดับของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนรายสายของรถไฟฟ้า

ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	จำนวนครั้ง (ครั้ง/ปี พ.ศ.)				
	2564	2565	2566	2567	2568
รถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม (สายสีเขียวอ่อน)	0	0	0	0	0
รถไฟฟ้าบีทีเอส สายสุขุมวิท (สายสีเขียวเข้ม)	0	0	0	2	0
รถไฟฟ้าหมอชิต สายเฉลิมรัชมงคล (สายสีน้ำเงิน)	0	0	1	0	0
รถไฟฟ้าหมอชิต สายฉลองรัชธรรม (สายสีม่วง)	0	1	0	0	0
รถไฟฟ้าสายสีทอง	9	1	2	0	0
รถไฟฟ้าหมอชิต (สายสีเหลือง)	0	1	1	1	0
รถไฟฟ้าหมอชิต (สายสีชมพู)	0	0	2	0	1

ผลการศึกษาข้อมูลสถิติการเกิดปัญหาไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนประเทศทั้งแบบรายปีและรายสายของรถไฟฟ้า แม้ข้อมูลนี้อาจไม่ครอบคลุมเหตุการณ์ทั้งหมดเนื่องจากหน่วยงานมิได้เปิดเผยข้อมูลทั้งหมดต่อสาธารณะก็ตาม เผยให้เห็นว่าแม้จะมีการพัฒนาและนำมามาตรการป้องกันไฟดับมาใช้ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสายต่าง ๆ แต่สถานการณ์การหยุดการทำงานของระบบจากปัญหาไฟดับก็ยังคงเกิดขึ้นในลักษณะที่คล้ายคลึงกับในอดีต ซึ่งบ่งชี้ถึงความซับซ้อนของปัญหาที่อาจมีสาเหตุจากปัจจัยอื่นนอกเหนือจากมาตรการที่ได้ดำเนินการไปแล้ว

3.6 ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

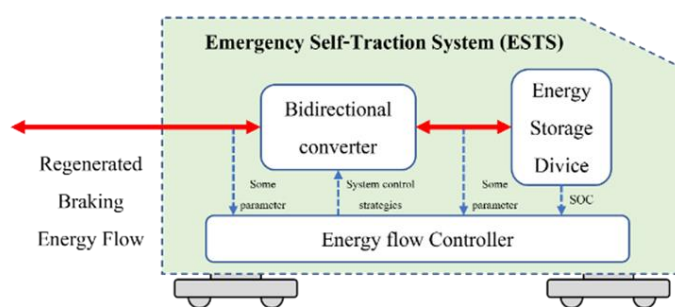
จากเหตุการณ์ไฟดับที่ทำให้การทำงานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนต้องหยุดชะงักลงและไม่สามารถให้บริการรับส่งผู้โดยสารต่อไปได้นั้น มีปัจจัยสิ่งเร้าทั้งภายในและภายนอกหลายส่วนที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของสถานีไฟฟ้าโดยตรง เช่น ภัยธรรมชาติและอุบัติเหตุ เหตุขัดข้องทางด้านเทคนิคของผลิตไฟฟ้า การส่งจ่ายไฟที่มากเกินไป ระบบของผู้ใช้ไฟฟ้าเกิดชำรุดหรือลัดวงจร สภาพแวดล้อมในขณะนั้น เป็นต้น โดยปัจจัยเหล่านี้มักเกิดขึ้นแบบเหตุสุดวิสัยที่ไม่สามารถทราบได้เลยว่าจะเกิดขึ้นเมื่อไหร่และนานแค่ไหน จึงยากแก่การคาดการณ์และป้องกันไม่ให้เกิดขึ้นได้แบบร้อยเปอร์เซ็นต์ ถึงแม้ในปัจจุบันจะมีวิธีการหรือมาตรการที่ถูกคิดค้นขึ้นมาสำหรับป้องกันการเกิดไฟดับในระบบต่าง ๆ ที่ใช้ไฟฟ้าแล้วก็ตาม ดังนั้นในระบบทั่วไปจะมีการติดตั้งอุปกรณ์สำรองไฟฟ้า (Uninterruptible Power Supply: UPS) ที่ช่วยในการจ่ายไฟให้กับระบบกรณีที่เกิดไฟดับนั่นเอง ซึ่งในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเองก็นำระบบที่มีลักษณะการทำงานที่คล้ายกันมาติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าเช่นกัน เรียกว่า ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน (Emergency self-traction system: ESTS) เพื่อนำส่งผู้ให้บริการไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดอย่างปลอดภัยในกรณีที่เกิดเหตุการณ์ไฟดับระหว่างการให้บริการของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดยระบบจะทำงานเป็นอิสระจากระบบจ่ายไฟหลักผ่านการใช้พลังงานไฟฟ้าสำรองจากอุปกรณ์กักเก็บพลังงานภายในขบวนรถไฟฟ้า เพื่อขับเคลื่อนรถไฟฟ้าด้วยความเร็วจำกัดไปยังจุดหมายปลายทางที่ปลอดภัย

ในยุคที่วิทยาการของระบบกักเก็บพลังงาน (Energy storage systems: ESS) และการเรียกคืนพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับที่ได้จากการเบรก (Regenerative braking) มีความก้าวหน้าถึงขั้นสามารถนำมาติดตั้งใช้งานจริงบนระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (Chalkhure, Jijankar, Dhore, Sanganwar, and Parihar, 2017) ส่งผลให้ ESTS เป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาต่อยอดสำหรับนำไปใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองให้กับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในกรณีที่เกิดเหตุการณ์ไฟดับขึ้น โดยพื้นฐาน

การทำงานและโครงสร้างของระบบนี้จะยังคงความเป็นระบบกักเก็บพลังงานไว้ตามเทคโนโลยีที่เลือกใช้ภายในโครงสร้าง ดังนั้น การทำงานทั่วไปของ ESTS จะสามารถปรับปรุงเสถียรภาพการใช้พลังงานไฟฟ้า ลดการใช้ไฟด้วยการเรียกคืนพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับจากการเบรก และยกระดับความน่าเชื่อถือของระบบได้เช่นเดียวกัน (Alfieri, Iannuzzi, Mottola, Pagano, and Roscia, 2018)

3.6.1 องค์ประกอบระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

จากการประยุกต์ใช้ ESTS ในเชิงการศึกษาวิจัยและการนำไปติดตั้งใช้งานจริงบนระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน พบว่าระบบนี้จะต้องอาศัยองค์ประกอบหลักในการดำเนินงานอยู่ทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน (Energy storage device) วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้า (Power electronic converters) และส่วนควบคุมระบบ (Controller) แสดงดังรูปที่ 3.30 (Wang, Ge, and Li, 2014) ซึ่งทั้งสามส่วนนี้จะทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานจากแหล่งกำเนิดภายนอก เช่น ไฟฟ้าเคมี กล ความร้อน แม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น ให้อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าและส่งไปจัดเก็บไว้ที่อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน ในขณะที่มีการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ และตรวจสอบทิศทางการทำงานของระบบให้มีรูปแบบสอดคล้องกับความต้องการ เพื่อรอคำสั่งเรียกใช้ไฟฟ้าจากระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในยามที่เกิดสถานการณ์ไฟดับหรือกรณีอื่น ๆ ที่ต้องการใช้งานระบบในลักษณะเดียวกันกับการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานทั่วไป (Yuana, Gua, Liua, Zhanga, and Lv, 2012; Mohammadi Pirouz and Hajizadeh, 2020; Khemkladmuk and Kulworawanichpong, 2021) โดยองค์ประกอบของ ESTS มีหน้าที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.30 องค์ประกอบระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

3.6.1.1 อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน

อุปกรณ์กักเก็บพลังงานถือเป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญมากที่สุดส่วนหนึ่งในการทำงานของ ESTS โดยอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่นำมาใช้งานต้องมีคุณสมบัติหลักอยู่ทั้งหมด

2 ประการที่เกื้อหนุนการขับเคลื่อนระบบ ได้แก่ การกักเก็บพลังงานได้มาก (High Energy Density) เพื่อให้ระบบสามารถขับเคลื่อนด้วยพลังงานสำรองได้ระยะทางไกล และการจ่ายพลังงานที่รวดเร็ว (High Power Density) เพื่อให้ระบบสามารถเร่งความเร็วในระยะเวลาอันสั้น นอกจากนี้ก็จะเป็นคุณสมบัติอื่น ๆ รองลงมาที่ผู้ใช้งานล้วนอยากได้ เช่น การชาร์จได้เร็ว (Fast Charging) อายุการใช้งานที่ยาวนาน (Long Lifetime) ราคาต้นทุนและค่าซ่อมบำรุงที่ต่ำ (Low Price and Low Maintenance) ประสิทธิภาพในการทำงานที่สูง (High Efficiency) เป็นต้น ซึ่งหากกล่าวถึงอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่ตอบโจทย์กับคุณสมบัติข้างต้นได้เป็นอย่างดี แบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดคือตัวเลือกที่มักถูกหยิบยกนำมาใช้งานจริงใน ESTS นอกจากนี้ในปัจจุบันยังมีการพัฒนาเทคโนโลยีอุปกรณ์กักเก็บพลังงานแบบผสมที่ติดตั้งแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดไว้เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่ชุดเดียวกัน เพื่ออาศัยจุดเด่นของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานแต่ละอุปกรณ์ในการปรับปรุงการทำงานของระบบให้ดียิ่งขึ้น (Nagaura, Oishi, Shimada, and Kaneko, 2017) อย่างไรก็ตามในการเพิ่มความสามารถของระบบในลักษณะนี้ต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง-ซ่อมบำรุงรักษา ความซับซ้อนในการสั่งใช้งานระบบ น้ำหนักระบบที่เพิ่มขึ้น ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ เป็นต้น การเลือกใช้งานอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่จะนำมาติดตั้งใน ESTS จึงต้องคำนึงถึงความเหมาะสมและคุณสมบัติที่สอดคล้องกับการทำงานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่นำมาติดตั้ง

ดังที่ทราบกันดีว่าแบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเก่าแก่ที่ใช้หลักปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีแบบย้อนเป็นกลไกให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนกลับระหว่างแอโนด (Anode) และแคโทด (Cathode) ที่อยู่ภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) จนเกิดเป็นพลังงานไฟฟ้าขึ้น สำหรับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานรูปแบบนี้ถือว่าเป็นระบบที่มีการใช้งานมาอย่างยาวนานและเป็นที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยในปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีแบตเตอรี่อยู่หลายรูปแบบ ซึ่งในแต่ละรูปแบบจะมีคุณสมบัติที่เหมือนหรือแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอัตราส่วนและองค์ประกอบของสารเคมีที่นำมาใช้ผลิตแบตเตอรี่ (Miao, Hynan, Jouanne, and Yokochi, 2019) ดังนั้นเมื่อจำแนกแบตเตอรี่ที่นิยมถูกนำมาใช้งานในเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่จะประกอบด้วย 4 ประเภท ได้แก่

(1) แบตเตอรี่ตะกั่วกรด (Lead-Acid) เป็นเทคโนโลยีที่เก่าแก่ที่สุดในบรรดาแบตเตอรี่ทุกประเภท ซึ่งอาศัยการจุ่มสารตะกั่วบริสุทธิ์ (Pb) ที่เป็นขั้วแอโนด (Anode) และขั้วแคโทด (Cathode) ที่เกิดจากการผสมสารตะกั่วบริสุทธิ์ (Pb) กับสารตะกั่วเปอร์ออกไซด์ (PbO₂) ลงไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ที่ทำจากกรดซัลฟิวริก โดยแบตเตอรี่ชนิดนี้มักถูก

นำมาใช้งานสตาร์ทรถยนต์สันดาปเสียส่วนใหญ่ เนื่องจากเป็นแบตเตอรี่ที่มีความจุสูงที่ทำให้กระแสไหลได้มาก อีกทั้งยังเป็นแบตเตอรี่ที่มีต้นทุนต่ำและผลิตได้ง่ายอีกด้วย

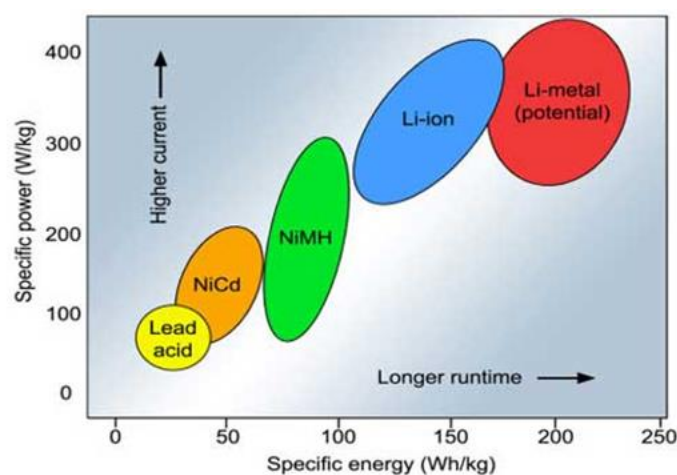
(2) แบตเตอรี่นิกเกิล (Nickel-Based) จะมีการใช้นิกเกิล (Ni) เป็นขั้วแคโทดและขั้วแอโนดจะใช้วัสดุที่แตกต่างกันตามคุณสมบัติที่ผู้ใช้งานต้องการจุ่มลงไป สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ทำจากโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้อยู่ 3 ประเภท ได้แก่ นิกเกิล-แคดเมียม (Ni-Cd) นิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์ (Ni-MH) และนิกเกิล-สังกะสี (Ni-Zn) ในงานขนาดเล็ก ๆ ไปจนถึงขนาดใหญ่อย่างแบตเตอรี่สำรองไฟ (Stationary battery) ที่ใช้ได้หลายเมกะวัตต์

