

การวางแผนเชิงกลยุทธ์ของสถานีประจุไฟฟ้าเร็วสำหรับระบบรถบัไฟฟ้า
ขนส่งสาธารณะ: กรณีศึกษา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**STRATEGIC PLANNING OF FAST CHARGING
STATIONS FOR ELECTRIC BUS PUBLIC TRANSPORT
SYSTEMS: A CASE STUDY OF MUEANG DISTRICT,
NAKHON RATCHASIMA PROVINCE**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor Philosophy in Electrical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2019

การวางแผนเชิงกลยุทธ์ของสถานีประจุไฟฟ้าเร็ว สำหรับระบบรถบัไฟฟ้า

ขนส่งสาธารณะ: กรณีศึกษา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.กิริติ ชยะกุลศิริ)

กรรมการ



(รศ. ดร.เพด็จ เฟ่าละออ)

กรรมการ



(ผศ. ดร.อุเทน ลีตัน)

กรรมการ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล คณะบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ธีระพงษ์ บุญรักษา : การวางแผนเชิงกลยุทธ์ของสถานีประจุไฟฟ้าเร็วสำหรับระบบ
รถบัสไฟฟ้าขนส่งสาธารณะ: กรณีศึกษา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา (STRATEGIC
PLANNING OF FAST CHARGING STATIONS FOR ELECTRIC BUS PUBLIC
TRANSPORT SYSTEMS: A CASE STUDY OF MUEANG DISTRICT, NAKHON
RATCHASIMA PROVINCE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร.บุญเรือง มะรังศรี, 283 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการวางแผนเชิงกลยุทธ์ของสถานีประจุไฟฟ้าเร็วสำหรับระบบรถบัสไฟฟ้าขนส่งสาธารณะโดยใช้เส้นทางในเขตอำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เป็นกรณีศึกษา ปัจจัยที่ศึกษาและจำลองประกอบด้วย (1) การใช้พลังงานไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้า (2) กลยุทธ์การประจุไฟฟ้า (3) ผลกระทบและการบรรเทาผลกระทบการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้า และ (4) การวิเคราะห์ต้นทุนของระบบรถบัสไฟฟ้า โดยกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าที่ใช้จำลองประกอบด้วย (1) กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไป สำหรับรถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน (2) กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วยิ่ง สำหรับรถบัสไฟฟ้าแบบแพนโทกราฟ และ (3) กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วสำหรับรถบัสไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ ผลการจำลองพบว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าทั้ง 3 เส้นทาง มีค่าเฉลี่ย 1.1983 kWh/km และยังพบว่ากลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำที่สุด จากการใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด จำลองผลกระทบเมื่อเชื่อมต่อกับสถานีประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าเข้ากับระบบ ผลการจำลองพบว่าเมื่อมีการอัดประจุให้กับรถบัสไฟฟ้าของสถานีประจุไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าลดลงต่ำกว่ามาตรฐานและมีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มขึ้น และเมื่อจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าของจังหวัดนครราชสีมา โดยใช้วงจรจำหน่ายจริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 5 วงจร ตามเส้นทางกรณีศึกษา ผลการจำลองพบว่าแรงดันไฟฟ้าตกของระบบยังคงอยู่ในมาตรฐาน แต่ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียมีค่าเพิ่มขึ้น การบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าใช้การติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายที่เหมาะสมที่สุด เพื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าให้ได้มาตรฐานและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ ผลการจำลองระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด พบว่า การใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคเปรียบเทียบกับแบบอาณานิคมผึ้งเทียมได้ขนาดที่เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายเท่ากัน สำหรับการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าทั้ง 5 วงจร กรณีศึกษาจังหวัดนครราชสีมา ใช้การติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายและชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียมเพื่อเลือกตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุด ผลการจำลองพบว่า การติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายและชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่

เหมาะสมสามารถปรับปรุงระดับแรงดันไฟฟ้าและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม การติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งมากกว่าการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า เมื่อวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายและต้นทุนสำหรับระบบรบบัสไฟฟ้าสาธารณะ โดยใช้กรณีรบบัสไฟฟ้าที่มีรูปแบบการประจุไฟฟ้าแตกต่างกัน 3 รูปแบบ เปรียบเทียบกับระบบรบบัสดีเซล ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าใช้จ่ายรวมของรบบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอินมีค่าต่ำที่สุด ดังนั้น กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่มีการประจุไฟฟ้าที่สถานีต้นทางและปลายทางเป็นกลยุทธ์การลงทุนที่ดีที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้พลังงานต่ำที่สุดของรบบัสไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากไม่เพียงส่งผลต่อค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเท่านั้น แต่ยังส่งผลต่อการสึกหรอของแบตเตอรี่และเวลาที่ใช้สำหรับการประจุไฟฟ้าอีกด้วย



TERAPONG BOONRAKSA : STRATEGIC PLANNING OF FAST
CHARGING STATIONS FOR ELECTRIC BUS PUBLIC TRANSPORT
SYSTEMS: A CASE STUDY OF MUEANG DISTRICT, NAKHON
RATCHASIMA PROVINCE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
BOONRUANG MARUNGSRI, D. Eng., 283 PP.

ELECTRIC BUS PUBLIC TRANSPORT/ FAST CHARGING STATIONS/ POWER
FLOW ANALYSIS/ STRATEGIC PLANNING

This thesis aims to study the strategic planning of the fast charging station for the electric bus public transport systems by using the Mueang District, Nakhon Ratchasima Province, as a case study area. The study and simulation factors consisted of (1) the Electric Bus (EB) power consumption, (2) the charging strategy, (3) the impact and mitigation of the impact of EB charging, and (4) the cost analysis of the Electric Bus system (EBs). The simulation of the charging strategy consists of (1) normal charging strategy for Plug-in EB, (2) ultra-fast charging strategy for Pantograph EB, and (3) fast charging strategy for Battery Swapping Electric Bus (BSEB). The simulation results show that the average of EB energy consumption on 3 routes of 1.1983 kWh/km. The electric bus power consumption for the plug-in charging strategy uses the lowest electric power. The simulation results of power flow analysis when connecting the EB charging station on IEEE 33 node shows that the voltage drop is lower than the standard and the power loss increased. The simulation of the impact of EB charging on the power distribution systems in Nakhon Ratchasima province with 5 circuits of the Provincial Electricity Authority along the route, a case study found that the system voltage drop remains standard, but the power

loss increases. The simulation results of the mitigation of impact for EB charging to the IEEE 33 node test systems, show the same size of Distributed Generation system (DGs) with particle swarm optimization and artificial bee colony optimization technic. Mitigation of the effect of EB charging on distribution systems in Nakhon Ratchasima province by installing the DGs and Capacitor Bank (CB). The ABC optimization method was applied to optimize the most suitable location and size of DGs and CB. The installation of DGs and CB can improve the voltage level and reduce the power loss on the power distribution system. However, the costs of DGs installation a lot more than the installation of an CB. The results of the investment cost analysis for EB public transport system using the case study of the EB charging with 3 types and considering the diesel bus system. Therefore the Plug-in charging strategy for the Plug-in EB is the best investment strategy. Also found that the lowest energy consumption of an EB is essential because it not only affects the energy costs but also affects to the wear and tear of the battery and the charging time.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature

Signature of Student: ดร. พชร ภูมิทอง

Advisor's Signature

Signature of Advisor: ดร. นพวิมล งามะ

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างยิ่งและให้ความรู้ด้านวิชาการมาโดยตลอด อีกทั้งยังได้ช่วยตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง รองศาสตราจารย์ ดร.กิริติ ชยะกุลศิริ รองศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุเทน ลีตน ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางสำหรับการทำวิจัย

ขอขอบคุณ คุณสุชาติ เต้าทอง และ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค จังหวัดนครราชสีมา ที่ให้คำแนะนำและอนุเคราะห์ข้อมูลระบบจำหน่ายไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา

ขอขอบคุณ สมาชิกกลุ่มวิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือในทุก ๆ เรื่อง

ขอบคุณสมาชิกบัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดาและมารดา โดยเฉพาะ คุณแม่จันทร์เพ็ญ สุภาชาติ ที่ให้ความรักความห่วงใย และการส่งเสริมทางการศึกษาอย่างเปี่ยมล้นตลอดมา ทำให้ผู้วิจัยไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดมา

ธีระพงษ์ บุญรักษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขีดตกลงเบื้องต้น.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์.....	4
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 กล่าวนำ.....	6
2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับยานยนต์ไฟฟ้า.....	6
2.2.1 ประวัติความเป็นมาของยานยนต์ไฟฟ้า.....	6
2.2.2 ประเภทของยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ในปัจจุบัน.....	9
2.3 รถบัสไฟฟ้าสาธารณะ.....	14
2.3.1 ประวัติความเป็นมาของยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ.....	14
2.3.2 รถบัสไฟฟ้าในปัจจุบัน.....	17
2.4 การประจุไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้า.....	19
2.4.1 การประจุไฟฟ้ากระแสสลับแบบหัวชาร์จสำหรับรถบัสไฟฟ้า.....	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2	การประจุไฟฟ้ากระแสตรงแบบหัวขารจ์สำหรับรถบัไฟฟ้า.....	22
2.4.3	การประจุไฟฟ้ากระแสตรงแบบแพนโทกราฟ.....	23
2.4.4	การประจุไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ.....	26
2.4.5	การเปลี่ยนแบตเตอรี่.....	28
2.4.6	ระดับของการประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า.....	29
2.4.7	โหมดการประจุไฟฟ้าสำหรับการประจุไฟฟ้าแบบผ่านตัวนำไฟฟ้า.....	30
2.5	แบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า.....	34
2.5.1	เซลล์ไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่.....	36
2.5.2	พารามิเตอร์ของแบตเตอรี่.....	37
2.5.3	แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด.....	41
2.5.4	แบตเตอรี่ลิเทียม.....	47
2.5.5	การประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด.....	49
2.5.6	การประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่ลิเทียม.....	52
2.5.7	วงจรประจุไฟฟ้า RC.....	54
2.5.8	การประจุไฟฟ้าแบบเร็ว.....	58
2.5.9	ลักษณะการประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า.....	61
2.6	ความต้องการพลังงานสำหรับรถบัไฟฟ้า.....	63
2.6.1	การใช้พลังงานในส่วนต่าง ๆ ของรถบัไฟฟ้า.....	63
2.6.2	เส้นโค้งความเร็ว.....	63
2.6.3	ความต้องการพลังงานของรถบัไฟฟ้า.....	65
2.7	ระบบไฟฟ้ากำลัง.....	68
2.7.1	ระบบผลิตไฟฟ้า.....	69
2.7.2	ระบบส่งจ่ายไฟฟ้า.....	69
2.7.3	ระบบจำหน่ายไฟฟ้า.....	69
2.7.4	โหลดของระบบไฟฟ้า.....	70

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7.5	ผลกระทบของระบบไฟฟ้าเมื่อมีการประจุไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้า	70
2.8	การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า	71
2.8.1	พารามิเตอร์ของสายส่ง	72
2.8.2	หลักการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า	72
2.8.3	ชนิดของบัส	73
2.8.4	การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน	75
2.9	การเชื่อมต่อสถานีประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้า	77
2.10	วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการศึกษาวิจัย	80
2.10.1	ขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค	80
2.10.2	ขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม	82
2.11	การวิเคราะห์ต้นทุนสำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้า	86
2.11.1	ต้นทุนรถบัส	86
2.11.2	ต้นทุนการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานการประจุไฟฟ้า	87
2.11.3	ต้นทุนแบตเตอรี่	87
2.11.4	ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงและพลังงาน	88
2.11.5	ต้นทุนการใช้งานตลอดอายุการใช้งาน	89
2.11.6	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ	90
2.11.7	อัตราส่วนมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย	91
2.12	ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	91
2.13	สรุป	98
3	วิธีดำเนินงานวิจัย	99
3.1	กล่าวนำ	99
3.2	การจำลองความต้องการพลังงานไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้า	100
3.2.1	เส้นทางกรณีศึกษา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา	100
3.2.2	คุณสมบัติของรถบัสไฟฟ้า	108

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	แผนกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าระดับไฟฟ้าสาธารณะที่ใช้ศึกษาวิจัย.....	110
3.3.1	กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าระดับไฟฟ้าสาธารณะ	110
3.4	การจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้าระดับไฟฟ้าต่อระบบ จำหน่ายไฟฟ้า.....	113
3.4.1	การจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้าระดับไฟฟ้า ต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โนด	113
3.4.2	การจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้าระดับไฟฟ้าต่อระบบ จำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา	115
3.5	การบรรเทาผลกระทบผลกระทบของการประจุไฟฟ้าระดับไฟฟ้า ต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า.....	124
3.5.1	การบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้าระดับไฟฟ้า ต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โนด	124
3.5.2	การบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้าระดับไฟฟ้าต่อระบบ จำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา	128
3.6	การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายและต้นทุนสำหรับระบบระดับไฟฟ้าสาธารณะ	132
3.6.1	ต้นทุนระดับไฟฟ้า	132
3.6.2	ต้นทุนโครงสร้างพื้นฐานสถานีประจุไฟฟ้า.....	133
3.6.3	ต้นทุนแบตเตอรี่.....	134
3.6.4	ต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิง	135
3.6.5	การวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุน	135
3.7	สรุป	136
4	ผลการวิจัย.....	137
4.1	กล่าวนำ.....	137
4.2	ผลการจำลองความต้องการพลังงานไฟฟ้าของระดับไฟฟ้าสาธารณะ.....	137
4.2.1	ผลการจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้า สำหรับระดับไฟฟ้าสายสีม่วง	137

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.2	ผลการจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้า สำหรับระบบไฟฟ้าสายสี่เฟส.....	141
4.2.3	ผลการจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้า สำหรับระบบไฟฟ้าสายสี่เฟส.....	145
4.3	ผลการวิเคราะห์กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าของระบบระบบไฟฟ้า.....	150
4.3.1	กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง.....	150
4.3.2	กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ.....	161
4.3.3	กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่.....	171
4.4	ผลการจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้าสำหรับระบบ จำหน่ายไฟฟ้า.....	190
4.4.1	ผลการจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้าสำหรับระบบ จำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด.....	190
4.4.2	ผลการจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้าสำหรับระบบ จำหน่ายไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา.....	192
4.5	ผลการบรรเทาผลกระทบผลกระทบของการประจุไฟฟ้าสำหรับระบบ จำหน่ายไฟฟ้า.....	209
4.5.1	ผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบผลกระทบของการประจุไฟฟ้า สำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด.....	210
4.5.2	ผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบผลกระทบของการประจุไฟฟ้า สำหรับระบบจำหน่ายไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา.....	219
4.6	ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายและต้นทุนสำหรับระบบระบบไฟฟ้าสาธารณะ.....	227
4.7	สรุป.....	237
5	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	240
5.1	สรุป.....	240
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	242
	รายการอ้างอิง.....	243

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก.....	250
ภาคผนวก ก ชุดคำสั่งโปรแกรม MATLAB ที่ใช้งานวิจัย.....	250
ภาคผนวก ข ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้งานวิจัย	267
ภาคผนวก ค บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	280
ประวัติผู้เขียน.....	283



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของรถบัสไฟฟ้าที่ใช้งานในปัจจุบัน	18
2.2 ระดับการประจุไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้า	30
2.3 พารามิเตอร์สำหรับแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด	43
2.4 พารามิเตอร์สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	48
2.5 คุณสมบัติของแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ	49
2.6 แรงดันและกระแสไฟฟ้าสำหรับตัวเก็บประจุในวงจรชาร์จ RC สำหรับค่าคงที่เวลา	57
2.7 ลักษณะเฉพาะเครื่องชาร์จและสารเคมีในแบตเตอรี่	60
2.8 พารามิเตอร์ของ巴士แต่ละชนิด	73
2.9 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	91
3.1 คุณสมบัติของรถบัสไฟฟ้า Proterra Catalyst XR	108
3.2 พารามิเตอร์สำหรับการประจุไฟฟ้าแบบทั่วไป	111
3.3 พารามิเตอร์สำหรับการประจุไฟฟ้าแบบเร็ว รถบัสไฟฟ้าแบบแพนโทกราฟ	112
3.4 พารามิเตอร์สำหรับการประจุไฟฟ้าแบบรวดเร็ว รถบัสไฟฟ้าสลับเปลี่ยนแบตเตอรี่	113
3.5 วงจรไฟฟ้าสถานีไฟฟ้านครราชสีมา สำหรับติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้า	115
3.6 ขนาดของชุดตัวเก็บประจุและค่าใช้จ่าย	130
3.7 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับรถบัสไฟฟ้า	132
3.8 พารามิเตอร์รถบัสดีเซล	132
3.9 ต้นทุนโครงสร้างพื้นฐานสถานีประจุไฟฟ้ารายปี	133
3.10 พารามิเตอร์และค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับแบตเตอรี่	134
3.11 ระยะเวลาการเปลี่ยนแบตเตอรี่สำหรับรถบัส	135
3.12 ต้นทุนพลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิง	135
3.13 พารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ความคุ้มค่าการลงทุน	136
4.1 ความต้องการพลังงานสำหรับการเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง	140
4.2 ความต้องการพลังงานสำหรับการเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว	144
4.3 ความต้องการพลังงานสำหรับการเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม	148

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.4 การใช้พลังงานของระบบไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน	154
4.5 กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูงสุดขณะการประจุไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง.....	158
4.6 พลังงานไฟฟ้าสูงสุด สำหรับการประจุไฟฟ้าระบบระบบไฟฟ้าในหนึ่งวัน กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไปที่ต้นทางและปลายทาง.....	160
4.7 การใช้พลังงานของระบบไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ.....	165
4.8 กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูงสุดขณะการประจุไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ.....	169
4.9 พลังงานไฟฟ้าสูงสุด สำหรับการประจุไฟฟ้าระบบระบบไฟฟ้าในหนึ่งวัน กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ.....	171
4.10 การใช้พลังงานของระบบไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้า ด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่.....	175
4.11 กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูงสุดขณะประจุไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์ การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่.....	188
4.12 พลังงานไฟฟ้าสูงสุดสำหรับการประจุไฟฟ้าระบบระบบไฟฟ้าในหนึ่งวัน กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่	190
4.13 ผลการจำลองผลกระทบการประจุไฟฟ้า โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โนด.....	191
4.14 ผลการจำลองผลกระทบการประจุไฟฟ้า สำหรับระบบระบบไฟฟ้าสายลึ่มวง	198
4.15 ผลการจำลองผลกระทบการประจุไฟฟ้า สำหรับระบบระบบไฟฟ้าสายลึ่มเดี่ยว	205
4.16 ผลการจำลองผลกระทบการประจุไฟฟ้า สำหรับระบบระบบไฟฟ้าสายลึ่ม.....	209
4.17 ผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้าระบบไฟฟ้า ด้วยการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย สำหรับระบบระบบไฟฟ้า แบบปลั๊กอิน ด้วยวิธีวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค	211
4.18 ผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้าระบบไฟฟ้า ด้วยการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย สำหรับระบบระบบไฟฟ้า แบบแผนโทกราฟ ด้วยวิธีวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค	212

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.19 ผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบการประจุไฟฟ้ารถยนต์ไฟฟ้า ด้วยการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า แบบสลับเปลี่ยนแบตเตอรี่ ด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค213	
4.20 ผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถยนต์ไฟฟ้า ด้วยการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า แบบปลั๊กอิน ด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม215	
4.21 ผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถยนต์ไฟฟ้า ด้วยการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า แบบแพนโทกราฟ ด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม216	
4.22 ผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบการประจุไฟฟ้ารถยนต์ไฟฟ้า ด้วยการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า แบบสลับเปลี่ยนแบตเตอรี่ ด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม217	
4.23 การเปรียบเทียบผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้า รถยนต์ไฟฟ้า โดยใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคและ วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม218	
4.24 ผลการจำลองการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรไฟฟ้า NRB06 สำหรับรถยนต์สายสีม่วง.....220	
4.25 ผลการจำลองการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรไฟฟ้า NRD09 สำหรับรถยนต์สายสีม่วง.....222	
4.26 ผลการจำลองการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรไฟฟ้า NRB08 รถยนต์ไฟฟ้าสายสีเขียว223	
4.27 ผลการจำลองการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรไฟฟ้า NRA08 รถยนต์ไฟฟ้าสายสีเขียว224	
4.28 ผลการจำลองการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรไฟฟ้า NRA07 สำหรับรถยนต์สายสีส้ม225	
4.29 การเปรียบเทียบต้นทุนรวมสำหรับระบบรถยนต์ไฟฟ้าสาธารณะสายสีม่วง.....230	

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.30 การเปรียบเทียบต้นทุนรวมสำหรับระบบรถบัไฟฟ้าสาธารณะสายสีเขียว.....	233
4.31 การเปรียบเทียบต้นทุนรวมสำหรับระบบรถบัไฟฟ้าสาธารณะสายสีส้ม	236
4.32 มูลค่าปัจจุบันสุทธิของระบบรถบัไฟฟ้า (NPV)	236



สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

1.1	โครงข่ายไฟฟ้าสำหรับรถบัไฟฟ้า.....	3
2.1	แท็กซี่ในนิวยอร์กประมาณปี ค.ศ. 1901 ที่เป็นยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่.....	7
2.2	รถ La Jamais Contente คันแรกที่มีสถิติความเร็ว 65.79 mph ในปี 1899.....	7
2.3	การเปรียบเทียบพลังงานจากน้ำมันและแบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรด.....	9
2.4	ยานยนต์ไฮบริดแบบอนุกรม.....	10
2.5	ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดแบบขนาน.....	11
2.6	รถเซลล์เชื้อเพลิง ในปี 1999.....	11
2.7	ยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ล้อตุนกำลังเพื่อเก็บพลังงาน	13
2.8	รถประจำทาง Omnibus ของ Shillibeer.....	14
2.9	รถขนส่งสาธารณะไฟฟ้า.....	16
2.10	รถบัไฟฟ้า Elektromote ในปี 1882.....	17
2.11	โครงสร้างระบบการประจุไฟฟ้ารถบัไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีต่าง ๆ.....	19
2.12	การประจุไฟฟ้าแบบผ่านตัวนำไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า.....	20
2.13	ตัวอย่างหัวชาร์จและเครื่องชาร์จสำหรับการประจุไฟฟ้าประเภสลับ สำหรับรถบัไฟฟ้า.....	21
2.14	การประจุไฟฟ้ากระแสสลับแบบหัวชาร์จสำหรับรถบัไฟฟ้า.....	21
2.15	ตัวอย่างเครื่องชาร์จและหัวชาร์จแบบกระแสดตรงตามมาตรฐานต่าง ๆ	22
2.16	เครื่องชาร์จที่ใช้หัวชาร์จแบบแพนโทกราฟ	24
2.17	การใช้งานหัวชาร์จแบบแพนโทกราฟ แบบ Existing Interfaces กับรถบัไฟฟ้า	24
2.18	การใช้งานหัวชาร์จแบบแพนโทกราฟ แบบ Inverted Interfaces กับรถบัไฟฟ้า	24
2.19	สถานีชาร์จหัวชาร์จแบบแพนโทกราฟ Off-board top-down ของบริษัท Siemens.....	25
2.20	สถานีชาร์จหัวชาร์จแบบแพนโทกราฟ On-board bottom-up ของบริษัท Siemens.....	25
2.21	โมเดลสถานีประจุไฟฟ้าแบบแพนโทกราฟ	26
2.22	การประจุไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า.....	27
2.23	โมเดลการชาร์จด้วยระบบการชาร์จแบบเหนี่ยวนำของรถบัไฟฟ้า.....	27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 ระบบการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่แบบได้พื้นรถ	28
2.25 การสับเปลี่ยนแบตเตอรี่สำหรับรถบรรทุกไฟฟ้า.....	29
2.26 สถานการณ์ที่เป็นอันตรายโดยไม่มี RCD	31
2.27 ตัวนำตัวควบคุมนำร่อง	33
2.28 ฟังก์ชันควบคุมแบบนำร่องด้วยการสื่อสารด้วยสายไฟฟ้า.....	33
2.29 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรด ที่ใช้ในรถยนต์ทั่วไป	35
2.30 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่.....	36
2.31 การเปลี่ยนแปลงความสามารถในการประจุแบตเตอรี่ 42 Ah ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด.....	38
2.32 กำลังงานเฉพาะเทียบกับกราฟพลังงานเฉพาะสำหรับแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด และแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียม.....	39
2.33 ปฏิกริยาระหว่างการประจุและการคายประจุของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด.....	42
2.34 ปฏิกริยาการเกิดแก๊สที่เกิดขึ้นเมื่อแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ถูกประจุจนเต็ม.....	44
2.35 แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด แบบปิดผนึกที่เปลี่ยนไป ตามสถานะการชาร์จ	45
2.36 วิธีการชาร์จแบบกระแสดังที่แบบขั้นตอนเดียวและหลายขั้นตอน.....	50
2.37 ลักษณะการชาร์จทั่วไปของแบตเตอรี่ โดยใช้วิธีการชาร์จแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่.....	51
2.38 วิธีการชาร์จแบบแรงดันคงที่ลดลง.....	52
2.39 คุณสมบัติการประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน	53
2.40 วงจรการชาร์จ RC.....	55
2.41 เส้นโค้งของวงจรการชาร์จ RC	56
2.42 ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลิเธียมที่มีการประจุและคายประจุ 1C 2C และ 3C	59
2.43 คุณสมบัติการประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน	61
2.44 การใช้พลังงานในส่วนต่าง ๆ ของรถบรรทุกไฟฟ้า	63
2.45 การเร่งความเร็วของรถบรรทุกไฟฟ้า.....	64
2.46 เส้นโค้งความเร็วของรถบรรทุกไฟฟ้า	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.47	แรงในการเคลื่อนที่ของรถบัไฟฟ้า..... 65
2.48	โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังในประเทศไทย 70
2.49	แบบจำลองสถานีประจุไฟฟ้าของรถบัไฟฟ้า..... 77
2.50	วงจรสมมูลของสถานีประจุไฟฟ้ารถบัไฟฟ้า..... 78
2.51	ขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค 82
2.52	ขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม..... 85
3.1	ขั้นตอนการศึกษาวิจัย..... 100
3.2	เส้นทางรถบัไฟฟ้าตามแผนแม่บท จังหวัดนครราชสีมา..... 101
3.3	เส้นทางรถบัไฟฟ้าสายสีม่วง 102
3.4	ค่าความชันของเส้นทางรถบัไฟฟ้าสายสีม่วงเที่ยวไป..... 103
3.5	ค่าความชันของเส้นทางรถบัไฟฟ้าสายสีม่วงเที่ยวกลับ 103
3.6	เส้นทางรถบัไฟฟ้าสายสีเขียว 104
3.7	ค่าความชันของเส้นทางรถบัไฟฟ้าสายสีเขียวเที่ยวไป..... 105
3.8	ค่าความชันของเส้นทางรถบัไฟฟ้าสายสีเขียวเที่ยวกลับ 105
3.9	เส้นทางรถบัไฟฟ้าสายสีส้ม..... 106
3.10	ค่าความชันของเส้นทางรถบัไฟฟ้าสายสีส้มเที่ยวไป..... 107
3.11	ค่าความชันของเส้นทางรถบัไฟฟ้าสายสีส้มเที่ยวกลับ 107
3.12	ขั้นตอนการหาพลังงานไฟฟ้าของรถบัไฟฟ้า..... 109
3.13	แบบจำลองกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไป สำหรับรถบัไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน 110
3.14	แบบจำลองกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ..... 111
3.15	แบบจำลองกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่..... 112
3.16	ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด ประยุกต์ใช้กับสถานีประจุไฟฟ้ารถบัไฟฟ้า..... 114
3.17	การจ่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้านครราชสีมา 2 วงจรนครราชสีมา NRB06 สำหรับกรณีศึกษาเส้นทางรถบัไฟฟ้าสายสีม่วง 116
3.18	วงจรเทียบเคียงวงจรนครราชสีมา NRB06 สำหรับเส้นทางรถบัไฟฟ้าสายสีม่วง 117

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.19 การจ่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้านครราชสีมา 2 วงจรนครราชสีมา NRD09 สำหรับกรณีศึกษาเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง	118
3.20 วงจรเทียบเคียงวงจรนครราชสีมา NRD09 สำหรับรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง.....	119
3.21 การจ่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้านครราชสีมา 2 วงจรนครราชสีมา NRB08 สำหรับกรณีศึกษาเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว	120
3.22 วงจรเทียบเคียง วงจรนครราชสีมา NRB08 สำหรับเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว.....	120
3.23 การจ่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้านครราชสีมา 2 วงจรนครราชสีมา NRA08 สำหรับกรณีศึกษาเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว	121
3.24 วงจรเทียบเคียง วงจรนครราชสีมา NRA08 สำหรับเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว.....	122
3.25 การจ่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้านครราชสีมา 2 วงจรนครราชสีมา NRA07 สำหรับกรณีศึกษาเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม.....	123
3.26 วงจรเทียบเคียง วงจรนครราชสีมา NRA07 สำหรับเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม	123
3.27 ขั้นตอนวิธีการหาขนาดที่เหมาะสมของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย ด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค	126
3.28 ขั้นตอนวิธีการหาขนาดที่เหมาะสมของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย ด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม	127
3.29 ขั้นตอนวิธีหาดำเนินและขนาดที่เหมาะสมของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบ กระจายและชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุด แบบอาณานิคมผึ้งเทียม	131
4.1 เส้นโค้งความเร็วสำหรับการให้บริการ 17 สถานี เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง.....	138
4.2 กำลังไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้า เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง.....	139
4.3 ตารางเวลารถบัสไฟฟ้า สำหรับให้บริการต่อวัน เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง	141
4.4 ตารางเวลาสำหรับการให้บริการของระบบรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง.....	141
4.5 เส้นโค้งความเร็วสำหรับการให้บริการ 18 สถานี เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว.....	142
4.6 กำลังไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้า เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว.....	143
4.7 ตารางเวลารถบัสไฟฟ้า สำหรับให้บริการต่อวัน เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว	145

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ตารางเวลาสำหรับการให้บริการของระบบรบบไฟฟ้าสายสีเขียว.....	145
4.9 เส้นโค้งความเร็วสำหรับการให้บริการ 18 สถานี เส้นทางรบบไฟฟ้าสายสีส้ม	146
4.10 กำลังไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเคลื่อนที่ของรบบไฟฟ้า เส้นทางรบบไฟฟ้าสายสีส้ม	147
4.11 ตารางเวลารบบไฟฟ้า สำหรับให้บริการต่อวัน เส้นทางรบบไฟฟ้าสายสีส้ม.....	149
4.12 ตารางเวลาสำหรับการให้บริการของระบบรบบไฟฟ้าสายสีส้ม	149
4.13 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รบบไฟฟ้าขาไป เส้นทางรบบไฟฟ้า สายสีม่วง สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง.....	150
4.14 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รบบไฟฟ้าจากกลับ เส้นทางรบบไฟฟ้า สายสีม่วง สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง.....	151
4.15 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รบบไฟฟ้าขาไป เส้นทางรบบไฟฟ้า สายสีเขียว สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง.....	152
4.16 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รบบไฟฟ้าจากกลับ เส้นทางรบบไฟฟ้า สายสีเขียว สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง.....	152
4.17 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รบบไฟฟ้าขาไป เส้นทางรบบไฟฟ้า สายสีส้ม สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง	153
4.18 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รบบไฟฟ้าจากกลับ เส้นทางรบบไฟฟ้า สายสีส้ม สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง	154
4.19 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรบบไฟฟ้า สายสีม่วง สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง.....	155
4.20 ลักษณะของกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรบบไฟฟ้าสายสีม่วง สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง.....	155
4.21 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรบบไฟฟ้า สายสีเขียว สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง.....	156
4.22 ลักษณะของกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรบบไฟฟ้าสายสีเขียว สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง.....	156

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรอบขั้วไฟฟ้า สายสี่ลัด สำหรับกลยุทธการประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง	157
4.24 ลักษณะของกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรอบขั้วไฟฟ้าสายสี่ลัด สำหรับกลยุทธการประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง	157
4.25 ลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า ระบบรอบขั้วไฟฟ้าสายลัดวง สำหรับกลยุทธการประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง	159
4.26 ลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า ระบบรอบขั้วไฟฟ้าสายสี่เหลี่ยม สำหรับกลยุทธการประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง	159
4.27 ลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า ระบบรอบขั้วไฟฟ้าสายสี่ลัด สำหรับกลยุทธการประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง	160
4.28 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รอบขั้วไฟฟ้าขาไป เส้นทางรอบขั้วไฟฟ้า สายลัดวง สำหรับกลยุทธการประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ	161
4.29 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รอบขั้วไฟฟ้าขากลับ เส้นทางรอบขั้วไฟฟ้า สายลัดวง สำหรับกลยุทธการประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ	162
4.30 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รอบขั้วไฟฟ้าขาไป เส้นทางรอบขั้วไฟฟ้า สายสี่เหลี่ยม สำหรับกลยุทธการประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ	163
4.31 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รอบขั้วไฟฟ้าขากลับ เส้นทางรอบขั้วไฟฟ้า สายสี่เหลี่ยม สำหรับกลยุทธการประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ	163
4.32 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รอบขั้วไฟฟ้าขาไป เส้นทางรอบขั้วไฟฟ้า สายสี่ลัด สำหรับกลยุทธการประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ	164
4.33 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รอบขั้วไฟฟ้าขากลับ เส้นทางรอบขั้วไฟฟ้า สายสี่ลัด สำหรับกลยุทธการประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ	164
4.34 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรอบขั้วไฟฟ้า สายลัดวง สำหรับกลยุทธการประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ	165
4.35 ลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรอบขั้วไฟฟ้าสายลัดวง สำหรับกลยุทธการประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ	166

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.62 ลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า ระบบรบบัสไฟฟ้าสายสี่เหลี่ยม สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนเบตเตอร์ี.....	189
4.63 ลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า ระบบรบบัสไฟฟ้าสายสี่เหลี่ยม สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนเบตเตอร์ี.....	189
4.64 รูปแบบแรงดันไฟฟ้าเมื่อเชื่อมต่อกับโหลดการประจุไฟฟ้า.....	191
4.65 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบรบบัสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRB06 สำหรับกลยุทธ์ การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไปที่ต้นทางและปลายทาง เส้นทางรบบัสไฟฟ้าสายสี่เหลี่ยม.....	193
4.66 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบรบบัสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRB06 สำหรับกลยุทธ์ การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ เส้นทางรบบัสไฟฟ้าสายสี่เหลี่ยม	194
4.67 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบรบบัสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRB06 สำหรับกลยุทธ์ การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนเบตเตอร์ี เส้นทางรบบัสไฟฟ้าสายสี่เหลี่ยม	195
4.68 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบรบบัสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRD09 สำหรับกลยุทธ์ การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไปที่ต้นทางและปลายทาง เส้นทางรบบัสไฟฟ้าสายสี่เหลี่ยม.....	196
4.69 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบรบบัสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRD09 สำหรับกลยุทธ์ การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ เส้นทางรบบัสไฟฟ้าสายสี่เหลี่ยม	197
4.70 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบรบบัสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRB08 สำหรับกลยุทธ์ การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไปที่ต้นทางและปลายทาง เส้นทางรบบัสไฟฟ้าสายสี่เหลี่ยม.....	200
4.71 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบรบบัสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRB08 สำหรับกลยุทธ์ การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ เส้นทางรบบัสไฟฟ้าสายสี่เหลี่ยม	201
4.72 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบรบบัสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRB08 สำหรับกลยุทธ์ การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนเบตเตอร์ี เส้นทางรบบัสไฟฟ้าสายสี่เหลี่ยม	202
4.73 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบรบบัสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRA08 สำหรับกลยุทธ์ การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไปที่ต้นทางและปลายทาง เส้นทางรบบัสไฟฟ้าสายสี่เหลี่ยม.....	203
4.74 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบรบบัสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRA08 สำหรับกลยุทธ์ การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ เส้นทางรบบัสไฟฟ้าสายสี่เหลี่ยม	204

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.75 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบรบบัสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRA07 สำหรับกลยุทธ์ การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไปที่ต้นทางและปลายทาง เส้นทางรบบัสไฟฟ้าสายสี่ลัม	206
4.76 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบรบบัสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRA07 สำหรับกลยุทธ์ การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ เส้นทางรบบัสไฟฟ้าสายสี่ลัม	207
4.77 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบรบบัสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRA07 สำหรับกลยุทธ์ การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนเบตเตอร์ เส้นทางรบบัสไฟฟ้าสายสี่ลัม	208
4.78 แรงดันไฟฟ้าหลังจากติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย ด้วยวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค สำหรับรบบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน	211
4.79 แรงดันไฟฟ้าหลังจากติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย ด้วยวิธีหาค่า ที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค สำหรับรบบัสไฟฟ้าแบบแผนโทกราฟ	212
4.80 แรงดันไฟฟ้าหลังจากติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย ด้วยวิธีหาค่า ที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค สำหรับรบบัสไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนเบตเตอร์	213
4.81 แรงดันไฟฟ้าหลังจากติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย ด้วยวิธีหาค่า ที่เหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม สำหรับรบบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน	214
4.82 แรงดันไฟฟ้าหลังจากติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย ด้วยวิธีหาค่า ที่เหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม สำหรับรบบัสไฟฟ้าแบบแผนโทกราฟ	215
4.83 แรงดันไฟฟ้าหลังจากติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย ด้วยวิธีหาค่า ที่เหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม สำหรับรบบัสไฟฟ้า แบบสับเปลี่ยนเบตเตอร์	216
4.84 การหาค่าตอบของวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค	217
4.85 การหาค่าตอบของวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม	218
4.86 ต้นทุนการลงทุนระบบรบบัสโดยสารสาธารณะสายลัมวง	227
4.87 ค่าใช้จ่ายการลงทุนรบบัสโดยสาร 24 ปี สำหรับระบบรบบัสไฟฟ้าสายลัมวง	228
4.88 ค่าใช้จ่ายการลงทุนรบบัสตลอดอายุการใช้งาน สำหรับระบบรบบัสไฟฟ้า สายลัมวง	229

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.89 อัตราส่วนมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย สำหรับระบบไฟฟ้า สายสีม่วง	229
4.90 ต้นทุนการลงทุนระบบรถโดยสารสาธารณะสายสีเขียว.....	230
4.91 ค่าใช้จ่ายการลงทุนรถโดยสาร 24 ปี สำหรับระบบระบบไฟฟ้าสายสีเขียว.....	231
4.92 ค่าใช้จ่ายการลงทุนรถโดยสารตลอดอายุการใช้งาน สำหรับระบบระบบไฟฟ้า สายสีเขียว	232
4.93 อัตราส่วนมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย สำหรับระบบไฟฟ้า สายสีเขียว	232
4.94 ต้นทุนการลงทุนระบบรถโดยสารสาธารณะสายสีส้ม	233
4.95 ค่าใช้จ่ายการลงทุนรถโดยสาร 24 ปี สำหรับระบบระบบไฟฟ้าสายสีส้ม	234
4.96 ค่าใช้จ่ายการลงทุนรถโดยสารตลอดอายุการใช้งาน สำหรับระบบระบบไฟฟ้า สายสีส้ม.....	235
4.97 อัตราส่วนมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย สำหรับระบบไฟฟ้า สายสีส้ม.....	235

บทที่ 1

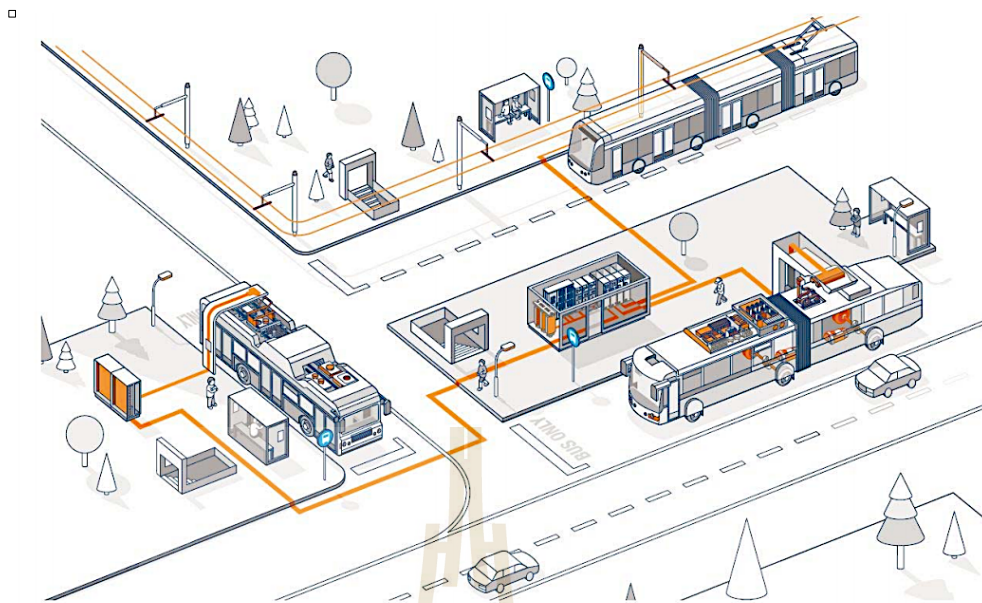
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้เชื้อเพลิงจากฟอสซิลลดน้อยลงเรื่อย ๆ ตรงข้ามกับการใช้พลังงานที่มีการขยายตัวมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น พลังงานทดแทนหรือพลังงานสะอาดจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถทดแทนพลังงานเหล่านี้ได้ พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่สำคัญมากในการขับเคลื่อนกลไกต่าง ๆ ของประเทศ รวมถึงระบบขนส่ง เช่น รถไฟฟ้า และรถบัสไฟฟ้า เป็นต้น

สถานการณ์การใช้พลังงานในของประเทศไทยในระบบขนส่ง ปัจจุบันเชื้อเพลิงฟอสซิลและปัญหาสิ่งแวดล้อมมีความสำคัญมากยิ่งขึ้น การใช้พลังงานมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องสัมพันธ์กับการขยายตัวทางเศรษฐกิจของประเทศ โดยเฉพาะการขยายตัวของความต้องการพลังงานในภาคการขนส่งซึ่งมีการใช้พลังงานสูงเท่า ๆ กับภาคอุตสาหกรรม ขณะที่ภาคการขนส่งทางถนนนับเป็นภาคการขนส่งที่มีการใช้พลังงานสูงสุด ส่วนใหญ่เป็นรถที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine: ICE) และมีเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงานในการขับเคลื่อนซึ่งมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานอยู่ในช่วง 30-40% และมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีผลต่อการเกิดสภาวะโลกร้อน ดังนั้น จึงมีการพัฒนาในเรื่องพลังงานทดแทน หรือ เทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงและมีการปล่อยมลพิษต่ำ

ยานยนต์ไฟฟ้า หรือรถยนต์ไฟฟ้า เริ่มเข้ามามีบทบาทในระบบขนส่งของประเทศไทย และมีการใช้งานมากขึ้นเรื่อย ๆ โดยเฉพาะในตัวเมืองที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากจากรถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน ยานยนต์ไฟฟ้าระบบขนส่งสาธารณะหรือรถบัสไฟฟ้า จึงเริ่มเข้ามามีบทบาทในการขนส่งและยังสามารถช่วยรักษาภาวะแวดล้อมให้ดีขึ้น ยานยนต์ไฟฟ้าต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เพื่อขับเคลื่อนระบบกลไกการทำงานต่าง ๆ ในตัวรถ ดังนั้น ระบบการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าโดยใช้แบตเตอรี่ต้องมีประสิทธิภาพที่ดีเพื่อเก็บและคายประจุไฟฟ้า การประจุไฟฟ้าหรือการชาร์จไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า และการออกแบบระบบประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าก็เป็นส่วนที่สำคัญด้วยเช่นกัน รูปที่ 1.1 แสดงโครงข่ายไฟฟ้าและสถานีประจุไฟฟ้าสำหรับรถบัสไฟฟ้าระบบขนส่งสาธารณะ ที่เริ่มมีการเปลี่ยนจากรถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในไปเป็นระบบรางหรือรถบัสไฟฟ้า เพื่อรักษาภาพแวดล้อมและลดมลภาวะทางอากาศในตัวเมือง



รูปที่ 1.1 โครงข่ายไฟฟ้าสำหรับรถบัสไฟฟ้า¹

จังหวัดนครราชสีมาเป็นจังหวัดที่มีศักยภาพ มีการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ สังคม และการท่องเที่ยวรวมถึงเป็นประตูไปสู่ภาคอีสานและให้ความสนใจการรักษาสภาพแวดล้อมในตัวเมือง โดยสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร ดำเนินการศึกษาแผนแม่บทจราจรและแผนแม่บทพัฒนาระบบขนส่งสาธารณะในเขตเมืองนครราชสีมา ส่งเสริมการพัฒนาเมืองให้สอดคล้องกับโครงการรถไฟความเร็วสูงเฟส 1 ช่วงกรุงเทพ-โคราช จากการศึกษาแผนแม่บทของจังหวัดนครราชสีมา พบว่า ระบบที่เหมาะสมและมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ คือ ระบบไฟฟ้ารางเบา (Light Rail Transit System: LRTs) ซึ่งจะเป็นระบบหลัก และมีระบบรถบัสไฟฟ้าเป็นระบบรอง

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษารวบรวมเชิงกลยุทธ์ของสถานีประจําไฟฟ้าสำหรับระบบขนส่งสาธารณะไฟฟ้า บนระบบจําหน่ายไฟฟ้า ลักษณะการประจําไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าขนส่งสาธารณะ การใช้พลังงานของรถบัสไฟฟ้า แบบจําลองสถานีประจําไฟฟ้าที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบจําหน่ายไฟฟ้า รวมไปถึงผลกระทบจากการประจําไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าต่อระบบจําหน่ายไฟฟ้า เพื่อศึกษาวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าและจําลองเส้นทางและสถานีประจําไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าที่จะมีในอนาคต โดยจําลองการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม MATLAB จําลองการไหลของกำลังไฟฟ้าตามระบบทดสอบ IEEE ที่มีการเชื่อมต่อเข้ากับสถานีประจําไฟฟ้า และบนระบบจําหน่ายไฟฟ้า เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสาธารณะตามแผนแม่บทของจังหวัดนครราชสีมา

¹ ที่มา: [http://www.tut.fi/eee/opetus/kurssit/DEE_26006/Slides/Jukka A. Mäkinen 130416.pdf](http://www.tut.fi/eee/opetus/kurssit/DEE_26006/Slides/Jukka%20A.%20M%C3%A4kinen%20130416.pdf), สืบค้นเมื่อ 19 มิถุนายน 2563

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้าสำหรับรถบัสไฟฟ้าขนส่งสาธารณะทั้งแบบประจุไฟฟ้าปกติและแบบประจุไฟฟ้าเร็ว ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด และระบบจำหน่ายไฟฟ้า อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของสถานีประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าขนส่งสาธารณะต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

1.2.3 เพื่อประยุกต์ใช้ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย และตัวเก็บประจุไฟฟ้าสำหรับบรรเทาผลกระทบของการติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าขนส่งสาธารณะต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

1.2.4 เพื่อวิเคราะห์กลยุทธ์ที่เหมาะสมของสถานีประจุไฟฟ้า ทั้งแบบประจุไฟฟ้าเร็วและแบบประจุไฟฟ้าปกติ สำหรับรถบัสไฟฟ้าขนส่งสาธารณะบนระบบจำหน่ายไฟฟ้า อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 การจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับสถานีประจุไฟฟ้าบนระบบจำหน่ายไฟฟ้า 22 kV โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลอง

1.3.2 การจำลองพิจารณาระบบจำหน่ายไฟฟ้าระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE 33 โหนด และระบบจำหน่ายไฟฟ้า อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

1.3.3 การจำลองจะใช้ขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization: PSO) และขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม (Artificial Bee Colony: ABC)

1.3.4 จำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อมีการติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าขนส่งสาธารณะเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด และแบบจำลองระบบไฟฟ้า อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ที่สร้างขึ้น

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 จำลองโดยใช้โหลดการใช้ไฟฟ้าของ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา จำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าในจังหวัดนครราชสีมา ที่เชื่อมต่อกับสถานีประจุไฟฟ้าระบบรถบัสไฟฟ้า

1.4.2 จำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับสถานีประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้า บนระบบจำหน่าย 22 kV โดยใช้โปรแกรม MATLAB

1.4.3 จำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับสถานีประจุไฟฟ้าระบบแรงดันไฟฟ้า โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โนด

1.4.4 จำลองความต้องการพลังงานไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าที่ให้บริการบนเส้นทางกรณีศึกษา โดยไม่พิจารณาปัจจัยด้านการจราจรบนท้องถนน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ความรู้จากการวิเคราะห์การจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้าสำหรับระบบแรงดันไฟฟ้าระบบขนส่งสาธารณะทั้งแบบประจุไฟฟ้าปกติและแบบประจุไฟฟ้าเร็วในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE และระบบจำหน่ายไฟฟ้าของอำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

1.5.2 ได้ความรู้ถึงผลกระทบของการติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้าของระบบขนส่งสาธารณะต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

1.5.3 ได้ความรู้สำหรับบรรเทาผลกระทบของการติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้าของระบบขนส่งสาธารณะต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ด้วยการเชื่อมต่อบรรยากาศพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย และตัวเก็บประจุไฟฟ้า

1.5.4 ได้แผนเชิงกลยุทธ์ที่เหมาะสมของสถานีประจุไฟฟ้า ทั้งแบบประจุไฟฟ้าปกติและแบบประจุไฟฟ้าเร็ว สำหรับระบบแรงดันไฟฟ้าขนส่งสาธารณะบนระบบจำหน่ายไฟฟ้า อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

1.5.5 ได้เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยในที่ประชุมทางวิชาการหรือในวารสารวิชาการระดับชาติและนานาชาติ

1.5.6 พัฒนาบุคลากรทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าคุณวุฒิวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิตที่มีคุณภาพ

1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท 3 ภาคผนวก ซึ่งได้จัดเรียงตามความเหมาะสม ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาพหุสัจพจน์ที่เป็นองค์ประกอบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎี ปรวิทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกลยุทธ์ที่เหมาะสมของสถานีประจุไฟฟ้า ความเป็นมาของระบบไฟฟ้า และระบบจำหน่ายไฟฟ้า

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีดำเนินงานวิจัยสำหรับกลยุทธ์ที่เหมาะสมของสถานีประจุไฟฟ้าระบบแรงดันไฟฟ้า กระบวนการจำลองการใช้พลังงานของระบบไฟฟ้า กระบวนการจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้าในระบบแรงดันไฟฟ้าสาธารณะ การบรรเทาผลกระทบด้วยการเชื่อมต่อระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายและตัวเก็บประจุไฟฟ้า และการวิเคราะห์ต้นทุนการลงทุนระบบแรงดันไฟฟ้าสาธารณะเพื่อหากลยุทธ์ที่เหมาะสมของสถานีประจุไฟฟ้าระบบแรงดันไฟฟ้า

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการจำลองการใช้พลังงานของระบบไฟฟ้า ผลการศึกษผลกระทบของการประจุไฟฟ้าของระบบแรงดันไฟฟ้าสาธารณะต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า ผลการบรรเทาผลกระทบจากการประจุไฟฟ้าของระบบแรงดันไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า และผลการวิเคราะห์หาต้นทุนของระบบแรงดันไฟฟ้าเพื่อหากลยุทธ์การประจุไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในพื้นที่กรณีศึกษา

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก ชุดคำสั่งโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในงานวิจัย

ภาคผนวก ข ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย

ภาคผนวก ค บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



บทที่ 2

ทฤษฎี ปรักศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันนั้นยานยนต์ไฟฟ้าเริ่มเข้ามามีบทบาทที่สำคัญมากขึ้น เนื่องจากเชื้อเพลิงจากฟอสซิลลดลงเรื่อย ๆ และการใช้รถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในมีผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมในเมืองใหญ่หลาย ๆ เมืองเริ่มหันมาใช้ยานยนต์ไฟฟ้าแทนการใช้รถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน ดังนั้น งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงจำเป็นต้องศึกษาหลักการเกี่ยวกับยานยนต์ไฟฟ้า การใช้พลังงานไฟฟ้า การวิเคราะห์หากลยุทธ์ที่เหมาะสมสำหรับระบบรถบัสไฟฟ้า ระบบจำหน่ายไฟฟ้า รวมถึงการศึกษาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นเมื่อมีการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้กรณีศึกษาอำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา มีรายละเอียดดังนี้

2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับยานยนต์ไฟฟ้า

2.2.1 ประวัติความเป็นมาของยานยนต์ไฟฟ้า

เริ่มมีการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าโดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ที่ไม่สามารถชาร์จใหม่ได้ครั้งแรกในปี 1983 ก่อนที่แบตเตอรี่จะได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในยานยนต์ไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์ ปลายศตวรรษที่ 19 ด้วยการผลิตแบตเตอรี่ที่สามารถชาร์จไฟได้ที่มีขนาดใหญ่ ยานยนต์ไฟฟ้ากลายเป็นที่นิยมในการใช้งานอย่างกว้างขวาง รถยนต์ส่วนบุคคลเริ่มมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนไปเป็นรถยนต์ไฟฟ้า เช่น รถแท็กซี่ รูปที่ 2.1 แสดงรถแท็กซี่ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในนิวยอร์ก ประมาณปี ค.ศ. 1901 ประสิทธิภาพเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า รูปที่ 2.2 แสดงรถคันแรกที่วิ่งด้วยความเร็วมากกว่า 96 km/hr เมื่อนักแข่งเรือชาวเบลเยียมชื่อ Camille Jenatzy ขับรถไฟฟ้าที่เรียกว่า La Jamais Contente มีสถิติความเร็วใหม่ที่ 106 km/hr ทำให้กลายเป็นรถคันแรกที่วิ่งเกิน 100 km/hr.

ในช่วงต้นของศตวรรษที่ 20 ยานยนต์ไฟฟ้าเป็นคู่แข่งทางการตลาดที่แข็งแกร่งสำหรับการขนส่งทางถนนในอนาคต ยานยนต์ไฟฟ้ามีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้งานได้ทันที ในขณะที่เครื่องยนต์สันดาปภายในมีช่วงที่ไม่มีมีความน่าเชื่อถือ คือ มีควันที่มีกลิ่นเหม็นและมีเสียงดัง ยานยนต์ประเภทอื่น ๆ เช่น รถเครื่องยนต์ไอน้ำ รถพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งจะมีประสิทธิภาพต่ำด้านความร้อนของเครื่องยนต์ เมื่อใช้งานเป็นเวลานานทำให้เครื่องยนต์ร้อนมาก



รูปที่ 2.1 แท็กซี่ในนิวยอร์กประมาณปี ค.ศ. 1901 ที่เป็นยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่
(Larminie and Lowry, 2012)



รูปที่ 2.2 รถ La Jamais Contente คันแรกที่มีสถิติความเร็ว 65.79 mph ในปี 1899²

² ที่มา: <http://www.patentlyinteresting.com/april-29.html>, เข้าถึงเมื่อ 19 มิถุนายน 2563

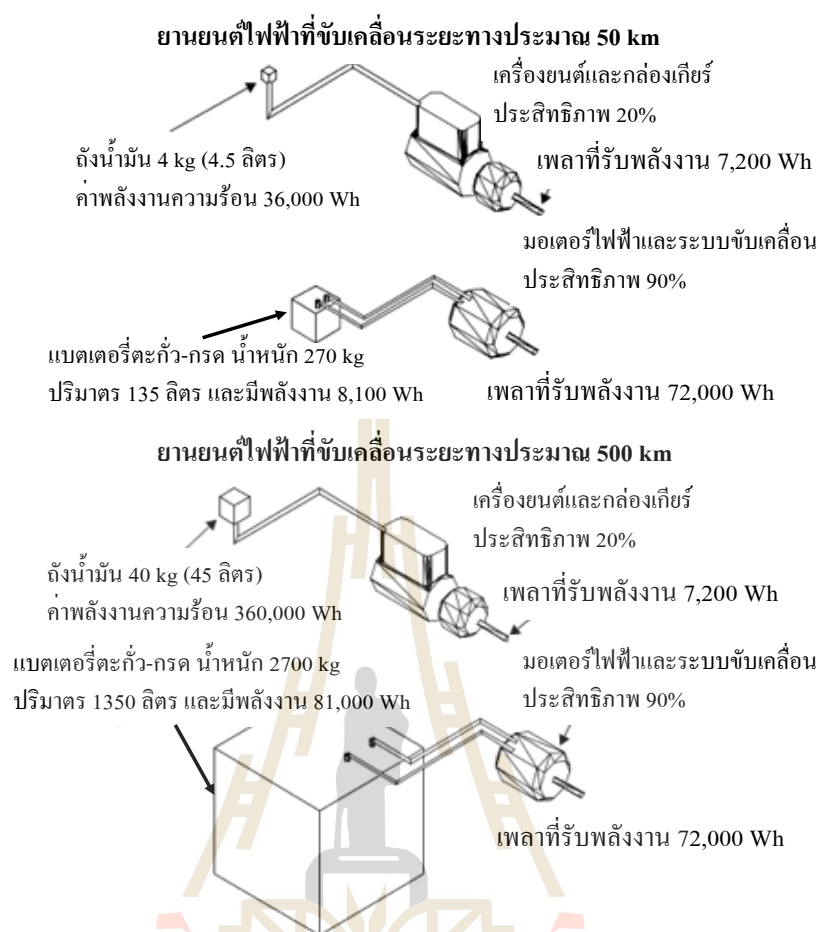
ในปี ค.ศ. 1920 มีการผลิตรถยนต์ไฟฟ้าจำนวนหลายแสนคันเพื่อใช้เป็นรถยนต์ รถตู้ รถแท็กซี่ รถรับส่ง และรถประจำทาง อย่างไรก็ตาม แม้จะมีสัญญาณการใช้นานยนต์ไฟฟ้าในช่วงต้น น้ำมันจะราคาถูกลงเมื่อมีการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าอย่างกว้างขวาง และต่อมามีการเริ่มใช้รถเครื่องยนต์สันดาปภายในมากขึ้น (คิดค้นในปี 1911) เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจมากขึ้นสำหรับการใช้งานยานยนต์ มีผลกระทบกับตลาดหลักสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่แบบชาร์จไฟฟ้าได้

ยานยนต์ไฟฟ้ามีข้อจำกัดหลายอย่างเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน ปัจจุบันรถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในสามารถเข้าใจได้ง่ายเมื่อเปรียบเทียบพลังงานเฉพาะจากน้ำมันปิโตรเลียมกับพลังงานจากแบตเตอรี่ พลังงานเฉพาะของเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในแตกต่างกันไป ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 9000 Wh/kg ในขณะที่พลังงานจำเพาะของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด อยู่ที่ประมาณ 30 Wh/kg เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน จะเห็นว่าน้ำมันเบนซิน 4.5 L มีมวลประมาณ 4 kg จะทำให้รถยนต์ทั่วไปวิ่งได้ระยะทาง 50 km และการเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าในจำนวนเดียวกันต้องใช้แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ที่มีมวลประมาณ 270 kg และด้วยเหตุนี้เครื่องยนต์เบนซินซึ่งเก็บน้ำมันเชื้อเพลิงเพียง 4.5 L มีมวลประมาณ 4 kg เท่านั้น ในขณะที่แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ต้องใช้แบตเตอรี่น้ำหนักถึง 270 kg ในรูปที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานจากน้ำมันและแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

อีกปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นกับแบตเตอรี่ คือ เวลาที่ใช้ในการประจุไฟฟ้า โดยปกติแล้วใช้เวลาหลายชั่วโมงสำหรับการประจุแบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรด ขณะที่รถยนต์ใช้น้ำมันเบนซิน 45 L ที่สามารถนำไปเติมได้ภายในเวลาประมาณ 5 นาที เวลาในการชาร์จแบตเตอรี่รุ่นใหม่ ๆ สามารถทำให้ลดลงได้เหลือแค่ 15 นาที แต่นี่ก็ยังคงเป็นเวลานานกว่าที่ใช้ในการเติมน้ำมัน

ในช่วงต้นของการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้า แนวคิดนี้ได้รับการพัฒนาจากยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในที่ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าร่วมกับมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งมีการสร้างขึ้นในช่วงต้นศตวรรษที่ 20 รถไฮบริดเป็นหนึ่งในแนวคิดที่มีแนวโน้มมากที่สุดที่สามารถทำให้มีผลกระทบต่อการใช้งานของยานยนต์ไฟฟ้าได้ โตโยต้าพริอุสเป็นรถยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด ที่มีศักยภาพสำหรับการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด และแสดงให้เห็นถึงความสำคัญสำหรับการพัฒนาในอนาคต

□



รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบพลังงานจากน้ำมันและแบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรด
(ดัดแปลงจาก Larminie and Lowry, 2012)

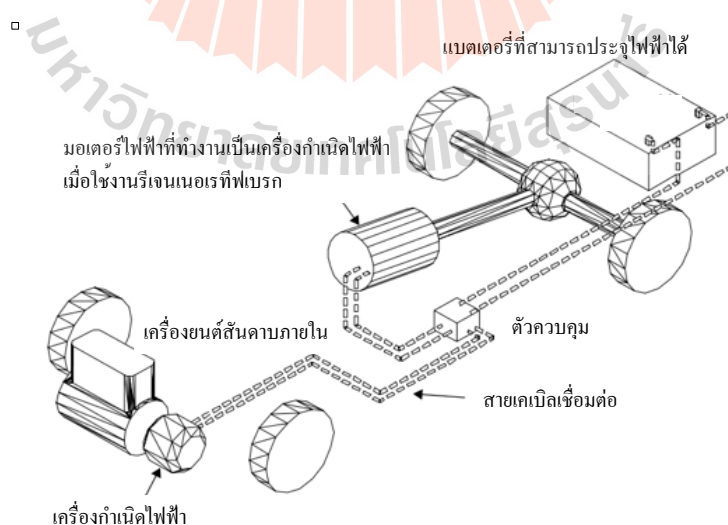
2.2.2 ประเภทของยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ในปัจจุบัน

การพัฒนาแนวคิดการสร้างยานยนต์ไฟฟ้าในศตวรรษที่ 19 และ 20 ถูกนำไปใช้ในการผลิตยานยนต์ไฟฟ้ารูปแบบใหม่ โดยมีพื้นฐานของยานยนต์ไฟฟ้า 6 ประเภท สามารถแบ่งได้ดังนี้ ประเภทแรก: ยานยนต์ไฟฟ้าแบตเตอรี่แบบดั้งเดิม ประเภทที่สอง: ยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริดเป็นการรวมแบตเตอรี่และเครื่องยนต์สันดาปภายในเข้าด้วยกัน และมีแนวโน้มที่มีการใช้งานมากที่สุดในช่วงหลายปีข้างหน้า ประเภทที่สาม: ยานยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงทดแทนจากแหล่งพลังงานอื่นโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงหรือแบตเตอรี่แบบโลหะ ประเภทที่สี่: ยานยนต์ที่รับพลังงานไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าหรือโครงข่ายไฟฟ้า ประเภทที่ห้า: ยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ ประเภทที่หก: ยานยนต์ไฟฟ้าที่เก็บพลังงานโดยใช้วิธีอื่น เช่น วงล้อกักเก็บพลังงาน (Flywheels) หรือ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Super Capacitors) เป็นการใช้งานจากแหล่งพลังงานอื่น ๆ

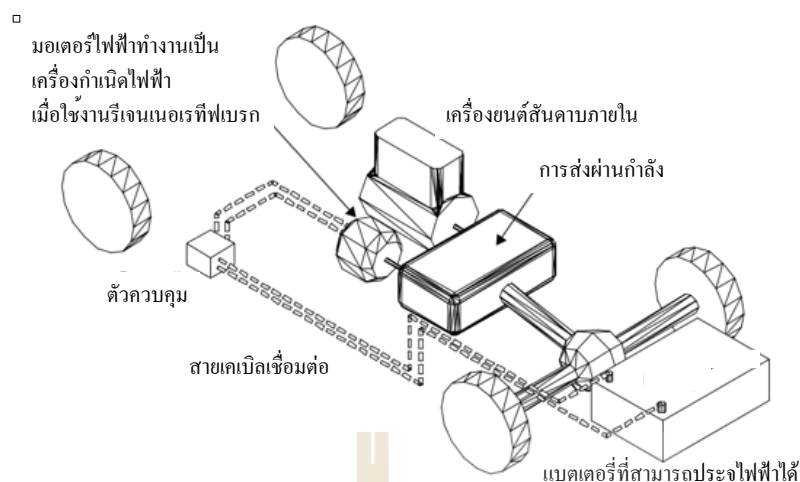
1) เครื่องยนต์สันดาปภายใน และยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด

ยานยนต์แบบไฮบริดนั้นมีแหล่งพลังงานสองแห่งขึ้นไป และมีรูปแบบที่สามารถสร้างขึ้นได้เป็นจำนวนมาก ชนิดของยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริดที่พบมากที่สุด คือ รถเครื่องยนต์สันดาปภายในที่มีแบตเตอรี่ มอเตอร์ไฟฟ้า และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พื้นฐานสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด มี 2 รูปแบบ คือ ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดแบบอนุกรม และยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดแบบขนาน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5

ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดแบบอนุกรม ขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ไฟฟ้าที่รับไฟฟ้ามาจากแบตเตอรี่ หรือจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์สันดาปภายในหรือจากทั้งสองอย่างใดก็ตามในทั้งสองกรณีแรงขับทั้งหมดมาจากมอเตอร์ไฟฟ้า ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดแบบขนาน สามารถขับเคลื่อนโดยเครื่องยนต์สันดาปภายใน ทำงานโดยตรงผ่านระบบเกียร์ไปยังล้อหรือมอเตอร์ไฟฟ้าอย่างน้อย 1 ตัว หรือทั้งมอเตอร์ไฟฟ้าและเครื่องยนต์สันดาปใน ทั้งในยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดแบบอนุกรมและแบบขนาน แบตเตอรี่สามารถชาร์จโดยเครื่องยนต์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในขณะที่รถเคลื่อนที่เพื่อให้แบตเตอรี่ไม่ต้องมีขนาดใหญ่เช่นเดียวกับในยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่อย่างเดียว นอกจากนี้ทั้งสองประเภทใช้การเบรกสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การชะลอความเร็วและชาร์จแบตเตอรี่ ข้อเสียหลักของรถไฮบริดแบบอนุกรม คือ พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดต้องผ่านทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและมอเตอร์ ซึ่งมีค่าใช้จ่ายของระบบเพิ่มขึ้นอย่างมาก ยานยนต์ไฮบริดแบบขนานมีข้อจำกัดสำหรับการใช้งาน อุปกรณ์ไฟฟ้าอาจมีขนาดเล็กและราคาถูกกว่าเนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนรูปแบบของพลังงาน



รูปที่ 2.4 ยานยนต์ไฮบริดแบบอนุกรม (คัดแปลงจาก Larminie and Lowry, 2012)



รูปที่ 2.5 ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริดแบบขนาน (ดัดแปลงจาก Larminie and Lowry, 2012)

2) ยานยนต์ที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิง

หลักการพื้นฐานของยานยนต์ที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิง ต้องใช้เซลล์เชื้อเพลิงจำนวนมากเช่นเดียวกับแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า แต่มีเซลล์เชื้อเพลิง หรือแบตเตอรี่อากาศโลหะแทนแบตเตอรี่ไฟฟ้าแบบชาร์จไฟได้ บริษัทยานยนต์รายใหญ่ ได้พัฒนารถยนต์ขับเคลื่อนด้วยเซลล์เชื้อเพลิงที่ทันสมัย ตัวอย่างเช่น บริษัทเดมเลอร์ไครสเลอร์ได้พัฒนารถยนต์เซลล์เชื้อเพลิงที่ขึ้นอยู่กับชุดการติดตั้งเซลล์เชื้อเพลิงบัลลาร์ด หนึ่งในนั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.6 รถเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้ไฮโดรเจนที่เก็บอยู่ในรูปของเหลวเป็นพลังงานที่ป้อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 2.6 รถเซลล์เชื้อเพลิง ในปี 1999 (Larminie and Lowry, 2012)

ยานยนต์ที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงนั้นคล้ายกับยานยนต์แบบเครื่องยนต์สันดาปภายใน มีความเร็วสูงสุดที่ 144 km/hr. และวิ่งได้ 450 km เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนจะถูกเก็บเป็นของเหลว แม้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงจะถูกคิดค้นขึ้นเมื่อประมาณปี ค.ศ. 1840 แต่เทคโนโลยีนี้ไม่คุ้นเคยสำหรับคนส่วนใหญ่ ปัญหาสำคัญเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิง คือ โดยทั่วไปแล้วต้องใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจน นี้จะสามารถเก็บไว้ในถังเก็บแม้ว่าจะไม่ง่าย ทางเลือกหนึ่งคือการแทนไฮโดรเจนที่เป็นเชื้อเพลิงด้วยเมทานอล ซึ่งเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้กับรถเซลล์เชื้อเพลิง

3) ยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แหล่งจ่ายจากระบบไฟฟ้า

รถเมล์และรถรางถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในการขนส่งในเมืองใหญ่ ๆ เป็นรูปแบบการขนส่งที่มีประสิทธิภาพและยังคงใช้งานอยู่ในบางเมือง โดยปกติไฟฟ้าจะถูกป้อนจากสายไฟฟ้าเหนือศีรษะของระบบจำหน่าย และใช้แบตเตอรี่ขนาดเล็กบนรถเพื่อให้สามารถใช้งานได้ในช่วงที่ จำกัด โดยไม่ต้องใช้ไฟฟ้าจากระบบ ต่อมา มีการยกเลิกการให้บริการเพราะว่าค่าใช้จ่ายเป็นเกณฑ์ที่สำคัญกว่าการคำนึงถึงสภาพแวดล้อมและความกังวลเกี่ยวกับก๊าซเรือนกระจก เซลล์เชื้อเพลิงฟอสซิลมีราคาถูกและระบบส่งจ่ายไฟฟ้าเหนือศีรษะได้รับการพิจารณาว่าไม่น่าดู ราคาแพง และมีภาระการบำรุงรักษา รถรางจะได้รับการพิจารณาเพื่อพัฒนาให้สามารถแทนที่รถยนต์ส่วนตัว เมื่อยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายในหยุดการพัฒนา และมลพิษในเมืองใหญ่มีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นอีกครั้ง ยานยนต์ไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนโดยรางจ่ายไฟฟ้าเหนือศีรษะสามารถสร้างผลกระทบที่เป็นประโยชน์ต่อการขนส่งที่ทันสมัย และแนวคิดนี้ไม่ควรมองข้ามโดยนักออกแบบ

4) ยานยนต์ที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์

ยานยนต์พลังงานแสงอาทิตย์ เช่น ฮอนด้าคริมที่ได้รับรางวัลระดับโลก ซึ่งยังมีราคาแพง และทำงานได้ดีในพื้นที่ที่มีแสงแดดสูงเท่านั้น รถแสงอาทิตย์ประสบความสำเร็จในการใช้งานที่วิ่งด้วยความเร็วเฉลี่ย 85 km/hr. แม้ว่าจะไม่น่าเป็นไปได้ว่ารถคันนี้จะเป็นข้อเสนอที่เป็นประโยชน์สำหรับการใช้งานในทุกวัน แต่ประสิทธิภาพของการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นตลอดเวลาในขณะที่ค่าใช้จ่ายลดลง แนวคิดของการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งสามารถห่อหุ้มไว้บนพื้นผิวของรถเพื่อเก็บพลังงานไปไว้ในแบตเตอรี่ของรถโดยสารที่มีปริมาณมากขึ้นเป็นความคิดที่เป็นไปได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อต้นทุนลดลงและประสิทธิภาพอาจการเพิ่มขึ้นในอนาคต

5) ยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ล้อตุ้มน้ำมัน และตัวเก็บประจุยิ่งยวด

อุปกรณ์เก็บพลังงานทางเลือกต่าง ๆ เช่น ล้อตุ้มน้ำมัน และตัวเก็บประจุยิ่งยวด ตามกฎทั่วไปทั้งสองอุปกรณ์เหล่านี้มีพลังงานเฉพาะสูงซึ่งหมายความว่า สามารถใช้และให้พลังงานได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม ปริมาณพลังงานที่สามารถจัดเก็บอยู่ได้ค่อนข้างน้อย กล่าวอีกนัยหนึ่งแม้ว่าจะมีความหนาแน่นของกำลังงานที่ดีแต่มีความหนาแน่นพลังงานต่ำ ยานยนต์ไฟฟ้า

ชนิดใหม่ โดยใช้ล้อยูนก้ำล่างเป็นอุปกรณ์เก็บพลังงานได้รับการออกแบบโดยจอห์นแพร์รี สหราชอาณาจักร รถรางที่มีล้อยูนก้ำล่างจะทำงานโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.7 นักประดิษฐ์ได้เสนอการติดตั้งทั้งล้อและกระปุกเกียร์เข้ากับรถขับเคลื่อนแบบธรรมดา ประโยชน์คือ เมื่อแบตเตอรี่ไม่พร้อมใช้งาน ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะสามารถให้พลังงานได้อย่างรวดเร็ว และการจัดเรียงของระบบจะสามารถทำให้มีประสิทธิภาพที่ดีซึ่งจะช่วยลดน้ำหนักแบตเตอรี่ได้



รูปที่ 2.7 ยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ล้อยูนก้ำล่างเพื่อเก็บพลังงาน (Larminie and Lowry, 2012)

รถยนต์ทดลองที่ใช้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเพื่อเก็บพลังงานได้รับการทดสอบขึ้น โดยใช้เป็นส่วนหนึ่งของรถไฟฟ้าแบบไฮบริด แหล่งพลังงานหลักสามารถใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในโดยส่วนใหญ่แล้วตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะใช้งานกับรถบัสหรือรถไฟฟ้าเพื่อจ่ายพลังงานเมื่อมีความต้องการพลังงานสูง จุดประสงค์ของตัวเก็บประจุ คือ การช่วยให้ฟื้นฟูพลังงานจลน์เมื่อยานยนต์ช้าลงและเพื่อเพิ่มพลังงานให้สูงสุดเมื่ออยู่ในช่วงเวลาเร่งด่วน ซึ่งจะช่วยให้เครื่องยนต์หรือเซลล์เชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กสามารถขับเคลื่อนยานยนต์นั้นได้

อนาคตของยานยนต์ไฟฟ้านั้นมีความน่าสนใจมากขึ้น เมื่อความจำเป็นในการใช้ยานยนต์เพื่อลดมลพิษทางอากาศเป็นเรื่องที่สำคัญ เทคโนโลยีส่วนใหญ่ในการผลิตรถยนต์ประเภทนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นและมีต้นทุนที่สูง อย่างไรก็ตาม ในหลาย ๆ กรณีต้นทุนมักจะลดลงตามการพัฒนาของเทคโนโลยีและความต้องการที่เพิ่มขึ้นซึ่งช่วยให้สามารถผลิตได้เป็นปริมาณมาก

2.3 รถไฟฟ้าสาธารณะ

2.3.1 ประวัติความเป็นมาของยานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะ

ในศตวรรษที่ 17 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปี ค.ศ. 1661 Blaise Pascal ได้คิดค้นวิธีการขนส่งสาธารณะครั้งแรกในโลก ระบบขนส่งสาธารณะแบบราคาถูกลำหรับรถโดยสารสาธารณะของปารีส เป็นที่รู้จักกันในชื่อ รถโดยสารสาธารณะ Pascal ได้รับการอนุญาตจากกษัตริย์หลุยส์ที่ 14 เพื่อเปิดเส้นทางไปยังแคว้นปัววีร์ ลักเซมเบิร์ก ในวันที่ 18 มีนาคม ค.ศ. 1662 และมีค่าใช้จ่ายในการเดินทางของเส้นทางนี้เท่ากับค่าเนื้อสัตว์ 1 ปอนด์ (Maniere, 2011; Blackburn, 2005) อย่างไรก็ตาม หลังจากผ่านไป 15 ปี เส้นทางนี้ก็ได้อพยพยกเลิกไป

รถบัสที่ชื่อ Omnibuses ได้ปรากฏอีกครั้งในปี ค.ศ. 1826 โดยชายหนุ่มคนหนึ่งชื่อ Stephen Bureau ต้องการนำพนักงานจากเมืองหนึ่งเพื่อไปทำงานอีกเมืองหนึ่ง ในเวลาเดียวกันพันเอกในกองทัพบาไปเลี่ยนชื่อ Stanislas Baudry เป็นเจ้าของโรงงานแป้งในย่าน Richebourg มีความคิดที่จะเปิดบริการการขนส่งเพื่อนำผู้คนไปยังสถานประกอบการ ทำให้ได้รับอนุญาตจากเทศบาลเมืองเพื่อเปิดเส้นทางรถประจำทางแห่งแรก มีการขยายการดำเนินงานเพิ่มขึ้นในกรุงปารีส ตั้งแต่วันที่ 30 มกราคม ค.ศ. 1828 โดยการเปิดตัว 1 Entreprise Generale des Omnibus เป็นรถโดยสารที่มีค่าโดยสารถูกกว่ารถแท็กซี่มาก (Maniere, 2011) สามารถรับส่งผู้โดยสารได้ถึง 14 คน ผ่านมาจนถึงปี ค.ศ. 1836 มีผู้ประกอบการรถโดยสารทั้งหมด 16 รายในปารีส ครอบคลุมเส้นทาง 35 เส้นทาง (Rodrigue, 2014) นวัตกรรมถูกนำไปใช้ที่ลอนดอนในปี ค.ศ. 1829 โดย George Shillibeer รูปที่ 2.8 แสดงรถโดยสาร Omnibus ที่มีผู้โดยสารขึ้นนั่งมากกว่า 22 คน (Knowledge of London, 2014)



รูปที่ 2.8 รถประจำทาง Omnibus ของ Shillibeer (Knowledge of London, 2014)

ในช่วงต้นศตวรรษที่ 19 นำความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีเกี่ยวกับการพัฒนา รูปแบบแรกของแบตเตอรี่ไฟฟ้าเคมี ในปี ค.ศ. 1800 Alessandro Volta ชาวอิตาลี ทำการทดลองและ แสดงให้เห็นว่าพลังงานสามารถเก็บไว้ในทางเคมีได้ ต่อมาในปี ค.ศ. 1821 Faraday ใช้แบตเตอรี่ ของ Volta ในการทดลองเพื่อแสดงหลักการของมอเตอร์ไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยแสดงให้เห็น ในปี ค.ศ. 1831 ปรากฏการณ์การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้านี้ได้สร้างสะพานเชื่อมระหว่าง กระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ให้เริ่มต้นขั้นตอนแรกยานยนต์มอเตอร์ไฟฟ้าและเครื่องกำเนิด ไฟฟ้า ความพยายามปรับปรุงเทคโนโลยีแบตเตอรี่และการประจุไฟฟ้าในปลายปี ค.ศ. 1800 เทคโนโลยีใหม่ ๆ กระตุ้นให้เกิดนวัตกรรมที่เรียกว่า การเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Braking) แสดงครั้งแรกในกรุงปารีสในปี ค.ศ. 1897 การเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ คือ ความสามารถ ของมอเตอร์ไฟฟ้าในการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าสำหรับประจุไฟฟ้า ให้กับแบตเตอรี่เมื่อรถเบรก ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมาการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ กลายเป็นอุปกรณ์ มาตรฐานที่มีอยู่ในรถยนต์ไฟฟ้ารุ่นแรกในศตวรรษที่ 18 (Westbrook, 2001)

การประดิษฐ์มอเตอร์ไฟฟ้า แบบ Traction สร้างการปฏิวัติการเดินทางในเมือง โดยพัฒนามาเป็นระบบสาธารณะเป็นรถราง (Trams) และ รถโทรลลีย์บัส (Trolleybuses) รถบัส แบบรถราง คือ รถที่วิ่งบนรางคงที่ ขณะที่รถโทรลลีย์บัสเป็นรถที่มีล้อสำหรับเคลื่อนที่ ทั้งสองแบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าผ่านสายไฟฟ้าเหนือศีรษะ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (Veasey, 2014; Courtenay, 2014)

ในปี ค.ศ. 1882 Werner von Siemens ผู้ก่อตั้ง บริษัท ซีเมนส์ ได้คิดค้นรถบัสไฟฟ้า ขนส่งสาธารณะ ชื่อว่า Elektromote ซึ่งเป็นรถบัสรูปแบบแรกของโลกที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงาน ไฟฟ้าจากสายส่งเหนือศีรษะ สามารถวิ่งได้ด้วยความเร็ว 30 km/hr. และมีผู้โดยสารทั้งหมด 20 คน (Siemens, 2014) ในขณะที่รถรางไฟฟ้าสายแรกเปิดใช้งานในปี ค.ศ. 1888 ในเมืองริชมอนด์ ประเทศสหรัฐอเมริกา มีความเร็วในการเดินทางเป็น 3 เท่าของรถม้า รถรางสามารถดึงดูดกิจกรรม เศรษฐกิจ และเสริมสร้างการพัฒนาที่อยู่อาศัยอย่างรวดเร็ว (Rodrigue, 2014) รูปที่ 2.10 แสดงรถ บัสไฟฟ้า Elektromote ในปี 1882 และมียานยนต์ไฟฟ้าสาธารณะอีกประเภทที่ไม่แพร่หลายมาก ที่เรียกว่ายานยนต์ไฟฟ้าแบบเคเบิล (Cable cars) ถูกคิดค้นในปี ค.ศ. 1873 เพื่อปีนขึ้นเนินเขา ตั้งแต่ นั้นมารถรางและรถโทรลลีย์บัสถูกใช้งานกันอย่างแพร่หลายในโลกปัจจุบัน รวมทั้งรถไฟและ รถไฟฟ้าใต้ดินมีส่วนสำคัญต่อการขนส่งสาธารณะที่ใช้ไฟฟ้า



(ก) รถรางไฟฟ้า



(ข) รถโทรลลีย์บัส

รูปที่ 2.9 รถขนส่งสาธารณะไฟฟ้า (Hutchinson, 2005; Veasey, 2014)



รูปที่ 2.10 รถบัสนไฟฟ้า Elektromote ในปี 1882 (Siemens, 2014)

2.3.2 รถบัสนไฟฟ้าในปัจจุบัน

การขนส่งสาธารณะในรูปแบบยานยนต์ไฟฟ้าไม่ใช่ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีที่เพิ่งเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม ไม่ว่าจะเป็นบนทางรถไฟก็อาจถือได้ว่าเป็นการพัฒนาที่ทันสมัย สิ่งที่น่าแปลกใจที่สุดก็คือ รถยนต์ส่วนตัวในช่วงต้นศตวรรษที่ 19 ตามความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีของแบตเตอรี่ แต่ปัญหาของการเปลี่ยนสิ่งนี้ไปสู่นานยนต์ที่มีขนาดใหญ่กว่ายังไม่ได้ได้รับการพัฒนาขึ้น เหตุผลหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหานี้อาจเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นในวันนี้แม้จะต้องเผชิญกับการพัฒนาในเรื่องของแบตเตอรี่เพื่อให้สามารถใช้งานได้ยาวนานขึ้นและมีการประจุไฟฟ้าที่รวดเร็ว

ปัจจุบันแบตเตอรี่มีประสิทธิภาพการใช้งานในรถบัสนไฟฟ้า ประกอบด้วยชุดแบตเตอรี่ขนาดใหญ่ที่ให้พลังงานตลอดทั้งวันสำหรับการทำงานหรืออย่างน้อยก็ถึงจุดหนึ่งที่รถบัสนสามารถหยุดชาร์จได้ รถโดยสารไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ ในหลายประเทศถูกผลิตขึ้นมาใช้งานตามความเหมาะสมหรือความต้องการของผู้ใช้งาน อย่างไรก็ตาม มีหลายผู้ผลิตรถบัสนไฟฟ้าให้บริการในทั่วโลก มีรูปแบบแตกต่างกันไปตามการใช้งาน ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของรถบัสนไฟฟ้าจากผู้ผลิต บริษัท BYD เป็นผู้ผลิตรถบัสนของจีนที่ใหญ่ที่สุดในโลกซึ่งเป็นรถบัสนไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ก่อตั้งขึ้นในปี 2010 และปัจจุบันได้ผลิตรถประจำทางไฟฟ้าสำหรับหลาย ๆ เมืองทั่วโลก รถโดยสารไฟฟ้ารุ่นแรกที่ชื่อว่า K9 ได้ถูกทดสอบและใช้งาน มีความยาว 12.25 m ความจุผู้โดยสาร 38 คน กำลังไฟฟ้าสำหรับประจุไฟฟ้า 80 kW ในเวลา 4-5 ชั่วโมง ความจุแบตเตอรี่ 324 kWh และมีอัตราการใช้พลังงาน 1.3-1.5 kWh/km (BYD - Build Your Dreams, 2014)