(3) แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium ion) เป็นเทคโนโลยีแบตเตอรี่ขั้นสูงที่ใช้ลิเทียมไอออนเป็นองค์ประกอบสำคัญ โดยจะมีการใช้คาร์บอนหรือแกรไฟต์ (Graphite) เป็นขั้วแอโนด และใช้วัสดุที่แตกต่างกันตามคุณสมบัติที่ต้องการทำขั้วแคโทด ซึ่งมีด้วยกันหลายชนิด ได้แก่ ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ (LCO) ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ (LMO) ลิเทียมนิกเกิลโคบอลต์ อลูมิเนียมออกไซด์ (NCA) ลิเทียมนิกเกิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ (NMC) ลิเทียมเหล็กฟอสเฟต (LFP) ลิเทียมไททาเนต (LTO) เป็นต้น ปัจจุบันแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนถูกนำมาใช้งานในระบบยานยนต์ไฟฟ้า ระบบรถไฟฟ้ามหานคร และระบบอื่น ๆ มากขึ้น เนื่องจากมีคุณสมบัติในการจุพลังงานและจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่สูงเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ชนิดอื่นที่ขนาดใกล้เคียงกัน จึงทำให้มีการพัฒนาประสิทธิภาพและนำแบตเตอรี่ชนิดนี้ไปติดตั้งแบบบนรถ (On-board installation) หรือติดตั้งแบบอยู่กับที่ (Stationary installation) ในระบบต่าง ๆ รวมไปถึงการใช้งานใน ESTS เช่นกัน

(4) แบตเตอรี่โซเดียมซัลเฟอร์ (Sodium sulphur) ขั้นตอนการคายประจุของแบตเตอรี่ประเภทนี้จะเริ่มต้นเมื่อสารอิเล็กโทรไลต์ในรูปแบบของแข็ง (beta alumina) ยอมให้อิออนจากโซเดียม (Na) ไหลผ่านไปรวมกับซัลเฟอร์ (S) จนเกิดปฏิกิริยากลายเป็นโซเดียมพอลิซัลไฟด์ (Na_2S_4) ในขณะเดียวกันเองอิเล็กตรอนจะไหลผ่านวงจรภายนอกทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้า 2V สำหรับการอัดประจุจะสามารถทำได้โดยการสร้างปฏิกิริยาย้อนกลับภายในแบตเตอรี่นั่นเอง แม้แบตเตอรี่ประเภทนี้มีความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้า อัตราการคายประจุ และประสิทธิภาพที่สูง แต่มีอุณหภูมิระหว่างการทำงานที่สูงมาก จึงทำให้การใช้งานแบตเตอรี่ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ระบายอากาศสำหรับลดอุณหภูมิระหว่างการทำงานให้น้อยลงด้วย

นอกจากเทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่กล่าวมาข้างต้น ในปัจจุบันยังมีการคิดค้นและพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติเทียบเท่าหรือดีกว่าแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ ที่มีการใช้งาน

เช่น แบตเตอรี่ลิเทียมเมทัล (Li-Metal) แบตเตอรี่โซลิดสเตต (Solid-state Battery) แบตเตอรี่ซิงค์-แอร์ (Zinc-Air Battery) แบตเตอรี่ลิเทียม-แอร์ (Li-Air Battery) แบตเตอรี่รีดอกซ์โฟลว์ (Redox Flow Battery) เป็นต้น อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ยุคใหม่นี้ยังอยู่ในสถานะที่กำลังพัฒนาปรับปรุงและยังไม่สามารถการันตีได้ว่าเป็นแบตเตอรี่ชนิดที่เหมาะสมกับการใช้งานใน ESTS จึงไม่ได้มีการหยิบยกมากล่าวถึงในการศึกษาในส่วนนี้ สำหรับแบตเตอรี่ที่ยกตัวอย่างมาในข้อ (1) - (4) สามารถสรุปการเปรียบเทียบความสามารถในการทำงานของแบตเตอรี่แต่ละประเภท แสดงดังรูปที่ 3.31 และตารางที่ 3.6 (Ghaviha, Campillo, Bohlin, and Dahlquist, 2016)



รูปที่ 3.31 ความสามารถในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่แต่ละประเภท

(ที่มาภาพ: <https://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=43172.php> [เข้าถึงเมื่อ 22 พฤษภาคม 2568])

ตารางที่ 3.6 การเปรียบเทียบความสามารถในการทำงานของแบตเตอรี่แต่ละประเภท

No.	PARAMETER	BATTERY ENERGY STORAGE DEVICES TECNOLOGY			
		Lead-acid	Nickel-Based	Lithium ion	Sodium Sulphur
1	Specific Energy (Wh/kg)	20-50	60-80	75-200	120-240
2	Specific Power (W/kg)	25-300	200-250	100-350	120-230
3	Efficiency (%)	70-90	65-70	90-100	70-90
4	Discharge Time (Second)	1-3,600	1-3,600	1-3,600	1-3,600

ตารางที่ 3.6 การเปรียบเทียบความสามารถในการทำงานของแบตเตอรี่แต่ละประเภท (ต่อ)

No.	PARAMETER	BATTERY ENERGY STORAGE DEVICES TECNOLOGY			
		Lead-acid	Nickel- Based	Lithium ion	Sodium Sulphur
5	Cycle Life (Cycle)	200-2,000	1,500- 3,000	1,000- 1,0000	2,000- 3,000
6	Self-discharge (%/day/Wh)	0.5-3	1-2	1-3	20
7	Environmental Impact	High	Moderate	Low	Low

จากตารางที่ 3.6 เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกักเก็บพลังของแบตเตอรี่ทั้ง 4 ประเภทข้างต้น พบว่าแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนมีความสามารถและประสิทธิภาพในการทำงานอยู่ในเกณฑ์ที่ดีกว่าแบตเตอรี่ประเภทอื่น ทั้งในส่วนของค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (specific energy) ที่บ่งบอกถึงความสามารถในการจุพลังงานไฟฟ้าภายในแบตเตอรี่ กำลังไฟฟ้าจำเพาะ (specific power) ที่บ่งบอกถึงความสามารถในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลด และรอบอายุการใช้งาน ทำให้มีการประยุกต์ใช้งานแบตเตอรี่ประเภทนี้ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมากมาย

3.6.1.2 วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทาง

วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทาง (The bidirectional DC-DC power converters) เป็นส่วนหนึ่งของ ESTS ที่ทำหน้าที่ในการแปลงไฟฟ้าที่ได้รับมาจากสายจ่ายเหนือศีรษะ รางที่สาม หรือการเรียกคืนพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับให้อยู่ในรูปแบบไฟฟ้ากระแสตรงที่เหมาะสมสำหรับเก็บเป็นพลังงานสำรองในอุปกรณ์กักเก็บพลังงานและแปลงไฟฟ้าที่ ESTS เรียกใช้จากอุปกรณ์กักเก็บพลังงานให้มีรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับจ่ายโหลดต่าง ๆ ภายในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ซึ่งปกติแล้วการทำงานของเครือข่ายวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานต้องมีการเชื่อมต่อกับวงจรเชื่อมโยงทางดีซี (DC-Link) เพื่อกรองแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าให้มีความเรียบขึ้น (Chalkhure, Jijankar, Dhore, Sanganwar, and Parihar, 2017; Khodaparastan, Mohamed, and Brandauer, 2019; Rechard and Gouttefangeas, 2017) อย่างไรก็ตามปัจจัยที่บ่งบอกว่าวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดี จะขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีอุปกรณ์กักเก็บพลังงานและเงื่อนไขการใช้งานที่สำคัญบางประการที่ต้องพิจารณา เช่น ความเร็วในการตอบสนอง กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ระบบรองรับ ช่วงอุณหภูมิที่ระบบสามารถคงสถานะการ

ทำงานไว้ได้ ขนาดของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่เล็กและน้ำหนักที่เบา (โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีติดตั้งอุปกรณ์กักเก็บพลังงานบนรถ) และความสามารถในการแปลงแรงดันไฟฟ้าให้อยู่ในระดับที่ต้องการ ได้แก่ 600 750 1,500 หรือ 3,000 โวลต์ ก่อนเข้าวงจรเชื่อมโยงทางดีซี (Abad, 2017)

วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทางถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ชนิดแยกกราวด์ (isolated type) และชนิดไม่แยกกราวด์ (non-isolated type) โดยวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าชนิดแยกกราวด์นั้นจะมีข้อเสียและข้อจำกัดอยู่หลายอย่าง เนื่องจากต้องอาศัยหม้อแปลงกัลวานิก (galvanic transformer) ที่มีอัตราส่วนการพันขดลวดสูง (large turn ratio) ในการแยกกราวด์ระหว่างด้านแรงดันไฟฟ้าต่ำและสูง ซึ่งทำให้วงจรที่ใช้มีขนาดใหญ่และหนักจากการติดตั้งหม้อแปลงในระบบ นอกจากนี้ในการทำงานของวงจรจะต้องมีการแปลงผันแรงดันไฟฟ้าจากกระแสตรงไปเป็นกระแสสลับ แล้วแปลงไฟฟ้ากระแสสลับกลับมาเป็นกระแสตรงหลังจากที่ทำการปรับขนาดแรงดันไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงอีกครั้ง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดความเหนี่ยวนำรั่วไหล (leakage inductance) และตัวเก็บประจุแอบแฝง (parasitic capacitance) ที่ส่งผลให้สมรรถนะและประสิทธิภาพของระบบลดลงจากการกระชาก (spike) ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในวงจรส่วนขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงอีกด้วย (Kale, 2019) ในทางกลับกันวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าแบบไม่แยกกราวด์ปกติจะใช้ในการแปลงแรงดันไฟฟ้าที่มีอัตราการถ่ายโอนขนาดเล็ก (ปกติจะน้อยกว่า 4 ต่อ 1) และไม่ต้องมีหม้อแปลงช่วยในการทำงาน จึงทำให้ประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าชนิดนี้สูงกว่าชนิดแยกกราวด์ (Abad, 2017) โดยวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทางที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีหลายรูปแบบดังต่อไปนี้

(1) วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าบัค-บูสต์สองทิศทางชนิดไม่แยกกราวด์ (non-isolated buck-boost bi-directional DC-DC converter) หรือที่เรียกกันว่างจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าแบบฮาล์ฟบริดจ์ สามารถทำหน้าที่เป็นวงจรบัคสำหรับลดระดับแรงดันไฟฟ้าที่รับมาจากระบบไฟฟ้าภายนอกให้มีขนาดเหมาะสมก่อนเก็บไว้ในอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน และจะทำหน้าที่เป็นวงจรบูสต์สำหรับเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าที่อุปกรณ์กักเก็บพลังงานส่งออกไปยังโหลดต่าง ๆ โดยใช้สวิตช์สารกึ่งตัวนำกำลังประเภททรานซิสเตอร์สองขั้วฉนวน (Insulate Gate Bipolar Junction Transistor : IGBTs) เพียง 2 ตัว ขดลวดเหนี่ยวนำ และวงจรเชื่อมโยงทางดีซีในการทำงาน วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้านี้มีข้อดีอยู่หลายประการ ได้แก่ อุปกรณ์กักเก็บพลังงานได้รับผลกระทบจากคลื่นความถี่ที่เกิดจากการสับสวิตช์น้อยมาก การควบคุมวงจรทำได้ง่าย มีขนาดเล็กและเบากว่าวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าทั่วไป และมีประสิทธิภาพที่สูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ แต่มีข้อเสียในส่วนที่อุปกรณ์

กักเก็บพลังงานกับวงจรเชื่อมโยงทางดีซีในระบบจะไม่สามารถแยกออกจากกันได้ จึงส่งผลให้เกิดการสูญเสียสวิตช์และไม่สามารถเพิ่มค่าของแรงดันไฟฟ้าระหว่างโหมดยุสท์ได้ตามต้องการ (Abad, 2017; Gorji, Sahebi, Ektesabi, and Rad, 2019)

(2) วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าบัค-บูสต์สองทิศทางแบบหลายเฟส (Multiphase Buck-Boost Bi-directional DC-DC Converter) เป็นวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าที่สามารถเพิ่มระดับพลังงานไฟฟ้าและกำจัดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น โดยที่ไม่จำเป็นต้องเพิ่มอัตราการสับสวิตช์ให้ถี่ขึ้นหรือปรับเปลี่ยนค่าตัวเหนี่ยวนำมาเชื่อมต่อในวงจร แต่อาศัยการนำวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าบัค-บูสต์สองทิศทางชนิดไม่แยกกราวด์มาต่อแบบขนานกันหลายวงจรและควบคุมลำดับการสับสวิตช์ในวงจรด้วยการปรับมุมเฟสที่ $360^\circ/N$ โดยที่ N หมายถึงจำนวนคู่สวิตช์ที่ทำงานร่วมกัน ในการใช้งานวงจรในลักษณะนี้ช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับการทำงานของ ESTS เนื่องจากมีสวิตช์สารกึ่งตัวนำหลายชุดเชื่อมต่อกันอยู่ในวงจร จึงส่งผลให้แม้มีสวิตช์ใดชุดหนึ่งเกิดขัดข้องก็ยังมียุสท์ในส่วนอื่น ๆ ทำงานทดแทนต่อไปได้ อย่างไรก็ตามจำนวนสวิตช์ในวงจรที่เพิ่มขึ้นทำให้ต้องใช้วิธีการควบคุมที่ซับซ้อนและราคาแพง เมื่อเทียบกับวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าบัค-บูสต์หนึ่งเฟสทั่วไป (Abad, 2017; García, Zumel, De Castro, and Cobos, 2006)

(3) วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าบัค-บูสต์สองทิศทางแบบต่อเรียง (Cascaded Buck-Boost Bi-directional DC-DC converter) เป็นการนำวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าบัค-บูสต์สองทิศทางชนิดไม่แยกกราวด์ 2 ชุดมาเชื่อมเข้าด้วยกัน เพื่อเพิ่มอัตราการขยายแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นและลดการกระเพื่อมของกระแสไฟฟ้าให้ต่ำลง โดยวงจรนี้ถูกนำไปใช้งานกับรถยนต์ไฟฟ้าในลักษณะที่เชื่อมต่อกับวงจรเข้ากับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานและวงจรเชื่อมโยงทางดีซี (Gorji, Sahebi, Ektesabi, and Rad, 2019)

(4) วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทางแบบบริดจ์คู่ขนาน (Dual Active Full-Bridge Bi-directional DC-DC Converter) เป็นวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทางชนิดแยกกราวด์ที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันระหว่างชุดสวิตช์สารกึ่งตัวนำแบบบริดจ์ 2 ชุด ซึ่งมีหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงเป็นส่วนเชื่อมระหว่างวงจรบริดจ์ทั้งสอง ส่วนประกอบอื่น ๆ ในวงจรก็จะมีตัวเก็บประจุที่เชื่อมต่อข้ามวงจรบริดจ์ทั้งสองฝั่งและตัวเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อกับด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงมีการทำงานแบบการแยกกัลวานิกจึงช่วยให้สามารถควบคุมค่าพลังงานไฟฟ้าที่จะถ่ายโอนระหว่างทั้งสองด้านของวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าเมื่อพลังงานไฟฟ้าไหลผ่านวงจรเชื่อมโยงทางดีซีในทิศทางที่เข้าหาอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน (โหมดยุสท์)

ประจุให้กับอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน) วงจรบริดจ์ที่เชื่อมต่อกับด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงจะทำหน้าที่เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แปลงไฟฟ้าในระบบจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ขณะที่วงจรบริดจ์ที่เชื่อมต่อกับด้านทุติยภูมิจะทำหน้าที่เป็นวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น ในทางกลับกันเมื่อพลังงานไฟฟ้าไหลในทิศออกจากอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน (โหมดการคายประจุอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน) วงจรบริดจ์ทั้งสองก็จะทำหน้าที่สลับกัน (Gorji, Sahebi, Ektesabi, and Rad, 2019; Kan, Wu, Tang, Zhang, and Zhang, 2016)

(5) วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทางแบบครึ่งบริดจ์คู่ขนาน (Dual Active Half-Bridge Bi-directional DC-DC Converter) เป็นวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าที่ดัดแปลงมาจากวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทางแบบบริดจ์คู่ขนาน โดยนำตัวเก็บประจุมาต่อแทนที่สวิตช์สารกึ่งตัวนำ 2 ตัวในบริดจ์ที่อยู่แต่ละฝั่งของแท็ปหม้อแปลง ซึ่งทำให้จำนวนสวิตช์สารกึ่งตัวนำที่ใช้ในส่วนบริดจ์ของวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าลดลงและมีลักษณะเป็นแบบครึ่งบริดจ์ อย่างไรก็ตาม วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าประเภทนี้มักถูกนำไปประยุกต์ใช้กับระบบที่ทำงานด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำ เนื่องจากการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าระหว่างสองด้านของแท็ปหม้อแปลงจะทำได้น้อยเมื่อเทียบกับวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทางแบบบริดจ์คู่ขนาน (Abad, 2017; Gorji, Sahebi, Ektesabi, and Rad, 2019; Park and Song, 2011)

3.6.1.3 ชุดควบคุมและจัดการระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ESTS มีองค์ประกอบทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทาง และชุดควบคุมการทำงานของระบบ ซึ่งแต่ละส่วนต่างมีความสำคัญอย่างมากสำหรับการควบคุมและการจัดการกับพลังงานไฟฟ้าของ ESTS ที่ถูกนำไปติดตั้งบนระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เนื่องจากลักษณะการทำงานของรถไฟฟ้าทุกระบบจะมีการเร่งความเร็วและการเบรกขบวนรถอยู่บ่อยครั้ง แม้สถานีจ่ายไฟภายในระบบจะทำงานปกติหรือเกิดสถานการณ์ไฟดับในระบบก็ตาม ซึ่งส่งผลให้เกิดการอัดประจุและคายประจุของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานในอัตราส่วนที่สูงมาก ดังนั้นการควบคุมและจัดการพลังงานไฟฟ้าของ ESTS จึงต้องเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของระบบ และปรับปรุงให้การทำงานของระบบมีความเหมาะสมกับระบบรถไฟฟ้าที่นำไปติดตั้งให้มากที่สุด และในขณะเดียวกันก็ต้องการคำนึงถึงความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือของระบบให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ด้วยเช่นกัน (González-Gil, Palacin, and Batty, 2013; Barrero, Tackoen, and Mierlo, 2008)

โดยทั่วไปการควบคุม ESTS สำหรับใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองให้ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในกรณีที่เกิดปัญหาสถานการณ์ไฟดับนั้น จะสามารถแบ่งหน้าที่ในการควบคุมระบบออกเป็น 2 ส่วน คือ การควบคุมการจัดการการไหลของพลังงานไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน รถไฟฟ้า และสถานีจ่ายไฟย่อย และการควบคุมวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทางที่ใช้จัดการการไหลของพลังงานไฟฟ้าทั้งขาเข้าและขาออกจากอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน ซึ่งในการควบคุมระบบทั้งสองส่วนนี้จะสามารถดำเนินการได้ด้วยการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานและวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทาง เพื่อให้แน่ใจว่าการควบคุมนี้จะสามารถจัดการ ESTS โดยรวมและพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ไหลในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Camara, Gualous, Gustin, Berthon, and Dakyo, 2010; Lin, Li, Zhao, and Yang, 2016) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

(1) การควบคุมอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน มีวัตถุประสงค์สำหรับการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน จะมุ่งเน้นไปที่การจัดการกับพลังงานไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน ไม่ว่าจะเป็น การควบคุมปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่จะนำไปจัดเก็บไว้ในอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน การควบคุมจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่อยู่ในอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน และยังช่วยป้องกันอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจากสถานการณ์ความผิดปกติต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นกับระบบ โดยการควบคุมสิ่งเหล่านี้ต้องคำนึงถึงข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน รูปแบบการทำงานของระบบที่นำไปติดตั้ง และเงื่อนไขอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งปกติแล้วทางผู้ผลิตอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่มีการใช้งานทั่วไปตามท้องตลาด จะให้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ในส่วนของคุณสมบัติเฉพาะ ภาพโครงสร้าง ลักษณะการทำงาน และข้อดีเท่านั้น อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ให้มาจะไม่ได้มีการลงรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการเชื่อมอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเข้ากับระบบต่าง ๆ ไม่ได้มีการอธิบายวิธีการหรือเทคนิคในการควบคุมที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นการใช้งานอุปกรณ์กักเก็บพลังงานจึงต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้ใช้งาน และการเลือกประเภทของวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทางที่เหมาะสม (Khodaparastan, Mohamed, and Brandauer, 2019; Battistelli, Fantauzzi, Iannuzzi, and Lauria, 2012)

(2) การควบคุมวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทาง โดยทั่วไปอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่นำมาใช้งาน ESTS ต้องมีการติดตั้งวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าสองทิศทางสำหรับเป็นตัวกลางในการควบคุมการไหลของพลังงานไฟฟ้าภายในระบบ ซึ่งปกติแล้วอุปกรณ์กักเก็บพลังงานส่วนใหญ่จะไม่สามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบภายนอกได้โดยตรง ด้วยเงื่อนไขการใช้ไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีแรงดันฝั่งอุปกรณ์กักเก็บพลังงานและฝั่งระบบส่วนอื่น ๆ ที่มีขนาดแตกต่างกัน (Abad, 2017) ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเป็นอีกหนึ่งระบบที่มีความผันผวนของการใช้

พลังงานไฟฟ้ามากที่สุด การเลือกใช้วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าแบบสองทิศทางจึงต้องสามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว และเป็นตัวกลางที่ดีในการแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานกับอุปกรณ์อื่น ๆ ให้มีขนาดที่สอดคล้องกัน โดยทั้งสองประเด็นนี้คือหัวใจหลักที่ต้องคำนึงในการควบคุมการทำงานของวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นการเลือกเทคนิคที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับระบบจึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการควบคุมวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าแบบสองทิศทาง เพื่อให้แน่ใจได้ว่าการทำงานของ ESTS นั้นมีประสิทธิภาพ ปลอดภัย และปราศจากการรบกวนที่อาจจะส่งผลให้เกิดความเสียหายในส่วนต่าง ๆ ได้ (Camara, Gualous, Gustin, Berthon, and Dakyo, 2010) โดยการเลือกเทคนิคควบคุมวงจรต้องพิจารณาในส่วนของชนิดวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้าแบบสองทิศทางที่เลือกใช้และรูปแบบการนำไปใช้ ซึ่งในปัจจุบันจะมีเทคนิคพื้นฐานที่มักใช้กับการควบคุมวงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้า เช่น ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (Proportional Integral Derivative Control หรือ PID Control) การควบคุมแบบสไลด์ดิ้ง (Sliding Mode Control) การควบคุมเชิงคาดการณ์แบบจำลอง (Model Predictive Control: MPC) การควบคุมแบบฟัซซีโลจิก (Fuzzy Logic Control: FLC) การควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network :ANN) การควบคุมแบบพลวัตวิวัฒนาการ (Dynamic evolution controller) การควบคุมแบบย้อน (Backstepping control) การควบคุมแบบขอบเขต (Boundary control) เป็นต้น (Gorji, Sahebi, Ektesabi, and Rad, 2019; Camara, Gualous, Gustin, Berthon, and Dakyo, 2010; Lin, Li, Zhao, and Yang, 2016; Rashid, 2018) ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป ดังนั้นการเลือกใช้เทคนิคควบคุม ESTS จึงขึ้นอยู่กับความถนัดของผู้ใช้งาน รูปแบบของระบบที่นำไปควบคุม และเงื่อนไขทางสภาพแวดล้อม ณ ขณะนั้น อย่างไรก็ตามการควบคุมระบบต่าง ๆ ในปัจจุบันมีการปรับมาใช้เป็นเทคนิคปัญญาประดิษฐ์มากขึ้น

3.6.2 ภาพรวมการทำงานของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน

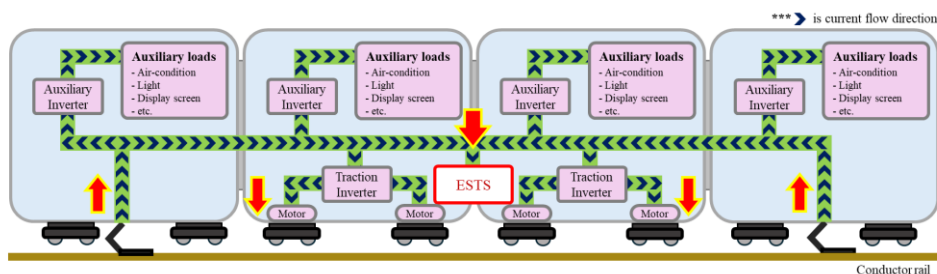
ESTS ถูกออกแบบให้สามารถรองรับการทำงานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนทั้งในกรณีที่ระบบจ่ายไฟในระบบมีการทำงานที่ปกติ และกรณีที่ระบบจ่ายไฟมีความผิดปกติจนเกิดสถานการณ์ไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนขึ้น ซึ่งในแต่ละสถานการณ์จะมีรูปแบบการทำงานของ ESTS ที่แตกต่างกัน (Nagaura, Oishi, Shimada, and Kaneko, 2017) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.6.2.1 การทำงานขณะสถานีจ่ายไฟทำงานปกติ

ระบบจะมีการจัดสรรพลังงานไฟฟ้าที่รับมาจากแหล่งจ่ายไฟหลักหรือการเรียกพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับจากการเบรกในการอัดประจุให้กับอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน เพื่อ

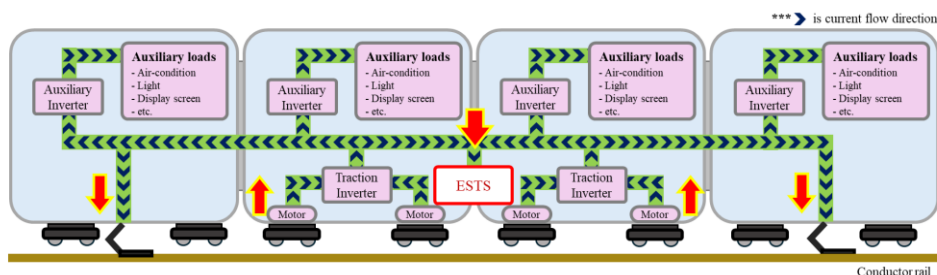
เตรียมพร้อมรับมือกับเหตุการณ์ฉุกเฉินที่อาจเกิดขึ้นหรืออาจใช้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าด้วยการจ่ายทดแทนพลังงานไฟฟ้าที่ต้องรับมาจากแหล่งจ่ายไฟหลักในช่วงที่ขบวนรถไฟฟ้าออกตัวจากสถานี โดยหลักการทำงานของ ESTS จะมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

(1) ESTS ทำการรับพลังงานไฟฟ้าผ่านทางสายจ่ายเหนือศีรษะหรือรางที่สามขณะที่ระบบจ่ายไฟหลักทำงานปกติ เพื่ออัดประจุให้กับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานภายในระบบตามขนาดความจุที่ถูกรออกแบบไว้ ซึ่งในบางระบบอาจมีการจำกัดการอัดประจุจากระบบจ่ายไฟหลักไว้บางส่วน ส่วนที่เหลืออาจรับพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับจากการเบรก แสดงดังรูปที่ 3.32

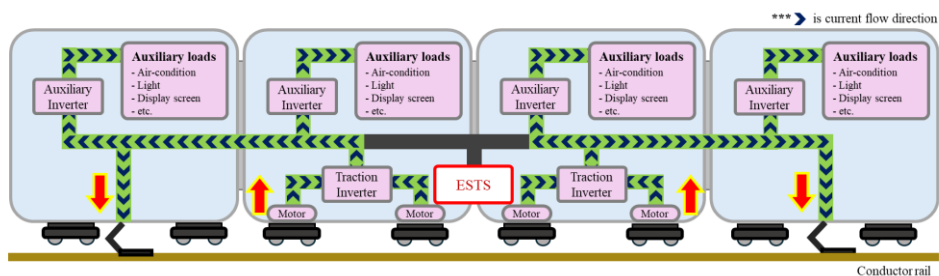


รูปที่ 3.32 การรับพลังงานไฟฟ้าจากระบบจ่ายไฟหลัก

(2) ESTS ทำการรับพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับจากการเบรกขณะที่ขบวนรถไฟฟ้าเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสาร เพื่ออัดประจุให้กับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานไว้ใช้ในกรณีที่เกิดเหตุการณ์ฉุกเฉินหรือจ่ายให้กับส่วนต่าง ๆ บนขบวนรถไฟฟ้าแทนการรับพลังงานไฟฟ้ามาจากสถานีจ่ายไฟหลัก แสดงดังรูปที่ 3.33 แต่หากอุปกรณ์กักเก็บพลังงานเต็มก็อาจมีการส่งพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินนี้ไปให้กับรถไฟฟ้าขบวนอื่น ๆ ผ่านสายจ่ายเหนือศีรษะหรือรางที่สาม แสดงดังรูปที่ 3.34