VDL Bus & Coach ผลิตรถบัสไฟฟ้ารุ่น SLE-120 Electric มีแบตเตอรี่ขนาด 216 kWh สามารถจุผู้โดยสารได้ 75 คน และมีระบบประจุไฟฟ้าเร็วที่กำลังไฟฟ้า 420 kW (VDL Bus & Coach, 2020) บริษัท Proterra เป็นบริษัทสัญชาติอเมริกันที่ผลิตแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้า โดยมีรถบัสไฟฟ้ารุ่นแรก คือ EcoRide35 และเป็นครั้งแรกของโลกที่เป็นรถบัสไฟฟ้าที่มีการประจุไฟฟ้าแบบรวดเร็ว และมีการผลิตรถบัสไฟฟ้ารุ่น CATALYST XR แบตเตอรี่ขนาด 220 kWh ซึ่งสามารถประจุไฟฟ้าภายในเวลาไม่ถึง 16 นาที กำลังไฟฟ้า 166 kW และมีอัตราการใช้พลังงานที่ 0.925 - 1.13 kWh/km (Proterra, 2014) บริษัท Solaris Bus & Coach เป็นบริษัทสัญชาติโปแลนด์ในปี ค.ศ. 1994 ซึ่งผลิตและจำหน่ายรถบัส รถโค้ช (Coach) รถโทรลลีย์บัส และรถรางไฟฟ้า ในปี ค.ศ. 2011 ได้เปิดตัวรถบัสไฟฟ้าคันแรก คือ Urbino 8.9 LE electric ต่อมามีการพัฒนาเป็นรถบัส Urbino 12 electric มีขนาดชุดแบตเตอรี่และระบบประจุไฟฟ้าที่ปรับได้ตามความต้องการของลูกค้า ระบบประจุไฟฟ้าเร็วที่กำลังไฟฟ้า 450 kW ภายในเวลา 5 นาที (Solaris Bus & Coach SA., 2014)

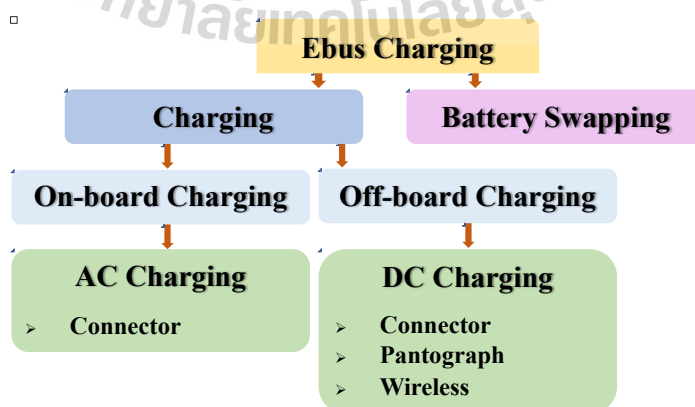
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติรถบัสไฟฟ้าที่ใช้งานในปัจจุบัน

Type	BYD	VDL Bus & Coach	Proterra	Solaris Bus & Coach	ABB	Volvo
Model	BYD K9	SLE-120 Electric	CATALYST XR	Urbino 12 Electric	TOSA E-bus	VOLVO 7900 ELECTRIC
Length	12.25 m	12 m	12.95 m	12 m	18.75 m	12 m
Weight	18,000 kg	18,700 kg	19,800 kg	17,300 kg	-	18,000 kg
Passenger capacity	38 people	75 people	40 people	70 people	133 people	83 people
Charging	Normal	Flash, Fast	Fast, Normal	Flash, Fast	Flash, Fast, Normal	Fast
Charging Power	80 kW	420 kW, 320 kW	166 kW, 72 kW	450 kW, 70 kWh	600 kW, 400 kW, 45 kW	150-300 kW
Charging time	4.5-5 hrs.	-	16 min., 2.8 hrs.	4 min., 1-2 hrs.	20 s., 4-5 min., 30 min.	6 min.
Electric Motor	150 kW × 2	160 kW × 2	190 kW × 2	160 kW × 2	-	160 kW × 2
Battery Capacity	324 kWh	216 kWh	220 kWh	125 kWh	73 kWh	76 kWh
Energy Consumption	1.3-1.5 kWh/km	-	0.925- 1.13 kWh/km	-	-	-

รถบัสไฟฟ้า TOSA (Trolleybus Optimisation Systeme du Alimentation) เป็นรถบัสไฟฟ้าที่ทำงานโดยไม่มีสายไฟฟ้าเหนือศีรษะ (TOSA, 2014) แนวคิดของรถบัสนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นในความร่วมมือของหน่วยงานต่าง ๆ เช่น ABB และ EPFL มีความยาว 18.75 m สามารถบรรทุกผู้โดยสารได้ถึง 133 คน ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไททาเนท มีระบบการประจุไฟฟ้าแบบเร็วยิ่งภายในเวลา 20 วินาที ที่กำลังไฟฟ้า 600 kW และบริษัท Volvo เป็นผู้จัดจำหน่ายรถยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริดที่มีชื่อเสียงและพัฒนารถบัสไฟฟ้ารุ่น VOLVO 7900 ELECTRIC ความยาว 12 m ระบบประจุไฟฟ้าเร็ว ที่กำลังไฟฟ้า 300 kW ภายในระยะเวลา 6 นาที (Volvo Group, 2014; ABB, 2014)

2.4 การประจุไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้า

การประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า คือ การเชื่อมต่อยานยนต์ไฟฟ้าเข้ากับแหล่งจ่ายไฟเพื่อชาร์จแบตเตอรี่คล้ายกับการเติมน้ำมันเชื้อเพลิง เมื่อใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าจะทำให้พลังงานที่เก็บไว้ในแบตเตอรี่ลดลง และหากแบตเตอรี่หมดลง ยานยนต์ไฟฟ้าจะไม่สามารถขับเคลื่อนได้ ในกรณีของยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้แบตเตอรี่อย่างเดียวจะไม่สามารถขับเคลื่อนได้อีก ในทางกลับกันยานยนต์ไฟฟ้าแบบปลั๊กอินไฮบริดยังคงสามารถใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อขับเคลื่อนต่อไปได้แต่จะเสียค่าใช้จ่ายด้านน้ำมันเชื้อเพลิงมากกว่าการใช้ไฟฟ้า ดังนั้น ผู้ใช้ยานยนต์ไฟฟ้าต้องประจุแบตเตอรี่เป็นระยะ ๆ การประจุไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้าจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไปตาม ชนิดของยานยนต์ไฟฟ้า ระดับของกำลังงานไฟฟ้าและวิธีการประจุไฟฟ้า การจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับรถบัสไฟฟ้าเป็นส่วนที่สำคัญ เทคโนโลยีการประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภท ได้แก่ การประจุไฟฟ้าแบบผ่านตัวนำไฟฟ้า (Conductive charging) และการประจุไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ (Inductive charging) รูปที่ 2.11 แสดงรูปแบบการประจุไฟฟ้าให้กับรถบัสไฟฟ้า

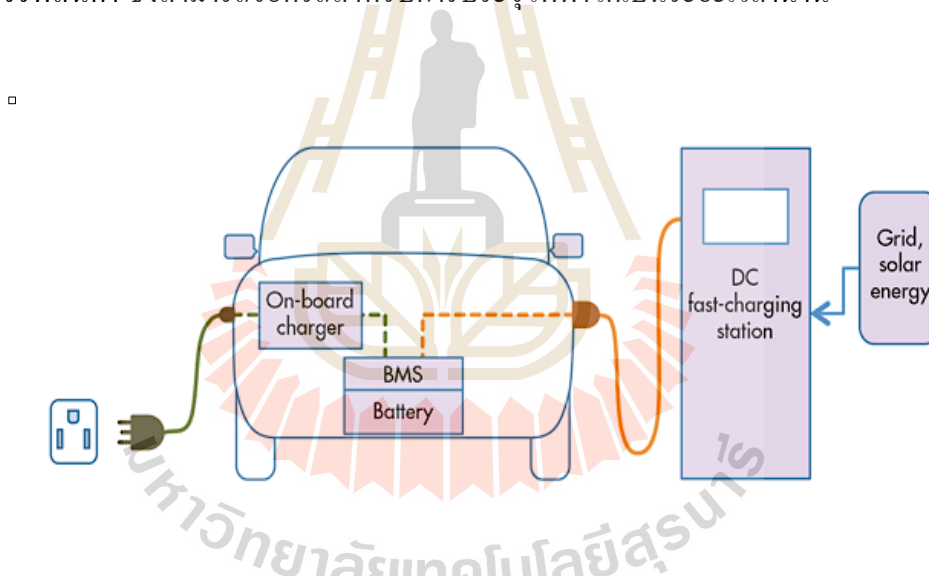


รูปที่ 2.11 โครงสร้างระบบการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีต่าง ๆ

2.4.1 การประจุไฟฟ้ากระแสสลับแบบหัวชาร์จสำหรับรถบัไฟฟ้า

การประจุไฟฟ้าแบบผ่านตัวนำไฟฟ้า คือ การชาร์จแบตเตอรี่ โดยการต่อสายไฟเข้ากับแหล่งจ่ายไฟโดยตรงผ่านสายเคเบิล หรือสายชาร์จ วิธีนี้เป็นการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำไหลจากแหล่งจ่ายไฟผ่านสายเคเบิลเข้าสู่แบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้าซึ่งเป็นรูปแบบของการประจุไฟฟ้าที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน คิดตั้งได้ง่ายและมีประสิทธิภาพสูงสามารถใช้งานได้ทั้งระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) และกระแสตรง (DC)

การประจุไฟฟ้าแบบกระแสสลับ (AC Charging) คือ การประจุไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับไปยังยานยนต์ไฟฟ้า ตัวชาร์จที่ติดตั้งอยู่ภายในรถจะแปลงไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นกระแสตรงก่อนจึงป้อนเข้าสู่แบตเตอรี่ รูปที่ 2.12 แสดงการประจุไฟฟ้าแบบกระแสสลับของยานยนต์ไฟฟ้า การประจุไฟฟ้ากระแสสลับสามารถทำงานได้กับการใช้พลังงานที่ค่อนข้างต่ำที่ 16-32 A การประจุไฟฟ้ากระแสสลับเหมาะสมกับการใช้พลังงานไฟฟ้าในบ้าน อาคาร สำนักงาน และห้างสรรพสินค้า ซึ่งสามารถจอดรอสำหรับการประจุไฟฟ้าได้เป็นระยะเวลานาน



รูปที่ 2.12 การประจุไฟฟ้าแบบผ่านตัวนำไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า⁴

การชาร์จในระบบไฟฟ้ากระแสสลับของเครื่องชาร์จรถบัไฟฟ้า นั้น ระบบการชาร์จจะเป็นการนำระบบไฟฟ้า 1 เฟส หรือระบบไฟฟ้า 3 เฟส ต่อเข้ากับหัวชาร์จและเสียบเข้ากับเต้ารับของตัวรถบัไฟฟ้าโดยตรง ซึ่งหัวชาร์จจะมีมาตรฐานกำกับอยู่ตามประเทศของผู้ผลิตรายนั้น รูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างหัวชาร์จและเครื่องชาร์จสำหรับการประจุไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับรถบัไฟฟ้า ซึ่งเป็นประประจุไฟฟ้าแบบธรรมดา รูปที่ 2.14 แสดงการประจุไฟฟ้ากระแสสลับแบบ

⁴ (ที่มา: <http://www.electronicdesign.com/power/optocouplers-help-promote-safe-efficient-ev-charging-stations>; สืบค้นเมื่อ 20 มิถุนายน 2561)

หัวชาร์จสำหรับรถบัสไฟฟ้า ผู้ผลิตเครื่องชาร์จในระบบไฟฟ้ากระแสสลับรายหนึ่ง คือ บริษัท BYD โดยเครื่องชาร์จจะมีขนาดกำลังไฟฟ้า 80 kW สามารถรับไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ขนาด 380 V ซึ่งความถี่มีทั้งรุ่นที่เป็น 50 Hz และ 60 Hz



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างหัวชาร์จและเครื่องชาร์จสำหรับการประจุไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับรถบัสไฟฟ้า (โครงการศึกษาแนวทางการจัดการโดยसारระบบไฟฟ้า จำนวน 200 คัน, 2559)



รูปที่ 2.14 การประจุไฟฟ้ากระแสสลับแบบหัวชาร์จสำหรับรถบัสไฟฟ้า⁵

⁵ ที่มา <https://www.siemens.com/customer-magazine/en/home/mobility/innotrans/smarter-charging.html>, สืบค้น 20 มิถุนายน 2561

2.4.2 การประจุไฟฟ้ากระแสตรงแบบหัวชาร์จสำหรับรถบีโไฟฟ้า

การประจุไฟฟ้าแบบกระแสตรง (DC Charging) เป็นการประจุไฟฟ้าโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงไปยังยานยนต์ไฟฟ้า ในกรณีนี้สถานีประจุไฟฟ้าจะแปลงไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นกระแสตรงแล้วจ่ายไปยังยานยนต์ไฟฟ้า ไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับยานยนต์ไฟฟ้าจะประจุไฟฟ้าโดยตรงกับแบตเตอรี่ โดยมีระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery management system) ทำหน้าที่ในการควบคุมการประจุไฟฟ้า การประจุไฟฟ้าแบบกระแสตรงเป็นการประจุไฟฟ้าที่รวดเร็วซึ่งสามารถชาร์จพลังงานได้สูงเนื่องจากไม่มีขีดจำกัดของเครื่องชาร์จ (Onboard charger) สามารถประจุไฟฟ้าได้ภายใน 10-30 นาที เนื่องจากมีการใช้พลังงานสูง (ประมาณ 90 kW) จึงต้องใช้แหล่งจ่ายไฟ 3 เฟส ที่มีกระแสไฟฟ้าสูง การประจุไฟฟ้าแบบกระแสตรงถูกใช้กับสถานีประจุไฟฟ้าในพื้นที่สาธารณะซึ่งต้องการการประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วที่คล้ายกับสถานีบริการน้ำมัน เหมาะสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่ต้องประจุไฟฟ้าหลายครั้งในระหว่างวัน หรือสำหรับการเดินทางระยะไกล เช่น การเดินทางระหว่างจังหวัด

การประจุไฟฟ้ากระแสตรงแบบหัวชาร์จ เป็นการประจุไฟฟ้าแบบรวดเร็วโดยใช้ระบบไฟฟ้ากระแสตรง (DC Fast Charging) การประจุไฟฟ้าจะมีหลายรูปแบบ เช่น การประจุไฟฟ้าด้วยหัวชาร์จแบบธรรมดา (Connector) การประจุไฟฟ้าด้วยหัวชาร์จแบบแพนโทกราฟ (Pantograph) และการประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย (Wireless) ด้วยหลักการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า

การประจุไฟฟ้าด้วยหัวชาร์จธรรมดา (Connector) เป็นการประจุไฟฟ้าด้วยหัวชาร์จที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับและมีมาตรฐานแยกไปตามประเทศผู้ผลิต สามารถแบ่งมาตรฐานออกเป็น 3 มาตรฐานใหญ่ ๆ คือ มาตรฐานของญี่ปุ่น จีน และยุโรป-อเมริกา ดังแสดงในรูปที่ 2.15 โดยกำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 30 kW ถึง 120 kW



รูปที่ 2.15 เครื่องชาร์จและหัวชาร์จแบบกระแสตรงตามมาตรฐานต่าง ๆ

(โครงการศึกษาแนวทางการจัดการโดยसारระบบไฟฟ้า

จำนวน 200 คั่น, 2559)

บริษัท E-station ได้เปิดตัวสถานีประจุไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับรถบัสไฟฟ้า และสนับสนุนทางด้านพลังงานสะอาดและการพัฒนาอย่างยั่งยืนต่อระบบขนส่งสาธารณะในอนาคต รถบัสไฟฟ้าช่วยลดระดับมลพิษโดยรวมลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเมืองที่มีการจราจรที่หนาแน่นซึ่งมลพิษทาง อากาศจะส่งผลโดยตรงต่อปัญหาสุขภาพผู้คนในเมือง รถบัสไฟฟ้า Optare ได้ติดตั้งเทคโนโลยีการประจุไฟฟ้าแบบรวดเร็ว โดยใช้ Circontrol CHAdeMO ที่เป็นสถานีประจุไฟฟ้าเร็ว กระแสตรง โดยสามารถประจุไฟฟ้าได้ที่ 80 kWh ใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับการประจุไฟฟ้าแบบปกติที่จะใช้เวลา 6-8 ชั่วโมง การประจุแบบเตอรีระหว่างวันและข้ามคืนส่งผลให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 2 เท่า ระยะทางที่รถบัสวิ่งจึงมากขึ้นตามไปด้วย

2.4.3 การประจุไฟฟ้ากระแสตรงแบบแผนโทกราฟสำหรับรถบัสไฟฟ้า

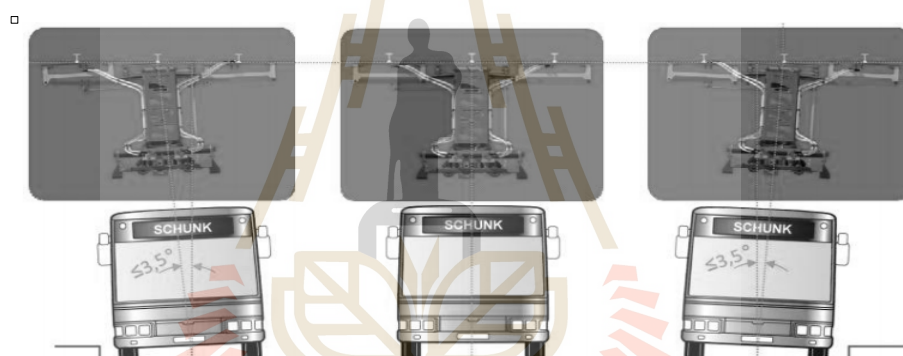
การประจุไฟฟ้าด้วยหัวชาร์จแบบแผนโทกราฟ มีด้วยกัน 2 วิธี โดยแบ่งตามรูปแบบการติดตั้งหัวชาร์จ คือ ติดตั้งที่สถานีชาร์จ และการติดตั้งบนรถบัสไฟฟ้า รูปที่ 2.16 แสดงตัวอย่างเครื่องชาร์จที่ใช้หัวชาร์จแบบแผนโทกราฟ โดยด้านซ้ายเป็นการติดตั้งหัวชาร์จที่สถานีชาร์จ และด้านขวาติดตั้งหัวชาร์จบนรถบัสไฟฟ้า การชาร์จด้วยหัวชาร์จแบบแผนโทกราฟแบบ Existing Interfaces จะมีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูงและมีการแยกระหว่างขั้วบวก ขั้วลบ และสายดิน ดังในรูปที่ 2.17

บริษัท Siemens เป็นบริษัทหนึ่งที่มีการผลิตสถานีประจุไฟฟ้าแบบแผนโทกราฟ ที่มีทั้งแบบการติดตั้งแผนโทกราฟที่สถานีและการติดตั้งแผนโทกราฟบนรถบัสไฟฟ้า Off-board top-down แผนโทกราฟ คือ ระบบการชาร์จแบบรวดเร็วที่สามารถติดตั้งไว้ที่บนเสาหรือบนหลังคาของป้ายรอรถบัส ดังแสดงในรูปที่ 2.18 วิธีการประจุไฟฟ้าแบบ Off-board แสดงในรูปที่ 2.19 สามารถทำได้กับรถบัสหลายประเภทและตามความต้องการของระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพื่อประจุแบตเตอรี่อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น จึงต้องมีการวางแผนสำหรับการประจุไฟฟ้าของรถบัสที่ต้องมีพลังงานมากพอที่จะเดินทางไปยังสถานีประจุไฟฟ้าถัดไป สถานีประจุไฟฟ้าแบบนี้สามารถติดต่อสื่อสารแบบไร้สายผ่านทาง Wi-Fi IEEE 802.11a ตามมาตรฐาน ISO 15118 ระบบแผนโทกราฟเป็นแบบ 4 ขั้ว และควบคุมด้วย PE/isolation ที่มีระบบเชื่อมต่อและประจุไฟฟ้าเองแบบอัตโนมัติ โดยมีขนาดเครื่องชาร์จที่กำลังไฟฟ้า 150 kW 300 kW และ 450 kW



(ก) ติดตั้งหัวชาร์จที่สถานีชาร์จ

(ข) ติดตั้งหัวชาร์จบนรถบัไฟฟ้า

รูปที่ 2.16 เครื่องชาร์จที่ใช้หัวชาร์จแบบแพนโทกราฟ⁶รูปที่ 2.17 การใช้หัวชาร์จแบบแพนโทกราฟ แบบ Existing Interfaces กับรถบัไฟฟ้า⁷รูปที่ 2.18 การใช้หัวชาร์จแบบแพนโทกราฟ แบบ Inverted Interfaces กับรถบัไฟฟ้า⁷

⁶ ที่มา: <http://www.busfahrermagazin.de/bildergalerien/elektrobus-fraunhofer-ivi-1646112.html>, สืบค้นเมื่อ 20 มิถุนายน 2561

⁷ ที่มา: <https://www.schunk-carbontechnology.com/en/product-carbon/schunk-smart-charging/>, สืบค้นเมื่อ 20 มิถุนายน 2561



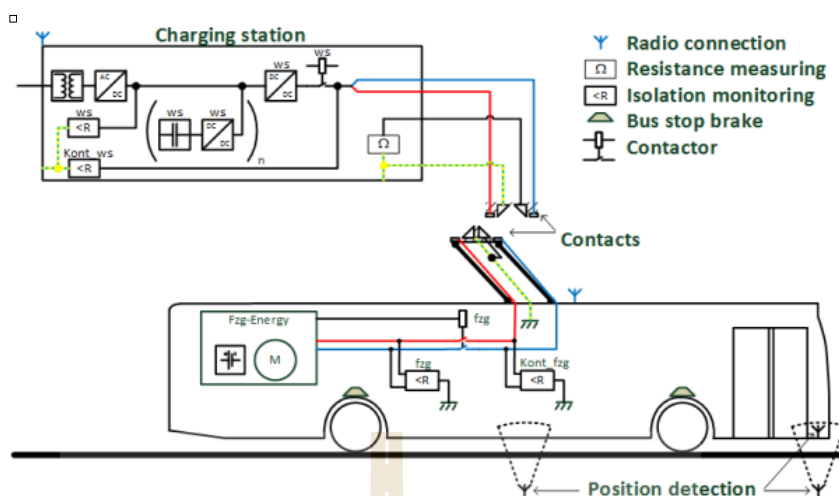
รูปที่ 2.19 สถานีชาร์จหัวชาร์จแบบแพนโทกราฟ Off-board top-down ของบริษัท Siemens⁸

On-board bottom-up แพนโทกราฟ คือ การประจุไฟฟ้าโดยเชื่อมต่อแพนโทกราฟที่ติดตั้งบนรถบัสเข้ากับระบบส่งจ่ายไฟฟ้า เป็นระบบการประจุไฟฟ้าที่ยืดหยุ่นและรับพลังงานไฟฟ้าตามที่ต้องการ ยกตัวอย่างเช่น รถรางที่มีระบบไฟฟ้าเหนือศีรษะและใช้วิธี On-board เพื่อประจุไฟฟ้า อุปกรณ์การประจุไฟฟ้าทั้งหมดถูกติดตั้งไว้บนรถบัส รวมถึงแพนโทกราฟที่มี 2 ขั้วสำหรับต่อกับสายไฟฟ้าเหนือศีรษะ โดยรับไฟฟ้ากระแสตรงจากสายส่งเหนือศีรษะที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 750 V และมีขนาดกำลังไฟฟ้าของเครื่องชาร์จที่ 60 kW และ 120 kW รูปที่ 2.20 แสดงการประจุไฟฟ้าด้วยหัวชาร์จแบบแพนโทกราฟ On-board bottom-up ของบริษัท Siemens และรูปที่ 2.21 แสดงแบบจำลองสถานีประจุไฟฟ้าแบบแพนโทกราฟ



รูปที่ 2.20 สถานีชาร์จหัวชาร์จแบบแพนโทกราฟ On-board bottom-up ของบริษัท Siemens⁸

⁸ ที่มา <https://www.siemens.com/customer-magazine/en/home/mobility/innotrans/smarter-charging.html>, สืบค้น 20 มิถุนายน 2561



รูปที่ 2.21 โมเดลสถานีประจุไฟฟ้าแบบแผนโทกราฟ⁹

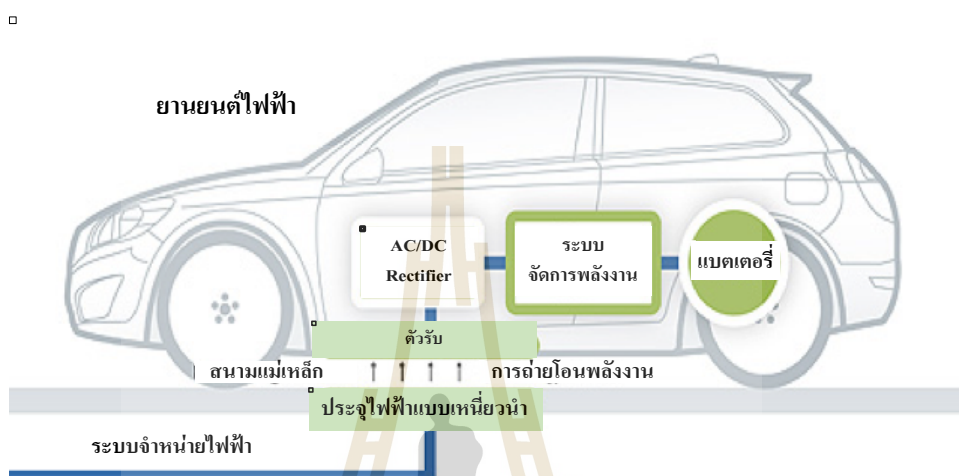
2.4.4 การประจุไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำสำหรับรถบัสไฟฟ้า

การประจุไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ หรือ การประจุไฟฟ้าแบบไร้สายเป็นเทคโนโลยีการประจุไฟฟ้าที่ยึดตามหลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้า เมื่อแหล่งจ่ายจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับผ่านเครื่องส่งสัญญาณซึ่งติดตั้งอยู่บนพื้น ขดลวดเหนี่ยวนำในเครื่องส่งสัญญาณจะสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในขดลวดเหนี่ยวนำที่ติดตั้งอยู่ในยานยนต์ไฟฟ้า จากนั้นยานยนต์ไฟฟ้าจะป้อนไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งจะประจุแบตเตอรี่ต่อไป การประจุไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำมีความสะดวกและปลอดภัยเนื่องจากไม่ต้องเสียบปลั๊กและสามารถลดความเสี่ยงในการประจุไฟฟ้า เช่น การเกิดการลัดวงจร อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ยังมีข้อเสีย คือ มีประสิทธิภาพต่ำและทำให้เกิดความร้อนสูงเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าสูง ดังนั้น จึงไม่สามารถรองรับการประจุไฟฟ้าที่มีกำลังไฟฟ้าสูงได้ อย่างไรก็ตาม วิธีการประจุไฟฟ้าแบบนี้ยังได้รับความนิยมเนื่องจากมีต้นทุนสูงและติดตั้งยากแตกต่างจากการประจุไฟฟ้าแบบผ่านตัวนำที่มีต้นทุนต่ำและง่ายต่อการติดตั้ง (Costello, 2018)

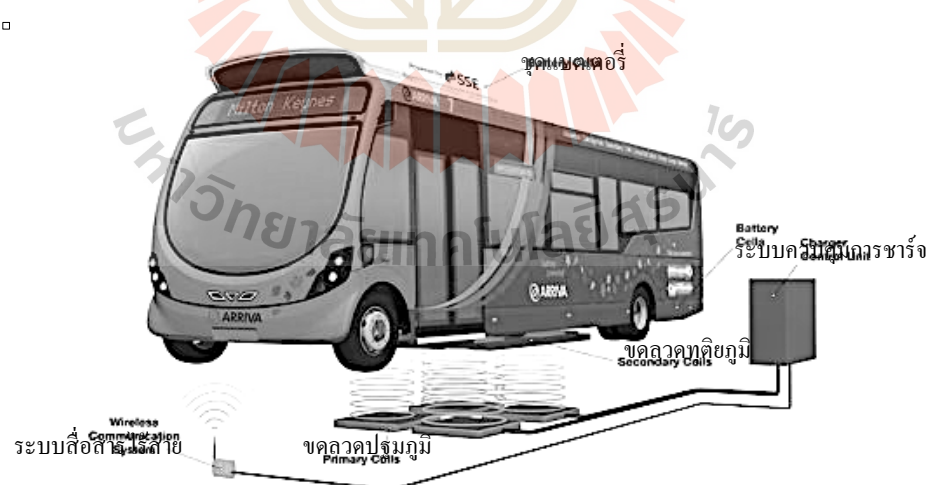
การใช้งานรถบัสไฟฟ้าที่มีระบบการประจุไฟฟ้าด้วยระบบการชาร์จแบบเหนี่ยวนำ ได้มีการศึกษาและนำมาใช้งานจริงที่เมือง Milton Keynes ซึ่งเป็นเมืองทางตะวันตกเฉียงเหนือของประเทศอังกฤษ โดยรถบัสไฟฟ้าจะชาร์จพลังงานไฟฟ้าที่สถานีเริ่มต้นในช่วงเวลากลางคืนจนเต็ม หลังจากนั้น เมื่อมีการรับส่งผู้โดยสารรถบัสไฟฟ้าจะมีการชาร์จพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบการชาร์จแบบเหนี่ยวนำขณะที่จอดอยู่ที่ป้ายผู้โดยสาร โดยการชาร์จ 1 ครั้ง ขณะที่จอดอยู่ที่ป้ายรับส่งผู้โดยสารจะใช้เวลาประมาณ 10 นาที สำหรับเทคนิคการชาร์จนั้นใช้เทคนิคการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า

⁹ ที่มา: <http://www.greencarcongress.com/2015/06/20150601-edda.html>, สืบค้น 20 มิถุนายน 2561

ซึ่งมีการสร้างสนามแม่เหล็กบนแผ่นโลหะที่พื้นถนน หลังจากนั้นจะเกิดการเหนี่ยวนำกับแผ่นโลหะที่ติดอยู่ที่ตัวรถบัสไฟฟ้า เกิดการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าและนำพลังงานไปชาร์จให้กับแบตเตอรี่ รูปที่ 2.22 และ 2.23 แสดงแบบจำลองการประจุไฟฟ้าด้วยระบบการชาร์จแบบเหนี่ยวนำสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าและรถบัสไฟฟ้า ตามลำดับ



รูปที่ 2.22 การประจุไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า (Costello, 2018)



รูปที่ 2.23 แบบจำลองการประจุไฟฟ้าด้วยระบบการชาร์จแบบเหนี่ยวนำของรถบัสไฟฟ้า¹⁰

¹⁰ ที่มา: <https://www.pinterest.com/kcarter2112kc45/battery-electric-buses/?lp=true>, สืบค้น 20 มิถุนายน 2561

2.4.5 การสับเปลี่ยนแบตเตอรี่สำหรับรถบัสไฟฟ้า

คุณลักษณะของรถบัสไฟฟ้าที่เหมาะสมในเมือง คือ รถบัสที่มีระบบการสับเปลี่ยนกันภายในเมืองทำให้ง่ายต่อการออกแบบเส้นทางเดินรถและตารางเวลาการเดินรถ โดยคุณสมบัติทั่วไปที่เป็นระบบดังกล่าวมี ข้อกำหนดสองข้อคือรถต้องวิ่งไปตามเส้นทางและเวลาที่กำหนด และข้อสองคือรถบัสต้องวิ่งอย่างต่อเนื่อง หมายถึงรถบัสจะไม่หยุดและพักที่สถานีเป็นเวลานาน เป็นเหตุให้รถบัสไฟฟ้าต้องหาทางประจุไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่อย่างรวดเร็วเพื่อหลีกเลี่ยงการเสียเวลาที่สถานีชาร์จ ดังนั้น วิธีการที่เรียกว่าการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของรถบัสไฟฟ้าจึงเกิดขึ้น โดยส่วนประกอบของระบบการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของรถบัสไฟฟ้ามีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ สถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้า (Battery Swapping Station: BSS) รถบัสไฟฟ้าที่มีระบบการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ (Battery Swappable Smart Electric Bus: BSSEB) และระบบควบคุมของรถบัสไฟฟ้าหรือหุ่นยนต์ที่ใช้ในการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ (Smart Bus Information Service: SBIS)

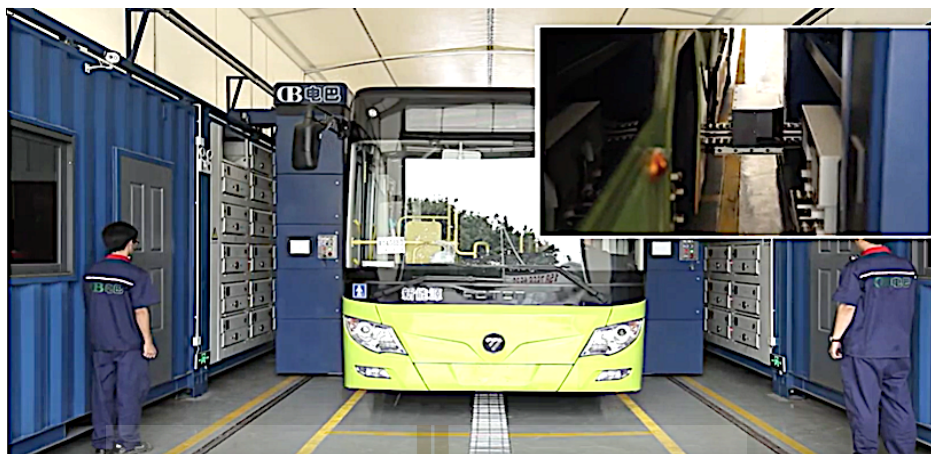
สถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่จะถูกสร้างขึ้นบนเส้นทางการให้บริการของรถบัสไฟฟ้า และมีสถานีประจุไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นในนั้นด้วยการออกแบบที่เหมาะสม เมื่อพลังงานในแบตเตอรี่ได้ถูกใช้จนหมดรถบัสไฟฟ้าจะวิ่งเข้าสู่สถานีการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่เพื่อเปลี่ยนแบตเตอรี่ที่มีพลังงานเต็มมาใช้แทน ส่วนแบตเตอรี่ที่ถูกใช้จนหมดจะเข้าสู่กระบวนการประจุแบตเตอรี่โดยมีการวางระบบเพื่อป้องกันสถานะโหลดเกินของระบบไฟฟ้าด้วย ในรูปที่ 2.24 แสดงระบบการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่แบบใต้พื้นรถ และรูปที่ 2.25 แสดงการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่สำหรับรถบัสไฟฟ้า



รูปที่ 2.24 ระบบการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่แบบใต้พื้นรถ

(โครงการศึกษาแนวทางการจัดการโดยสารระบบไฟฟ้า

จำนวน 200 คัน, 2559)



รูปที่ 2.25 การสับเปลี่ยนแบตเตอรี่สำหรับรถบัสไฟฟ้า¹¹

2.4.6 ระดับของการประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

การประจุไฟฟ้านั้นมีความสำคัญมากสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่ใช้ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากต้องมีการประจุไฟฟ้าใหม่เมื่อมีระดับพลังงานของแบตเตอรี่เหลือน้อย และหากปล่อยให้แบตเตอรี่หมดยานยนต์ไฟฟ้าก็จะไม่สามารถใช้งานได้ซึ่งต่างจากยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด ดังนั้นจึงต้องมีการวิเคราะห์และออกแบบสถานีประจุไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการประจุไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้ารวมถึงวิเคราะห์ตำแหน่งที่ตั้งที่เหมาะสม การประจุไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับระดับของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ โครงสร้างพื้นฐานของสถานีประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้ามีการกำหนดระดับของการประจุไฟฟ้า 3 ระดับ (Baker, 1978)

การประจุไฟฟ้าระดับ 1 เป็นการประจุไฟฟ้าทั่วไป จะใช้แรงดันไฟฟ้า 120 V เป็นการประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน ส่วนใหญ่มักติดตั้งใช้งานในบ้านหรือที่ทำงาน ซึ่งสามารถชาร์จได้ทุกที่ แต่มีข้อจำกัดที่สามารถประจุไฟฟ้าได้ที่ระดับกระแสไฟฟ้าต่ำ ประมาณ 12 A การประจุไฟฟ้าระดับ 1 จะใช้เวลาในการประจุไฟฟ้า 8-14 ชั่วโมง หรือมากกว่านั้นขึ้นอยู่กับขนาดความจุของแบตเตอรี่ (Types of Charging Stations; สืบค้นเมื่อ 20 พฤษภาคม 2561)

การประจุไฟฟ้าระดับ 2 เป็นวิธีการประจุไฟฟ้าที่ใช้งานอย่างกว้างขวางสำหรับการประจุไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้า และต้องมีอุปกรณ์พิเศษสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าสำหรับเชื่อมต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าในการประจุไฟฟ้า การประจุไฟฟ้าระดับ 2 ใช้เวลาประจุไฟฟ้าประมาณ 1-3 ชั่วโมงที่แรงดันไฟฟ้า 240 V กระแสประมาณ 12-80 A สามารถประจุไฟฟ้าได้ทั้งภายในบ้าน และสถานบริการสาธารณะ

¹¹ ที่มา: e-station: battery swapping for bus, <https://www.youtube.com/watch?v=FQVx167iYS4>, สืบค้นเมื่อ 19 มิถุนายน 2563

การประจุไฟฟ้าระดับ 3 หรือการประจุไฟฟ้าเร็ว โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงที่ระดับกระแสไฟฟ้าสูงถึง 125 A ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าประมาณ 480 V ซึ่งสามารถชาร์จแบตเตอรี่ได้ภายใน 20-30 นาที สถานีประจุไฟฟ้าประเภทนี้เป็นที่นิยมใช้งานในที่สาธารณะที่ไม่สามารถจอดยานยนต์ได้เป็นระยะเวลานานที่คล้ายกับสถานีบริการน้ำมัน สถานีประจุไฟฟ้าเร็วนี้มีความน่าสนใจมากในปัจจุบันเพื่อตอบสนองความต้องการของการประจุไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้าในเมืองใหญ่ ๆ ที่ผู้ใช้ยานยนต์ต้องการความรวดเร็วในการประจุไฟฟ้า (EV Charging Station Installation Guidebook, 2018; สืบค้นเมื่อ 20 พฤษภาคม 2561)

ตารางที่ 2.2 ระดับการประจุไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้า

ระดับการประจุไฟฟ้า	ระดับ 1 (AC)	ระดับ 2 (AC)	ระดับ 3 (DC)
แรงดันไฟฟ้า	120 V	240 V	480 V
กระแสไฟฟ้า	12-16 A	12-80 A	< 125 A
กำลังไฟฟ้า	1.4-1.9 kW	2.5-19.2 kW	< 90 kW
เวลาในการประจุไฟฟ้า	8-14 ชั่วโมง	1-3 ชั่วโมง	20-30 นาที
ระยะทางที่รถวิ่งได้ต่อชั่วโมง	8 km	32 km	120 km

2.4.7 โหมดการประจุไฟฟ้าสำหรับการประจุไฟฟ้าแบบผ่านตัวนำไฟฟ้า

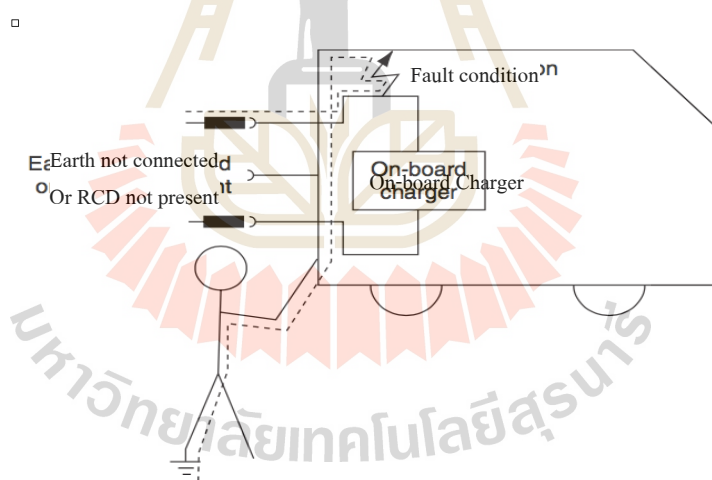
การพิจารณาโครงสร้างพื้นฐานที่ใช้เชื่อมต่อกับยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งนำไปสู่การกำหนดโหมดการประจุไฟฟ้าที่เป็นไปตามมาตรฐาน IEC 61851-1 (Peter et al., 2016)

1) การประจุไฟฟ้าโหมด 1

การประจุไฟฟ้าโหมด 1 คือ การเชื่อมต่อยานยนต์ไฟฟ้าไปยังระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ได้รับแบบมาตรฐานโดยมีกระแสไฟฟ้าไม่เกิน 16 A ซึ่งมีมาตรฐานของหัวชาร์จแตกต่างกันไปตามประเทศที่ใช้งานและผู้ผลิตรายอื่น ๆ ผู้ผลิตยานยนต์ไฟฟ้าแต่ละรายเหล่านี้สามารถส่งพลังงานที่ต้องการได้และประหยัดพลังงาน เนื่องจากความพร้อมใช้งาน การประจุไฟฟ้าโหมด 1 จึงเป็นทางเลือกที่ใช้กันมากที่สุดสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าโดยเฉพาะเมื่อใช้โครงสร้างพื้นฐานของระบบไฟฟ้าที่มีอยู่ อย่างไรก็ตาม ต้องคำนึงถึงเรื่องความปลอดภัยหลายเรื่องการทำงานของจุดชาร์จไฟ ของโหมด 1 ที่ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่เหมาะสมของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ฟิวส์หรือเบรกเกอร์เพื่อป้องกันกระแสไฟเกิน มีการเชื่อมต่อสายดินที่ถูกต้องและอุปกรณ์ป้องกันแหล่งจ่ายไฟฟ้าหากมีกระแสไฟฟ้ารั่วมากขึ้น มากกว่าค่าที่กำหนด เช่น 30 mA ในหลายประเทศ ปัจจุบันอุปกรณ์ตัดไฟรั่ว (RCDs) ถูกกำหนดไว้สำหรับการติดตั้งระบบไฟฟ้าใหม่ทั้งหมด อย่างไรก็ตาม ยังคงมีการใช้งาน

ระบบประจุไฟฟ้าที่ไม่มี RCD จำนวนมาก และมักจะเป็นเรื่องยากสำหรับผู้ใช้งานยนต์ไฟฟ้าที่จะรู้เมื่อเสียบปลั๊กว่ามีการติดตั้ง RCD หรือไม่ ในขณะที่บางประเทศปล่อยให้เป็นการรับผิดชอบของผู้ใช้ ดังนั้น โหมด 1 จึงถูกนำไปใช้แบบผิดกฎหมายในหลายประเทศ (IEC 61851-1, 2001)

นอกจากนี้ในบางประเทศ เช่น ประเทศอิตาลีไม่อนุญาตให้การประจุไฟฟ้าโหมด 1 มีการใช้งานในที่สาธารณะ และจำกัดการใช้พื้นที่ส่วนตัว ที่ไม่ต้องมีความกังวลว่าช่องเสียบปลั๊กมาตรฐานในสถานที่สาธารณะอาจสัมผัสกับส่วนประกอบของการประจุไฟฟ้าที่ไม่ได้รับอนุญาต ในประเทศที่สามารถใช้การประจุไฟฟ้าโหมด 1 ได้นี้จะยังคงเป็นโหมดการชาร์จไฟฟ้าที่แพร่หลายมากที่สุดสำหรับสถานที่สาธารณะ (รวมถึงโรงรถที่อยู่อาศัย และที่จอดรถของบริษัท) เนื่องจากความเรียบง่ายและต้นทุนการลงทุนต่ำ ด้วยการติดตั้งระบบไฟฟ้าที่เหมาะสมรวมถึงติดตั้ง RCD โหมด 1 ช่วยให้สามารถประจุไฟฟ้าได้อย่างปลอดภัย อย่างไรก็ตาม ความไม่แน่นอนที่ผู้ใช้ต้องเผชิญเกี่ยวกับอุปกรณ์ตัดไปรั่ว RCD ที่อาจจะมีหรือไม่มีนั้นมีความเสี่ยงมาก เมื่อเสียบปลั๊กเข้ากับเต้าเสียบมาตรฐานทำให้เกิดอันตรายที่อาจเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.26 ด้วยเหตุนี้ผู้ผลิตยานยนต์ไฟฟ้าจึงมีแนวโน้มหลีกเลี่ยงการประจุไฟฟ้าโหมด 1 ในระยะยาว



รูปที่ 2.26 สถานการณ์ที่เป็นอันตรายโดยไม่มี RCD (Peter et al., 2016)

2) การประจุไฟฟ้าโหมด 2

การประจุไฟฟ้าโหมด 2 เป็นการเชื่อมต่อยานยนต์ไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้ากระแสสลับยังใช้ช่องเสียบแบบมาตรฐาน แต่จะให้การป้องกันเพิ่มเติมโดยการเพิ่มกล่องควบคุมด้วยตัวควบคุมนำร่อง ระหว่างยานยนต์ไฟฟ้าและปลั๊กหรือกล่องควบคุม การเปิดตัวการประจุไฟฟ้าโหมด 2 มุ่งเน้นไปที่ประเทศสหรัฐอเมริกาที่สะท้อนให้เห็นถึงกระบวนการโครงสร้างพื้นฐานที่

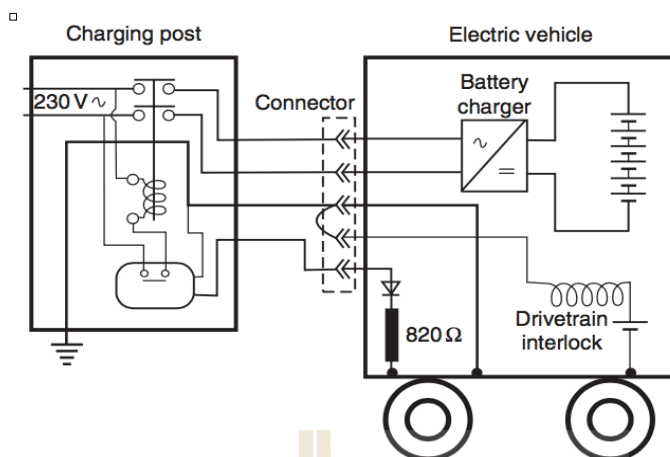
พัฒนามาตรฐานไฟฟ้าและภาษารหัสที่ถูกนำมาใช้โดย National Electrical Code เพื่อให้แน่ใจว่าการป้องกันบุคลากรและการพิจารณาด้านความปลอดภัยอื่น ๆ ถูกนำมาใช้ในระบบประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ ข้อเสียเปรียบหลักของโหมด 2 คือ กล้องควบคุมช่วยป้องกันสายคาวาน์สตรีมและยานยนต์ไฟฟ้า แต่ไม่ใช่ปลั๊กในขณะที่ปลั๊กเป็นหนึ่งในส่วนประกอบที่เสี่ยงต่อการใช้งานมาก

3) การประจุไฟฟ้าโหมด 3

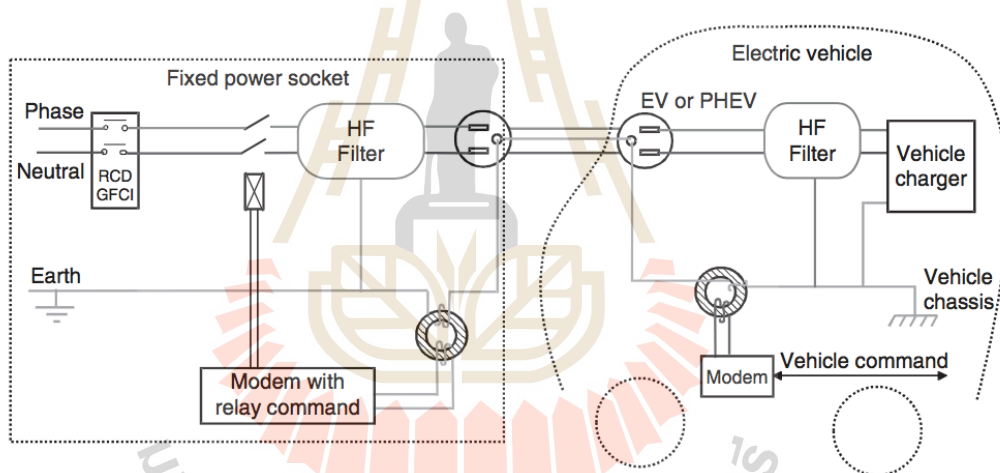
การประจุไฟฟ้าโหมด 3 เกี่ยวข้องกับการเชื่อมต่อยานยนต์ไฟฟ้าไปยังแหล่งจ่ายระบบไฟฟ้ากระแสสลับโดยตรง โดยใช้อุปกรณ์ในการประจุไฟฟ้าแบบพิเศษ หมายถึงมีสถานีประจุไฟฟ้าของเอกชนหรือในที่สาธารณะ มาตรฐาน IEC 61851-1 (Peter et al., 2016) จะควบคุมการป้องกันนำร่องระหว่างอุปกรณ์ที่เชื่อมต่ออย่างถาวรแหล่งจ่ายกระแสสลับและยานยนต์ไฟฟ้า

ในมาตรฐานแรกของอุปกรณ์ควบคุมจะถูกกำหนดให้เป็นตัวนำพิเศษในชุดสายชาร์จที่นอกเหนือจากสายเฟส สายนิวตรอน และสายดิน อย่างไรก็ตาม IEC 61851 ไม่ได้ระบุข้อกำหนดบรรทัดฐานสำหรับการทำงานของวงจรควบคุมแบบนำร่อง ตัวอย่างของวงจรระบบควบคุมนำร่องจะแสดงในรูปที่ 2.27 การทำงานของระบบควบคุมแบบนำร่องนั้น กระแสไฟฟ้าถูกส่งผ่านตัวนำควบคุมนำร่องที่เชื่อมต่อกับตัวถังผ่านตัวต้านทาน กระแสย้อนกลับจะไหลผ่านตัวนำไฟฟ้าลงดิน เมื่อวงจรทำงานปกติหน้าสัมผัสสำหรับระบบการประจุไฟฟ้าจะปิดและระบบประจุไฟฟ้าจะทำงานเมื่อไม่มียานยนต์ไฟฟ้าเชื่อมต่อกับระบบประจุไฟฟ้า ไฟแสดงผลการประจุไฟฟ้าจะดับซึ่งเป็นข้อได้เปรียบด้านความปลอดภัยที่สำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับสถานีประจุไฟฟ้าในที่สาธารณะ เมื่อเกิดการประจุไฟฟ้าที่มีกระแสรั่วไหล วงจรป้องกันกระแสรั่วไหลลงดินจะมีเสียงเตือนและมีการเชื่อมต่อของหน้าสัมผัสกับสายดินและมีการเชื่อมต่อผ่านตัวควบคุมนำร่องเพื่อตัดการเชื่อมต่อ ในระหว่างตัดการเชื่อมต่อตัวควบคุมนำร่องจะต้องตัดวงจรและกระแสรั่วไหลจะผ่านลงดิน กระบวนการนี้ช่วยให้มั่นใจได้ว่ากระแสไฟฟ้าจะถูกตัดที่หน้าสัมผัสและไม่ได้ค้างอยู่ที่ปลั๊ก ดังนั้น จึงช่วยขจัดความร้อนและยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์เสริมได้อีกด้วย

ตัวควบคุมนำร่องในอุปกรณ์การประจุไฟฟ้าถูกใช้เป็นครั้งแรกประมาณปี 1990 สำหรับสถานีประจุไฟฟ้าของเรือไฟฟ้า ที่ถูกนำไปใช้ใน Norfolk Broads ประเทศอังกฤษ การใช้ฟังก์ชันตัวควบคุมนำร่องด้วยสายไฟเส้นที่สามารถศึกษาได้ในมาตรฐาน J1772 ของ Society of Automotive Engineers การใช้ตัวนำเฉพาะสำหรับการควบคุมแบบนำร่องจำเป็นต้องมีตัวนำพิเศษและต้องใช้สายเคเบิลและอุปกรณ์เสริมพิเศษ ตามมาตรฐาน 61851-1 ได้เพิ่มฟังก์ชันควบคุมนำร่องสำหรับการประจุไฟฟ้าโหมด 3 ทำหน้าที่เดียวกับตัวนำควบคุมแบบนำร่องที่อธิบายก่อนหน้านี้ วิธีการอื่นสำหรับการใช้ฟังก์ชันควบคุมแบบนำร่อง ได้แก่ ระบบการถ่ายโอนข้อมูลแบบไร้สายรวมทั้งการสื่อสารด้วยสายไฟฟ้า หลักการดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.27 ตัวควบคุมนำร่อง (Peter et al., 2016)



รูปที่ 2.28 ฟังก์ชันควบคุมแบบนำร่องด้วยการสื่อสารด้วยสายไฟฟ้า (Peter et al., 2016)

สัญญาณการควบคุมแบบนำร่องเป็นสัญญาณโหมดทั่วไประหว่างสายเฟสและตัวนำลงดิน โดยใช้ความถี่ 110 kHz สัญญาณนี้ถูกสร้างโดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของยานยนต์และส่งผ่านสายดินผ่านหม้อแปลง มีวงจรกรองความถี่เพื่อหลีกเลี่ยงการส่งข้อมูลที่ไม่พึงประสงค์จากระบบประจุไฟฟ้าไปยังแหล่งจ่ายไฟและเพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐานที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จะเชื่อมต่อกับกริดซึ่งห้ามการสื่อสารผ่านสายดินจากอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟยานยนต์ไฟฟ้า (Peter et al., 2016) ส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องมีขนาดเล็กและราคาต่ำ

ระบบนี้สามารถใช้งานฟังก์ชันนำร่องควบคุมทั้งหมดผ่านการเชื่อมต่อแบบสามสาย การป้องกันขั้นพื้นฐานนี้สามารถใช้งานได้โดยใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีราคาถูกและน้อยที่สุด ดังนั้น จึงเหมาะสำหรับรถที่มีน้ำหนักเบา เช่น รถจักรยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งหลีกเลี่ยงค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในอุปกรณ์พิเศษ ระบบนี้แสดงถึงโอกาสที่น่าสนใจอีกหลายอย่าง เนื่องจากไม่เพียงแต่นำสัญญาณควบคุมไปใช้ แต่สามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลเพื่อใช้ในการประจุไฟฟ้าและการเก็บเงินแบบอัจฉริยะ

4) การประจุไฟฟ้าโหมด 4

การประจุไฟฟ้าโหมด 4 คือ การเชื่อมต่อของยานยนต์ไฟฟ้าไปยังระบบไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้อุปกรณ์ประจุไฟฟ้าแบบ Off-board ตัวควบคุมนำร่องจะขยายไปยังอุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายกระแสสลับ โดยมีการประจุไฟฟ้ากระแสตรงที่ส่วนใหญ่ใช้สำหรับการประจุไฟฟ้าแบบเร็วสำหรับการประจุไฟฟ้าแบบ Off-board การเชื่อมต่อระบบเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ผู้ใช้งานรู้ข้อมูลเกี่ยวกับประเภทและสถานะการประจุแบตเตอรี่เพื่อให้มีแรงดันและกระแสไฟที่ถูกต้อง

2.5 แบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

ยานยนต์ไฟฟ้านั้นมีหลายประเภทและหลายขนาด อย่างไรก็ตาม ในเกือบทุกกรณี แบตเตอรี่เป็นส่วนประกอบสำคัญในยานยนต์ไฟฟ้า แบตเตอรี่เป็นแหล่งเก็บพลังงานเพียงอย่างเดียวและเป็นส่วนประกอบที่มีน้ำหนักและปริมาตรสูงสุด ในยานยนต์แบบไฮบริดที่ใช้แบตเตอรี่ซึ่งต้องยอมรับและให้พลังงานไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องเป็นส่วนประกอบสำคัญที่มีความสำคัญสูงสุด ยานยนต์เซลล์เชื้อเพลิงถูกทำให้มีแบตเตอรี่ที่มีขนาดไม่ใหญ่มาก ปกติมีขนาดเท่ารถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน แต่เป็นไปได้ที่ยานยนต์แบบสันดาปภายในส่วนใหญ่จะมีแบตเตอรี่ขนาดใหญ่และทำงานในโหมดเซลล์เชื้อเพลิงหรือแบตเตอรี่แบบผสมผสาน ในระยะสั้นความเข้าใจที่ดีเกี่ยวกับเทคโนโลยีแบตเตอรี่และประสิทธิภาพเป็นสิ่งสำคัญสำหรับทุกคนที่เกี่ยวข้องกับยานยนต์ไฟฟ้า

แบตเตอรี่ประกอบไปด้วยเซลล์ไฟฟ้าตั้งแต่สองตัวขึ้นไป เซลล์จะทำหน้าที่แปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า เซลล์ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าบวกและลบที่เชื่อมด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างขั้วไฟฟ้าและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สร้างกระแสไฟฟ้ากระแสตรง ในกรณีของแบตเตอรี่สำรองหรือแบตเตอรี่แบบชาร์จใหม่ได้ปฏิกิริยาทางเคมีสามารถย้อนกลับได้ โดยย้อนกลับกระแสและแบตเตอรี่กลับสู่สถานะที่ถูกชาร์จ

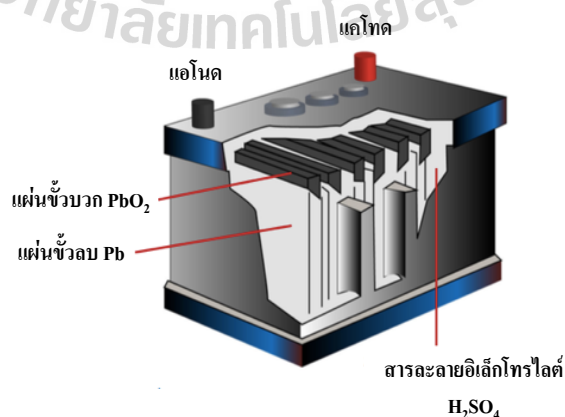
แบตเตอรี่ปฐมภูมิ (Primary battery) เป็นแบตเตอรี่ที่ใช้แล้วไม่สามารถชาร์จประจุเพื่อนำกลับมาใช้ได้อีก (ไม่สามารถเก็บพลังงานได้) แบตเตอรี่ชนิดนี้เรียกว่า “ถ่าน” มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น ถ่านอัลคาไลน์ (Alkaline) ถ่านลิเทียม (Lithium) ที่มีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่สำหรับใช้งานกับวิทยุ นาฬิกาและเครื่องใช้ไฟฟ้าอื่น ๆ แบตเตอรี่ประเภทนี้สามารถเก็บพลังงานได้สูง และ ไม่มี

การรั่วไหลของพลังงาน (Self-discharge) จึงมีอายุการใช้งานค่อนข้างยาวนาน นอกจากนั้นยังใช้งานได้ง่ายสะดวก แต่เมื่อหมดอายุการใช้งานจะกลายเป็นขยะที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

แบตเตอรี่ทุติยภูมิ (Secondary battery) เป็นแบตเตอรี่ที่เมื่อใช้หมดแล้วสามารถชาร์จประจุเพื่อนำกลับมาใช้ได้ อีก แบตเตอรี่ประเภทนี้มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น แบตเตอรี่รถยนต์ที่ทำจากตะกั่ว (Lead-acid battery) แบตเตอรี่มือถือที่ทำจากนิกเกิลแคดเมียม (Nickel-cadmium battery) นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ (Nickel-metal hydride battery) หรือลิเทียมไอออน (Lithium ion battery) และแบตเตอรี่ที่เก็บพลังงานขนาดใหญ่ที่ทำจากโซเดียม-ซัลเฟอร์ และวานาเดียม

แบตเตอรี่ผสม (Hybrid battery) เป็นแบตเตอรี่ที่มีลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) ผสมอยู่ โดยที่ขั้วอิเล็กโทรดหนึ่งใช้ก๊าซ ในขณะที่อีกขั้วอิเล็กโทรดใช้ตัวของมันเอง ตัวอย่างของแบตเตอรี่ประเภทนี้ได้แก่ แบตเตอรี่ชนิดซิงค์-โบรมีน (Zinc-bromine battery) รวมทั้งแบตเตอรี่ชนิดอะลูมิเนียม-อากาศ (Aluminium-air battery) และแบตเตอรี่ชนิดซิงค์-อากาศ (Zinc-air battery) ที่อยู่ในประเภทแบตเตอรี่เชิงกล (ศุภฤกษ์ อัครวิทยาพันธุ์, 2541)

ปัจจุบันแบตเตอรี่ประกอบด้วยแบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรด นิกเกิล-เหล็ก นิกเกิล-แคดเมียม นิกเกิล-เมทัลไฮไดรด์ ลิเทียม-โพลิเมอร์ และลิเทียม-เหล็ก โซเดียมซัลไฟฟริกและโซเดียมคลอไรด์ นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาแบตเตอรี่รุ่นใหม่ที่สามารถเติมเชื้อเพลิงได้โดยอัตโนมัติซึ่งส่วนใหญ่เป็นอากาศอะลูมิเนียมและอากาศสังกะสี แม้จะมีความพยายามที่จะพัฒนาเทคโนโลยีของแบตเตอรี่แต่ก็ยังไม่มีการพัฒนาแบตเตอรี่ที่เหมาะสมกับยานยนต์ไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีแบตเตอรี่ที่สำคัญและมีการเพิ่มประสิทธิภาพของแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขึ้น การสร้างแบบจำลองของแบตเตอรี่อย่างถูกต้องจะสามารถออกแบบยานยนต์ไฟฟ้าที่มีประโยชน์มาก ในรูปที่ 2.29 แสดงส่วนประกอบของแบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรด ที่ใช้ในรถยนต์ทั่วไป

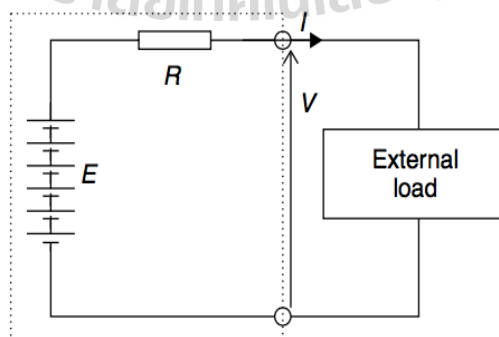


รูปที่ 2.29 ส่วนประกอบของแบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรด (รักษพล ธนานุวงศ์, 2560)

แบตเตอรี่สามารถถือได้ว่าเป็น “กล่องดำ” ที่มีเกณฑ์การทำงานหลากหลาย เกณฑ์เหล่านี้จะรวมถึงพลังงานเฉพาะ ความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าเฉพาะ แรงดันไฟฟ้าทั่วไป ประสิทธิภาพของแอมป์ชั่วโมง ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ค่าใช้จ่าย อุณหภูมิในการทำงาน อัตราการคายประจุ จำนวนรอบการใช้งาน และอัตราการชาร์จ ที่จะอธิบายไว้ในส่วนต่อไปนี้ ผู้ออกแบบจำเป็นต้องเข้าใจถึงความพร้อมใช้งานพลังงานที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และอัตราการคายประจุ รูปเรขาคณิตของแบตเตอรี่ อุณหภูมิที่เหมาะสม วิธีการชาร์จ ความต้องการในการหล่อเย็น และการพัฒนาในอนาคต อย่างไรก็ตาม ความเข้าใจพื้นฐานทางเคมีของแบตเตอรี่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เช่นเดียวกับประสิทธิภาพและความต้องการในการบำรุงรักษาในแต่ละประเภทและความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับการใช้งานแบตเตอรี่เช่นอายุการใช้งานที่จำกัด อายุการใช้งานลดลงที่กระแสดูสูงและอื่น ๆ ไม่สามารถเข้าใจได้ ความรู้พื้นฐานนี้เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นในผลกระทบโดยรวมของการใช้สารเคมีของแบตเตอรี่ที่มีต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้น การรีไซเคิลแบตเตอรี่ที่ใช้แล้วมีความสำคัญยิ่งขึ้น (รักษพล ธนานุวงศ์, 2560)

2.5.1 เซลล์ไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่

เซลล์ไฟฟ้าทั้งหมดมีแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะให้แรงดันไฟฟ้าโดยประมาณ เมื่อเซลล์แบตเตอรี่กำลังส่งกระแสไฟฟ้า เซลล์สามารถเชื่อมต่อแบบอนุกรมเพื่อให้แรงดันไฟฟ้ามากขึ้น แบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ไฟฟ้ามักถูกระบุเป็น 6 V หรือ 12 V และหน่วยเหล่านี้เชื่อมต่อกันเป็นแบบอนุกรม เพื่อผลิตแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการ รูปที่ 2.30 แสดงวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ แสดงเป็นแรงดันไฟฟ้าถาวร (E) แต่แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเป็นแรงดันไฟฟ้า (V) เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานภายใน (R) สมมติว่ากระแสไหล (I) ออกจากแบตเตอรี่ โดยทฤษฎีวงจรไฟฟ้าพื้นฐานสามารถแสดงโดยสมการที่ 2.1



รูปที่ 2.30 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่

$$V = E - IR \quad (2.1)$$

ถ้าให้กระแส I เป็น 0 แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเท่ากับ E ดังนั้น E มักเรียกว่าแรงดันไฟฟ้าของวงจรเปิด หากแบตเตอรี่กำลังชาร์จไฟ แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นโดย IR ในแบตเตอรี่รถยนต์ไฟฟ้า ความต้านทานภายในวงจรจะต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (Larminie and Lowry, 2012) โดยทั่วไป สมการที่ 2.1 ให้การคาดการณ์ที่แม่นยำสำหรับการใช้งานแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ อย่างไรก็ตาม แรงดันไฟฟ้าของวงจรเปิด E ไม่มีค่าคงที่ แรงดันไฟฟ้ายังได้รับผลกระทบจากสถานะการชาร์จและปัจจัยอื่น ๆ เช่น อุณหภูมิ ปัญหาของการสร้างแบบจำลองประสิทธิภาพของแบตเตอรี่จะมีการอธิบายถึงในส่วนถัดไป

2.5.2 พารามิเตอร์ของแบตเตอรี่

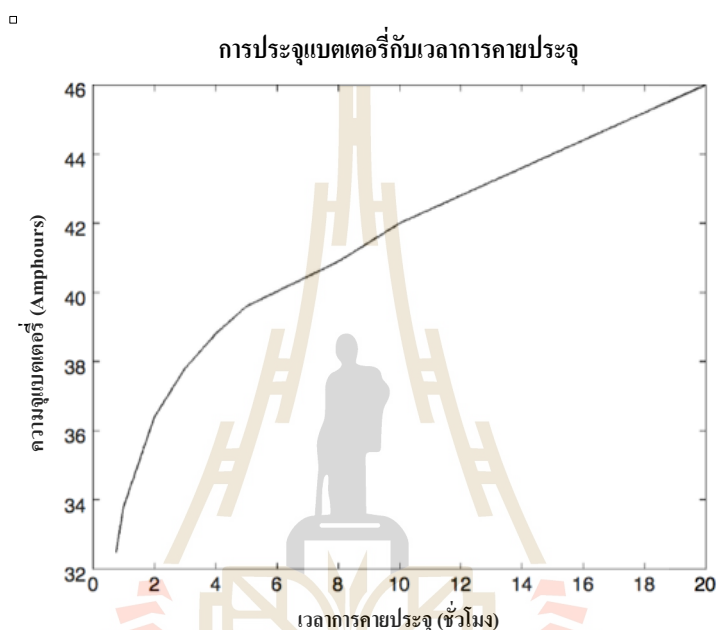
1) ความจุของแบตเตอรี่

กำลังงานไฟฟ้าที่แบตเตอรี่นั้นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุด ในหน่วย SI คือ Coulomb ซึ่งเป็นกำลังงานไฟฟ้าเมื่อกระแส 1 A ไหลเป็นเวลาหนึ่งวินาที อย่างไรก็ตาม หน่วยนี้มีขนาดเล็กไม่สะดวกแทนที่จะเปลี่ยนมาใช้ Ah คือ กระแส 1 A ไหลเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง ความจุของแบตเตอรี่อาจเป็น เช่น 10 Ah ซึ่งหมายความว่าสามารถให้กระแสไหล 1 A ได้เป็นเวลา 10 ชั่วโมง หรือ 2 A เป็นเวลา 5 ชั่วโมง หรือในทางทฤษฎี 10 A เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ ไม่ได้ผลเช่นนี้สำหรับแบตเตอรี่ส่วนใหญ่

ปกติที่ในขณะแบตเตอรี่ถูกใช้งานอาจจะสามารถให้กระแส 1 A 10 ชั่วโมง แต่ถ้า 10 A ถูกดึงมาใช้งานจะทำให้ใช้งานได้น้อยกว่า 1 ชั่วโมง เป็นสิ่งสำคัญที่สุดที่จะเข้าใจเรื่องความจุของแบตเตอรี่ขนาดใหญ่ที่ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า มักจะมีการคายประจุใน 5 ชั่วโมง รูปที่ 2.31 แสดงให้เห็นว่ากำลังการผลิตได้รับผลกระทบอย่างไรหากอุปกรณ์ชาร์จไฟถูกนำออกอย่างรวดเร็วหรือช้ากว่า แผนภาพนี้ใช้สำหรับแบตเตอรี่ที่มีความจุ 100 Ah สังเกตว่าถ้าการชาร์จถูกยกเลิกใน 1 ชั่วโมง ความจุจะลดลงอย่างมากประมาณ 70 Ah ในทางตรงกันข้ามถ้ากระแสไหลช้ากว่าในเวลา 20 ชั่วโมงความจุจะเพิ่มขึ้นประมาณ 110 Ah

การเปลี่ยนแปลงความสามารถนี้เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาขอบข้างที่ไม่ต้องการภายในเซลล์ ผลกระทบที่เห็นได้ชัดที่สุด คือ ในแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด แต่สามารถเกิดขึ้นได้ในแบตเตอรี่ทุกประเภท เป็นสิ่งสำคัญมากที่จะสามารถทำนายได้อย่างแม่นยำถึงผลกระทบของปรากฏการณ์นี้ เมื่อพิจารณาแบบจำลองแบตเตอรี่ ความสามารถของแบตเตอรี่ในความจุ Ah จะถูกแทนด้วยตัวอักษร C สมมติว่าแบตเตอรี่มีความจุ 42 Ah มักจะบอกว่า $C = 42Ah$ หรือผู้ใช้แบตเตอรี่

พูดเกี่ยวกับ กระแสจำหน่าย $2C$ หรือ ชาร์จแบตเตอรี่ที่ $0.4C$ ในกรณีเช่นนี้จะหมายถึง กระแสไฟฟ้าในการใช้งานที่ 84 A หรือกระแสไฟฟ้าที่ชาร์จได้ 16.8 A เพื่อให้ไม่สับสนจึงทำการให้เครื่องหมายขีดล่างบนสัญลักษณ์ C ดังที่เราได้กล่าวมาข้างต้นคือ ค่าความจุ Ah ของแบตเตอรี่ที่แตกต่างกันไปตามระยะเวลาในการใช้งาน ในตัวอย่างแบตเตอรี่ 42 Ah ได้รับการจัดประเภทไว้เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในสถานการณ์ที่สมบูรณ์มากขึ้นนี้จะต้องมีการเขียนกระแสไฟฟ้าที่ 84 แอมป์เป็น $2C_{10}$



รูปที่ 2.31 การเปลี่ยนแปลงความสามารถในการประจุแบตเตอรี่ 42 Ah ของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด (ดัดแปลงจาก Larminie and Lowry, 2012)

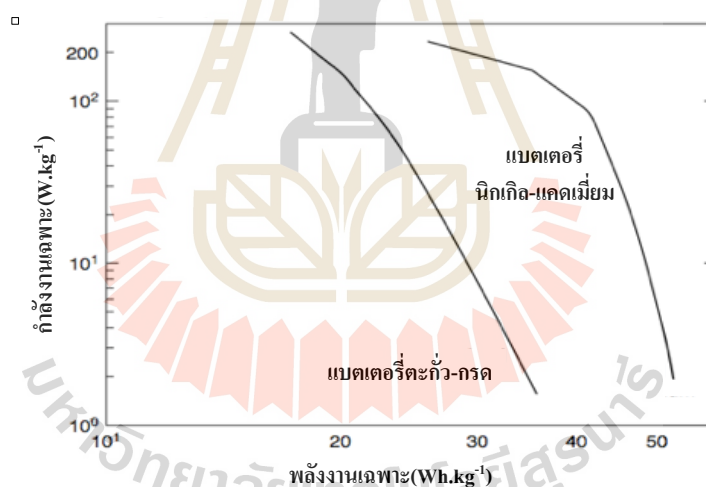
2) การเก็บสะสมพลังงาน วัตถุประสงค์ของแบตเตอรี่ คือ การเก็บพลังงานพลังงานที่จัดเก็บในแบตเตอรี่ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่จัดเก็บไว้ในหน่วย SI คือ Joule แต่เป็นหน่วยเล็ก ๆ ที่ไม่สะดวกดังนั้นจึงใช้หน่วยเป็น Wh แทน จะเทียบเท่าพลังงานของการทำงานที่ค่าถึงไฟฟ้า 1 W สำหรับ 1 ชั่วโมง Wh เท่ากับ 3600 J ซึ่ง Wh สามารถใช้งานได้กับ Ah ในการประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่เพราะสามารถได้จากสมการที่ 2.2

$$\text{พลังงานในหน่วยวัตต์ชั่วโมง (Wh)} = \text{แรงดันไฟฟ้า (V)} \times \text{แอมป์ชั่วโมง (Ah)}$$

$$\text{หรือ} \quad = V \times C \quad (2.2)$$

อย่างไรก็ตาม สมการนี้ต้องใช้ด้วยความระมัดระวังเป็นอย่างยิ่ง ตั้งข้อสังเกตว่า ทั้งแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (V) และยิ่งเพิ่มความจุของ Ah (C) ขึ้นอยู่กับวิธีการใช้แบตเตอรี่ ทั้งสองค่าจะลดลงหากกระแสเพิ่มขึ้นและแบตเตอรี่จะหมดเร็ว พลังงานที่เก็บไว้เป็นปริมาณที่ค่อนข้างผันแปรและลดลงหากปล่อยพลังงานออกมาอย่างรวดเร็ว โดยปกติแล้วจะมีการอ้างอิงตาม พิกัด Ah นั่นคือถ้าความสามารถในการชาร์จประจุไฟฟ้าใน 5 ชั่วโมง

3) พลังงานจำเพาะ (Specific energy) พลังงานจำเพาะ คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เก็บไว้ในทุก ๆ น้ำหนัก 1 กิโลกรัมของแบตเตอรี่ มีหน่วยเป็น Wh/kg เมื่อความจุพลังงานของแบตเตอรี่ที่ต้องการในรถยนต์ที่รู้จัก คือ Wh สามารถแบ่งออกได้โดยพลังงานเฉพาะ (Wh/kg) เพื่อให้ทราบค่าประมาณน้ำหนักของแบตเตอรี่ พลังงานจำเพาะที่ยกมาสามารถเป็นไปได้ไม่มากไปกว่าแนวทางเพราะอย่างที่เห็น พลังงานที่เก็บไว้ในแบตเตอรี่มีความแตกต่างกันอย่างมากกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิและอัตราการคายพลังงาน แสดงในรูปที่ 2.32 ว่าพลังงานจำเพาะของแบตเตอรี่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างไร



รูปที่ 2.32 กำลังงานเฉพาะเทียบกับกราฟพลังงานเฉพาะสำหรับแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด และแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียม (ดัดแปลงจาก Larminie and Lowry, 2012)

4) ความหนาแน่นของพลังงาน (Energy density) ความหนาแน่นของพลังงาน คือ จำนวนพลังงานไฟฟ้าที่เก็บไว้ต่อลูกบาศก์เมตรของปริมาตรแบตเตอรี่ ปกติมีหน่วยของ Wh/m³ นอกจากนี้ยังเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญเนื่องจากความจุพลังงานของแบตเตอรี่สามารถหารด้วยความหนาแน่นของพลังงานแบตเตอรี่ (Wh/m³) เพื่อแสดงปริมาณแบตเตอรี่ที่ต้องการ หากปริมาตร

สำหรับแบตเตอรี่สามารถเพิ่มปริมาตร (m^3) ได้ตามความหนาแน่นของพลังงานแบตเตอรี่ (Wh/m^3) เพื่อให้ได้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้ ปริมาตรแบตเตอรี่อาจมีผลกระทบอย่างมากต่อการออกแบบรถยนต์ เช่นเดียวกับพลังงานที่ระบุความหนาแน่นของพลังงานเป็นตัวเลข

5) **กำลังงานเฉพาะ (Specific power)** คือ ปริมาณของกำลังงานที่ได้รับต่อกิโลกรัมของแบตเตอรี่ เป็นปริมาณที่ค่อนข้างผันแปรเนื่องจากพลังงานที่แบตเตอรี่จ่ายให้ขึ้นอยู่กับโหลดที่เชื่อมต่อกับแบตเตอรี่มากกว่าแบตเตอรี่ แม้ว่าแบตเตอรี่จะมีกำลังไฟฟ้าสูงสุด แต่ก็ไม่ควรที่จะใช้งานใกล้กับกำลังไฟสูงสุดนี้นานกว่าสองถึงสามวินาทีเนื่องจากจะทำงานได้ไม่ดี หน่วยปกติของกำลังงานเฉพาะ คือ W/kg แบตเตอรี่บางชนิดมีพลังงานเฉพาะที่ดีมากแต่มีกำลังงานเฉพาะที่ต่ำซึ่งหมายความว่า แบตเตอรี่สามารถเก็บพลังงานได้มากแต่สามารถคายพลังงานออกได้อย่างช้า ๆ ในแง่ของยานยนต์ไฟฟ้าสามารถใช้ได้กับรถที่ขับเคลื่อนแบบช้า ๆ ความเร็วคงที่ในระยะทางไกล กำลังงานเฉพาะที่สูงจะส่งผลให้พลังงานเฉพาะน้อยลง เนื่องจากการดึงพลังงานจากแบตเตอรี่อย่างรวดเร็ว นั่นคือกำลังงานที่สูงจะลดพลังงานไฟฟ้าที่มีอยู่อย่างรวดเร็ว

6) **ประสิทธิภาพการประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่** คือ ความสามารถของแบตเตอรี่ที่สามารถประจุไฟฟ้าใหม่ได้ โดยประสิทธิภาพการประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่สูงสุด 100% อย่างไรก็ตาม แบตเตอรี่ไม่ได้มีประสิทธิภาพการประจุไฟฟ้า 100% ค่าที่แม่นยำจะแตกต่างกันไปตามประเภทของแบตเตอรี่ อุณหภูมิ และการชาร์จที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังแตกต่างกันไปตามสถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ โดยทั่วไปจะมีการประจุไฟฟ้าจาก 20% ถึง 80% ประสิทธิภาพจะใกล้เคียงกับ 100%

7) **ประสิทธิภาพด้านพลังงาน (Energy efficiency)** คือตัวแปรหนึ่งที่สำคัญและเป็นอัตราส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแบตเตอรี่ให้เท่ากับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่จำเป็นต่อการส่งกลับคืนสู่สถานะก่อนคายประจุ จุดเด่นของการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพที่มีการปล่อยมลพิษลดลง ดังนั้น จึงต้องการพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง พลังงานที่มีประสิทธิภาพจะแตกต่างกันอย่างมากกับวิธีการที่จะใช้แบตเตอรี่ ถ้าแบตเตอรี่ชาร์จและคายประจุอย่างรวดเร็ว ประสิทธิภาพการใช้พลังงานจะลดลงอย่างมาก แต่เป็นแนวทางในการเปรียบเทียบแบตเตอรี่ในลักษณะเดียวกับการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์

8) **อัตราการคายประจุ (Self-discharge rates)** แบตเตอรี่ส่วนใหญ่มักจะมีการคายประจุเมื่อปล่อยทิ้งไว้ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากแบตเตอรี่บางก้อนไม่สามารถทิ้งไว้ได้นานโดยไม่ต้องมีการชาร์จใหม่ อัตราการคายประจุนี้แตกต่างกันไปตามประเภทแบตเตอรี่และปัจจัยอื่น ๆ เช่น อุณหภูมิ อุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มอัตราการคายประจุของแบตเตอรี่

9) **รูปทรงของแบตเตอรี่ (Battery geometry)** เซลล์แบตเตอรี่ถูกสร้างขึ้นในหลายรูปร่าง เช่น เป็นวงรอบ เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เป็นแท่งปรีซึม หรือหกเหลี่ยม ซึ่งตามปกติเป็นบล็อกลี่เหลี่ยม บางคนอาจมองเป็นรูปทรงเรขาคณิตเท่านั้น บางรุ่นสามารถขายในรูปแบบของความกว้างและความยาว ที่สามารถให้นักออกแบบทำการออกแบบขอบเขตและขนาดของแบตเตอรี่ได้

10) **อุณหภูมิ ความร้อน และการลอยเย็นของแบตเตอรี่** แม้ว่าแบตเตอรี่ส่วนใหญ่ทำงานที่อุณหภูมิห้อง แต่มีแบตเตอรี่บางชนิดทำงานที่อุณหภูมิสูงและต้องใช้ความร้อนในการเริ่มต้นการทำงาน และจะมีการระบายความร้อนเมื่อใช้งาน แบตเตอรี่บางประเภทประสิทธิภาพจะลดลงที่อุณหภูมิต่ำซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ แต่ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการให้ความร้อนแก่แบตเตอรี่ เมื่อเลิกใช้งานแบตเตอรี่ผู้ออกแบบต้องตระหนักถึงลักษณะการใช้งานของอุณหภูมิ ความร้อน และความเย็นของแบตเตอรี่ ซึ่งต้องคำนึงถึงระหว่างขั้นตอนการออกแบบยานยนต์ไฟฟ้า

11) **อายุการใช้งานแบตเตอรี่ และจำนวนรอบการประจุและคายประจุไฟฟ้า (Deep cycles)** โดยปกติแบตเตอรี่สามารถประจุไฟฟ้าได้มากที่สุดไม่ก็ร้อยรอบการประจุไฟฟ้า อย่างไรก็ตามจำนวนรอบการประจุไฟฟ้าที่แน่นอนขึ้นอยู่กับชนิดของแบตเตอรี่ รายละเอียดการออกแบบแบตเตอรี่ และวิธีการใช้งานแบตเตอรี่ ซึ่งเป็นตัวเลขที่สำคัญมากในข้อกำหนดของแบตเตอรี่ที่สะท้อนถึงอายุการใช้งาน และสะท้อนถึงค่าใช้จ่ายการใช้พลังงานไฟฟ้ายานยนต์ไฟฟ้า

2.5.3 แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

1) **ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด** แบตเตอรี่ที่รู้จักและใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า คือ แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในรถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน อย่างไรก็ตาม สำหรับยานยนต์ไฟฟ้านั้น แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ต้องทนทานต่อการประจุและคายประจุไฟฟ้ามากขึ้น