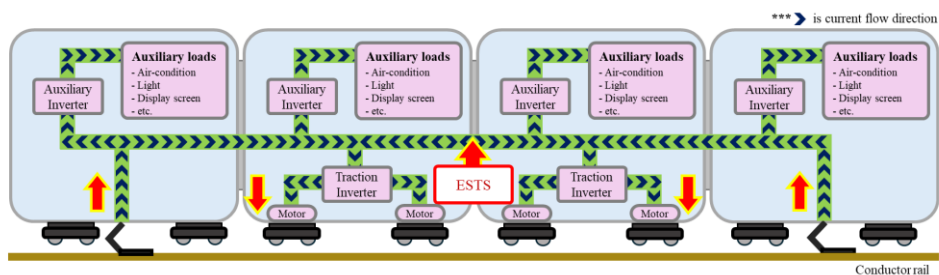


รูปที่ 3.33 การรับพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับจากการเบรก

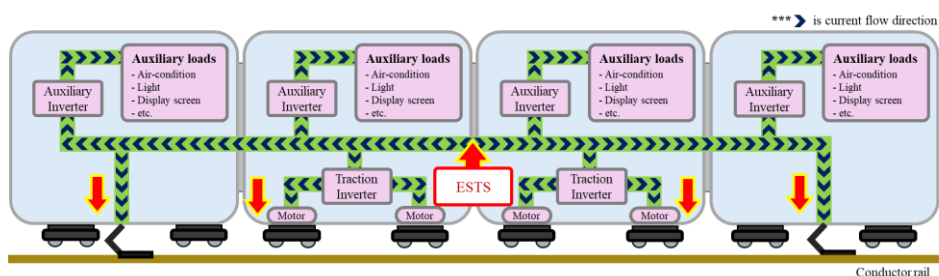


รูปที่ 3.34 การส่งพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินจากการเบรกให้กับรถไฟฟ้าขบวนอื่น ๆ

(3) ESTS ทำการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่อยู่ในอุปกรณ์กักเก็บพลังงานให้กับระบบขับเคลื่อนของขบวนรถไฟฟ้าพร้อมกับระบบจ่ายไฟหลัก แสดงดังรูปที่ 3.35 โดยบางระบบอาจมีการส่งพลังงานไฟฟ้าส่วนนี้ไปยังรถไฟฟ้าขบวนอื่น ๆ ผ่านสายจ่ายเหนือศีรษะหรือรางที่สาม เพื่อลดการรับพลังงานไฟฟ้าจากสถานีจ่ายไฟหลัก แสดงดังรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.35 การขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าด้วยพลังงานไฟฟ้าจากอุปกรณ์กักเก็บพลังงานและระบบจ่ายไฟหลัก

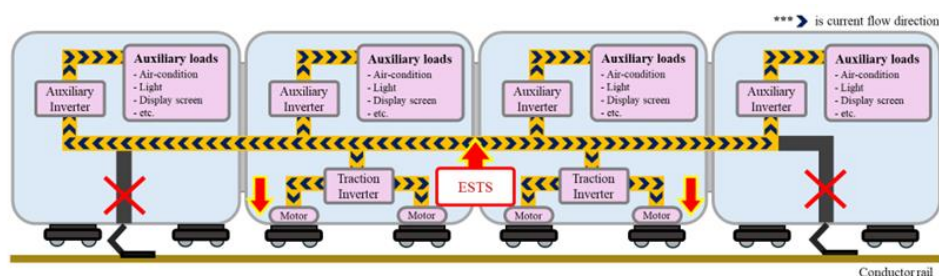


รูปที่ 3.36 การส่งพลังงานไฟฟ้าจากอุปกรณ์กักเก็บพลังงานให้กับส่วนอื่น ๆ ของระบบ

3.6.2.2 การทำงานขณะเกิดสถานการณ์ไฟดับ

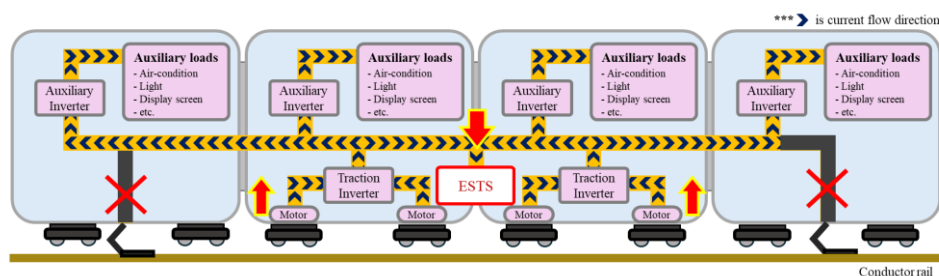
ระบบจะมีการดึงพลังงานไฟฟ้าที่ประจุไว้ในอุปกรณ์กักเก็บพลังงานมาใช้ขับเคลื่อนระบบ เพื่อให้ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสามารถดำเนินการให้บริการต่อไปได้ในขณะที่เกิดสถานการณ์ไฟดับขึ้น หลักการทำงานของ ESTS จะมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

(1) ESTS จะทำการดึงเอาพลังงานไฟฟ้าที่กักเก็บไว้มาใช้ขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าในกรณีที่ระบบสถานีจ่ายไฟเกิดขัดข้องและไม่สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านสายจ่ายเหนือศีรษะหรือรางที่สามได้ เพื่อให้ขบวนรถไฟฟ้าสามารถวิ่งอพยพผู้โดยสารไปยังสถานีผู้โดยสารที่ใกล้ที่สุดด้วยความเร็วต่ำ แสดงดังรูปที่ 3.37

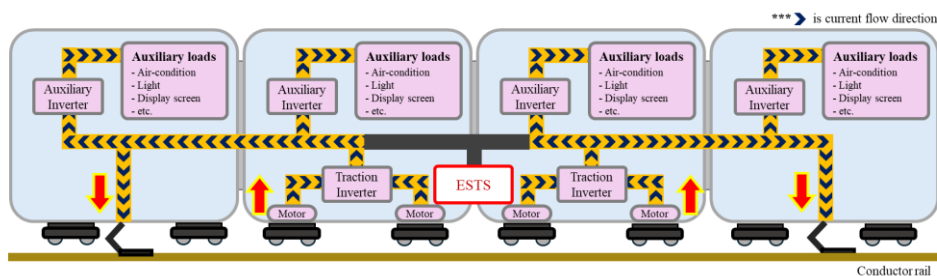


รูปที่ 3.37 การดึงพลังงานไฟฟ้าที่กักเก็บไว้มาใช้ขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าขณะระบบจ่ายไฟขัดข้อง

(2) ESTS จะทำการรับพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับจากการเบรกของขบวนรถไฟฟ้า เพื่อช่วยในการประหยัดพลังงานไฟฟ้าให้กับ ESTS ในอีกทางหนึ่ง แสดงดังรูปที่ 3.38 อย่างไรก็ตาม หากอุปกรณ์กักเก็บพลังงานภายในระบบเต็มก็อาจมีการจ่ายไปให้กับรถไฟฟ้าขบวนอื่นผ่านสายจ่ายเหนือศีรษะหรือรางที่สาม แสดงดังรูปที่ 3.39



รูปที่ 3.38 การรับพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับจากการเบรกในกรณีที่ระบบจ่ายไฟหลักขัดข้อง



รูปที่ 3.39 การส่งพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินจากการเบรกไปยังรถไฟฟ้าขบวนอื่น ๆ กรณีระบบจ่ายไฟหลักเกิดขัดข้อง

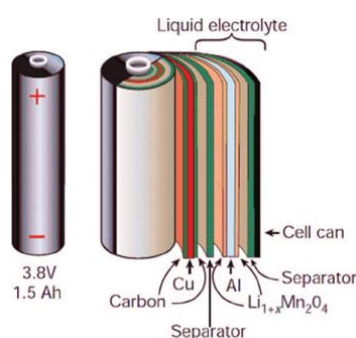
3.7 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-ion battery หรือ Li-ion battery) เป็นแบตเตอรี่ที่พัฒนาขึ้นจากสารประกอบลิเทียม ซึ่งเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา สามารถผลิตศักย์ไฟฟ้าได้สูง และมีความไวต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารประกอบต่าง ๆ ได้ดี เมื่อนำโลหะชนิดนี้มาประกอบเป็นแบตเตอรี่จึงทำให้ได้แบตเตอรี่ที่มีคุณสมบัติเก็บพลังงานไฟฟ้าได้สูงและสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว ในปัจจุบันจึงมีการนำแบตเตอรี่ประเภทนี้มาใช้งานต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เช่น เครื่องใช้ไฟฟ้า หุ่นยนต์ แบตเตอรี่สำรอง (Power Bank) เป็นต้น (Miao, Hynan, Jouanne, and Yokochi, 2019) เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟหลักหรือสำรองให้กับอุปกรณ์ที่หลากหลายประเภท โดยการใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนจะช่วยให้สามารถจำกัดขนาดของอุปกรณ์ที่เคยมีขนาดใหญ่ เทอะทะ ไม่สะดวกในการใช้งานนอกสถานที่กลับมีขนาดเล็กลงได้ นอกจากนี้ยังมีความสำคัญอย่างมากต่อการพัฒนาระบบขนาดใหญ่ที่ต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ เช่น ยานยนต์ไฟฟ้า ดาวเทียม ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เป็นต้น ได้อีกด้วย (Nagaura, Oishi, Shimada, and Kaneko, 2017)

3.7.1 องค์ประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

จากรูปที่ 3.40 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประกอบด้วยองค์ประกอบหลักจำนวน 5 ส่วน ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อกลไกการทำงาน สมรรถนะ และความปลอดภัยของเซลล์แบตเตอรี่ (Song, Lu, Ji, and Zhang, 2012) ได้แก่ ขั้วบวก ขั้วลบ อิเล็กโทรไลต์ แผ่นกั้นแยก และตัวสะสมกระแส โดยขั้วบวก (positive electrode) หรือขั้วแคโทด (cathode) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกักเก็บลิเทียมไอออนและมีผลต่อแรงดันไฟฟ้าและความจุของแบตเตอรี่ มักใช้สารประกอบจำพวกลิเทียมหรือเกลือของลิเทียม เช่น LiCoO_2 (LCO) LiMn_2O_4 (LMO) LiMnNiCoO_2 (NMC) LiFePO_4 (LFP) เป็นต้น ส่วน

ขั้วลบ (negative electrode) หรือแอโนด (anode) ทำหน้าที่รับและปล่อยลิเทียมไอออนในทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้สารประเภทคาร์บอนหรือแกรไฟต์เป็นหลัก เนื่องจากมีเสถียรภาพและเหมาะสมต่อการแทรกตัวของไอออน อิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการนำพาไอออนของ Li^+ แต่ไม่ยอมให้อิเล็กตรอนไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ขณะที่แผ่นกั้นแยก (separator) มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้ขั้วบวกและขั้วลบสัมผัสกันโดยตรง อันเป็นการลดความเสี่ยงของการลัดวงจรภายในเซลล์ ส่วนใหญ่นิยมใช้เป็นพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) หรือ พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) เป็นต้น สำหรับตัวสะสมกระแส (current collector) ทำหน้าที่ลำเลียงอิเล็กตรอนระหว่างวัสดุขั้วไฟฟ้ากับวงจรภายนอกอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ ส่วนมากตัวรับกระแสจะทำมาจากอลูมิเนียม (Al) และทองแดง (Cu) ดังนั้นองค์ประกอบทั้ง 5 ส่วนจึงต้องได้รับการออกแบบให้เหมาะสมและสอดคล้องกัน เพื่อให้แบตเตอรี่มีประสิทธิภาพสูง มีความปลอดภัย และรองรับการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในระยะยาว

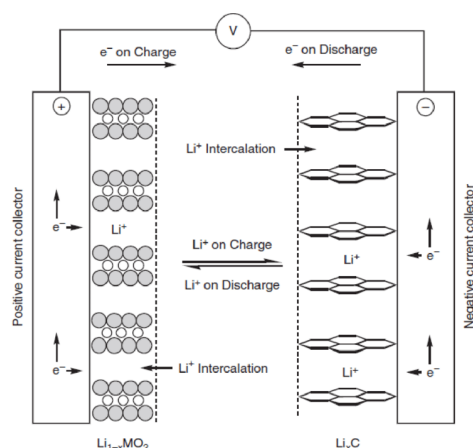


รูปที่ 3.40 ส่วนประกอบหลักของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

(ที่มาภาพ: Song, Lu, Ji, and Zhang, 2012)

3.7.2 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

ปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดไฟฟ้าในแบตเตอรี่ชนิดนี้เกิดจากการแพร่ของ Li^+ จากขั้วไฟฟ้าที่มีพลังงานศักย์ทางเคมีสูงไปยังขั้วไฟฟ้าที่มีพลังงานศักย์ต่ำกว่า แต่การแพร่ของสารนั้นจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อประจุรวมของสารที่แพร่ทั้งหมด (ไอออนบวก ไอออนลบ และอิเล็กตรอน) มีค่าเป็นกลาง เนื่องจากอิเล็กโทรไลต์ไม่สามารถเป็นสื่อนำอิเล็กตรอนได้ การแพร่ของ Li^+ จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีวงจรภายนอกหรือมีโลหะตัวนำมาเชื่อมต่อให้อิเล็กตรอนวิ่งผ่าน ก่อให้เกิดไฟฟ้าที่เราสามารถนำไปใช้ได้ หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Tran, DaCosta, Mevawalla, Panchal, and Fowler, 2020) แสดงดังรูปที่ 3.41

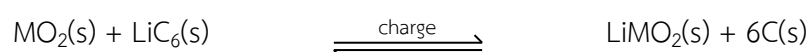


รูปที่ 3.41 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

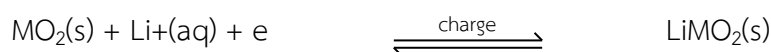
(ที่มาภาพ: Tran, DaCosta, Mevawalla, Panchal, and Fowler, 2020)

จากรูปที่ 3.41 เมื่อมีการอัดประจุไฟฟ้า (charge) ให้กับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้ งาน ไอออนจากลิเทียมจะเคลื่อนออกจากโครงสร้างฝั่งขั้วบวกไปยังแผ่นกั้นและทะลุเข้าสู่ขั้วลบจนเกิด เป็นสารประกอบของลิเทียมและคาร์บอน ซึ่งในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากขั้วบวกสู่ขั้วลบ ผ่านวงจรภายนอกด้วย สำหรับการคายประจุไฟฟ้า (discharge) ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจะ เกิดปฏิกิริยาในทิศทางที่ตรงข้ามกับการอัดประจุไฟฟ้า สามารถแสดงปฏิกิริยาทางเคมีได้ดังนี้

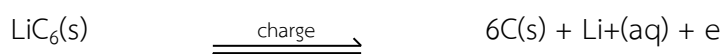
ปฏิกิริยารวมที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่:



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวก:



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบ:



3.7.3 ประเภทของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

แบตเตอรี่ชนิดนี้ถูกวางจำหน่ายออกสู่ตลาดเมื่อปี ค.ศ.1991 (Buchmann, 2017) และภายในระยะเวลาอันสั้นความต้องการของตลาดได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยทั่วไปจะแบ่งตาม

วัสดุที่ใช้ทำขั้วบวก ส่วนขั้วลบทำมาจากแกรไฟต์เป็นหลัก ทั้งนี้เนื่องจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแต่ละประเภทมีคุณสมบัติแตกต่างกัน จึงเหมาะสมต่อการใช้งานที่แตกต่างกันด้วย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.7.3.1 แบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium Cobalt Oxide: LiCoO_2 or LCO)

เป็นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประเภทที่ใช้โครงสร้างขั้วบวกคือโลหะลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ (LiCoO_2) และขั้วลบคือแกรไฟต์ ปกติแบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ 1 เซลล์จะให้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 3.7 โวลต์ สำหรับแบตเตอรี่ประเภทนี้แล้วจะมีค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะสูง ในขณะที่กำลังไฟฟ้าจำเพาะต่ำ กล่าวคือสามารถจ่ายไฟได้นานแต่จ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าสูงมากได้ไม่ดี ทำให้การใช้งานแบตเตอรี่ลิเทียมโคบอลต์ออกไซด์ไปอยู่ในส่วนของอุปกรณ์ขนาดเล็กที่ต้องการกำลังน้อย ๆ แต่ใช้งานได้นาน ๆ เช่นเดียวกับแบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟต

3.7.3.2 แบตเตอรี่ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ (Lithium Manganese Oxide: LiMn_2O_4 or LMO)

เป็นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประเภทที่ใช้โครงสร้างขั้วบวกคือลิเทียมแมงกานีสออกไซด์ (LiMn_2O_4) และขั้วลบคือแกรไฟต์ ซึ่งจากการรวมกันขององค์ประกอบทั้งสามธาตุที่ขั้วบวกของแบตเตอรี่นี้ ทำให้เกิดโครงสร้างแบบ 3 มิติที่มีส่วนช่วยในการไหลของไอออนให้ดีขึ้น มีความต้านทานภายในแบตเตอรี่ลดลงจึงช่วยให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลสู่ภายนอกมากขึ้น และมีค่าการทนต่อความร้อนได้มากขึ้น แต่มีสิ่งที่ต้องแลกมาคือการที่แบตเตอรี่จะเก็บพลังงานไฟฟ้าได้น้อยและอายุการใช้งานที่ไม่ได้ยาวนานนัก จากการค้นพบแบตเตอรี่ประเภทนี้เมื่อปี ค.ศ.1981 ถือเป็นความสำเร็จก้าวสำคัญในวงการแบตเตอรี่แบบชาร์จเร็ว (fast charge) และจ่ายกระแสไฟฟ้าสูง (high discharge current) เนื่องจากแบตเตอรี่ลิเทียมแมงกานีสออกไซด์สามารถที่จ่ายกระแสไฟฟ้าได้ถึง 20 - 30 แอมแปร์ โดยแบตเตอรี่ประเภทนี้มักถูกนำมาใช้ในระบบต่าง ๆ เช่น เครื่องมือทางการแพทย์ ระบบส่งกำลังในยานยนต์ไฟฟ้า รถไฟฟ้า เป็นต้น

3.7.3.3 แบตเตอรี่ลิเทียมนิเคิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์ (Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide: $\text{Li}(\text{Ni,Mn,Co})\text{O}_2$ or NMC)

จากการเพิ่มนิเคิล (Ni) ที่มีความจุพลังงานไฟฟ้าจำเพาะสูงเข้าไปในส่วนแคโทดของแบตเตอรี่ ทำให้แบตเตอรี่ประเภทนี้มีค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะสูงขึ้นตามไปด้วย และการเพิ่มแมงกานีสเข้าไปทำให้การทำงานของแบตเตอรี่มีความเสถียรยิ่งขึ้น ผลที่ได้คือเซลล์แบตเตอรี่ที่มีความเสถียรในการทำงานที่สูงในขณะที่มีความสามารถในการจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูงถึง 4 โวลต์ การ

ปรับเปลี่ยนส่วนผสมระหว่าง นิกเกิล แมงกานีส และโคบอลต์ ทำให้เกิดชนิดย่อยและคุณสมบัติที่แตกต่างกันและยังคงเป็นจุดขายของผู้ผลิตแต่ละราย เช่น NMC111 (ส่วนผสมเท่ากัน) NMC442 NMC622 NM811 เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันแบตเตอรี่ลิเทียมนิเคิลแมงกานีสโคบอลต์ออกไซด์กำลังเป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีคุณสมบัติในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่สูง มีเสถียรภาพการทำงานที่ดี และทนต่ออุณหภูมิได้ดีมาก

3.7.3.4 แบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟต (Lithium Ion Phosphate: LiFePO_4 or LFP)

เป็นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประเภทที่ใช้โครงสร้างขั้วบวกคือโลหะลิเทียมฟอสเฟต (LiFePO_4) และขั้วลบคือแกรไฟต์ ซึ่งปกติแบตเตอรี่ลิเทียมฟอสเฟต 1 เซลล์จะให้แรงดันไฟฟ้าประมาณ 3.2V หากต้องการให้แบตเตอรี่จ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ 12 โวลต์ ก็เพียงนำเซลล์แบตเตอรี่มาต่ออนุกรมกัน 4 เซลล์เท่านั้น จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้แบตเตอรี่ประเภทนี้ถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์ขนาดเล็ก เช่น โทรศัพท์มือถือ แท็บเล็ต แลปท็อป กล้องดิจิทัล เป็นต้น รวมถึงการนำไปใช้แทนแบตเตอรี่ตะกั่วกรดในระบบโซล่าเซลล์ของโฟลนอีกด้วย

3.7.3.5 แบตเตอรี่ลิเทียมนิเคิลโคบอลต์อลูมิเนียมออกไซด์ (Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide: $\text{Li}(\text{Ni},\text{Co},\text{Al})\text{O}_2$ or NCA)

แบตเตอรี่ประเภทนี้มีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกับ NMC คือเก็บไฟได้มากและจ่ายไฟได้นาน แต่มีข้อเสียคือด้านความปลอดภัยยังไม่ค่อยสูงมากนัก ต้องอาศัยระบบตรวจเช็คความปลอดภัยอยู่ตลอดเวลาเมื่อนำมาใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า จนถึงตอนนี้มี Tesla เพียงเจ้าเดียวที่นำแบตเตอรี่ลิเทียมนิเคิลโคบอลต์อลูมิเนียมออกไซด์มาใช้กับยานยนต์ไฟฟ้า รุ่น Model 3 และ Model S รุ่นแรก

3.7.3.6 แบตเตอรี่ลิเทียมไททาเนตออกไซด์ (Lithium Titanate Oxide: $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ or LTO)

เป็นแบตเตอรี่ที่เปลี่ยนแอโนดจากกราไฟต์เป็นลิเทียมไททาเนต ส่วนแคโทดมีทั้งเป็นแบบ LMO และ NMC ผลคือได้แบตเตอรี่ที่ทั้งชาร์จเร็ว อายุการใช้งานนาน และมีความปลอดภัยสูง แบตเตอรี่ลิเทียมไททาเนตถูกนำมาใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าภายในประเทศญี่ปุ่น เช่น รถยนต์ไฟฟ้า Mitsubishi i-MiEV Honda Fit EV Tosa Electric Concept Bus เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีใช้ในเครื่องมือทางการแพทย์ โฟลนโซล่าเซลล์ รถ EV สถานีชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า แหล่งจ่ายไฟสำรอง เครื่องมือสื่อสาร รวมไปถึงอุปกรณ์ทางอวกาศอีกด้วย

จากข้อมูลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแต่ละประเภทข้างต้น พบว่าแบตเตอรี่แต่ละประเภทมีคุณสมบัติเด่น ข้อจำกัด และรูปแบบการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ทั้งในด้านความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้า ความสามารถในการจ่ายกำลังไฟฟ้า ความปลอดภัย อายุการใช้งาน และต้นทุน ดังนั้น เมื่อสรุปข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแต่ละประเภท (Kang, 2020) สามารถแสดงรายละเอียดเปรียบเทียบได้ ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแต่ละประเภท

No.	Parameter	Lithium battery technology					
		LCO	LMO	NMC	LFP	NCA	LTO
1	Nominal cell voltage (V)	3.6	3.7-3.8	3.6-3.7	3.2-3.3	3.6	2.4
2	Full charge (V)	4.2	4.2	4.2+	3.65	4.2	2.85
3	Full discharge (V)	3.0	3.0	3.0	2.5	3.0	1.8
4	Specific Energy (Wh/kg)	150-200	100-150	150-220	90-120	200-260	70-80
6	Charge current rate (C)	0.7-1	0.7-1	0.7-1	1	0.7	1
7	Discharge current rate (C)	1	1	1.2	1	1	10
8	Cycle Life (Cycle)	500-1000	300-700	1000-2000	1000-2000	500	3000-7000
9	Thermal runaway (°C)	150 (higher when empty)	250 (higher when empty)	210 (higher when empty)	270 (safe at full charge)	150 (higher when empty)	One of safest Li-ion batteries
10	Efficiency (%)	90	90	85	95	-	95
11	Maintenance	Keep cool; store partially charged; prevent full charge cycles, use moderate charge, and discharge currents					
12	Security	Bad	Middle	Middle	Good	Bad	Good
13	Prices	Low	Low	Low	Low	Middle	High

ตารางที่ 3.7 ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแต่ละประเภท (ต่อ)

No.	Parameter	Lithium battery technology					
		LCO	LMO	NMC	LFP	NCA	LTO
14	Applications	Mobile phones, tablets, laptops, cameras	Power tools, medical devices, railway	E-bikes, medical devices, EVs, industrial	Stationary with high currents and endurance	Medical, industrial, EV (Tesla)	UPS, EV, solar street lighting, railway
15	Comments	High energy, limited power. Market share has stabilized	High power, less capacity; safer than Li-cobalt; mixed with NMC to improve perform	High capacity and high power. Market share is increasing Also NCM, CMN, MNC, MCN	Flat discharge voltage, high power low capacity, very safe; elevated self-discharge	Highest capacity with moderate power. Like Li-cobalt	Long life, fast charge, wide temperature range and safe. Low capacity, expensive

3.7.4 การวิเคราะห์ข้อมูลแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

เทคโนโลยีของแบตเตอรี่ที่พิจารณาเลือกใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ คือ แบตเตอรี่ทุติยภูมิประเภทลิเทียมไอออน ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ที่มีหลากหลายชนิดและหลากหลายรูปแบบ การพิจารณาเลือกใช้เซลล์แบตเตอรี่ที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญ เพื่อให้การเลือกใช้เซลล์แบตเตอรี่สำหรับชุดแบตเตอรี่นี้ตรงตามคุณสมบัติที่ออกแบบไว้และคุ้มค่าในการลงทุน การพิจารณาเลือกเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่มีอยู่ในท้องตลาดสำหรับวิเคราะห์ออกแบบและนำไปทดสอบในแบบจำลองต่อไป

3.7.4.1 หลักการเลือกเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

เซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสามารถสร้างพลังงานทางไฟฟ้าได้จากการออกซิเดชันและการรีดักชันของลิเทียม (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2558) ซึ่งเป็นเซลล์ที่สามารถคายประจุ (Discharge) และ ประจุพลังงาน (Charge) ได้หลายครั้ง คุณสมบัติต่าง ๆ ที่ใช้ในการพิจารณาเซลล์แบตเตอรี่ ได้แก่

1) แรงดันไฟฟ้าระบุ (Nominal voltage) หมายถึง ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้ว มีหน่วยคือ โวลต์ (V)

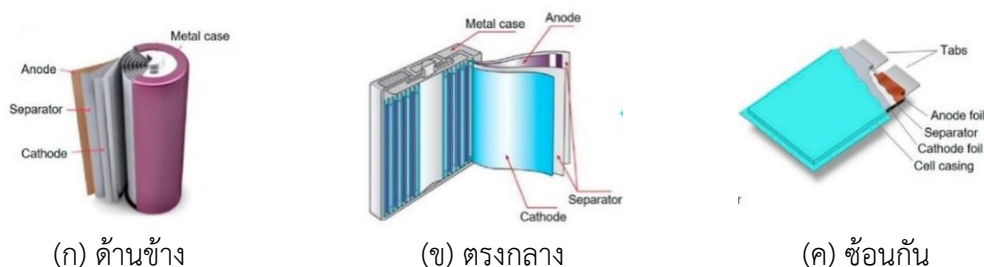
2) พลังงานจำเพาะ (Specific energy) หมายถึง ค่าพลังงานต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก มีหน่วย คือ วัตต์ชั่วโมง/กิโลกรัม (Wh/kg)