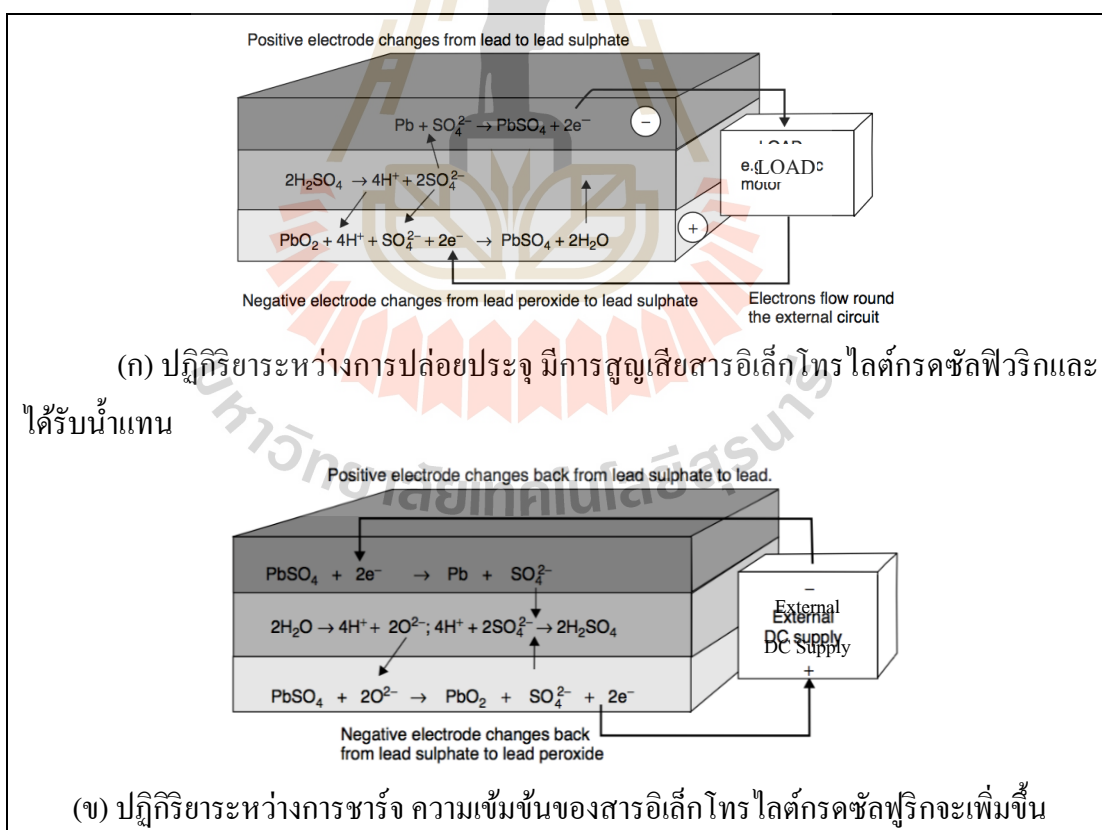
ในเซลล์ตะกั่ว-กรด แผ่นเชิงลบจะมีตะกั่วเป็นวัสดุ ขณะที่แผ่นบวกมีวัสดุตะกั่วไดออกไซด์ เซลล์ตะกั่วจะถูกเชื่อมในสารอิเล็กโทรไลต์กรดซัลฟิวริกเจือจาง กรดซัลฟิวริกรวมกับตะกั่วและตะกั่วไดออกไซด์เพื่อผลิตตะกั่วซัลเฟตและน้ำ ทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาในระหว่างกระบวนการ ปฏิริยาโดยรวม แสดงในสมการที่ 2.3



ปฏิกิริยาในขั้วบวกและขั้วลบของแบตเตอรี่จะมีการคายประจุ ทำให้เกิดการก่อตัวของตะกั่วซัลเฟต สารละลายอิเล็กโทรไลต์จะค่อย ๆ สูญเสียกรดซัลฟิวริก และกลายเป็นกรดเจือจางมากขึ้น เมื่อประจุเช่นเดียวกับรูปที่ 2.33 อิเล็กโทรดจะเปลี่ยนกลับเป็นตะกั่ว สารอิเล็กโทรไลต์

จะยังทำปฏิกิริยาให้กรดซัลฟิวริกมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด เป็นแบตเตอรี่ที่ใช้กันมากที่สุดในงานยานยนต์ แต่เป็นขนาดที่เล็กที่สุดของระบบ สาเหตุหลัก คือ ส่วนประกอบหลักมีราคาไม่แพง มีประสิทธิภาพและมีแรงดันไฟฟ้าสูงประมาณ 2 V ต่อเซลล์ ลักษณะโดยรวมของแบตเตอรี่จะแสดงในตารางที่ 2.5 หนึ่งในคุณสมบัติเด่นที่สุดของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด คือ ความต้านทานภายในที่ต่ำมาก ซึ่งเกิดแรงดันไฟฟ้าตกในขณะที่มีกระแสไฟฟ้าไหลน้อยมาก รูปที่ 2.33 แสดงแบตเตอรี่ที่มีค่าความหนาแน่นพลังงาน 1.0 Ah ความจุของเซลล์มีส่วนใกล้เคียงกับพื้นที่ของแผ่นตะกั่วและความต้านทานภายในจะมีสัดส่วนผกผันกับพื้นที่ที่แผ่นตะกั่ว ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่แสดงไว้ในตารางที่ 2.3 มีความต้านทานเป็น 0.022Ω ต่อเซลล์ การประมาณค่าความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด จึงสามารถหาได้จากสมการที่ 2.4 โดยที่ R คือ ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ และ N_c คือ จำนวนของเซลล์แบตเตอรี่

$$R = N_c \times 0.022 / C_{10} \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.33 ปฏิกิริยาระหว่างการประจุและการคายประจุของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

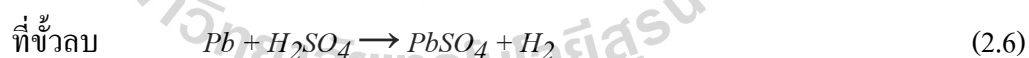
(Larminie and Lowry, 2012)

ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์สำหรับแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด (Larminie and Lowry, 2012)

พลังงานเฉพาะ	20-35 Wh/kg ขึ้นอยู่กับการใช้งาน
ความหนาแน่นพลังงาน	54-95 Wh/L
กำลังงานเฉพาะ	~250 W/kg ก่อนประสิทธิภาพลดลง
แรงดันไฟฟ้าของเซลล์	2 V
ประสิทธิภาพการประจุ	~80% แตกต่างกันไปตามการคายประจุและอุณหภูมิ
ความต้านทานภายใน	น้อยมาก ~0.022 Ω ต่อเซลล์ สำหรับ 1 Ah
การใช้งานในเชิงพาณิชย์	สามารถหาซื้อได้จากหลายผู้ผลิต
อุณหภูมิขณะทำงาน	ที่อุณหภูมิแวดล้อม และประสิทธิภาพต่ำเมื่ออุณหภูมิต่ำ
การคายประจุ	~2% ต่อวัน
จำนวนรอบการใช้งาน	มากถึง 800 รอบ ที่ความจุ 80%
เวลาในการประจุไฟฟ้า	8 ชั่วโมง

2) ลักษณะพิเศษของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

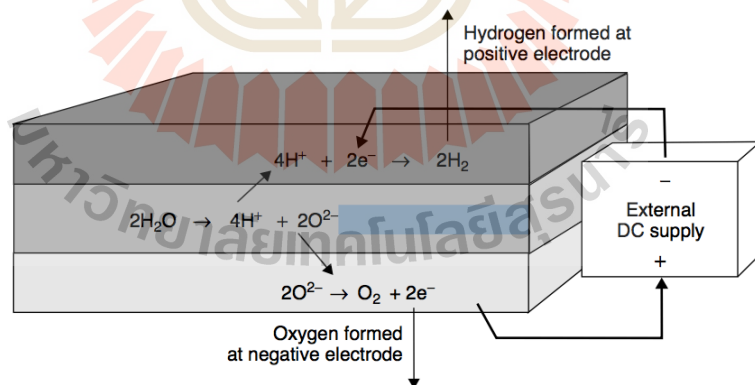
ปฏิกิริยาของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ดังแสดงในรูปที่ 2.35 ทำให้เกิดตะกั่วและไดออกไซด์ ซึ่งจะไม่สามารถละลายในสารละลายตะกั่ว-กรด และจะสลายตัวไปแม้ว่าจะเข้มข้น โดยปฏิกิริยาดังแสดงในสมการที่ 2.5 และ 2.6



ปฏิกิริยาของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด จะส่งผลต่อการคายประจุของแบตเตอรี่ อัตราส่วนที่เกิดปฏิกิริยาเหล่านี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่ ซึ่งจะเกิดเร็วขึ้นถ้าเซลล์แบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ เช่น ความบริสุทธิ์ของส่วนประกอบ และโลหะผสมที่ใช้ในการทำอิเล็กโทรด ปฏิกิริยาเหล่านี้จะผลิตก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนขณะที่แบตเตอรี่หมดอายุการใช้งาน ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นเร็วหากแบตเตอรี่ถูกใช้หมดเร็ว และการทำงานของอิเล็กโทรดที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการสูญเสียจากการชาร์จ ปฏิกิริยาการคายประจุจะเกิดขึ้นไม่เหมือนกันในทุกเซลล์แบตเตอรี่ ดังนั้น เซลล์แบตเตอรี่บางเซลล์จึงจะถูกคายประจุออกมามากกว่าเซลล์อื่น ๆ สิ่งนี้มีผลกระทบที่สำคัญมากสำหรับวิธีการชาร์จแบตเตอรี่ แต่ในระยะสั้นเซลล์

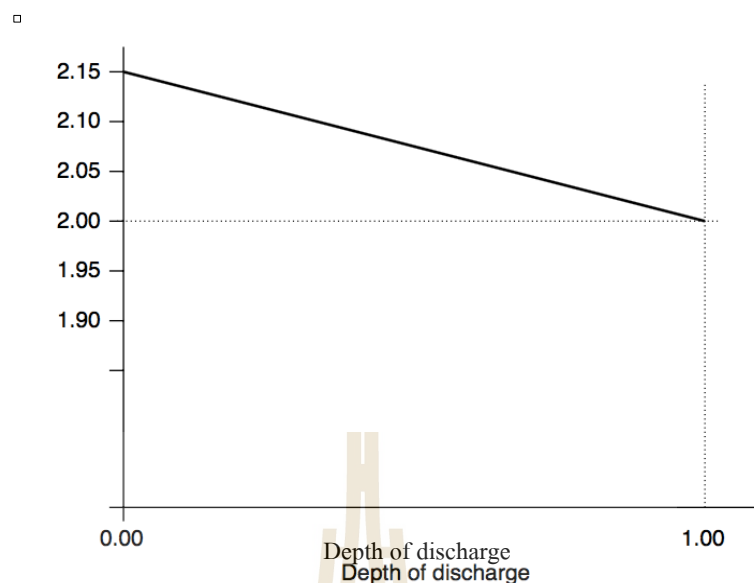
แบตเตอรี่บางส่วนจะต้องทนต่อการถูกประจุไฟฟ้าเกิน (Over-charged) เพื่อให้เซลล์แบตเตอรี่ทั้งหมดจะถูกประจุ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด เมื่อมีการประจุไฟฟ้าเกินแสดงไว้ในรูปที่ 2.34 ปฏิกิริยาของก๊าซเหล่านี้เกิดขึ้นเมื่อไม่มีตะกั่วซัลเฟตในขั้วไฟฟ้าเพื่อปล่อยหรือรับอิเล็กตรอน ดังนั้น จึงเกิดขึ้นเมื่อแบตเตอรี่ถูกประจุจนเต็มหรือเกือบเต็ม

ปฏิกิริยาการชาร์จและการคายประจุจะมีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ของเซลล์ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นนั้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเมื่อคายประจุออกมา สำหรับแบตเตอรี่ที่ปิดสนิทในปัจจุบัน การเปลี่ยนแปลงจะเป็นแบบเชิงเส้นซึ่งค่อนข้างใกล้เคียงกัน สังเกตได้ว่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ไม่สามารถใช้เพื่อระบุสถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้ โดยปกติแล้วไม่สามารถวัดแรงดันไฟฟ้าแบบเปิดวงจรได้เมื่อใช้งานแบตเตอรี่ ดังนั้น การวัดแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่อาจได้รับผลกระทบจากปัจจัยอื่น ๆ ลักษณะเด่นของปฏิกิริยาการประจุไฟฟ้า ในรูปที่ 2.35 และปฏิกิริยาการคายประจุ สำหรับสมการที่ 2.5 และ 2.6 ซึ่งจะทำให้น้ำจะหายไปกลายเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน ในการออกแบบแบตเตอรี่ที่มีอายุการใช้งานยาวนานมาก ๆ ก๊าซนี้ถูกปล่อยออกและสูญหายไป สารอิเล็กโทรไลต์จะต้องถูกเติมเข้าไปแทนด้วยน้ำกลั่น ในแบตเตอรี่ที่ปิดสนิทสมัยนี้เป็นไปได้ที่ก๊าซจะถูกเก็บอยู่ในแบตเตอรี่และสามารถรวมตัวใหม่ซึ่งสามารถเกิดมากขึ้นสำหรับการเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนกลับไปเป็นน้ำ



รูปที่ 2.34 ปฏิกิริยาการเกิดก๊าซที่เกิดขึ้นเมื่อแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ถูกประจุจนเต็ม

(Larminie and Lowry, 2012)



รูปที่ 2.35 แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด แบบปิดผนึกที่เปลี่ยนไปตามสถานะการชาร์จ
(Larminie and Lowry, 2012)

ผู้ผลิตแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด สามารถผลิตได้ในหลากหลายขนาด เพื่อให้ได้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการและที่กำหนด อย่างไรก็ตาม ปัญหาเกี่ยวกับการใช้แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด โดยทั่วไปก็คือการออกแบบที่แตกต่างกัน สำหรับการใช้งานที่แตกต่างกันและจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้นิยามที่ถูกต้อง ประเภทของแบตเตอรี่ที่ใช้สำหรับรถยนต์ทั่วไปจะไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้า แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ส่วนใหญ่ถูกออกแบบมาสำหรับการใช้งานในระบบไฟฉุกเฉินและสัญญาณเตือนภัย ในปัจจุบันมีการผลิตแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ที่มีการอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น ถูกสร้างขึ้นโดย Vincent และ Scrosati ในปี 1998 เป็นแบตเตอรี่ประเภท Traction หรือ Deep cycles ที่เหมาะสมกับยานยนต์ไฟฟ้าและมีราคาแพง

3) อายุการใช้งานและการบำรุงรักษาแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

ปฏิกิริยาการเกิดก๊าซจะเกิดขึ้นภายในแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด นำไปสู่การสูญเสียของสารอิเล็กโทรไลต์ แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด แบบดั้งเดิมต้องเติมน้ำกลั่นเป็นครั้งคราว แต่แบตเตอรี่ที่เป็นตะกั่ว-กรด ในรถยนต์สมัยใหม่จะปิดสนิทเพื่อป้องกันการสูญเสียของสารอิเล็กโทรไลต์ นอกจากนี้สารอิเล็กโทรไลต์ยังเป็นเจลไม่ใช่ของเหลว หมายความว่า การบำรุงรักษาของสารอิเล็กโทรไลต์จะไม่จำเป็นอีกต่อไป อย่างไรก็ตาม การปิดผนึกแบตเตอรี่นั้นจะทำให้ไม่สามารถถูกแทนที่ คุณสมบัตินี้เป็นข้อจำกัดด้านความปลอดภัยและนำไปสู่ความเสี่ยงของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ก๊าซดังกล่าวจะเกิดขึ้นหากเกิดปฏิกิริยา ดังแสดงในรูปที่ 2.34 ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีการประจุไฟฟ้า

ที่แรงดันสูงเกินไปหรือประจุไฟฟ้าเร็วเกินไป อย่างไรก็ตาม แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด อาจมีอายุการใช้งานที่สั้น เนื่องจากผลกระทบหลายอย่าง ตัวอย่างเช่นกระบวนการที่เรียกว่า Sulphation กรณีนี้เกิดขึ้นหากทิ้งแบตเตอรี่ไว้เป็นเวลานานและมีการปล่อยตะกั่วซัลเฟตออกมาบนขั้วไฟฟ้ากลายเป็นผลึกขนาดใหญ่ที่ยากต่อการเปลี่ยนกลับเป็นตะกั่วหรือ ไดออกไซด์และก่อตัวเป็นชั้นฉนวนเหนือพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า

การเกิดซัลเฟตของแบตเตอรี่เป็นสาเหตุหลักของความล้มเหลวของแบตเตอรี่ ผลกระทบของการสั้นสะเทือนและการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุที่ใช้งานต่อเนื่องในระหว่างรอบการชาร์จหรือการคายประจุจะมีผลต่อการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ ปัญหาทั้งหมดนี้จะทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ถูกจำกัด ไว้ที่ประมาณ 700 รอบ อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไป แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด สามารถใช้งานได้ตั้งแต่ 1200-1500 รอบ ในระยะเวลาการใช้งาน 7-8 ปี จากประสบการณ์การใช้งานของ Fleet กับรถยนต์ไฟฟ้าพบว่าแบตเตอรี่มีอายุการใช้งานประมาณ 5 ปี หรือ 700 รอบ อายุการใช้งานที่สั้นของยานยนต์ไฟฟ้าเป็นผลจากการใช้งานแบตเตอรี่มากขึ้น แบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าปกติจะถูกคายประจุประมาณสองชั่วโมงเมื่อเทียบกับรถบรรทุกอุตสาหกรรมที่ใช้เวลาประมาณ 7-8 ชั่วโมง

4) การชาร์จแบตเตอรี่

การชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด เป็นขั้นตอนที่ซับซ้อนเช่นเดียวกับแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ หากดำเนินการอย่างไม่ถูกต้องอาจทำให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพและลดอายุการใช้งานได้อย่างรวดเร็ว การชาร์จจะต้องไม่เกิดขึ้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าสูงเกินไป วิธีที่ดีที่สุดในการดูแลแบตเตอรี่คือเมื่อเลือกแบตเตอรี่แล้วต้องขอคำแนะนำจากผู้ผลิตโดยตรง เทคนิคการประจุไฟฟ้าที่ใช้บ่อยที่สุดสำหรับแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด เรียกว่าการประจุแบบหลายขั้นตอน ในวิธีนี้แบตเตอรี่จะถูกประจุจนกว่าแรงดันไฟฟ้าของเซลล์จะเพิ่มขึ้นไปยังระดับที่กำหนดไว้ อย่างไรก็ตาม แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ถูกนำมาใช้ในส่วนต่าง ๆ จำนวนมาก ดังนั้น จึงเหมาะสำหรับเครื่องชาร์จที่มีคุณภาพดีจากผู้ผลิตที่หลากหลาย จุดสำคัญที่ใช้กับแบตเตอรี่ประเภทต่าง ๆ เกี่ยวข้องกับกระบวนการปรับระดับการประจุไฟฟ้าที่ต้องทำในแบตเตอรี่เป็นระยะ ๆ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งสำหรับแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ได้รับการยอมรับในเชิงพาณิชย์โดยมีการใช้งานในภาคอุตสาหกรรม เป็นแบตเตอรี่แบบชาร์จไฟได้ ที่ถูกที่สุดต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด มีการใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อใช้ในยานยนต์ที่วิ่งระยะสั้น ซึ่งมีช่วงประสิทธิภาพกำลังงานมากขึ้น ดังนั้น จึงมีความขัดแย้งกันมากในยานยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริดซึ่งจะมีการจัดเก็บพลังงานไว้เพียงจำนวนจำกัด แต่ควรมีอัตราการประจุและคายประจุไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว

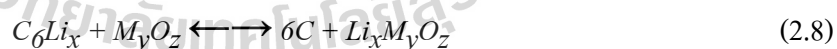
2.5.4 แบตเตอรี่ลิเทียม

นับตั้งแต่ช่วงปลายทศวรรษ 1980 แบตเตอรี่ลิเทียมที่สามารถชาร์จใหม่ได้เริ่มเข้าสู่ตลาด และมีความหนาแน่นของพลังงานที่เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่แบบชาร์จไฟได้ชนิดอื่น ๆ แม้ว่าราคาจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก เป็นคุณลักษณะที่ดีขึ้นสำหรับใช้งานในคอมพิวเตอร์แล็ปท็อป และโทรศัพท์มือถือ แบตเตอรี่ลิเทียมมีต้นทุนต่ำกว่า NiCad หรือ NiHM

1) แบตเตอรี่ลิเทียมโพลิเมอร์ แบตเตอรี่ลิเทียมโพลิเมอร์ใช้โลหะลิเทียมสำหรับขั้วลบ และการเปลี่ยนรูปโลหะออกไซด์เป็นโลหะบวก ในปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นลิเทียมรวมกับโลหะออกไซด์เพื่อสร้างโลหะออกไซด์ลิเทียมและปล่อยพลังงาน เมื่อแบตเตอรี่ชาร์จใหม่ปฏิกิริยาทางเคมีจะย้อนกลับ ลิเทียมเป็นสารปฏิกิริยาและไอออนเคลื่อนที่ที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ ดังแสดงในสมการที่ 2.7 ขั้วลบของแบตเตอรี่ลิเทียมโพลิเมอร์เป็นสาเหตุหลักของปัญหาเกี่ยวกับเซลล์แบตเตอรี่ประเภทนี้ ด้วยปัญหาด้านความปลอดภัยและบางครั้งประสิทธิภาพในการทำงานลดลงเนื่องจากการทำ Passivation ดังนั้น แบตเตอรี่ลิเทียมโพลิเมอร์จึงถูกแทนที่โดยแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน



2) แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนถูกนำมาใช้ในช่วงต้นทศวรรษที่ 1990 และใช้ลิเทียมทรานซิชันออกไซด์โลหะสำหรับขั้วบวกและคาร์บอนที่เป็นลิเทียมสำหรับขั้วลบ อิเล็กโทรไลต์เป็นสารละลายอินทรีย์เหลวหรือของแข็งพอลิเมอร์ พลังงานไฟฟ้าได้มาจากการรวมกันของลิเทียมคาร์บอนและลิเทียมโลหะออกไซด์เพื่อสร้างคาร์บอนและลิเทียมโลหะออกไซด์ ปฏิกิริยาทางเคมีโดยรวมของแบตเตอรี่ คือ



คุณสมบัติที่สำคัญของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแสดงในตารางที่ 2.4 จุดสำคัญเกี่ยวกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนคือการควบคุมแรงดันไฟที่ถูกต้องเมื่อชาร์จแบตเตอรี่ลิเทียม ถ้าแบตเตอรี่มีกำลังไฟฟ้าสูงเกินไปเล็กน้อยอาจทำให้แบตเตอรี่เสียหายและหากแบตเตอรี่กำลังไฟฟ้าต่ำเกินไปอาจทำให้แบตเตอรี่ถูกประจุไฟฟ้าไม่เพียงพอ (Larminie and Lowry, 2012)

ตารางที่ 2.4 พารามิเตอร์สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Larminie and Lowry, 2012)

พลังงานเฉพาะ	90 Wh/kg
ความหนาแน่นพลังงาน	153 Wh/L
กำลังงานเฉพาะ	300 W/kg
แรงดันไฟฟ้าของเซลล์	3.5 V มีความต้านทานภายในน้อยมาก
ประสิทธิภาพการประจุ	ดีมาก
การใช้งานในเชิงพาณิชย์	มีขายแค่เซลล์ขนาดเล็กจึงยังไม่เหมาะกับยานยนต์ไฟฟ้า
การคายประจุ	น้อยมาก ประมาณ 10% ต่อเดือน
จำนวนรอบการใช้งาน	>1000 รอบ
เวลาในการประจุไฟฟ้า	2-3 ชั่วโมง

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีข้อได้เปรียบในด้านน้ำหนักที่เบากว่าแบตเตอรี่ชนิดอื่น ๆ และทำให้มีความน่าสนใจอย่างยิ่งสำหรับการนำมาใช้งานกับยานยนต์ไฟฟ้าในอนาคต แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีพลังงานเฉพาะประมาณสามเท่าของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด และอาจทำให้ยานยนต์ไฟฟ้ามีช่วงการใช้งานที่ยาวนานและเหมาะสมมากขึ้น อย่างไรก็ตาม แบตเตอรี่ขนาดใหญ่ในปัจจุบันมีราคาแพง เมื่อบริษัทการค้าได้จัดตั้งสายการผลิตที่สามารถผลิตแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่มีต้นทุนต่ำทำให้มีศักยภาพเต็มที่ รถยนต์ไฟฟ้าบางรุ่นมีการพลังงานจากแบตเตอรี่ลิเทียม ที่มีการสาธิตการใช้งาน คือ ยานยนต์ไฟฟ้ารุ่น ฟอร์ดกา ที่ผลิตในปี 2544

การประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่นั้นต้องใช้พลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ เช่น แหล่งจ่ายไฟทั่วไปและแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง การชาร์จแบตเตอรี่กระแสตรงที่ถูกต้องจะต้องมีคลื่นรบกวนน้อยมาก เนื่องจากถ้าหากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ประจุต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่การชาร์จจะไม่เกิดขึ้นและที่จุดสูงของสัญญาณรบกวนอาจทำให้แรงดันไฟฟ้าสูงเกินซึ่งทำให้แบตเตอรี่เสียหายได้ ยิ่งกระแสไฟฟ้ากระแสตรงสูงขึ้นเท่าไรก็ยิ่งยากสำหรับวงจรเรียงกระแสที่สามารถผลิตไฟฟ้ากระแสตรงที่ราบเรียบ หมายความว่า วงจรแปลงผันและลดสัญญาณรบกวนของเครื่องชาร์จแบตเตอรี่จะมีราคาแพง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการประจุไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าสูง ตัวอย่างเช่น เครื่องชาร์จแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า General Motors EV1 มีราคาประมาณ 2,000 เหรียญในปี 1996

ประเด็นหนึ่งที่สำคัญเกี่ยวกับเครื่องชาร์จแบตเตอรี่ คือ การจัดหาสิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับการประจุไฟฟ้าในสถานที่สาธารณะ เช่น ที่จอดรถของบางเมืองในยุโรป เช่น La Rochelle ในประเทศฝรั่งเศส และอีกหลายแห่งในรัฐแคลิฟอร์เนียในสหรัฐอเมริกา ปัญหาสำคัญ คือ การทำ

ให้เป็นมาตรฐานเดียวกันเพื่อให้มั่นใจว่ายานยนต์ไฟฟ้าทั้งหมดสามารถเชื่อมต่อกับระบบการประจุไฟฟ้าดังกล่าวได้อย่างปลอดภัย อย่างไรก็ตาม ยานยนต์ไฟฟ้าส่วนใหญ่ เช่น รถจักรยาน อุปกรณ์ช่วยการเคลื่อนย้ายต่าง ๆ และยานยนต์สำหรับการขนส่ง จะใช้เครื่องชาร์จที่ได้รับการออกแบบมาเฉพาะสำหรับแบตเตอรี่บนรถคันดังกล่าว รถยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริดจะมีเครื่องชาร์จเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับในตัวรถ และการประจุไฟฟ้าจะถูกควบคุมโดยระบบการจัดการพลังงานของยานยนต์

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ

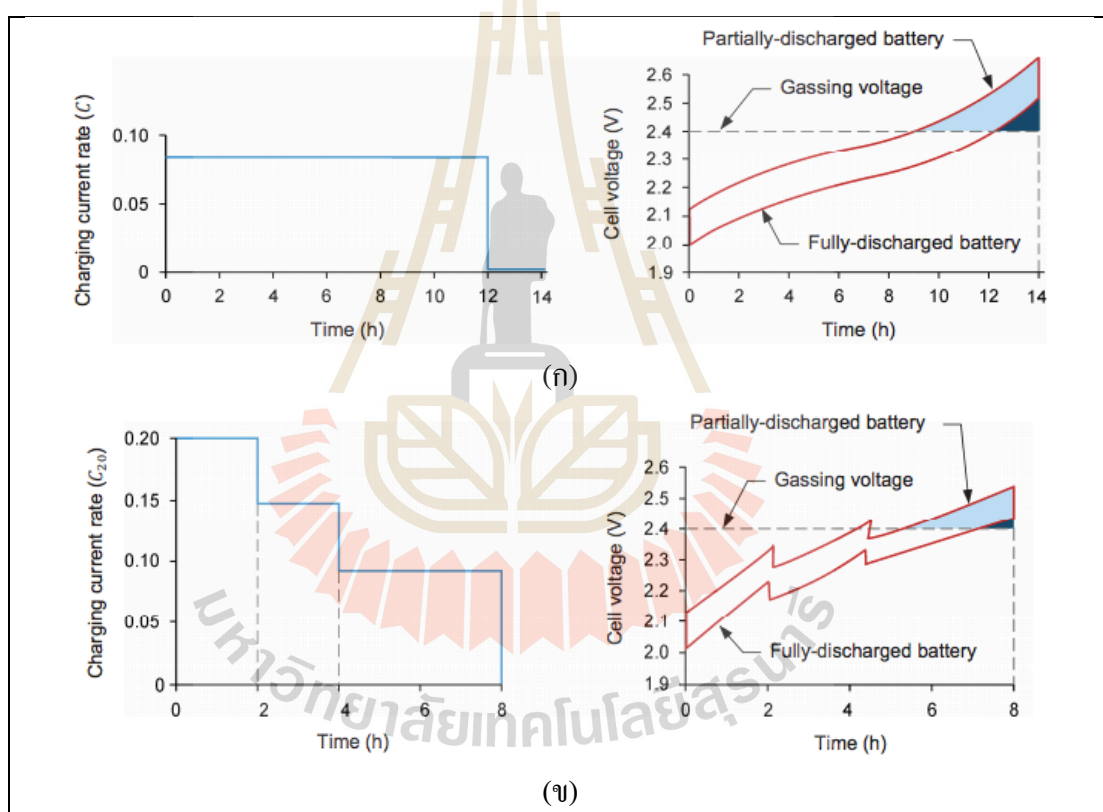
พารามิเตอร์	Lead-acid	NiCd	NiMH	NaS	NaMCl	Li-Ion
พลังงานเฉพาะ	20-35 Wh/kg	40-50 Wh/kg	~65 Wh/kg	~100 Wh/kg	~100 Wh/kg	90 Wh/kg
กำลังงานเฉพาะ	250 W/kg	~125 W/kg	200 W/kg	200 W/kg	150 W/kg	300 W/kg
ความหนาแน่นพลังงาน	54-95 Wh/L	70-90 Wh/L	~150 Wh/L	~150 Wh/L	~150 Wh/L	153 Wh/L
แรงดันไฟฟ้าของเซลล์	2 V	1.2 V	1.2 V	2 V	~2 V	3.5 V
ความต้านทานภายใน	~0.022 Ω	~0.06 Ω	~0.06 Ω	~0.06 Ω	น้อยมาก	น้อยมาก
การใช้งานในเชิงพาณิชย์	หลายผู้ผลิต	หลายผู้ผลิต	หลายผู้ผลิต	ตั้งผลิต	หลายผู้ผลิต	หลายผู้ผลิต
อุณหภูมิขณะทำงาน	Ambient	-40 - +80 °C	Ambient	300-350 °C	300-350 °C	Ambient
การคายประจุ	~2% ต่อวัน	0.5% ต่อวัน	5% ต่อวัน	ค่อนข้างต่ำ	10% ต่อวัน	10% ต่อเดือน
จำนวนรอบการใช้งาน	800 รอบ	1200 รอบ	~1000 รอบ	~1000 รอบ	>1000 รอบ	>1000 รอบ
เวลาในการประจุไฟฟ้า	8 ชั่วโมง	1 ชั่วโมง	1 ชั่วโมง	8 ชั่วโมง	8 ชั่วโมง	2-3 ชั่วโมง

2.5.5 การประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่ตะกั่วกรด

แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด มีวิธีการประจุไฟฟ้าหลายวิธีด้วยกัน ได้แก่ วิธีการประจุไฟฟ้าแบบกระแสคงที่ (Constant-Current) วิธีการประจุไฟฟ้าแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ (Constant-Voltage) วิธีการประจุไฟฟ้าแบบดัดแปลงวิธีแรงดันคงที่ (Modified constant-voltage) วิธี Float charging และวิธี Trickle charging (ที่มา: Battery Charging Methods)

1) วิธีการชาร์จแบบกระแสคงที่ กระแสไฟฟ้าจะถูกจำกัดในบางช่วงเวลาเพื่อให้มีการชาร์จแบตเตอรี่ กระแสชาร์จจะถูกตั้งค่าให้มีค่าน้อย โดยทั่วไปจะน้อยกว่า 0.1C เพื่อหลีกเลี่ยง

แรงดันเกินของแบตเตอรี่จากการเกิดก๊าซขณะที่แบตเตอรี่ถูกชาร์จเกือบถึง 100% ผลที่ตามมาคือใช้เวลาชาร์จนาน (ปกติ 12 ชั่วโมงหรือนานกว่า) รูปที่ 2.36 (ก) แสดงเส้นโค้งการชาร์จที่ได้จากวิธีการแคงที่ (ขั้นตอนเดียว) นอกจากนี้ยังสามารถใช้ขั้นตอนการลดหลายขั้นตอนเพื่อลดระยะเวลาประจุไฟฟ้าโดยใช้วิธีการชาร์จแบบกระแคงที่ดังที่แสดงในรูปที่ 2.36 (ข) แม้ว่าจะใช้สำหรับชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่วกรดขนาดเล็ก แต่วิธีการชาร์จไฟฟ้าแบบต่อเนื่องไม่ได้ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับแบตเตอรี่ตะกั่วกรดเนื่องจากมีแนวโน้มที่จะเกิดก๊าซขึ้นเมื่อชาร์จแบตเตอรี่เป็นเวลานานเกินไป ความเสี่ยงในการเกิดก๊าซมีความสำคัญมากขึ้นในการชาร์จแบตเตอรี่ซึ่งมีเพียงการเกิดดีชาร์จบางส่วนเท่านั้น กระแสคงที่ที่ใช้ในวิธีการชาร์จแบบ Trickle charging

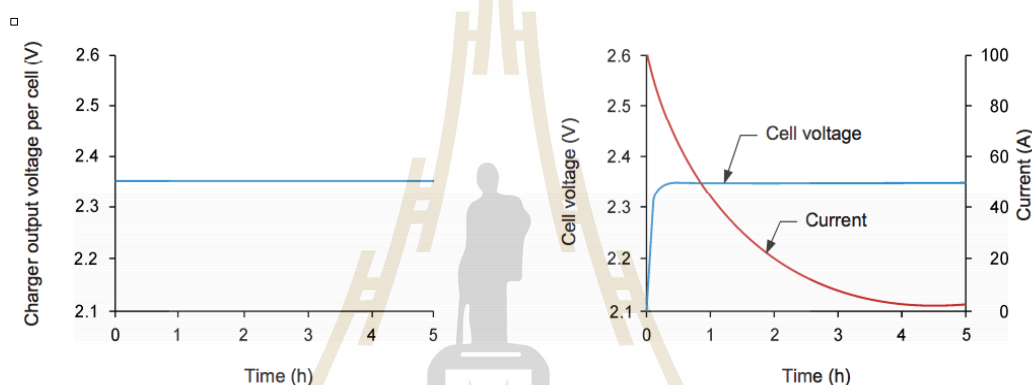


รูปที่ 2.36 วิธีการประจุไฟฟ้าแบบกระแคงที่แบบขั้นตอนเดียวและหลายขั้นตอน¹²

2) วิธีการชาร์จแบบแรงดันคงที่ ใช้แรงดันไฟฟ้าคงที่เพื่อชาร์จแบตเตอรี่ กระแสไฟฟ้าที่ชาร์จครั้งแรก (กระแสที่จุดเริ่มต้นของการชาร์จแบตเตอรี่) อยู่ที่ระดับสูงสุดและยัง

¹² ที่มา: http://www1.labvolt.com/publications/Exercises/86351-00_4.pdf, สืบค้นเมื่อ 10 เมษายน 2562

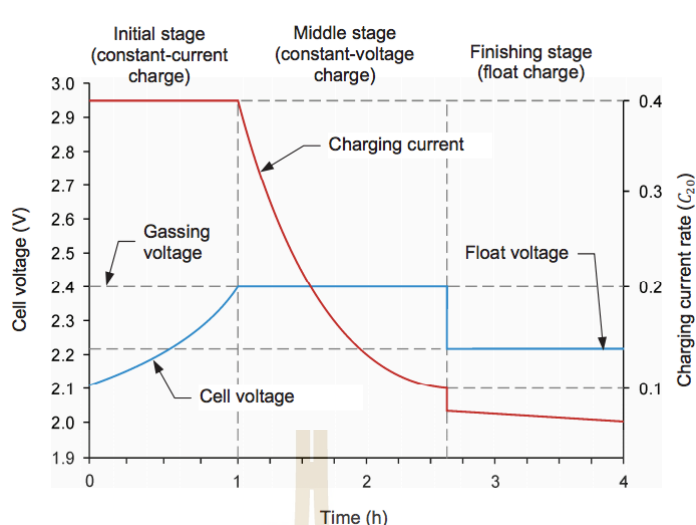
สามารถเข้าถึงค่าที่สูงกว่า (แม้จะเกินค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ผู้ผลิตแบตเตอรี่กำหนด) เมื่อระดับความลึกการปล่อยประจุของแบตเตอรี่สูง ด้วยเหตุผลนี้การชาร์จแบบไม่ต่อเนื่องจึงไม่ค่อยใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่กรดตะกั่วที่ใช้ในการชาร์จ ดิจชาร์จแบบวงจร (เช่นแบตเตอรี่ในรถยนต์ไฟฟ้า) อย่างไรก็ตาม การชาร์จแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่มักใช้เพื่อรักษาประจุของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดที่ใช้ในการใช้งานแบบสแตนด์บาย (เช่นในเครื่องจ่ายไฟฟ้าสำรอง) ซึ่งในกรณีนี้กระบวนการชาร์จจะเรียกว่าการชาร์จแบบแรงดันคงที่ รูปที่ 2.37 แสดงกราฟค่าลักษณะการชาร์จที่ได้จากวิธีการชาร์จแบบแรงดันคงที่ ความแตกต่างของรูปคลื่นระหว่างแรงดันไฟฟ้าออกของเครื่องชาร์จและแรงดันแบตเตอรี่ของแบตเตอรี่เมื่อเริ่มต้นชาร์จเกิดจากความต้านทานภายในของแบตเตอรี่



รูปที่ 2.37 ลักษณะการประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ โดยใช้วิธีประจุไฟฟ้าแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่¹⁴

3) Modified Constant-Voltage charging method ในวิธีการชาร์จแบบแรงดันคงที่ที่ได้รับการแก้ไขจะใช้ทั้งค่ากระแสคงที่เริ่มต้น และค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ การชาร์จแบตเตอรี่เริ่มต้นด้วยกระแสไฟฟ้าที่คงที่จนกว่าจะถึงแรงดันไฟฟ้าที่กำหนด (ปกติคือแรงดันที่ทำให้เกิดก๊าซ) การชาร์จแบตเตอรี่ต่อเนื่องยังคงมีแรงดันคงที่ที่เท่ากับหรือน้อยกว่าแรงดันที่ทำให้เกิดก๊าซเล็กน้อย จนกระทั่งกระแสไฟฟ้าลดลงเหลือประมาณ $0.1C_{20}$ ที่จุดนี้ ค่าแรงดันคงที่ลดลงไปถึงค่าลอย (Float value) เพื่อเสร็จสิ้นและรักษาการชาร์จแบตเตอรี่ ค่ากระแสคงที่และแรงดันคงที่เริ่มต้นที่สูง ระยะเวลาในการชาร์จจะสั้นลง รูปที่ 2.38 แสดงกราฟค่าลักษณะการชาร์จที่ได้จากวิธีการชาร์จแรงดันคงที่แบบปรับปรุง วิธีการนี้เรียกว่าวิธีการชาร์จแบบรวดเร็ว วิธีการชาร์จนี้ใช้ในเครื่องชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด ที่ใช้ร่วมกับ Four Quadrant Dynamometer/Power Supply ¹⁴

¹⁴ ที่มา: http://www1.labvolt.com/publications/Exercises/86351-00_4.pdf, สืบค้นเมื่อ 10 เมษายน 2562



รูปที่ 2.38 วิธีชาร์จแบบแรงดันคงที่ที่ดัดแปลง¹⁴

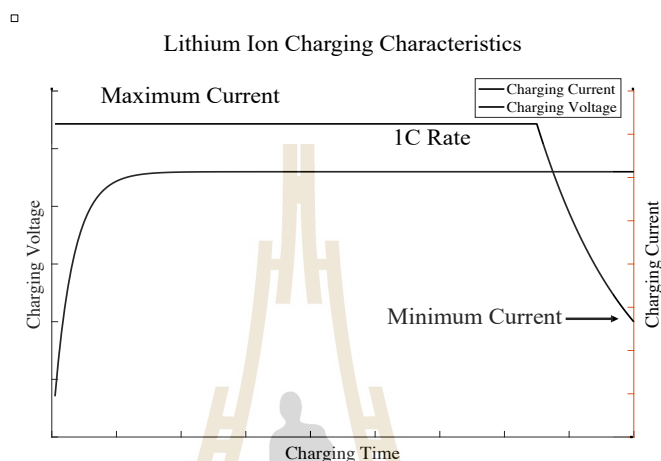
4) Float charging method แรงดันไฟฟ้าคงที่ซึ่งตั้งค่าไว้เพียงพอต่อการชาร์จแบตเตอรี่หรือเพื่อรักษาการประจุไฟฟ้าที่ใช้กับแบตเตอรี่ ค่าแรงดันประจุไฟฟ้าทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 2.15 V ถึง 2.3 V ต่อเซลล์แบตเตอรี่ วิธีการชาร์จแบบลอยใช้กันทั่วไปเพื่อรักษาการประจุของแบตเตอรี่ตะกั่วที่ใช้ในการใช้งาน เช่น ในอุปกรณ์จ่ายไฟสำรองและแบตเตอรี่ SLI (เมื่อชาร์จแบตเตอรี่จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ) โปรดทราบว่าเพื่อให้เกิดการชาร์จแบบเต็มรูปแบบโดยมีแรงดันไฟฟ้าคงที่จำเป็นต้องเลือกกระแสไฟเริ่มต้นที่ถูกต้องซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของผู้ผลิต

5) Trickle charging method กระแสไฟฟ้าที่มีค่าต่ำจะถูกนำมาใช้กับแบตเตอรี่ กระแสไฟขนาดเล็กนี้เพียงพอที่จะรักษาการประจุแบตเตอรี่เต็มหรือเรียกคืนการชาร์จของแบตเตอรี่ที่ใช้เป็นระยะ ๆ เป็นเวลาสั้น ๆ วิธีการชาร์จแบบหยดหรือที่เรียกว่าค่าชดเชยจะใช้เพื่อรักษาการประจุแบตเตอรี่ที่ใช้สำหรับแอปพลิเคชันเคลื่อนที่และแบตเตอรี่ SLI ระหว่าง Trickle charging แบตเตอรี่จะไม่เชื่อมต่อกับโหลด

2.5.6 การประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่ลิเทียม

1) ระบบควบคุมการประจุไฟฟ้าแบบแรงดันคงที่-กระแสคงที่ (Constant-current Constant-voltage controlled charge system) เป็นระบบประจุไฟฟ้าที่ใช้สำหรับชาร์จแบตเตอรี่ลิเทียมและแบตเตอรี่อื่น ๆ ซึ่งอาจเสี่ยงต่อความเสียหายหากเกินขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้าบนอัตราการชาร์จแบบกระแสคงที่ของผู้ผลิต คือ อัตราการชาร์จสูงสุดที่แบตเตอรี่สามารถทนได้โดยไม่ทำลายแบตเตอรี่ ต้องใช้ความระมัดระวังเป็นพิเศษเพื่อเพิ่มอัตราการชาร์จและเพื่อให้แน่ใจว่าแบตเตอรี่

ได้รับการชาร์จอย่างเต็มที่พร้อมกับหลีกเลี่ยงการประจุไฟเกิน ด้วยเหตุผลนี้ขอแนะนำให้วิธีการชาร์จเปลี่ยนเป็นการชาร์จด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่ก่อนที่จะแรงดันไฟฟ้าของเซลล์จะถึงขีดจำกัดบน หมายความว่าแท่นชาร์จสำหรับเซลล์ลิเทียมไอออนจะต้องสามารถควบคุมกระแสไฟและแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้ (Battery Chargers and Charging Methods, 2005)



รูปที่ 2.39 คุณสมบัติการประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน
(Battery Chargers and Charging Methods, 2005)

เพื่อควบคุมอัตราการชาร์จที่กระแสคงที่ที่กำหนดไว้ แรงดันไฟฟ้าจะต้องเพิ่มขึ้นพร้อมกับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์เพื่อเอาชนะ EMF ย้อนกลับของเซลล์เมื่อชาร์จ ซึ่งเกิดขึ้นค่อนข้างรวดเร็วในโหมดกระแสคงที่จนกว่าเซลล์ถึงขีดจำกัดบนของแรงดันไฟฟ้า หลังจากการชาร์จแรงดันไฟฟ้าจะยังคงอยู่ในระดับที่เรียกว่าระดับลอยในโหมดแรงดันคงที่ ในช่วงแรงดันไฟฟ้าคงที่นี้กระแสจะลดลง เนื่องจากการชาร์จจะเสร็จสิ้น การตัดจะเกิดขึ้นเมื่อถึงจุดสูงสุดที่กำหนดไว้ ซึ่งระบุถึงการชาร์จเต็มแล้ว เมื่อระบุอัตราการชาร์จอย่างรวดเร็วพวกเขามักจะอ้างถึงโหมดกระแสคงที่ ขึ้นอยู่กับเคมีของเซลล์ช่วงนี้อาจอยู่ระหว่าง 60% ถึง 80% ของเวลาในการชาร์จเต็ม อัตราเหล่านี้ไม่ควรมีการอนุมานเพื่อประมาณเวลาในการชาร์จแบตเตอรี่จนเต็มเพราะอัตราการชาร์จจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาที่แรงดันคงที่ รูปที่ 2.39 แสดงคุณสมบัติการประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเนื่องจากไม่สามารถชาร์จแบตเตอรี่ลิเทียมได้ที่อัตราการชาร์จที่ผู้ผลิตกำหนดไว้ตลอดระยะเวลาการชาร์จ อย่างไรก็ตาม สามารถประมาณเวลาในการชาร์จแบตเตอรี่ได้โดยการแบ่งกำลังไฟฟ้าออกในหน่วยกิโลวัตต์ชั่วโมง สมการต่อไปนี้เป็น การประมาณเวลาใกล้เคียงกับเวลาในการชาร์จแบตเตอรี่ที่ไม่มีประจุไฟฟ้าเหลืออยู่ เมื่อใช้วิธีการชาร์จแบบ CC/CV

$$\text{เวลาในการชาร์จ (hr.)} = 1.3 \times (\text{ความจุแบตเตอรี่ใน Ah}) / (\text{โหมดกระแสชาร์จแบบ CC})$$

อัตราการชาร์จ สามารถประจุแบตเตอรี่ได้ในอัตราที่ต่างกันขึ้นอยู่กับความต้องการ อัตราการประจุไฟฟ้าปกติจะแสดงไว้ ดังนี้

Slow Charge	คือ การประจุไฟฟ้าโดยใช้เวลา 14-16 ชั่วโมง อัตราการชาร์จ 0.1C
Quick Charge	คือ การประจุไฟฟ้าโดยใช้เวลา 3 ถึง 6 ชั่วโมง อัตราการชาร์จ 0.3C
Fast Charge	คือ การประจุไฟฟ้าโดยใช้เวลาน้อยกว่า 1 ชั่วโมง อัตราการชาร์จ 1.0C

2.5.7 วงจรประจุไฟฟ้า RC

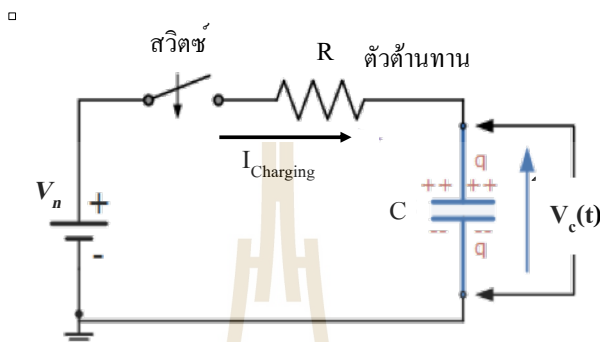
เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันจ่ายให้กับวงจร RC ตัวเก็บประจุ C จะถูกชาร์จผ่านความต้านทาน R วงจรไฟฟ้าหรือระบบอิเล็กทรอนิกส์หรือระบบเกิดจากความล่าช้า ระหว่างรูปแบบการป้อนข้อมูลและสัญญาณขาออกเมื่อมีการใช้สัญญาณหรือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง หรือกระแสสลับอย่างต่อเนื่อง ความล่าช้านี้เรียกว่าการหน่วงเวลาหรือค่าคงที่เวลาของวงจรและเป็นการตอบสนองต่อเวลาของวงจรเมื่อมีการใช้แรงดันไฟฟ้าขึ้นหรือสัญญาณเป็นครั้งแรก ค่าคงที่เวลาที่เกิดขึ้นของวงจรหรือระบบอิเล็กทรอนิกส์จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องกับตัวเก็บประจุหรือการเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่อกับมันและเป็นการวัดผลตอบสนองของเวลาตอบสนองด้วยหน่วย τ (Tau)

เมื่อแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เพิ่มขึ้นถูกนำมาใช้กับตัวเก็บประจุที่ปล่อยพลังงานออกมา ตัวเก็บประจุจะดึงกระแสไฟฟ้าที่ชาร์จออกมาและจะชาร์จไฟเพิ่มขึ้น และเมื่อแรงดันไฟฟ้าลดลงตัวเก็บประจุจะปล่อยพลังงานออกไปในทิศทางตรงกันข้าม เนื่องจากตัวเก็บประจุสามารถเก็บพลังงานไฟฟ้า ทำหน้าที่เหมือนแบตเตอรี่ขนาดเล็กและสามารถเก็บหรือคายประจุได้ตามที่ต้องการ

ประจุไฟฟ้าที่ถูกชาร์จในแผ่นตัวเก็บประจุจะได้ $Q = CV$ การประจุและการคายประจุของตัวเก็บประจุจะไม่เกิดขึ้นทันที แต่ต้องใช้เวลาระยะหนึ่งกับเวลาที่ตัวเก็บประจุชาร์จหรือคายประจุให้อยู่ในอัตราร้อยละของค่าแหล่งจ่ายสูงสุดที่เรียกว่า ค่าคงที่เวลา (τ) ถ้าตัวต้านทานเชื่อมต่อในชุดด้วยตัวเก็บประจุที่สร้างวงจร RC ตัวเก็บประจุจะค่อย ๆ ชาร์จผ่านตัวต้านทานจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุถึงแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ เวลาที่เรียกว่าการตอบสนองชั่วคราวสำหรับตัวเก็บประจุที่จะชาร์จด้วย 5 เท่าของค่าคงที่เวลา หรือ 5τ

เวลาตอบสนองชั่วคราว τ นี้วัดได้ในรูปของ $\tau = R \times C$ ในหน่วยวินาที โดยที่ R คือค่าของตัวต้านทานในหน่วยโอห์ม และ C คือ ค่าของตัวเก็บประจุในหน่วย Farads ในส่วนนี้รูปแบบพื้นฐานของวงจรการชาร์จ RC เป็น 5τ ยังสามารถคิดว่าเป็น $5 \times RC$ ตัวเก็บประจุ (C) ในแบบ

อนุกรมพร้อมตัวต้านทาน (R) สร้างวงจรการชาร์จ RC ที่เชื่อมต่อผ่านแหล่งจ่ายไฟ DC (V_s) ผ่านสวิตช์ทางกล เมื่อสวิตช์ปิด ตัวเก็บประจุจะค่อย ๆ ชาร์จไฟผ่านตัวต้านทานจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าทั่วทั้งเซลล์ถึงแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ลักษณะการประจุของตัวเก็บประจุจะเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.40 (RC Charging Circuit Tutorial & RC Time Constant)¹⁵



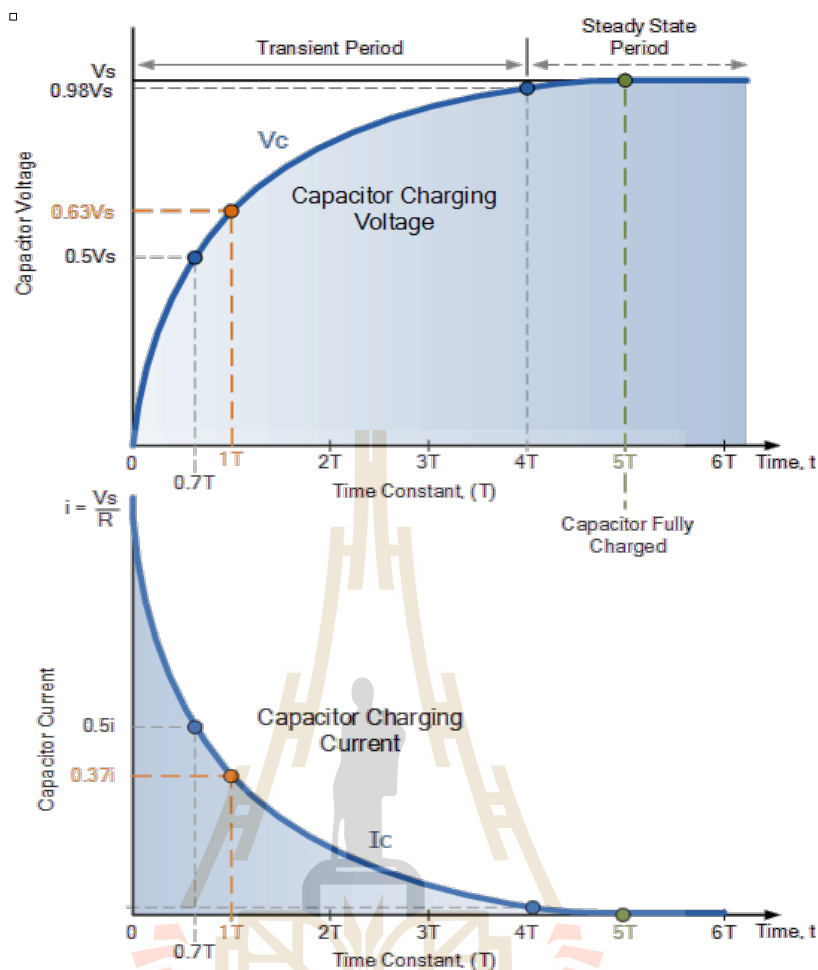
รูปที่ 2.40 วงจรการชาร์จ RC ¹³

ยกตัวอย่าง ตัวเก็บประจุ C เต็ม มีการคายประจุและสวิตช์ (S) เปิดเต็มที่ นี่คือการเริ่มต้นของวงจรแล้ว $t = 0$, $i = 0$ และ $q = 0$ เมื่อปิดสวิตช์เวลาเริ่มต้นที่ $t = 0$ และกระแสเริ่มไหลเข้าตัวเก็บประจุผ่านตัวต้านทาน เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าเริ่มต้นที่ตัวเก็บประจุเป็นศูนย์ ($V_c = 0$) ตัวเก็บประจุจะลัดวงจรไปยังวงจรภายนอกและกระแสสูงสุดจะไหลผ่านวงจรที่ถูกจำกัดด้วยตัวต้านทาน R จากนั้นใช้กฎแรงดันไฟฟ้าของ Kirchhoff (KVL) แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมวงจรจะได้เป็น

$$V_s - R \cdot i(t) - V_c(t) = 0$$

กระแสที่ไหลในวงจรเรียกว่ากระแสอัดประจุ และพบได้โดยใช้กฎของโอห์ม คือ $I = V_s/R$ โดยเส้นโค้งวงจรการชาร์จ RC (RC Charging Circuit Curves) ดังแสดงในรูปที่ 2.41 ตัวเก็บประจุจะเริ่มชาร์จตามที่แสดงด้วยการเพิ่มขึ้นของเส้นโค้ง RC ที่จุดเริ่มต้นเนื่องจากอัตราการชาร์จจะเร็วที่สุดเมื่อเริ่มต้นและลดลงเมื่อตัวเก็บประจุชาร์จเพิ่มในอัตราที่ช้าลง เมื่อการประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเกิดขึ้นความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าในแผ่นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามเวลาที่เกิดขึ้นจริงสำหรับการประจุไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุจะอยู่ที่ 63% ของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในเส้นโค้ง $0.63V_s$ เรียกว่า Time Constant (T) = 1 จุดแรงดันไฟฟ้า $0.63V_s$ นี้ให้ค่าของ $1T$

¹³ ที่มา: https://www.electronics-tutorials.ws/rc/rc_1.html, สืบค้นเมื่อ 19 มิถุนายน 2563



รูปที่ 2.41 เส้นโค้งของวงจรการชาร์จ RC¹⁵

ตัวเก็บประจุจะถูกชาร์จต่อเนื่องและแรงดันไฟฟ้าระหว่าง V_s และ V_c จะลดลง เพื่อให้กระแสไฟของวงจร (i) เพิ่มขึ้น จากนั้นในสถานะสุดท้ายที่ค่าคงที่เวลา 5 เท่า ($5T$) เมื่อตัวเก็บประจุเต็มแล้ว $t = \infty$, $i = 0$, $q = Q = CV$ จากนั้นที่อินพุตกระแสจะลดลงไปที่ศูนย์ ตัวเก็บประจุจะเปิดวงจร ดังนั้น แรงดันตกคร่อมจึงอยู่ที่ตัวเก็บประจุทั้งหมด ทางคณิตศาสตร์สามารถบอกได้ว่าเวลาที่จำเป็นสำหรับตัวเก็บประจุที่จะชาร์จเพิ่มขึ้นหนึ่งครึ่งของค่าคงที่เวลา ($1T$) จะได้รับเป็นค่าคงที่เวลาของวงจร RC (RC Time Constant, Tau) ดังในสมการที่ 2.9

$$\tau = R \cdot C \quad (2.9)$$

¹⁵ ที่มา: https://www.electronics-tutorials.ws/rc/rc_1.html, สืบค้นเมื่อ 19 มิถุนายน 2563

ค่าคงที่เวลา RC นั้นระบุเฉพาะอัตราการชาร์จที่ R อยู่ในหน่วย Ω และ C ในหน่วย Farads เนื่องจากแรงดันไฟฟ้า V เกี่ยวข้องกับการประจุตัวเก็บประจุที่กำหนดโดยสมการ $V_c = Q/C$ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_c) ณ เวลาใด ๆ ในระหว่างช่วงการชาร์จดังในสมการที่ 2.10

$$V_c = V_s(1 - e^{-t/RC}) \quad (2.10)$$

โดยที่ V_c คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ
 V_s คือ แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย
 t คือ เวลาที่ผ่านไปนับตั้งแต่มีการใช้แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย
 RC คือ ค่าคงที่เวลาของวงจรชาร์จ RC

หลังจากช่วงเวลาเท่ากับค่าคงที่เวลาเป็น 4 เท่า ($4T$) ตัวเก็บประจุในวงจรชาร์จ RC นี้มีประจุเต็มและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าประมาณ 98% ของค่าสูงสุด $0.98V_s$ ระยะเวลาที่ตัวเก็บประจุจะมาถึงจุดนี้เรียกว่า Transient Period หลังจากเวลาผ่านไป $5T$ ตัวเก็บประจุจะถูกชาร์จอย่างเต็มที่และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ (V_c) จะเท่ากับแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย (V_s) เนื่องจากตัวเก็บประจุมีประจุเต็มแล้วไม่มีกระแสไหลในวงจร ระยะเวลาหลังจากจุด $5T$ นี้เรียกว่าระยะเวลาคงที่ (Steady State Period) จากนั้นสามารถแสดงร้อยละแรงดันและค่ากระแสสำหรับตัวเก็บประจุในวงจรชาร์จ RC สำหรับค่าคงที่เวลาที่กำหนด แสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แรงดันและกระแสไฟฟ้าสำหรับตัวเก็บประจุในวงจรชาร์จ RC สำหรับค่าคงที่เวลา

ค่าคงที่เวลา (Time Constant)	ค่า RC (RC Value)	เปอร์เซ็นต์สูงสุด	
		แรงดันไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า
0.5	$0.5T = 0.5RC$	39.3%	60.7%
0.7	$0.7T = 0.7RC$	50.3%	49.7%
1.0	$1T = 1RC$	63.2%	36.8%
2.0	$2T = 2RC$	86.5%	13.5%
3.0	$3T = 3RC$	95.0%	5.0%
4.0	$4T = 4RC$	98.2%	1.8%
5.0	$5T = 5RC$	99.3%	0.7%

เส้นโค้งการชาร์จสำหรับวงจร RC เป็นเลขยกกำลังเอกซ์โพเนนเชียล ตัวเก็บประจุจะไม่ถูกชาร์จจนเต็ม 100% เนื่องจากพลังงานที่เก็บอยู่ในตัวเก็บประจุ ดังนั้น ในทางปฏิบัติทั้งหมดหลังจากที่ค่าคงที่เวลาเท่ากับ 5 ตัวเก็บประจุจะถือว่าเป็นการชาร์จเต็มรูปแบบ ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ V_c เปลี่ยนแปลงกับเวลาและเป็นค่าที่แตกต่างกันเมื่อค่าคงที่เวลาถึง 5T

2.5.8 การประจุไฟฟ้าแบบเร็วยิ่ง

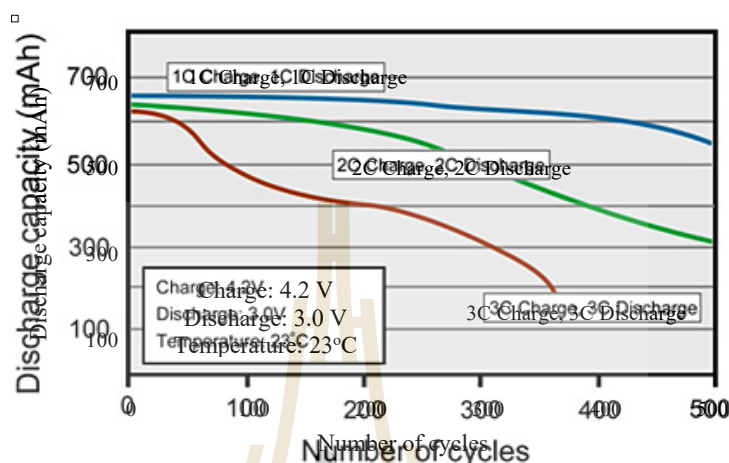
การประจุไฟฟ้าแบบเร็วยิ่ง (Ultra-fast Chargers) สำหรับความต้องการของรถไฟฟ้าเป็นไปได้ยาก การชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าในไม่กี่ปีก่อนที่ที่คล้ายกับการเติมน้ำมันเชื้อเพลิงในถัง 50 ลิตร ที่ให้พลังงาน 600 kWh การจัดเก็บพลังงานที่มีขนาดใหญ่เช่นนี้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าเป็นไปได้เนื่องจากแบตเตอรี่ที่มีกำลังการผลิตดังกล่าวจะมีน้ำหนักถึง 6 ตัน ส่วนใหญ่แบตเตอรี่ลิเทียมผลิตใช้งานเพียงประมาณ 150 kW/kg หากใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมีค่าประมาณ 100 เท่า (Fast and Ultra-fast Chargers, 2018)

การชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าจะใช้เวลานานกว่าการเติมน้ำมันและแบตเตอรี่จะให้พลังงานต่อน้ำหนักน้อยกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล การทำลายกฎข้อบังคับและการบังคับให้การประจุมุ่งอย่างรวดเร็วช่วยเพิ่มความเครียดแม้ว่าแบตเตอรี่จะได้รับการออกแบบมาเพื่อวัตถุประสงค์ดังกล่าวแต่แบตเตอรี่มีลักษณะเฉื่อยชา เช่นเดียวกับคนที่อายุมากสภาพร่างกายจะไม่เหมาะกับการใช้งานและความสามารถในการชาร์จได้อย่างรวดเร็ว การประจุไฟฟ้าเร็วเป็นพิเศษจะถูกใช้เมื่อแบตเตอรี่ว่างเปล่าและลดการไหลของกระแสไฟฟ้าลงเมื่อค่า SOC ถึง 50% และเรียกว่าขั้นตอนการชาร์จอุตสาหกรรมเล็กน้อยได้ใช้ขั้นตอนการชาร์จนี้เป็นเวลาหลายปี กระแสประจุต้องสอดคล้องกับประเภทของแบตเตอรี่เนื่องจากระบบแบตเตอรี่ที่แตกต่างกันมีข้อกำหนดการชาร์จที่แตกต่างกัน

1) ข้อจำกัดของแบตเตอรี่ลิเทียมที่ชาร์จแบบเร็วยิ่ง ค่าประจุสูงสุดที่แบตเตอรี่ลิเทียมสามารถยอมรับได้จะถูกควบคุมโดยการออกแบบเซลล์และไม่ใช่วัสดุแคโทดตามปกติ เป้าหมายคือการหลีกเลี่ยงการเคลื่อนที่ลิเทียมบนขั้วบวกและเพื่อให้อุณหภูมิอยู่ภายใต้การควบคุม ขั้วบวกบางที่มีความพรุนสูงและอนุภาคแกรไฟต์ขนาดเล็กทำให้สามารถชาร์จประจุได้รวดเร็วเนื่องจากพื้นที่ผิวใหญ่ เซลล์ไฟฟ้าสามารถชาร์จและปล่อยกระแสไฟฟ้าได้สูง แต่ความหนาแน่นของพลังงานต่ำ เซลล์พลังงานในการเปรียบเทียบมีขั้วบวกหนาและมีรูพรุนต่ำกว่า และอัตราการชาร์จต้องไม่เกิน 1C บางเซลล์ที่เป็นแบบผสมในนิเกิลโคบอลต์ออลูมิเนียมสามารถประจุไฟฟ้าได้สูงกว่า 1C

การใช้การประจุไฟฟ้าที่รวดเร็วเป็นพิเศษเมื่อจำเป็นเท่านั้น เครื่องชาร์จที่มีความเร็วสูงที่ได้รับการออกแบบมาอย่างดีควรมีการชาร์จตามเวลาที่กำหนดเพื่อให้ผู้ใช้สามารถเลือกการชาร์จที่เครียดที่สุดสำหรับเวลาที่กำหนด รูปที่ 2.42 เปรียบเทียบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทั่วไปเมื่อชาร์จและปล่อยประจุที่อัตรา 1C 2C และ 3C อายุการใช้งาน

ยาวนานสามารถยืดเยื้อได้โดยการชาร์จและการคายประจุที่ต่ำกว่า 1C ที่ 0.8C เป็นอัตราที่แนะนำและเหมาะสม การชาร์จและการคายประจุของแบตเตอรี่ลิเทียมที่อยู่เหนือ 1C จะลดอายุการใช้งาน ใช้การชาร์จที่น้อยลงและการคายประจุหากทำได้ กฎนี้ใช้กับแบตเตอรี่ส่วนใหญ่¹⁴



รูปที่ 2.42 ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ลิเทียมที่มีการประจุและคายประจุ 1C 2C และ 3C¹⁶

2) การสะสมของลิเทียม การสะสมของลิเทียมมักจะเกิดขึ้นหากอัตราการประจุไฟฟ้าเกินความสามารถที่แบตเตอรี่ลิเทียมรับได้บนขั้วลบแกรไฟต์ของลิเทียมได้ การก่อตัวนี้เป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนาและอาจเป็นอันตรายได้ แทนที่จะดูดซับไอออนลิเทียมเข้าไปในวัสดุ ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้ฟิล์มโลหะลิเทียมจะเกิดขึ้นบนขั้วลบ ชั้นพื้นผิวนี้จะกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วทั้งวัสดุที่เป็นโฮสต์ หรือ Gravitates ไปยังพื้นที่หนึ่ง ๆ ในรูปแบบที่เป็นแนวระนาบที่มี Dendritic รูปแบบ Dendritic อาจทำให้เกิดการคายประจุด้วยตัวเอง การคายประจุจะสามารถเกิดขึ้นระยะสั้นและนำไปสู่การระบายความร้อนที่อาจเกิดเปลวไฟได้

3) สภาพแวดล้อมมีผลต่อการสะสมของลิเทียม ดังนี้

การสะสมของลิเทียมจะมากขึ้นเมื่อแบตเตอรี่ลิเทียมมีการประจุไฟฟ้าอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิต่ำ รวมถึงจะเกิดขึ้นหากแบตเตอรี่ลิเทียมมีการประจุที่เร็วเกินกว่าระดับที่กำหนดไว้ และการสะสมจะเพิ่มขึ้นจากเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมมีการเสื่อมอายุเนื่องจากความต้านทานภายในเพิ่มขึ้น เครื่องชาร์จสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมสามารถชาร์จได้เพียง 80 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ซึ่งอาจทำได้มากกว่านี้โดยการลดความเครียดของเซลล์แบตเตอรี่ แต่ยังเกิดขึ้นตามธรรมชาติโดยความล่าช้า

¹⁴ ที่มา: <https://www.bixpower.com/category-s/2449.htm>, สืบค้นเมื่อ 19 มิถุนายน 2563

ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและสถานะการชาร์จที่ขยายตัวเร็วขึ้น การชาร์จที่รวดเร็วทำให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่ม 4.20 V/cell ได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่แบตเตอรี่อาจถูกชาร์จเพียงบางส่วนเท่านั้น การชาร์จแบบเต็มรูปแบบจะเกิดขึ้นในอัตราที่ช้าลงเนื่องจากความอึดตัวภายในเซลล์แบตเตอรี่

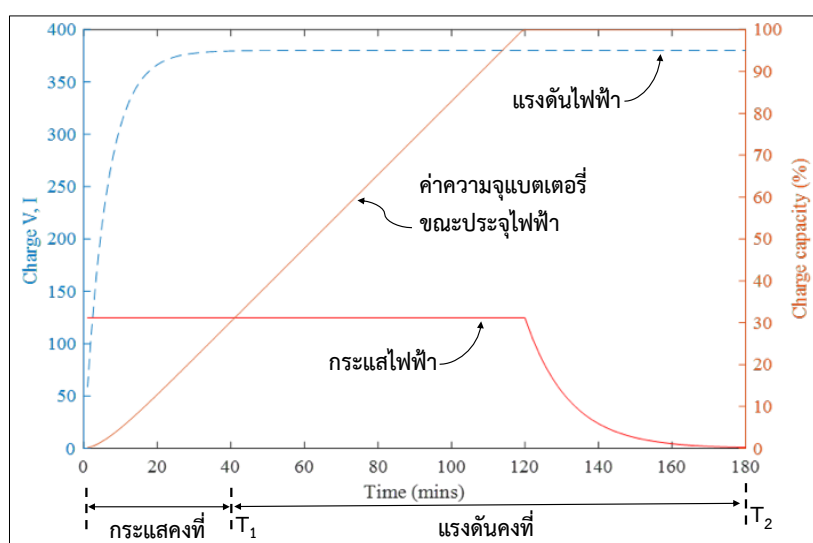
แบตเตอรี่ลิเทียมไททาเนตอาจเป็นข้อยกเว้นและช่วยให้สามารถชาร์จได้อย่างรวดเร็วโดยไม่มีความเครียดเกิดขึ้นมากเกินไป คุณลักษณะนี้มีแนวโน้มที่จะใช้ในอนาคตกับยานยนต์ไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ลิเทียมไททาเนตมีพลังงานจำเพาะต่ำกว่าลิเทียมแบบโคบอลต์แต่แบตเตอรี่มีราคาแพง นิกเกิลแคดเมียมเป็นอีกหนึ่งสารเคมีของแบตเตอรี่ที่สามารถชาร์จได้ในเวลาไม่กี่นาทีถึงความจุไฟฟ้า 70% เช่นเดียวกับแบตเตอรี่ส่วนใหญ่การยอมรับการชาร์จแบบเต็มรูปแบบจะลดลงและกระแสประจุไฟฟ้าจะต้องลดลง การชาร์จที่รวดเร็วนั้นจำเป็นต้องใช้พลังงานสูง สถานีชาร์จพลังงานไฟฟ้าแบบเร็วยังอาจดึงพลังงานไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าจากภาคครัวเรือน การประจุไฟฟ้าแบบเร็วยังอาจมีผลกระทบกับระบบไฟฟ้าของเมืองได้ ตารางที่ 2.7 สรุปลักษณะการประจุของแบตเตอรี่ตะกั่ว นิกเกิล และลิเทียม

ตารางที่ 2.7 ลักษณะเฉพาะเครื่องชาร์จและสารเคมีในแบตเตอรี่ (Fast-Ultra-fast Chargers, 2018)

ชนิดการประจุไฟฟ้า	สารเคมี	อัตราการประจุ	เวลาประจุ	อุณหภูมิ	หัวชาร์จ (Charge termination)
ประจุช้า	NiCd Lead acid	0.1C	14 ชั่วโมง	0°C ถึง 45°C	การชาร์จแบบต่อเนื่องหรือเวลาที่ขึ้นอยู่กับประจุเกิน ถอดแบตเตอรี่เมื่อชาร์จ
ประจุเร็ว	NiCd, NiMH, Li-ion	0.3-0.5C	3-6 ชั่วโมง	10°C ถึง 45°C	ตรวจจับแรงดันไฟฟ้า กระแส อุณหภูมิและเวลาการชาร์จของแบตเตอรี่
ประจุเร็วมาก	NiCd, NiMH, Li-ion	1C	>1 ชั่วโมง	10°C ถึง 45°C	เหมือนกับเครื่องชาร์จแบบเร็วด้วยบริการที่รวดเร็วขึ้น
ประจุเร็วยิ่ง	Li-ion, NiCd, NiMH	1-10C	10-60 นาที	10°C ถึง 45°C	ใช้การชาร์จเร็วเป็นพิเศษถึง 70% SOC และจำกัดลักษณะของแบตเตอรี่พิเศษ

2.5.9 ลักษณะการประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า

การใช้งานยานยนต์ไฟฟ้า แบตเตอรี่เป็นส่วนประกอบหลักในการให้พลังงานไฟฟ้าและเป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญที่สุด แบตเตอรี่ไฟฟ้า ประกอบไปด้วยเซลล์ไฟฟ้าที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า มีขั้วไฟฟ้าบวกและลบเชื่อมด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ปฏิกิริยาเคมีระหว่างขั้วไฟฟ้าและสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะสร้างไฟฟ้ากระแสตรง แบตเตอรี่ที่มีใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน เช่น แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด และลิเทียมไอออน แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนถูกนำมาใช้ในปี 1990 และใช้ลิเทียม ทรานซิชันออกไซด์โลหะสำหรับขั้วบวกและคาร์บอนที่เป็นลิเทียมสำหรับขั้วลบ อิเล็กโทรไลต์เป็นสารละลายอินทรีย์เหลวหรือของแข็งพอลิเมอร์ โดยทั่วไปแล้วความต้องการประจุไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับลักษณะการประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ ซึ่งแตกต่างกันไปตามชนิด ขนาด และอุณหภูมิใช้งาน (Larminie and Lowry, 2012) รูปที่ 2.43 แสดงคุณสมบัติการประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน



รูปที่ 2.43 คุณสมบัติการประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน
(ดัดแปลงจาก Larminie and Lowry, 2012)

การศึกษาลักษณะการประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ เมื่อมีการประจุไฟฟ้า แบตเตอรี่จะถูกประจุที่แรงดันคงที่และกระแสคงที่ มีลักษณะความจุเพิ่มขึ้นจนถึง 100% ตามเวลาการประจุไฟฟ้า (Peter et al., 2016) รูปที่ 2.43 แสดงคุณสมบัติการประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยมีรูปแบบการประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่กระแสคงที่โดยประมาณในช่วงเวลาที่ $0 - T_1$ คือ

$$v(t) = V_n (1 - e^{-\frac{t}{\tau_v}}) \quad (2.11)$$

$$i(t) = I_n \quad (2.12)$$

รูปแบบการประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ ในช่วงเวลา $T_1 - T_2$ คือ

$$v(t) = V_n i(t) = I_n \quad (2.13)$$

$$i(t) = I_n (e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \quad (2.14)$$

เมื่อ V_n คือ แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ τ_v คือ ค่าคงที่เวลาของแรงดันที่ประจุไฟฟ้า τ_i คือ ค่าคงที่เวลาของกระแสที่ประจุไฟฟ้า I_n คือ ค่าคงที่กระแสไฟฟ้าที่อยู่ในรูปเอกซ์โพเนนเชียล จนกว่าแบตเตอรี่ถูกประจุจนเต็ม ดังนั้น กำลังไฟระหว่างการประจุไฟฟ้าสามารถคำนวณได้โดย

$$p(t) = i(t) \times v(t)$$

$$p(t) = \begin{cases} V_n I_n (1 - e^{-\frac{t}{\tau_v}}) & 0 \leq t \leq T_1 \\ V_n I_n (e^{-\frac{t}{\tau_i}}) & T_1 \leq t \leq T_2 \end{cases} \quad (2.15)$$

ดังนั้น จะได้พลังงานทั้งหมดที่แบตเตอรี่ถูกประจุ ดังสมการที่ 2.16

$$w = \int p(t) dt = \int_0^{T_1} V_n I_n (1 - e^{-\frac{t}{\tau_v}}) dt + \int_{T_1}^{T_2} V_n I_n (e^{-\frac{t}{\tau_i}}) dt = K I_n \quad (2.16)$$

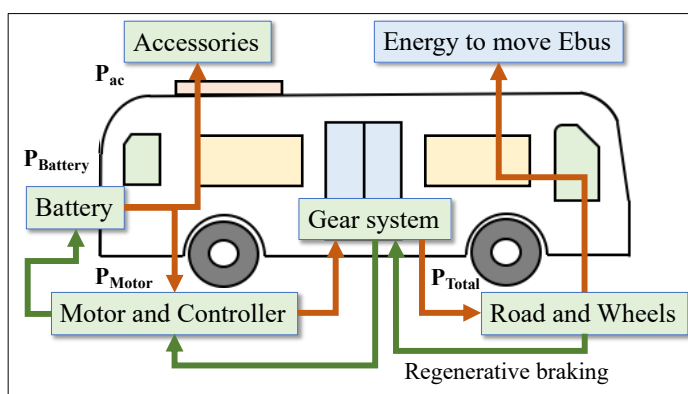
สำหรับการประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัไฟฟ้า กำหนดให้ช่วงระยะเวลาของการประจุไฟฟ้าที่กระแสและแรงดันคงที่ มีค่าเท่ากับ 5 เท่าของค่าคงที่เวลา ดังสมการที่ 2.17

$$t_{con} = 5\tau \quad (2.17)$$

2.6 ความต้องการพลังงานสำหรับรถบัสไฟฟ้า

2.6.1 การใช้พลังงานในส่วนต่าง ๆ ของรถบัสไฟฟ้า

การขับเคลื่อนของรถบัสไฟฟ้าต้องใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ ($P_{Battery}$) เป็นแหล่งจ่ายพลังงานหลัก ซึ่งจะส่งพลังงานส่วนหนึ่งไปขับเคลื่อนมอเตอร์ (P_{Motor}) และอีกส่วนหนึ่งจะถูกใช้ในระบบอำนวยความสะดวก (P_{ac}) ได้แก่ ระบบปรับอากาศและระบบส่องสว่างภายในตัวรถ มอเตอร์จะขับเคลื่อนระบบเกียร์และส่งผ่านไปยังล้อรถ (Wu et al., 2014) รถบัสไฟฟ้าสามารถได้รับพลังงานอื่น ๆ นอกจากแบตเตอรี่ โดยใช้การเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าเมื่อมีการเบรกหรือชะลอความเร็วของรถบัสไฟฟ้า โดยจะส่งพลังงานกลับคืนไปประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ (Halmeaho et al., 2015) รูปที่ 2.44 แสดงการใช้พลังงานในส่วนต่าง ๆ ของรถบัสไฟฟ้า



รูปที่ 2.44 การใช้พลังงานในส่วนต่าง ๆ ของรถบัสไฟฟ้า

(Boonraksa et al., 2020)

2.6.2 เส้นโค้งความเร็ว

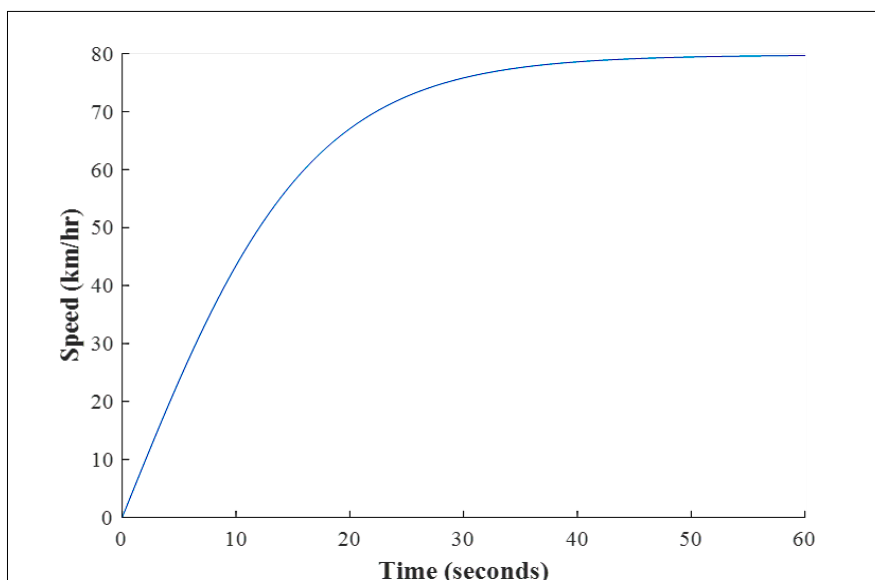
เส้นโค้งความเร็วของรถบัสไฟฟ้าที่ใช้ในปัจจุบันมีโหมดการทำงานอยู่ 4 โหมด ได้แก่ โหมดเร่งความเร็ว โหมดคงค่าความเร็ว โหมดชะลอความเร็ว และโหมดเบรก โดยอัตราการใช้พลังงานของแต่ละโหมคนั้นแตกต่างกันไปตามความเร็วและความเร่งของรถบัสไฟฟ้า (Sakulphaisan et al., 2018) โหมดการเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้าแต่ละโหมดมีย่อแตกต่างกัน ดังนี้

โหมดเร่งความเร็ว เกิดขึ้นในสถานะที่ความเร็วของรถบัสไฟฟ้าอยู่ต่ำกว่าความเร็วสูงสุดที่กำหนดไว้ มอเตอร์จะดึงกระแสไฟฟ้าเพื่อสร้างแรงบิดทางกลเพื่อเอาชนะแรงบิดโหลดของรถบัสไฟฟ้า ดังนั้น แรงบิดที่สร้างขึ้นต้องต่ำกว่าแรงบิดสูงสุดของรถบัสไฟฟ้าเพื่อไม่ให้เกิดการฟรีของล้อ

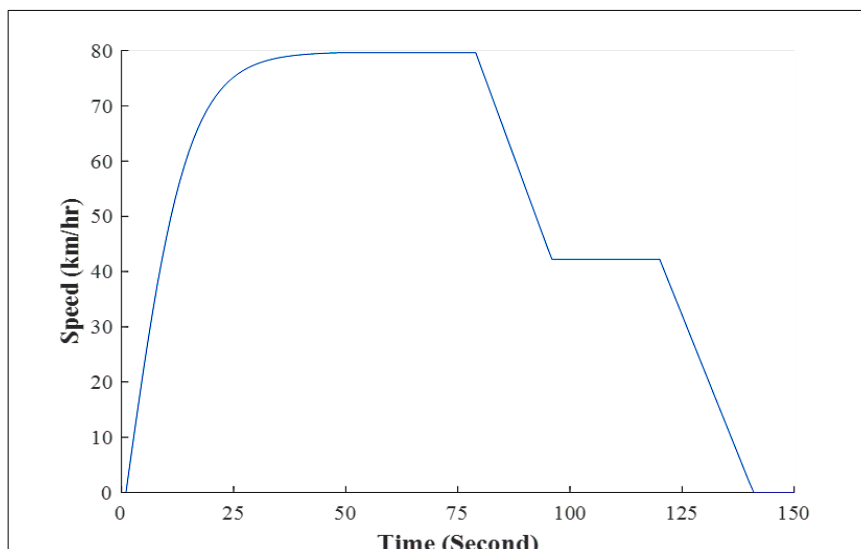
โหมดคงค่าความเร็ว จะถูกใช้งานเมื่อรถบัไฟฟ้าเร่งความเร็วจนถึงความเร็วที่ต้องการ รถไฟฟ้าจะเปลี่ยนจากโหมดเร่งความเร็วเป็นโหมดคงค่าความเร็ว โดยที่อัตราเร่งของรถบัไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ แรงบิดของรถบัไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงต้านการเคลื่อนที่ซึ่งจะมีค่าน้อยมาก ส่งผลให้ในโหมดนี้มีการใช้พลังงานน้อยมาก

โหมดชะลอความเร็ว รถบัไฟฟ้าจะไม่มีการใช้พลังงานไฟฟ้า ส่งผลให้มอเตอร์หมุนตามแรงเฉื่อยของรถบัไฟฟ้าส่งผลให้ความเร็วของรถบัไฟฟ้าลดลงเนื่องจากแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถบัไฟฟ้า โหมดนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการชะลอความเร็วเพื่อจอดรับผู้โดยสารหรือการชะลอความเร็วตามสภาวะการจราจร

โหมดการเบรกจะถูกแบ่งออก 2 ส่วน คือ การเบรกแบบไฟฟ้าและการเบรกทางกล โดยทั่วไปการเบรกแบบไฟฟ้าจะถูกใช้ในช่วงต้นของโหมดการเบรก การเบรกมีข้อกำหนดคล้าย ๆ กับโหมดเร่งความเร็วโดยที่แรงบิดที่เกิดจากการเบรกจะต้องไม่เกินค่าแรงบิดสูงสุดของรถบัไฟฟ้าเพื่อไม่ให้เกิดการลไหลของล้อรถบัไฟฟ้า รูปที่ 2.45 แสดงการเร่งความเร็วของรถบัไฟฟ้าที่อัตราเร่ง 0-80 km/hr ในเวลา 60 วินาที เส้นโค้งความเร็วของรถบัไฟฟ้าในแต่ละโหมด แสดงดังรูปที่ 2.46