3) ความจุไฟฟ้าที่กำหนด (Capacity) หมายถึงความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้า ที่จำนวนชั่วโมงหนึ่งมีหน่วย คือ แอมแปร์-ชั่วโมง (Ah)

4) กระแสไฟฟ้าประจุและกระแสไฟฟ้ายประจุ ปกติค่ากระแสไฟฟ้าทั้งสองจะแสดงเป็นจำนวนเท่าของค่าความจุไฟฟ้า (C-rate) หรือในรูป C หารด้วยตัวเลข เช่น 0.2C หรือ C/5 C เป็นต้น (ตามมาตรฐาน มอก. จะแสดงในรูปแบบ C_n โดยที่ n หมายถึง ตัวเลข) ตัวเลขที่ห้อยท้ายหมายถึงจำนวนชั่วโมงในการประจุและคายประจุที่กระแสไฟฟ้าคงที่ เมื่อขนาดของกระแสไฟฟ้าคงที่เท่ากับอัตราส่วนระหว่างขนาดความจุไฟฟ้าและตัวเลข มีหน่วย คือ แอมแปร์ (A)

5) ความคงทนเป็นวัฏจักร หรืออายุการใช้งาน ซึ่งแสดงเป็นจำนวนรอบของวัฏจักรการประจุและคายประจุที่เซลล์แบตเตอรี่สามารถคงทนอยู่ได้ก่อนที่ความจุไฟฟ้าที่ใช้จะลดลง เหลือประมาณ 70-80 เปอร์เซ็นต์ของความจุไฟฟ้าที่กำหนด มีหน่วย คือ รอบ (cycle)

นอกจากนี้ รูปทรงของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติการทำงานของแบตเตอรี่ ซึ่งจะสามารถแบ่งออกได้ 2 รูปทรง ตามมาตรฐานมอก. 2218-2548 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2558; Mun and Won, 2021) ได้แก่ ทรงกระบอก (Cylindrical cell) และทรงเหลี่ยม (เช่น เซลล์แบบกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Prismatic cell) และเซลล์แบบถุงกาแฟ (Pouch-bag cell) แสดงดังรูปที่ 3.42



รูปที่ 3.42 รูปทรงของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

(ที่มาภาพ: Mun and Won, 2021)

จากการสำรวจในท้องตลาดเบื้องต้น พบว่าสำหรับเซลล์แบตเตอรี่แบบทรงกระบอกจะเป็นเซลล์ประเภท LCO NMC และ LFP เซลล์แบตเตอรี่แบบทรงลูกแก้วจะเป็นเซลล์ประเภท LFP และ LTO และแบตเตอรี่แบบทรงกล่องสี่เหลี่ยมมักจะเป็นเซลล์ประเภท LMO LFP และ LTO โดยปกติเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแต่ละรูปทรงมีข้อได้เปรียบและข้อด้อยแตกต่างกัน โดยเซลล์แบตเตอรี่แบบทรงกระบอกและเซลล์แบตเตอรี่แบบกล่องสี่เหลี่ยมจะมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ง่ายต่อการประกอบเป็นแพ็คแบตเตอรี่ ถึงแม้ลักษณะของเซลล์แบตเตอรี่แบบลูกแก้วจะทำให้มีความสามารถในการใช้พื้นที่สำหรับการประกอบแพ็คที่ดีกว่าเซลล์รูปแบบอื่น แต่เซลล์แบตเตอรี่รูปแบบนี้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำหรับยึดและประกอบเซลล์ภายในแพ็คด้วย ซึ่งมีความยุ่งยากในการออกแบบและประกอบมากกว่าเซลล์แบตเตอรี่รูปแบบอื่น สำหรับเซลล์แบตเตอรี่แบบกล่องสี่เหลี่ยมจะมีความซับซ้อนในการประกอบแพ็คค่อนข้างน้อย อย่างไรก็ตามแพ็คแบตเตอรี่จากเซลล์แบตเตอรี่แบบกล่องสี่เหลี่ยมรวมถึงเซลล์แบตเตอรี่แบบลูกแก้วจะต้องมีระบบควบคุมอุณหภูมิที่ซับซ้อนกว่าแพ็คแบตเตอรี่จากเซลล์แบตเตอรี่แบบทรงกระบอก (iGet Solar Cell, n.d.; A123systems, n.d.; Samsung SDI., n.d.)

3.7.4.2 ศึกษาข้อมูลของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนในท้องตลาด

จากข้อมูลในตารางที่ 3.7 ชี้ให้เห็นว่าเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ถูกนำมาติดตั้งใช้งานจริงในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนจะมี 2 ชนิด ได้แก่ LCO และ LTO โดยเฉพาะอย่างยิ่ง LTO ที่ได้กลายเป็นตัวเลือกหลักสำหรับใช้งานระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและระบบรถไฟฟ้ารางเบา เนื่องจากว่าเซลล์แบตเตอรี่ประเภทนี้มีความโดดเด่นด้านความปลอดภัยที่สูง (ไม่ติดไฟแม้เกิดการกระแทกหรือร้อนจัด) อายุการใช้งานยาวนาน (สามารถรองรับได้มากกว่า 15,000–25,000 รอบการชาร์จ-คายประจุ) ทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง (-30°C ถึง $+55^{\circ}\text{C}$) โดยไม่ต้องมีระบบควบคุมอุณหภูมิที่ซับซ้อน และมีอัตราการชาร์จ-คายประจุ (C-rate) ที่สูงมากพอที่จะสามารถรับพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับจากการเบรกได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังรองรับการชาร์จเร็ว เหมาะกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในเมืองที่มีการหยุด-ออกตัวของขบวนรถไฟฟ้าที่ถี่ในแต่ละสถานี เหตุผลเหล่านี้มีส่วนช่วยส่งเสริมให้มีการเลือกใช้ LTO ที่ตอบโจทย์ทั้งด้านประสิทธิภาพ ความปลอดภัย และต้นทุนตลอดอายุการใช้งานได้อย่างลงตัวสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (Meishner, Ünübayir, and Sauer, 2022; Fedele, Iannuzzi, Tricoli, and Del Pizzo, 2021)

เมื่อพิจารณาในเชิงการใช้งานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน จะพบว่าการเลือกใช้แบตเตอรี่ที่สามารถรับและจ่ายกำลังไฟฟ้าได้สูงในช่วงเวลาสั้นมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพ

ของระบบโดยรวม อีกทั้งความสามารถในการทนต่อรอบการใช้งานจำนวนมากยังช่วยลดความถี่ในการเปลี่ยนแบตเตอรี่และลดภาระค่าบำรุงรักษาในระยะยาว แม้ว่า LTO จะมีความหนาแน่นพลังงานต่ำกว่าแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนบางชนิด แต่ข้อจำกัดดังกล่าวมักไม่ใช่ประเด็นหลักสำหรับระบบรางที่ให้ความสำคัญกับความปลอดภัย ความเชื่อถือได้ และความพร้อมใช้งานของระบบมากกว่า ดังนั้นเพื่อประเมินขีดความสามารถเชิงพาณิชย์ของเทคโนโลยี LTO ในปัจจุบัน จึงได้ทำการสำรวจข้อมูลของเซลล์แบตเตอรี่ LTO จากบริษัทผู้ผลิตชั้นนำ 3 รุ่นที่มีจำหน่ายและนิยมนำมาใช้งานจริงในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (GS Yuasa Corporation, 2014; Microvast Holdings, Inc., 2025; Toshiba Corporation, n.d.) ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.8 ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ลิเทียมไททาเนตออกไซด์ยี่ห้อต่าง ๆ ในท้องตลาด

ที่	ข้อมูลจำเพาะ	แบตเตอรี่ ยี่ห้อ-รุ่น		
		GS Yuasa LIM30H	Microvast LpTO 34Ah	Toshiba SCiB™ 23Ah
1	รูปทรง	ทรงกล่อง สี่เหลี่ยม	ทรงถุงกาแฟ	ทรงกล่อง สี่เหลี่ยม
2	แรงดันไฟฟ้าระบุ (Nominal voltage: V)	3.6	2.3	2.3
3	ความจุไฟฟ้าที่กำหนด (Rated capacity: Ah)	30	34	23
4	ขนาด (กว้าง*ยาว*สูง) (Dimensions: mm)	170×47×133	173×45×140	116×22×107
5	น้ำหนัก (Weight: g)	2000	1000	506
6	ความหนาแน่นทางพลังงานไฟฟ้า (Volumetric energy density: Wh/L)	101.63	75	229
7	พลังงานไฟฟ้าจำเพาะ (Weight energy density: Wh/kg)	54	100	106

ตารางที่ 3.8 ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ลิเทียมไททานเนียมไดออกไซด์ยี่ห้อต่าง ๆ ในท้องตลาด (ต่อ)

ที่	ข้อมูลจำเพาะ	แบตเตอรี่ ยี่ห้อ-รุ่น		
		GS Yuasa LIM30H	Microvast LpTO 34Ah	Toshiba SCiB™ 23Ah
8	ราคา (Prices: USD)	≈ 180–220 USD/cell	≈ 150–180 USD/cell	≈ 100–130 USD/cell
9	การนำไปใช้งานจริง	JR East ACCUM Metro	Metro China, Tram China	Mireo Plus B, Shinkansen N700S, TWILIGHT EXPRESS MIZUKAZE, Tokyo Metro

ตารางที่ 3.9 การประเมินเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไททานเนียมไดออกไซด์ยี่ห้อต่าง ๆ ในท้องตลาด

ที่	เกณฑ์การประเมินเซลล์แบตเตอรี่เบื้องต้น	แบตเตอรี่ ยี่ห้อ-รุ่น		
		GS Yuasa LIM30H	Microvast LpTO 34Ah	Toshiba SCiB™ 23Ah
1	ความหนาแน่นทางพลังงานไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ	+	++	+++
2	กระแสไฟฟ้าอัดประจุและคาย ประจุสูงสุด	+++	+++	+++
3	กระแสไฟฟ้าคายประจุแบบชั่วขณะ	+++	+++	++
4	ความคงทนเป็นวัฏจักร	+++	++	+++
6	ราคา	++	+++	+++
7	ความง่ายในการจัดซื้อ	++	+++	++

หมายเหตุ +++ หมายถึง ดีมาก ++ หมายถึง พอใช้ + หมายถึง ไม่ดี

จากการศึกษาข้อมูล LTO ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์และมีการนำไปใช้งานจริงกับระบบรถไฟฟ้ามหานครในปัจจุบัน พบว่าแบตเตอรี่แต่ละรุ่นที่นำเสนอในตารางที่ 3.8 และ 3.9 ถือเป็นตัวเลือกที่ได้รับความนิยมสูงและมีสมรรถนะที่เหมาะสมกับการใช้งานในประเด็นนี้ โดย GS Yuasa LIM30H มีจุดเด่นในด้านอายุการใช้งานที่ยาวนานและรองรับกระแสไฟฟ้าคายประจุแบบชั่วขณะได้สูง จึงเหมาะสำหรับระบบรถไฟฟ้ามหานครที่มีการตั้งสถานีผู้โดยสารที่ถี่ เพื่อรองรับพลังงานไฟฟ้าคืนกลับจากการเบรกได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง ขณะที่ Microvast LpTO 34Ah มีความหนาแน่นพลังงานไฟฟ้าเชิงน้ำหนักสูงและรองรับกระแสไฟฟ้าคายประจุสูง จึงมีความเหมาะสมสำหรับระบบรถไฟฟ้ามหานครและระบบรถไฟรางเบาที่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่การติดตั้ง ส่วน Toshiba SCiB™ 23Ah แม้จะมีความจุไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าคายประจุชั่วขณะต่ำกว่าแบตเตอรี่อีก 2 รุ่นที่เหลือ แต่มีจุดเด่นด้านความปลอดภัยและมีความหนาแน่นพลังงานสูงสุด จึงเหมาะสำหรับระบบรถไฟฟ้ามหานครที่เน้นความปลอดภัยสูงเป็นพิเศษ เช่น สำหรับระบบรถไฟฟ้ามหานครในเมืองหรือรถไฟฟ้าความเร็วสูง โดยสรุปแล้วแบตเตอรี่ทั้งสามรุ่นมีความเหมาะสมแตกต่างกันตามลักษณะการใช้งานของระบบรถไฟฟ้ามหานครแต่ละประเภท โดยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาเลือกเซลล์แบตเตอรี่ Toshiba SCiB™ 23Ah สำหรับจำลองการทำงานของ ESTS ด้วยเหตุผลด้านคุณสมบัติทางเทคนิคที่มีความเหมาะสมต่อการทำงานของระบบรถไฟฟ้ามหานครได้ และข้อได้เปรียบอื่น ๆ ของแบตเตอรี่ยี่ห้ออื่น ซึ่งกล่าวอย่างละเอียดในบทที่ 4 และภาคผนวก ก

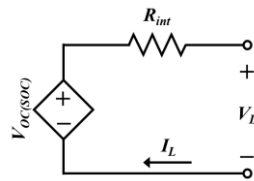
3.7.5 แบบจำลองแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

เทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่ใช้สำหรับพิจารณาแบบจำลอง ESTS ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำแบบจำลองแบตเตอรี่มาอ้างอิง เพื่อประเมินการทำงานของระบบในส่วนการจัดการพลังงานไฟฟ้าและผลที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานในรูปแบบแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน โดยทั่วไปแบบจำลองแบตเตอรี่จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ (1) แบบจำลองที่สร้างจากสมการไฟฟ้าเคมี (2) แบบจำลองจากสมการทางคณิตศาสตร์ และ (3) แบบจำลองวงจรไฟฟ้า ซึ่งจากแบบจำลองทั้งสามแบบพบว่าแบบจำลองจากสมการไฟฟ้าเคมีจะมีความแม่นยำที่สูงที่สุด แต่แลกมาด้วยความซับซ้อนและเวลาในการพัฒนาที่มากขึ้นมาด้วย ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการความเที่ยงตรงสูงหรืองานที่เฉพาะกรณี เช่น การออกแบบแบตเตอรี่ชนิดใหม่ เป็นต้น ในขณะที่แบบจำลองแบบที่ 2 และ 3 นั้นจะมีความซับซ้อนน้อยกว่า อย่างไรก็ตามในปัจจุบันมีการนำแบบจำลองเหล่านี้มาสร้างใหม่โดยอาศัยผลการทดสอบพฤติกรรมของเซลล์แบตเตอรี่ (Empirical model) เพื่อความง่ายและแม่นยำในการจำลองผลการการทำงานของแบตเตอรี่ยิ่งขึ้น ทำให้แบบจำลอง