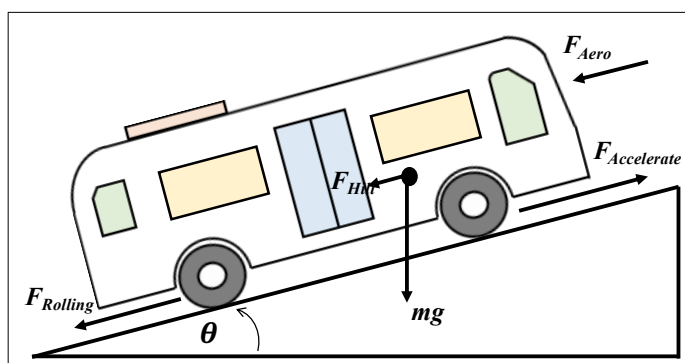
รูปที่ 2.45 การเร่งความเร็วของรถบัไฟฟ้า (Sakulphaisan et al., 2018)



รูปที่ 2.46 เส้นโค้งความเร็วของรถบัสไฟฟ้า (Sakulphaisan et al., 2018)

2.6.3 ความต้องการพลังงานของรถบัสไฟฟ้า

การให้บริการของรถบัสไฟฟ้านั้นมีการใช้พลังงานในส่วนต่าง ๆ ของรถบัสไฟฟ้า ซึ่งสามารถคำนวณได้จากแรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ ผู้วิจัยหาแรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่โดยการประยุกต์ใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน รูปที่ 2.47 แสดงแรงสำหรับการเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้า โดยแบ่งออกเป็นแรงของการเร่งความเร็ว ($F_{Accelerate}$) แรงต้านของอากาศ (F_{Aero}) แรงต้านทานการหมุนที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานของล้อรถบนถนน ($F_{Rolling}$) แรงที่ต้องการเพื่อขับเคลื่อนขึ้นทางที่ลาดชัน (F_{Hill}) และแรงของการเร่งความเร็วเชิงมุม (F_{ω}) ดังนั้น จะได้แรงทั้งหมดที่ใช้สำหรับการเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้าดังแสดงในสมการที่ 2.23



รูปที่ 2.47 แรงในการเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้า (Boonraksa et al., 2020)

1) แรงต้านทานการหมุน (Rolling resistance force: $F_{Rolling}$)

แรงต้านทานการหมุนเกิดขึ้นจากแรงเสียดทานของล้อรถบนถนน รวมถึงแรงเสียดทานการเบรกและระบบเกียร์ ความต้านทานการหมุนคือการประมาณเป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับความเร็วของรถ ซึ่งเป็นสัดส่วนกับน้ำหนักของรถ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.18 เมื่อ μ_r คือ ประสิทธิภาพความต้านทานการหมุน ปัจจัยของการควบคุมความต้านทานการหมุนคือชนิดของยาง และความดันลม โดยทั่วไปค่าของ μ_r จะอยู่ที่ 0.005 - 0.015

$$F_{Rolling} = \mu_r mg \quad (2.18)$$

2) แรงต้านอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic drag: F_{Aero})

แรงต้านอากาศพลศาสตร์ คือ ส่วนของแรงเนื่องจากความเสียดทานของอากาศกับโครงสร้างรถบัสมีหน่วยเป็น Nm มันคือค่าความเสียดทานของพื้นที่ด้านหน้ารถกับอากาศขณะรถวิ่ง สามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 2.19 เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ A คือ พื้นที่ด้านหน้าของรถ (m^2) C_d คือ สัมประสิทธิ์แรงดึง (Drag coefficient) และ v คือ ความเร็ว (m/s) โดยค่าความหนาแน่นอากาศ (ρ) คือ 1.25 kg/m^3

$$F_{Aero} = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 \quad (2.19)$$

3) แรงพยายามในการขึ้นเขา (Hill climbing force: F_{Hill})

แรงพยายามในการขึ้นเขา คือ แรงที่ต้องการเพื่อขับเคลื่อนรถขึ้นทางลาดชัน ซึ่งเป็นส่วนประกอบของน้ำหนักที่มีผลตามแนวลาดของพื้นถนน โดยแสดงในสมการที่ 2.20

$$F_{Hill} = mg \sin(\theta) \quad (2.20)$$

4) แรงของการเร่งความเร็ว (Acceleration force: $F_{Accelerate}$)

แรงของการเร่งความเร็ว คือ การเปลี่ยนแปลงตามความเร็วของรถบัสไฟฟ้า ซึ่งแรงนี้จะให้ความเร่งที่เป็นเชิงเส้นตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน แสดงในสมการที่ 2.21

$$F_{Accelerate} = ma \quad (2.21)$$

5) แรงของการเร่งความเร็วเชิงมุม (F_ω)

แรงของการเร่งความเร็วเชิงมุม คือ แรงที่ล้าต้องการเพื่อให้การเร่งความเร็วเชิงมุม เพื่อให้ชิ้นส่วนนั้นหมุนได้เร็วขึ้นต้องพิจารณาความเร่งการหมุนเช่นเดียวกับการเร่งเชิงเส้น สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.22 โดยที่ G คือ อัตราทดเกียร์ของระบบที่เชื่อมต่omotor กับเพลา r คือ รัศมีของล้อ I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยโรเตอร์ของมอเตอร์ และ a คือ ค่าความเร่งของรถบั๊ไฟฟ้า

$$F_\omega = I \frac{G^2}{r^2} a \quad (2.22)$$

ดังนั้น จะได้แรงจลลากรวม F_{total} ที่ใช้สำหรับการเคลื่อนที่ของรถบั๊ไฟฟ้าจากการรวมส่วนประกอบของแรงทั้งหมด ได้ดังแสดงในสมการที่ 2.23

$$F_{total} = F_{Rolling} + F_{Aero} + F_{Hill} + F_{Accelerate} + F_\omega \quad (2.23)$$

ดังนั้น สามารถนำมาหาค่ากำลังไฟฟ้ารวม (P_{total}) ที่รถบั๊ไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ได้ดังแสดงในสมการที่ 2.24

$$P_{total} = \frac{F_{total} \times v}{\eta}$$

$$P_{total} = \frac{v}{\eta} \left(\mu_r mg + \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 + mg \sin(\theta) + ma + I \frac{G^2}{r^2} a \right) \quad (2.24)$$

เมื่อ η คือ ประสิทธิภาพการทำงานของระบบรถบั๊ไฟฟ้า ที่สามารถหาได้จากประสิทธิภาพของมอเตอร์ในช่วงการในงานในโหมดขับเคลื่อน และในช่วงของโหมดเบรกจะใช้ค่าประสิทธิภาพของการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ

$$\eta = \begin{cases} \frac{1}{\eta_m} & \text{Motoring_Mode} \\ \eta_{reg} & \text{Braking_Mode} \end{cases}$$

โดยที่ η คือ ประสิทธิภาพการทำงานของระบบรถบัสดไฟฟ้า
 η_m คือ ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์
 η_{reg} คือ ประสิทธิภาพการทำงานของระบบเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ

ดังนั้น สามารถคำนวณหาพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถบัสดไฟฟ้าดังแสดงในสมการที่ 2.25 เพื่อให้ทราบค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไป สถานะประจุไฟฟ้าจึงถูกนำมาใช้สำหรับเป็นตัวชี้วัด โดยที่ สถานะประจุไฟฟ้าที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่คือพลังงานไฟฟ้าพิกัดที่แบตเตอรี่สามารถกักเก็บหรือที่ได้รับจากผู้ผลิตต่อพลังงานที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่ สามารถคำนวณได้ดังในสมการที่ 2.26

$$E_{total} = \int_0^t P_{total}(t) dt \quad (2.25)$$

โดยที่ E_{total} คือ ความจุของแบตเตอรี่รถบัสดไฟฟ้าก่อนพิจารณาค่า SOC (kWh)
 P_{total} คือ การใช้พลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้า (kW)

$$E_{bat} = \frac{E_{out}}{SOC_{max} - SOC_{min}} \quad (2.26)$$

โดยที่ E_{bat} คือ ค่าความจุแบตเตอรี่รถบัสดไฟฟ้า (kWh)
 E_{out} คือ ความจุของแบตเตอรี่รถบัสดไฟฟ้า ก่อนพิจารณาค่า SOC (kWh)
 SOC_{max} คือ สถานะประจุนสูงสุดของแบตเตอรี่
 SOC_{min} คือ สถานะประจุนต่ำสุดของแบตเตอรี่

2.7 ระบบไฟฟ้ากำลัง

ระบบไฟฟ้ากำลัง หมายถึง ระบบและอุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นในโครงข่ายไฟฟ้าทั้งหมดเพื่อเปลี่ยนรูปพลังงานอื่น ๆ ไปเป็นพลังงานไฟฟ้าและผ่านพลังงานด้วยระดับแรงดันไฟฟ้าสูงไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าในรูปแบบปิด ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานเหล่านี้ไปใช้งาน การส่งจ่ายไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟ โดยส่งจากสถานีไฟฟ้าผ่านสายส่งแรงสูง สถานีไฟฟ้าย่อยและหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำหน้าที่แปลงระดับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น หรือต่ำลงตามความต้องการสำหรับบริการผู้ใช้ไฟฟ้าหรือสถานีประจุไฟฟ้า ระบบไฟฟ้ากำลังนั้นต้องคำนึงถึงระบบความปลอดภัย ความมั่นคง ประสิทธิภาพความ

น่าเชื่อถือ ราคา ระบบที่เหมาะสมตามหลักเศรษฐศาสตร์ และผลกระทบต่อสถานะแวดล้อม โดยเป็นระบบที่เป็นที่ยอมรับของสังคมท้องถิ่น โครงสร้างพื้นฐานของระบบไฟฟ้ากำลัง แสดงดัง ในรูปที่ 2.48 สามารถแบ่งออกเป็น 3 ระบบย่อยที่สำคัญ คือ ระบบไฟฟ้าที่ผลิตไฟฟ้า ส่งจ่ายไฟฟ้า และจำหน่ายไฟฟ้า อธิบายรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.7.1 ระบบผลิตไฟฟ้า

ระบบผลิตไฟฟ้า คือ ระบบที่ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนรูปจากพลังงานอื่น ๆ เช่น การเปลี่ยนพลังงานลมมาเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้กังหันลมผลิตกระแสไฟฟ้า หรือการเปลี่ยน พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินให้เกิดไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า ที่เรียกว่าโรงจักรไอน้ำ หรือสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานอื่น ๆ พลังงานไฟฟ้าที่ถูกผลิตขึ้นมาจะถูกส่งผ่านหม้อ แปลงไฟฟ้าเพื่อปรับระดับแรงดันไฟฟ้าผ่านเข้าลานไกไฟฟ้าก่อนส่งขึ้นระบบส่งแรงสูง

2.7.2 ระบบส่งจ่ายไฟฟ้า

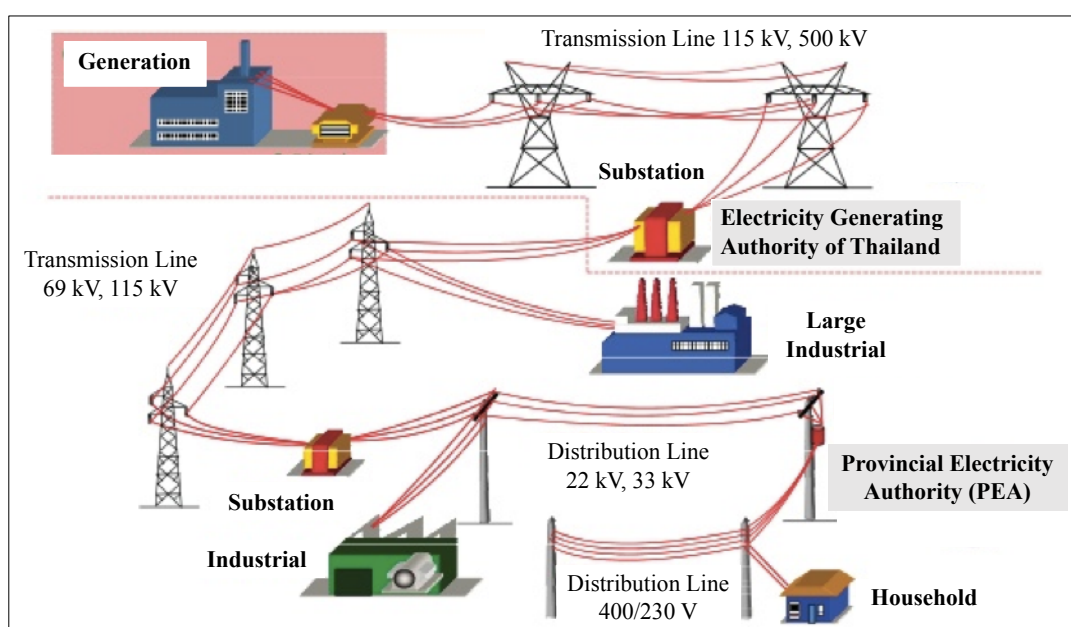
ระบบส่งจ่ายไฟฟ้า คือ ระบบที่ส่งกำลังไฟฟ้าผ่านเสาส่งและสายส่งแรงสูงที่รับจาก หม้อแปลงกำลังที่ลานไกไฟฟ้า เพื่อส่งกำลังไฟฟ้าไปยังสถานีไฟฟ้าย่อย และส่งต่อไปยังระบบ จำหน่ายไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟฟ้า ระบบส่งจ่ายไฟฟ้าจำเป็นต้องส่งกำลังไฟฟ้าไปในระยะทางไกล เพื่อ ไม่ให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในสายส่งจากกระแสและความต้านทานในสายส่ง จึงต้องส่ง กำลังไฟฟ้าในระดับแรงดันไฟฟ้าสูงหรือที่เรียกว่า ไฟฟ้าแรงสูง ระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบส่งจ่าย ไฟฟ้าในประเทศไทย ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 500 kV 230 kV และ 115 kV

2.7.3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ระบบจำหน่ายไฟฟ้า คือ ระบบที่รับกำลังไฟฟ้าจากระบบส่งจ่ายไฟฟ้า เพื่อจำหน่าย ให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าที่อยู่พื้นที่ต่าง ๆ โดยมีสถานีไฟฟ้าย่อยทำการแปลงแรงดันไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้า สูงให้ต่ำลง และส่งต่อไปยังผู้ใช้ไฟฟ้ารายย่อย ก่อนที่จะจำหน่ายให้กับบ้านเรือนก็จะมีหม้อแปลง จำหน่ายเพื่อปรับระดับแรงดันให้อยู่ที่แรงดันใช้งานที่แรงดัน 220 V และ 380 V ระบบจำหน่าย ไฟฟ้าในประเทศไทยมีหน่วยงานที่รับผิดชอบ คือ การไฟฟ้านครหลวง ที่จำหน่ายไฟฟ้าให้กับ กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ที่ระดับแรงดัน 12/24 kV และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่จำหน่ายไฟฟ้าให้ ภูมิภาคต่าง ๆ ในประเทศไทย มีระดับแรงดัน 22/33 kV

2.7.4 โหลดของระบบไฟฟ้า

พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นมานั้นต้องถูกนำไปใช้งานทันที เนื่องจากไม่สามารถกักเก็บไว้ได้ ดังนั้น ความต้องการกำลังงานไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับกำหนดการผลิตพลังงานไฟฟ้า เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการและไม่เหลือใช้โดยเปล่าประโยชน์ การศึกษาลักษณะของโหลดผู้ใช้ไฟฟ้าจึงสำคัญมากในการขยายระบบไฟฟ้า การผลิตไฟฟ้า การส่งจ่ายไฟฟ้า และการจำหน่ายไฟฟ้า ยังต้องคำนึงถึงการควบคุมการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง โหลดของระบบไฟฟ้า ได้แก่ โรงงานอุตสาหกรรม ห้างสรรพสินค้า บ้านเรือน สำนักงาน เป็นต้น โหลดแต่ละชนิดก็มีการใช้พลังงานแตกต่างกันไปตามช่วงเวลา (ชำนาญ ห่อเกียรติ, 2550)



รูปที่ 2.48 โครงสร้างของระบบไฟฟ้ากำลังในประเทศไทย¹⁵

2.7.5 ผลกระทบของระบบไฟฟ้าเมื่อมีการประจุไฟฟ้าของยานยนต์ไฟฟ้า

ยานยนต์ไฟฟ้าและสถานีประจุไฟฟ้าเมื่อถูกนำเข้ามาเชื่อมต่อในระบบไฟฟ้าโดยมุ่งประเด็นไปที่ผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นกับโครงสร้างพื้นฐานของระบบไฟฟ้าซึ่งพิจารณาปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ดังนี้ (บัณฑิต เพียดา, 2557)

1) แรงดันตก การประจุไฟฟ้าให้กับยานยนต์ไฟฟ้าเป็นเหมือนการเพิ่มโหลดให้กับระบบไฟฟ้ามากขึ้นจึงส่งผลกระทบให้เกิดปัญหาแรงดันตกในระบบไฟฟ้า (Neagoe-Stefanaetal, 2015)

¹⁵ ที่มา: ดัดแปลงจาก <http://nongcom-protection.blogspot.com/2015/09/power-system-protection.html>, สืบค้น 19 มิถุนายน 2563

2) การใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเกินพิกัดกำลัง ในปัจจุบันหม้อแปลงจ่ายกระแสไฟฟ้าได้รับการออกแบบพิกัดกำลังตามขนาดโหลดที่มีอยู่ ณ ปัจจุบัน แต่หากในอนาคตมีการเพิ่มยานยนต์ไฟฟ้าเข้ามาในระบบจำหน่ายไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงระบบไฟฟ้าเพื่อเตรียมพร้อมรองรับสำหรับการนำยานยนต์ไฟฟ้าเข้ามาใช้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า แม้ว่าหม้อแปลงจำหน่ายไฟฟ้าสามารถทนต่อโหลดเกินได้ถึง 160%

3) การจ่ายโหลดเกินของสายไฟแรงต่ำ การเพิ่มขึ้นของการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าในช่วงที่มีการประจุไฟฟ้าพร้อม ๆ กัน หรือในช่วงที่มีการใช้โหลดสูงสุดในระบบจำหน่ายไฟฟ้า อาจส่งผลกระทบต่อค่าจ่ายโหลดเกินของสายไฟแรงต่ำในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

4) การสูญเสียของกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของจำนวนยานยนต์ไฟฟ้าหรือในช่วงที่มีการประจุไฟฟ้าให้กับยานยนต์ไฟฟ้าทำให้โหลดในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเพิ่มขึ้นส่งผลกระทบต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า ให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้าในระบบจำหน่ายเพิ่มมากขึ้น

5) แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุล ความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าหากในอนาคตมีการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น และมีการประจุไฟฟ้าในระดับที่อยู่อาศัย บ้าน หรือสามารถประจุไฟฟ้าได้ทุกสถานที่ ซึ่งเป็นการประจุไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า 1 เฟส อาจส่งผลกระทบก่อให้เกิดปัญหาความไม่สมดุลของแรงดันไฟฟ้าได้ (Akhavan-Rezai et al., 2012)

6) ความถี่ตก การประจุไฟฟ้าให้กับยานยนต์ไฟฟ้าเป็นการเพิ่มโหลดให้กับระบบไฟฟ้าจึงอาจส่งผลกระทบต่อความถี่ของระบบจำหน่ายไฟฟ้า

7) เกิดฮาร์มอนิกส์ของกระแสไฟฟ้า เครื่องอัดประจุไฟฟ้าหรือหัวประจุไฟฟ้าสำหรับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่มีแนวโน้มอาจก่อให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกส์ของกระแสไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Zhou et al., 2015)

2.8 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้า

ระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าในปัจจุบันมีการเชื่อมโยงสถานีกำลังไฟฟ้าหลาย ๆ แห่ง โดยการใช้สายส่งเชื่อมโยงถึงกันเพื่อส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับกลุ่มโหลดการใช้งานไฟฟ้า ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้น จึงต้องวางแผนการผลิตกำลังไฟฟ้าให้เพียงพอต่อปริมาณความต้องการ การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า จึงมีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้าเมื่อมีการขยายโหลดการใช้งานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น การวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าจะช่วยให้เราทราบว่าขณะเกิดสภาวะผิดปกติจะมีกำลังไฟฟ้าไหลไปยังจุดผิดปกติมีขนาดค่าสุดหรือสูงสุดเท่าใด และยังช่วยในการวางแผนการสร้างสถานีไฟฟ้าเพื่อให้สมดุลกับกลุ่มโหลดในระบบ (Saadat, 1999)

การศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าเป็นการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟในสายส่งแต่ละวงจร รวมถึงการหาขนาดและมุมเฟสของค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละบัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและโหลดผู้ใช้ไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาที่มีการผลิตและส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ค่าที่ได้จากการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าจะนำมาใช้ในการวางแผนการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าโดยไม่ทำให้สายส่งเกิดโหลดเกิน (Over load) รวมถึงมีระดับแรงดันไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้

2.8.1 พารามิเตอร์ของสายส่ง

สายส่งที่ใช้ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าจากแหล่งผลิตไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าเป็นระยะทางไกล ซึ่งมีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีความสำคัญสำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง ประกอบด้วย ความต้านทาน ความเหนี่ยวนำ ความจุไฟฟ้า และความนำไฟฟ้า เป็นพารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้า

ความต้านทานของสายส่งจะมีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลัก คือ พื้นที่หน้าตัดของสายส่ง ความยาว และชนิดวัสดุที่ใช้ทำสายส่ง ความต้านทานของสายส่งนั้นหากมีค่ามากจะทำให้เกิดแรงดันตกในสายส่งและเกิดกำลังงานสูญเสียในสายส่ง และความนำไฟฟ้าของสายส่ง เกิดจากกระแสรั่วไหลที่ฉนวนลูกถ้วยโดยทั่วไปจะมีค่าน้อยมากจึงไม่ค่อยนำมาคิดในการวิเคราะห์ระบบส่งกำลังไฟฟ้า

ความเหนี่ยวนำของสายส่ง ถูกนิยามจากสมการแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์คัลลิ่งเมื่อมีกระแสไฟฟ้าสลับไหลในสายส่ง จำนวนของฟลักซ์คัลลิ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้า ดังนั้น แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตรา การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า

ความจุไฟฟ้าของสายส่ง เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญของสายส่ง ที่เกิดขึ้นกับสายส่ง เนื่องจากความต่างศักย์ระหว่างสายส่งหรือระหว่างสายส่งกับดิน ความจุไฟฟ้าระหว่างสายส่งคือจำนวนประจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งความจุระหว่างสายส่งกับสายส่งจะมีค่ามากกว่าระหว่างสายส่งกับดิน

2.8.2 หลักการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้า

การศึกษาการไหลของกำลังงานไฟฟ้าในสายส่งเพื่อให้เราทราบว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านอุปกรณ์หรือผ่านสายส่งแต่ละเส้น รวมทั้งแรงดันที่บัสต่าง ๆ ว่าอยู่ให้เกณฑ์ที่เหมาะสมหรือไม่ สามารถทราบสถานะในการจ่ายไฟฟ้าของระบบปัจจุบันและอนาคตโดยการพยากรณ์ความต้องการโหลด วิธีการแก้ปัญหาสำหรับการศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้ามีด้วยกันหลายวิธี

ในปัจจุบันมีการใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยเพื่อให้ได้คำตอบที่เร็วที่สุด โดยใช้วิธีการแก้ปัญหาของ เกาส์และเกาส์ไชเดล วิธีแก้ปัญหาคิวตัน-ราฟสัน เข้ามาช่วยในการแก้ปัญหา

2.8.3 ชนิดของบัส

บัสแต่ละชนิดนั้นมีข้อกำหนดหรือค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ประกอบด้วย ขนาดแรงดันไฟฟ้า ($|V|$) มุมของแรงดันไฟฟ้า ($\angle V$) กำลังไฟฟ้าจริง (P) กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) โดยทั่วไปแล้วในแต่ละบัสจะทราบค่าพารามิเตอร์สองค่า อีกสองค่าจะหาจากการคำนวณ

สแลคบัส (Slack Bus) หรือเรียกว่าสวิงบัส (Swing Bus) หรือบัสอนันต์ (Infinite Bus) หรือบัสอ้างอิง (Reference Bus) บัสชนิดนี้มีขนาดแรงดันไฟฟ้า มุมคงที่และโดยทั่วไปให้เป็นมุมศูนย์โดยใช้บัสนี้ไปใช้เป็นบัสอ้างอิง บัสนี้ถือว่าเป็นแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดใหญ่หรือมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ที่สามารถให้กำลังไฟฟ้าตามที่ต้องการโดยขนาดแรงดันไฟฟ้าและความถี่ไม่เปลี่ยนแปลง พารามิเตอร์ที่กำหนดให้คงที่ของบัสนี้คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าและมุมของแรงดันไฟฟ้า โดยจะคำนวณหาลำกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q)

บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator Bus) เป็นบัสที่มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่ หรือมีโหลดต่อร่วมอยู่ด้วย บัสนี้สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้มีขนาดคงที่ ดังนั้นขนาดแรงดันไฟฟ้า บัสมีค่าคงที่ กำลังไฟฟ้าจริง P มีค่าคงที่ บัสชนิดนี้อาจเรียกว่า PV Bus บางทีอาจกำหนดให้มีกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟคงที่ หรือ PQ bus ถ้าบัสเป็นชนิด PV bus พารามิเตอร์ที่ต้องหา คือ Q และ $\angle V$ และถ้าเป็นชนิด PQ bus พารามิเตอร์ที่ต้องหา คือ $|V|$ และ $\angle V$

บัสโหลด (Load Bus) เป็นบัสที่มีโหลดต่ออยู่ซึ่งทราบค่ากำลังไฟฟ้าจริง P และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ Q หรือเรียกว่า PQ bus ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการหา คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้า $|V|$ และมุมแรงดันไฟฟ้า $\angle V$ การศึกษาการไหลของโหลดทุกวิธีจะเน้นหาแรงดันที่บัสต่าง ๆ ของระบบ ซึ่งจะนำไปสู่การหาค่ากระแสในสายส่ง กำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ

ตารางที่ 2.8 พารามิเตอร์ของบัสแต่ละชนิด

ประเภทของบัส	ตัวแปรที่ทราบค่า	ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า
สแลคบัส หรือสวิงบัส	$ V , \angle V$	P, Q
บัสเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือ PV Bus	$ V , P$	$Q, \angle V$
บัสโหลด หรือ PQ Bus	P, Q	$ V , \angle V$

สมการการไหลของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการแก้ไขปัญหของระบบ มีอยู่สองสมการที่สำคัญ คือ สมการหาแรงดันไฟฟ้าและสมการหาลำดับไฟฟ้า สมการกำลังไฟฟ้าที่เข้าบัส k ใด ๆ ในระบบไฟฟ้ากำลังมีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในสมการที่ 2.27

$$S_k = V_k I_k^* \quad (2.27)$$

โดยที่ V_k คือ แรงดันไฟฟ้า
 I_k คือ กระแสไฟฟ้า

เป็นสมการกำลังไฟฟ้าที่หามาจากสมมุติฐานที่ลำดับไฟฟ้าริแอกทีฟมีค่าเป็นบวกเสมอ สำหรับโหลดล่าช้า (Lagging load) หรือ I_k ตามหลังเวกเตอร์ V_k การใช้สมการที่ 2.27 ต้องทำความเข้าใจว่าขึ้นอยู่กับสมมุติฐานอะไร ลำดับไฟฟ้าถูกนิยามเป็นลำดับไฟฟ้าที่ไหลเข้าบัสตามทิศทางกระแส I_k ที่ไหลเข้าบัส สมการแรงดันไฟฟ้าที่บัส k สามารถหาได้โดยสมการที่ 2.29 และหากระแสได้จากสมการที่ 2.30

$$S_k = P_k + jQ_k = V_k I_k^* \quad (2.28)$$

$$S_k^* = P_k - jQ_k = V_k^* I_k \quad (2.29)$$

$$I_k = \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} \quad (2.30)$$

จากสมการเมตริกซ์ $[I_{BUS}] = [Y_{BUS}][V_{BUS}]$ สามารถเขียนสมการหากระแสไฟฟ้าที่บัส k ใด ๆ คือ I_k ได้สำหรับระบบไฟฟ้าที่มี n บัส

$$I_k = Y_{k1}V_1 + Y_{k2}V_2 + \dots + Y_{kn}V_n = \sum_{i=1}^n Y_{ki}V_i \quad (2.31)$$

แทนค่ากระแส I_k เข้าไปในสมการที่ 2.33 จะได้

$$Y_{k1}V_1 + Y_{k2}V_2 + \dots + Y_{kk}V_k + \dots + Y_{kn}V_n = \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} \quad (3.32)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$Y_{kk}V_k = \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} - (Y_{k1}V_1 + Y_{k2}V_2 + \dots + Y_{k(k-1)}V_{k-1} + \dots + Y_{k(k+1)}V_{k+1} + \dots + Y_{kn}V_n) \quad (2.33)$$

และแรงดันไฟฟ้าที่บัส k ใด ๆ แสดงดังสมการที่ 2.34

$$V_k = \frac{1}{Y_{kk}} \left[\frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} - \sum_{i=1, i \neq k}^n Y_{ki}V_i \right] \quad (2.34)$$

จากสมการที่ 2.34 เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้น การแก้ปัญหาเพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าจึงไม่ใช่เรื่องง่าย จากกำลังไฟฟ้าในสมการที่ 2.29 เปลี่ยนให้อยู่ในรูปแรงดันไฟฟ้าและแอดมิตแตนซ์ของระบบได้โดยแทน I_k เข้าไปในสมการ จะได้ดังสมการที่ 2.35

$$S_k^* = P_k - jQ_k = V_k^* \sum_{i=1}^n Y_{ki}V_i \quad (2.35)$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าจริง} \quad P_k = \text{Re} \left[V_k^* \sum_{i=1}^n Y_{ki}V_i \right] \quad (2.36)$$

$$\text{กำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ} \quad Q_k = -\text{Im} \left[V_k^* \sum_{i=1}^n Y_{ki}V_i \right] \quad (2.37)$$

2.8.4 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน

วิธีของนิวตัน-ราฟสัน เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการหาคำตอบสูง ได้ผลลัพธ์โดยใช้รอบการคำนวณน้อย โดยใช้ทฤษฎีของอนุกรมเทเลอร์ (Taylor Series) ช่วยในการแก้ปัญหา ดังแสดงในสมการที่ 2.38 สำหรับ $f(x)$ ที่แทน x ด้วย x_0

$$y = f(x) = f(x_0) + \frac{df(x_0)}{dx}(\Delta x) + \frac{1}{2!} \cdot \frac{d^2 f(x_0)}{dx^2}(\Delta x)^2 \dots \quad (2.38)$$

ถ้า $[\Delta x]$ มีค่าน้อยมาก ตั้งแต่เทอมที่ 1 ไป จึงอาจตัดทิ้งได้ ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 2.39

$$y = f(x) = f(x_0) + \frac{df(x_0)}{dx}(\Delta x) \quad (2.39)$$

กรณีที่ฟังก์ชัน f มีหลายตัวแปรสามารถประยุกต์ได้เป็น

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \frac{\partial f}{\partial x_1} \Big|_{(0)} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Big|_{(0)} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Big|_{(0)} \Delta x_n \quad (2.40)$$

เมื่อ $x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0$ เป็นค่าเริ่มต้นที่แทนเข้าไปในฟังก์ชัน $\frac{\partial f}{\partial x_i} \Big|_{(0)}$ ซึ่งเป็นค่าของพาร์เชียลดิฟเฟอเรนเชียลที่แทนด้วยค่า $x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0$ ดังนั้น สามารถจัดสมการใหม่ได้เป็น

$$\Delta y = y - f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) + \frac{\partial f}{\partial x_1} \Big|_{(0)} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Big|_{(0)} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Big|_{(0)} \Delta x_n \quad (2.41)$$

สำหรับสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นใด ๆ n สมการ สามารถเขียนใหม่โดยใช้สมการที่ 2.41 และจัดรูปเมตริกซ์ใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ \vdots \\ \Delta y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

หรือสามารถเขียนแทนด้วยสมการเมตริกซ์ ดังสมการที่ 2.43

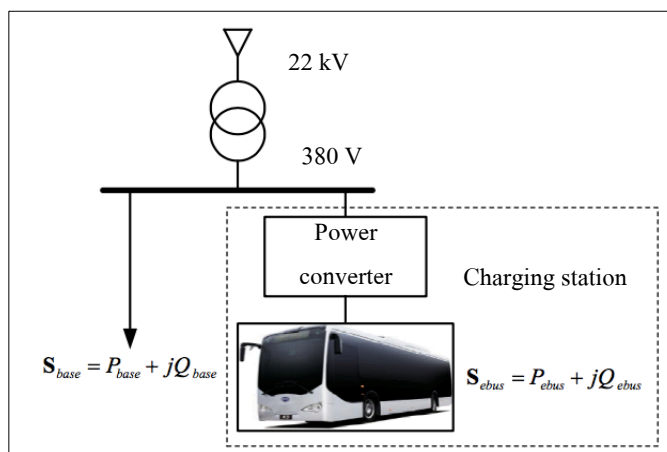
$$[\Delta y] = [J][\Delta x] \quad (2.43)$$

ขั้นตอนการแก้ปัญหของสมการโดยวิธีของนิวตัน-ราฟสัน สามารถสรุปได้ดังนี้

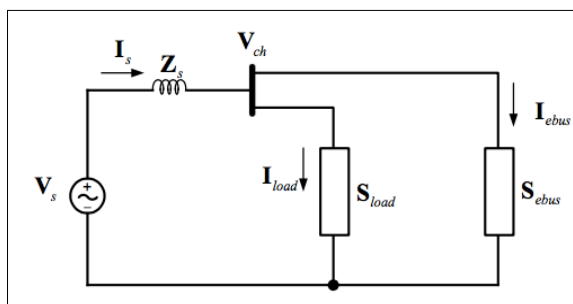
- 1) หาคาโคเบียนเมตริก $[J]$ จากสมการที่กำหนด
- 2) สมมุติค่าเริ่มต้นของตัวแปรและแทนค่าในสมการเพื่อหาค่าฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลง $[\Delta y]$
- 3) แทนค่าฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงในสมการที่ 2.42 เพื่อหาค่าตัวแปรที่เปลี่ยนแปลง $[\Delta x]$
- 4) หาค่าตัวแปรใหม่จาก ข้อ 2 และ 3
- 5) กลับไปหาค่าฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลง $[\Delta y]$ ในข้อ 2
- 6) ทำวนซ้ำระหว่างข้อ 2 และ 5 จนได้ค่าตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

2.9 การเชื่อมต่อสถานีประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้า

แบบจำลองสถานีประจุไฟฟ้าและวงจรสมมูลของรถบัสไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า (Boribun, 2013) แสดงในรูปที่ 2.49 และรูปที่ 2.50 ตามลำดับ เมื่อเปลี่ยนระบบรถบัสแบบเดิมเป็นระบบไฟฟ้าต้องพิจารณาถึงความเป็นไปได้และข้อจำกัดของระบบไฟฟ้า การเชื่อมต่อต้องได้รับการออกแบบมาเพื่อให้มีกำลังการผลิตเพียงพอในการประจุไฟฟ้าหรือมีต้นทุนเพิ่มขึ้นสำหรับการปรับเปลี่ยนพิกัดของสถานี



รูปที่ 2.49 แบบจำลองสถานีประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้า (Boonraksa et al., 2019)



รูปที่ 2.50 วงจรสมมูลของสถานีประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้า (Boonraksa et al., 2019)

ระบบไฟฟ้ากำลังโดยทั่วไปประกอบด้วยโรงไฟฟ้าที่ผลิตกระแสไฟฟ้า สายส่งไฟฟ้าที่ส่งพลังงานให้กับผู้ใช้ไฟฟ้า และผู้ใช้ไฟฟ้า การส่งพลังงานจากโรงไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ปลายทางจะดำเนินการผ่านสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน เพื่อปรับระดับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมซึ่งมีหม้อแปลงในสถานีย่อย ในประเทศไทยระบบจำหน่ายไฟฟ้ามีแรงดันอยู่ที่ 22 kV โดยผู้ใช้ไฟฟ้าส่วนใหญ่จะใช้ไฟฟ้าที่ระดับแรงดันต่ำที่ 380 V แต่ในอุตสาหกรรมบางรายอาจเชื่อมต่อกับแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น

เนื่องจากกลยุทธ์การผลิตไฟฟ้าและเทคโนโลยีใหม่ ๆ ระบบไฟฟ้ากำลังอยู่ระหว่างการพัฒนา ด้วยความต้องการพลังงานและพลังงานทดแทนเพิ่มขึ้น ซึ่งรวมถึงพลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่สม่ำเสมอและด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมพลังงานและควบคุมการผลิตเพื่อให้เกิดความสมดุลและการใช้พลังงาน การใช้พลังงานจำนวนมากจะมีผลต่อระบบไฟฟ้าในแง่ของคุณภาพไฟฟ้า เช่น การเบี่ยงเบนของความถี่หรือแรงดันไฟฟ้า สิ่งสำคัญคือ ต้องรักษาความถี่และแรงดันให้ใกล้เคียงกับค่าที่กำหนด เนื่องจากการเบี่ยงเบนขนาดใหญ่เกินไปอาจทำให้อุปกรณ์หรือส่วนประกอบของระบบเสียหายได้ ระบบไฟฟ้าควรได้รับการออกแบบเพื่อให้สามารถจ่ายพลังงานได้มากกว่าค่าสูงสุดของโหลดเพื่อไม่ให้เกิดความเสี่ยงต่อเสถียรภาพของระบบในช่วงเวลาที่มีโหลดสูงสุด อย่างไรก็ตามบางครั้งอาจเป็นไปได้มากที่จะมีการตัดการเชื่อมต่อกับผู้ใช้หากความต้องการใช้พลังงานสูงเกินไป กรณีนี้เกิดขึ้นในหลายประเทศ ปัญหาอื่น ๆ ที่อาจเกิดขึ้นในระดับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าหรือมีโหลดเกินพิกัด

เมื่อเปลี่ยนระบบรถบัสแบบเดิมในเมืองที่มีระบบไฟฟ้าต้องพิจารณาถึงความเป็นไปได้และข้อจำกัด ของระบบไฟฟ้า การเชื่อมต่อสถานีประจุไฟฟ้าเข้ากับระบบสามารถทำได้โดยผ่านสถานีย่อยในระบบจำหน่าย จุดเชื่อมต่อเหล่านี้ได้รับการออกแบบเพื่อถ่ายโอนพลังงานและไม่สามารถใช้ระดับพลังงานสูงสุดได้โดยไม่ต้องเสี่ยงต่อความเสียหายของสถานี

สถานีย่อยได้รับการออกแบบมาสำหรับทั้งกำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Q) โหลดจึงเป็นกำลังไฟฟ้าปรากฏ เป็นขนาดของกำลังงานเชิงซ้อน (S) กำหนดไว้ดังสมการที่ 2.44 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และกำลังไฟฟ้าปรากฏ สามารถเขียนได้ในสมการที่ 2.45 โดยที่ $\cos\theta$ คือ ตัวประกอบกำลัง และ θ คือ มุมเฟสระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้า

$$S = P + jQ \quad [\text{VA}] \quad (2.44)$$

$$P = |S| \cdot \cos\theta \quad [\text{W}] \quad (2.45)$$

$$Q = |S| \cdot \sin\theta \quad [\text{Var}] \quad (2.46)$$

ดังนั้น ความสามารถในการออกแบบของสถานีย่อยใน kVA จึงสามารถเทียบกับกำลังไฟฟ้าในการประจุไฟฟ้าที่ต้องการในหน่วย kW ทุกสถานีที่เลือกสำหรับการเชื่อมต่อต้องได้รับการออกแบบมาเพื่อให้มีกำลังการผลิตเพียงพอในการประจุไฟฟ้าหรือมีต้นทุนเพิ่มขึ้นสำหรับการปรับเปลี่ยนพิกัดของสถานี (Karlsson Elin, 2016) จากรูปที่ 2.50 วงจรสมมูลของสถานีประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้า จะสามารถหาแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าที่ติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้าได้ดังสมการที่ 2.47 และหาแรงดันไฟฟ้าได้ดังสมการที่ 2.49

$$I_s = I_{Load} + I_{EBs} = \left(\frac{P_{EBs} + jQ_{EBs}}{V_{ch}} \right)^* + \left(\frac{P_{Load} + jQ_{Load}}{V_{ch}} \right)^* \quad (2.47)$$

แรงดันไฟฟ้าของการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้า คือ

$$V_{ch} = V_s - (R_s + jX_s)I_s \quad (2.48)$$

$$V_{ch} = V_s - (R_s + jX_s) \left\{ \left(\frac{P_{EBs} + jQ_{EBs}}{V_{ch}} \right)^* + \left(\frac{P_{Load} + jQ_{Load}}{V_{ch}} \right)^* \right\} \quad (2.49)$$

2.10 วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ในปัจจุบันนั้นการแก้ไขปัญหาของระบบไฟฟ้าต่าง ๆ มีความซับซ้อนมากขึ้น การคำนวณการไหลกำลังไฟฟ้าจึงเป็นเครื่องมือสำคัญในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้านั้นเป็นจุดเริ่มต้นของการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า เช่น การจ่ายโหลดอย่างประหยัด การวางแผนการจ่ายโหลดไปยังผู้ใช้ การทำงานของระบบไฟฟ้า การลดต้นทุนการผลิตของระบบ รวมถึงการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบด้วย ดังนั้น จึงต้องมีวิธีการหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ระบบใหญ่ ๆ โดยในงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาวิธีการหาค่าที่เหมาะสม 2 วิธี ได้แก่ ขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) และขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม (ABC Algorithm) เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับการหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimal solutions) เพื่อปรับปรุงระดับแรงดันไฟฟ้าและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย

2.10.1 ขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค

การแก้ไขปัญหาที่มีความซับซ้อนจำเป็นต้องมีเทคนิคที่เหมาะสมเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ เทคนิคอันชาญฉลาดของปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) จึงถูกนำมาใช้งานซึ่งสามารถแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนและมีความไม่เชิงเส้นสูงได้ดี โดยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคเป็นวิธีที่นิยมใช้แก้ไขปัญหอย่างแพร่หลาย (ชนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์, 2550) เนื่องจากโครงสร้างการทำงานเข้าใจง่ายและมีพารามิเตอร์น้อย ซึ่งถูกพัฒนาและนำเสนอโดยเคนเนดี้และอีเบิร์ตฮาร์ดในปี 1995 (Kennedy et al., 1995) โดยเป็นอัลกอริทึมที่เรียนแบบการหาอาหารของฝูงนก ฝูงปลา หรือฝูงอนุภาค (Particle swarm) เป็นการจำลองระบบหรือโครงสร้างของกลุ่มสิ่งมีชีวิตเพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะบางอย่าง พิจารณาการล่าเหยื่อของฝูงนก โดยให้นก 1 ตัวแทนอนุภาค 1 ตัว นกแต่ละตัวจะมีค่าความฟิต (Fitness value) ที่บอกระยะห่างระหว่างเหยื่อและนกในการหาเหยื่อนั้นนกทั้งฝูงจะบินไปในทิศทางที่สอดคล้องกัน โดยนกตัวที่อยู่ใกล้เหยื่อมากที่สุดหมายถึงมีค่าความฟิตดีที่สุด (พินิจ วงเดจ, 2561) ซึ่งจะมีระยะห่างระหว่างฝูงกับเหยื่อน้อยที่สุด โดยกำหนดให้อนุภาคแทนผลเฉลยพร้อมทั้งประเมินค่าความฟิต โดยการบินของนกจะถูกกำหนดเป็นพารามิเตอร์ คือ ตำแหน่งที่บินอยู่ของนก (Position) และความเร็วในการเคลื่อนที่ของนก (Velocity) โดยตำแหน่งของอนุภาคแต่ละตัวจะถูกปรับปรุงและทำกระบวนการนี้ซ้ำจนได้คำตอบที่ดีที่สุดหรือทำจนครบจำนวนรอบ ตามสมการที่ 2.50 และสมการที่ 2.51 ตามลำดับ

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (2.50)$$

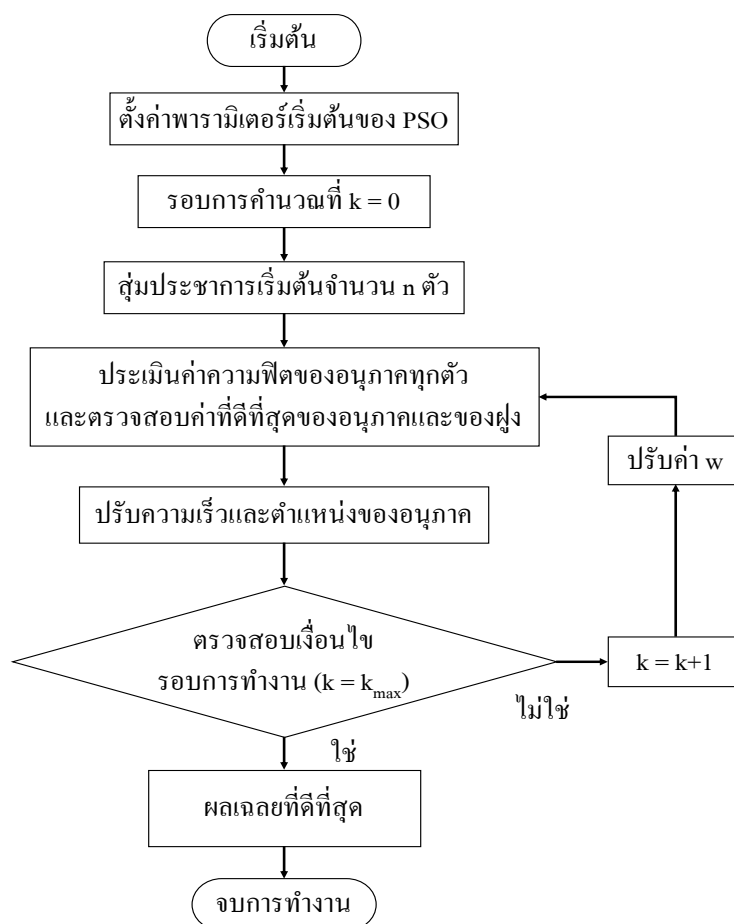
$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1r_1(x_i^{pbest} - x_i^k) + c_2r_2(x_i^{gbest} - x_i^k) \quad (2.51)$$

โดยที่	x_i^{k+1}	คือ อนุภาคที่ใช้แทนผลเฉลยตัวที่ i รอบการคำนวณที่ $k+1$
	x_i^k	คือ อนุภาคที่ใช้แทนผลเฉลยตัวที่ i รอบการคำนวณที่ k
	v_i^{k+1}	คือ ความเร็วของอนุภาคตัวที่ i รอบการคำนวณที่ $k+1$
	v_i^k	คือ ความเร็วของอนุภาคตัวที่ i รอบการคำนวณที่ k
	x_i^{pbest}	คือ ผลเฉลยที่ดีที่สุดที่อนุภาค i ค้นพบ (Personal best)
	x_i^{gbest}	คือ ผลเฉลยที่ดีที่สุดที่ฝูงค้นพบ (Global best)
	w	คือ ค่าการถ่วงน้ำหนักของความเร็ว (Inertia weight)
	c_1, c_2	คือ ค่าถ่วงน้ำหนักการเรียนรู้ (Learning factor)
	r_1, r_2	คือ ค่าสุ่มที่มีการกระจายสม่ำเสมอระหว่าง 0-1

ค่าการถ่วงน้ำหนักการเรียนรู้ทั้งสองค่าต้องมีค่ารวมกันไม่เกิน 4 ในงานทั่วไป มักจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 2 ทั้ง 2 ค่า ค่าการถ่วงน้ำหนักของความเร็วสามารถกำหนดได้หลายแบบทั้งแบบค่าคงที่ทุกรอบการคำนวณ โดยทั่วไปมีค่าเท่ากับ 1.4 หรือมักกำหนดให้ค่าการถ่วงน้ำหนักของความเร็วสูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 0.9 และ 0.4 ตามลำดับ สมการที่ 2.52 แสดงสมการถ่วงน้ำหนักของความเร็ว แผนผังการทำงานของวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคแสดงในรูปที่ 2.51

$$w = w_{\max} - \frac{k}{k_{\max}} \times (w_{\max} - w_{\min}) \quad (2.52)$$

โดยที่	k	คือ รอบของการคำนวณ
	$k_{\max}$	คือ รอบของการคำนวณสูงสุด
	$w_{\max}$	คือ ค่าการถ่วงน้ำหนักของความเร็วสูงสุด
	$w_{\min}$	คือ ค่าการถ่วงน้ำหนักของความเร็วสูงสุด



รูปที่ 2.51 ขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค

2.10.2 ขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม

ขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม (ABC Algorithm) เป็นขั้นตอนวิธีสำหรับการแก้ปัญหาค่าที่เป็นไปได้ทั้งหมดเพื่อให้ได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด เช่น การหาค่าน้อยที่สุด หรือมากที่สุดของปัญหาซึ่งขั้นตอนวิธีเลียนแบบมาจากพฤติกรรมการหาอาหารของอาณานิคมผึ้ง (Karaboga, 2008) ประชากรในอาณานิคมผึ้งประกอบด้วยผึ้ง 3 ชนิด คือ ผึ้งทำงาน (Employed bees) ผึ้งเฝ้าดู (Onlooker bees) และผึ้งสำรวจ (Scout bees) โดยแบ่งกลุ่มผึ้งทำงานและกลุ่มผึ้งเฝ้าดู ออกเป็น 2 กลุ่มเท่า ๆ กัน (Yarpiz, 2020) โดยผึ้งทำงานจะออกหาแหล่งอาหารแล้วกลับมาให้ข้อมูลแหล่งอาหารที่พบกับผึ้งเฝ้าดูที่รออยู่ในรังเพื่อบอกทิศทางของแหล่งอาหาร จากนั้นผึ้งเฝ้าดูจะเลือกผึ้งทำงานเพื่อตามออกไปเก็บอาหารที่แหล่งนั้น ถ้าแหล่งอาหารใดถูกเก็บอาหารจนหมดแล้วผึ้งทำงานที่เป็นเจ้าของแหล่งอาหารนั้นมันตัวเองเป็นผึ้งสำรวจเพื่อค้นหาแหล่งอาหารใหม่

ขั้นตอนวิธีอาณานิคมผึ้งเทียมมีขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: เริ่มต้นสร้างเวกเตอร์พารามิเตอร์ให้กับผึ้งงาน

ขั้นตอนที่ 2: ผึ้งงานสร้างเวกเตอร์พารามิเตอร์ใหม่จากเวกเตอร์เดิมแล้วเลือกเวกเตอร์พารามิเตอร์ที่ให้ค่าความเหมาะสมมากกว่า

ขั้นตอนที่ 3: ผึ้งเฝ้าดูแต่ละตัวจะเลือกผึ้งงานโดยขึ้นอยู่กับค่าความเหมาะสมของผึ้งงานตัวนั้น ๆ แล้วสร้างเวกเตอร์พารามิเตอร์ใหม่จากเวกเตอร์ของผึ้งงานที่เลือก แล้วเลือกเวกเตอร์พารามิเตอร์ที่มีค่าความเหมาะสมมากกว่า

ขั้นตอนที่ 4: จำเวกเตอร์พารามิเตอร์ที่ดีที่สุดตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงขั้นตอนนี้

ขั้นตอนที่ 5: หาเวกเตอร์พารามิเตอร์ของผึ้งงานที่ต้องละทิ้ง แล้วกำหนดให้เป็นผึ้งสำรวจแล้วสร้างเวกเตอร์พารามิเตอร์ขึ้นใหม่

ขั้นตอนที่ 6: ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2-5 จนกระทั่งครบตามจำนวนรอบที่กำหนดไว้

1) ระยะเริ่มต้น

เวกเตอร์พารามิเตอร์ x_i มีสมาชิก x_{ij} เมื่อ $i = 1, 2, \dots, SN$; SN คือ ขนาดของประชากรผึ้งงานทั้งหมดในอาณานิคมและ $j = 1, 2, \dots, D$; D คือ ขนาดมิติของปัญหา โดย x_{ij} สร้างจากสมการที่ 2.53 และคำนวณค่าฟังก์ชันและค่า *fitness* ด้วยสมการที่ 2.54

$$x_{ij} = l_j + rand(0,1) \times (u_j - l_j) \quad (2.53)$$

$$fit(x_i) = \begin{cases} \frac{1}{1 + f(x_i)}, & f(x_i) \geq 0 \\ 1 + |f(x_i)|, & f(x_i) < 0 \end{cases} \quad (2.54)$$

เมื่อ l_j และ u_j คือขอบเขตต่ำสุดและสูงสุดตามลำดับ และ $f(x_j)$ คือ ค่าของฟังก์ชันสำหรับ x_i

2) ระยะผึ้งงาน (Employed bees)

ผึ้งงานค้นหาแหล่งอาหารใหม่ (v_{ij}) ในพื้นที่ใกล้เคียง (x_{ij}) ด้วยสมการที่ 2.55 แล้วคำนวณค่าฟังก์ชันและค่า *fitness* เช่นเดียวกันกับระยะเริ่มต้น

$$v_{ij} = x_{ij} + \varphi \times (x_{ij} - x_{rj}) \quad (2.55)$$

เมื่อ x_{ij} คือ เวกเตอร์พารามิเตอร์ที่สุ่มมาจาก x_i ที่ไม่ใช่เวกเตอร์เดียวกับ x_{ij} โดยที่ r คือ จำนวนเต็มสุ่มที่มีค่าระหว่าง 1 ถึง D และ φ เป็นตัวเลขสุ่มที่มีค่าระหว่าง -1 ถึง 1 ฟังก์ชันจะเปรียบเทียบเวกเตอร์พารามิเตอร์ระหว่าง v_{ij} และ x_{ij} แล้วเลือกเวกเตอร์ที่มีค่า *fitness* มากกว่า

3) ระยะผึ้งเฝ้าดู (Onlooker bees)

ผึ้งเฝ้าดูจะเลือกฟังก์ชันโดยพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็น p_i ของ $fit(x_i)$ จากสมการที่ 2.56 การเลือกฟังก์ชันของผึ้งเฝ้าดูจะเริ่มจากผึ้งเฝ้าดูแต่ละตัวสุ่มค่าระหว่าง 0 ถึง 1 มาหนึ่งค่าแล้วเปรียบเทียบกับ p_i

$$p_i = \frac{fit(x_i)}{\sum_{i=1}^{sn} fit(x_i)} \quad (2.56)$$

ถ้าค่าสุ่มนั้นมีค่าน้อยกว่า ผึ้งเฝ้าดูจะเลือกฟังก์ชันตัวนั้น ผึ้งเฝ้าดูจะสร้างเวกเตอร์พารามิเตอร์ใหม่จาก เวกเตอร์ของฟังก์ชันที่เลือกไว้ พร้อมคำนวณค่าฟังก์ชันและค่า *fitness* แล้วฟังก์ชันจะเลือกเวกเตอร์ที่มีค่า *fitness* ที่มากกว่าเช่นเดียวกับระยะผึ้งงาน

4) ระยะผึ้งสำรวจ (Scout bees)

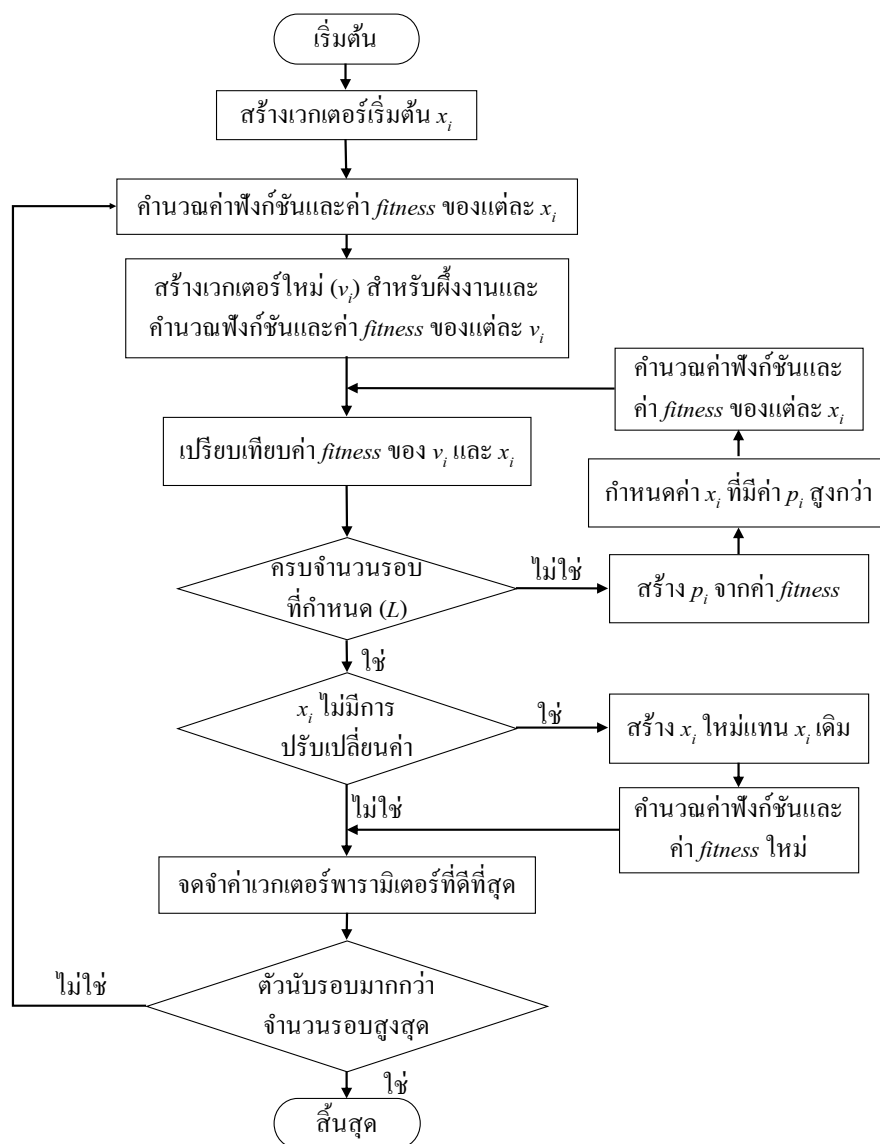
ระยะผึ้งสำรวจจะกำหนดให้ฟังก์ชันตัวใดที่ไม่ถูกปรับค่าเวกเตอร์พารามิเตอร์ติดต่อกันจนถึงรอบจำนวนที่กำหนด ($L = \text{Limit of abandonment criterion}$) จะถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันสำรวจแล้วกำหนดเวกเตอร์พารามิเตอร์ใหม่ด้วยสมการที่ 2.57 รูปที่ 2.52 แสดงผังการทำงาน (Flowchart) ของขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม

$$L = \frac{SN \times D}{2} \quad (2.57)$$

โครงสร้างรหัสเทียม (Pseudo code) ของ ABC algorithm

- (1) สร้างประชากรเริ่มต้น $x_i (i = 1, 2, \dots, SN)$
- (2) ประเมินค่า *fitness* ของประชากร และตั้งค่าจำนวนรอบ
- (3) ทำซ้ำ - ช่วงการทำงานของฟังก์ชัน
- (4) - คำนวณความน่าจะเป็นสำหรับผึ้งเฝ้าดู
- (5) - ช่วงการทำงานของผึ้งเฝ้าดู

- (6) หาเวกเตอร์พารามิเตอร์ที่ละทิ้ง กำหนดให้ฟังก์ชันสร้างเวกเตอร์พารามิเตอร์ขึ้นมาใหม่ ซึ่งถูกสุ่มโดยสมการที่ 2.57
- (7) จดจำเวกเตอร์พารามิเตอร์ที่ดีที่สุด ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงขั้นตอนนี้
- (8) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2-9 จนครบตามจำนวนรอบที่กำหนดไว้



รูปที่ 2.52 ขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม

2.11 การวิเคราะห์ต้นทุนและผลกำไรสำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้า

การวิเคราะห์ต้นทุนสำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าสามารถคำนวณโดยการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างรถบัสไฟฟ้าและรถบัสดีเซล และยังพิจารณาค่าใช้จ่ายของประเภทการประจุไฟฟ้าแบบต่าง ๆ ของรถบัสไฟฟ้า ค่าใช้จ่ายที่นำมาวิเคราะห์ คือ ต้นทุนการลงทุนของรถบัส ค่าเชื้อเพลิงหรือพลังงาน และค่าบำรุงรักษา สำหรับรถบัสไฟฟ้ายังมีค่าใช้จ่ายในการเปลี่ยนแบตเตอรี่ และค่าใช้จ่ายในการลงทุนโครงสร้างพื้นฐานการชาร์จและค่าบำรุงรักษา ค่าใช้จ่ายที่ไม่รวมอยู่ในการวิเคราะห์ที่ไม่มีความแตกต่างกันระหว่างประเภทรถบัส ได้แก่ ค่าแรงคนขับรถ ค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวกับการประกันภัยและการตรวจสอบยานพาหนะ (Liu et al., 2016) ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาค่าใช้จ่ายรวมได้ตามสมการที่ 2.58

$$C_y^{total} = C_y^{Ebus} + C_y^{Ebus,ma} + C_y^{inf} + C_y^{om} + C_y^{bat,exc} + C_y^{energy} \quad (2.58)$$

โดยที่	C^{total}	คือ ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของรถบัสไฟฟ้ารายปี (บาท)
	C^{Ebus}	คือ ต้นทุนการซื้อจริงของรถบัสไฟฟ้ารายปี (บาท)
	$C^{Ebus,ma}$	คือ ค่าบำรุงรักษารถบัสไฟฟ้า
	C^{inf}	คือ ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานสถานีรถบัสไฟฟ้า (บาท)
	C^{om}	คือ ค่าบำรุงรักษาโครงสร้างพื้นฐานรถบัสไฟฟ้ารายปี (บาท)
	$C^{bat,exc}$	คือ ค่าเปลี่ยนแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้ารายปี (บาท)
	C^{energy}	คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าหรือเชื้อเพลิง (บาท)

2.11.1 ต้นทุนรถบัส

การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายต้นทุนรถบัสประกอบไปด้วยค่าใช้จ่ายรถบัสและค่าบำรุงรักษา ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามประเภทและขนาดของรถบัส โครงสร้างค่าบำรุงรักษาเฉลี่ยของรถบัสดีเซล จะประกอบด้วย ค่าน้ำมันหล่อลื่นและค่าน้ำมันเกียร์ เบรก ล้อ และยาง ระบบปรับอากาศ และการทำความสะอาด (รายงานผลการดำเนินงานของคณะกรรมการกำหนดราคากลางการจัดซื้อรถโดยสารปรับอากาศ ใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ (NGV) พร้อมซ่อมแซมและบำรุงรักษารถโดยสาร จำนวน 489 คัน, 2559) ค่าใช้จ่ายสำหรับการเบรก การเสื่อมสภาพจากการเบรกแบบเบรคเนอเรทิฟของรถบัสไฟฟ้าจะมีค่าน้อยกว่ารถบัสดีเซล ค่าบำรุงรักษาปกติของรถบัสไฟฟ้านั้นไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนน้ำมันเครื่อง ไล่กรองน้ำมัน ไล่กรองดีเซล ซิลน้ำมันโรเตอร์ ไล่กรองอากาศหรือน้ำมันเกียร์ค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ของรถบัสไฟฟ้าจึงมีค่าน้อยกว่ารถบัสดีเซล รวมถึงรถบัสดีเซลมีอายุ

การใช้งาน 12 ปี น้อยกว่ารถแบตเตอรี่ที่ประมาณ 24 ปี (Bi et al., 2016) การซ่อมแซมข้อผิดพลาด เช่น มอเตอร์ไฟฟ้าที่มีชิ้นส่วนที่สึกหรอน้อยกว่ารถแบตเตอรี่และความผิดพลาดที่แพงที่สุดสำหรับรถแบตเตอรี่อยู่ที่เครื่องยนต์ อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีแบตเตอรี่ไฟฟ้าเป็นความผิดพลาดชนิดใหม่และอาจเกิดขึ้นได้ นอกจากนี้ควรพิจารณาผลกระทบของความผิดพลาดใหม่สำหรับรถแบตเตอรี่

2.11.2 ต้นทุนการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานการประจุไฟฟ้า

ต้นทุนการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานถูกคำนวณเฉพาะต้นทุนโครงสร้างพื้นฐานการชาร์จและการบำรุงรักษาโครงสร้างพื้นฐานการชาร์จสำหรับรถแบตเตอรี่เท่านั้น ในส่วนอื่น ๆ จะไม่ถูกนำมาเปรียบเทียบเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายที่เหมือนกัน ต้นทุนโครงสร้างพื้นฐานของสถานีรถแบตเตอรี่จะถูกคิดเฉพาะในปีแรก และในปีต่อมาค่าบำรุงรักษาโครงสร้างพื้นฐานจึงจะถูกนำมาคำนวณ

2.11.3 ต้นทุนแบตเตอรี่

แบตเตอรี่เป็นส่วนสำคัญในการคำนวณ มีแบตเตอรี่ลิเทียมประเภทต่าง ๆ ที่ประกอบด้วยแคโทด วัสดุแอโนด และสารอิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกัน ปัจจุบันมีการใช้สารเคมีในการผลิตแบตเตอรี่สองประเภทในยานยนต์ไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์ ได้แก่ ลิเทียมฟอสเฟต (Lithium Iron Phosphate: LFP) และลิเทียมไททาเนต (Lithium Titanate: LTO) และทั้งสองชนิดนี้ถูกนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการศึกษานี้ ก่อนการคำนวณทางการเงินจะต้องกำหนดขนาดของแบตเตอรี่ด้วยพารามิเตอร์ประสิทธิภาพแตกต่างกันระหว่างสารเคมีที่แตกต่างกัน รวมถึงความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ความหนาแน่นของพลังงาน อัตราการชาร์จสูงสุดและอัตราการปล่อยประจุ (C-rates) อายุการใช้งาน (Cycle life) ประสิทธิภาพการชาร์จ ค่าใช้จ่าย และความปลอดภัย

อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ขั้วแคโทดของแบตเตอรี่ LFP คือ LiFePO_4 และขั้วแอโนด คือ แกร์ไฟต์ แกร์ไฟต์จะจำกัดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่โดยปกติสูงสุด 3000 (100% DoD: ความลึกของการคายประจุ) แบตเตอรี่ LTO คือ $\text{Li}_5\text{Ti}_7\text{O}_{12}$ มีอายุการใช้งานที่เป็นข้อมูลเฉพาะของผู้ผลิตจะแตกต่างกันไปตามวัสดุแคโทดที่เปลี่ยนไป โดยทั่วไปอยู่ที่ 10,000-16,000 (100% DoD) เพื่อให้มั่นใจถึงอายุการใช้งานที่ยาวนานกระแสไฟฟ้าในการชาร์จยังคงอยู่ภายใต้อัตราการชาร์จ (C-rate) ที่ได้รับจากผู้ผลิตแบตเตอรี่ (Hu et al., 2013)

ก่อนแบตเตอรี่ประกอบด้วยเซลล์ การจัดการความร้อน และโครงสร้างรองรับ ต้นทุนการผลิตเซลล์แบตเตอรี่ LFP ประมาณ 28,818 บาท/kWh และเซลล์แบตเตอรี่ LTO มีต้นทุนประมาณ 64,040 บาท/kWh แบตเตอรี่ของรถแบตเตอรี่โดยเฉพาะจะมีราคาแพงกว่าการผลิตสำหรับผู้บริโภคขนาดเล็กเนื่องจากข้อกำหนดด้านความปลอดภัยที่มีมากขึ้นและความท้าทายในการควบคุมคุณภาพของการผลิตเซลล์แบตเตอรี่ขนาดใหญ่ ค่าใช้จ่ายทั้งหมดของแบตเตอรี่รวมถึงส่วนประกอบอื่น ๆ

ต้นทุนการสึกหรอของแบตเตอรี่สามารถคำนวณได้ต่อกิโลเมตร เมื่อเปรียบเทียบสารเคมีของแบตเตอรี่ที่แตกต่างกัน ในการใช้งานรถบัสไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีแบตเตอรี่ในปัจจุบัน ค่าใช้จ่ายของการสึกหรอของแบตเตอรี่มีความสำคัญมากกว่าค่าไฟฟ้า ต้นทุนการใช้งานในหน่วยกิโลวัตต์ชั่วโมงจะแตกต่างกันไปตามชนิดแบตเตอรี่ แต่สุดท้ายนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนระยะทางที่รถบัสไฟฟ้าสามารถขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่หนึ่งก้อนในช่วงชีวิตหรือรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ก้อนนั้น นอกเหนือจากราคาแล้วอายุการใช้งานของแบตเตอรี่เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการคำนวณทางเศรษฐกิจ ดังนั้น เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปวิเคราะห์ต้นทุนจึงสามารถคำนวณราคาของแบตเตอรี่ต่อกิโลเมตรด้วยสมการที่ 2.59 สมการจะไม่รวมการใช้การเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟเข้ามาในการคำนวณ แบตเตอรี่ส่วนใหญ่มักจะหมดอายุการใช้งานเมื่อรอบอายุการใช้งานประมาณ 80-90% (Vilppo et al., 2015) ดังนั้น กำหนดให้รอบอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ คือ 90%

$$P_{bat/km} = \frac{P_{bat/kWh} \times E_{con}}{0.9 \times Cl} \quad (2.59)$$

โดยที่ $P_{bat/km}$ คือ ราคาของแบตเตอรี่ต่อกิโลเมตร (บาท/km)
 $P_{bat/kWh}$ คือ ราคาของแบตเตอรี่ต่อหน่วย (บาท/kWh)
 Cl คือ อายุการใช้งาน (Cycle life)
 E_{cons} คือ ความต้องการพลังงานของรถบัสไฟฟ้า (kWh/km)

ต้นทุนการเปลี่ยนแบตเตอรี่สำหรับรถบัสไฟฟ้าจะแตกต่างกันไปตามรูปแบบการทำงาน ประสิทธิภาพ และขนาดของแบตเตอรี่ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.60 โดยที่ประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ (η_{bat}) คือ 90% และ N_{ch} คือ จำนวนการประจุไฟฟ้าต่อวัน

$$C_{bat,rep} = \frac{\eta_{bat} \times Cl}{365 \times N_{ch}} \quad (2.60)$$

2.11.4 ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงและพลังงาน

ปริมาณการใช้พลังงานหรือเชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับขนาดของยานพาหนะ น้ำหนักรวมของรถบสนั้นจะรวมน้ำหนักของผู้โดยสารทั้งหมดที่รองรับได้ที่มีน้ำหนักเฉลี่ย 70 kg/คน จำนวนผู้โดยสารที่แตกต่างกันมีผลต่อปริมาณการใช้พลังงานของเครื่องยนต์ การใช้พลังงานของรถบัสยังรวมถึงการใช้พลังงานในส่วน of ระบบทำความร้อน-ความเย็น ที่ 4-10 kW การเปิดปิดประตูมีผล

ต่อการใช้พลังงานน้อยที่ 1 Wh ราคาเชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับราคาตลาดราคาตลาดของการขนส่งน้ำมัน และภาษีของประเทศนั้น ๆ ในระยะยาวราคาน้ำมันดีเซลสามารถคาดการณ์ได้ว่าปรับตัวสูงขึ้น ราคาไฟฟ้าในประเทศไทย จะถูกนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ ที่ระดับแรงดัน 22-33 kV อัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU

2.11.5 ต้นทุนการใช้งานตลอดอายุการใช้งาน

การทำธุรกิจต่าง ๆ ในปัจจุบันนี้ต้องมีการตัดสินใจในการลงทุนซึ่งต้องมีการศึกษา และวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์อย่างรอบคอบ การวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนตลอดอายุการใช้งานของโครงการเป็นหนึ่งในเครื่องมือที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์อย่างมีประสิทธิภาพ นั่นคือ การคำนวณต้นทุนการใช้งานตลอดอายุการใช้งาน (Life Cycle Cost: LCC) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ช่วยสำหรับการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์และเป็นวิธีการทางเศรษฐศาสตร์ที่พิจารณาค่าใช้จ่ายตั้งแต่เริ่มต้นของโครงการ การดำเนินงาน การบำรุงรักษา ตลอดจนการกำจัดซากของโครงการ (Kara et al., 2017) การคำนวณต้นทุนการใช้งานตลอดอายุการใช้งาน แสดงดังสมการที่ 2.61

$$C^{LCC} = C^{Acq} + (C^{Opex} \times RBF) \quad (2.61)$$

โดยที่	C^{LCC}	คือ ต้นทุนรายปีตลอดอายุการใช้งาน
	C^{Acq}	คือ ต้นทุนการได้มาของรถบัส (Acquisition cost)
	C^{Oper}	คือ ต้นทุนการดำเนินงานรายปี (Operating cost)
	RBF	คือ ตัวชี้วัดมูลค่าปัจจุบันสุทธิต้นทุนรายปีที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

$$C^{Acq} = C^{Ebus} + C^{inf} \quad (2.62)$$

$$C^{Oper} = C^{Ebus,ma} + C^{pm} + C^{bat,exc} + C^{energy} \quad (2.63)$$

Rentenbarwertfaktor (RBF) คือ ตัวชี้วัดที่สะท้อนถึงมูลค่าปัจจุบันสุทธิสำหรับต้นทุนรายปีที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา RBF หรือ แฟกเตอร์ลดราคา (Discount factor) จะทำการวิเคราะห์ ร่วมกับตัวบ่งชี้อัตราคิดลด (Discount rate: r) และระยะเวลาการวิเคราะห์ (y) (Potkány et al., 2018) สามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ 2.64

$$RBF = \frac{(1+r)^y - 1}{(1+r)^y \times r} \quad (2.64)$$

2.11.6 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) คือ ผลต่างระหว่างผลประโยชน์และค่าใช้จ่ายในปีต่าง ๆ เมื่อคิดเป็นมูลค่าปัจจุบันตลอดอายุโครงการโดยใช้อัตราส่วนลด (Discount Rate) เพื่อประเมินเป็นมูลค่าปัจจุบัน ถ้าหากว่าโครงการมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นบวกหรือมากกว่าศูนย์แสดงว่าโครงการนั้นมีความเหมาะสมในการลงทุนกล่าวคือเมื่อลงทุนไปแล้วมีผลประโยชน์มากกว่าค่าใช้จ่ายตลอดอายุโครงการ (Bak et al., 2018) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.65

$$NPV = \sum_{y=0}^n \frac{B^{total} - C^{total}}{(1+r)^y} \quad (2.65)$$

โดยที่	NPV	คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ
	B^{total}	คือ ผลประโยชน์รายปีจากโครงการ
	C^{LCC}	คือ ต้นทุนรายปีตลอดอายุการใช้งาน
	y	คือ ระยะเวลาของโครงการ 0-24 ปี
	r	คือ อัตราค่าเสียโอกาส หรือ อัตราคิดลด โดยกำหนดให้มีค่า 12%

การคำนวณผลประโยชน์จากโครงการสามารถหาได้จากค่าโดยสารของผู้ใช้บริการและการขายซากของรถบัสเมื่อครบอายุการใช้งาน โดยกำหนดให้ผู้โดยสารสูงสุดต่อคันคือ 40 คน และนำมาคิดเพียง 50% ของผู้โดยสารสูงสุด โดยให้อัตราค่าโดยสารเป็นแบบเหมาจ่ายราคา 15 บาทต่อเที่ยว รายได้จากการขายซากรถ จะคิดเป็น 3% ของต้นทุนการซื้อจริงของรถบัส ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.66

$$B^{total} = B^{fare} + B^{res} \quad (2.66)$$

โดยที่	B^{total}	คือ ผลประโยชน์รวมจากโครงการรายปี
	B^{fare}	คือ ค่าโดยสารรวมรายปี
	B^{res}	คือ รายได้จากการขายซากรถ คิดเป็น 3% ของต้นทุนการซื้อจริงรถบัส

2.11.7 อัตราส่วนมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย

อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย (Benefit-Cost Ratio: B/C Ratio) หมายถึง อัตราส่วนมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อมูลค่าปัจจุบันของค่าใช้จ่ายของโครงการ โดยใช้อัตราส่วนลด เพื่อประเมินเป็นมูลค่าปัจจุบัน ถ้าโครงการที่ลงทุนมีอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่ายมากกว่าหนึ่งแสดงว่า โครงการนั้นมีความเหมาะสมในการลงทุน (การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจและสังคม)¹⁶ แสดงวิธีการคำนวณดังสมการ 2.67

$$\frac{B}{C} \text{ Ratio} = \frac{\sum_{y=0}^n \frac{B^{total}}{(1+r)^y}}{\sum_{y=0}^n \frac{C^{total}}{(1+r)^y}} \quad (2.67)$$

2.12 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้กล่าวถึงยานยนต์ไฟฟ้าและระบบไฟฟ้า ระบบประจุไฟฟ้ารถยนต์ไฟฟ้า และการจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อเชื่อมต่อสถานีประจุไฟฟ้ารถยนต์ไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบไฟฟ้าสำหรับรองรับโหลดการประจุไฟฟ้ายานยนต์ไฟฟ้า ศึกษาการปรับปรุงระบบไฟฟ้าด้วยการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายและชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า รวมถึงการวิเคราะห์ต้นทุนระบบรถบัสไฟฟ้า ซึ่งมีปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังแสดงในตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2011	Bedell, Westerlund and Astrand	ทดสอบรถบัสไฮบริดแบบประจุไฟฟ้าเร็วในเมืองอูเมอา ประเทศสวีเดน การประจุไฟฟ้าเร็วแบบปลั๊กอินโดยการวางเครื่องชาร์จไฟแบบเร็วอัตโนมัติที่ปลายด้านหนึ่งของเส้นทางรถบัส ใช้แบตเตอรี่ที่มีขนาดเล็กกว่าของรถบัสไฟฟ้าทุกรุ่น ทำการประจุแบตเตอรี่ทุกครั้งที่สถานีชาร์จ มีการติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้าขนาด 100 kW ขนาด 400 V ใช้เวลาประจุไฟฟ้าประมาณ 30 นาที ผลลัพธ์จากการทดสอบแสดงให้เห็นการให้บริการโดยใช้พลังงานไฟฟ้า 100%

¹⁶ ที่มา: <https://precast.rmutl.ac.th/การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์/> สืบค้นเมื่อ 24 กรกฎาคม 2563

ตารางที่ 2.9 ทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2013	Bayram, Michailidis, Devetsikiotis and Granelli	ศึกษาการจัดสรรกำลังไฟฟ้าในเครือข่ายระบบไฟฟ้าสำหรับสถานีประจุไฟฟ้าเร็วและความต้องการพลังงานจากโหลดการใช้ไฟฟ้าอื่น ๆ โดยศึกษา 3 กรณี คือ กรณีแรกทุกสถานีสามารถในการประจุไฟฟ้า และมีอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่เหมือนกัน ใช้พลังงานจากกริดและไม่มีการกำหนดเส้นทางที่ให้บริการ กรณีที่ 2 พลังงานไฟฟ้าที่ส่งไปสถานีจะได้รับ การจัดสรรอย่างเหมาะสม และผู้ใช้บริการสามารถกำหนดเส้นทางไปสถานีประจุไฟฟ้าใกล้เคียง กรณีที่ 3 พิจารณาการจัดสรรพลังงานที่ดีที่สุดจากกริดและเส้นทางไปสถานีประจุไฟฟ้า สถานการณ์ทั้งสามถูกประเมินโดยใช้ข้อมูลการจราจรค่าจริงที่สอดคล้องกับชั่วโมงเร่งด่วน ผลลัพธ์บ่งชี้ว่ารูปแบบที่นำเสนอขึ้นมีการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อเทียบกับโหมดการทำงานปัจจุบัน
2014	Kulworawanichpong and Punpaisarn	เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่รวมเข้ากับการเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้าแบบไดนามิกส์ การเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้าถูกศึกษาโดยใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน การสร้างแบบจำลองและการจำลองแบบไดนามิกส์นี้สามารถนำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของรถบัสไฟฟ้าในระหว่างการให้บริการ โดยใช้รถมินิบัสไฟฟ้าขนาด 12 คัน สำหรับการจำลองปริมาณการใช้พลังงานของการเดินทาง เพื่อให้บริการระยะทาง 9.4 km แสดงให้เห็นว่ารถบัสไฟฟ้าใช้พลังงานจากชุดแบตเตอรี่ 10.2 kWh ต่อการเดินทาง มีประสิทธิภาพการใช้พลังงาน 1.085 kWh/km และใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 155 kW จากแรงบิดของมอเตอร์ ข้อมูลนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบมอเตอร์และขนาดของแบตเตอรี่ของรถบัสไฟฟ้าได้

ตารางที่ 2.9 ปรัชณัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2014	EI-Zonkoly, Ashour and Ahmed	ศึกษาการหาที่ตั้งและขนาดที่เหมาะสมสำหรับประจุไฟฟ้า ยานยนต์ไฟฟ้าแบบปลั๊กอินไฮบริดที่เหมาะสมกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้อัลกอริทึมอาณานิคมผึ้งเทียมในการวิเคราะห์เลือกสถานที่และขนาดของที่จอดรถอย่างเหมาะสม ผลการศึกษาสามารถลดต้นทุนของพลังงานโดยรวมของระบบไฟฟ้า
2014	Mwasilu, Justo, Kim, Do and Jung	ศึกษาการทำงานร่วมกันของสถานีประจุไฟฟ้าและระบบสมาร์ตกริด โดยมีแหล่งพลังงานทดแทน คือ พลังงานลม และแสงอาทิตย์ ที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าจ่ายให้ระบบไฟฟ้า ซึ่งสามารถชดเชยพลังงานไฟฟ้าและลดความผันผวนของการจ่ายไฟฟ้าของกริด รวมถึงหาแนวทางการแก้ไขความผันผวนที่เป็นไปได้
2015	Rogge, Wollny and Sauer	วิเคราะห์ระบบรถบัสไฟฟ้าที่สามารถใช้พลังงานไฟฟ้าด้วยแบตเตอรี่สำหรับการประจุไฟฟ้าเร็ว ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตารางเวลาและการวางแผนโครงสร้างพื้นฐาน การวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับข้อมูลจริงของเครือข่ายรถบัสไฟฟ้า การใช้พลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าที่มีการประจุไฟฟ้าเร็ว การวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าตารางเวลามีความสำคัญมากซึ่งนำไปคำนวณขนาดของแบตเตอรี่ที่ต้องการ แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้พลังงานไฟฟ้าที่ 50% ด้วยความจุของแบตเตอรี่ 220 kWh ที่กำลังไฟฟ้า 300 kW การเพิ่มกำลังไฟฟ้าในการประจุไฟฟ้าเป็น 500 kW ทำให้ระดับการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประมาณ 80% การลดความจุผู้โดยสารทำให้สามารถเพิ่มความจุของแบตเตอรี่ที่สามารถติดตั้งได้เพื่อลดพลังงานในการประจุไฟฟ้า

ตารางที่ 2.9 ทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2015	Thiringer and Hagbin	ศึกษาปัญหาด้านคุณภาพพลังงานของสถานีประจุไฟฟ้าเร็วสำหรับระบบขนส่งสาธารณะแบบแบตเตอรี่ ในเมืองโกเธนเบิร์ก เพื่อนำเสนอผลการตรวจวัดที่เกี่ยวกับปัญหาคุณภาพไฟฟ้า ข้อกำหนดของแบตเตอรี่ การประจุไฟฟ้า โครงสร้างพื้นฐานการประจุไฟฟ้า และเส้นทางรถบัสไฟฟ้า ผลการตรวจสอบแสดงให้เห็นว่า การปล่อยคลื่นฮาร์มอนิกส้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดแม้จะมีคลื่นความถี่สูงจำนวนมากก็ตาม เนื่องจากการปรับแก้ไดโอดแบบพาสซีฟ มีการเสนอแนะให้เปลี่ยน Passive diode rectifier กับ Active front-end converter เพื่อลดกระแสฮาร์มอนิกส์และทำให้ค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์อยู่ในค่ามาตรฐาน
2015	Thiringer and Hagbin	ศึกษาปัญหาด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าของสถานีประจุไฟฟ้าเร็วสำหรับระบบขนส่งสาธารณะ สถานีประจุไฟฟ้าเร็วมีระดับกำลังไฟฟ้าถึง 120 kW พัฒนาขึ้นสำหรับรถประจำทางไฟฟ้า ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้น คือ เรื่องของแบตเตอรี่ การประจุไฟฟ้า โครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ประจุไฟฟ้า และเส้นทางที่รถวิ่งผ่าน ซึ่งทำให้พลังงานของรถบัสไฟฟ้าหมดเร็วและแบตเตอรี่มีการเสื่อมสภาพเร็วขึ้นจึงมีการปรับปรุงแบตเตอรี่ให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น
2016	Dong, Mu, Jia, Wu and Yu	วางแผนสำหรับการติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้าโดยใช้อัลกอริทึมการจัดกลุ่ม (SNN) พัฒนาโมเดลการกำหนดสถานที่เพื่อให้ได้ตำแหน่งเฉพาะสำหรับสถานีประจุไฟฟ้าของรถไฟฟ้า โดยพิจารณาจากความสะดวกในการเดินทางของผู้ใช้ยานยนต์ไฟฟ้า ยังช่วยลดเวลาในการรอคิวและค่าใช้จ่ายของการติดตั้งสถานี

ตารางที่ 2.9 ทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2016	Prohaska, Eudy, and Kelly	ประเมินผลการใช้งานการประจุไฟฟ้าเร็วของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้า เปรียบเทียบประสิทธิภาพของ BEVs กับรถยนต์ทั่วไป วิเคราะห์ข้อมูลการดำเนินงาน 148,000 km รวมทั้งการชาร์จและการประจุไฟฟ้า การวิเคราะห์ผลในงานวิจัยนี้จะให้การประเมินเทคโนโลยีขั้นสูงของการใช้งานของยานยนต์ไฟฟ้า ผลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นว่า Proterra BE35 มีประสิทธิภาพการใช้พลังงาน 1.34 kWh/km วงจรของระบบขับเคลื่อนของรถและสภาพแวดล้อมการทำงานมีผลต่อรอบการทำงานโดยรวม และส่งผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของยานยนต์ไฟฟ้า
2016	Negarestani, Firuzabad, Rastegar and Ghahnavieh	เสนอแนวทางในการกำหนดขนาดที่เหมาะสมของระบบกักเก็บพลังงานสำหรับสถานีประจุไฟฟ้าเร็ว ซึ่งพิจารณาตามรูปแบบของยานยนต์ไฟฟ้า ขนาดของระบบกักเก็บพลังงานจะถูกกำหนดขึ้นเพื่อช่วยลดต้นทุนด้านพลังงานของสถานีและเพื่อลดผลกระทบเชิงลบของการทำงานของสถานีประจุไฟฟ้าบนโครงข่ายไฟฟ้า
2017	Awasthi, Venkitusamy, Padmanaban, Selvamuthukumar, Blaabjerg and Singh	ศึกษาการจัดสรรและการเลือกขนาดที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างพื้นฐานของสถานีประจุไฟฟ้า โดยใช้อัลกอริทึมทางพันธุกรรม (GA) และปรับปรุงการเพิ่มประสิทธิภาพการหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมการเพิ่มประสิทธิภาพแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) เพื่อหาคำตำแหน่งที่เหมาะสมของสถานีประจุไฟฟ้าในระบบจำหน่าย วิธีดังกล่าวสามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพของระบบไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

ตารางที่ 2.9 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2017	Leou and Hung	เสนอการหาความจุพลังงานที่เหมาะสมและตารางการประจุไฟฟ้าของสถานีประจุไฟฟ้าสำหรับรถบัสไฟฟ้าที่สามารถลดค่าใช้จ่ายพลังงาน ปรับปรุงโมเดลทางคณิตศาสตร์ของการควบคุมการประจุไฟฟ้าเพื่อลดค่าใช้จ่าย ข้อจำกัดของโมเดล คือ คุณสมบัติการประจุไฟฟ้าและแนวทางการดำเนินงานของบริษัทรถบัสไฟฟ้า และยังศึกษารูปแบบการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของสถานีประจุไฟฟ้า พิจารณาถึงต้นทุนการลงทุนและการดำเนินงานและรายได้จากการดำเนินงาน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการลงทุนในสถานีประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้า มีความเป็นไปได้และสามารถเสนอรูปแบบการวางแผนที่สามารถนำมาใช้เพื่อกำหนดความจุของพลังงานของสถานีที่เหมาะสมและลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน
2017	Wu, Xu, Li, Yuan, and Chen	เสนอกกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อปรับปรุงการใช้พลังงานไฟฟ้าและการบริการของรถบัสไฟฟ้า โดยพิจารณาข้อผิดพลาดที่คาดการณ์ไว้ ศึกษาโครงสร้างและรูปแบบการทำงานของระบบกักเก็บพลังงานแบตเตอรี่ร่วมกับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) เพื่อกำหนดพลังงานสำหรับการประจุไฟฟ้าที่เหมาะสมและเพื่อลดต้นทุนการประจุไฟฟ้าสำหรับแต่ละช่วงเวลา กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าที่เสนอช่วยลดผลกระทบของความไม่แน่นอนที่คาดการณ์การสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ กลยุทธ์ที่นำเสนอสามารถปรับปรุงการใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและลดต้นทุนการประจุไฟฟ้าจากระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ตารางที่ 2.9 ทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2017	Silva, Sousa and Roque	ศึกษาการประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ ซึ่งมีความเหมาะสมกับพื้นที่ที่อยู่ห่างไกลจากระบบจำหน่ายไฟฟ้า มีระบบกักเก็บพลังงานโดยใช้แบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวด
2018	Gao, Guo, Ren, Zhao, Ehsan and Zheng	ศึกษาแบบจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้าของบัสไฟฟ้าและการปรับตารางการประจุไฟฟ้าสำหรับปัจจัยต่าง ๆ จากภายนอก โดยใช้วิธี Wavelet Neural Network (WNN) ในการพยากรณ์การใช้พลังงานของรถบัสไฟฟ้า และสร้างแบบจำลองการทำนายการใช้พลังงานด้วยหลายปัจจัยเพื่อลดต้นทุน ผลการคาดการณ์การใช้พลังงานของรถบัสไฟฟ้าเมื่อพิจารณาการคิดค่าไฟฟ้าแบบ TOU สถานีประจุไฟฟ้าถูกกำหนดตารางเวลาการประจุไฟฟ้าให้เหมาะสมผ่านลักษณะการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้า ซึ่งสามารถลดต้นทุนการดำเนินงานประมาณ 10%
2018	Topal and Nakir	วิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของแนวคิดต้นทุนรวมของรถดีเซล ซีเอ็นจี และรถโดยสารไฟฟ้าสำหรับการขนส่งสาธารณะในเมืองอิสตันบูล มีการเสนอแบบจำลองพลวัตที่มีพื้นฐานมาจากต้นทุน แหล่งข้อมูลที่ใช้ในแนวทางที่เสนอนี้สร้างขึ้นโดยการทดสอบประสิทธิภาพภาคสนามจริงสำหรับรถดีเซล รถซีเอ็นจี และรถเมล์ไฟฟ้า ภายใต้สภาพถนนจริง เวลา และสภาพการเดินทางของเมืองอิสตันบูล นำเสนอมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) และวิธีการคืนทุน (PB) โดยพิจารณาจากมูลค่า TCO และราคาที่ปรับปรุงแล้วเพื่อวิเคราะห์การลงทุนกับการวิเคราะห์ความสามารถในการทำกำไรเพื่อเปรียบเทียบการลงทุนรถขนส่งสาธารณะที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าแนวคิดเกี่ยวกับรถบัสไฟฟ้ามีความคุ้มค่าการลงทุน

ตารางที่ 2.9 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2018	Gohlich, Fay, Jefferies, Lauth, Kunith and Zhang	เสนอการออกแบบระบบรบบัสไฟฟ้าในเมือง แบบจำลองสามารถใช้เพื่อกำหนดระบบการประจุไฟฟ้าสำหรับรถบัสไฟฟ้าที่เป็นไปได้ วิเคราะห์การใช้พลังงานโดยพิจารณาคุณสมบัติของระบบจ่ายไฟและแบตเตอรี่เนื่องจากความร้อนและระบบปรับอากาศเป็นอุปกรณ์เสริมที่ใช้พลังงานมากที่สุดในรถบัสไฟฟ้า แบบจำลองที่นำเสนอจะขึ้นอยู่กับตารางการให้บริการของรถบัสไฟฟ้าซึ่งมีผลกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าและเวลาในการประจุไฟฟ้า

งานวิจัยที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นได้กล่าวถึงการใช้พลังงานและการวางแผนตารางเวลาของรถบัสไฟฟ้า การประยุกต์ใช้งานแหล่งพลังงานภายนอกมาช่วยจ่ายพลังงานให้กับสถานีประจุไฟฟ้า ร่วมกับระบบกริด รวมถึงวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของต้นทุนของระบบรถบัสไฟฟ้า ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาและนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยนี้ โดยในส่วนหนึ่ง คือ การจำลองการใช้พลังงานของรถบัสไฟฟ้าเพื่อหากลยุทธ์การประจุไฟฟ้าที่เหมาะสมของระบบรถบัสไฟฟ้าสาธารณะ ที่ใช้งานกับระบบจำหน่ายของประเทศไทย รวมถึงศึกษาผลกระทบของการประจุไฟฟ้าระบบรถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า และการบรรเทาผลกระทบด้วยการหาค่าที่เหมาะสมของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายและชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า

2.13 สรุป

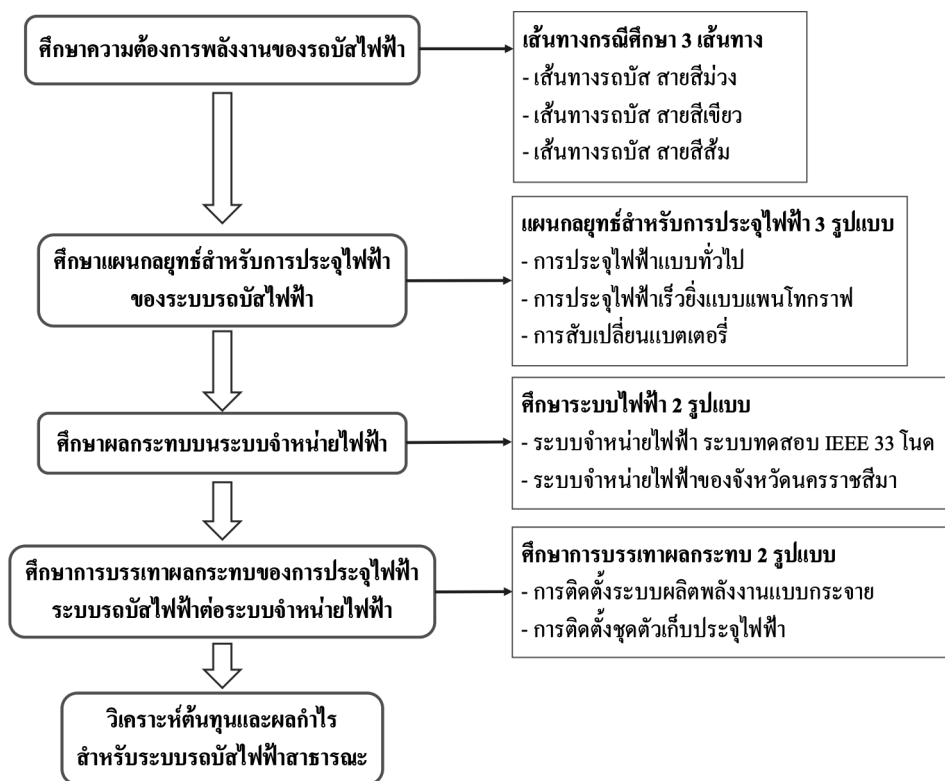
ในบทนี้กล่าวถึง ปรัชญา วรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับรถบัสไฟฟ้าสาธารณะ การประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้า การใช้พลังงานสำหรับการเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้า การวิเคราะห์การลงทุนของระบบรถบัสไฟฟ้า การหากลยุทธ์ที่เหมาะสมสำหรับระบบรถบัสไฟฟ้าสาธารณะ ผลกระทบจากการประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า และวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการศึกษาวิจัย โดยงานวิจัยนี้นำความรู้ที่ได้จาก ปรัชญา วรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษากลยุทธ์ที่เหมาะสมสำหรับระบบประจุไฟฟ้าสำหรับรถบัสไฟฟ้าสาธารณะ รวมถึงการวิเคราะห์ผลกระทบและการปรับปรุงผลกระทบจากการประจุไฟฟ้าสำหรับรถบัสไฟฟ้า เพื่อความเข้าใจในเนื้อหาของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 กล่าวนำ

การศึกษาการวางแผนกลยุทธ์ที่เหมาะสมสำหรับการประจุไฟฟ้าระบบรถบัสไฟฟ้าขนส่งสาธารณะ กรณีศึกษา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา จำเป็นต้องศึกษาการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าที่ให้บริการตามเส้นทางกรณีศึกษา การวิเคราะห์ต้นทุนค่าใช้จ่ายสำหรับระบบรถบัสไฟฟ้าที่มีกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า นอกจากนี้ยังศึกษาการบรรเทาผลกระทบจากการประจุไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา โดยมีวิธีดำเนินงานวิจัยหรือขั้นตอนการจำลองดังจะได้อธิบายไว้ในบทนี้ ขั้นตอนการศึกษาวิจัยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เริ่มจากการศึกษาความต้องการพลังงานของรถบัสไฟฟ้า โดยใช้เส้นทางกรณีศึกษา 3 เส้นทาง จากนั้นทำการศึกษาแผนกลยุทธ์สำหรับการประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้า ซึ่งมี 3 รูปแบบ คือ การประจุไฟฟ้าที่ต้นทางและปลายทางโดยใช้รถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน การประจุไฟฟ้าแบบแผนโทกราฟโดยใช้การประจุไฟฟ้าแบบเร็วยิ่ง และการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่โดยใช้การประจุไฟฟ้าแบบเร็ว จากนั้นนำลักษณะการประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้าไปจำลองผลกระทบบนระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โนด และระบบจำหน่ายไฟฟ้าในจังหวัดนครราชสีมา เป็นกรณีศึกษา จากนั้น ทำการศึกษาการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้ากรณีศึกษา โดยใช้การหาค่าที่เหมาะสมของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ และขนาดติดตั้งของชุดตัวเก็บประจุ รวมถึงวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบ และสุดท้าย คือ การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายและต้นทุนสำหรับระบบรถบัสไฟฟ้าสาธารณะเพื่อหากลยุทธ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบรถบัสไฟฟ้า แผนภาพขั้นตอนการศึกษาวิจัยสามารถแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

3.2 การจำลองความต้องการพลังงานไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้า

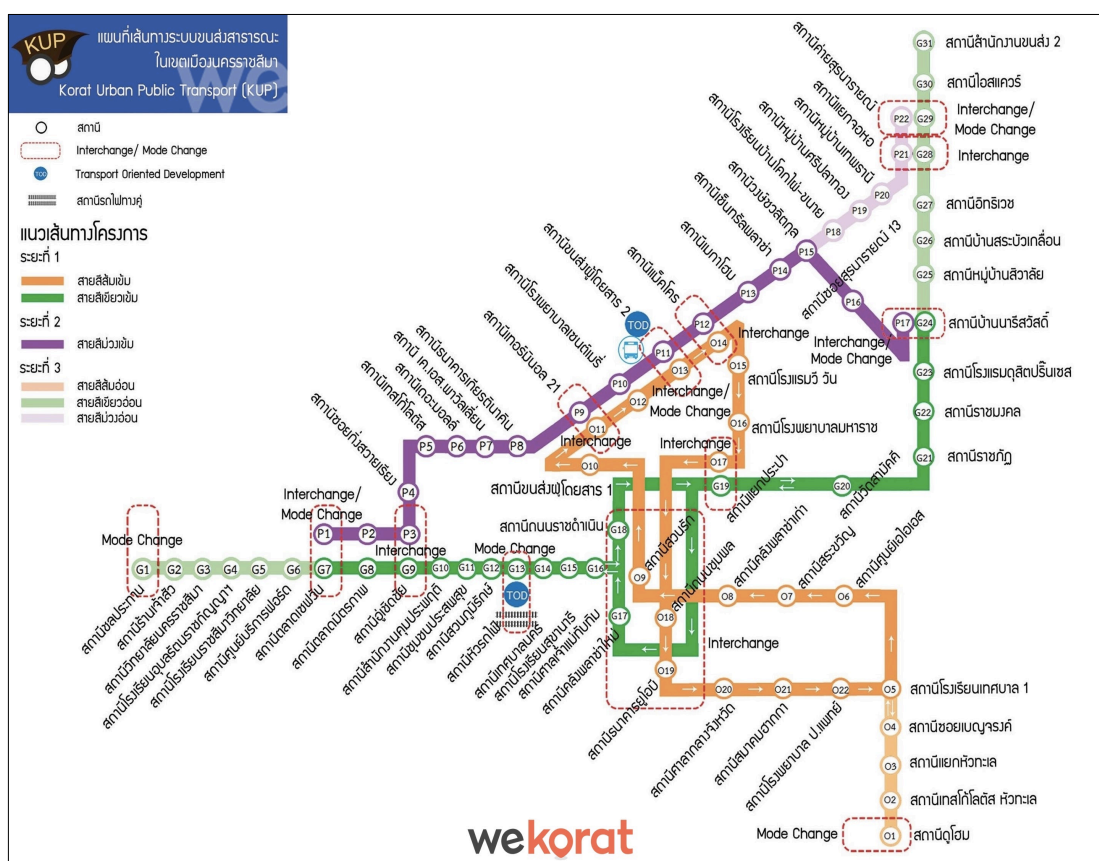
รถบัสไฟฟ้าที่มีการให้บริการนั้นจำเป็นต้องใช้พลังงานสำหรับระบบขับเคลื่อน ระบบเปิดปิดประตู และระบบทำความร้อนและความเย็น ซึ่งการใช้พลังงานจะมีความแตกต่างกันไปตามชนิดของรถบัสไฟฟ้า เส้นทาง การให้บริการ และสภาพการจราจร ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อความต้องการพลังงานไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าเฉพาะเส้นทาง การให้บริการ และใช้คุณสมบัติของรถบัสไฟฟ้าชนิดเดียวกันซึ่งอธิบายดังต่อไปนี้

3.2.1 เส้นทางกรณีศึกษา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

อำเภอเมืองนครราชสีมา เป็นอำเภอหนึ่งใน 32 อำเภอของจังหวัดนครราชสีมา อยู่ทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ซึ่งเป็นที่ตั้งของศาลากลางจังหวัด และหน่วยงานราชการต่าง ๆ และเป็นศูนย์กลางความเจริญของจังหวัด อำเภอเมืองนครราชสีมาตั้งอยู่ทางตอนกลางของจังหวัด บนที่ราบสูงโคราช ระหว่างเส้นทางที่ 14-15 องศาเหนือ และเส้นแวงที่ 101-102 องศาตะวันออก สูงจากระดับน้ำทะเลประมาณ 180-210 m ห่างจากกรุงเทพมหานครโดยทางรถยนต์ประมาณ 259 km มีอาณาเขตติดต่อกับอำเภอข้างเคียง คือ ทิศเหนือ ติดต่อกับอำเภอ

โนนไทยและอำเภอโนนสูง ทิศตะวันออก ติดต่อกับอำเภอเฉลิมพระเกียรติ ทิศใต้ ติดต่อกับอำเภอโชคชัยและอำเภอปักธงชัย ทิศตะวันตก ติดต่อกับอำเภอสูงเนินและอำเภอยางทอง เนื้อที่ทั้งหมดของอำเภอเมืองนครราชสีมาประมาณ 755.60 km² หรือประมาณ 468,704 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 3.69 ของเนื้อที่ทั้งหมดของจังหวัด มีจำนวนประชากรรวมทั้งสิ้น 454,647 คน เป็นชาย 222,724 คน เป็นหญิง 231,923 คน จำนวนบ้าน 169,878 หลัง ความหนาแน่นประชากรต่อพื้นที่ 601.70 คน/km² อำเภอเมืองนครราชสีมา มีจำนวนประชากรมากเป็นลำดับที่ 1 ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

การศึกษาวิจัยนี้จะใช้เส้นทางรถบัสไฟฟ้าของอำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ตามแผนแม่บทของจังหวัดนครราชสีมา เป็นกรณีศึกษาเพื่อวางแผนเชิงกลยุทธ์สำหรับสถานีประจูปฏิบัติการไฟฟ้าขนส่งสาธารณะ รูปที่ 3.2 แสดงเส้นทางรถบัสไฟฟ้าตามแผนแม่บท อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา โดยจะยกมาเพื่อเป็นกรณีศึกษา 3 เส้นทาง คือ รถไฟฟ้าสายสีม่วง รถไฟฟ้าสายสีเขียว และรถไฟฟ้าสายสีส้ม

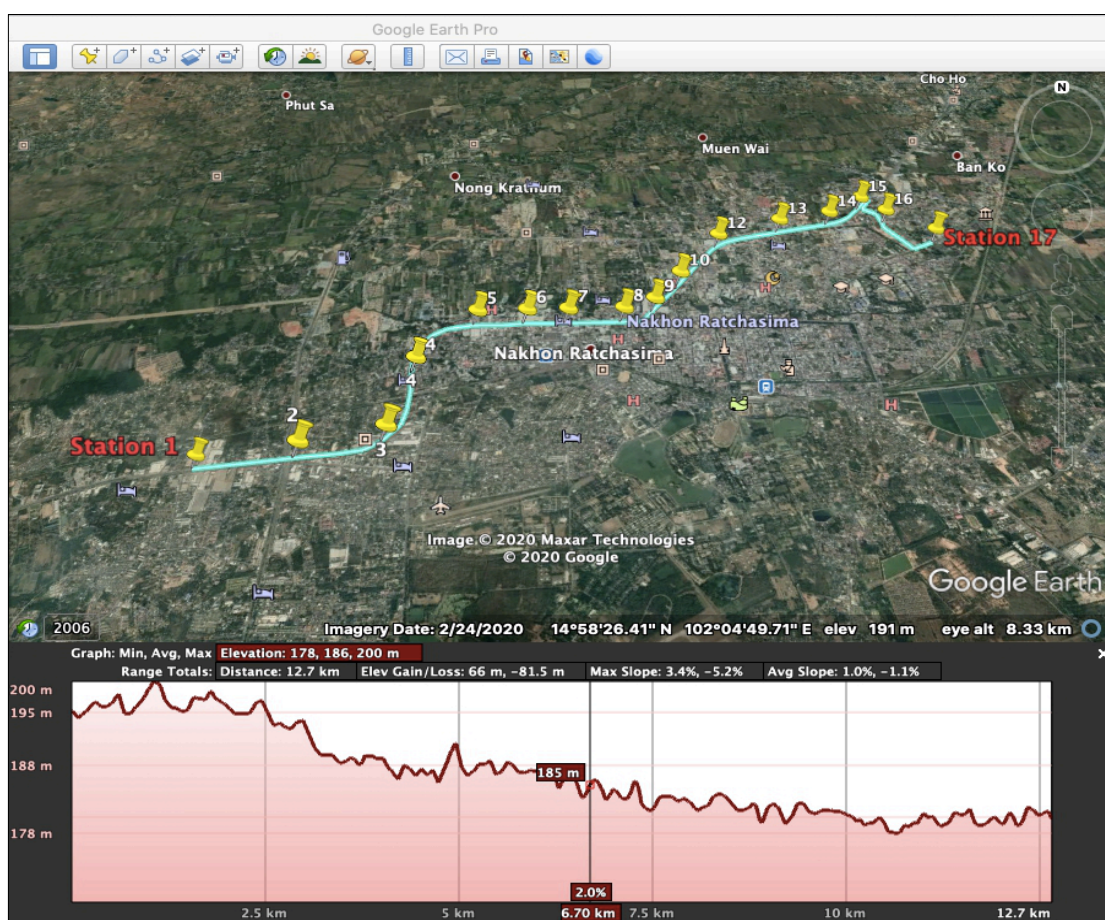


รูปที่ 3.2 เส้นทางรถบัสไฟฟ้าตามแผนแม่บท จังหวัดนครราชสีมา¹⁸

¹⁸ ที่มา: <https://wekorat.com/2017/04/04/korat-lrt-mass-transit-stations-update/>, สืบค้นเมื่อ 10 เมษายน 2563

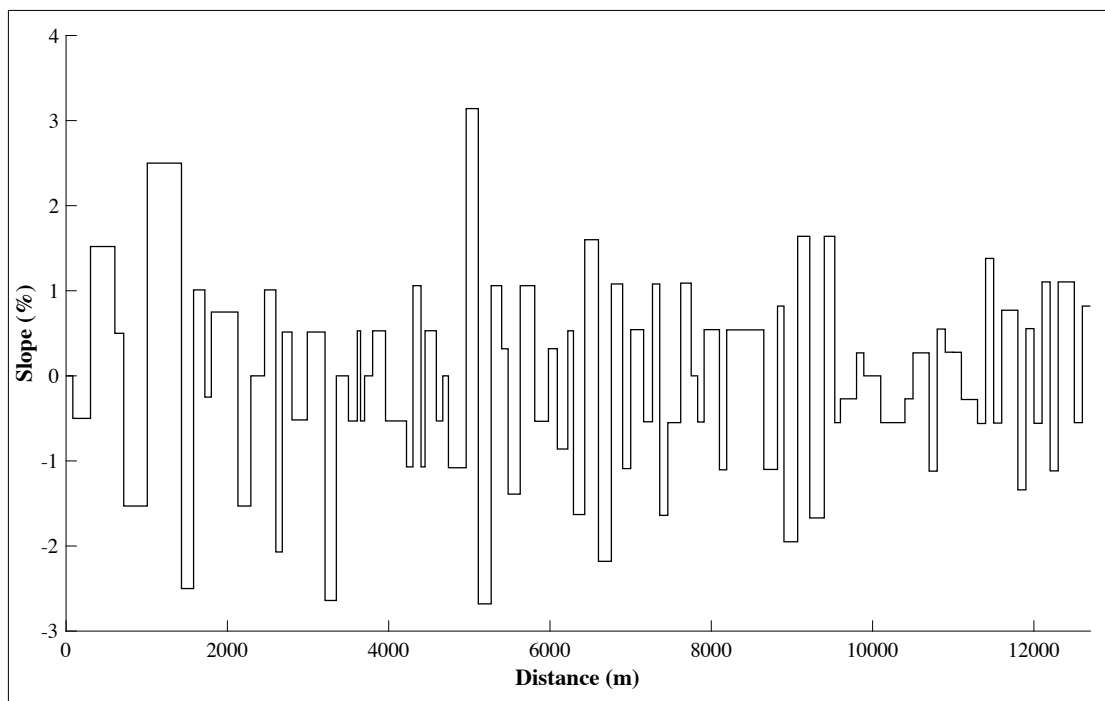
1) เส้นทางรถบัไฟฟ้าสายสีม่วง

รถบัไฟฟ้าสายสีม่วงมีระยะทางในการให้บริการจากต้นทางถึงปลายทาง 12.70 km จำนวน 17 สถานี เริ่มต้นเส้นทางจาก ตลาดเซฟวัน - อุ้งเช็ดชัย - เทศโกโด้ส - ธนาคารเกียรตินาคิน - เทอร์มินอล 21 - บขส. ใหม่ - เซ็นทรัลพลาซ่า - วงษ์สวัสดิกุล - ซอยสุรนารายณ์ 13 และสิ้นสุดเส้นทางที่สถานค้คุมครองและพัฒนาอาชีพบ้านนริสวัสดิ์ แสดงในรูปที่ 3.3 ระยะทางและค่าความชันของเส้นทางที่ใช้เป็นกรณีศึกษาถูกคำนวณโดยใช้โปรแกรม Google earth pro¹⁹ รูปที่ 3.4 แสดงค่าความชันของเส้นทางเที่ยวไป และรูปที่ 3.5 แสดงความชันของเส้นทางเที่ยวกลับ ค่าเป็นบวกนั้นหมายความว่ารถบัไฟฟ้าขึ้นเนินและเมื่อความชันเป็นลบคือช่วงที่รถบัลงเนิน

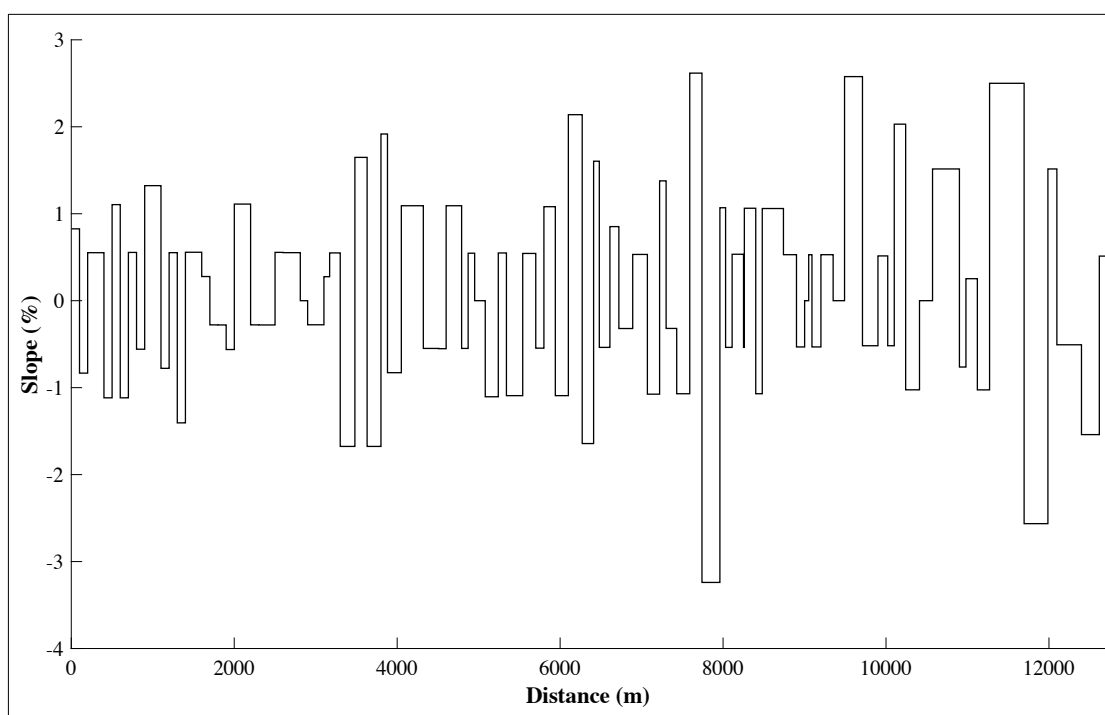


รูปที่ 3.3 เส้นทางรถบัไฟฟ้าสายสีม่วง

¹⁹ ที่มา: Google earth pro, <https://www.google.com/earth/versions/>.



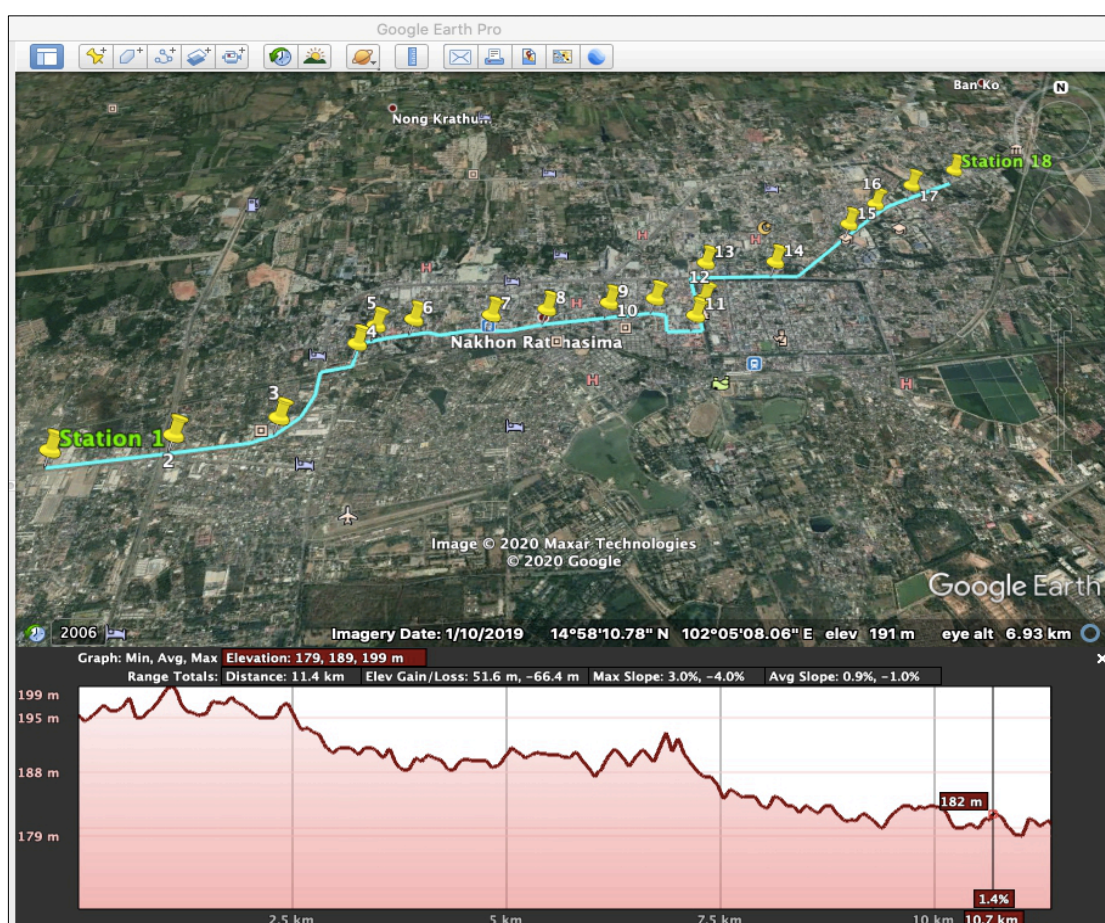
รูปที่ 3.4 ค่าความชันของเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วงเข้มเที่ยวไป



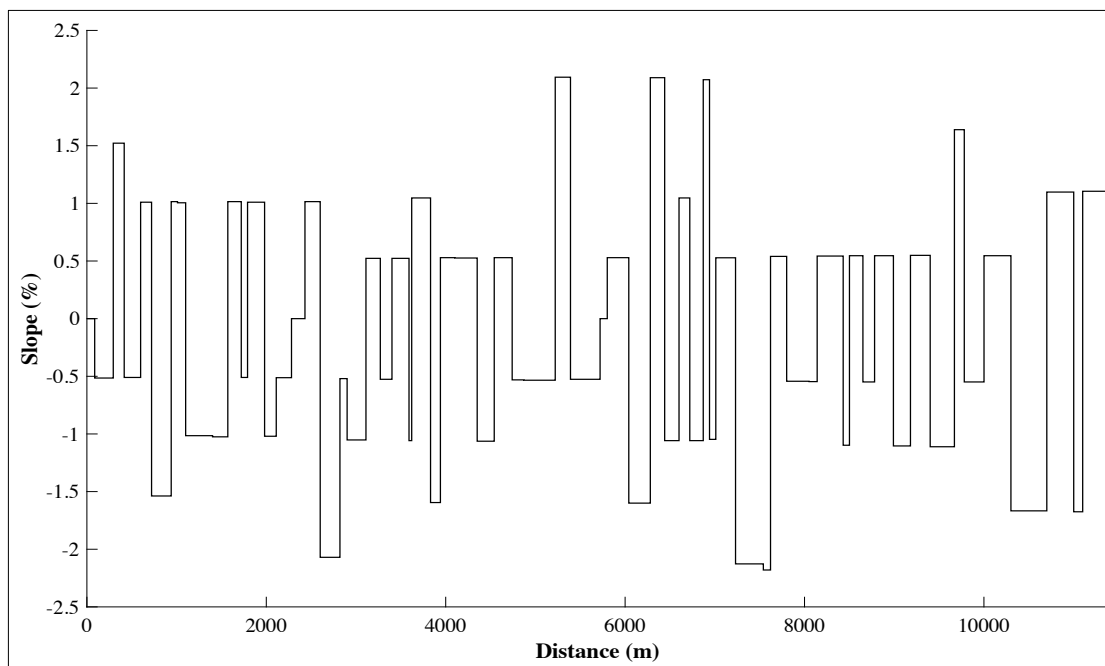
รูปที่ 3.5 ค่าความชันของเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วงเข้มเที่ยวกลับ

2) เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว

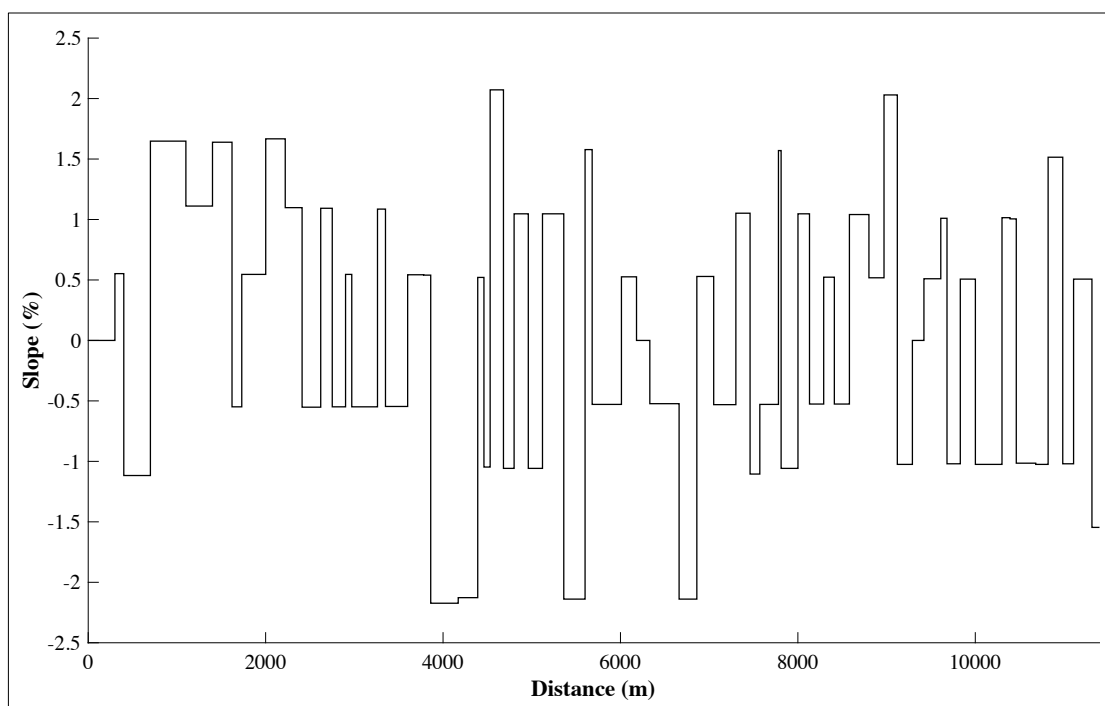
รถไฟฟ้าสายสีเขียวมีระยะทางสำหรับการให้บริการจากต้นทางถึงปลายทาง 11.4 km จำนวนสถานี 18 สถานี เส้นทางเริ่มจากตลาดเซฟวัน-เซคชัย-สำนักงานคุมประพฤติ-ห้วยรถไฟ คลังปลาชำใหม่-อนุสาวรีย์ท้าวสุรนารี-มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา-สถานคุ้มครองและพัฒนา อาชีพบ้านนารีสวัสดิ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ค่าความชันของเส้นทางจะถูกคำนวณจากโปรแกรม Google earth pro รูปที่ 3.7 แสดงค่าความชันของเส้นทางที่วิ่งไป และรูปที่ 3.8 แสดงความชันของ เส้นทางที่วิ่งกลับ



รูปที่ 3.6 เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว



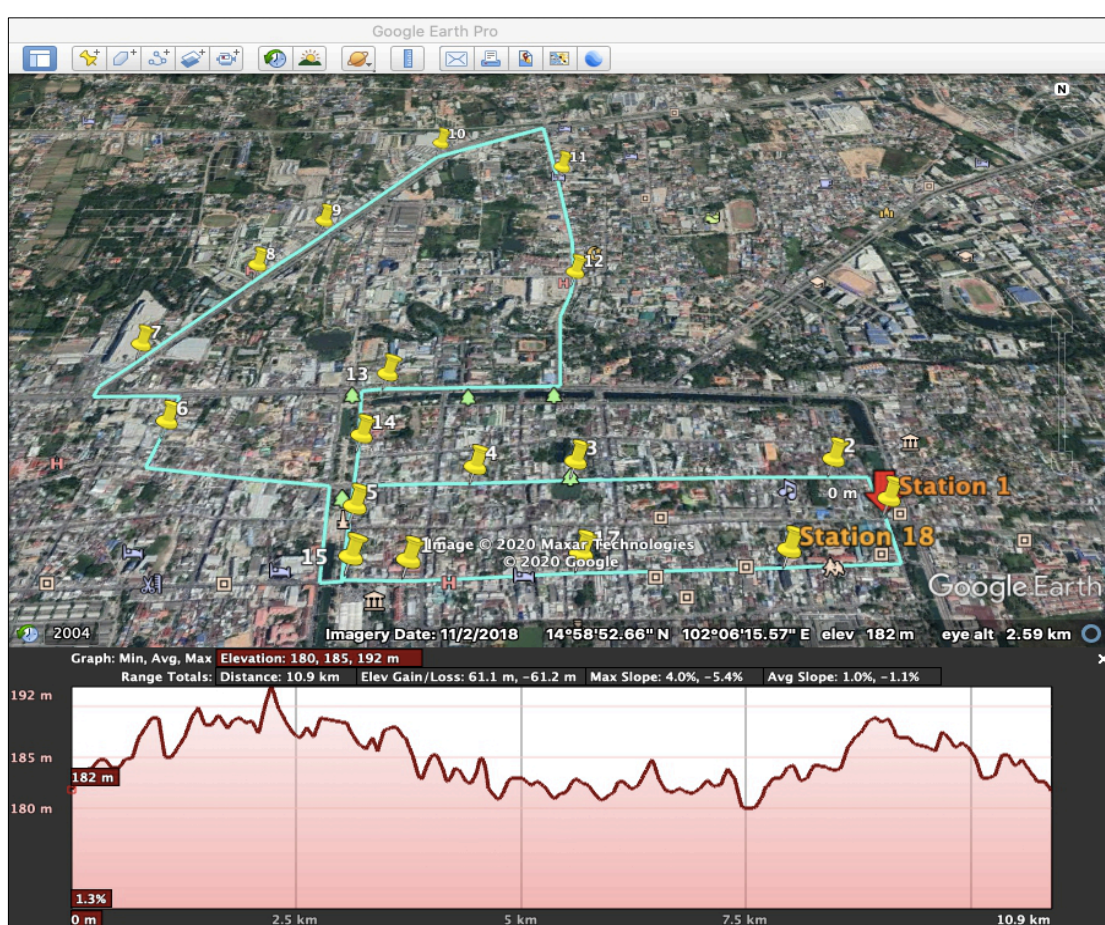
รูปที่ 3.7 ค่าความชันของเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียวเที่ยวไป



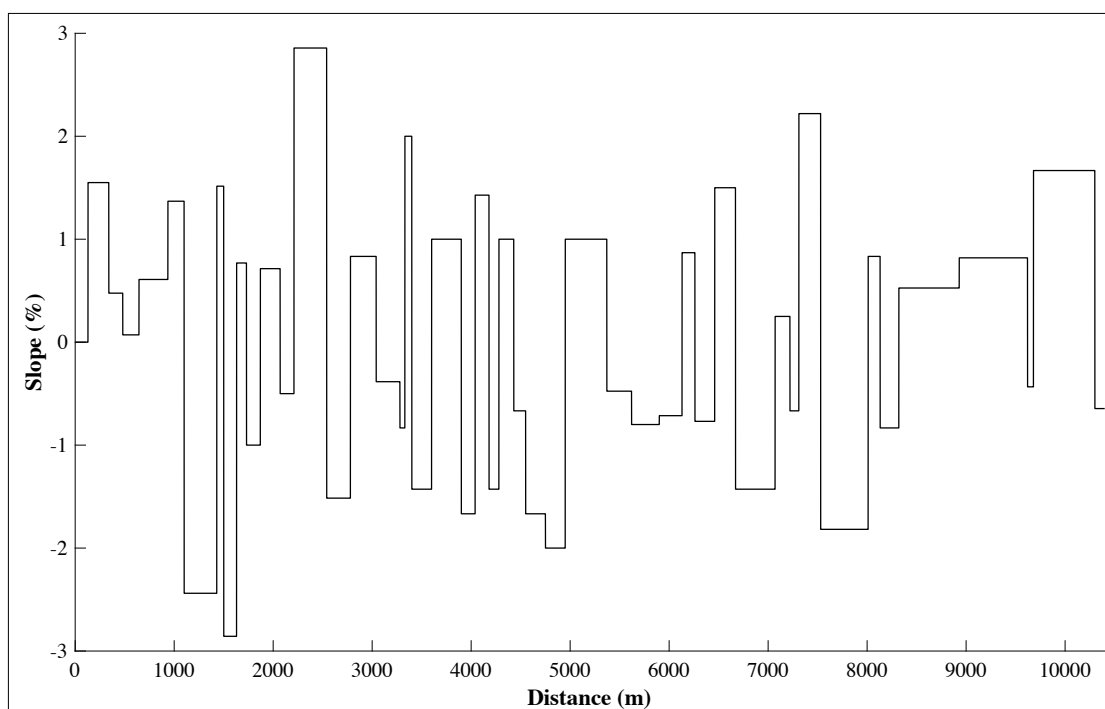
รูปที่ 3.8 ค่าความชันของเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียวเที่ยวกลับ

3) เส้นทางรถบัไฟฟ้าสายสีส้ม

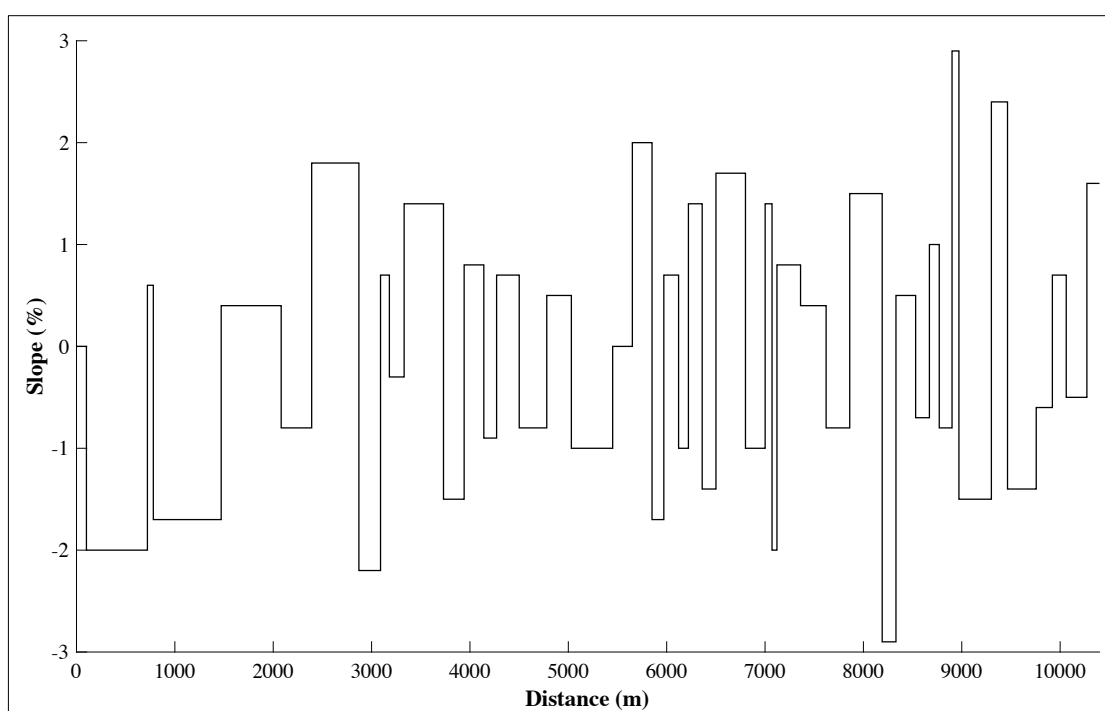
รถบัไฟฟ้าสายสีส้มมีระยะทางสำหรับการให้บริการจากต้นทางถึงปลายทาง 10.4 km จำนวน 18 สถานี เริ่มต้นเส้นทางจาก โรงเรียนเทศบาล 1-สระขวัญ-สวนรัก-บขส. เก่า-เทอร์มินอล 21- โรงพยาบาลเชนดัมเมรี-โรงแรมวี วัน-โรงพยาบาลมหาราช-แยกประปา-ศาลากลางจังหวัด ถึงสิ้นสุดเส้นทางที่ถนนมหาไถไทย โรงพยาบาล ป.แพทย์ แสดงในรูปที่ 3.9 ค่าความชันของเส้นทางจะถูกคำนวณจากโปรแกรม Google earth pro รูปที่ 3.10 แสดงค่าความชันของเส้นทางที่วิ่งไป และรูปที่ 3.11 แสดงความชันของเส้นทางที่วิ่งกลับ



รูปที่ 3.9 เส้นทางรถบัไฟฟ้าสายสีส้ม



รูปที่ 3.10 ค่าความชันของเส้นทางเที่ยวไป



รูปที่ 3.11 ค่าความชันของเส้นทางเที่ยวกลับ

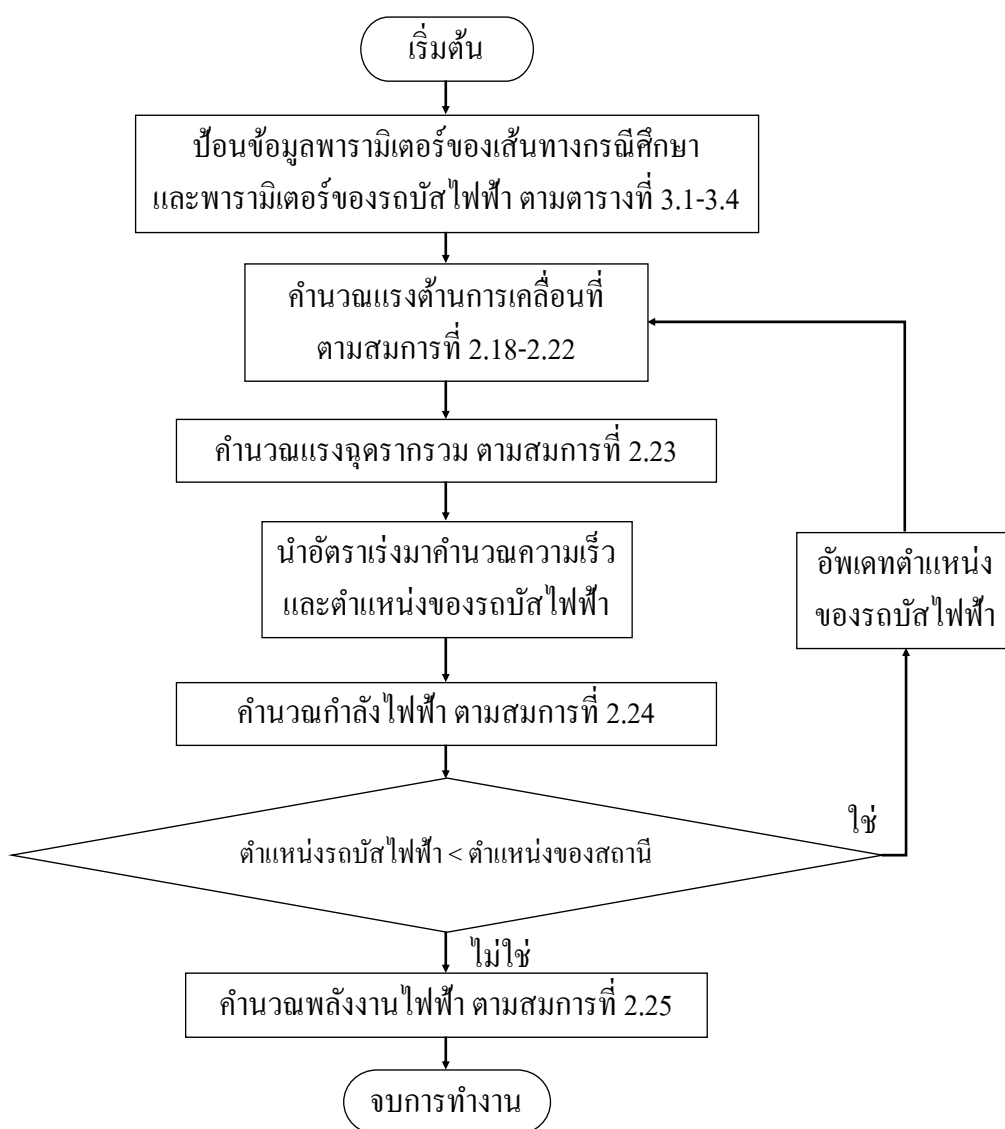
3.2.2 คุณสมบัติของรถบัสไฟฟ้า

การศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ใช้คุณสมบัติต่าง ๆ ของรถบัสไฟฟ้า Proterra Catalyst XR Bus 40 Foot สำหรับเป็นข้อมูลในการจำลอง คุณสมบัติต่าง ๆ ของรถบัสไฟฟ้าที่นำมาใช้ในการศึกษา แสดงดังตารางที่ 3.1 มีจำนวนที่นั่ง 40 ที่นั่ง มีแบตเตอรี่ขนาดความจุ 220 kWh ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน 0.9817 -1.1868 kWh/km (Proterra Catalyst 40 ft, 2019)

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของรถบัสไฟฟ้า Proterra Catalyst XR (Proterra Catalyst 40 ft, 2019)

คุณสมบัติ	รายละเอียด
น้ำหนักรถบัส (ไม่รวมน้ำหนักผู้โดยสาร)	12,088 kg
น้ำหนักกรมสูงสุด	19,800 kg
ความยาว	11.25 m
ความสูง	3.25 m
ความกว้าง	2.59 m
ความเร็วสูงสุด	104.6 km/hr. (65 mph)
อัตราเร่ง	0 – 8.9408 m/s (0 to 20 mph) in 6.2 s (1.44 m/s^2)
พิกัดกำลังของมอเตอร์	Single 250 kW
อัตราการใช้พลังงาน	0.9817-1.1868 kWh/km
ประสิทธิภาพของมอเตอร์ (η_m)	0.95
แรงโน้มถ่วง (g)	9.8 m/s^2
ประสิทธิภาพการต้านทานการหมุน (μ_r)	0.015
สัมประสิทธิ์การฉุดลาก (C_d)	0.82
พื้นที่ด้านหน้าของรถบัส (A)	$3.25 \times 2.59 \text{ m}^2$
ความหนาแน่นของอากาศ (ρ_a)	1.25 kg/m^3
ขนาดของล้อและยาง	225/70R19.5
รัศมีของล้อ	0.454 m
การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน	กำลังไฟฟ้าพิกัด 72 kW (200A)
การประจุไฟฟ้าแบบแพนโทกราฟ	กำลังไฟฟ้าพิกัด 166 kW
การรับประกันแบตเตอรี่	12 ปี

เมื่อทราบพารามิเตอร์ของเส้นทางกรณีศึกษาในอำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของรถบัสไฟฟ้าแล้ว ดังนั้น สามารถหาค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าได้จากสมการที่ 2.25 ดังได้อธิบายในบทที่ 2 และสามารถคำนวณจำนวนรถบัสไฟฟ้าที่ให้บริการในหนึ่งวัน รูปที่ 3.12 แสดงขั้นตอนการหาพลังงานไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้า และรายละเอียดของผลการจำลองแสดงในบทที่ 4 ต่อไป



รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการหาพลังงานไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้า

3.3 แผนกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าสำหรับรถโดยสารสาธารณะที่ใช้ศึกษาวิจัย

3.3.1 กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าสำหรับรถโดยสารสาธารณะ

การวิเคราะห์แผนกลยุทธ์ของการประจุไฟฟ้าสำหรับรถโดยสารสาธารณะนั้น เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาการใช้พลังงานของรถโดยสารไฟฟ้าเมื่อมีการประจุไฟฟ้า รวมถึงการวางแผนตารางการประจุไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการใช้งานในพื้นที่ให้บริการของรถโดยสารสาธารณะ ซึ่งสามารถเป็นแนวทางในการวิเคราะห์สำหรับการติดตั้งระบบในอนาคต กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าของรถโดยสารไฟฟ้าในการศึกษาวิจัยนี้มี 3 รูปแบบ คือ กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไปสำหรับรถโดยสารไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแบบแผนโทกราฟ และกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไป สำหรับรถโดยสารไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน

กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไป สำหรับรถโดยสารไฟฟ้าแบบปลั๊กอินเป็นการประจุไฟฟ้าที่สถานีต้นทางและสถานีปลายทางจนแบตเตอรี่มีค่า SOC 100% หรือแบตเตอรี่เต็ม จากนั้นให้บริการตลอดทั้งวัน และทำการประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่อีกครั้งเมื่อสิ้นสุดการให้บริการและกลับสู่สถานี สำหรับการศึกษาจะใช้การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไปที่ใช้เวลาในการประจุไฟฟ้า 7:30 ชั่วโมง ทำการประจุไฟฟ้าไว้ตลอดคืน รูปที่ 3.13 แสดงแบบจำลองการประจุไฟฟ้าของรถโดยสารไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่สถานีต้นทางและสถานีปลายทางเมื่อสิ้นสุดการให้บริการ



รูปที่ 3.13 แบบจำลองกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไป สำหรับรถโดยสารไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน

รถโดยสารไฟฟ้าแบบปลั๊กอินถูกนำมาใช้สำหรับการศึกษาการประจุไฟฟ้าแบบทั่วไป ซึ่งเป็นการประจุไฟฟ้าแบบช้าโดยใช้กำลังไฟฟ้าต่ำ และใช้แรงดันไฟฟ้าทั่วไปที่ใช้ตามบ้านเรือน แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส มีแรงดันไฟฟ้าอิมินอลเท่ากับ 230 V กระแสไฟฟ้าไม่เกิน 80 A และกำลังไฟฟ้าสูงสุด 19.2 kW ดังแสดงในตารางที่ 2.2 การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไป คือ การประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่รถโดยสารไฟฟ้าหนึ่งครั้งต่อวัน ทำการประจุไฟฟ้าเมื่อไม่มีการให้บริการในช่วงเวลากลางคืน ตั้งแต่เวลา 22:00 – 04:30 น. กำหนดให้รถโดยสารไฟฟ้ามีขนาดของแบตเตอรี่เป็นไปตามรูปแบบการประจุไฟฟ้า ซึ่งสามารถให้บริการได้ตลอดทั้งวัน โดยใช้รถโดยสาร

จำนวน 10 คันให้บริการ และมีสถานีประจุไฟฟ้า 2 สถานี ที่ต้นทางและปลายทาง มีหัวชาร์จ 10 หัว ตามจำนวนของรถบัสไฟฟ้า พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการประจุไฟฟ้าแบบทั่วไปสำหรับรถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์สำหรับการประจุไฟฟ้าแบบทั่วไป

คุณลักษณะเฉพาะ	รายละเอียด
กำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่กระแส 80 A (kW)	20
จำนวนสถานีประจุไฟฟ้า (สถานี)	2
จำนวนหัวชาร์จต่อสถานีประจุไฟฟ้า (หัวชาร์จ/สถานี)	5
เวลาประจุไฟฟ้า (ชั่วโมง)	7:30
แรงดันไฟฟ้า (V)	230

2) กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ

กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟจะใช้รถบัสไฟฟ้าที่มีระบบการประจุไฟฟ้าแบบแผนโทกราฟ การประจุไฟฟ้าจะดำเนินการเมื่อรถบัสไฟฟ้าไปถึงสถานีปลายทางและสถานีต้นทาง โดยประจุไฟฟ้าทุกครั้งที่รถบัสมาถึงสถานีต้นทางและปลายทาง การศึกษานี้จะใช้การประจุไฟฟ้าแบบเร็วที่ใช้เวลาในการประจุไฟฟ้า 5 นาที รูปที่ 3.14 แสดงแบบจำลองกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ



รูปที่ 3.14 แบบจำลองกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ

กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟจะใช้รูปแบบการประจุไฟฟ้าแบบเร็ว นั่นคือ การชาร์จแบตเตอรี่โดยการเชื่อมต่อหัวชาร์จเข้ากับหลังการรถบัสไฟฟ้า ซึ่งเป็นระบบการชาร์จแบบรวดเร็วโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงผ่านหัวชาร์จ ใช้เวลาในการประจุที่รวดเร็วและใช้กำลังไฟฟ้าสูง พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการประจุไฟฟ้าแบบเร็วสำหรับระบบรถบัสไฟฟ้าแบบ

แผนโทกราฟ แสดงในตารางที่ 3.3 โดยประจุไฟฟ้าเมื่อรถบัสไฟฟ้าเข้าจอดที่สถานีต้นทางและปลายทาง โดยประจุไฟฟ้าที่เวลา 5 นาที ที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด 450 kW โดยใช้จำนวนรถบัสไฟฟ้าให้บริการ 10 คัน ผลการจำลองจะถูกแสดงในบทถัดไป

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์สำหรับการประจุไฟฟ้าแบบเร็วยิ่ง รถบัสไฟฟ้าแบบแผนโทกราฟ

คุณลักษณะเฉพาะ	รายละเอียด
กำลังไฟฟ้า (kW)	450
จำนวนสถานีประจุไฟฟ้า (สถานี)	2
จำนวนหัวชาร์จต่อสถานีประจุไฟฟ้า (หัวชาร์จ)	2
เวลาประจุไฟฟ้า (นาที)	5
แรงดันไฟฟ้า (V)	500

3) กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

การสับเปลี่ยนแบตเตอรี่เป็นอีกวิธีการหนึ่งเพื่อให้รถบัสไฟฟ้ามีพลังงานที่ขับเคลื่อนระบบให้สามารถให้บริการได้อย่างต่อเนื่อง และใช้เวลาในการฟื้นคืนพลังงานให้แบตเตอรี่น้อยที่สุดแทนการประจุไฟฟ้า โดยใช้รถบัสไฟฟ้าที่มีระบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ โดยกำหนดให้มีสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่สถานีเดียวอยู่ที่สถานีต้นทาง และจะมีการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่เมื่อรถบัสไฟฟ้าให้บริการครบ 2 รอบ ตามระยะทาง การสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของรถบัสไฟฟ้าใช้เวลา 10-15 นาที รูปที่ 3.15 แสดงแบบจำลองสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้า



รูปที่ 3.15 แบบจำลองกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่จะใช้เวลาประจุไฟฟ้าแบบเร็วสำหรับรถบัสไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ ซึ่งเหมาะกับระบบรถบัสไฟฟ้าในตัวเมืองที่ต้องการความรวดเร็วในการให้บริการ และมีสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่และจำเป็นต้องใช้

แบตเตอรี่สำรองจำนวนมากหรือสองเท่าของจำนวนรถจักรยานไฟฟ้า พารามิเตอร์สำหรับการประจุไฟฟ้าแบบเร็วของรถจักรยานไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ แสดงในตารางที่ 3.4 แบตเตอรี่จะถูกสับเปลี่ยนเมื่อให้บริการไป 2 รอบ ซึ่งจะใช้สถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่เพียงสถานีเดียวที่ต้นทาง การสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของรถจักรยานไฟฟ้าจะใช้เวลาประมาณ 10 นาที โดยรถจักรยานไฟฟ้าจะใช้พลังงานในแบตเตอรี่เป็นไปตามการใช้งานของแต่ละเส้นทาง และสามารถคำนวณหาจำนวนของแบตเตอรี่สำรองได้ตามสมการที่ 3.1 ดังนั้น ผลการจำลองลักษณะการประจุไฟฟ้าแบบเร็วสำหรับรถจักรยานไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่จะแสดงในบทถัดไป

$$B_N = \frac{T_{ch}}{T_s + T_w} \quad (3.1)$$

โดยที่ B_N	คือ จำนวนของแบตเตอรี่ (หากเป็นจุดทศนิยมให้ปัดขึ้นเป็นจำนวนเต็ม)
T_{ch}	คือ เวลาที่ใช้ในการประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่
T_s	คือ เวลาหยุดรถที่สถานี
T_w	คือ เวลารอรถเข้าสถานี

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์สำหรับการประจุไฟฟ้าแบบรวดเร็ว รถจักรยานไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

คุณลักษณะเฉพาะ	รายละเอียด
กำลังไฟฟ้า (kW), 200 A	90
จำนวนสถานีประจุไฟฟ้า (สถานี)	1
จำนวนหัวชาร์จต่อสถานีประจุไฟฟ้า (หัวชาร์จ/จำนวนแบตเตอรี่สำรอง)	1
เวลาประจุไฟฟ้า (นาที)	50
แรงดันไฟฟ้า (V)	500

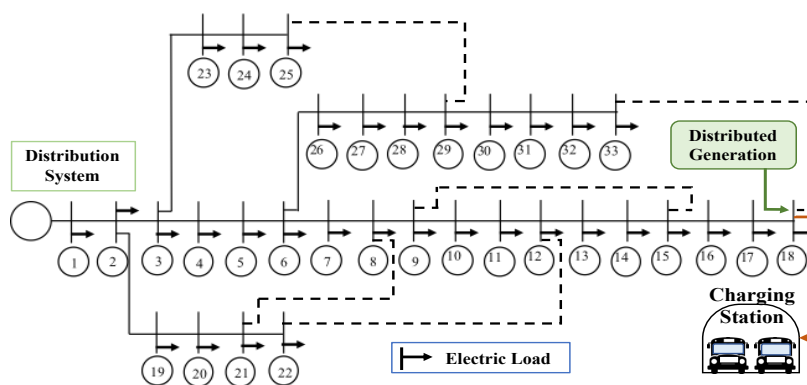
3.4 การจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถจักรยานไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า

3.4.1 การจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถจักรยานไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า

โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด

ระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปจะมีการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับผู้ใช้งาน เช่น คริวเรือน ห้างร้าน สำนักงาน และอุตสาหกรรม ดังนั้น เมื่อมีสถานีประจุไฟฟ้าเข้ามาเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าย่อมมีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากขึ้นตามไปด้วย การจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถจักรยานไฟฟ้า

ไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด ที่มีการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้ากับโหลดทั่วไปและโหลดการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้า ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด ปกติแล้วเป็นระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเรเดียลที่มีนักวิจัยหลายคนให้ความสนใจนำมาประยุกต์ใช้ โดยปกติแล้วระบบนี้จะมีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่ามาตรฐานกำหนดจึงต้องมีการประยุกต์ใช้ Tie lines 5 เส้น เชื่อมต่อวงจรเพื่อปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า มีโครงสร้างจำนวนโหนดในระบบทั้งหมด 33 โหนด โดยมีจำนวนสาย 33 สาย มีบัสสแลค 1 บัส ที่โหนด 1 โหนดที่เหลือเป็นโหนดสำหรับโหลดการใช้งาน มีค่าแรงดันไฟฟ้าฐาน 22 kV ที่ค่ากำลังไฟฟ้าฐาน 100 MVA กำลังไฟฟ้าจริง 3.715 MW กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 2.30 Mvar และแรงดันไฟฟ้าพิกัด 1.0 p.u. (Sharma and Tandon, 2015) รูปที่ 3.16 แสดงระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด สำหรับประยุกต์ใช้กับสถานีประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้า ผู้วิจัยทำการศึกษาผลกระทบของโหลดสถานีประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้าที่ติดตั้งเข้ากับโหนดที่ 18 โหนดเดียว เนื่องจากเป็นโหนดที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำที่สุด



รูปที่ 3.16 ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด ประยุกต์ใช้กับสถานีประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้า
(ดัดแปลงจาก Boonraksa et al., 2018)

การศึกษผลกระทบการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้า กำหนดให้มีรถบัสให้บริการ 10 คันต่อวัน และใช้รูปแบบโหลดการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้า 3 รูปแบบ คือ การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไปแบบปลั๊กอิน การประจุไฟฟ้าแบบเร็วยิ่ง (แพนโทกราฟ) และการประจุไฟฟ้าแบบเร็วสำหรับสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ ซึ่งได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ เนื่องจากระบบทดสอบเป็นระบบแบบคงที่ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้น ผู้วิจัยจึงใช้โหลดการประจุไฟฟ้าสูงสุดของระบบรถบัสไฟฟ้าเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง เป็นกรณีศึกษา การจำลองผลกระทบจากการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้า สามารถคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน ดังแสดงในหัวข้อที่ 2.9.4 เพื่อตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

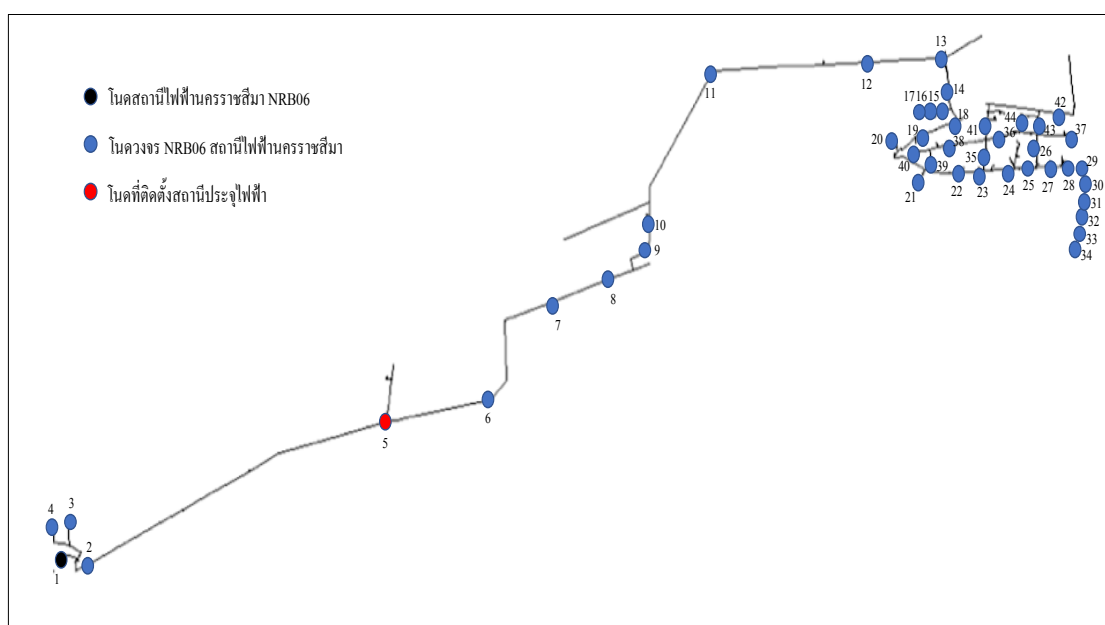
3.4.2 การจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา

การจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้าของพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา เป็นการจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยใช้โหลดแบบไดนามิกส์หรือมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา จำเป็นต้องหาตำแหน่งของสถานีประจุไฟฟ้าบนระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยกำหนดตำแหน่งตามสถานีประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้า ตามเส้นทางกรณีศึกษา ซึ่งผู้วิจัยได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ และใช้รูปแบบการประจุไฟฟ้า 3 รูปแบบ ได้แก่ รถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน ใช้การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไปที่สถานีต้นทางและสถานีปลายทาง รถบัสไฟฟ้าแบบแพนโทกราฟ ใช้การประจุไฟฟ้าที่สถานีต้นทาง รถบัสไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ ใช้การประจุไฟฟ้าที่สถานีต้นทาง ดังนั้น จึงได้วงจรไฟฟ้าที่นำมาศึกษาสำหรับการติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้าระบบรถบัสไฟฟ้า 5 วงจร ดังแสดงในตารางที่ 3.5 การจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา สามารถคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน ดังแสดงในหัวข้อที่ 2.9.4 เพื่อตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

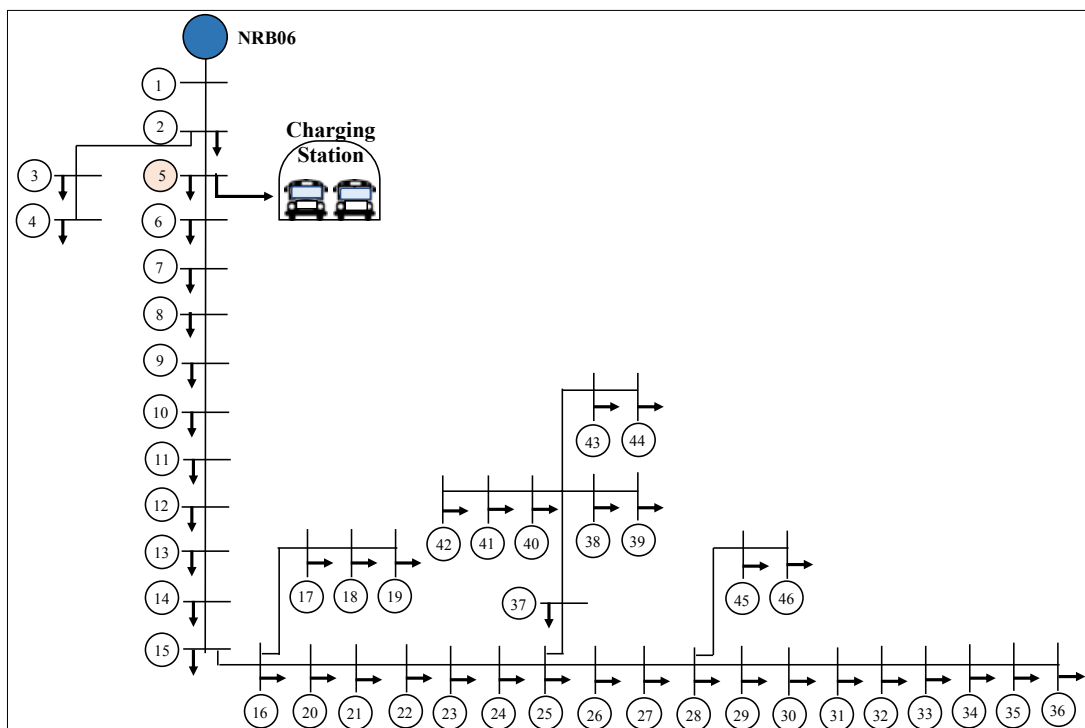
ตารางที่ 3.5 วงจรไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้านครราชสีมา สำหรับติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้า

เส้นทาง	วงจรไฟฟ้าที่	รหัส วงจรไฟฟ้า	สถานี ประจุไฟฟ้า	โนดที่ติดตั้ง สถานีประจุไฟฟ้า
รถบัสไฟฟ้า สายสีม่วง	1	NRB06	ปลั๊กอิน	5
			แพนโทกราฟ	5
			สับเปลี่ยนแบตเตอรี่	5
	2	NRD09	แพนโทกราฟ	30
			สับเปลี่ยนแบตเตอรี่	30
รถบัสไฟฟ้า สายสีเขียว	3	NRB08	ปลั๊กอิน	12
			แพนโทกราฟ	12
			สับเปลี่ยนแบตเตอรี่	12
	4	NRA08	แพนโทกราฟ	41
			สับเปลี่ยนแบตเตอรี่	41
รถบัสไฟฟ้า สายสีส้ม	5	NRA07	ปลั๊กอิน	6
			แพนโทกราฟ	6
			สับเปลี่ยนแบตเตอรี่	6

เส้นทางรถบัไฟฟ้าสายสีม่วงมีวงจรไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการจำลองอยู่ 2 วงจร ได้แก่ วงจรไฟฟ้าที่ 1 และวงจรไฟฟ้าที่ 2 โดยที่วงจรไฟฟ้าที่ 1 คือ วงจรไฟฟ้านครราชสีมา NRB06 ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ซึ่งเป็นวงจรไฟฟ้าที่ใช้ศึกษาการประจุไฟฟ้าของสถานีต้นทางสำหรับสถานีประจุไฟฟ้ารถบัไฟฟ้า โดยมีโครงสร้างจำนวนโนดในระบบทั้งหมด 44 โนด จำนวนสาย 43 สาย มีบัสแตกที่โนด 1 ส่วนโนดที่เหลือเป็นโนดสำหรับโหลดการใช้งาน ติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้ารถบัไฟฟ้าที่โนด 5 โดยมีค่าแรงดันฐาน 22 kV ที่ค่ากำลังไฟฟ้าฐาน 12.243 MVA กำลังไฟฟ้าจริง 31.22 MW กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 19.35 Mvar และแรงดันไฟฟ้าพิกัด 1.03 p.u. รูปที่ 3.17 แสดงวงจรเทียบเคียงวงจรนครราชสีมา NRB06 สำหรับเส้นทางรถบัไฟฟ้าสายสีม่วง

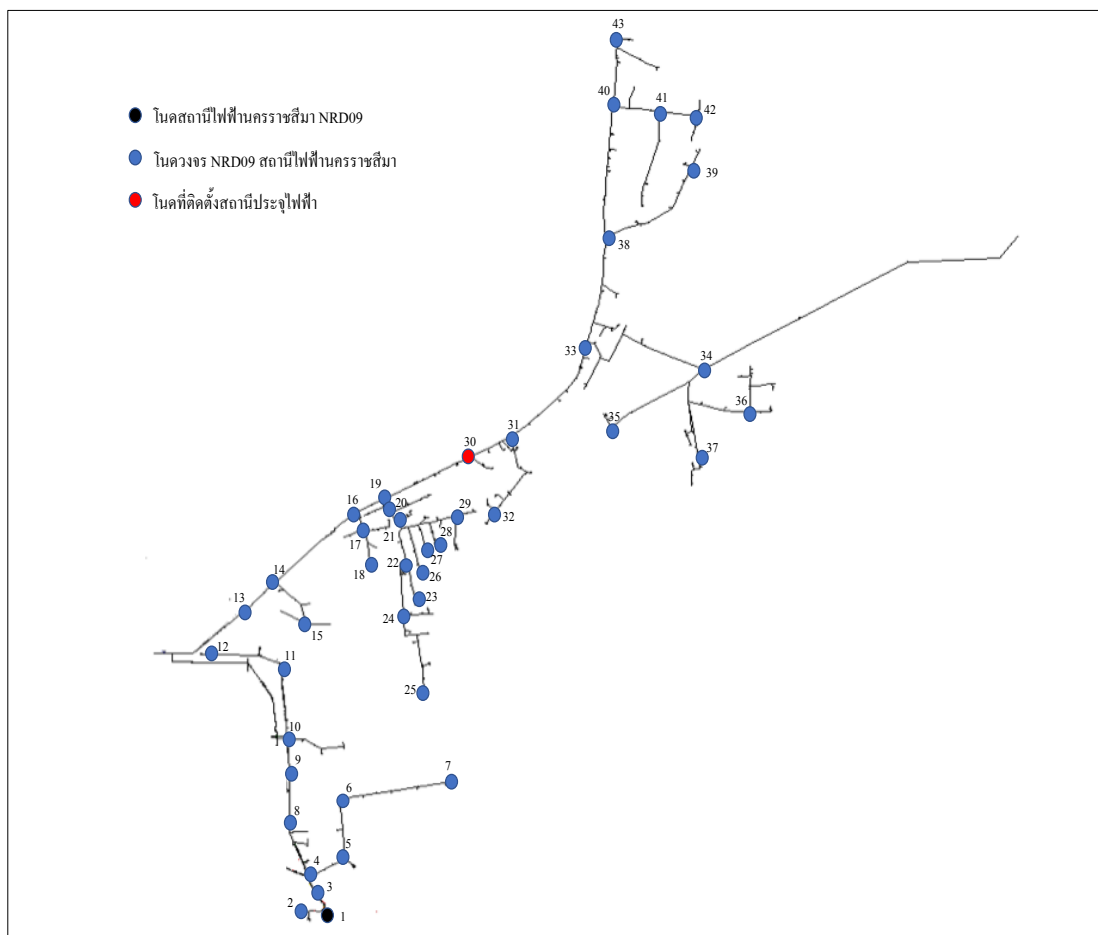


รูปที่ 3.17 การจ่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้านครราชสีมา 2 วงจรนครราชสีมา NRB06 สำหรับกรณีศึกษาเส้นทางรถบัไฟฟ้าสายสีม่วง

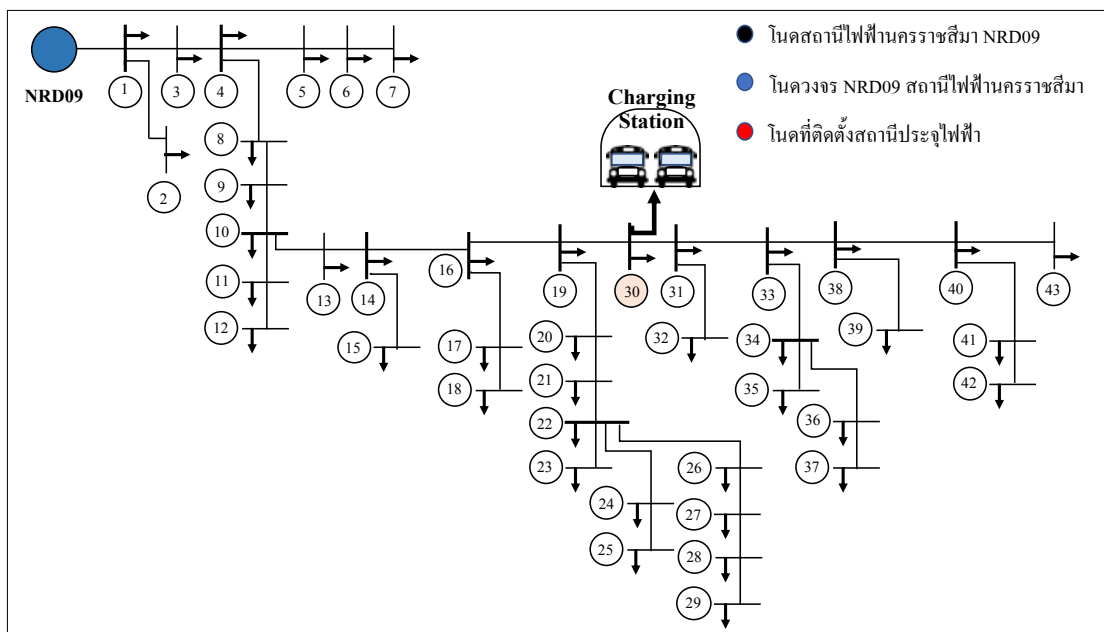


รูปที่ 3.18 วงจรเทียบเคียงวงจรกรรณราชสีมา NRB06 สำหรับเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง

วงจรไฟฟ้าที่ 2 สำหรับเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง คือ วงจรไฟฟ้ากรรณราชสีมา NRD09 ดังแสดงในรูปที่ 3.19 ซึ่งเป็นวงจรไฟฟ้าที่ใช้ศึกษาการประจุไฟฟ้าของสถานีปลายทางสำหรับสถานีประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้า โดยมีโครงสร้างจำนวนโนดในระบบทั้งหมด 43 โนด มีจำนวนสาย 42 สาย มีบัสแตกที่โนด 1 ส่วนโนดที่เหลือเป็นโนดสำหรับโหลดการใช้งาน ติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าที่โนด 30 โดยค่าแรงดันฐาน 22 kV กำลังไฟฟ้าฐาน 17.1733 MVA กำลังไฟฟ้าจริง 49.98 MW กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 17.07 Mvar และแรงดันไฟฟ้าพิกัด 1.03 p.u. รูปที่ 3.120 แสดงวงจรเทียบเคียงวงจรกรรณราชสีมา NRD09 สำหรับเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง

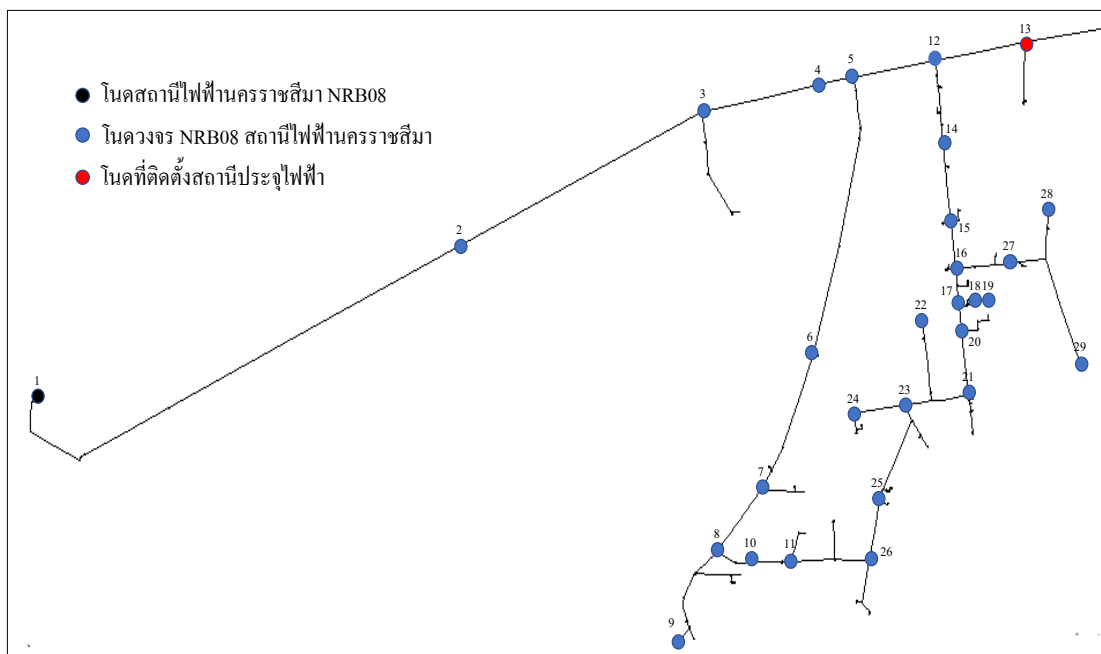


รูปที่ 3.19 การจ่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้านครราชสีมา 2 วงจรนครราชสีมา NRD09
สำหรับกรณีศึกษาเส้นทางรอบบัสไฟฟ้าสายลีม่วง

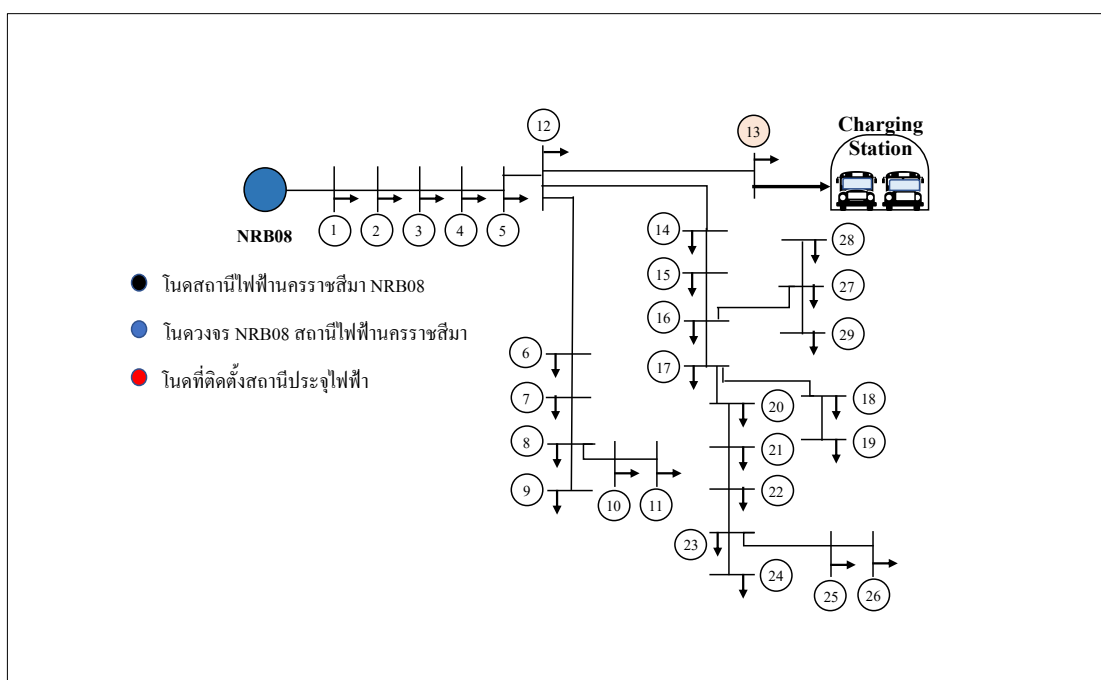


รูปที่ 3.20 วงจรเทียบเคียงวงจรนครราชสีมา NRD09 สำหรับรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง

เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียวมีวงจรไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการจำลองอยู่ 2 วงจร วงจรไฟฟ้าที่ 3 และวงจรไฟฟ้าที่ 4 โดยที่วงจรไฟฟ้าที่ 3 คือ วงจรไฟฟ้านครราชสีมา ดังแสดงในรูปที่ 3.21 ซึ่งเป็นวงจรไฟฟ้าที่ใช้ศึกษาการประจุไฟฟ้าของสถานีต้นทางสำหรับสถานีประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้า โดยมีโครงสร้างจำนวนโนดในระบบ 29 โนด มีจำนวนของสาย 28 สาย มีบัสแอสที่โนด 1 ส่วนโนดที่เหลือเป็นโนดสำหรับโหลดการใช้งาน ติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าที่โนด 12 โดยมีแรงดันไฟฟ้าฐาน 22 kV กำลังไฟฟ้าฐาน 4.62 MVA กำลังไฟฟ้าจริง 11.77 MW กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 7.29 Mvar และแรงดันไฟฟ้าพิกัด 1.03 p.u. รูปที่ 3.22 แสดงวงจรเทียบเคียงวงจรนครราชสีมา NRB08 สำหรับเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว

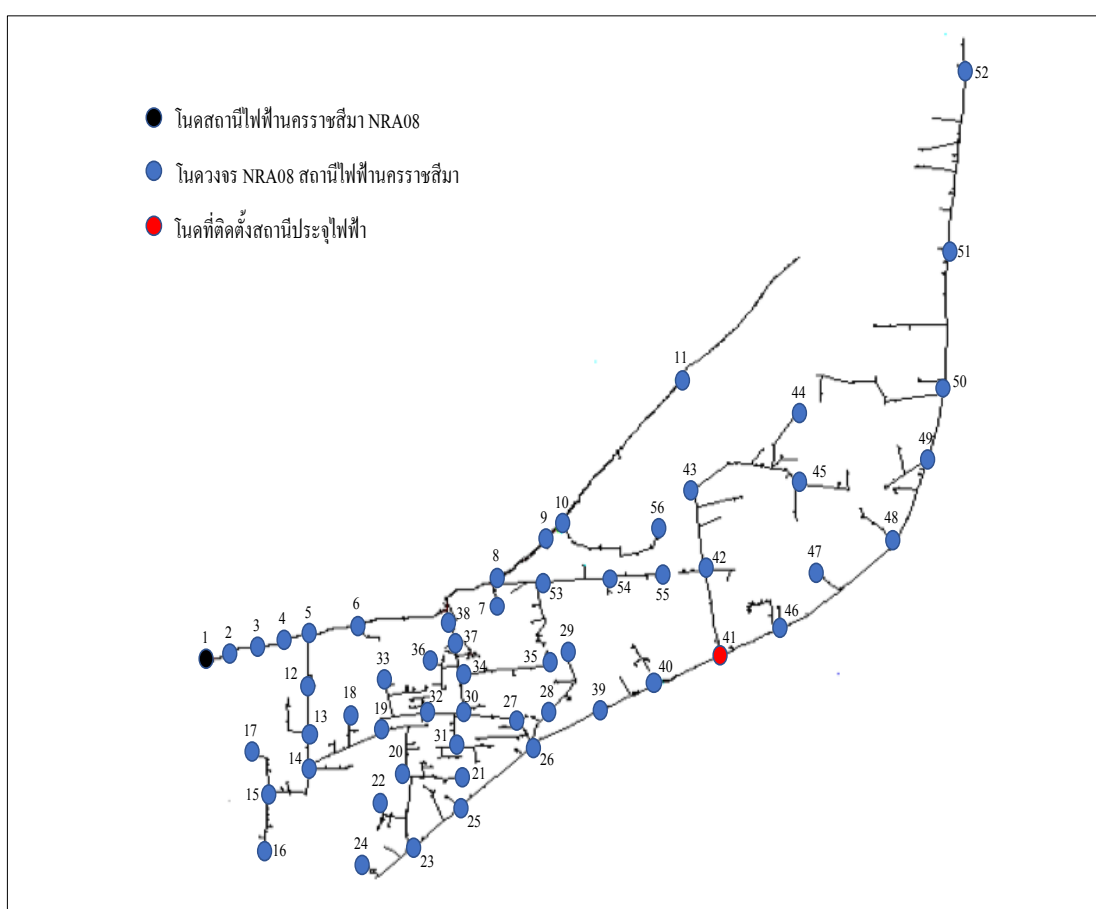


รูปที่ 3.21 การจ่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้านครราชสีมา 2 วงจรนครราชสีมา NRB08
 สำหรับกรณีศึกษาเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว

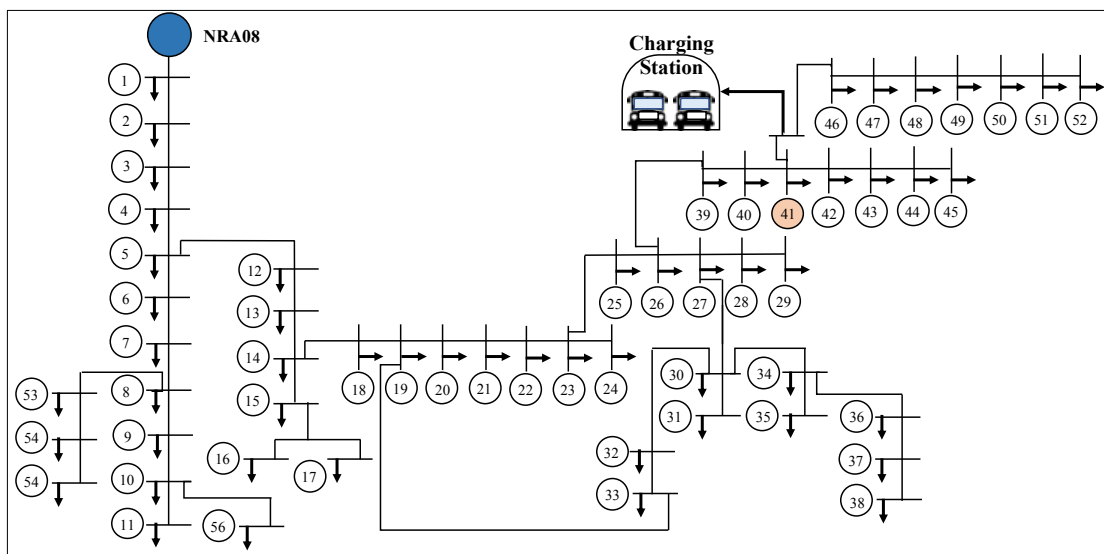


รูปที่ 3.22 วงจรเทียบเคียง วงจรนครราชสีมา NRB08 สำหรับเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว

วงจรไฟฟ้าที่ 4 คือ วงจรไฟฟ้านครราชสีมา NRA08 ดังแสดงในรูปที่ 3.23 ซึ่งเป็นวงจรไฟฟ้าที่ใช้ศึกษาการประจุไฟฟ้าของสถานีย่อยทางสำหรับสถานีประจุไฟฟ้ารอรับไฟฟ้า โดยมีโครงสร้างจำนวนโหนดในระบบทั้งหมด 56 โหนด มีจำนวนของสาย 56 สาย มีบัสสแลคที่โหนด 1 ส่วนโหนดที่เหลือเป็นโหนดสำหรับโหลดการใช้งาน ติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้ารอรับไฟฟ้าที่โหนด 41 โดยมีค่าแรงดันฐาน 22 kV ที่ค่ากำลังไฟฟ้าฐาน 22.69 MVA กำลังไฟฟ้าจริง 61.08 MW กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 33.76 Mvar และแรงดันไฟฟ้าพิกัด 1.03 p.u. รูปที่ 3.24 แสดงวงจรเทียบเคียงวงจรนครราชสีมา NRA08 สำหรับเส้นทางรอรับไฟฟ้าสายสีเขียว

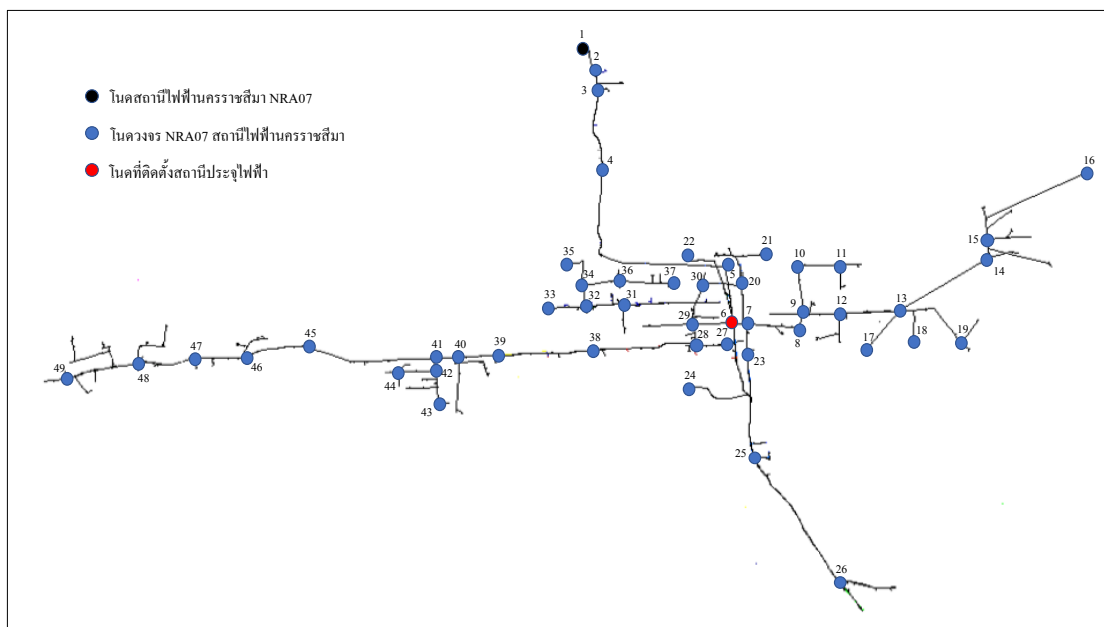


รูปที่ 3.23 การจ่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้านครราชสีมา 2 วงจรนครราชสีมา NRA08
สำหรับกรณีศึกษาเส้นทางรอรับไฟฟ้าสายสีเขียว

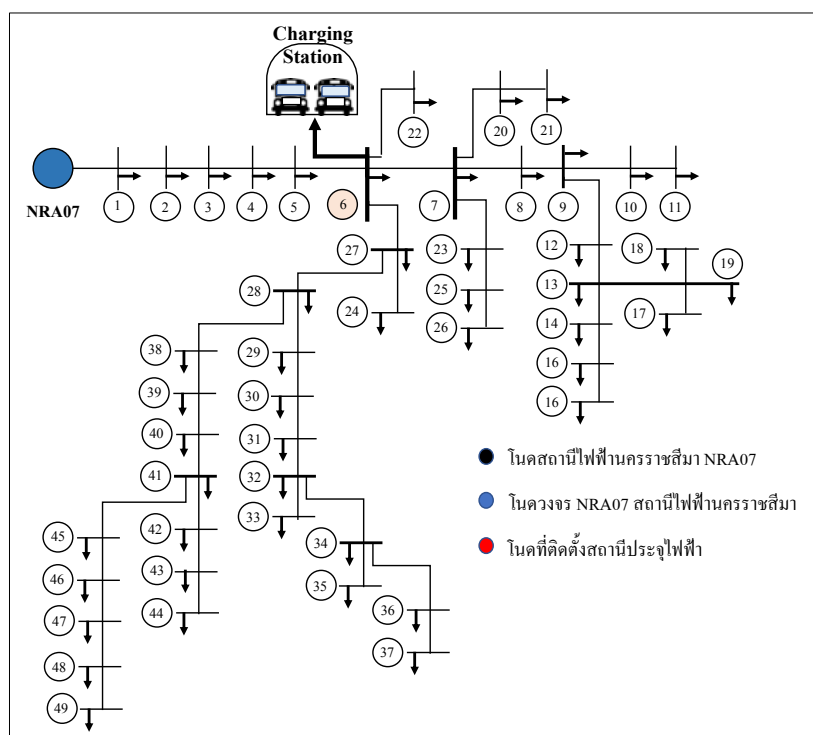


รูปที่ 3.24 วงจรเทียบเคียง วงจรนครราชสีมา NRA08 สำหรับเส้นทางรับส่งไฟฟ้าสายสีเขียว

เส้นทางรับส่งไฟฟ้าสายสีส้มนี้มีวงจรไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการจำลอง 1 วงจร คือ วงจรไฟฟ้าที่ 5 วงจรไฟฟ้านครราชสีมา NRA07 ดังแสดงในรูปที่ 3.25 ซึ่งเป็นวงจรไฟฟ้าที่ใช้ศึกษาการประจุไฟฟ้าของทั้งสถานีต้นทางและปลายทาง สำหรับสถานีประจุไฟฟ้ารับส่งไฟฟ้า โดยมีโครงสร้างจำนวนโนดในระบบทั้งหมด 49 โหนด มีจำนวนของสาย 49 สาย มีบัสแต่ละที่โนด 1 ส่วน โหนดที่เหลือเป็นโนดสำหรับโหลดการใช้งาน ติดตั้งสถานีประจุไฟฟ้ารับส่งไฟฟ้าที่โนด 6 มีค่าแรงดันฐาน 22 kV ที่ค่ากำลังไฟฟ้าฐาน 16.71 MVA กำลังไฟฟ้าจริง 44.46 MW กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ 19.77 Mvar และแรงดันไฟฟ้าพิกัด 1.03 p.u. รูปที่ 3.26 แสดงวงจรเทียบเคียงวงจรนครราชสีมา NRA08 สำหรับเส้นทางรับส่งไฟฟ้าสายสีส้ม



รูปที่ 3.25 การจ่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้านครราชสีมา 2 วงจรนครราชสีมา NRA07
สำหรับกรณีศึกษาเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม



รูปที่ 3.26 วงจรเทียบเคียง วงจรนครราชสีมา NRA07 สำหรับเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม

การจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้าของพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา ดังแสดงในรูปที่ 3.17-3.26 กำหนดให้มีรถบัสให้บริการ 10 คันต่อวันต่อเส้นทาง และใช้รูปแบบโหลดการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้า 3 รูปแบบ คือ การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไปแบบปลั๊กอิน การประจุไฟฟ้าแบบเร็วยิ่ง (แพนโทกราฟ) และการประจุไฟฟ้าเร็วสำหรับสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ ซึ่งได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ เนื่องจากระบบทดสอบเป็นระบบแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้น จึงใช้โหลดการประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้าทั้ง 3 เส้นทาง เป็นกรณีศึกษา การจำลองผลกระทบจากการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าสามารถคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน ดังแสดงในหัวข้อที่ 2.9.4 เพื่อตรวจสอบแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ผลการจำลองแสดงในบทที่ 4 ต่อไป

3.5 การบรรเทาผลกระทบผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า

การประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้าเป็นเหมือนการเพิ่มโหลดเข้าไปในระบบไฟฟ้า เมื่อเพิ่มโหลดเข้าไปในระบบไฟฟ้าทำให้แรงดันในระบบไฟฟ้านั้นลดลงและทำให้กำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย ดังนั้น งานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอวิธีการยกระดับแรงดันไฟฟ้าและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย และชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าจริง และชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าทำหน้าที่เหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟ โดยรายละเอียดของวิธีการยกระดับแรงดันไฟฟ้าจะแสดงในหัวข้อต่อไป

3.5.1 การบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด

การบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด เป็นการจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงระดับแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าเนื่องจากมีโหลดการประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้าเพิ่มเข้ามาในระบบ ติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายเข้าไปที่โหนด 18 และทำการหาขนาดที่เหมาะสมของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยใช้วิธีการหาที่เหมาะสม 2 วิธี เพื่อเปรียบเทียบค่าความแม่นยำและประสิทธิภาพการหาคำตอบ โดยใช้วิธีหาที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคและวิธีหาที่เหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม รูปที่ 3.27 แสดงขั้นตอนวิธีการหา

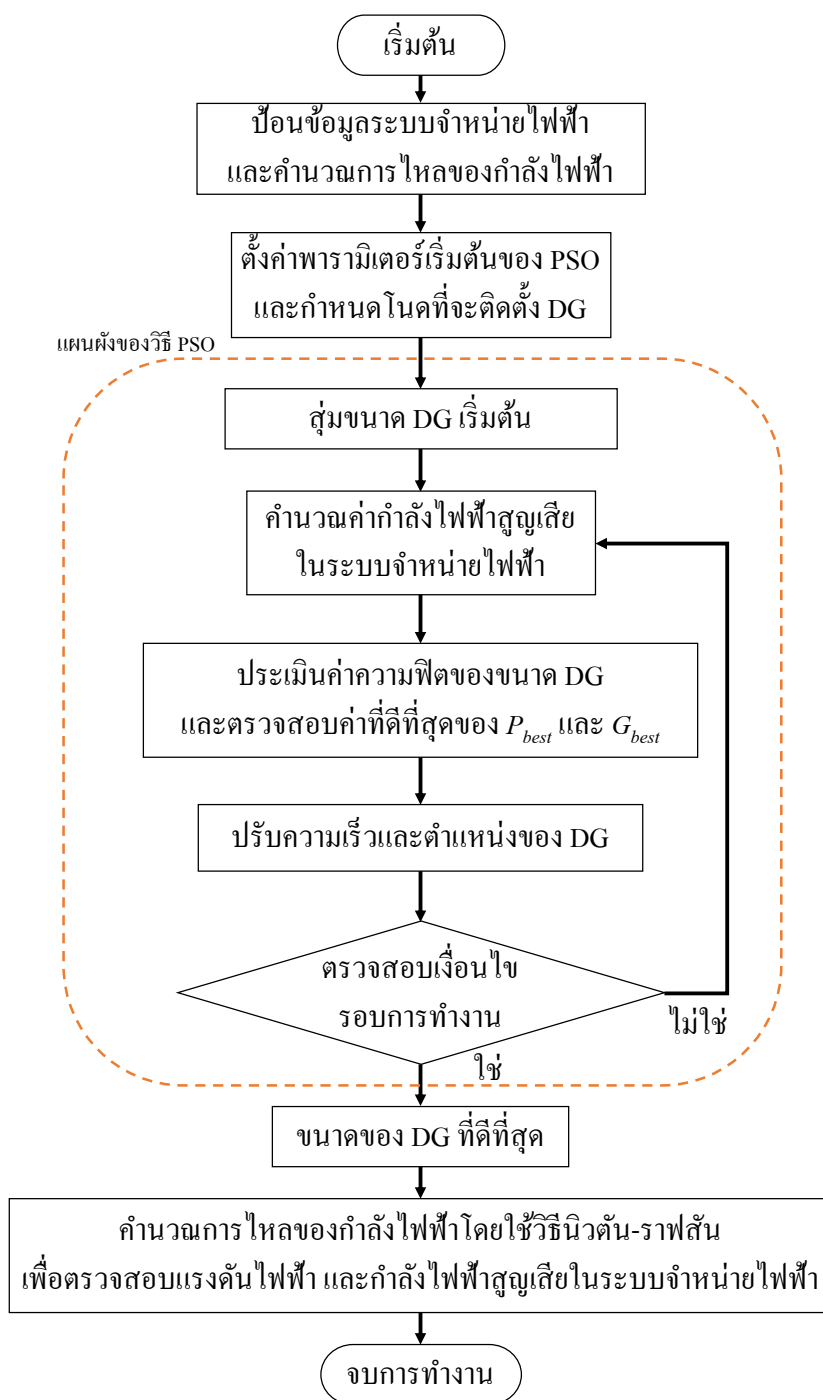
ขนาดที่เหมาะสมของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค และรูปที่ 3.28 แสดงขั้นตอนวิธีการหาขนาดที่เหมาะสมของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอานานิคมผึ้งเทียม ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า รวมถึงการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ดังนั้นฟังก์ชันวัตถุประสงค์สามารถแสดงได้โดยสมการที่ 3.2

$$\text{Minimize } (F) = \min (P_{\text{Loss}}) \quad (3.2)$$

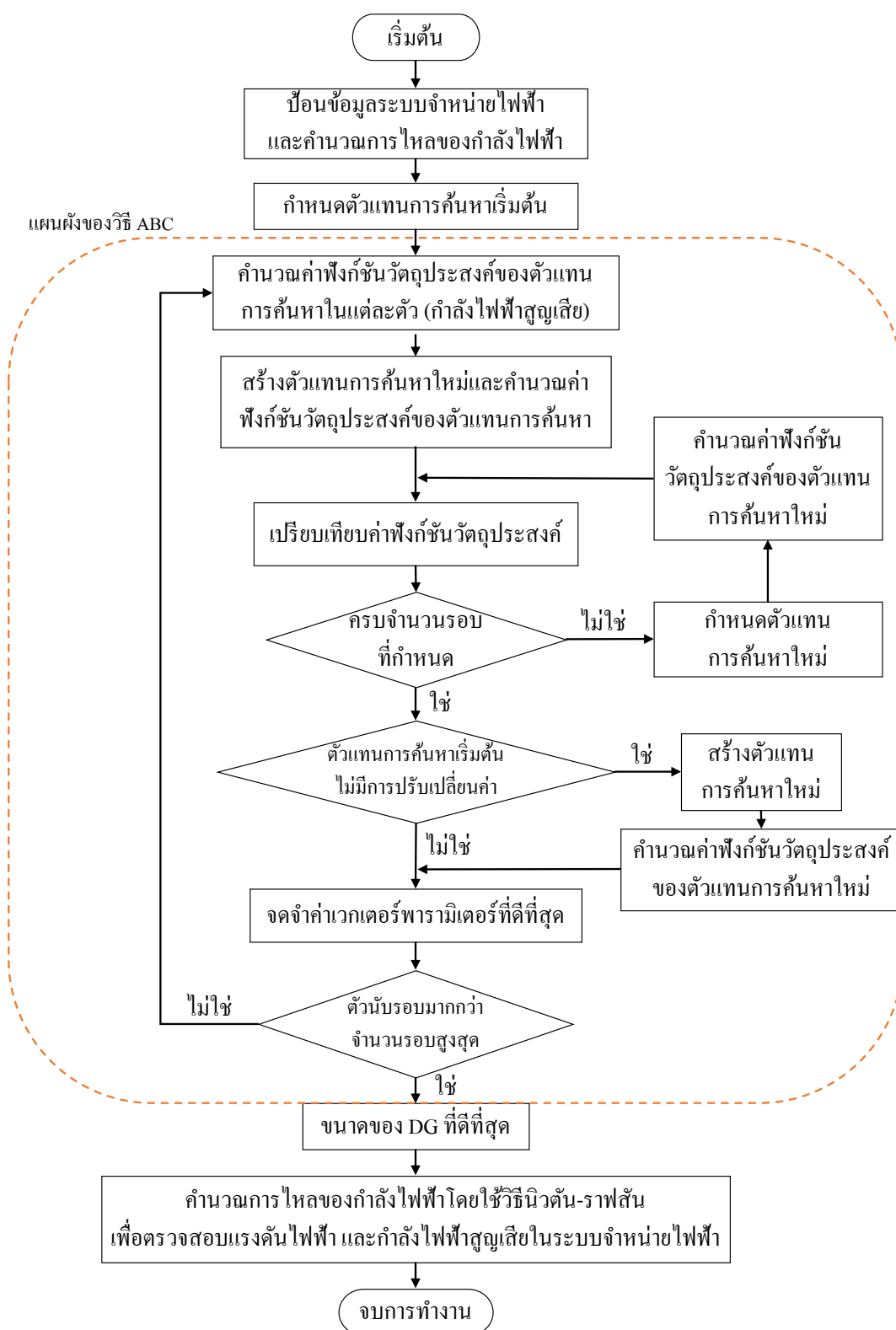
ในระบบจำหน่ายไฟฟ้านั้นมีค่ามาตรฐานของระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด คือ 0.95 p.u. และแรงดันไฟฟ้าสูงสุดคือ 1.05 p.u. ดังแสดงในสมการที่ 3.3

$$V_{\min} \leq V_p \leq V_{\max} \quad (3.3)$$

โดยที่	V_p	คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าที่โหนด p ในระบบจำหน่ายไฟฟ้า (p.u.)
	$V_{\min}$	คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดในระบบจำหน่ายไฟฟ้า (p.u.)
	$V_{\max}$	คือ ระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในระบบจำหน่ายไฟฟ้า (p.u.)



รูปที่ 3.27 ขั้นตอนวิธีการหาขนาดที่เหมาะสมของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย
ด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค



รูปที่ 3.28 ขั้นตอนวิธีการหาขนาดที่เหมาะสมของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย
ด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม

การตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมทั้งสองวิธี ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการจำลองซ้ำหลายครั้งเพื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับปัญหาหรือให้มีความแม่นยำในการหาผลเฉลยของปัญหา เพื่อให้ผลของการจำลองสามารถเปรียบเทียบกันได้ ผู้วิจัยจึงใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เท่ากัน ใช้จำนวนอนุภาคและจำนวนฟังก์ชัน 100 ตัว และจำนวนรอบสูงสุด 50 รอบ หลังจากได้ผลการจำลองแล้ว หากพบว่าวิธีไหนมีประสิทธิภาพการหาคำตอบได้ดีที่สุดหรือใช้เวลาน้อยที่สุดจะนำวิธีการหาคำตอบนั้นมาประยุกต์ใช้กับการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้าลบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้าของพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา ในหัวข้อถัดไป

3.5.2 การบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้าลบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา

การบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้าลบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้า พื้นที่จังหวัดนครราชสีมา เป็นการศึกษาการปรับปรุงระบบไฟฟ้า ด้วยการปรับระดับแรงดันไฟฟ้าและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ทำการหาค่าที่เหมาะสมของตำแหน่งและขนาด สำหรับติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายและการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า ด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมฟังก์ชันเทียม รูปที่ 3.29 แสดงขั้นตอนวิธีการหาตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายและชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมฟังก์ชันเทียม มีวงจรไฟฟ้าที่นำมาศึกษา 5 วงจร ดังแสดงในรูปที่ 3.16-3.26 โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการประจุไฟฟ้าของระบบบัสไฟฟ้า ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการประกอบด้วย ค่าใช้จ่ายรายปีจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ค่าใช้จ่ายรายปีจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการประจุไฟฟ้าระบบบัสไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า และค่าใช้จ่ายรายปีจากการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายและการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ค่าใช้จ่ายทั้งหมดสามารถแสดงได้โดยสมการที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ

$$Min_Cost_{total} = C_{Ploss} (E_{loss}^{system} + E_{loss}^{Ebus}) + C_{DG} Size_{DG} \quad (3.4)$$

$$Min_Cost_{total} = C_{Ploss} (E_{loss}^{system} + E_{loss}^{Ebus}) + C_{SC} Size_{SC} \quad (3.5)$$

โดยที่ $Cost_{total}$	คือ	ค่าใช้จ่ายรวมรายปี สำหรับการดำเนินการ (บาท/ปี)
$E_{loss,system}$	คือ	พลังงานไฟฟ้าสูญเสียของระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยไม่มีการประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้าในหนึ่งปี (MWh)
$E_{loss,Ebus}$	คือ	พลังงานไฟฟ้าสูญเสียของระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยมีการประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้าในหนึ่งปี (MWh)
C_{Ploss}	คือ	ราคาไฟฟ้า (บาท/MWh)
$Size_{DG}$	คือ	ขนาดของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย (MW)
$Size_{SC}$	คือ	ขนาดของชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Mvar)
C_{DG}	คือ	ค่าใช้จ่ายสำหรับติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย (บาท/MW)
C_{SC}	คือ	ค่าใช้จ่ายสำหรับติดตั้งชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า (บาท/Mvar)

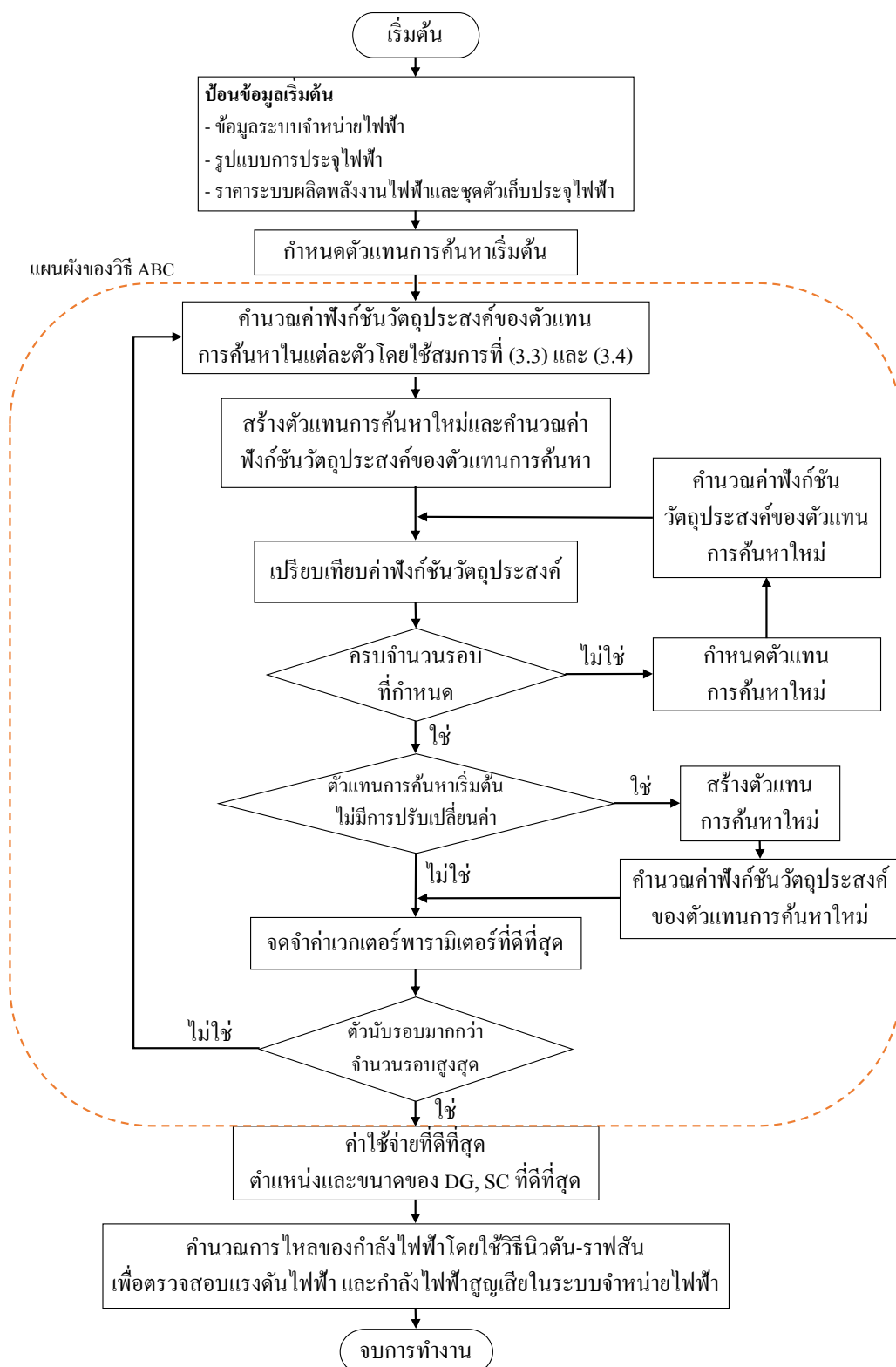
ค่าใช้จ่ายสำหรับค่าไฟฟ้าที่นำมาคิดค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้า กำหนดให้ใช้ค่าไฟฟ้า $C_{Ploss} = 3.20$ บาท/kWh หรือ $C_{Ploss} = 3,200$ บาท/MWh ซึ่งเป็นอัตราค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเฉลี่ยที่การไฟฟ้าใช้คำนวณค่าใช้จ่ายของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ สำหรับ Technical loss ระบบไฟฟ้าแรงดัน 22-33 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค²⁰ ซึ่งโดยทั่วไปจะมีการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบให้อยู่ในเกณฑ์ประมาณ 5-6% ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายที่ใช้ในการศึกษานี้ผู้วิจัยเลือกระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เนื่องจากการใช้งานจำนวนมากและทราบราคาของการติดตั้งระบบ ซึ่งมีอายุการใช้งานอยู่ที่ 25 ปี โดยมีราคาต้นทุนการติดตั้ง 47,600 บาท/kW ดังนั้น ค่าใช้จ่ายรายปีสำหรับการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้า (C_{DG}) คือ 1,904,000 บาท/MW ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายสำหรับระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน (รายงานฉบับสมบูรณ์ การติดตามสถานภาพการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย, 2561) กำหนดให้การผลิตพลังงานไฟฟ้าในหนึ่งวันของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์คือ 3.5703 MWh/MW (เอกพันธ์ ผดศรี, 2561) โดยมีราคารับซื้อไฟฟ้า 6.55 บาท/kWh สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนพื้นดิน ค่าใช้จ่ายสำหรับติดตั้งชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดที่ติดตั้ง ดังแสดงในตารางที่ 3.6

²⁰ ที่มา: อัตราค่าไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, <https://www.pea.co.th/>.

ตารางที่ 3.6 ค่าใช้จ่ายของชุดตัวเก็บประจุต่อปี (บาท/Mvar) (Baghzouz et al., 1990)

ขนาดชุดตัวเก็บประจุ (Mvar)	0.15	0.30	0.45	0.60	0.75	0.90	1.05
ค่าใช้จ่าย (บาท/Mvar)	16,420	11,494	8,309	7,225	9,064	6,010	7,488
ขนาดชุดตัวเก็บประจุ (Mvar)	1.20	1.35	1.50	1.65	1.80	1.95	2.10
ค่าใช้จ่าย (บาท/Mvar)	5,583	6,798	6,601	6,338	6,141	6,929	5,780
ขนาดชุดตัวเก็บประจุ (Mvar)	2.25	2.40	2.55	2.70	2.85	3.00	3.15
ค่าใช้จ่าย (บาท/Mvar)	6,469	5,583	6,207	6,141	6,010	5,911	6,404

การตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม ผู้วิจัยได้ทำการจำลองซ้ำหลายครั้งเพื่อปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับปัญหาหรือให้มีความแม่นยำในการหาผลเฉลยของปัญหา โดยใช้จำนวนของผึ้ง 10 ตัว และจำนวนรอบสูงสุด 50 รอบ ซึ่งผลการจำลองจะแสดงในบทที่ 4



รูปที่ 3.29 ขั้นตอนวิธีหาค่าตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย และหุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม

3.6 การวิเคราะห์ต้นทุนและผลกำไรสำหรับระบบรถบัสดีเซลไฟฟ้าสาธารณะ

การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายและต้นทุนสำหรับระบบรถบัสดีเซลไฟฟ้าสาธารณะจะทำการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างระบบรถบัสดีไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน รถบัสดีไฟฟ้าแบบแพนโทกราฟ และรถบัสดีไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ อีกทั้งยังทำการเปรียบเทียบกับระบบรถบัสดีเซล ค่าใช้จ่ายที่รวมอยู่ในการวิเคราะห์ คือ ต้นทุนการลงทุนของรถบัสดี ต้นทุนโครงสร้างพื้นฐานสถานีประจุไฟฟ้าและค่าบำรุงรักษา ต้นทุนแบตเตอรี่ ต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิง ดังนั้น สามารถคำนวณต้นทุนการลงทุนรวมได้โดยใช้สมการที่ 2.27 โดยสามารถอธิบายรายละเอียดของต้นทุนแต่ละส่วนได้ดังนี้

3.6.1 ต้นทุนรถบัสดีไฟฟ้า

การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายต้นทุนรถบัสดีประกอบไปด้วยค่าใช้จ่ายรถบัสดีและค่าบำรุงรักษา คุณสมบัติต่าง ๆ ของรถบัสดีไฟฟ้า ในการศึกษาที่ใช้รถบัสดีไฟฟ้าขนาด 12 m เป็นรถต้นแบบ พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับค่าใช้จ่ายของรถบัสดีไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 3.7 และตารางที่ 3.8 แสดงพารามิเตอร์ของรถบัสดีเซล ในการวิเคราะห์นี้จะใช้ข้อมูลรถบัสดีเซลมาวิเคราะห์ร่วมด้วย

ตารางที่ 3.7 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับรถบัสดีไฟฟ้า (Hoofitman et al., 2019)

ประเภทรถบัสดี	ชนิดแบตเตอรี่	ราคารถบัสดี (บาท)	ค่าบำรุงรักษา (บาท/km)
รถบัสดีไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน	ลิเทียมไอออนฟอสเฟต	12,706,639.41	9.93
รถบัสดีไฟฟ้าแบบแพนโทกราฟ	ลิเทียมไททาเนต	14,349,551.67	8.33
รถบัสดีไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่	ลิเทียมไอออนฟอสเฟต	14,349,551.67	8.33

ตารางที่ 3.8 พารามิเตอร์รถบัสดีเซล

พารามิเตอร์	รถบัสดีเซล
ราคารถบัสดี (บาท)	6,567,478.43
ความต้องการพลังงาน (ลิตร/km)	0.4
ค่าบำรุงรักษา (บาท/km)	15.05
อายุการใช้งาน (ปี)	12

โครงสร้างค่าบำรุงรักษาเฉลี่ยสำหรับรถโดยสารดีเซลประกอบด้วย ค่าวัสดุสิ้นเปลือง ค่าน้ำมันหล่อลื่น และค่าน้ำมันเกียร์ เบรก ล้อ และยาง ระบบปรับอากาศ และการทำความสะอาด ค่าใช้จ่ายสำหรับการเบรก การเสื่อมสภาพจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟของรถบัสไฟฟ้าจะมีค่าน้อยกว่ารถบัสดีเซล ค่าบำรุงรักษาปกติ รถบัสไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนน้ำมันเครื่อง ไส้กรองน้ำมัน ไส้กรองดีเซล ซิลน้ำมันโรเตอร์ ไส้กรองอากาศหรือน้ำมันเกียร์ ค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ของรถบัสไฟฟ้าจึงมีค่าน้อยกว่ารถบัสดีเซล รวมถึงรถบัสดีเซลนั้นมีอายุการใช้งานเพียง 12 ปี น้อยกว่ารถบัสไฟฟ้าที่มีอายุการใช้งานประมาณ 24 ปี การซ่อมแซมข้อผิดพลาด ตัวอย่างเช่น มอเตอร์ไฟฟ้ามีชิ้นส่วนที่สึกหรอน้อยกว่ารถบัสดีเซลและความผิดพลาดที่แพงที่สุดสำหรับรถบัสดีเซลอยู่ที่เครื่องยนต์ อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีสำหรับรถบัสไฟฟ้าเป็นความผิดพลาดชนิดใหม่และอาจเกิดขึ้นได้ ควรพิจารณาการศึกษากรณีสำหรับความผิดพลาดใหม่ของรถบัสไฟฟ้า ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ เช่น การสึกหรอของยาง การทำความสะอาด ควรเหมือนกันโดยไม่คำนึงถึงประเภทรถบัส

3.6.2 ต้นทุนโครงสร้างพื้นฐานสถานีประจุไฟฟ้า

ต้นทุนการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานจะถูกนำมาคำนวณเฉพาะต้นทุนโครงสร้างพื้นฐานการประจุไฟฟ้าและการบำรุงรักษาของรถบัสไฟฟ้า ต้นทุนโครงสร้างพื้นฐานของสถานีรถบัสไฟฟ้าจะถูกคิดเฉพาะในปีแรก และค่าบำรุงรักษาโครงสร้างพื้นฐานจะถูกนำมาคำนวณทุกปี ตารางที่ 3.9 แสดงต้นทุนโครงสร้างพื้นฐานสถานีประจุไฟฟ้าสำหรับรถบัสไฟฟ้า

ตารางที่ 3.9 ต้นทุนโครงสร้างพื้นฐานสถานีประจุไฟฟ้ารายปี

ประเภทสถานีประจุไฟฟ้า	จำนวนสถานี	จำนวนหัวชาร์จต่อสถานี	ค่าใช้จ่าย/สถานี (บาท)
รถบัสดีเซล	2	-	192,120.00
รถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน	2	5	888,815.00
รถบัสไฟฟ้าแบบแพนโทกราฟ	2	1	12,443,412.28
รถบัสไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่	1	3	12,443,412.28
ค่าบำรุงรักษา			
สถานีรถบัสดีเซล			53,324.83
สถานีประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน			40,875.45
สถานีประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าแบบแพนโทกราฟ			20,4376.94
สถานีประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่			20,4376.94

3.6.3 ต้นทุนแบตเตอรี่

แบตเตอรี่เป็นส่วนสำคัญในการคำนวณ ในการวิเคราะห์จะใช้แบตเตอรี่สองประเภท ได้แก่ ลิเทียมไอออนฟอสเฟต และลิเทียมไททาเนต ก่อนการคำนวณทางการเงินจะต้องกำหนดขนาดของแบตเตอรี่ด้วยพารามิเตอร์ประสิทธิภาพการใช้งานและอายุการใช้งาน (Cycle life)

กำหนดให้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต มีอายุการใช้งานสูงสุด 3000 รอบ และแบตเตอรี่ลิเทียมไททาเนต มีอายุการใช้งานอยู่ที่ 12,000 รอบ ต้นทุนของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต ประมาณ 28,818 บาท/kWh และแบตเตอรี่ลิเทียมไททาเนต มีต้นทุนประมาณ 64,040 บาท/kWh การประมาณราคาและคุณสมบัติของชุดแบตเตอรี่สำหรับรถ巴士ไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 3.10 สำหรับแบตเตอรี่ของรถ巴士ดีเซลจะใช้เป็นแบตเตอรี่ตะกั่วกรด ราคาโดยประมาณ 6,500 บาท/ลูก และจะถูกสับเปลี่ยนทุก ๆ 2 ปี

ตารางที่ 3.10 พารามิเตอร์และค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับแบตเตอรี่

ชนิดแบตเตอรี่	ลิเทียมไอออนฟอสเฟต	ลิเทียมไททาเนต
ค่าใช้จ่ายเริ่มต้นแบตเตอรี่ (บาท/kWh)	28,818	64,040
อัตราการชาร์จ (C-rate)	1C	5C - 10C
รอบการใช้งาน (100% DOD)	3000	12000
ความหนาแน่นพลังงาน (Wh/kg)	130	65

ต้นทุนการสึกหรอของแบตเตอรี่สามารถคำนวณได้ต่อกิโลเมตร ดังนั้น เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปวิเคราะห์ต้นทุนจึงสามารถคำนวณราคาของแบตเตอรี่ต่อกิโลเมตรด้วยสมการที่ 2.28 ในสมการจะไม่รวมการใช้เบรกแบบรีเจนเนอเรทิฟเข้ามาในการคำนวณ แบตเตอรี่จะหมดอายุการใช้งานเมื่อมีรอบอายุการใช้งานประมาณ 80-90% ดังนั้น จึงกำหนดให้แบตเตอรี่มีรอบอายุการใช้งานแบตเตอรี่ 90%

ต้นทุนการเปลี่ยนแบตเตอรี่ของรถ巴士สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.29 โดยที่ประสิทธิภาพการทำงานของแบตเตอรี่ (η_{bat}) คือ 90% และ N_{ch} คือ จำนวนการประจุไฟฟ้าต่อวัน ดังนั้น จะได้ระยะเวลาการเปลี่ยนแบตเตอรี่สำหรับรถ巴士ไฟฟ้าดังแสดงในตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 ระยะเวลาการเปลี่ยนแบตเตอรี่สำหรับรถบัส

ประเภทรถบัส	ชนิดแบตเตอรี่	จำนวนการประจุไฟฟ้า	การเปลี่ยนแบตเตอรี่
รถบัสดีเซล	ตะกั่ว-กรด	-	ทุก ๆ 2 ปี
รถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน	ลิเทียมไอออนฟอสเฟต	1 ครั้ง/วัน	ทุก ๆ 8 ปี
รถบัสไฟฟ้าแบบแพนโทกราฟ	ลิเทียมไททาเนต	8 ครั้ง/วัน	ทุก ๆ 4 ปี
รถบัสไฟฟ้าแบบสลับเปลี่ยนแบตเตอรี่	ลิเทียมไอออนฟอสเฟต	2 ครั้ง/วัน	ทุก ๆ 4 ปี

3.6.4 ต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบรถบัสที่มีความยาว 12 m โดยมีปริมาณการใช้เชื้อเพลิงเฉลี่ยของรถบัสดีเซล 0.4 ลิตร/km และไม่มีการคาดการณ์ราคาน้ำมันเชื้อเพลิงที่จะสูงขึ้นในอนาคต สำหรับอายุการใช้งานของรถบัสไฟฟ้า โดยกำหนดให้มีอายุการใช้งาน 24 ปี และการวิเคราะห์นี้ใช้ราคาน้ำมันดีเซล 27.49 บาท/ลิตร ราคาวันที่ 24 ธันวาคม 2562) (ราคาน้ำมันเชื้อเพลิง ขาปลีก กทม. และปริมณฑล ที่มา: <https://www.pttor.com/oilprice-capital.aspx>) และถูกนำไปใช้ตลอดระยะเวลาการให้บริการทั้งหมด

อัตราค่าไฟฟ้าที่นำมาพิจารณาเป็นอัตราค่าไฟฟ้าแบบ TOU ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 22-33 kV จะถูกนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์การใช้พลังงานของรถบัสไฟฟ้า โดยจะแบ่งช่วงเวลาการประจุไฟฟ้าออกตามรูปแบบของรถบัสไฟฟ้าและการให้บริการ (อัตราค่าไฟฟ้า การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่มา: <https://www.pea.co.th/>) ตารางที่ 3.12 แสดงต้นทุนพลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิง

ตารางที่ 3.12 ต้นทุนพลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิง

ต้นทุนพลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิง		ราคา
ค่าพลังงานไฟฟ้า	On Peak (9.00 – 22.00 น.)	4.1839 บาท/kWh
	Off Peak (22.00 – 9.00 น.)	2.6037 บาท/kWh
ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง (วันที่ 24 ธันวาคม 2562)		27.49 บาท/ลิตร

3.6.5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุน

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนตลอดอายุการใช้งานของโครงการ ทำการวิเคราะห์โดยใช้ตัวชี้วัดที่สะท้อนถึงมูลค่าปัจจุบันสุทธิสำหรับต้นทุนรายปีที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ซึ่งกำหนดให้อัตราค่าเสียโอกาส หรือ อัตราคิดลดมีค่า 12% จากนั้นคำนวณผลประโยชน์จาก

โครงการรายปี ซึ่งสามารถหาได้จากค่าโดยสารของผู้ใช้บริการและการขายซากของรถบัสเมื่อครบอายุการใช้งาน โดยกำหนดให้ผู้โดยสารสูงสุดต่อคัน คือ 40 คน ตามคุณสมบัติของรถบัสไฟฟ้า และนำมาคิดเพียง 50% ของผู้โดยสารสูงสุด โดยให้อัตราค่าโดยสารแบบเหมาจ่าย 15 บาทต่อเที่ยว รายได้จากการขายซากรถ จะคิดเป็น 3% ของต้นทุนการซื้อจริงรถบัส โดยรถบัสดีเซลจะถูกนำมาคำนวณในปีที่ 13 และรถบัสไฟฟ้าจะถูกนำมาคิดในปีสุดท้าย สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.66 นำมาคำนวณเฉพาะในปีที่มีการขายรถบัสที่หมดอายุการใช้งาน จากนั้น หาอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย หรือ B/C Ratio ตามสมการที่ 2.67 และหามูลค่าปัจจุบันสุทธิ ดังแสดงในสมการที่ 2.65 ตารางที่ 3.13 แสดงพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ความคุ้มค่าการลงทุน

ตารางที่ 3.13 พารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ความคุ้มค่าการลงทุน

จำนวนรถบัส	การให้บริการ	จำนวนผู้โดยสาร	ค่าโดยสาร	รายได้รวมต่อปี
10 คัน/เส้นทาง	8 เที่ยว/วัน	584,000 คน/ปี	15 บาท	87,600,000 บาท

3.7 สรุป

การศึกษากลยุทธ์ที่เหมาะสมสำหรับการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าสาธารณะ กรณีศึกษาอำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา จำเป็นต้องมีการศึกษาการใช้พลังงานบนเส้นทางกรณีศึกษา ซึ่งอธิบายถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการคำนวณ กำหนดให้มีเส้นทางกรณีศึกษา 3 เส้นทาง กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้มี 3 รูปแบบ คือ การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไปที่ต้นทางและปลายทางสำหรับรถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน การประจุไฟฟ้าเร็วสำหรับรถบัสไฟฟ้าแบบแพนโทกราฟ และการประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่สำหรับรถบัสไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ จากนั้นทำการศึกษาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า ใช้ลักษณะการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าของกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าทั้ง 3 รูปแบบ โดยประยุกต์ใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โนด และระบบไฟฟ้าในเขตให้บริการของพื้นที่กรณีศึกษาเพื่อศึกษาผลกระทบจากการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้า จากนั้นศึกษาการบรรเทาผลกระทบจากการประจุประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้าด้วยการยกระดับแรงดันไฟฟ้าและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยการหาค่าที่เหมาะสมของขนาดและตำแหน่งของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายและชุดตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้า และทำการวิเคราะห์ต้นทุนและผลกำไรสำหรับการใช้งานระบบรถบัสไฟฟ้าสาธารณะเพื่อหากลยุทธ์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานรถบัสไฟฟ้าในพื้นที่กรณีศึกษา ผลการวิจัยหรือผลการจำลองได้แสดงไว้ในบทถัดไป

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 กล่าวนำ

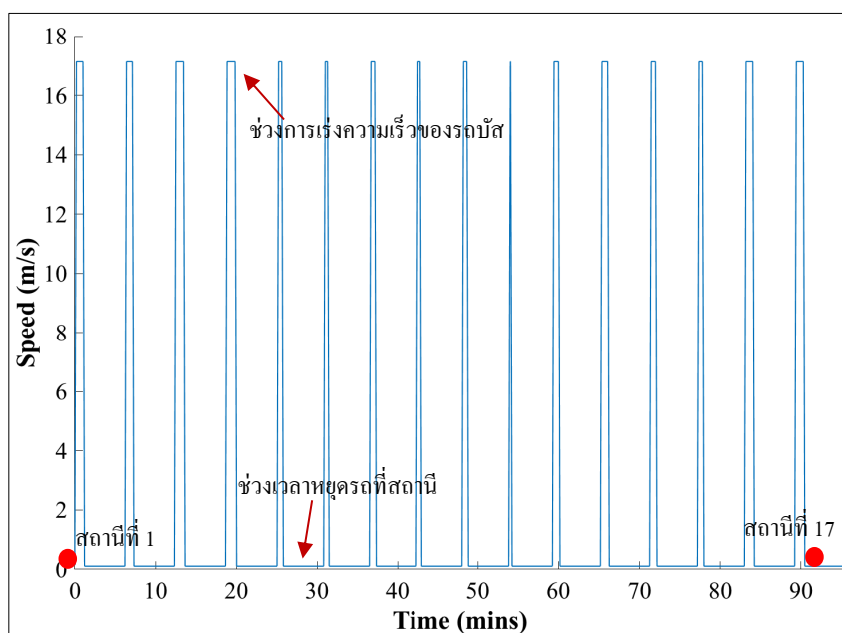
การศึกษาวิจัยเรื่องกลยุทธ์ที่เหมาะสมสำหรับการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าได้ศึกษาออกแบบพารามิเตอร์สำหรับการจำลองการใช้พลังงาน การออกแบบกลยุทธ์สำหรับระบบประจุไฟฟ้าสำหรับระบบรถบัสไฟฟ้า ศึกษาผลกระทบและการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้า เพื่อนำมาวิเคราะห์กลยุทธ์ที่เหมาะสมสำหรับระบบรถบัสไฟฟ้า โดยใช้กรณีศึกษาจังหวัดนครราชสีมา ดังนั้น ในบทนี้จึงแสดงผลการวิจัยที่ได้จากวิธีดำเนินการในบทที่ 3 ดังต่อไปนี้

4.2 ผลการจำลองความต้องการพลังงานไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าสาธารณะ

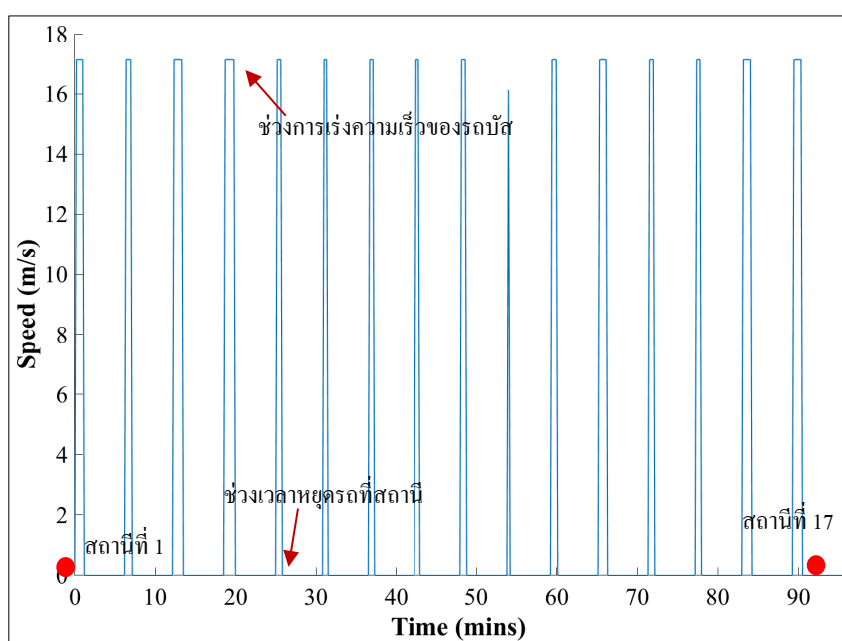
ผลการจำลองความต้องการพลังงานไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าสาธารณะทำการจำลองการใช้พลังงานของรถบัสไฟฟ้าโดยใช้เส้นทางกรณีศึกษา 3 เส้นทาง คือ เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว และเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม ซึ่งมีผลการจำลองดังนี้

4.2.1 ผลการจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้า สำหรับรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง

ในหัวข้อนี้ดำเนินการจำลองเพื่อแสดงให้เห็นถึงการใช้พลังงานสำหรับการเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์การใช้พลังงานคุณลักษณะทั่วไปของรถบัสไฟฟ้า Proterra Catalyst XR และแบบจำลองเส้นทางรถบัสไฟฟ้าของจังหวัดนครราชสีมา ถูกนำมาใช้เป็นกรณีศึกษา เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วงมีการบริการทั้งหมด 17 สถานี ระยะทางรวม 12.7 km ผลการจำลองพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการให้บริการหนึ่งรอบซึ่งจะได้เส้นโค้งความเร็วที่เร็วไปและที่ช้ากลับ แสดงดังรูปที่ 4.1 เส้นโค้งความเร็วถูกจำลองขึ้นมาโดยกำหนดให้รถบัสไฟฟ้าวิ่งด้วยความเร็วสูงสุด โดยมีข้อกำหนด คือ แรงบิดที่ใช้ในช่วงการเร่งความเร็วจะต้องไม่เกินค่าความเร็วสูงสุด ความเร็วสูงสุดที่ใช้งาน คือ 17.14 m/s (61.70 km/hr.) และมีการหยุดรถทุกสถานีเป็นเวลา 5 นาที เส้นโค้งความเร็วมีโหมดการทำงาน 3 โหมด ได้แก่ โหมดเร่งความเร็ว โหมดความเร็วคงที่ และโหมดเบรก กำลังไฟฟ้าสำหรับการเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้าที่เร็วไปและที่ช้ากลับ แสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุดในการเคลื่อนที่ 232.73 kW ในโหมดเร่งความเร็วรถบัสไฟฟ้าจะใช้พลังงานสูงสุด หลังจากนั้นในโหมดความเร็วคงที่จะใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยลงเพื่อรักษาระดับความเร็วของรถบัส โหมดเบรกถูกใช้งานก่อนที่จะเข้าสู่สถานี

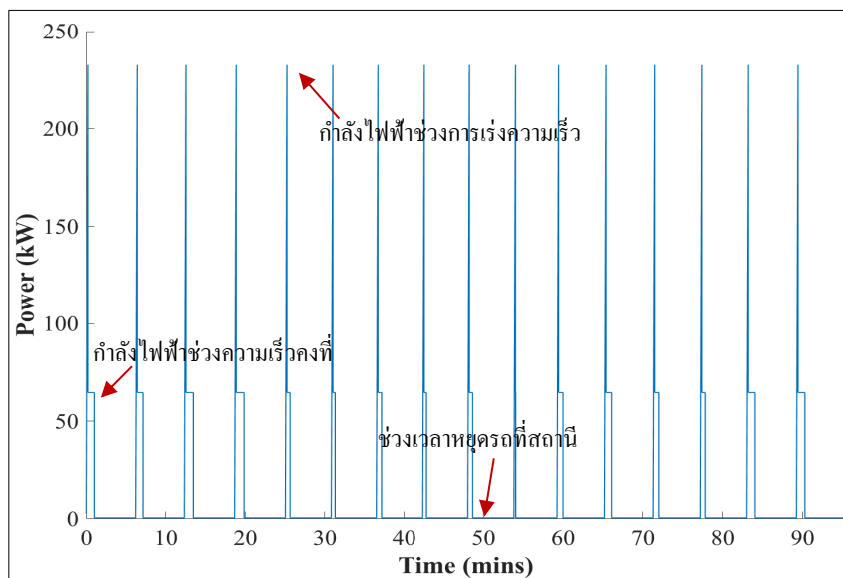


ก) เส้นโค้งความเร็ว เทียบไป

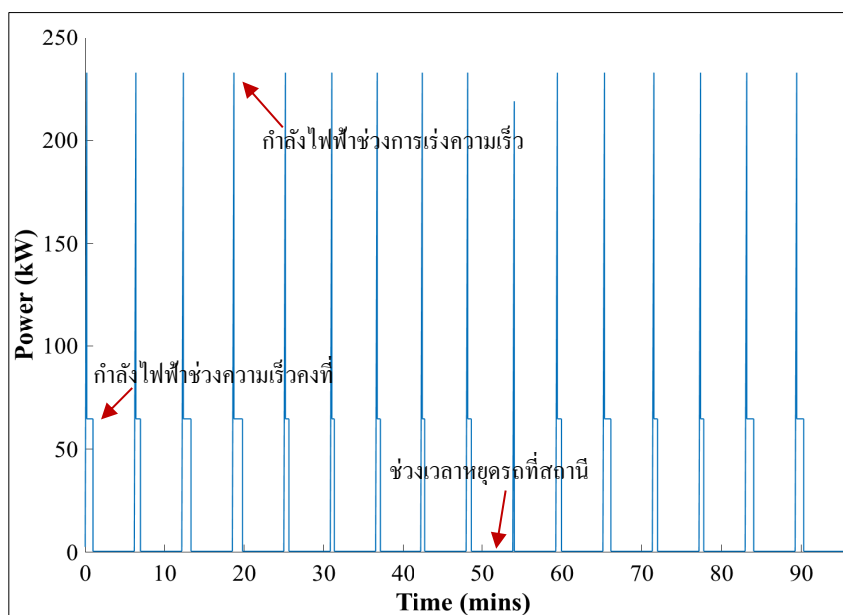


ข) เส้นโค้งความเร็ว เทียบกลับ

รูปที่ 4.1 เส้นโค้งความเร็วสำหรับการให้บริการ 17 สถานี เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง



ก) กำลังไฟฟ้า เทียบไป



ข) กำลังไฟฟ้า เทียบกลับ

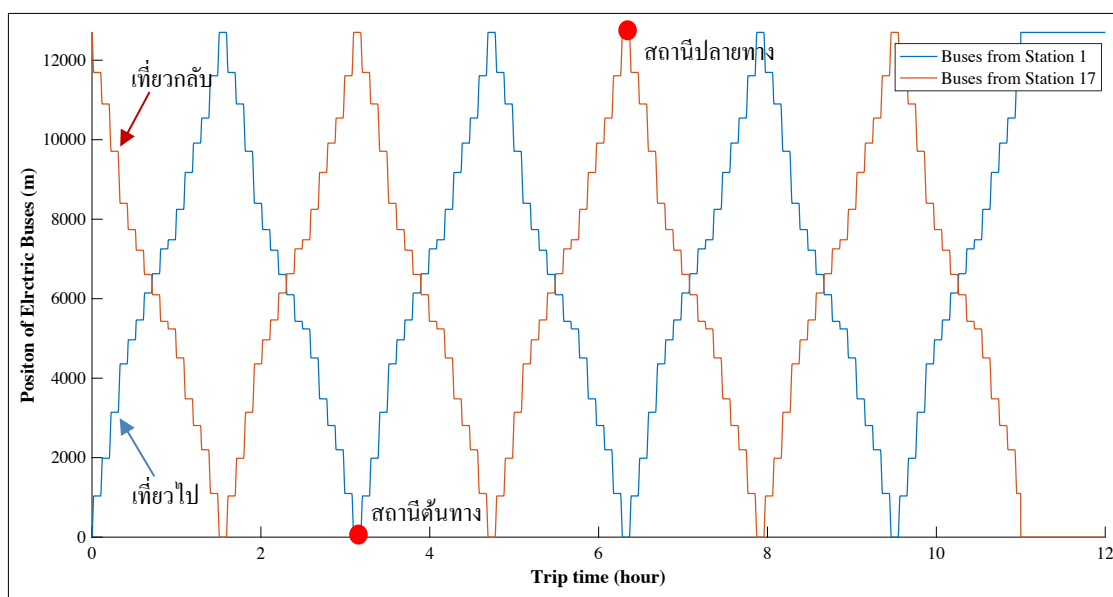
รูปที่ 4.2 กำลังไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้า เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง

ตารางที่ 4.1 ความต้องการพลังงานสำหรับการเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง

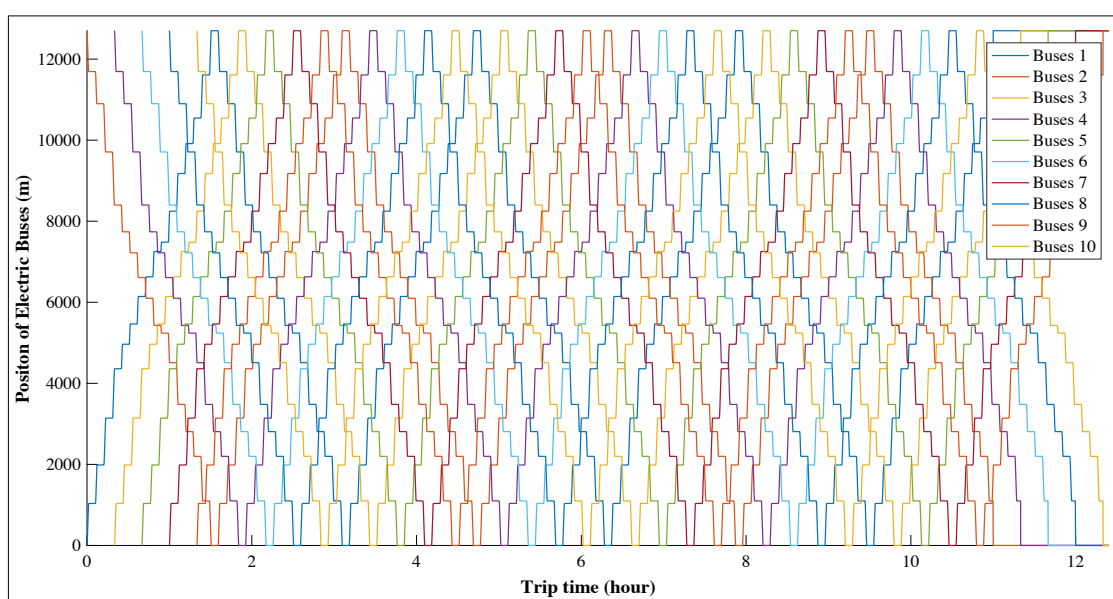
พารามิเตอร์	เที่ยวไป	เที่ยวกลับ
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)	16.8144	16.7829
พลังงานไฟฟ้าที่ได้กลับคืนจากการเบรก (kWh)	1.9634	1.9352
ระยะทางที่ให้บริการ (km)	12.70	12.70
อัตราการบริโภคพลังงาน (kWh/km)	1.1694	1.1691
อัตราการบริโภคพลังงานเฉลี่ย (kWh/km)	1.1692	
เวลาให้บริการ (ชั่วโมง)	1:35	1:35

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการจำลองความต้องการพลังงานไฟฟ้าในการเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้า พลังงานที่ใช้สำหรับให้บริการเที่ยวไปและเที่ยวกลับ คือ 16.81 kWh และ 16.78 kWh ตามลำดับ พลังงานไฟฟ้าที่ได้กลับคืนมาจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ สำหรับให้บริการเที่ยวไปและเที่ยวกลับ คือ 1.96 kWh และ 1.93 kWh ตามลำดับ การให้บริการระยะทางไปและกลับรวม 25.4 km ซึ่งมีอัตราการบริโภคพลังงานเฉลี่ย 1.1692 kWh/km

เพื่อให้ทราบถึงตำแหน่งและการใช้พลังงานของรถบัสไฟฟ้าในการให้บริการหนึ่งวัน ดังนั้น จึงต้องจำลองตารางเดินรถสำหรับรถบัสไฟฟ้า ซึ่งเป็นการสร้างระบบตารางการเดินรถบัสไฟฟ้าที่สามารถบอกได้ว่ารถบัสให้บริการอยู่ที่จุดไหนในเวลานั้น ดังนั้น จึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลของเส้นโค้งความเร็ว ตำแหน่ง และกำลังไฟฟ้า จากการจำลองแบบรถคันเดียวมาพิจารณาร่วมกับระยะห่างของการปล่อยรถและการรับ-ส่งผู้โดยสาร ดังนั้น จะได้ตารางเดินรถสำหรับระบบรถบัสไฟฟ้าหลายคัน ซึ่งแสดงถึงเวลาและตำแหน่งรถบัสไฟฟ้าทุกคันที่ให้บริการในหนึ่งวัน ตั้งแต่เวลา 06:00 -18:00 น. รูปที่ 4.3 แสดงตารางเดินรถของรถบัสไฟฟ้าเที่ยวไปและเที่ยวกลับ สำหรับให้บริการต่อวันตามเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง การให้บริการรถบัสไฟฟ้ากำหนดให้มีรถบัสไฟฟ้าจำนวน 10 คัน เริ่มออกให้บริการจากสถานีต้นทาง 5 คัน และจากสถานีปลายทาง 5 คัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยมีระยะเวลาจอดรับส่งผู้โดยสารประมาณ 5 นาที ระยะเวลาจอดรถเข้าสถานีทุก ๆ 15 นาที และรถบัสให้บริการ 4 รอบ/วัน มีการใช้พลังงานไฟฟ้า 118.795 kWh/คัน/วัน ดังนั้น ในหนึ่งวันมีรถบัสให้บริการ 10 คันต่อวันต่อเส้นทาง วิ่ง 4 รอบ/คัน/วัน หรือ 8 เที่ยว/คัน/วัน



รูปที่ 4.3 ตารางเดินรถไฟฟ้า สำหรับการให้บริการต่อวัน เส้นทางรถไฟฟ้าสายสีม่วง

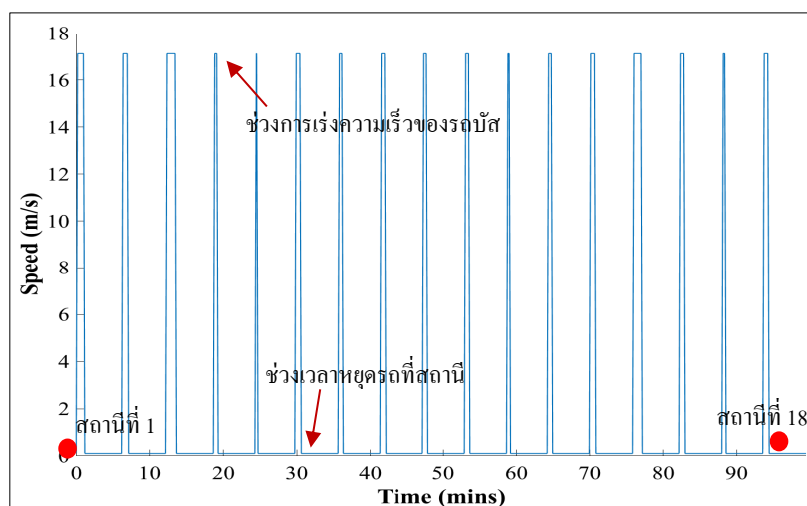


รูปที่ 4.4 ตารางเดินรถสำหรับการให้บริการของระบบรถไฟฟ้าสายสีม่วง

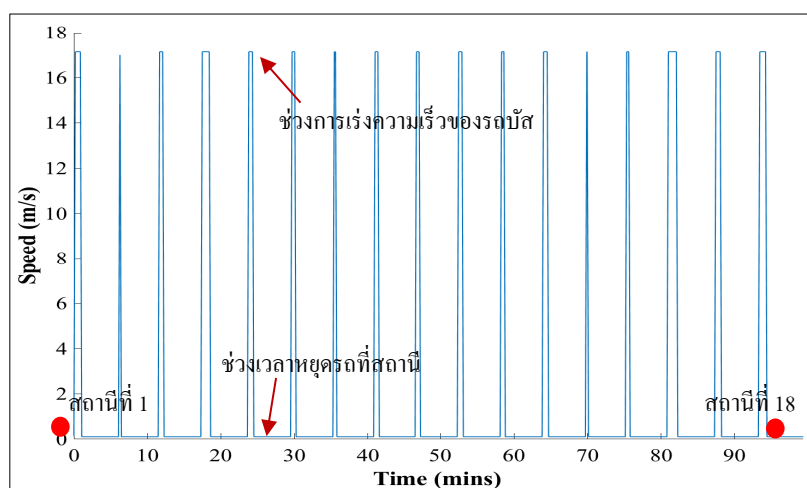
4.2.2 ผลการจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้า สำหรับรถไฟฟ้าสายสีเขียว

รถไฟฟ้าสายสีเขียวมีระยะทางเที่ยวไป 11.4 km จำนวนสถานี 18 สถานี ดังนั้นจะได้เส้นโค้งความเร็วที่เที่ยวไปและเที่ยวกลับ แสดงดังในรูปที่ 4.5 เส้นโค้งความเร็วขอร์ดถูกจำลองขึ้นมา

โดยกำหนดให้รถบัสไฟฟ้าวิ่งด้วยความเร็วสูงสุด โดยมีแรงบิดที่ใช้ในช่วงการเร่งความเร็วจะต้องไม่เกินค่าความเร็วสูงสุด ความเร็วสูงสุดที่ใช้งาน คือ 17.1360 m/s (61.69 km/hr.) การเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้ามีการใช้กำลังไฟฟ้าในการเร่งความเร็วสูงสุด 232.7 kW ดังแสดงในรูปที่ 4.6 การเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟถูกนำมาใช้สำหรับการฟื้นฟูพลังงานที่มาจากการเบรกของรถบัสไฟฟ้า

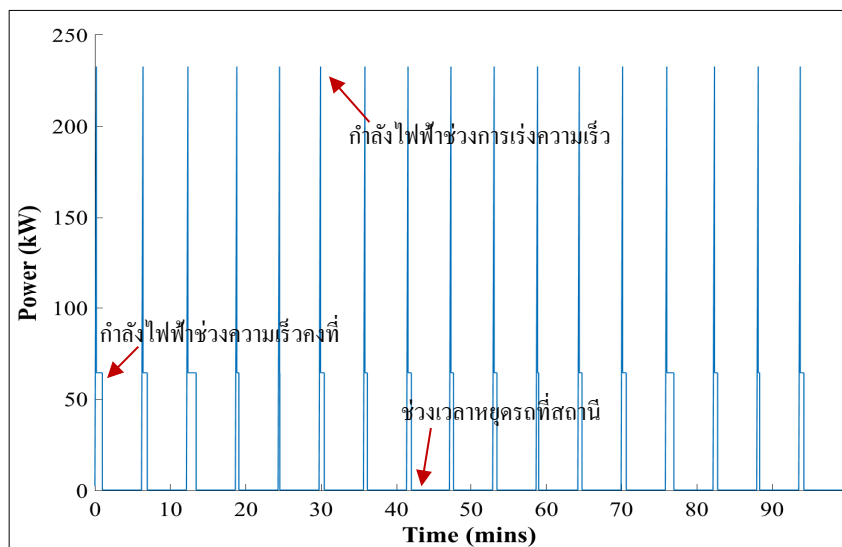


ก) เส้นโค้งความเร็ว เทียบไป

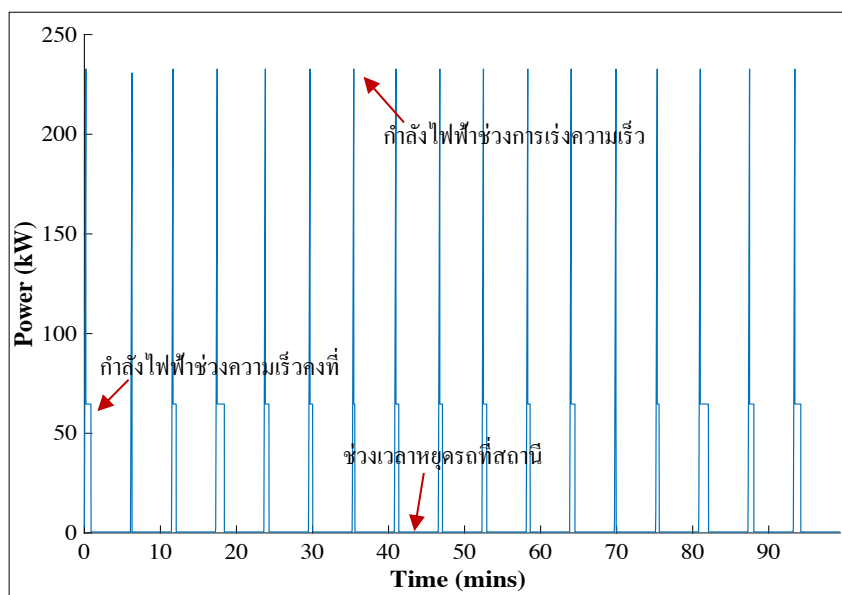


ข) เส้นโค้งความเร็ว เทียบกลับ

รูปที่ 4.5 เส้นโค้งความเร็วสำหรับการให้บริการ 18 สถานี เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว



ก) กำลังไฟฟ้า เทียบไป



ข) กำลังไฟฟ้า เทียบกลับ

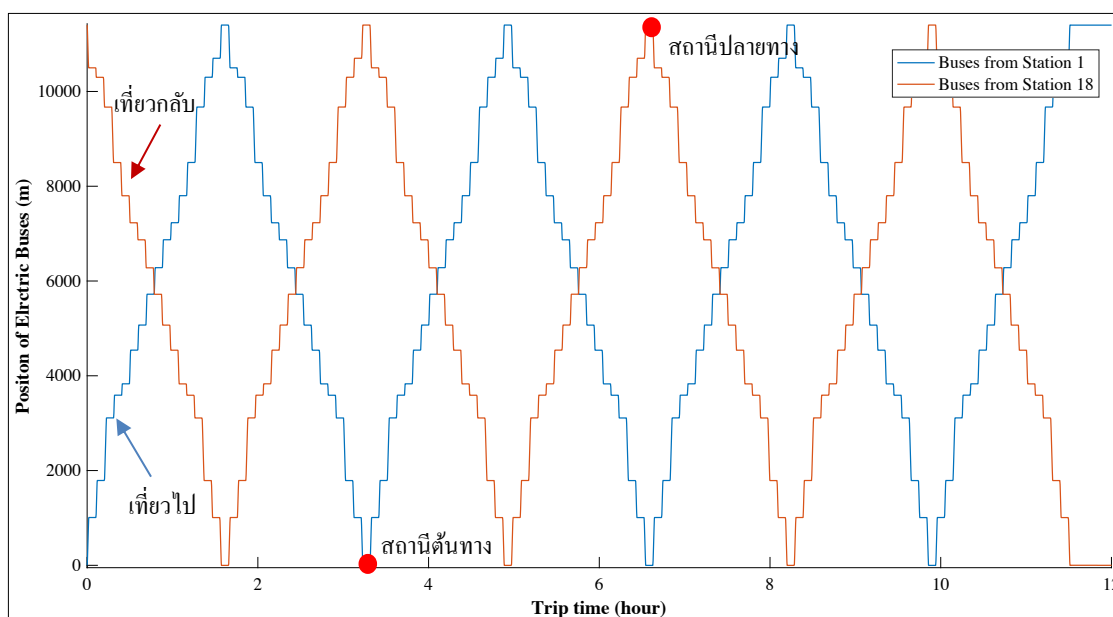
รูปที่ 4.6 กำลังไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้า เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว

ตารางที่ 4.2 ความต้องการพลังงานสำหรับการเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว

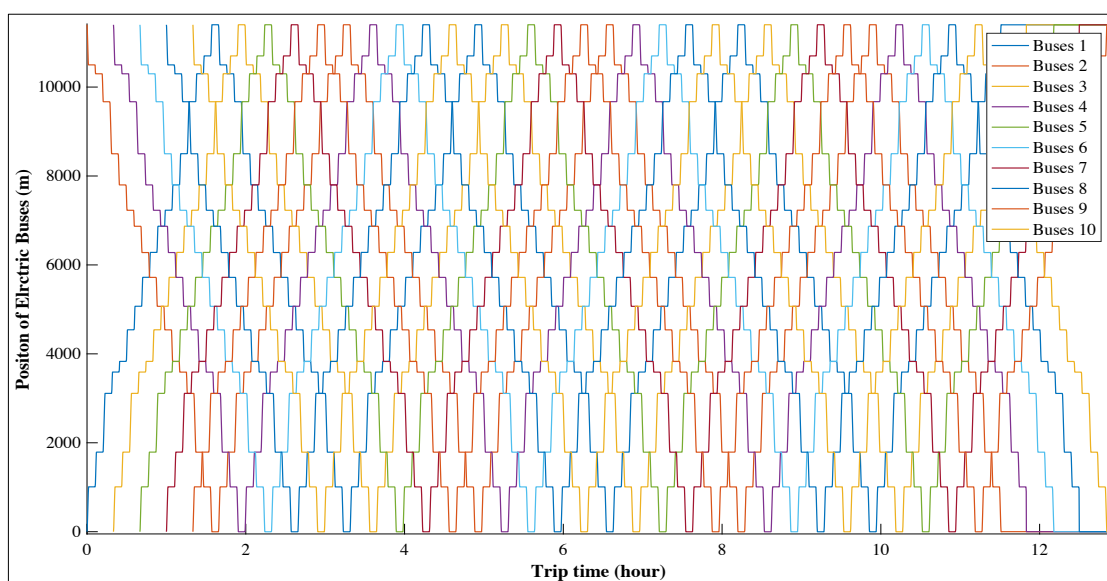
พารามิเตอร์	เที่ยวไป	เที่ยวกลับ
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)	15.6722	15.8713
พลังงานไฟฟ้าที่ได้กลับคืนจากการเบรก (kWh)	2.0861	2.0778
ระยะทางที่ให้บริการ (km)	11.40	11.40
อัตราการบริโภคพลังงาน (kWh/km)	1.1918	1.2099
อัตราการบริโภคพลังงานเฉลี่ย (kWh/km)	1.2008	
เวลาให้บริการ (ชั่วโมง)	1:39	1:39

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการจำลองความต้องการพลังงานไฟฟ้าในการเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว พลังงานที่ใช้สำหรับให้บริการเที่ยวไปและกลับ คือ 15.67 kWh และ 15.87 kWh ตามลำดับ พลังงานไฟฟ้าที่ได้กลับคืนมาจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ สำหรับให้บริการในเที่ยวไปและเที่ยวกลับ คือ 2.0861 kWh และ 2.0778 kWh ตามลำดับ ที่การให้บริการระยะทางรวม 22.8 km ซึ่งมีอัตราการบริโภคพลังงานเฉลี่ย 1.2008 kWh/km

เพื่อให้ทราบถึงตำแหน่งและการใช้พลังงานของรถบัสไฟฟ้าในการให้บริการหนึ่งวัน ดังนั้น จึงต้องจำลองตารางเดินรถ ซึ่งเป็นการสร้างระบบตารางเดินรถบัสไฟฟ้าที่สามารถบอกได้ว่ารถบัสให้บริการอยู่ที่จุดไหนในเวลานั้น ดังนั้น ได้ตารางเดินรถสำหรับระบบรถบัสไฟฟ้าหลายคัน แสดงถึงเวลาและตำแหน่งของรถบัสไฟฟ้าทุกคันที่ให้บริการในหนึ่งวัน ตั้งแต่เวลา 06.00-18.00 น. รูปที่ 4.7 แสดงตารางเดินรถบัสไฟฟ้าเที่ยวไปและเที่ยวกลับ สำหรับให้บริการต่อวันตามเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม การให้บริการรถบัสไฟฟ้ากำหนดให้มีรถบัสไฟฟ้าให้บริการจำนวน 10 คัน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 มีระยะเวลาจอดรับส่งผู้โดยสาร 5 นาที ระยะเวลาจอดเข้าสถานีทุก ๆ 15 นาที และให้บริการ 4 รอบต่อวัน ซึ่งมีการใช้พลังงานไฟฟ้า 108.68 kWh/คัน/วัน



รูปที่ 4.7 ตารางเดินรถบัสไฟฟ้า สำหรับการให้บริการต่อวัน เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว

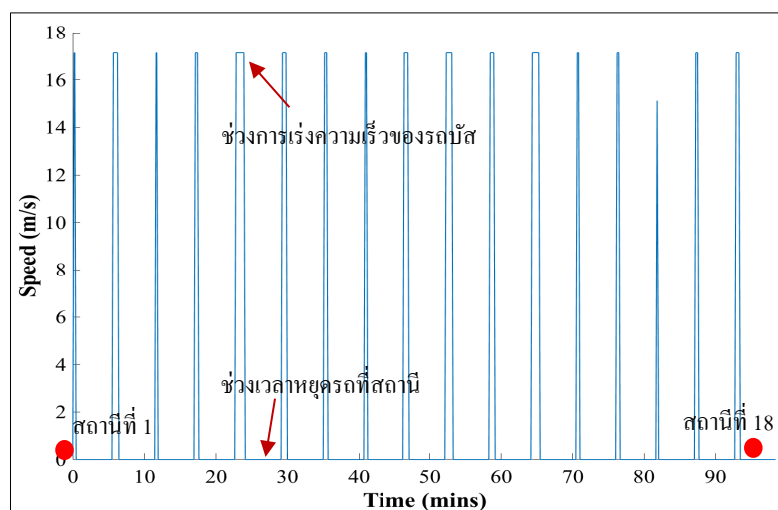


รูปที่ 4.8 ตารางเดินรถสำหรับการให้บริการของระบบรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว

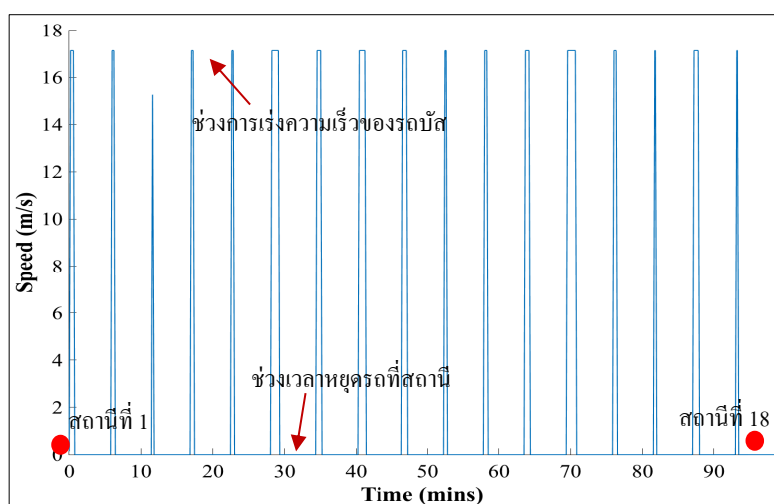
4.2.3 ผลการจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้า สำหรับรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม

รถบัสไฟฟ้าสายสีส้มมีระยะทางเที่ยวไป 10.4 km จำนวนสถานีรับ-ส่งผู้โดยสาร 18 สถานี ดังนั้น ได้เส้นโค้งความเร็วเที่ยวไปและเที่ยวกลับ ดังรูปที่ 4.9 เส้นโค้งความเร็วถูกจำลอง

ขึ้นมาโดยกำหนดให้รถบัสไฟฟ้าวิ่งด้วยความเร็วสูงสุด ความเร็วสูงสุดที่ใช้งาน คือ 17.1360 m/s (61.68 km/hr.) การเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้าใช้กำลังไฟฟ้าในการเร่งความเร็วและในส่วนประกอบอื่น ๆ 232.7 kW ดังแสดงในรูปที่ 4.10 การเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟถูกนำมาใช้สำหรับการฟื้นฟูพลังงานที่มาจากการเบรกของรถบัสไฟฟ้า ซึ่งทำงานเมื่อรถเบรกและผลิตพลังงานไฟฟ้า

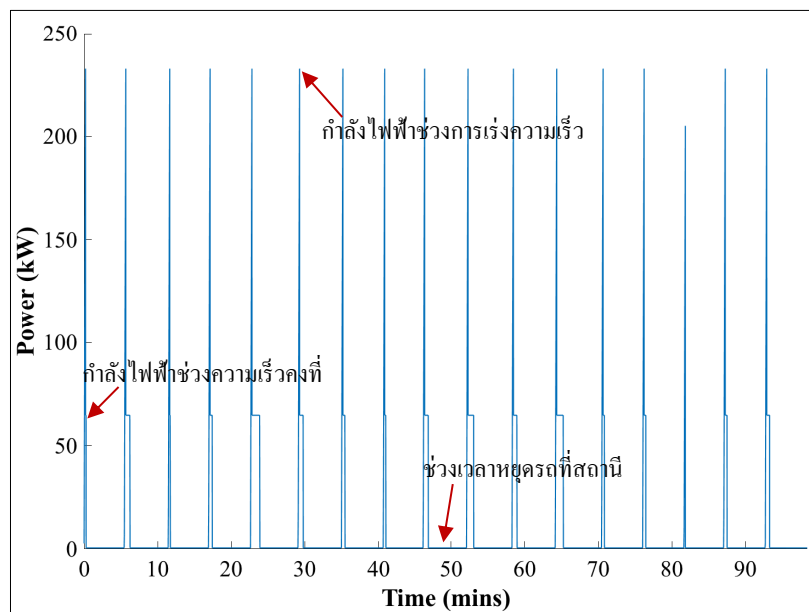


ก) เส้นโค้งความเร็ว เทียบไป

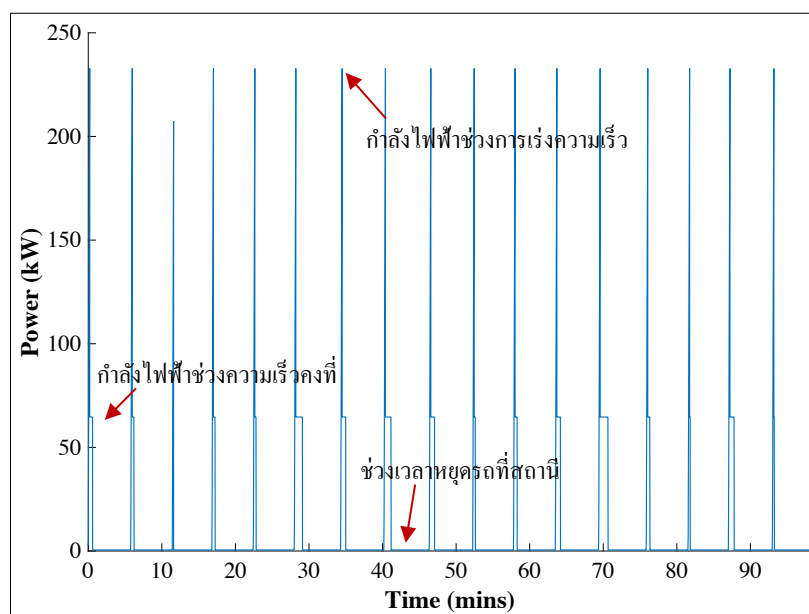


ข) เส้นโค้งความเร็ว เทียบกลับ

รูปที่ 4.9 เส้นโค้งความเร็วสำหรับการให้บริการ 18 สถานี เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม



ก) กำลังไฟฟ้า เทียบไป



ข) กำลังไฟฟ้า เทียบกลับ

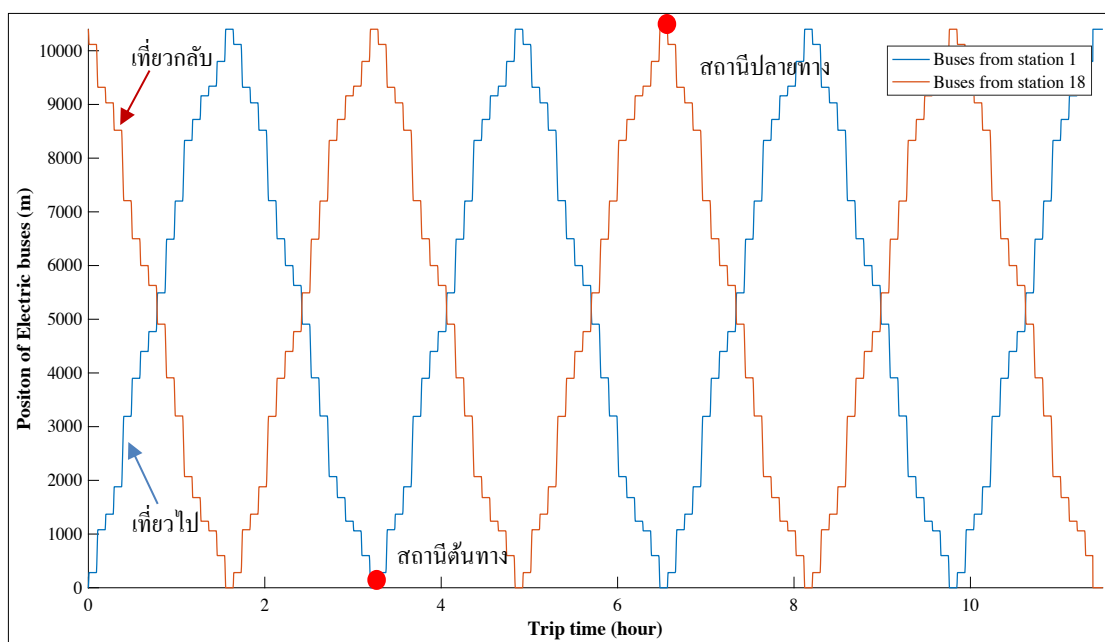
รูปที่ 4.10 กำลังไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการเคลื่อนที่ของรถบัไฟฟ้า เส้นทางรถบัไฟฟ้าสายสีส้ม

ตารางที่ 4.3 ความต้องการพลังงานสำหรับการเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม

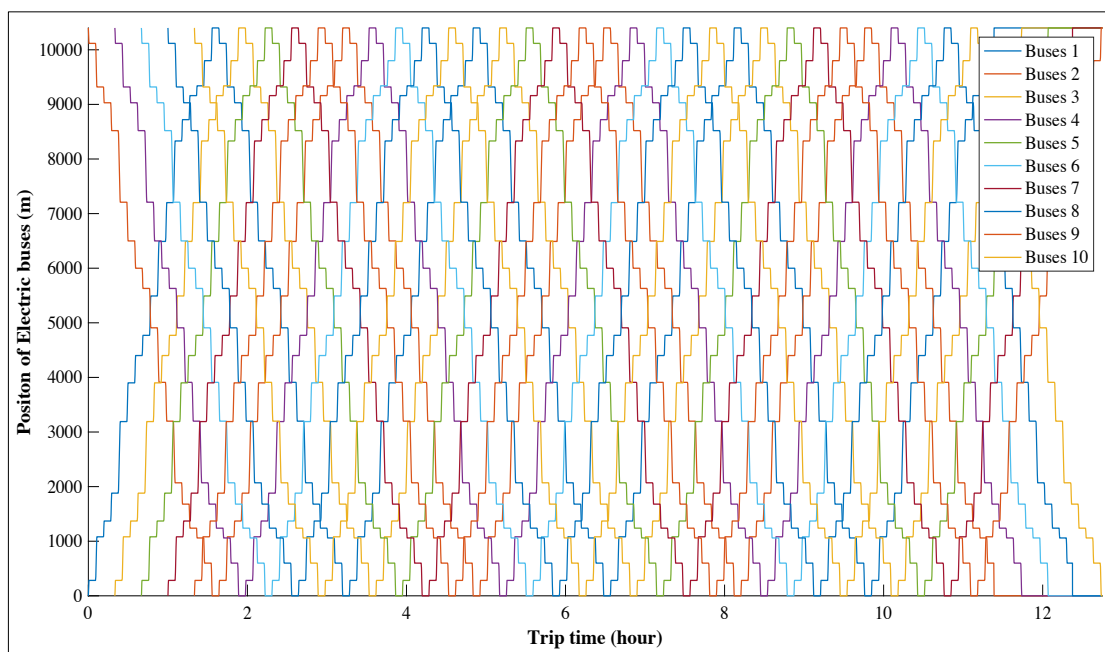
พารามิเตอร์	เที่ยวไป	เที่ยวกลับ
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)	14.5616	14.985
พลังงานไฟฟ้าที่ได้กลับคืนจากการเบรก (kWh)	2.0314	2.0351
ระยะทางที่ให้บริการ (km)	10.40	10.40
อัตราการบริโภคพลังงาน (kWh/km)	1.2048	1.2453
อัตราการบริโภคพลังงานเฉลี่ย (kWh/km)	1.2250	
เวลาให้บริการ (ชั่วโมง)	1:38	1:38

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการจำลองความต้องการพลังงานไฟฟ้าในการเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม พลังงานที่ใช้สำหรับให้บริการเที่ยวไปและกลับ 14.56 kWh และ 14.98 kWh ตามลำดับ พลังงานไฟฟ้าที่ได้กลับคืนมาจากการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟ สำหรับให้บริการเที่ยวไปและเที่ยวกลับ 2.0314 kWh และ 2.0351 kWh ตามลำดับ ให้บริการระยะทางรวม 21.8 km ซึ่งมีอัตราการบริโภคพลังงานเฉลี่ย 1.2250 kWh/km จากผลการจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าทั้ง 3 เส้นทาง แสดงให้เห็นว่ารถบัสไฟฟ้ามีการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ 1.1983 kWh/km ซึ่งมีอัตราการใช้พลังงานใกล้เคียงกับคุณสมบัติการใช้พลังงานของรถบัสไฟฟ้าที่นำมาใช้เป็นกรณีศึกษา

เพื่อให้ทราบถึงตำแหน่งและการใช้พลังงานของรถบัสไฟฟ้าในการให้บริการหนึ่งวัน ดังนั้น จึงต้องจำลองตารางเดินรถสำหรับรถบัสไฟฟ้า ซึ่งเป็นการสร้างระบบตารางการเดินรถบัสไฟฟ้าที่สามารถบอกได้ว่ารถบัสให้บริการอยู่ที่จุดไหนในเวลานั้น ดังนั้น จึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลของเส้นโค้งความเร็ว ตำแหน่ง และกำลังไฟฟ้า จากการจำลองแบบรถคันเดียวมาพิจารณาร่วมกับระยะห่างของการปล่อยรถและการรับ-ส่งผู้โดยสาร ดังนั้น จะได้ตารางเดินรถสำหรับระบบรถบัสไฟฟ้าหลายคัน ซึ่งแสดงเวลาและตำแหน่งของรถบัสไฟฟ้าทุกคันที่ให้บริการในหนึ่งวัน ตั้งแต่เวลา 06:00 -18:00 น. รูปที่ 4.11 แสดงตารางเดินรถของรถบัสไฟฟ้าเที่ยวไปและเที่ยวกลับ สำหรับให้บริการต่อวันตามเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม กำหนดให้มีรถบัสไฟฟ้าให้บริการจำนวน 10 คัน เริ่มออกให้บริการจากสถานีต้นทาง 5 คัน และจากสถานีปลายทาง 5 คัน ดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยมีระยะเวลาจอดรับส่งผู้โดยสารประมาณ 5 นาที ระยะเวลาจอดรถบัสเข้าสถานีทุก ๆ 15 นาที และรถบัสให้บริการ 3 รอบต่อวัน ซึ่งมีการใช้พลังงานไฟฟ้า 100.24 kWh/คัน/วัน



รูปที่ 4.11 ตารางเดินรถไฟฟ้า สำหรับการให้บริการต่อวัน เส้นทางรถไฟฟ้าสายสีส้ม



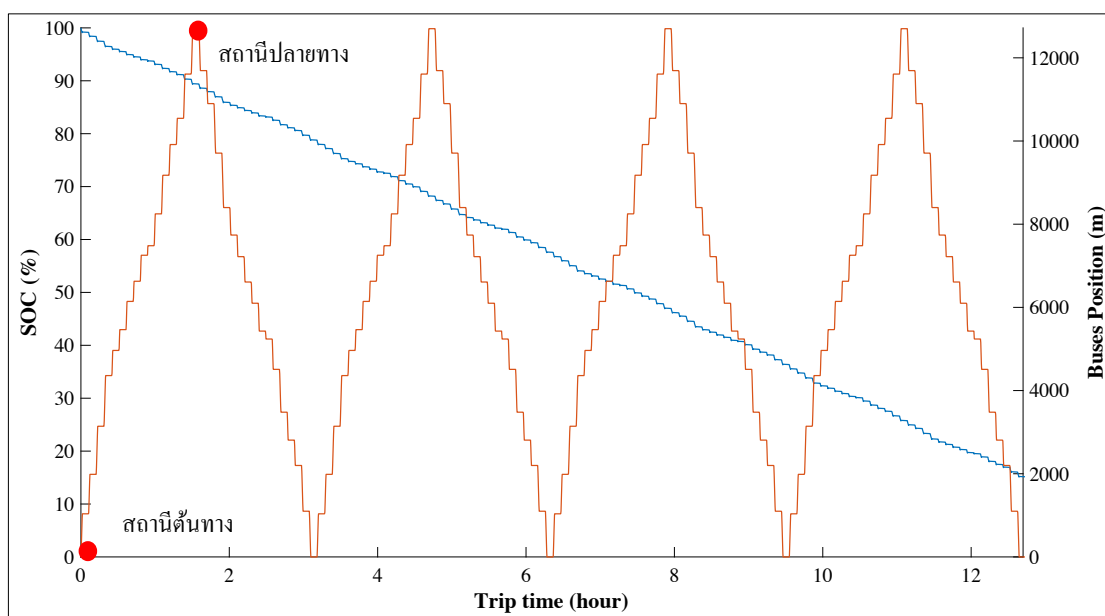
รูปที่ 4.12 ตารางเดินรถสำหรับการให้บริการของระบบรถไฟฟ้าสายสีส้ม

4.3 ผลการวิเคราะห์กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้า

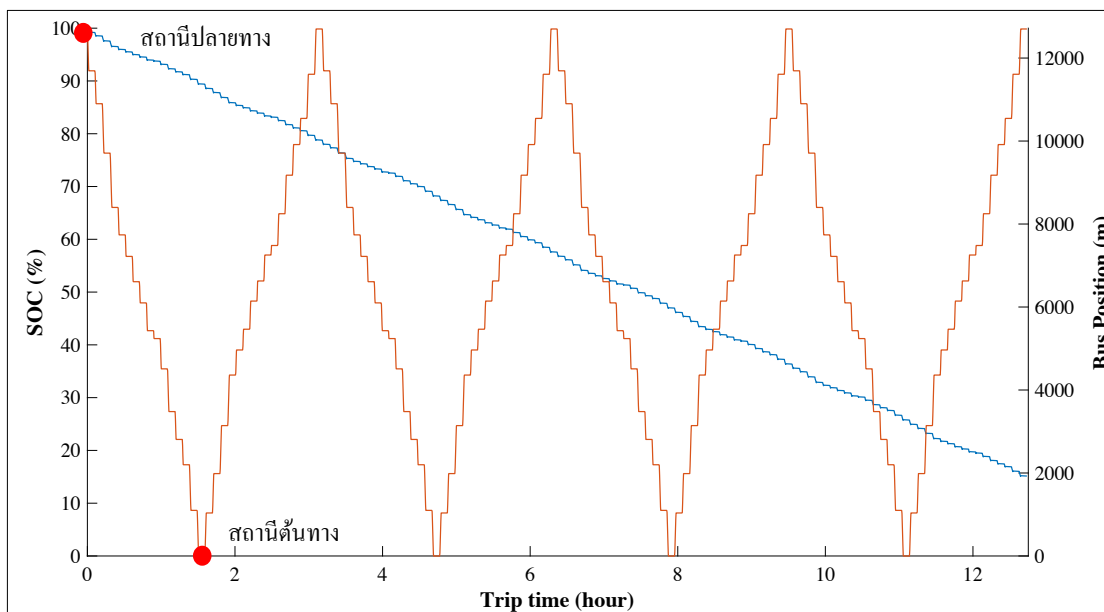
4.3.1 กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง

กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง ซึ่งจะใช้รถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่มีการประจุไฟฟ้าแบบทั่วไปจำนวน 10 คัน ทั้ง 3 เส้นทาง การประจุไฟฟ้านั้นจะทำการประจุไฟฟ้าเมื่อรถบัสหยุดให้บริการตั้งแต่เวลา 22:00 -05:30 น เป็นเวลา 7:30 ชั่วโมง ที่สถานีต้นทาง 5 คัน และสถานีปลายทางอีก 5 คัน ดังนั้น สามารถคำนวณการใช้พลังงานและสถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าที่วิ่งไปและที่วิ่งกลับ ทั้ง 3 เส้นทาง ดังแสดงในรูปที่ 4.13 - 4.18 ตามลำดับ

สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้า สำหรับการให้บริการเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง การให้บริการที่วิ่งไป แสดงในรูปที่ 4.13 ซึ่งใช้แบตเตอรี่ขนาดความจุ 140 kWh มีการใช้พลังงานรวมในหนึ่งวัน 118.79 kWh ต่อคัน ดังนั้น สถานะประจุไฟฟ้าคงเหลือในแบตเตอรี่ 15.15% หรือความจุคงเหลือของแบตเตอรี่ 21.20 kWh และจากรูปที่ 4.14 แสดงสถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าที่วิ่งกลับ สถานะประจุไฟฟ้าคงเหลือในแบตเตอรี่ 15.15% หรือมีพลังงานคงเหลือ 21.20 kWh มีค่าเท่ากับรถบัสไฟฟ้าที่วิ่งไป

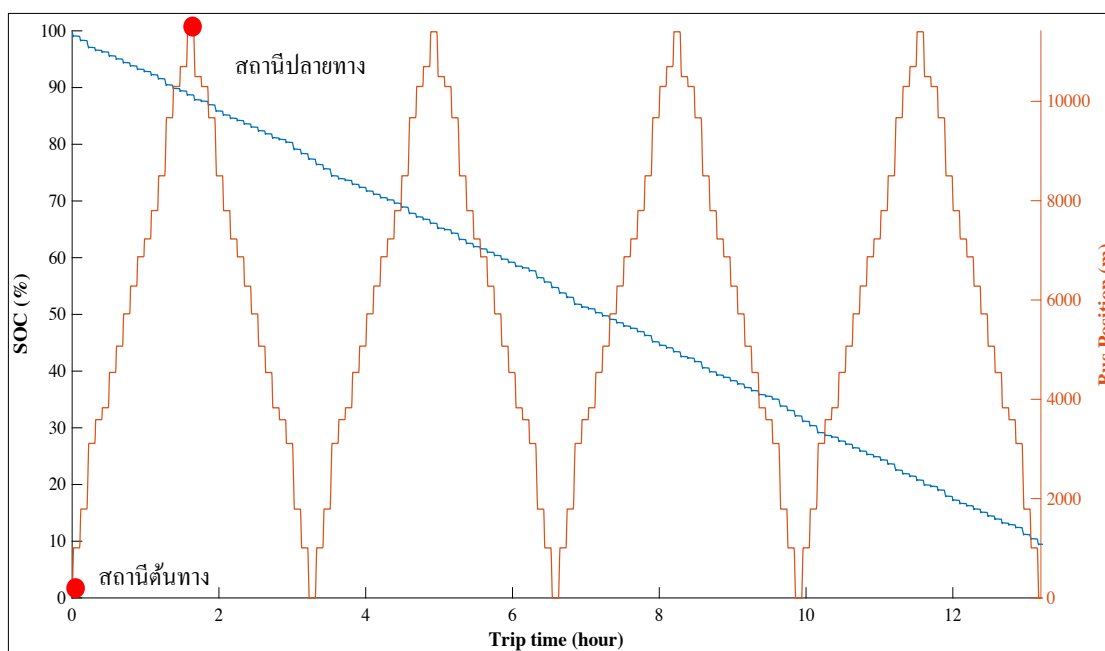


รูปที่ 4.13 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าที่วิ่งไป เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง

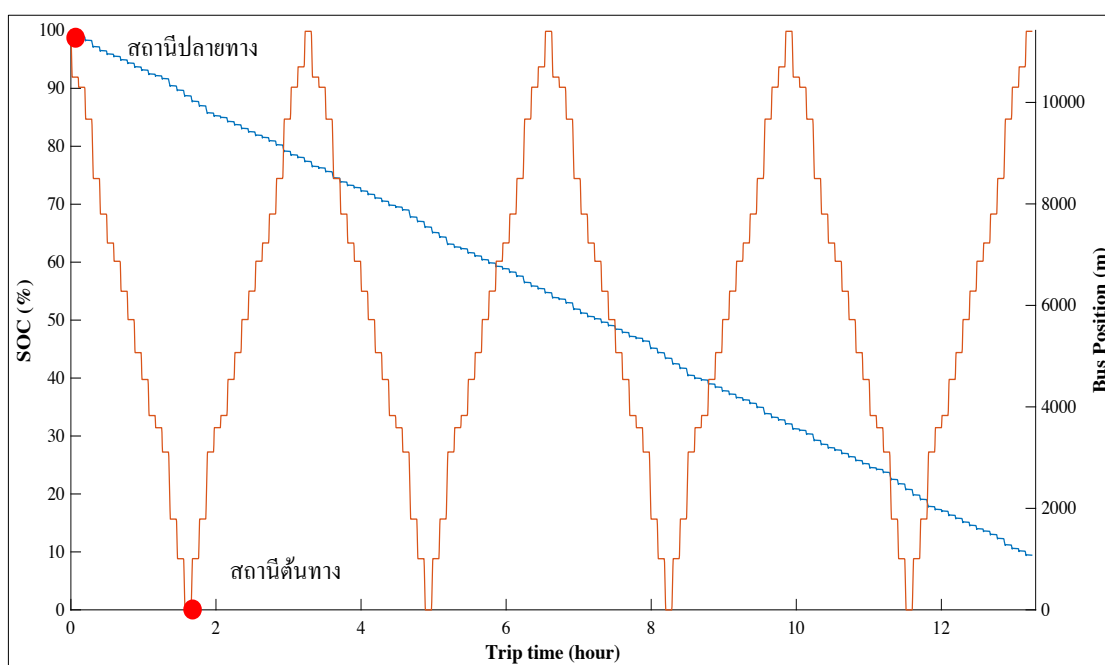


รูปที่ 4.14 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าที่วิ่งกลับ เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง

สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าที่วิ่งไป สำหรับเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียวแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งใช้แบตเตอรี่ขนาด 120 kWh จะได้การใช้พลังงานรวมในหนึ่งวัน 108.68 kWh ต่อคัน ดังนั้น จะได้สถานะประจุไฟฟ้าคงเหลือในแบตเตอรี่ 9.43% หรือความจุคงเหลือแบตเตอรี่ 11.31 kWh และจากรูปที่ 4.16 แสดงสถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าที่วิ่งกลับ ซึ่งสถานะประจุไฟฟ้าคงเหลือในแบตเตอรี่ 9.43% หรือ 11.31 kWh มีค่าเท่ากับรถบัสไฟฟ้าที่วิ่งไป

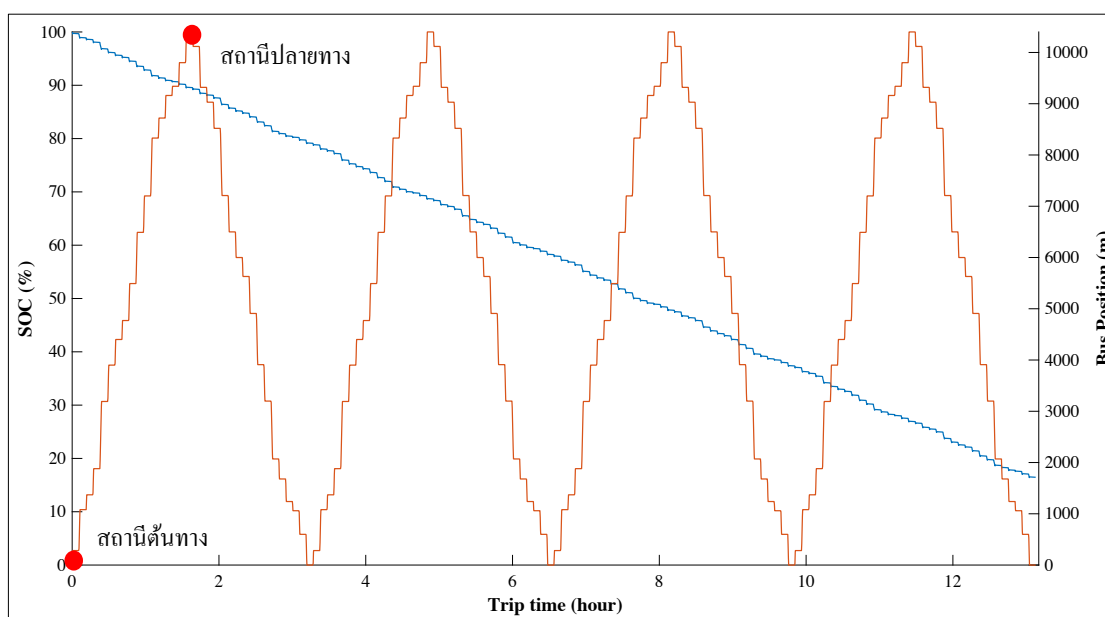


รูปที่ 4.15 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าเที่ยวไป เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง

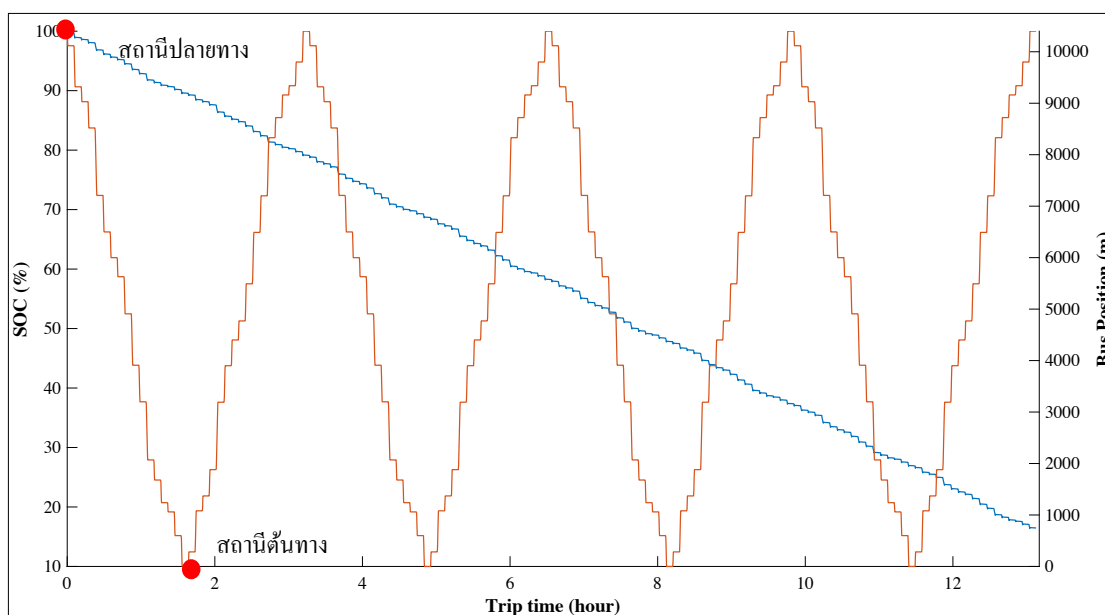


รูปที่ 4.16 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าเที่ยวกลับ เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง

สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าเที่ยวไป สำหรับเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม แสดงในรูปที่ 4.17 โดยใช้แบตเตอรี่ขนาด 120 kWh มีการใช้พลังงานรวมในหนึ่งวัน 100.24 kWh/คัน ดังนั้น จะได้สถานะประจุไฟฟ้าคงเหลือในแบตเตอรี่ 16.46% หรือความจุคงเหลือของแบตเตอรี่ 19.76 kWh และจากรูปที่ 4.18 แสดงสถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าเที่ยวกลับ สถานะประจุไฟฟ้าคงเหลือในแบตเตอรี่ 16.46% หรือ 19.76 kWh มีค่าเท่ากับรถบัสไฟฟ้าเที่ยวไป



รูปที่ 4.17 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าเที่ยวไป เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง

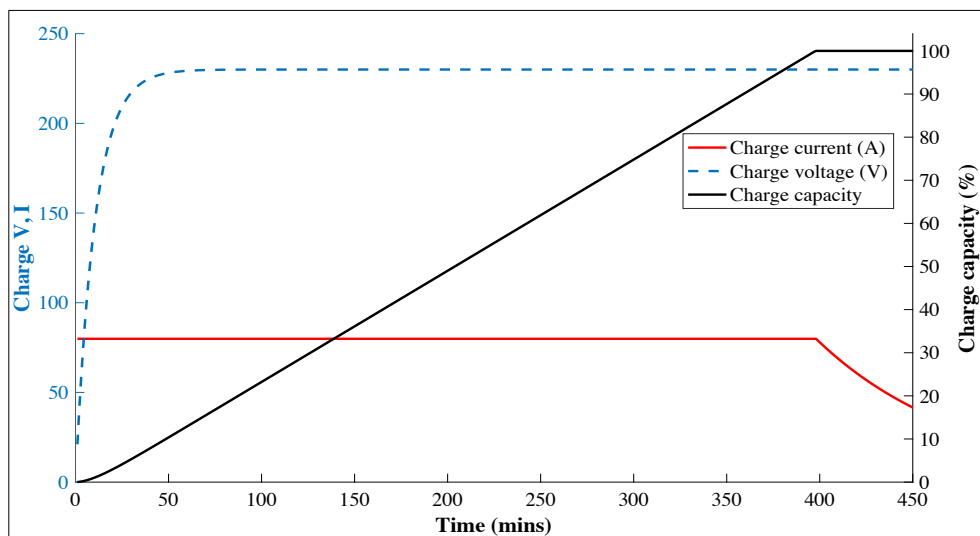


รูปที่ 4.18 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าที่ขากลับ เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง

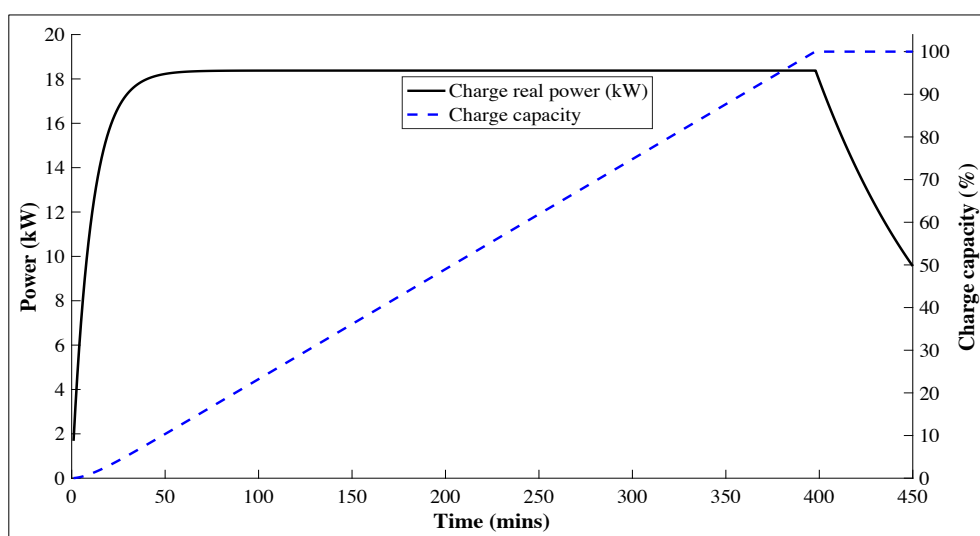
ตารางที่ 4.4 การใช้พลังงานของรถบัสไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน

เส้นทาง	พลังงานรวมต่อวัน	อัตราการใช้พลังงาน	ขนาดแบตเตอรี่
สายสีม่วง	118.79 kWh	1.1692 kWh/km	140 kWh
สายสีเขียว	108.69 kWh	1.1920 kWh/km	120 kWh
สายสีส้ม	100.24 kWh	1.2048 kWh/km	120 kWh

ตารางที่ 4.4 แสดงการใช้พลังงานของรถบัสไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน โดยมีอัตราการใช้พลังงานของรถบัสไฟฟ้าต่อการให้บริการหนึ่งรอบต่อคัน คือ 1.1692 kWh/km 1.1920 kWh/km และ 1.2048 kWh/km ตามเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง สายสีเขียว และสายสีส้ม ตามลำดับ การเลือกขนาดของแบตเตอรี่นั้นผู้วิจัยทำการเลือกขนาดของแบตเตอรี่โดยให้ขนาดของแบตเตอรี่มีค่ามากกว่าค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ 10-20% จากการจำลองการใช้พลังงานของรถบัสไฟฟ้าสำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทางนั้น จะได้ลักษณะกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้าสำหรับทั้ง 3 เส้นทางกรณีศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 4.19-4.24

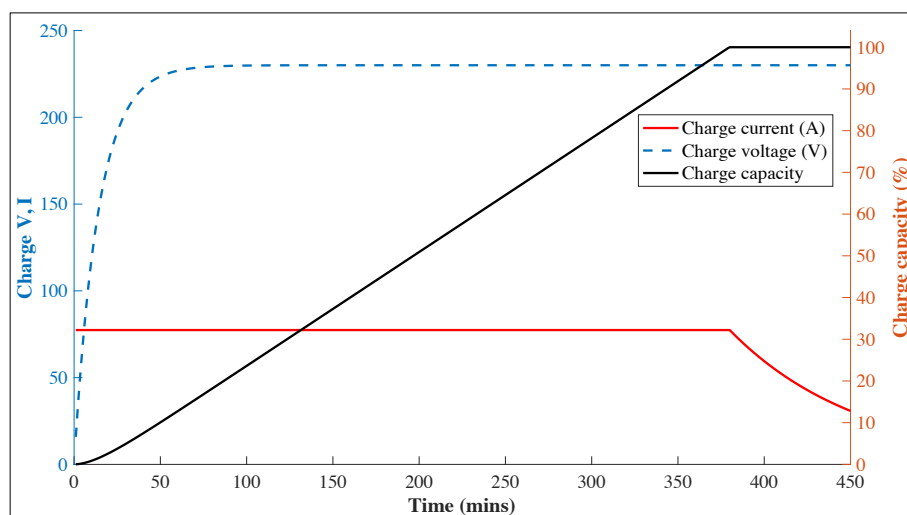


รูปที่ 4.19 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรอบัสไฟฟ้าสายลีม่วง
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง

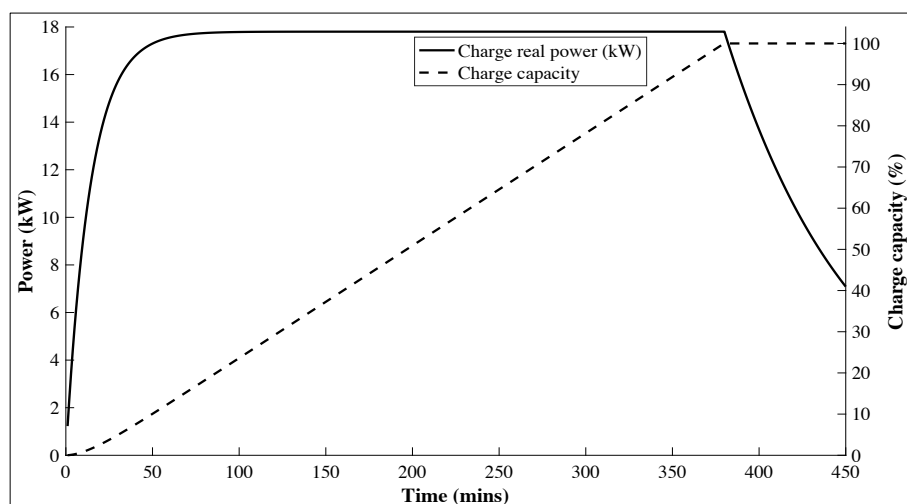


รูปที่ 4.20 ลักษณะของกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรอบัสไฟฟ้าสายลีม่วง
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง

รูปที่ 4.19 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรอบัสไฟฟ้าสายลีม่วง สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง สถานะประจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นถึง 100% ที่เวลา 400 นาที และกระแสประจุจะค่อย ๆ ลดลง เช่นเดียวกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการประจุไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.20 ที่ค่อย ๆ ลดลงเมื่อแบตเตอรี่ใกล้จะเต็ม

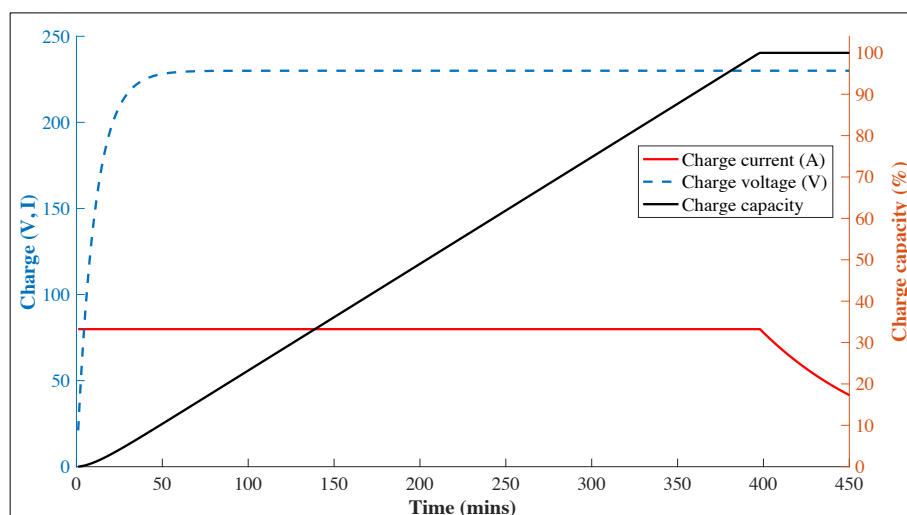


รูปที่ 4.21 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรอบัสไฟฟ้าสายสีเขียว สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง

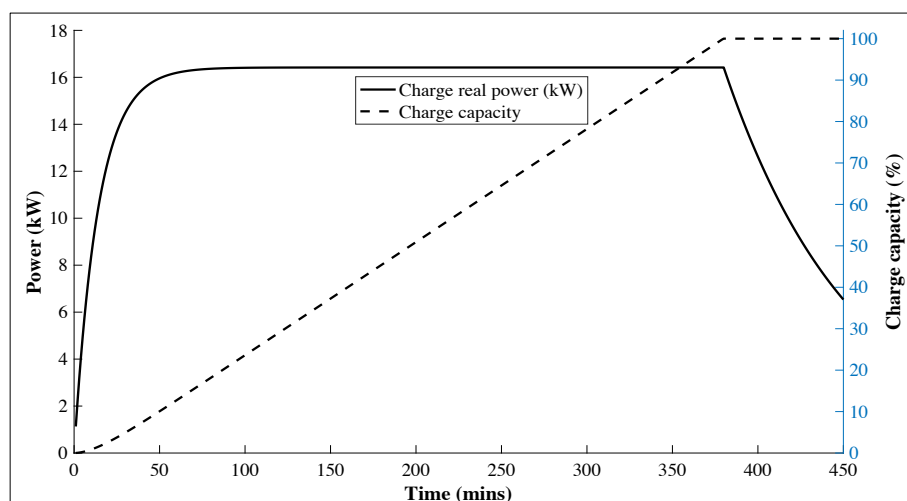


รูปที่ 4.22 ลักษณะของกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรอบัสไฟฟ้าสายสีเขียว สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง

รูปที่ 4.21 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรอบัสไฟฟ้าสายลึเขียว สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง สถานะประจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นถึง 100% ที่เวลา 380 นาที และกระแสประจุจะค่อย ๆ ลดลง เช่นเดียวกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการประจุไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.22 ที่ค่อย ๆ ลดลงเมื่อแบตเตอรี่ใกล้จะเต็ม



รูปที่ 4.23 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรอบัสไฟฟ้าสายลึส้ม สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง



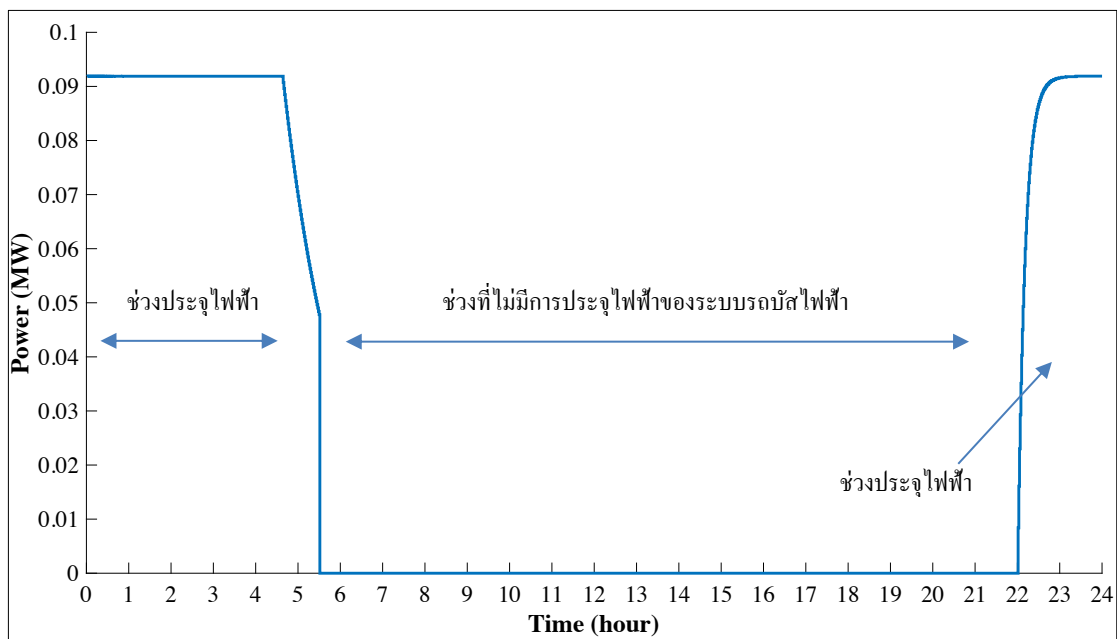
รูปที่ 4.24 ลักษณะของกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรอบัสไฟฟ้าสายลึส้ม สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง

รูปที่ 4.23 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง สถานะประจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นถึง 100% ที่เวลา 360 นาที และกระแสประจุจะค่อย ๆ ลดลง เช่นเดียวกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการประจุไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.24 ที่ค่อย ๆ ลดลงเมื่อแบตเตอรี่ใกล้จะเต็ม

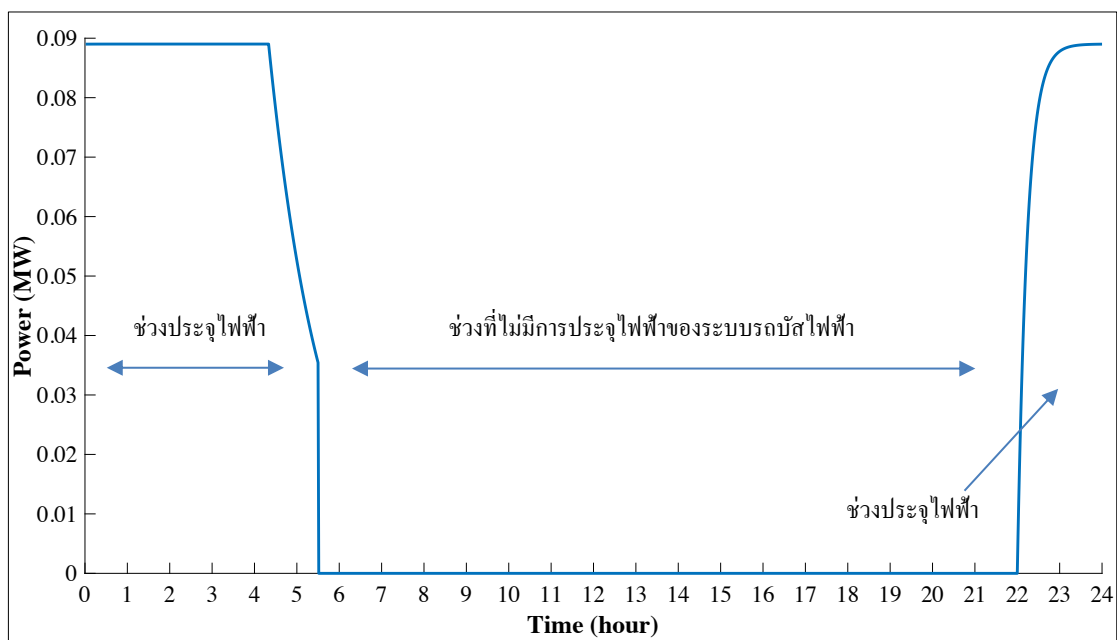
ตารางที่ 4.5 กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูงสุดขณะการประจุไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง

เส้นทาง	แรงดันไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า	เวลาประจุ
สายสีม่วง	230 V	79.90 A	18.38 kW	7:30 ชม.
สายสีเขียว	230 V	77.40 A	17.80 kW	7:30 ชม.
สายสีส้ม	230 V	71.39 A	16.42 kW	7:30 ชม.

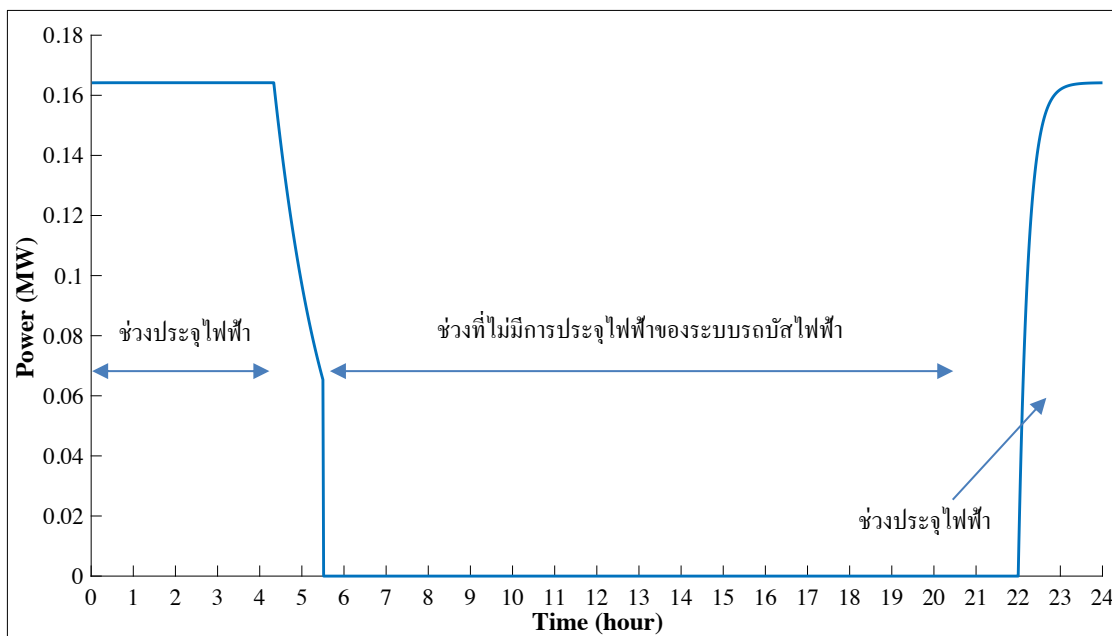
ตารางที่ 4.5 แสดงกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูงสุดขณะการประจุไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง ใช้เวลาในการประจุไฟฟ้า 7:30 ชั่วโมง และมีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3.5 ที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด 20 kW ดังนั้น จากลักษณะของกำลังไฟฟ้าขณะมีการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าในแต่ละเส้นทางจึงสามารถนำมาสร้างเป็นกราฟกำลังไฟฟ้ารวมของสถานีประจุไฟฟ้าที่ต้นทางและปลายทางตามเส้นทางกรณีศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 4.25-4.27 รูปที่ 4.25 แสดงลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า ระบบรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง ซึ่งมีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 91.90 kW รูปที่ 4.26 และ 4.27 แสดงลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า ระบบรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว และสายสีส้ม มีกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 89.02 kW และ 164.19 kW ตามลำดับ



รูปที่ 4.25 ลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า ระบบรับไฟฟ้าสายส่ง 110 kV สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง



รูปที่ 4.26 ลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า ระบบรับไฟฟ้าสายส่ง 110 kV สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง



รูปที่ 4.27 ลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า ระบบรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง

ตารางที่ 4.6 พลังงานไฟฟ้าสูงสุด สำหรับการประจุไฟฟ้าระบบรถบัสไฟฟ้าในหนึ่งวัน
กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไปที่ต้นทางและปลายทาง

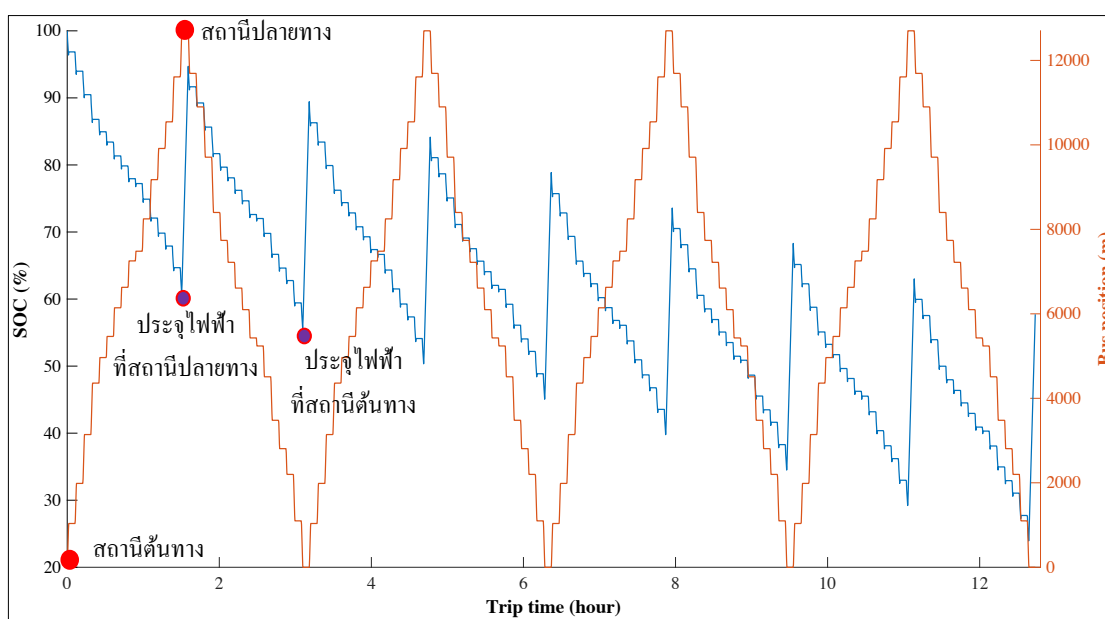
พารามิเตอร์	เส้นทางสายสีม่วง	เส้นทางสายสีเขียว	เส้นทางสายสีส้ม
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (kW)	91.90	89.02	164.1896
พลังงานไฟฟ้ารวม (kWh)	652.40	611.15	1,127.30

ตารางที่ 4.6 แสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุดและพลังงานไฟฟ้ารวมสำหรับการประจุไฟฟ้าระบบรถบัสไฟฟ้าในหนึ่งวัน สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง กำหนดให้มีรถบัสไฟฟ้าทำการประจุไฟฟ้าที่สถานีต้นทางและปลายทางพร้อมกันสถานีละ 5 คัน สำหรับเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วงและสายสีเขียว และมีการประจุไฟฟ้าพร้อมกัน 10 คัน สำหรับเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม เนื่องจากจุดที่เป็นต้นทางและปลายทางเป็นจุดเดียวกัน ดังนั้นพลังงานไฟฟ้ารวมที่ใช้สำหรับการประจุไฟฟ้าทั้ง 3 เส้นทาง คือ 652.40 kWh 611.15 kWh และ 1,127.30 kWh ตามลำดับ

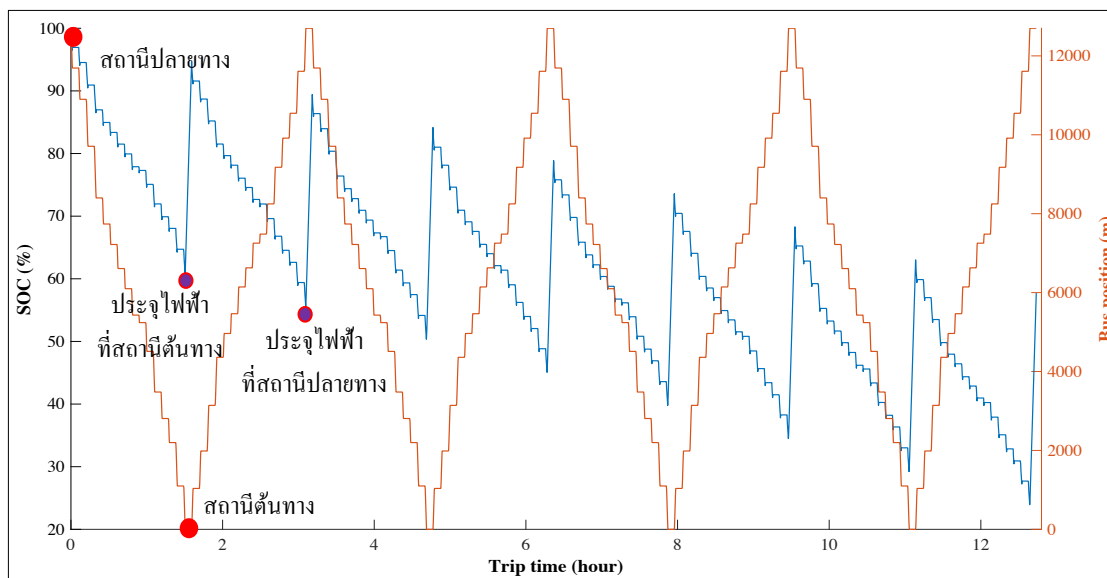
4.3.2 กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ

กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ ใช้รถบัสไฟฟ้าแบบแผนโทกราฟ โดยมีรูปแบบการประจุไฟฟ้าแบบเร็ว ใช้จำนวนรถบัสไฟฟ้าจำนวน 10 คัน ในทุกเส้นทาง การประจุไฟฟ้านั้นจะทำการประจุไฟฟ้าเมื่อรถบัสหยุดให้บริการที่สถานีต้นทางและที่สถานีปลายทาง ใช้เวลาประจุไฟฟ้า 5 นาที ดังนั้น สามารถคำนวณการใช้พลังงานและสถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าที่วิ่งไปและที่วิ่งกลับของทั้ง 3 เส้นทาง ดังแสดงในรูปที่ 4.28-4.33

สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าที่วิ่งไป สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง แสดงในรูปที่ 4.28 ใช้แบตเตอรี่ขนาด 35 kWh มีการใช้พลังงานในการประจุไฟฟ้าต่อครั้ง 11.83 kWh ดังนั้น การให้บริการหนึ่งวัน สถานะประจุไฟฟ้าคงเหลือในแบตเตอรี่ 23.93% หรือความจุคงเหลือของแบตเตอรี่ 8.37 kWh ก่อนประจุไฟฟ้าครั้งสุดท้าย จำนวนการประจุไฟฟ้า 8 ครั้งต่อวัน และจากรูปที่ 4.29 แสดงสถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าที่วิ่งกลับ



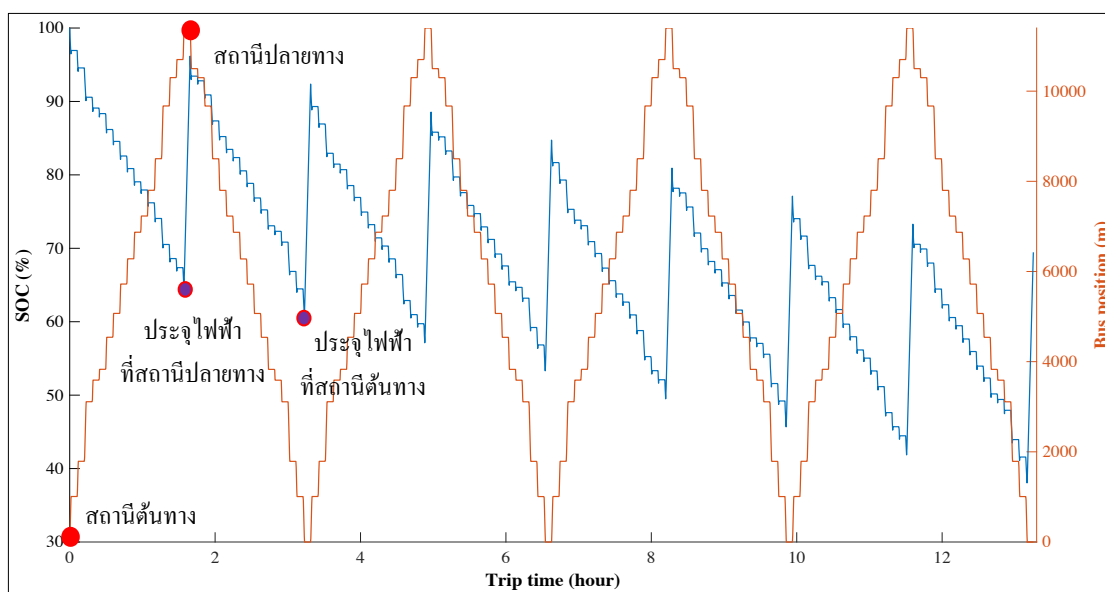
รูปที่ 4.28 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าที่วิ่งไป เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ



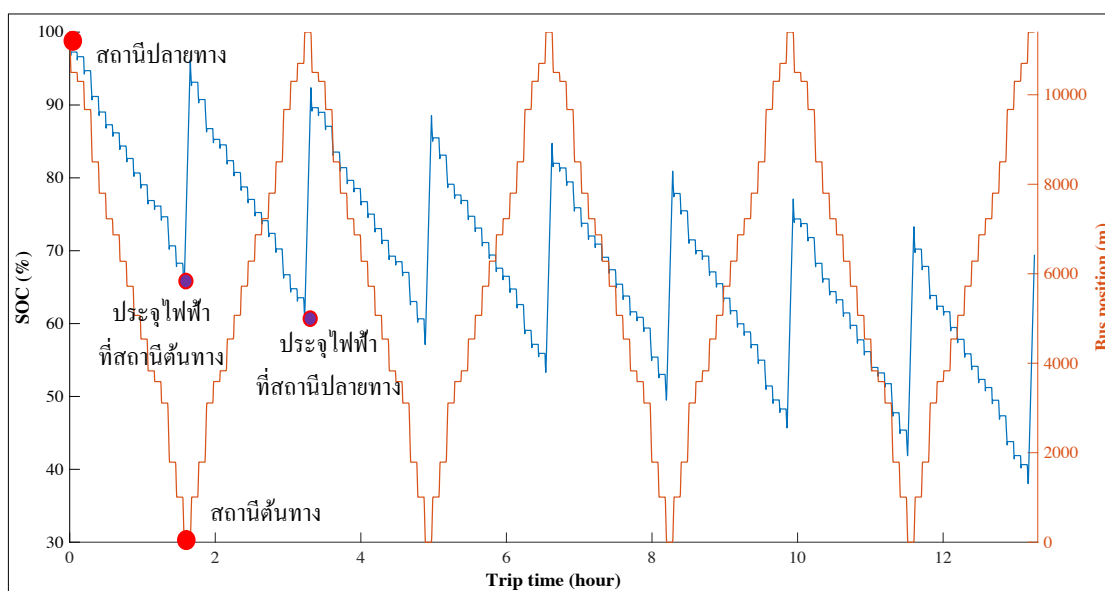
รูปที่ 4.29 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าที่เกี่ยวกลับ เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ

สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าที่เกี่ยวไป สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว แสดงในรูปที่ 4.30 ใช้แบตเตอรี่ขนาด 35 kWh การใช้พลังงานในการประจุไฟฟ้าต่อครั้ง 11 kWh ดังนั้น การบริการในหนึ่งวัน สถานะประจุไฟฟ้าคงเหลือในแบตเตอรี่ 38.05% หรือความจุคงเหลือของแบตเตอรี่ 13.32 kWh จำนวนการประจุไฟฟ้า 8 ครั้ง/วัน และรูปที่ 4.31 แสดงสถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าที่เกี่ยวกลับ

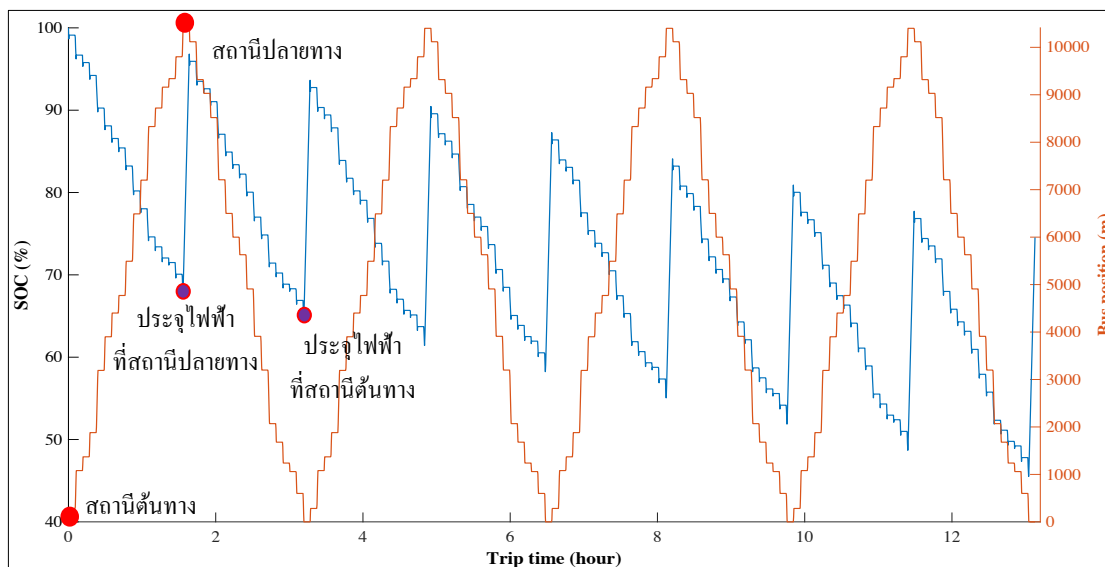
สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าที่เกี่ยวไป สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม แสดงในรูปที่ 4.32 ซึ่งใช้แบตเตอรี่ขนาด 35 kWh มีการใช้พลังงานในการประจุไฟฟ้าต่อครั้ง 10.16 kWh ดังนั้น การบริการในหนึ่งวัน สถานะประจุไฟฟ้าคงเหลือในแบตเตอรี่ 45.51% หรือความจุคงเหลือของแบตเตอรี่ 15.93 kWh จำนวนการประจุไฟฟ้า 8 ครั้งต่อวัน และรูปที่ 4.33 แสดงสถานะประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าที่เกี่ยวกลับ



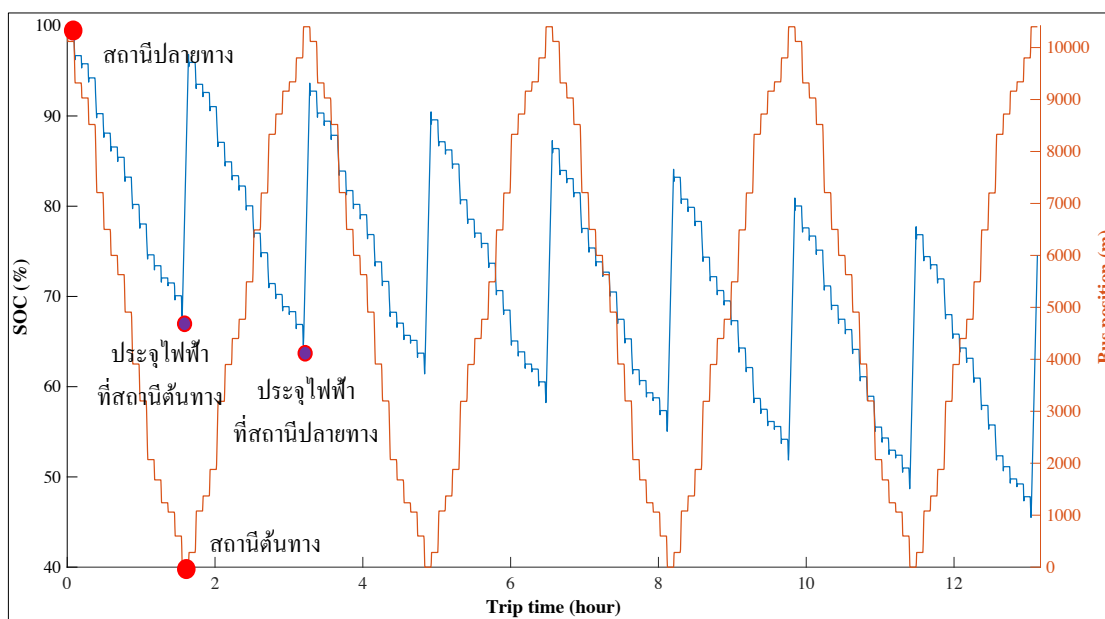
รูปที่ 4.30 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าที่เกี่ยวไป เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ



รูปที่ 4.31 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าที่เกี่ยวกลับ เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ



รูปที่ 4.32 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าเที่ยวไป เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ

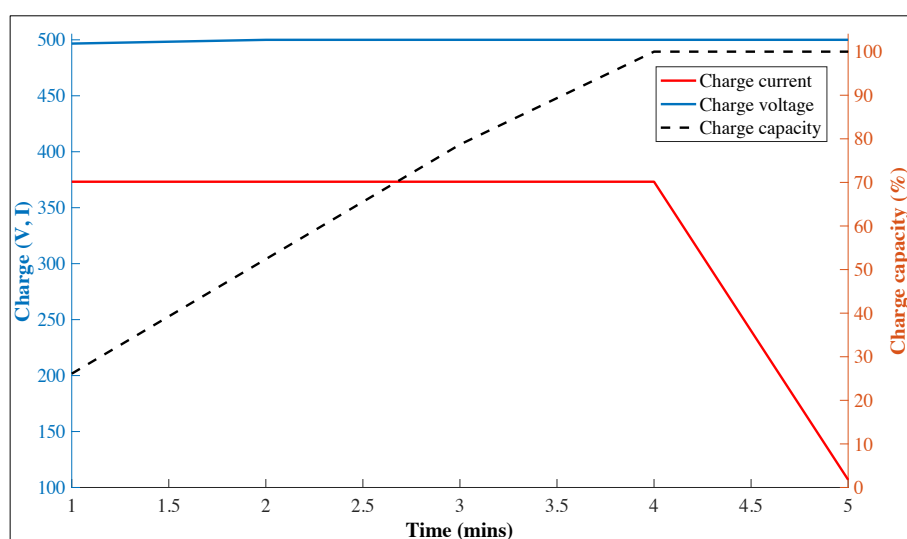


รูปที่ 4.33 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าเที่ยวกลับ เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ

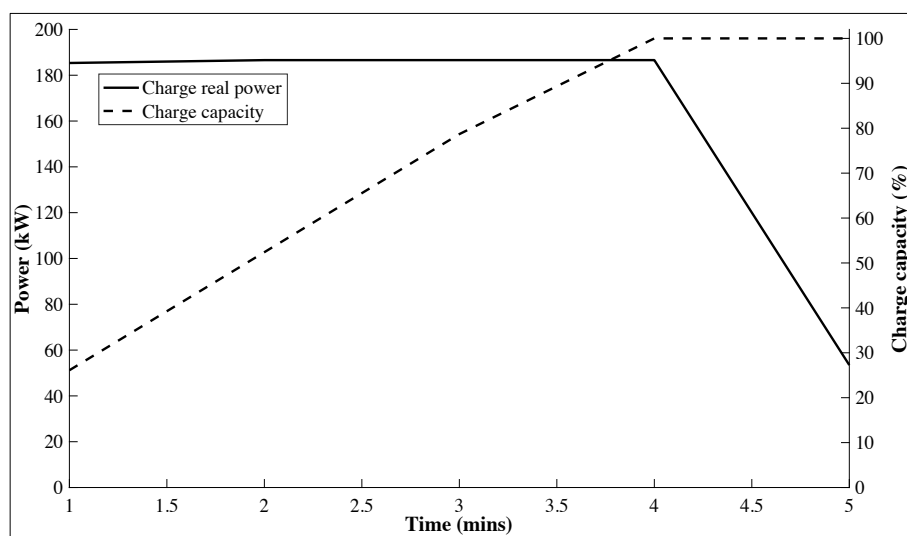
ตารางที่ 4.7 การใช้พลังงานของรถบีโไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์ประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ

เส้นทาง	การประจุไฟฟ้า	พลังงานที่ใช้ต่อครั้ง	ขนาดแบตเตอรี่
สายสีม่วง	8 ครั้ง/วัน	11.83 kWh	35 kWh
สายสีเขียว	8 ครั้ง/วัน	11.00 kWh	35 kWh
สายสีส้ม	8 ครั้ง/วัน	10.16 kWh	35 kWh

ตารางที่ 4.7 แสดงการใช้พลังงานของรถบีโไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์ประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ โดยรถบีโไฟฟ้าแต่ละเส้นทางจะทำการประจุไฟฟ้า 8 ครั้งต่อคันต่อวัน ซึ่งการประจุไฟฟ้าในแต่ละครั้งจะใช้ระยะเวลา 5 นาที พลังงานที่ใช้ในการประจุไฟฟ้าต่อครั้ง คือ 11.83 kWh 11.00 kWh และ 10.16 kWh ตามเส้นทางรถบีโไฟฟ้าสายสีม่วง สายสีเขียว และสายสีส้ม ตามลำดับ จากการจำลองการใช้พลังงานของรถบีโไฟฟ้าสำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟนั้น จึงนำค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการประจุไฟฟ้าไปจำลองลักษณะกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้าสำหรับทั้ง 3 เส้นทางกรณีศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 4.34-4.39 รูปที่ 4.34 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรถบีโไฟฟ้าสายสีม่วง สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ สถานะประจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจนถึง 100% ที่เวลาประจุไฟฟ้า 4 นาที และกระแสประจุจะค่อย ๆ ลดลง เช่นเดียวกับกำลังไฟฟ้า



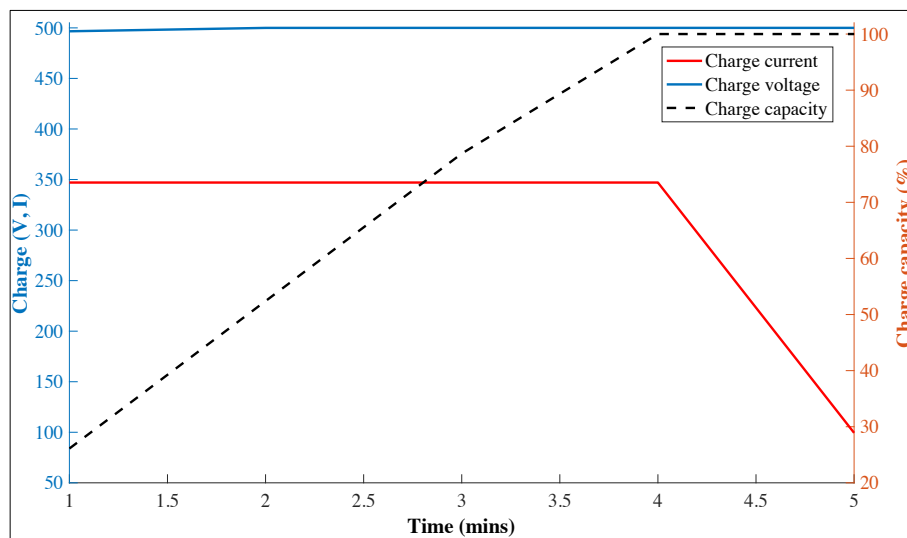
รูปที่ 4.34 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรถบีโไฟฟ้าสายสีม่วง สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ



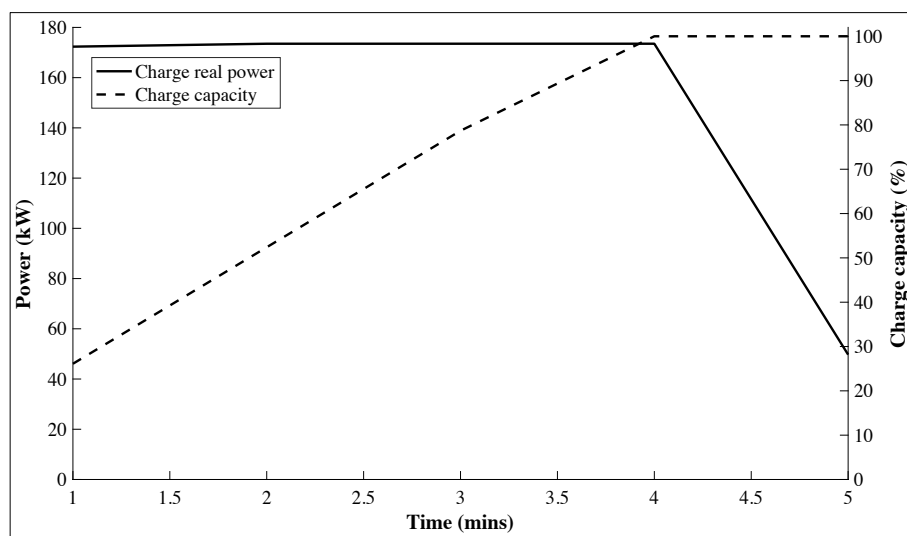
รูปที่ 4.35 ลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ

รูปที่ 4.36 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ สถานะประจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นถึง 100% ที่เวลา 4 นาที และกระแสประจุ 347.02 A และจะค่อย ๆ ลดลง เช่นเดียวกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการประจุไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.37 ที่ค่อย ๆ ลดลงเมื่อแบตเตอรี่ใกล้จะเต็ม

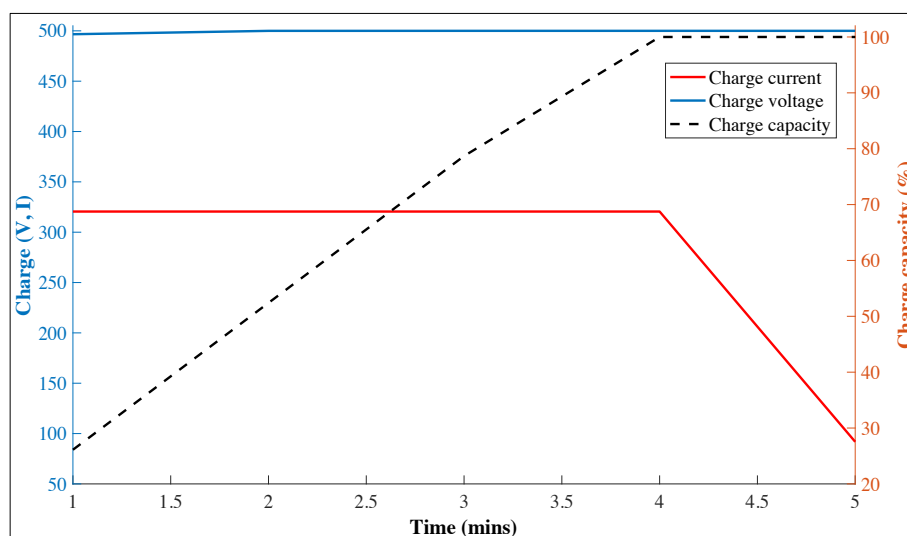
รูปที่ 4.38 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ สถานะประจุไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นถึง 100% ที่เวลา 4 นาที และกระแสประจุ 320.52 A และจะค่อย ๆ ลดลง เช่นเดียวกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการประจุไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.39 ที่ค่อย ๆ ลดลงเมื่อแบตเตอรี่ใกล้จะเต็ม



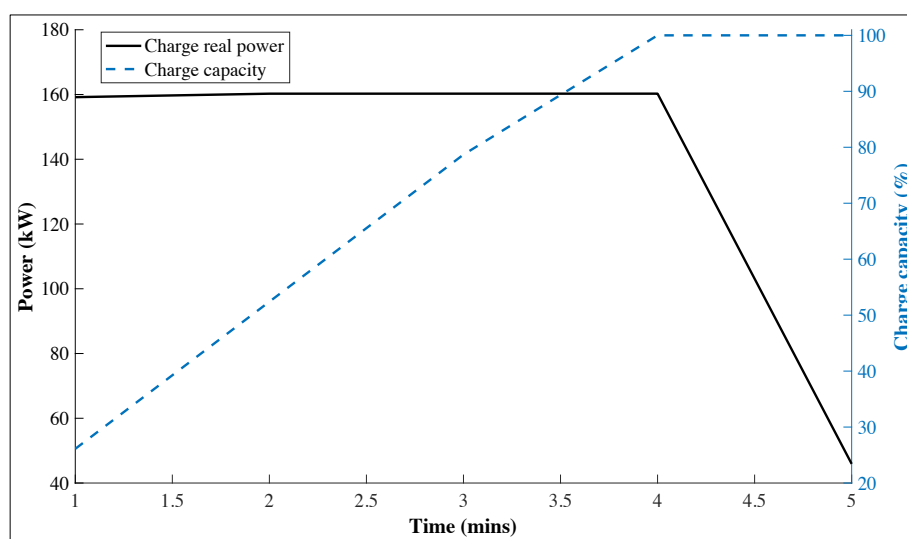
รูปที่ 4.36 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแบนโทกราฟ



รูปที่ 4.37 ลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแบนโทกราฟ



รูปที่ 4.38 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแบนโทกราฟ

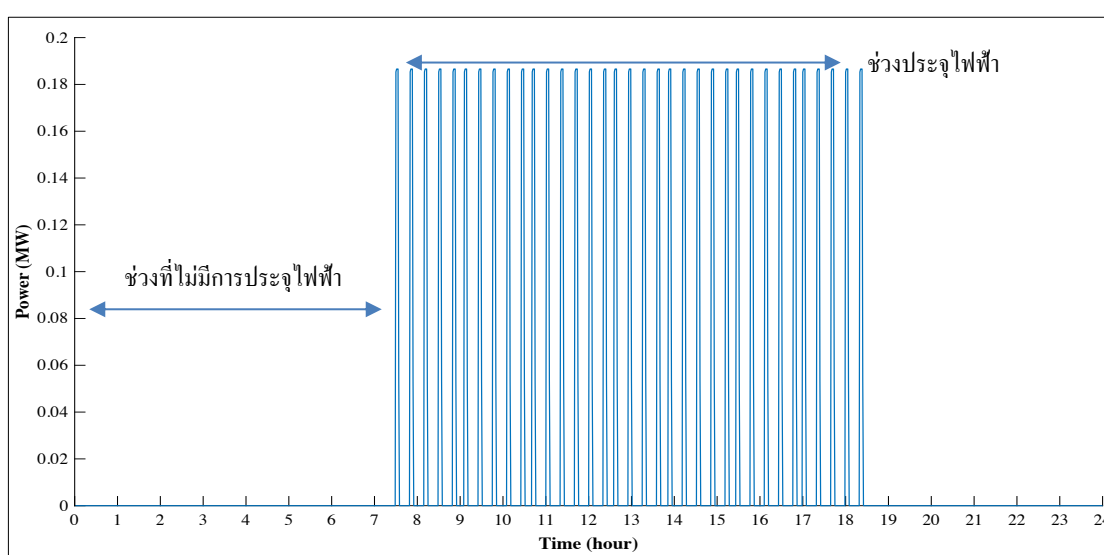


รูปที่ 4.39 ลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแบนโทกราฟ

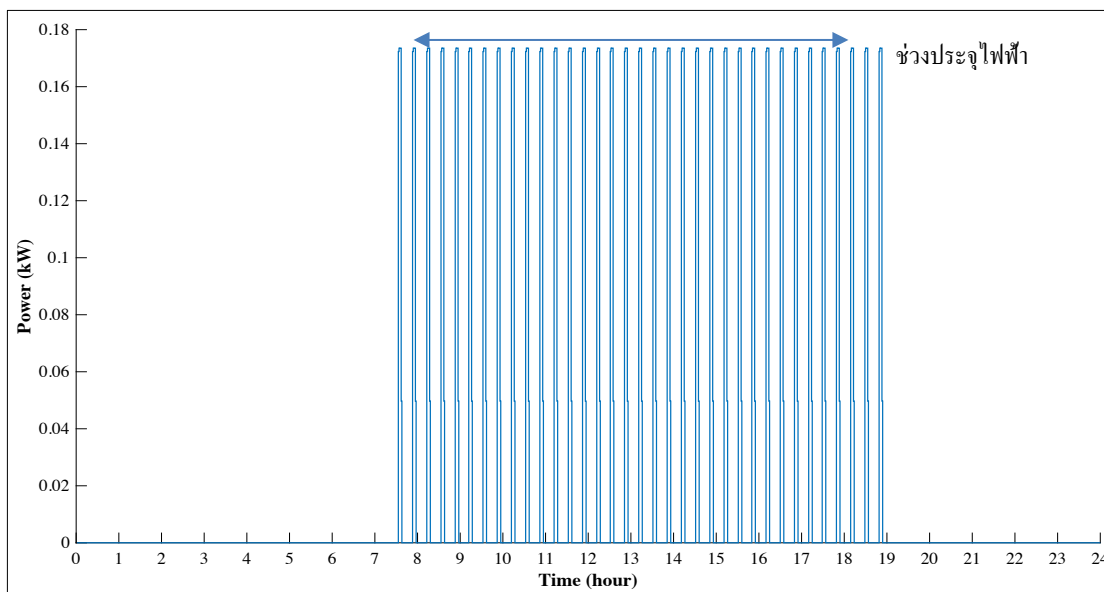
ตารางที่ 4.8 กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูงสุดขณะการประจุไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ

เส้นทาง	แรงดันไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า	กำลังไฟฟ้า	เวลาประจุ
สายสีม่วง	500 V	373.20 A	186.60 kW	5 นาที
สายสีเขียว	500 V	347.02 A	173.51 kW	5 นาที
สายสีส้ม	500 V	320.52 A	160.26 kW	5 นาที

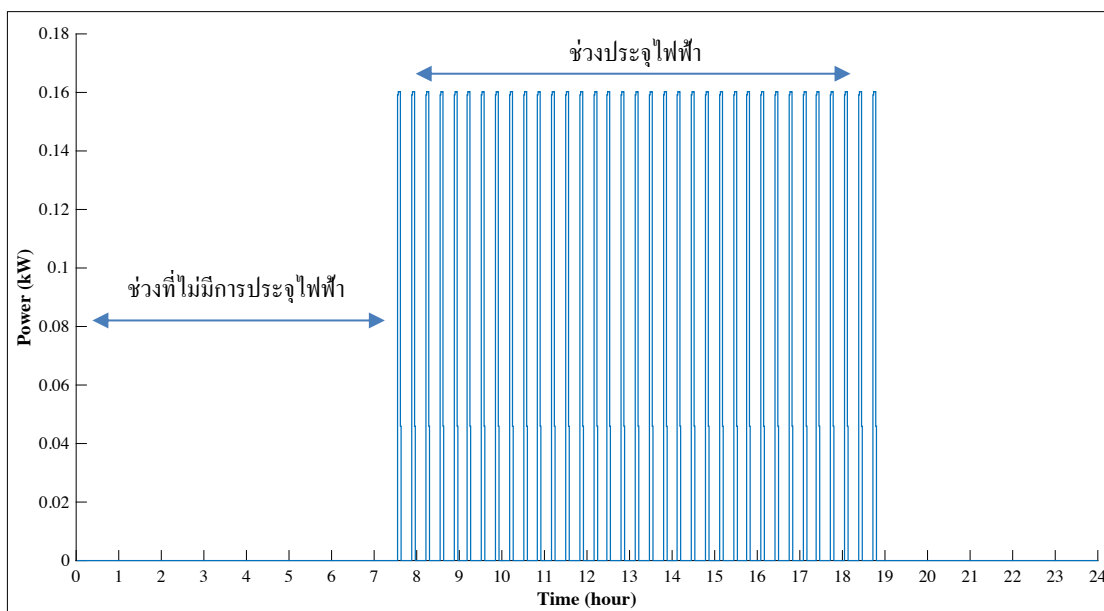
ตารางที่ 4.8 แสดงกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูงสุดขณะการประจุไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ ระบบรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วงมีกำลังไฟฟ้าสูงสุดขณะประจุไฟฟ้า 186.60 kW ระบบรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียวมีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 173.51 kW และระบบรถบัสไฟฟ้าสายสีส้มมีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 160.26 kW ดังนั้น จากลักษณะของกำลังไฟฟ้าขณะมีการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าในแต่ละเส้นทาง จึงสามารถนำมาสร้างเป็นกราฟกำลังไฟฟ้ารวมของสถานีประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟที่สถานีต้นทาง ตามเส้นทางกรณีศึกษา ดังรูปที่ 4.40-4.42 ตารางที่ 4.9 แสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุดและพลังงานไฟฟ้ารวมสำหรับการประจุไฟฟ้าระบบรถบัสไฟฟ้าในหนึ่งวัน สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ พลังงานไฟฟ้ารวมที่ใช้สำหรับการประจุไฟฟ้าของทั้ง 3 เส้นทาง คือ 465.85 kWh 433.16 kWh และ 391.19 kWh ตามลำดับ



รูปที่ 4.40 ลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า ระบบรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ



รูปที่ 4.41 ลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า ระบบรถบัสดำเนินการสายสีเขียว
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ



รูปที่ 4.42 ลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า ระบบรถบัสดำเนินการสายสีส้ม
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ

ตารางที่ 4.9 พลังงานไฟฟ้าสูงสุด สำหรับการประจุไฟฟ้าระบบรถบัสดำเนินการในวัน

กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ

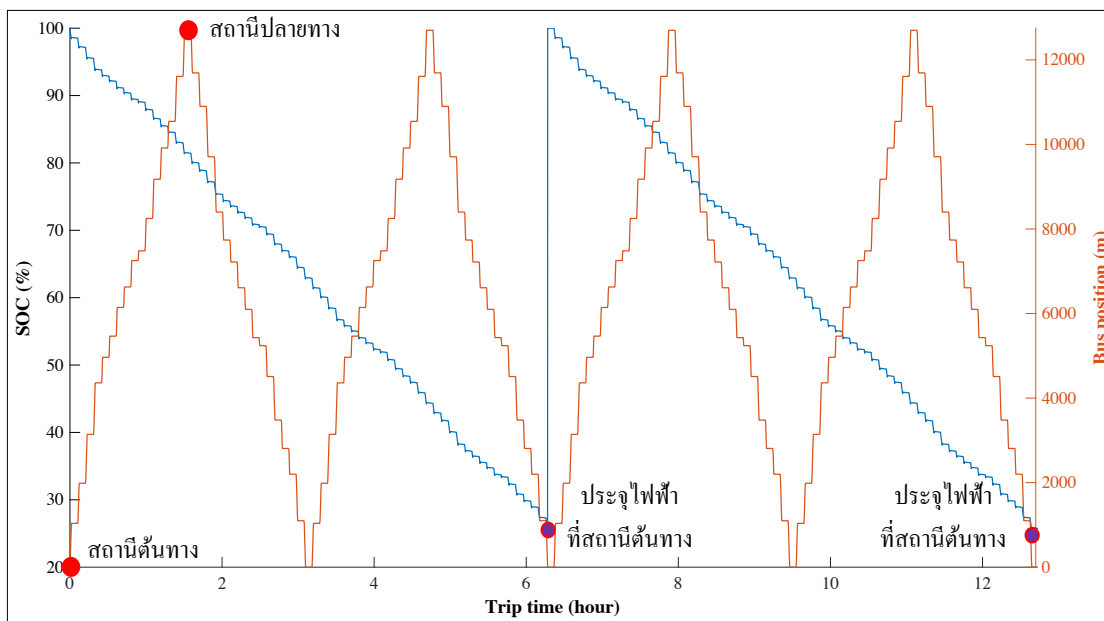
พารามิเตอร์	เส้นทางสายสีม่วง	เส้นทางสายสีเขียว	เส้นทางสายสีส้ม
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (kW)	186.5921	173.5080	160.2601
พลังงานไฟฟ้ารวม (kWh)	465.8496	433.1649	391.1960

4.3.3 กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

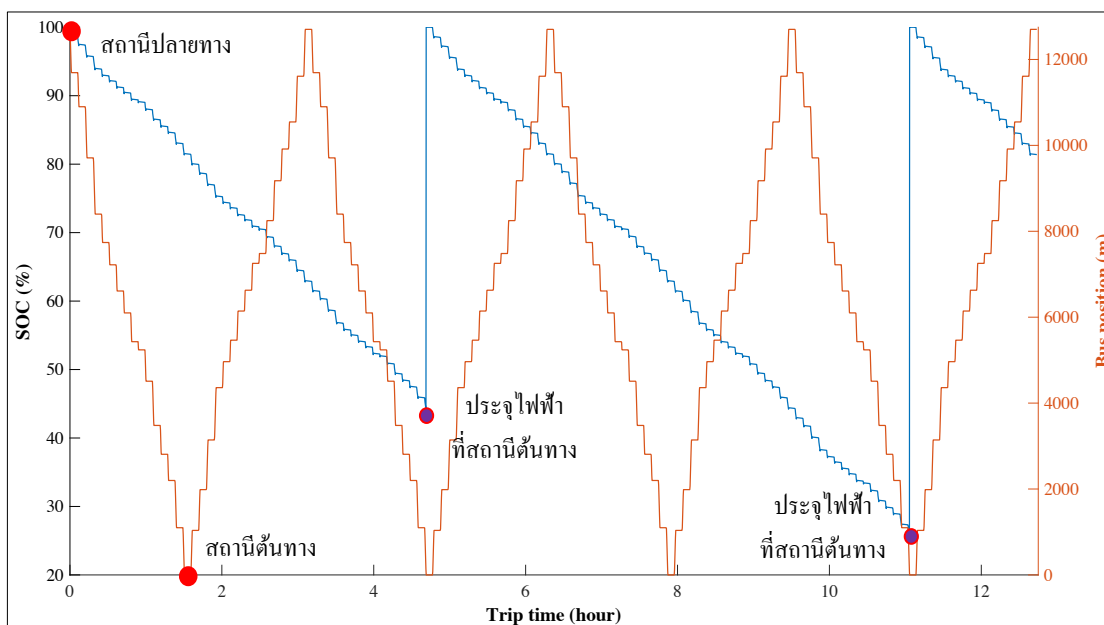
กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ โดยใช้รถบัสดำเนินการแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ โดยใช้การประจุไฟฟ้าแบบเร็ว ทำการประจุไฟฟ้าเมื่อรถบัสดำเนินการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ที่สถานีต้นทาง ซึ่งกำหนดให้มีสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่สถานีเดียว รถบัสดำเนินการให้บริการเที่ยวไป-กลับ 2 รอบ ต่อการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่หนึ่งครั้ง ดังนั้น สามารถคำนวณการใช้พลังงานและสถานะประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่รถบัสดำเนินการเที่ยวไปและเที่ยวกลับ ดังในรูปที่ 4.43 - 4.48

สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสดำเนินการเที่ยวไป สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ เส้นทางรถบัสดำเนินการสายสีม่วง แสดงในรูปที่ 4.43 ซึ่งใช้แบตเตอรี่ขนาด 80 kWh มีการใช้พลังงานในการประจุไฟฟ้าครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 คือ 59.48 kWh และ 59.40 kWh ตามลำดับ ดังนั้น การบริการในหนึ่งวันสถานะประจุไฟฟ้าคงเหลือในแบตเตอรี่ 25.76% หรือความจุคงเหลือของแบตเตอรี่ 20.6 kWh และจากรูปที่ 4.44 แสดงสถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสดำเนินการเที่ยวกลับ การใช้พลังงานสำหรับการประจุไฟฟ้าครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 คือ 44.63 kWh และ 54.34 kWh ตามลำดับ ความจุคงเหลือของแบตเตอรี่ในหนึ่งวัน 65.12 kWh

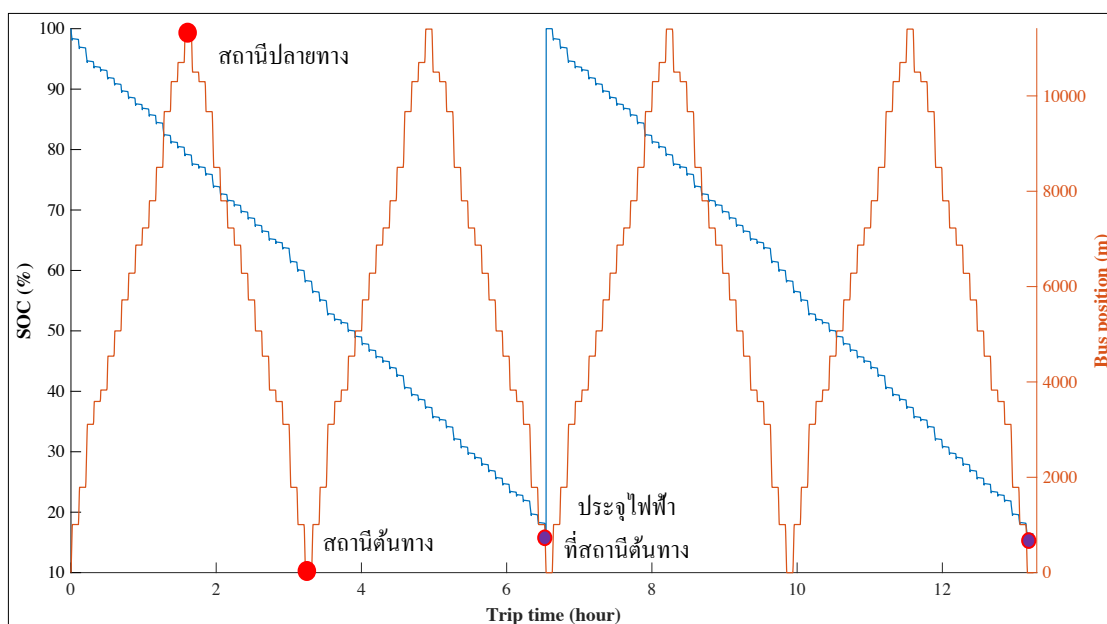
สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสดำเนินการเที่ยวไป สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ เส้นทางรถบัสดำเนินการสายสีเขียว แสดงในรูปที่ 4.45 ซึ่งใช้แบตเตอรี่ขนาด 65 kWh มีการใช้พลังงานในการประจุไฟฟ้าครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 คือ 54.42 kWh และ 54.34 kWh ตามลำดับ ดังนั้น การบริการในหนึ่งวันสถานะประจุไฟฟ้าคงเหลือในแบตเตอรี่ 16.40% หรือความจุคงเหลือของแบตเตอรี่ 10.66 kWh ก่อนประจุไฟฟ้าครั้งสุดท้าย จำนวนการประจุไฟฟ้า 2 ครั้ง/วัน และจากรูปที่ 4.46 แสดงสถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสดำเนินการเที่ยวกลับ การใช้พลังงานในการประจุไฟฟ้าครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 คือ 40.84 kWh และ 54.42 kWh ความจุคงเหลือของแบตเตอรี่เมื่อสิ้นสุดการให้บริการในหนึ่งวัน 51.42 kWh



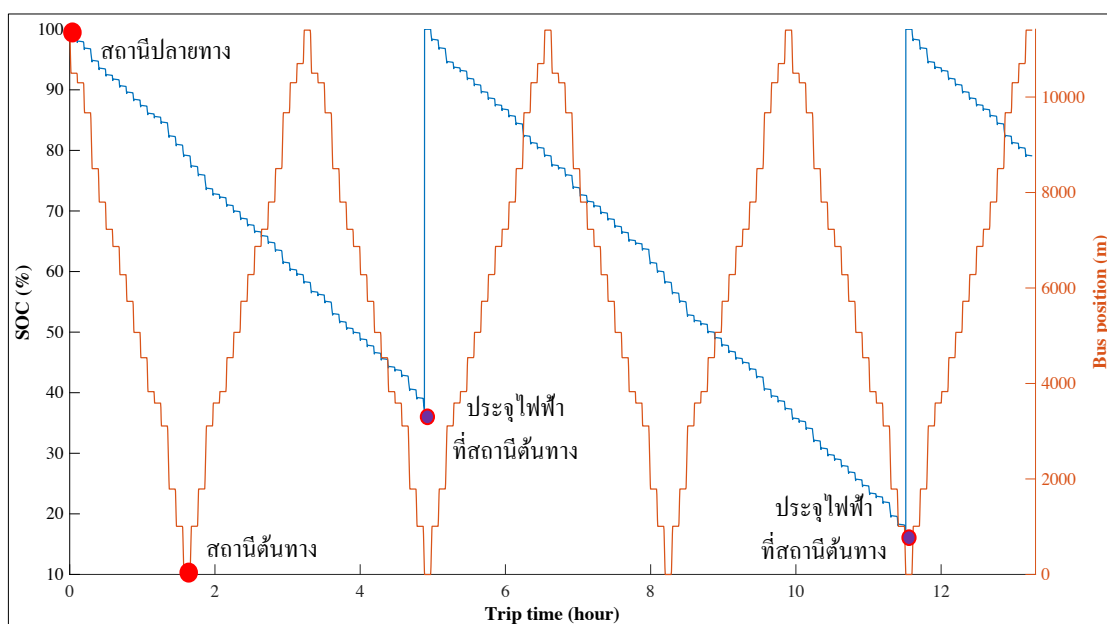
รูปที่ 4.43 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าเที่ยวไป เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่



รูปที่ 4.44 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าเที่ยวกลับ เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

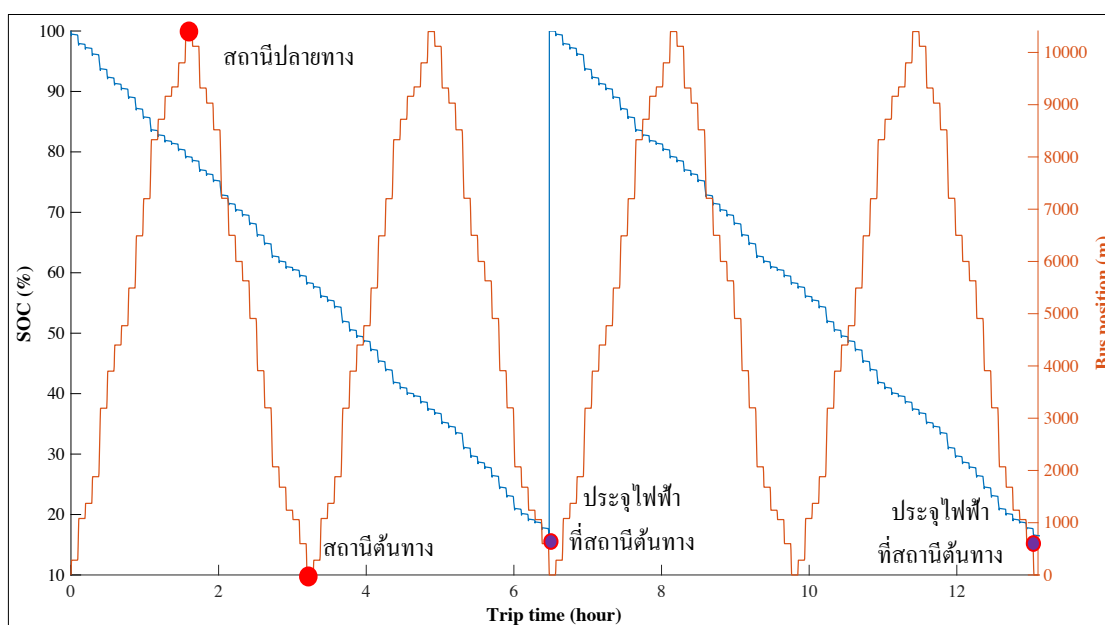


รูปที่ 4.45 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าเที่ยวไป เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

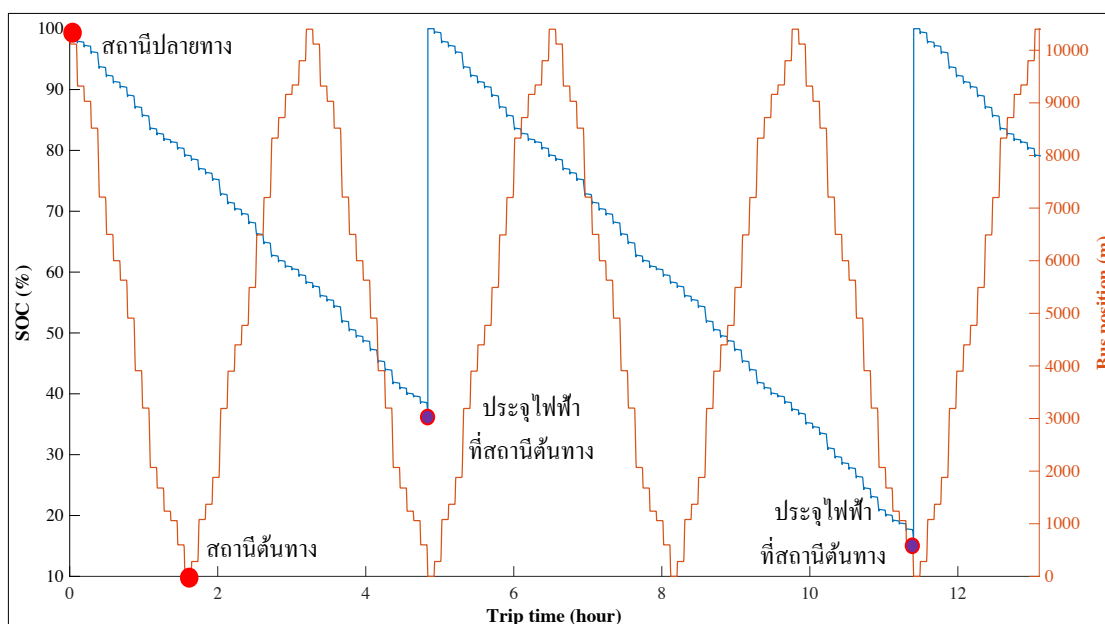


รูปที่ 4.46 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าเที่ยวกลับ เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าที่วิ่งไป สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม แสดงในรูปที่ 4.47 ซึ่งใช้แบตเตอรี่ขนาดความจุ 60 kWh มีการใช้พลังงานสำหรับการประจุไฟฟ้าครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 คือ 50.38 kWh และ 50.12 kWh ตามลำดับ ดังนั้น การบริการในหนึ่งวันสถานะประจุไฟฟ้าคงเหลือในแบตเตอรี่ 16.46% หรือความจุคงเหลือของแบตเตอรี่ก่อนประจุไฟฟ้าครั้งสุดท้าย 9.87 kWh จำนวนการประจุไฟฟ้า 2 ครั้งต่อวัน และจากรูปที่ 4.48 แสดงสถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าที่วิ่งกลับการใช้พลังงานในการประจุไฟฟ้าครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 คือ 37.67 kWh และ 50.20 kWh ความจุคงเหลือของแบตเตอรี่เมื่อสิ้นสุดการให้บริการในหนึ่งวัน 47.45 kWh



รูปที่ 4.47 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าที่วิ่งไป เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

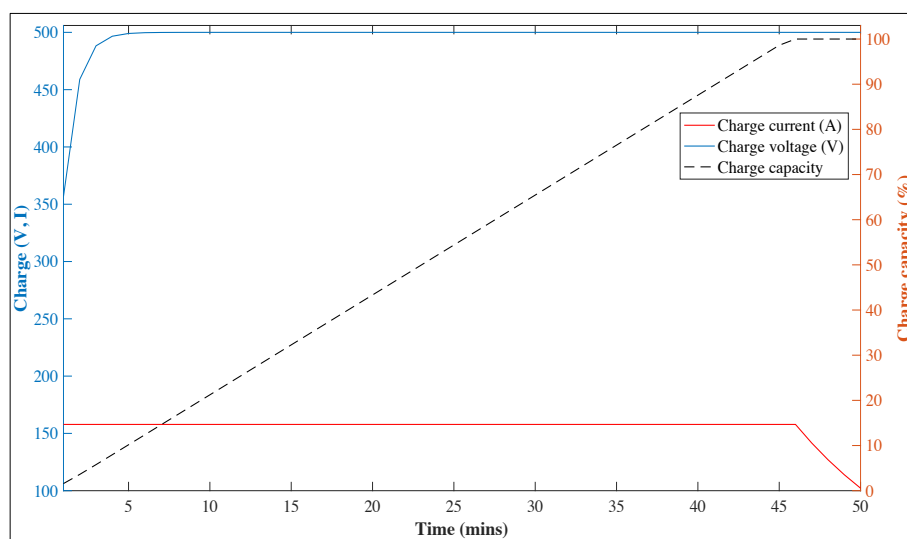


รูปที่ 4.48 สถานะประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้าเที่ยวกลับ เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

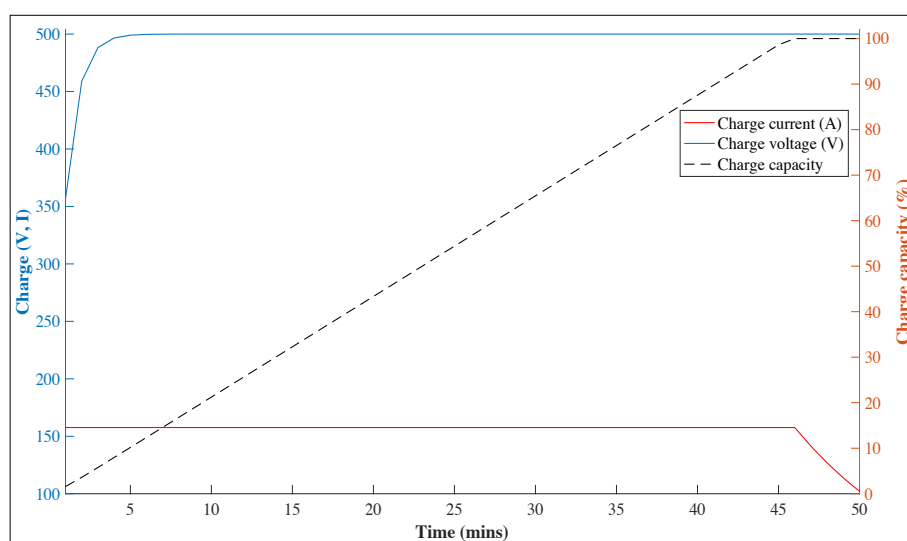
ตารางที่ 4.10 การใช้พลังงานของรถบัสไฟฟ้า กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

เส้นทาง	การประจุไฟฟ้า	พลังงานที่ใช้เที่ยวไป		พลังงานที่ใช้เที่ยวกลับ		ขนาดแบตเตอรี่
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	
สายสีม่วง	2 ครั้ง/วัน	59.48 kWh	59.40 kWh	44.63 kWh	54.37 kWh	80 kWh
สายสีเขียว	2 ครั้ง/วัน	54.42 kWh	54.34 kWh	40.84 kWh	54.42 kWh	65 kWh
สายสีส้ม	2 ครั้ง/วัน	50.38 kWh	50.12 kWh	37.67 kWh	50.20 kWh	60 kWh

ตารางที่ 4.10 การใช้พลังงานของรถบัสไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ โดยมีการประจุไฟฟ้า 2 ครั้งต่อวันต่อคันในทุกเส้นทาง จากการจำลองการใช้พลังงานของรถบัสไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่นั้น จึงนำค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการประจุไฟฟ้าไปจำลองลักษณะกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้าสำหรับทั้ง 3 เส้นทางกรณีศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 4.49-4.60

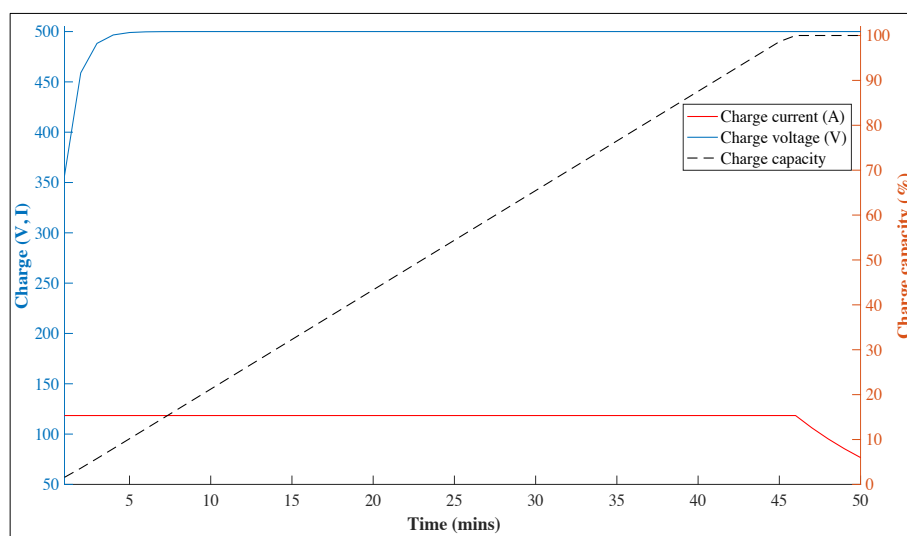


ก) การประจุไฟฟ้า ครั้งที่ 1

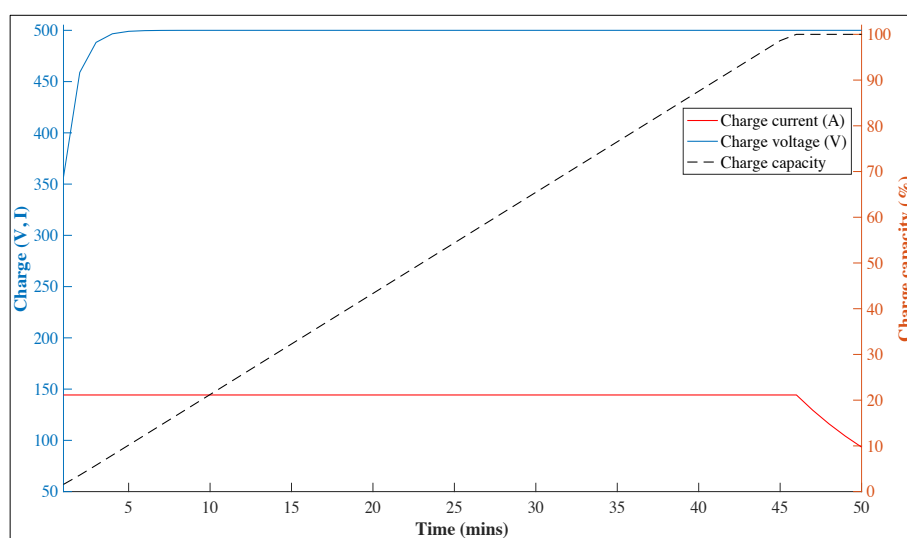


ข) การประจุไฟฟ้า ครั้งที่ 2

รูปที่ 4.49 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้าเที่ยวไป เส้นทางรอบัสไฟฟ้าสายสีม่วง
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

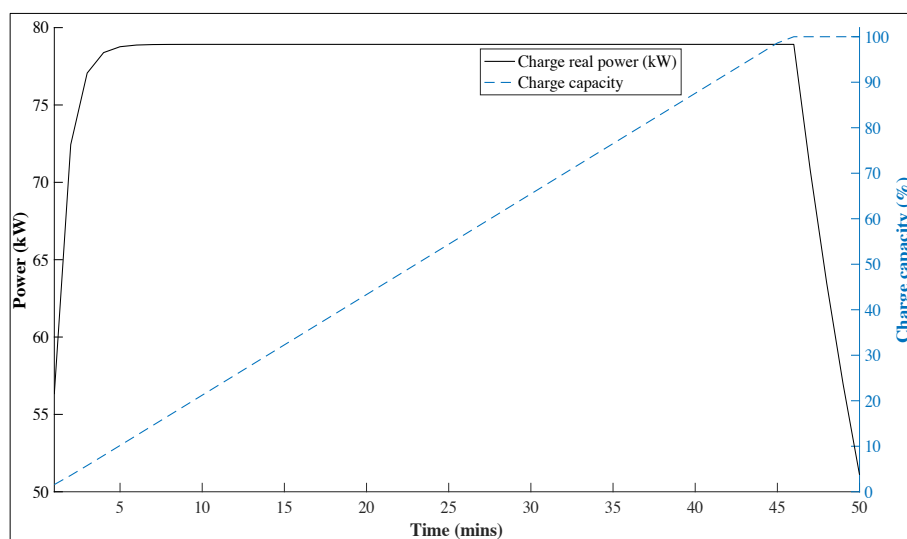


ก) การประจุไฟฟ้า ครั้งที่ 1

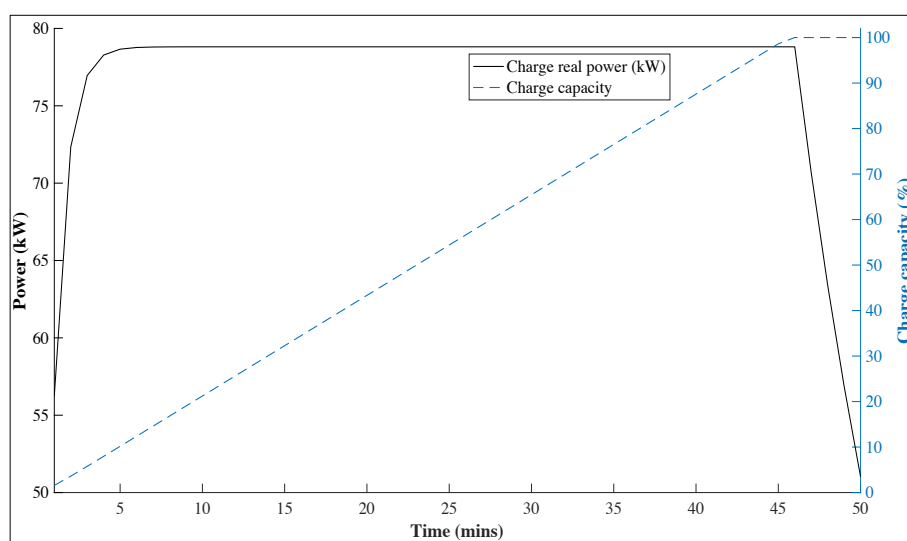


ข) การประจุไฟฟ้า ครั้งที่ 2

รูปที่ 4.50 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้าเทียวกลับ รถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

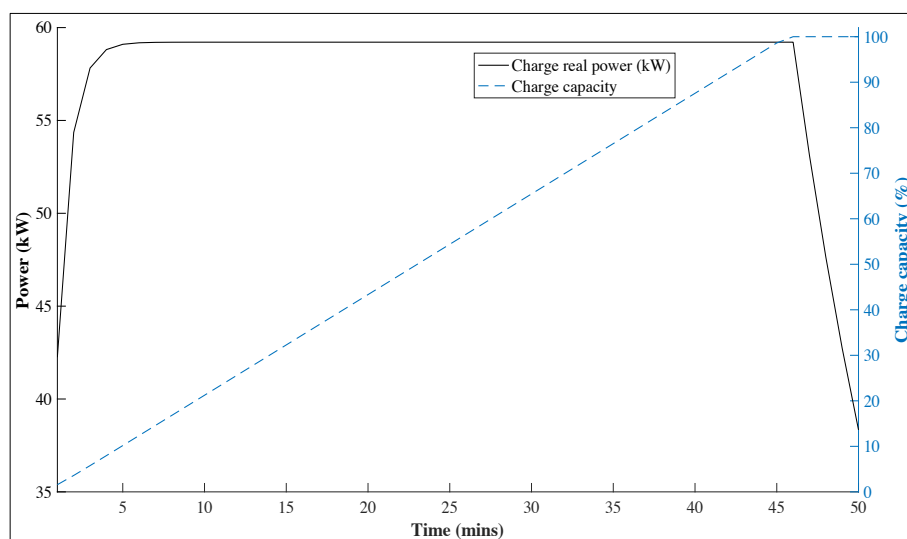


ก) การประจุไฟฟ้า ครั้งที่ 1

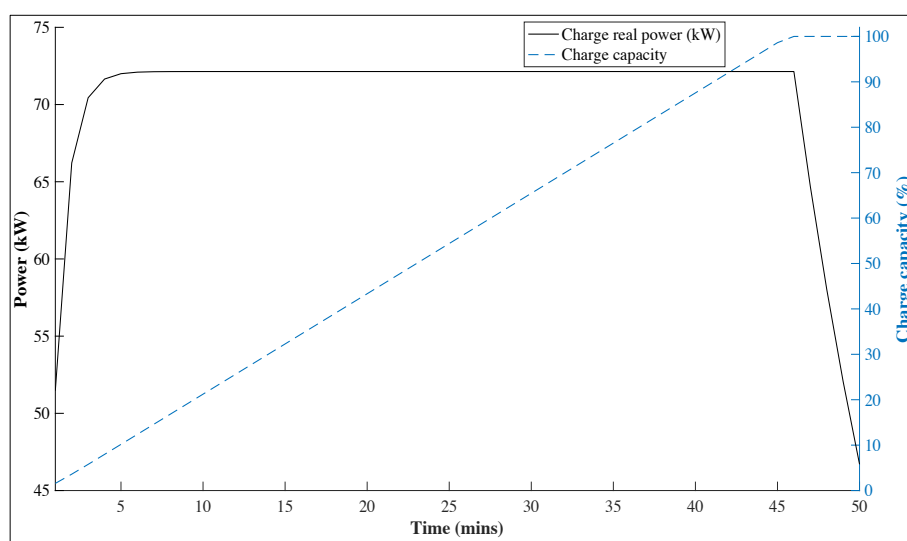


ข) การประจุไฟฟ้า ครั้งที่ 2

รูปที่ 4.51 ลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้าเที่ยวไป เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

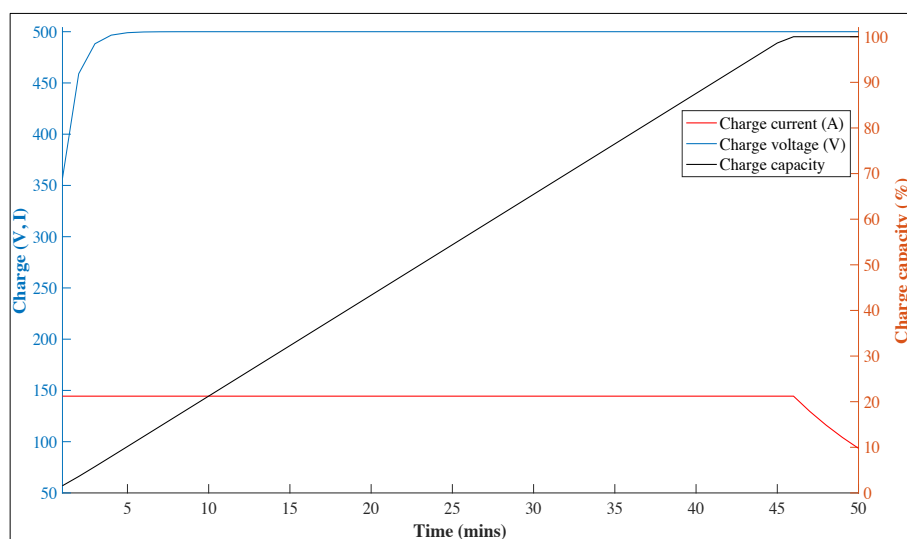


ก) การประจุไฟฟ้า ครั้งที่ 1

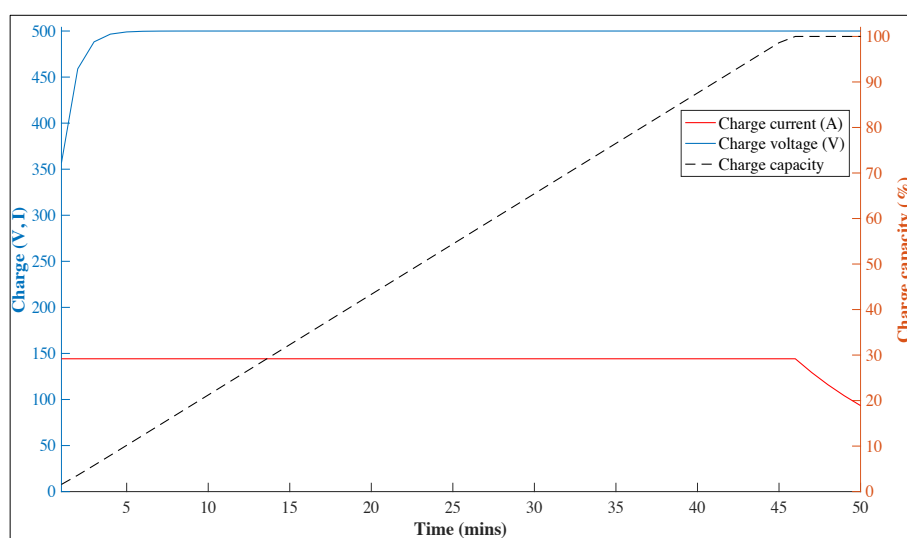


ข) การประจุไฟฟ้า ครั้งที่ 2

รูปที่ 4.52 ลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้าที่ขั้วกลับ เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

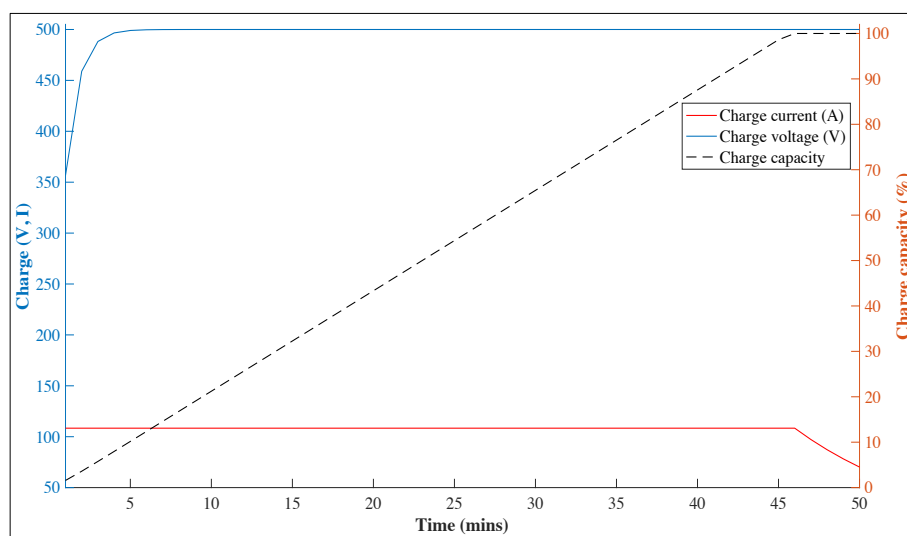


ก) การประจุไฟฟ้า ครั้งที่ 1

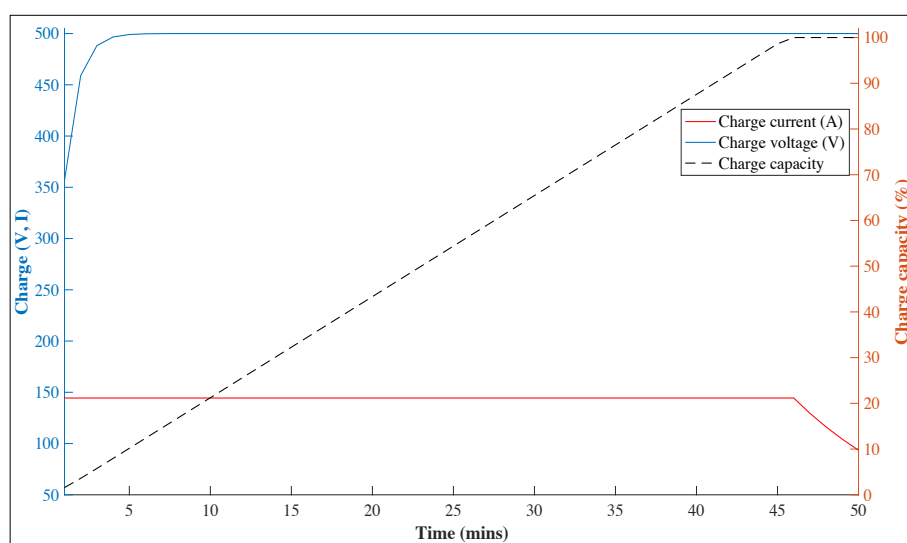


ข) การประจุไฟฟ้า ครั้งที่ 2

รูปที่ 4.53 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้าทั่วไป รถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

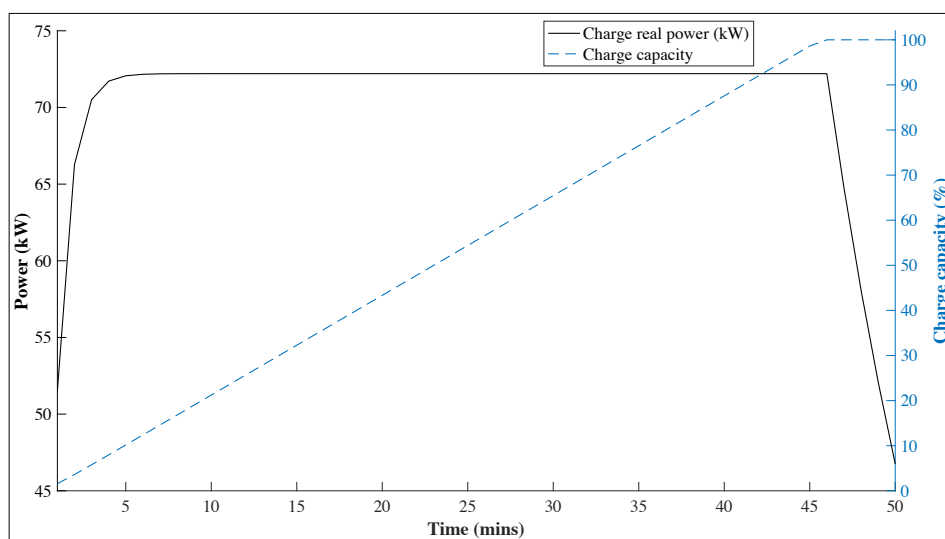


ก) การประจุไฟฟ้า ครั้งที่ 1

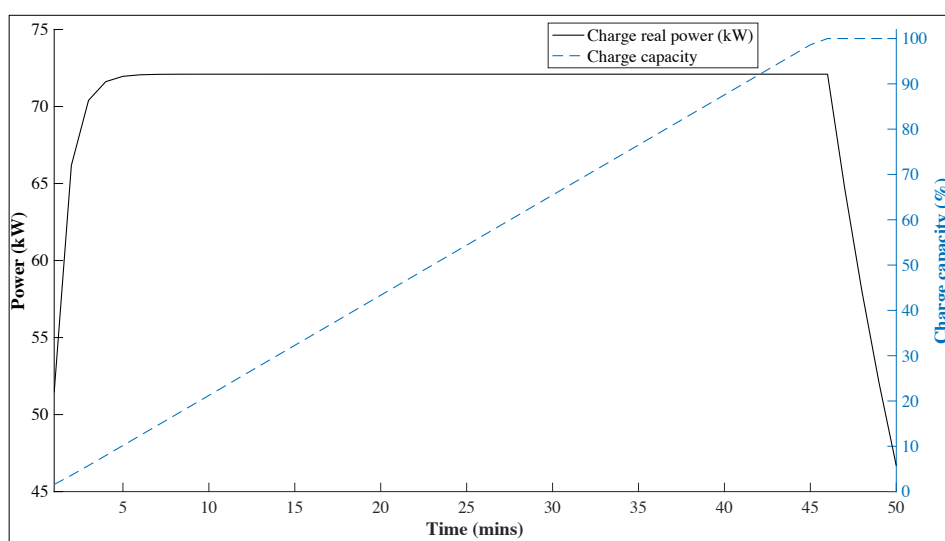


ข) การประจุไฟฟ้า ครั้งที่ 2

รูปที่ 4.54 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้าที่ขั้วกลับ รถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

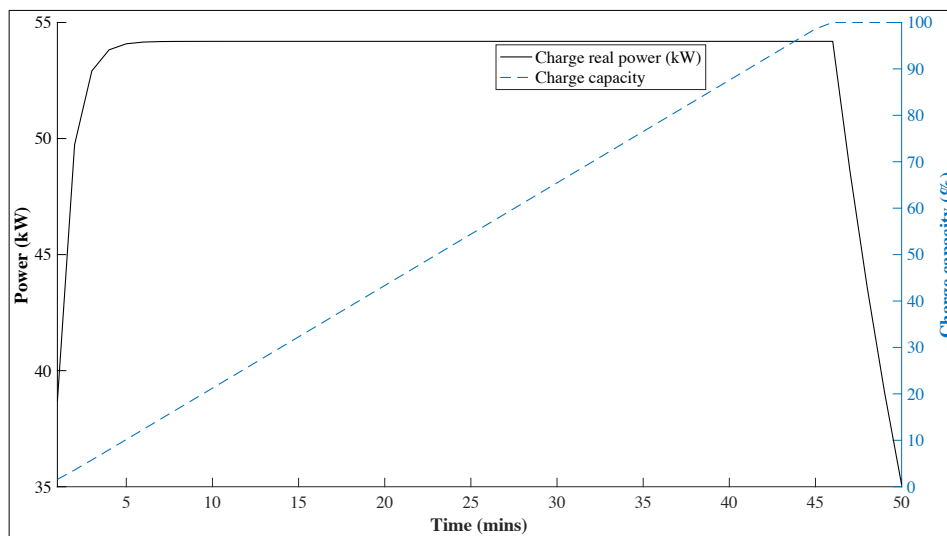


ก) การประจุไฟฟ้า ครั้งที่ 1

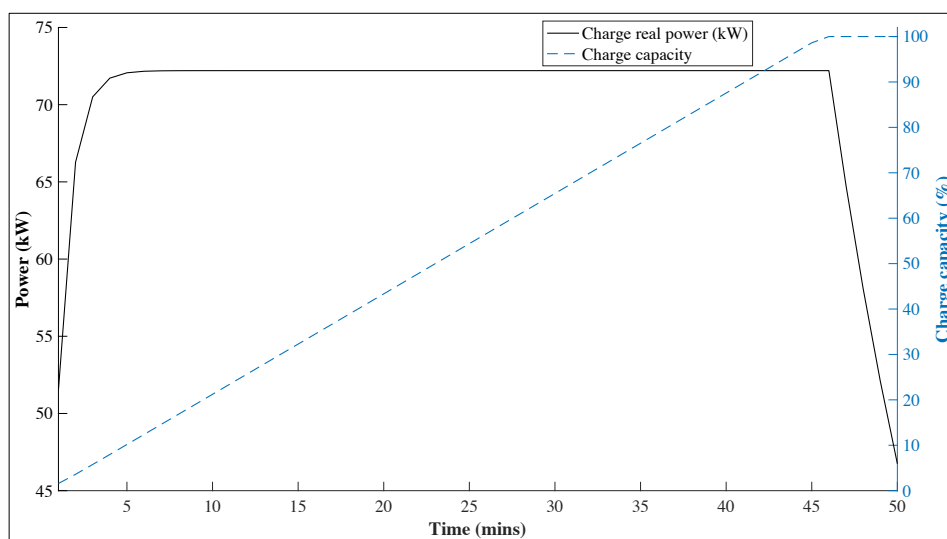


ข) การประจุไฟฟ้า ครั้งที่ 2

รูปที่ 4.55 ลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้าเที่ยวไป เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

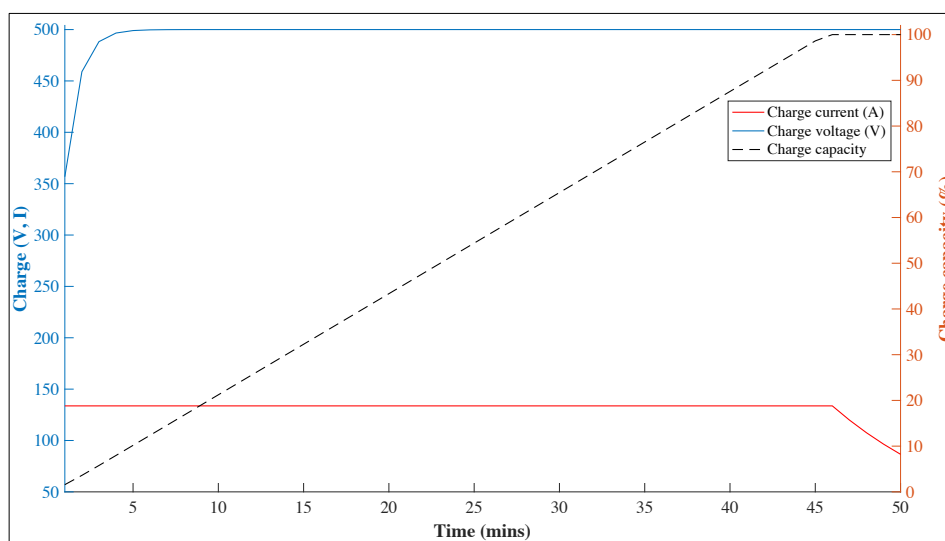


ก) การประจุไฟฟ้า ครั้งที่ 1

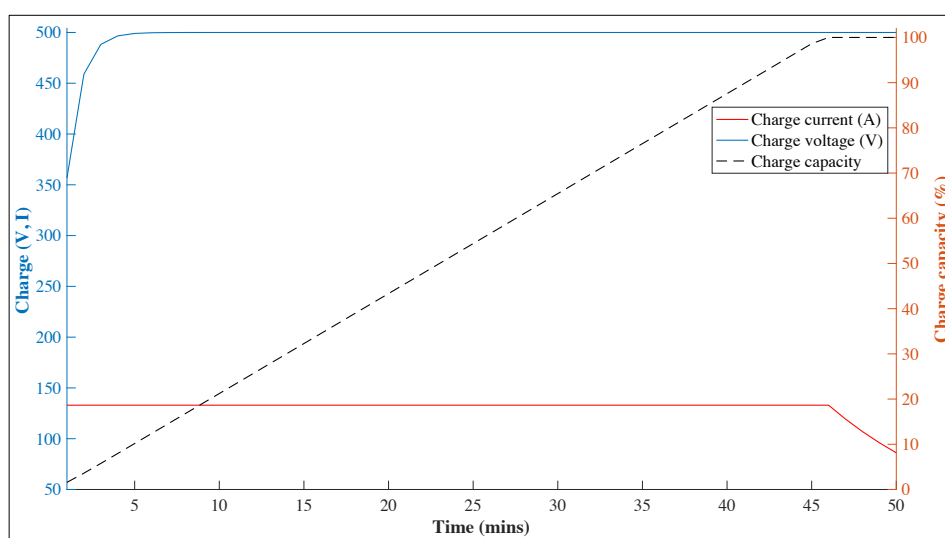


ข) การประจุไฟฟ้า ครั้งที่ 2

รูปที่ 4.56 ลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้าที่ขั้วกลับ เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

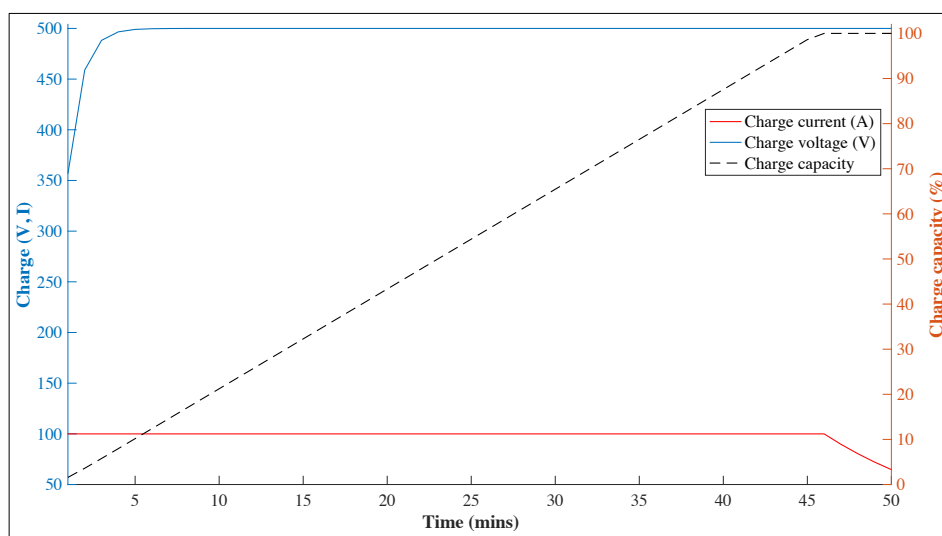


ก) การประจุไฟฟ้า ครั้งที่ 1

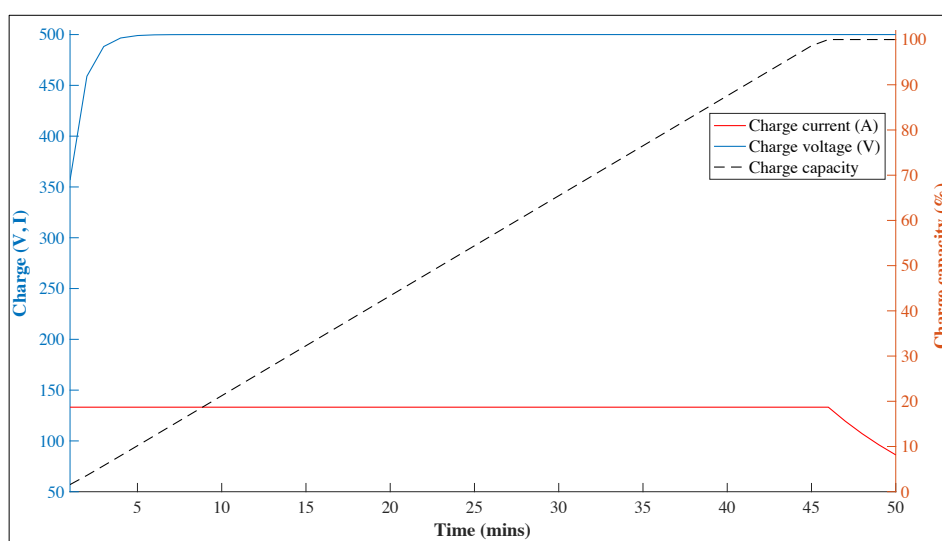


ข) การประจุไฟฟ้า ครั้งที่ 2

รูปที่ 4.57 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้าเที่ยวไป เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

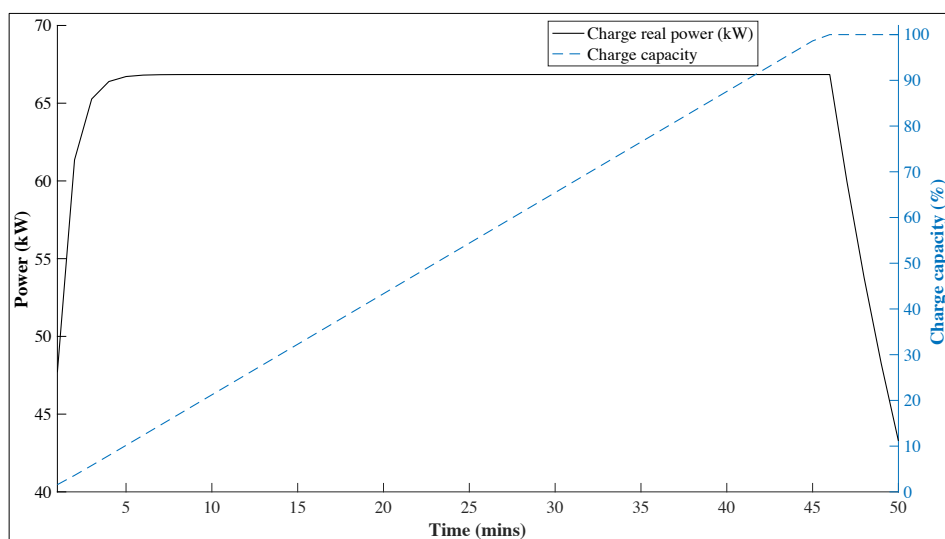


ก) การประจุไฟฟ้า ครั้งที่ 1

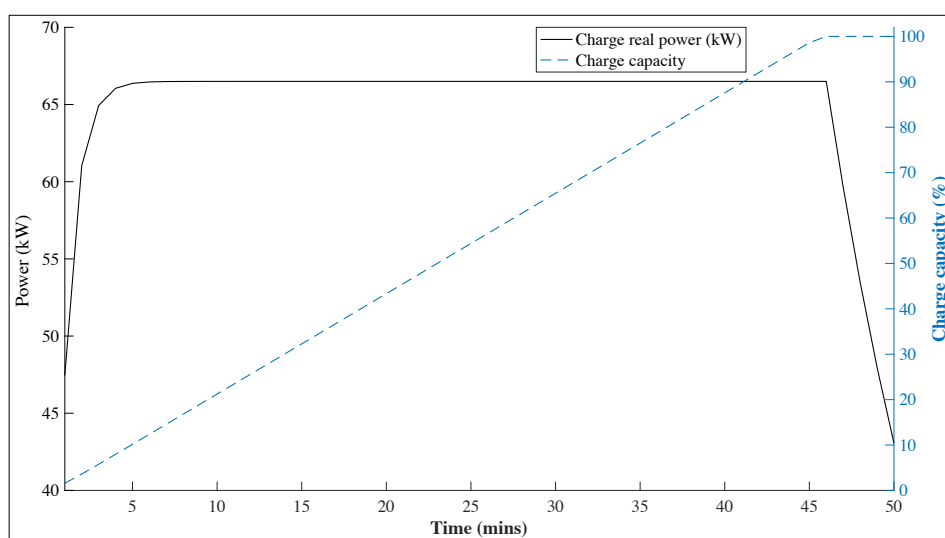


ข) การประจุไฟฟ้า ครั้งที่ 2

รูปที่ 4.58 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้าที่ขั้วกลับ รถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

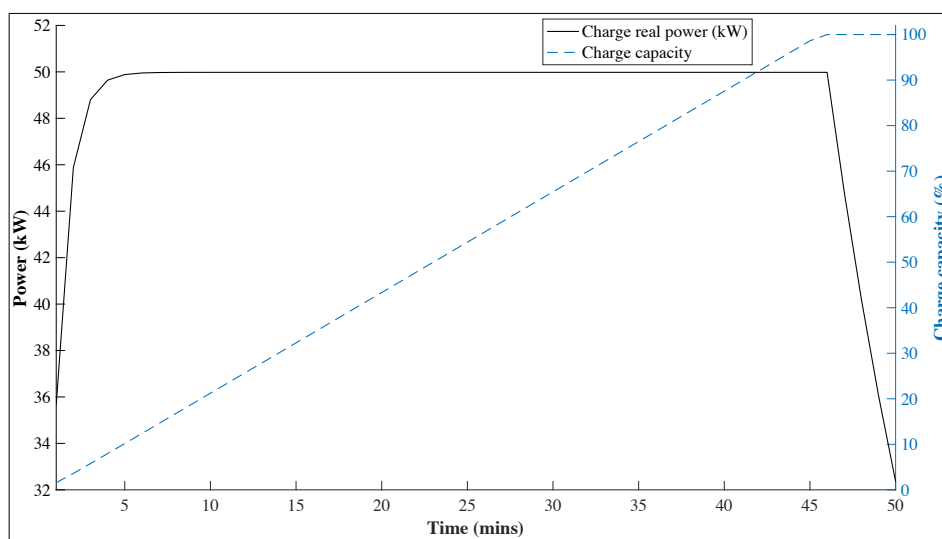


ก) การประจุไฟฟ้า ครั้งที่ 1

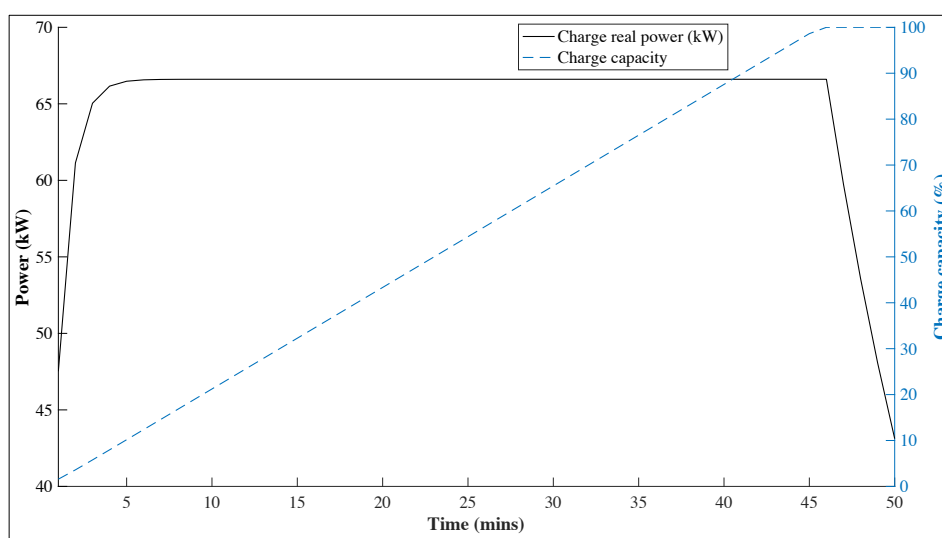


ข) การประจุไฟฟ้า ครั้งที่ 2

รูปที่ 4.59 ลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้าเทียวกว่ไป เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่



ก) การประจุไฟฟ้า ครั้งที่ 1



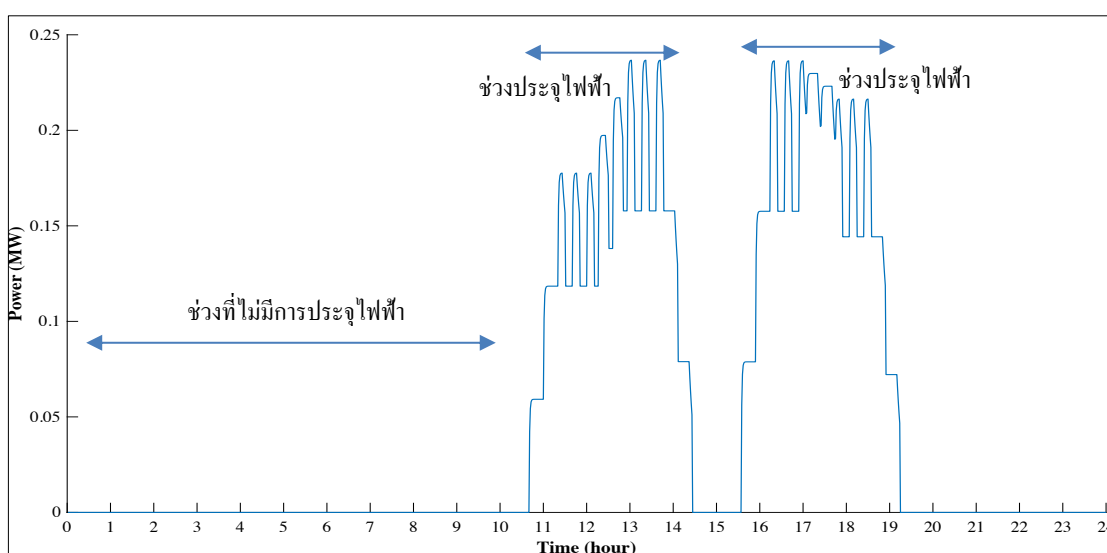
ข) การประจุไฟฟ้า ครั้งที่ 2

รูปที่ 4.60 ลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้าที่ขั้วกลับ เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

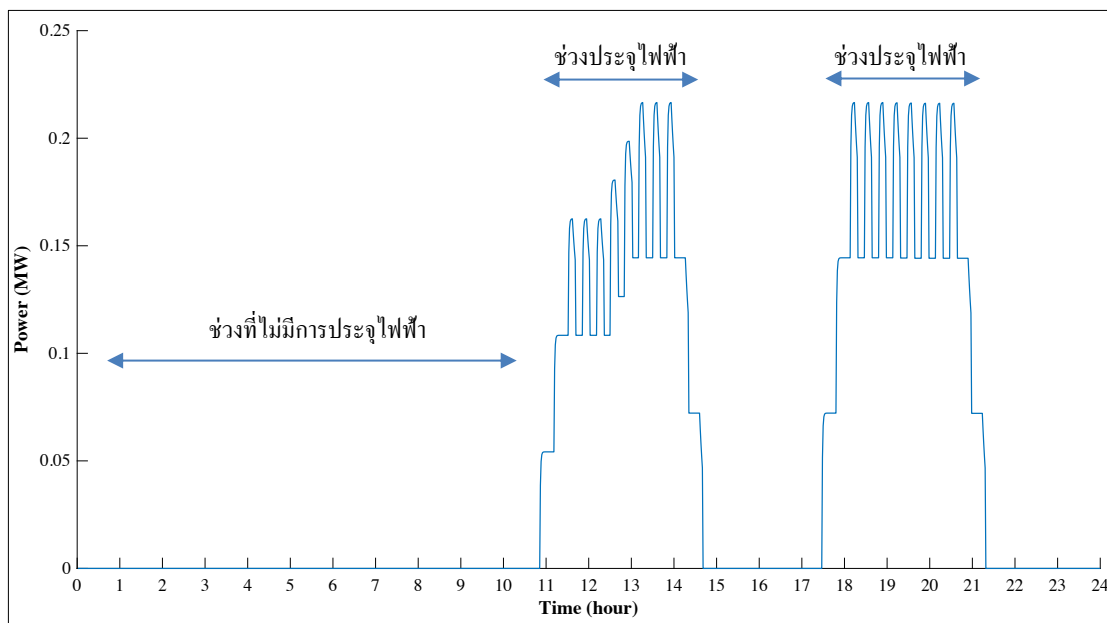
ตารางที่ 4.11 กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูงสุดขณะประจุไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้า ด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

เส้นทาง	แรงดันไฟฟ้า (V)	เที่ยวไป				เที่ยวกลับ			
		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2	
		I (A)	P (kW)	I (A)	P (kW)	I (A)	P (kW)	I (A)	P (kW)
สายสีม่วง	500	157.84	78.92	157.62	78.81	118.43	59.21	144.28	72.14
สายสีเขียว	500	144.41	72.20	144.20	72.10	108.37	54.19	144.41	72.20
สายสีส้ม	500	133.69	66.84	133.00	66.50	99.96	49.98	133.21	66.60

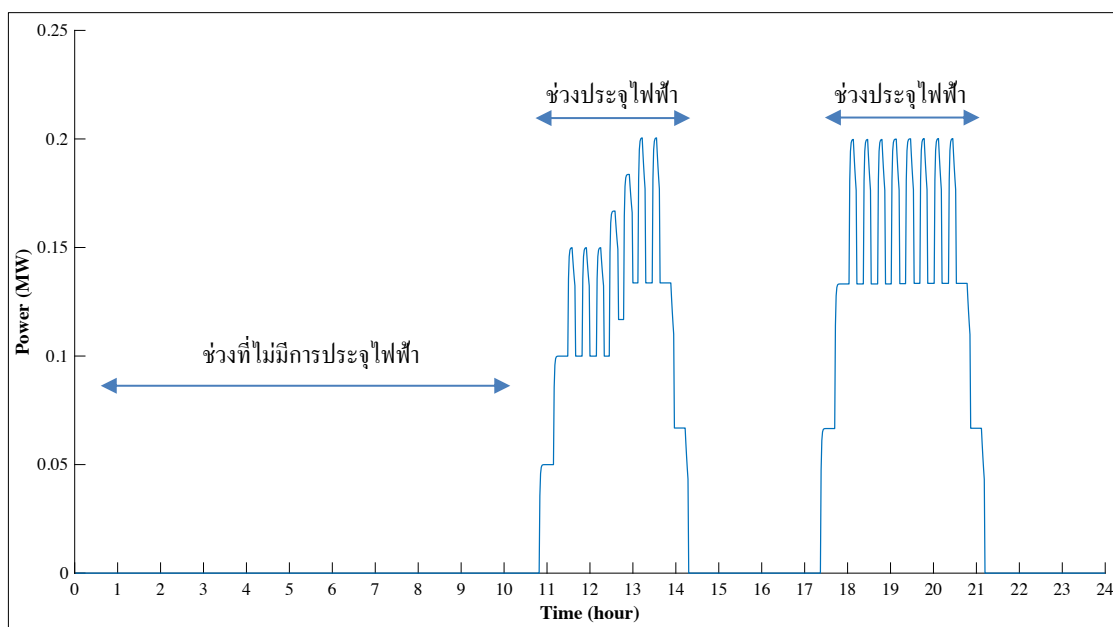
ตารางที่ 4.11 แสดงกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูงสุดขณะประจุไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ แรงดันไฟฟ้าที่ 500 V และมีการประจุไฟฟ้า 2 ครั้งต่อการให้บริการหนึ่งวัน ดังนั้น จะได้กราฟกำลังไฟฟ้ารวมของสถานีประจุไฟฟ้าเร็วที่สถานีต้นทาง ตามเส้นทางกรณีศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 4.61-4.63 ตารางที่ 4.12 แสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุดและพลังงานไฟฟ้ารวมสำหรับการประจุไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ กำหนดให้รถบัสไฟฟ้าทำการประจุไฟฟ้า 1 สถานี ที่สถานีต้นทาง ดังนั้น พลังงานไฟฟ้ารวมที่ใช้สำหรับประจุไฟฟ้า คือ 1,172.45 kWh 1,097.86 kWh และ 960.39 kWh ตามลำดับ



รูปที่ 4.61 ลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า ระบบรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่



รูปที่ 4.62 ลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า ระบบบรอดบัสไฟฟ้าสายลีสี่ขด
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่



รูปที่ 4.63 ลักษณะกำลังไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า ระบบบรอดบัสไฟฟ้าสายลีสี่ขด
สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

ตารางที่ 4.12 พลังงานไฟฟ้าสูงสุดสำหรับการประจุไฟฟ้าระบบรถบัไฟฟ้าในหนึ่งวัน
กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

พารามิเตอร์	เส้นทางสายสีม่วง	เส้นทางสายสีเขียว	เส้นทางสายสีส้ม
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (kW)	236.71	216.57	200.49
พลังงานไฟฟ้ารวม (kWh)	1,172.45	1,097.86	960.39

ตารางที่ 4.12 แสดงพลังงานไฟฟ้าสูงสุดสำหรับการประจุไฟฟ้าระบบรถบัไฟฟ้าที่ให้บริการในหนึ่งวัน โดยใช้กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ ซึ่งมีกำลังไฟฟ้าสูงสุดตามเส้นทางกรณีศึกษาที่ 236.71 kW 216.57 kW และ 200.49 kW ตามลำดับ เมื่อได้ผลการจำลองการประจุไฟฟ้าของรถบัไฟฟ้าแต่ละประเภทและแต่ละเส้นทางกรณีศึกษาแล้ว ผู้วิจัยจึงนำผลการจำลองนี้ไปจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้าของระบบรถบัไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าในหัวข้อถัดไป

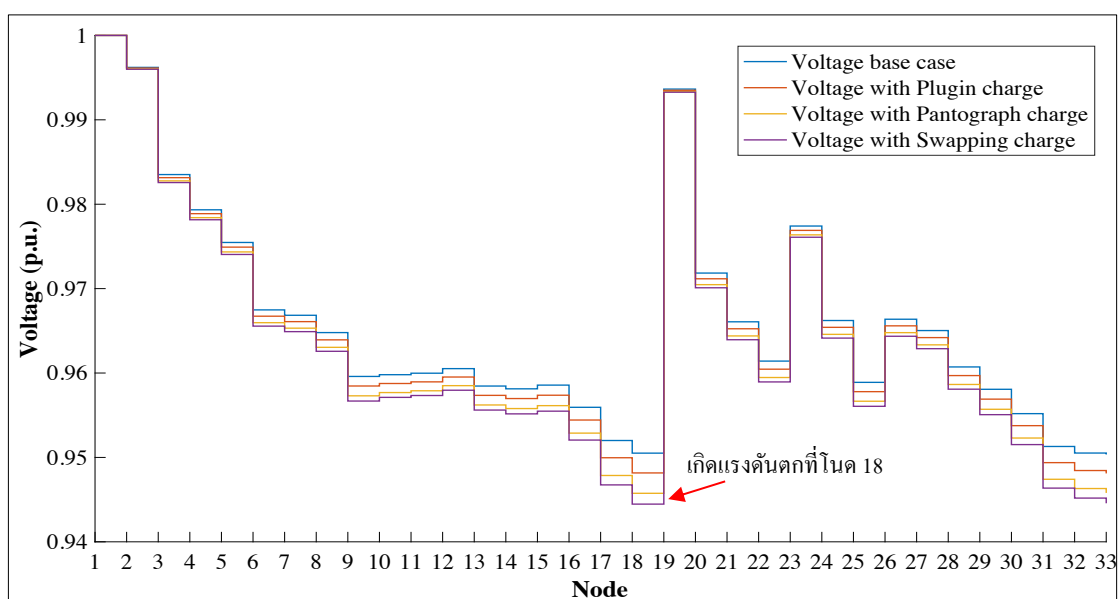
4.4 ผลการจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า

การจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะแบ่งผลการจำลองออกเป็น 2 หัวข้อหลัก ๆ คือ ผลการจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด และผลการจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งการจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด จะเป็นการจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้า โดยใช้โหลดการประจุไฟฟ้าสูงสุดของแต่ละรูปแบบการประจุไฟฟ้าเป็นโหลดการประจุไฟฟ้าของระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด โดยใช้โหลดการประจุไฟฟ้าของเส้นทางรถบัไฟฟ้าสายสีม่วง การจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา จะใช้โหลดการประจุไฟฟ้าของรถบัไฟฟ้าแบบไดนามิกส์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นโหลดการประจุไฟฟ้าของระบบ ผลการจำลองจะถูกอธิบายดังต่อไปนี้

4.4.1 ผลการจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด

ผลการจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อเชื่อมต่อกับสถานีประจุไฟฟ้าของรถบัไฟฟ้าเข้ากับระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบผลกระทบของการประจุไฟฟ้าของระบบรถบัไฟฟ้าทั้ง 3 รูปแบบ ต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า ได้แก่ โหลดการประจุไฟฟ้าแบบปลั๊ก

91.90 kW โหลดการประจุไฟฟ้าเร็วแบบแบนโทกราฟ 186.59 kW และโหลดการประจุไฟฟ้าเร็วสำหรับรถบัสไฟฟ้าแบบสลับเปลี่ยนแบตเตอรี่ 236.71 kW ในสภาวะปกติค่าระดับแรงดันไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ระหว่าง 1.05 p.u.-0.95 p.u. หลังจากเชื่อมต่อโหลดการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าบนโนดที่ 18 แสดงให้เห็นว่าเกิดแรงดันไฟฟ้าตก ดังแสดงในรูปที่ 4.64



รูปที่ 4.64 รูปแบบแรงดันไฟฟ้าเมื่อเชื่อมต่อกับโหลดการประจุไฟฟ้า

ตารางที่ 4.13 ผลการจำลองผลกระทบการประจุไฟฟ้า โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด

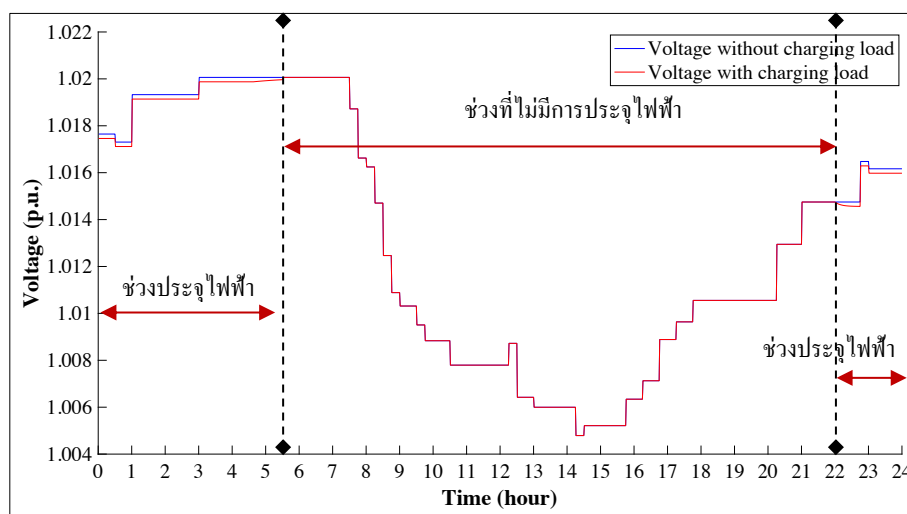
กรณีศึกษา (โหลดการประจุไฟฟ้า)	แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด (p.u.)	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (p.u.)	กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (MW)
สภาวะปกติ	0.9503	0.9655	0.1222
รถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน	0.9481	0.9644	0.1302
รถบัสไฟฟ้าแบบแบนโทกราฟ	0.9457	0.9634	0.1389
รถบัสไฟฟ้าแบบเปลี่ยนแบตเตอรี่	0.9445	0.9628	0.1436

ตารางที่ 4.13 แสดงผลการจำลองผลกระทบของการเชื่อมต่อโหลดการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าบนระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด แสดงให้เห็นว่าในสภาวะปกติที่ไม่มีโหลดการประจุไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 0.9503 p.u. แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 0.9655 p.u. และกำลังไฟฟ้าสูญเสีย

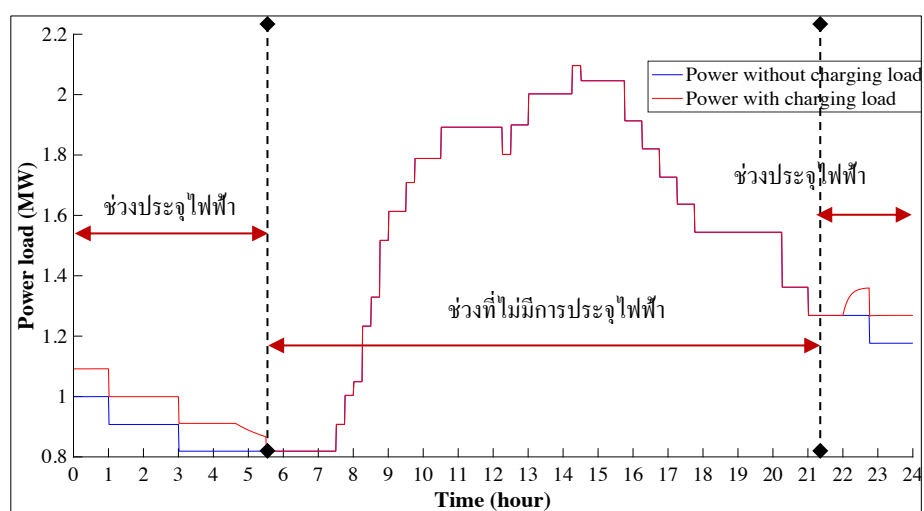
0.1222 MW หลังจากเชื่อมต่อโหลดประจุไฟฟ้าแบบทั่วไป รถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน ที่โนด 18 ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตก 0.9481 p.u. แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 0.9644 p.u. และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย 0.1302 MW และเมื่อเชื่อมต่อโหลดประจุไฟฟ้าแบบเร็วยังรถบัสไฟฟ้าแบบแพนโทกราฟ ที่โนด 18 แสดงให้เห็นว่า เกิดแรงดันตก 0.9457 p.u. แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 0.9634 p.u. และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย 0.1389 MW และเมื่อเชื่อมต่อโหลดประจุไฟฟ้าแบบเร็ว รถบัสไฟฟ้าแบบเปลี่ยนแบตเตอรี่ แสดงให้เห็นว่าเกิดแรงดันไฟฟ้าตก 0.9445 p.u. แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย 0.9628 p.u. และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียมากที่สุด 0.1436 MW ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเชื่อมต่อโหลดการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าเข้ากับระบบทดสอบทำให้เกิดแรงดันตกในระบบและเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียมากขึ้น

4.4.2 ผลการจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา

ผลการจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา เป็นการศึกษา โดยใช้เส้นทางกรณีศึกษา 3 เส้นทาง และใช้กลยุทธ์การประจุไฟฟ้า 3 รูปแบบ คือ กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไปที่ต้นทางและปลายทาง กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแพนโทกราฟ และกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ โดยมีวงจรไฟฟ้าที่นำมาศึกษา 5 วงจร ตามเส้นทางกรณีศึกษา ดังที่ได้อธิบายในบทที่ 3 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบรถบัสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากรณีศึกษา เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง แสดงในรูปที่ 4.65-4.69 รูปที่ 4.65 แสดงผลกระทบจากการประจุไฟฟ้าระบบรถบัสไฟฟ้า วงจรไฟฟ้า NRB06 สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง รูปที่ 4.65 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้าโดยมีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 1.0048 p.u. (สถานะปกติ 1.0048 p.u.) ซึ่งไม่มีความเปลี่ยนแปลงรูปที่ 4.65 (ข) แสดงกำลังไฟฟ้าเมื่อมีโหลดประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่ามีพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มมากขึ้น 0.6076 MWh (สถานะปกติ 0.6072 MWh) รูปที่ 4.65 แสดงผลกระทบการประจุไฟฟ้าระบบรถบัสไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแพนโทกราฟ รูปที่ 4.66 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 1.0047 p.u. ซึ่งมีความเปลี่ยนแปลงไม่มาก รูปที่ 4.66 (ข) แสดงกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าเมื่อมีโหลดประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น 0.6077 MWh รูปที่ 4.67 แสดงผลกระทบการประจุไฟฟ้าระบบรถบัสไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ รูปที่ 4.67 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดขณะรถบัสประจุไฟฟ้า 1.0046 p.u. รูปที่ 4.67 (ข) แสดงกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าเมื่อมีโหลดประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น 0.6083 MWh

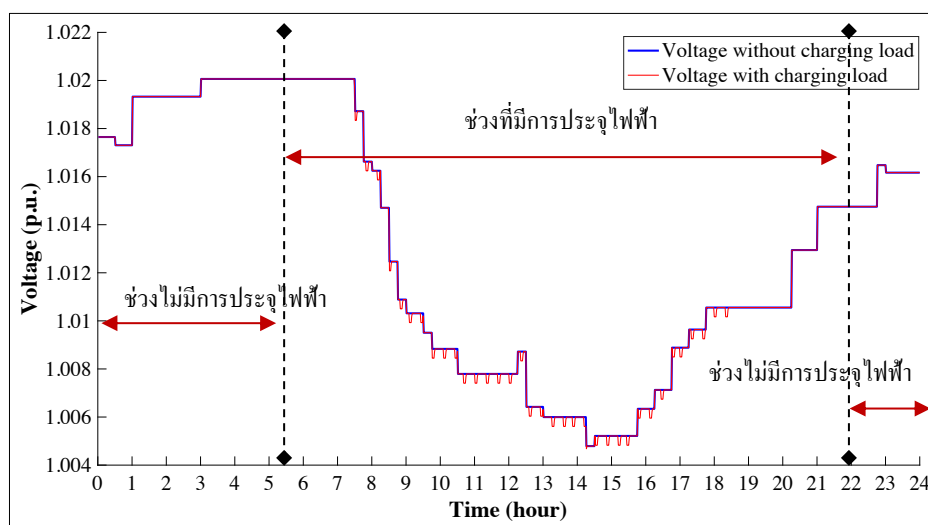


ก) แรงดันไฟฟ้า