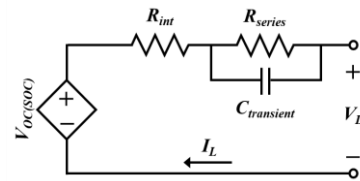
ดังกล่าวถูกนำมาใช้ทำนายพฤติกรรมของแบตเตอรี่ในระดับต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง แบบจำลองนี้ยังสามารถสร้างขึ้นจากการผสมผสานกันระหว่างแบบจำลองจากสมการทางคณิตศาสตร์และแบบจำลองวงจรไฟฟ้า โดยใช้อุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า เป็นต้น จากฐานข้อมูลของโปรแกรมจำลองผลสำเร็จรูปมาประกอบกับฟังก์ชันคณิตศาสตร์ ทำให้แบบจำลองชนิดนี้มีความซับซ้อนน้อยและใช้เวลาในการคำนวณที่น้อยลง นอกจากนี้ยังสามารถแก้ไขพารามิเตอร์หรือรูปแบบของวงจรได้ง่ายและยังสามารถตรวจสอบสถานะของตัวแปรได้จากรูปสัญญาณของวงจรไฟฟ้าได้ ดังนั้นแบบจำลองรูปแบบนี้จึงนิยมนำมาใช้ในกระบวนการศึกษาระบบรถไฟฟ้ามวลขนและระบบยานยนต์ไฟฟ้า การออกแบบระบบกักเก็บพลังงาน หรือระบบจัดการพลังงานของแบตเตอรี่ (Battery Management System: BMS) ข้อจำกัดประการหนึ่งของแบบจำลองที่สร้างขึ้นจากกลุ่มข้อมูลที่ได้จากการทดสอบคือผลจำลองจะมีความคลาดเคลื่อนออกไปตามสถานะทำงานที่เปลี่ยนแปลงไปของระบบ และจะไม่สามารถนำไปใช้ทำนายพฤติกรรมของแบตเตอรี่ชนิดอื่นได้ ลักษณะของแบบจำลองแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ ที่มีพื้นฐานอยู่บนวงจรไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.43 โดยแบบจำลองแบตเตอรี่อย่างง่ายอาจสร้างจากแหล่งจ่ายไฟที่ต่ออนุกรมกับความต้านทานภายในหนึ่งตัวเท่านั้น ผลที่ได้จากการจำลองอาจจะมีความคลาดเคลื่อนสำหรับงานที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง แต่อาจเพียงพอสำหรับงานบางประเภท อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้วความเที่ยงตรงของแบบจำลองมักแลกมาด้วยความซับซ้อนของแบบจำลองที่ต้องสร้างขึ้น ซึ่งสามารถนำเสนอเปรียบเทียบการทำงานของแบบจำลองแต่ละแบบสำหรับศึกษาพฤติกรรมที่สำคัญของแบตเตอรี่ แสดงดังตารางที่ 3.10 และรูปที่ 3.44 - 3.46 (Okedu, 2022; เกษม อุทัยไขฟ้า และสุกนันท์ ต้นวรรณรักษ์, 2559)

ตารางที่ 3.10 การเปรียบเทียบการทำงานของแบบจำลองแต่ละแบบ

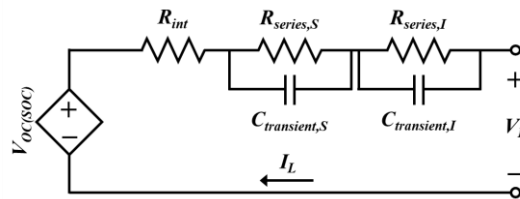
ลำดับ	แบบจำลองของแบตเตอรี่	การทำงาน
1	แบบจำลองอย่างง่าย	สามารถคำนวณได้เฉพาะแบตเตอรี่ที่มีค่าคงที่
2	แบบจำลองสมมูลเทวินิน	สามารถคำนวณสถานะการชาร์จ (State of charge: SOC)
3	แบบจำลองสมมูลเทวินินแบบปรับปรุง	สามารถคำนวณอุณหภูมิและค่าความจุของแบตเตอรี่ได้
4	แบบจำลองตามเวลา	สามารถคำนวณเวลาวัฏจักรของแบตเตอรี่ได้



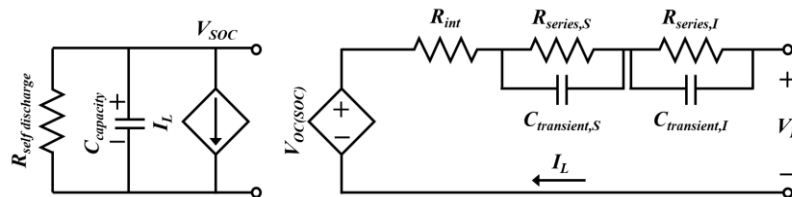
รูปที่ 3.43 แบบจำลองอย่างง่าย



รูปที่ 3.44 แบบจำลองสมมูลเทวินิน



รูปที่ 3.45 แบบจำลองสมมูลเทวินินแบบปรับปรุง



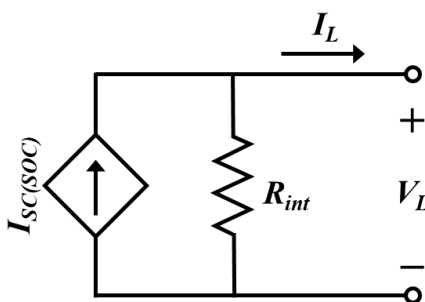
รูปที่ 3.46 แบบจำลองตามเวลา

จากวัตถุประสงค์หลักของการจำลอง ESTS คือ การศึกษาลักษณะการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของระบบที่มีความสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟไฟฟ้าในขณะเกิดเหตุฉุกเฉินขึ้นกับระบบรถไฟฟ้ามหานครส่วนนั้น โดยไม่ได้มุ่งเน้นการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ไฟฟ้าอย่างละเอียดของแบตเตอรี่ เช่น ผลกระทบด้านอุณหภูมิ เวลาวัฏจักรของแบตเตอรี่ เป็นต้น ดังนั้น เมื่อพิจารณารูปแบบแบบจำลองที่เหมาะสมดังปรากฏในรูปที่ 3.43 – 3.46 แล้ว พบว่า แบบจำลองที่เลือกใช้ในที่นี้จะเป็นแบบจำลองอย่างง่ายของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ซึ่งมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Open-circuit voltage: $V_{OC(SOC)}$) ต่อกันกับความต้านทานภายใน (internal resistance: R_{int}) และมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านโหลด (Load voltage: I_L) ภายในวงจรเป็นองค์ประกอบหลัก จากกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Voltage Law :KVL) จะทำให้ทราบค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ภายใต้โหลด (Terminal under load voltage: V_L) โดยทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า

จะกำหนดสถานะการทำงานเป็น 2 กรณี ได้แก่ แบตเตอรี่จะคายประจุเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางบวก ($I_L > 0$) และแบตเตอรี่จะอัดประจุเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางลบ ($I_L < 0$) แสดงดังสมการที่ 3.19

$$V_L = V_{OC} - I_L R_{int} \quad (3.19)$$

โดยในที่นี้จำได้ทำการแปลงแบบจำลองอย่างง่ายที่เดิมที่ถูกจัดให้อยู่ในรูปของวงจรสมมูลเทวินิน (Thevenin Equivalent Circuit) เป็นวงจรสมมูลนอร์ตัน (Norton Equivalent Circuit) เพื่อให้สอดคล้องกับการคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการฉีดกระแสที่จะใช้ในการวิเคราะห์ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ซึ่งเมื่อจัดรูปใหม่จะได้แบบจำลอง แสดงดังรูปที่ 3.47



รูปที่ 3.47 แบบจำลองอย่างง่ายแบบวงจรสมมูลนอร์ตัน

จากโครงสร้างของแบบจำลองในรูปของวงจรสมมูลนอร์ตันที่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าวงจรปิด (Short-circuit current: $I_{sc(soc)}$) ต่อขนานกับความต้านทานภายใน (internal resistance: R_{int}) เมื่อพิจารณาแบบจำลองจากกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Current Law :KCL) ร่วมกับความสัมพันธ์ของค่าทางไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ภายใต้โหลด กระแสไฟฟ้าไหลผ่านโหลด เป็นต้น สามารถสรุปความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในแบบจำลองจะสามารถแสดงดังสมการที่ 3.20

$$I_L = I_{sc(soc)} - \frac{V_L}{R_{int}} \quad (3.20)$$

องค์ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนและแบบจำลองอย่างง่ายในรูปแบบวงจรสมมูลแบบนอร์ตัน เป็นกุญแจสำคัญต่อการศึกษาพฤติกรรมของ ESTS ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดยเฉพาะในการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีการฉีดกระแส

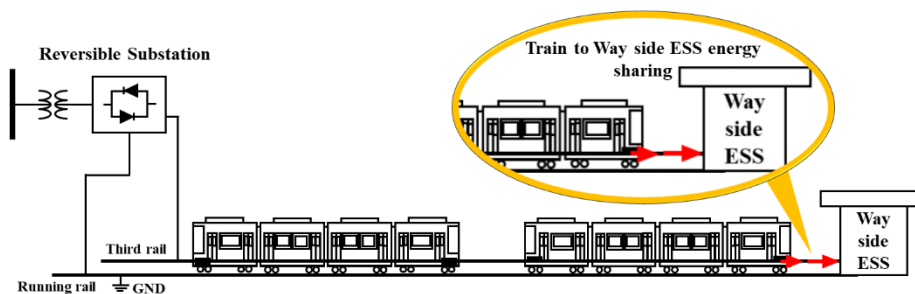
3.8 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน

การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า (Energy sharing) ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเป็นเทคโนโลยีสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยการนำพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานของระบบจ่ายคืนกลับสู่โครงข่ายระบบจ่ายไฟหลักหรือกักเก็บไว้ในระบบกักเก็บพลังงาน เพื่อดึงมาใช้ประโยชน์ในส่วนต่าง ๆ แทนการรับพลังงานไฟฟ้าจากโครงข่ายระบบจ่ายไฟหลัก (Kou, Fan, and Song, 2020) การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้านี้สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบจ่ายไฟหลักได้กว่า 15–40% (Meishner and Sauer, 2019) นอกจากนี้ยังมีส่วนช่วยในการยืดอายุการใช้งานอุปกรณ์เบรกและการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอีกด้วย จึงกล่าวได้ว่าการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าถือเป็นก้าวสำคัญสู่การยกระดับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ยั่งยืนและคุ้มค่าอย่างแท้จริง สำหรับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสามารถแบ่งตามลักษณะการดำเนินการได้ 3 แบบ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.8.1 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้ง

ข้างทาง

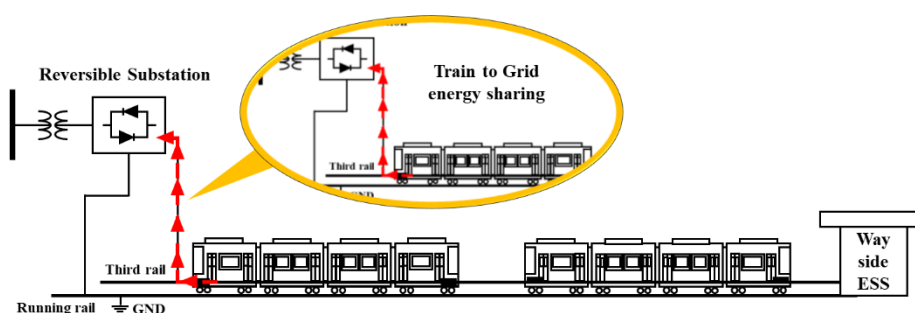
รูปแบบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับระบบกักเก็บพลังงานเป็นแนวคิดที่ได้รับการพัฒนาอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน โดยเฉพาะในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแบบกระแสตรงที่มีการนำพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับที่ได้จากการเบรกของขบวนรถไฟฟ้ามากักเก็บไว้ในระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งข้างทาง เช่น ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เป็นต้น เพื่อนำมาจ่ายให้กับรถไฟฟ้าขบวนอื่น ๆ ในระบบที่อยู่ในช่วงเร่งตัวออกจากสถานีผู้โดยสาร ซึ่งสามารถลดภาระของโครงข่ายระบบจ่ายไฟหลักที่ต้องจ่ายพลังงานไฟฟ้าตามค่าความต้องการ (peak demand) และยังลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบของความร้อนในระบบ นอกจากนี้ประโยชน์ในด้านการประหยัดพลังงานไฟฟ้าแล้ว การใช้ระบบกักเก็บพลังงานข้างทางยังช่วยปรับปรุงคุณภาพของการจ่ายไฟโดยการรักษาความเสถียรของแรงดันไฟฟ้าในระบบ และเพิ่มความสามารถในการรองรับจำนวนขบวนรถไฟฟ้าโดยไม่จำเป็นต้องขยายขนาดของโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ ด้านไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องอีก แสดงดังรูปที่ 3.48



รูปที่ 3.48 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ามกับระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งข้างทาง

3.8.2 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ามกับโครงข่ายระบบจ่ายไฟ

การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ามกับโครงข่ายระบบจ่ายไฟหลักเป็นแนวทางที่อาศัยคุณสมบัติของสถานีไฟฟ้าสองทิศทาง (bidirectional substations) ที่พัฒนาขึ้นมา โดยเฉพาะในการนำส่งพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการกระบวนกรต่าง ๆ กลับคืนสู่โครงข่ายระบบจ่ายไฟหลักผ่านรางที่สามหรือสายส่งเหนือหัว เพื่อนำไปใช้งานในส่วนอื่น ๆ ที่ไม่เพียงในระบบรถไฟฟ้ามขนส่งมวลชนเท่านั้น ซึ่งทำให้มีการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในส่วนอื่น ๆ ขณะที่ขบวนรถไฟฟ้ามไม่ได้ถูกใช้งาน (Khodaparastan, Dutta, Saleh, and Mohamed; 2019) แสดงดังรูปที่ 3.49

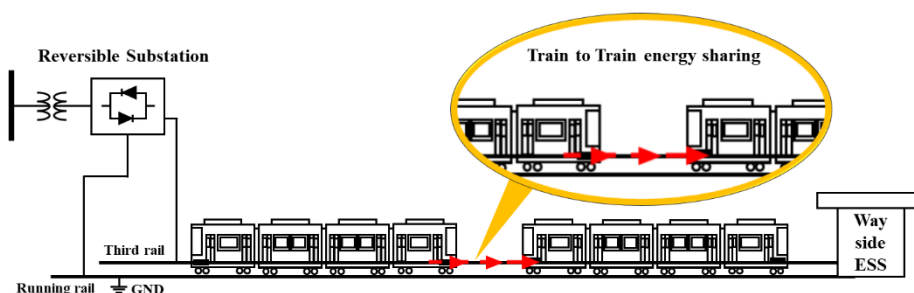


รูปที่ 3.49 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ามกับโครงข่ายระบบจ่ายไฟ

3.8.3 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ามกับรถไฟฟ้า

การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบนี้จะมีการส่งต่อพลังงานไฟฟ้าระหว่างขบวนรถไฟฟ้ามโดยตรง โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการจัดเก็บหรือต้องส่งกลับไปยังสถานีจ่ายไฟที่ตั้งอยู่ระยะไกล การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้านี้สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีการทำงานสอดคล้องกันระหว่างการ

เบรกและการเร่งของขบวนรถไฟไฟฟ้าต่าง ๆ ในระบบ หรือเมื่อมีขบวนรถไฟไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ส่งและรับพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลาเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 3.50 อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่การทำงานของขบวนรถไฟไฟฟ้าไม่สอดคล้องกันหรือไม่ลงตัว ระบบยังสามารถบูรณาการการทำงานเข้ากับระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งบนขบวนรถหรือติดตั้งข้างทาง เพื่อจัดเก็บพลังงานไฟฟ้าส่วนนี้ไว้ใช้ภายหลัง ซึ่งช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและประสิทธิภาพในการจัดสรรพลังงานไฟฟ้าทั้งระบบได้ดียิ่งขึ้น (Sumpavakup, Suwannakijborihan, Ratniyomchai, and Kulworawanichpong, 2018)



รูปที่ 3.50 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟไฟฟ้ากับรถไฟไฟฟ้า

การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าเป็นเทคโนโลยีที่ช่วยผลักดันให้เกิดความยั่งยืนในการบริการระบบรถไฟไฟฟ้าขนส่งมวลชน การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าแต่ละรูปแบบก็จะมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกันออกไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟไฟฟ้ากับรถไฟไฟฟ้าที่ถือเป็นรูปแบบที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด แต่การทำงานอาจถูกจำกัดด้วยโครงสร้างของระบบไฟฟ้าและลักษณะการทำงานของขบวนรถไฟไฟฟ้าในขณะนั้น ความสำเร็จของการนำเทคโนโลยีนี้ไปใช้งานขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญหลายประการ ได้แก่ ความสามารถในการตอบสนองของระบบกักเก็บพลังงาน ความแม่นยำของระบบตรวจจับและควบคุมการไหลของพลังงาน และความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ภายใต้สภาวะการใช้งาน นอกจากนี้ การออกแบบระบบจำเป็นต้องคำนึงถึงมาตรฐานความปลอดภัยและความเข้ากันได้กับโครงสร้างพื้นฐานที่มีอยู่เดิม ปัจจุบันได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่ระบุว่าการนำเทคโนโลยีการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้ามาใช้ในระบบจะช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ถึง 15–40% แม้การลงทุนในช่วงเริ่มต้นจะสูงและระบบควบคุมที่มีความซับซ้อนก็ตาม แต่การพัฒนาสารกึ่งตัวนำยุคใหม่ เทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงาน พลังงานหมุนเวียน และโครงข่ายระบบไฟฟ้าอัจฉริยะที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น จะช่วยยกระดับความคุ้มค่าและประสิทธิภาพจนเทคโนโลยีนี้กลายเป็นหัวใจ

สำคัญของการให้บริการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในอนาคต อย่างไรก็ตาม สำหรับสถานการณ์ความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบจ่ายไฟหลัก ทางเลือกการแบ่งปันจะจำกัดเหลือเพียง 2 กรณี ได้แก่ การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งข้างทาง และการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับรถไฟฟ้าหรือการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งบนขบวนรถ ซึ่งแต่ละรูปแบบจะมีข้อดีและข้อจำกัดในการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าที่แตกต่างกัน (Radu, Lewandowski, and Szelag, 2020) แสดงดังตารางที่ 3.11

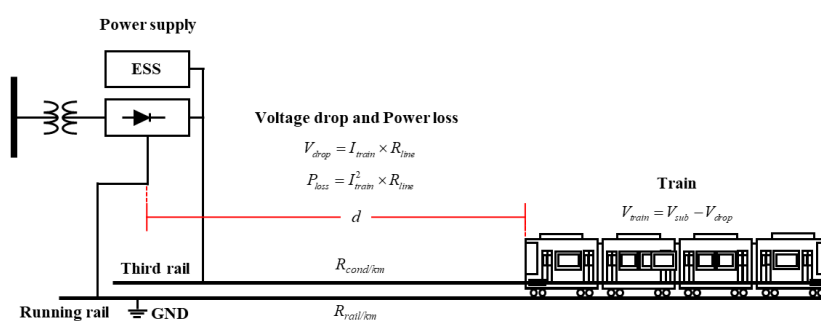
ตารางที่ 3.11 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า

ลำดับ	ประเด็นเปรียบเทียบ	การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับระบบกักเก็บพลังงาน	
		แบบติดตั้งบนขบวนรถ	แบบติดตั้งข้างทาง
1	บทบาทในภาวะฉุกเฉิน	เป็นแหล่งพลังงานฉุกเฉินส่วนตัวและสามารถแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าได้	เป็นแหล่งพลังงานฉุกเฉินกลาง
2	ความจุพลังงานไฟฟ้า	จำกัดตามขนาดและน้ำหนักที่ขบวนรถไฟฟ้ารับไหว	ปรับลดได้ตามความต้องการพลังงานไฟฟ้าของทั้งระบบ
3	การตอบสนอง	ตอบสนองได้ทันที	ตอบสนองได้ช้า
4	ลักษณะการทำงาน	มีความอิสระสูง	ไม่มีความอิสระ
5	ภาระโหลดที่ขบวนรถไฟฟ้า	รับภาระโหลดเพิ่ม	ไม่มีการรับภาระโหลดเพิ่ม
6	พื้นที่ติดตั้ง	ใช้พื้นที่บนขบวนรถ	ใช้พื้นที่ข้างทาง
7	การบำรุงรักษา	ต้องนำรถทั้งขบวนออกจากตารางบริการเพื่อเข้าซ่อม	เข้าถึงจุดติดตั้งได้ง่ายและไม่กระทบการเดินรถ
8	การทำงานบริเวณทางยกระดับหรืออุโมงค์	มีความยืดหยุ่นสูง	มีข้อจำกัดไม่เกินระยะที่มาตรฐานกำหนด
9	กำลังไฟฟ้าสูญเสียในการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้าสูญเสียอาจปรับเปลี่ยนตามระยะห่างระหว่างขบวนรถไฟฟ้าหรือระยะทางที่ต้องระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า	ระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าส่งผลต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยตรง

แนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS ที่นำเสนอมีจุดเด่นคือความสามารถในการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ายกไฟฟ้าหรือการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ายกกับระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งบนขบวนรถ คุณสมบัตินี้นำมาซึ่งประโยชน์ต่อระบบรถไฟฟ้ายกขนส่งมวลชนในหลายมิติ โดยเฉพาะการเพิ่มความยืดหยุ่นในการเดินรถเมื่อเกิดเหตุขัดข้องทางไฟฟ้า ซึ่งช่วยเพิ่มโอกาสให้ขบวนรถไฟสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ปลอดภัยและรองรับการบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่มีเสถียรภาพมากขึ้น

3.9 ผลกระทบแรงดันไฟฟ้าตกและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในโครงข่ายระบบจ่ายไฟ

ปัญหาแรงดันไฟฟ้าตก (Voltage drop: V_{drop}) และการสูญเสียกำลังไฟฟ้า (Power loss : P_{loss}) อันเนื่องมาจากความต้านทานของรางตัวนำและรางวิ่งที่เพิ่มขึ้นตามระยะทางถือเป็นประเด็นท้าทายที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพและประสิทธิภาพสำหรับแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในโครงข่ายระบบรถไฟฟ้ายกขนส่งมวลชนโดยตรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อขบวนรถไฟเคลื่อนที่ห่างออกจากแหล่งจ่ายไฟหรือระบบกักเก็บพลังงาน แสดงดังรูปที่ 3.51 แรงดันไฟฟ้าตกที่เกิดขึ้น ณ ขบวนรถจะส่งผลให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าปกติของแหล่งจ่ายไฟ ขณะเดียวกัน การสูญเสียกำลังไฟฟ้าในรูปของความร้อนก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อสมรรถนะและลดทอนประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบโดยรวม ส่งผลให้เป้าหมายการประหยัดพลังงานของแนวคิดการแบ่งปันพลังงานไม่สามารถบรรลุผลได้อย่างเต็มศักยภาพ สำหรับระบบรถไฟฟ้ายกขนส่งมวลชนโดยทั่วไป จะมีการจ่ายไฟผ่านรางตัวนำ 1 ราง และคืนไฟกลับสถานีจ่ายไฟผ่านรางวิ่ง 2 รางต่อหนึ่งขบวน แสดงดังรูปที่ 3.25 ความต้านทานของรางตัวนำและรางวิ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.21-3.22 ตามลำดับ (Mongkoldee, Leeton, and Kulworawanichpong, 2016)



รูปที่ 3.51 ความต้านทานของรางตัวนำและรางวิ่งที่เพิ่มขึ้นตามระยะทาง

$$R_{cond} = d \times R_{cond/km} \quad (3.21)$$

$$R_{rail} = \frac{1}{2} (d \times R_{rail/km}) \quad (3.22)$$

เมื่อ $R_{cond/km}$ คือ ความต้านทานต่อความยาวรางตัวนำ หน่วย โอห์มต่อกิโลเมตร $R_{rail/km}$ คือ ความต้านทานต่อความยาวรางวิ่ง หน่วย โอห์มต่อกิโลเมตร และ d คือ ระยะห่างระหว่างแหล่งจ่ายไฟ กับขบวนรถไฟ หน่วย กิโลเมตร ดังนั้นจะสามารถคำนวณค่าความต้านทานรวมตลอดเส้นทางการจ่ายไฟจากสถานีจ่ายไฟไปยังรถไฟ (Overall line resistance: R_{line}) ดังสมการที่ 3.23 นอกจากนี้ สามารถคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าตกและการสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากผลของความต้านทานตลอดเส้นทางการจ่ายไฟจากสถานีจ่ายไฟไปยังรถไฟ ดังสมการที่ 3.24-3.26

$$R_{line} = d \left(R_{cond/km} + \frac{R_{rail/km}}{2} \right) \quad (3.23)$$

$$V_{drop} = I_{train} \times R_{line} \quad (3.24)$$

$$V_{train} = V_{sub} - V_{drop} \quad (3.25)$$

$$P_{loss} = I_{train}^2 \times R_{line} \quad (3.26)$$

กำหนดให้ I_{train} คือ กระแสไฟฟ้าของขบวนรถไฟ V_{train} คือ แรงดันไฟฟ้าของขบวนรถไฟ และ V_{sub} คือ แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟหรือระบบกักเก็บพลังงาน ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะต้องมีความสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์พฤติการณ์การเคลื่อนที่ในระบบรถไฟ ขนส่งมวลชนและการประเมินการไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบด้วยวิธีการฉีดกระแส นอกจากนี้ การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าอย่างไม่เหมาะสมหรือการมีรถไฟหลายขบวนดึงกระแสไฟฟ้าพร้อมกันจากแหล่งจ่ายไฟ อาจทำให้แรงดันไฟฟ้าในรางต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานจนนำไปสู่การที่ขบวนรถไฟไม่สามารถดึงกำลังไฟฟ้าที่เพียงพอต่อการขับเคลื่อนได้ ซึ่งส่งผลให้เกิดการลดทอนสมรรถนะหรือหยุดชะงักของขบวนรถไฟเหล่านั้นได้ในที่สุด การทำความเข้าใจปรากฏการณ์เหล่านี้จากมุมมองของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบและวางแผนการติดตั้งระบบ

กักเก็บพลังงาน เพื่อเสริมเสถียรภาพทางแรงดันไฟฟ้าและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในโครงข่ายระบบ
รถไฟฟ้าขนส่งมวลชนโดยรวม

3.10 สรุป

บทนี้ได้รวบรวมทฤษฎีและข้อมูลสำคัญที่เกี่ยวข้องกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและระบบ
จ่ายไฟ พลวัตการเคลื่อนที่ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน เทคนิคการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า
ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนด้วยวิธีการผิวดกระแส ปัญหาไฟดับและผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบ
รถไฟฟ้าขนส่งมวลชน ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน การแบ่งปันพลังงาน
ไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน และผลกระทบแรงดันไฟฟ้าตกและกำลังไฟฟ้าสูญเสียใน
โครงข่ายระบบจ่ายไฟ เพื่อสร้างรากฐานความรู้และกรอบแนวคิดที่จำเป็นสำหรับการพัฒนา
แบบจำลองต้นแบบระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในบทถัดไป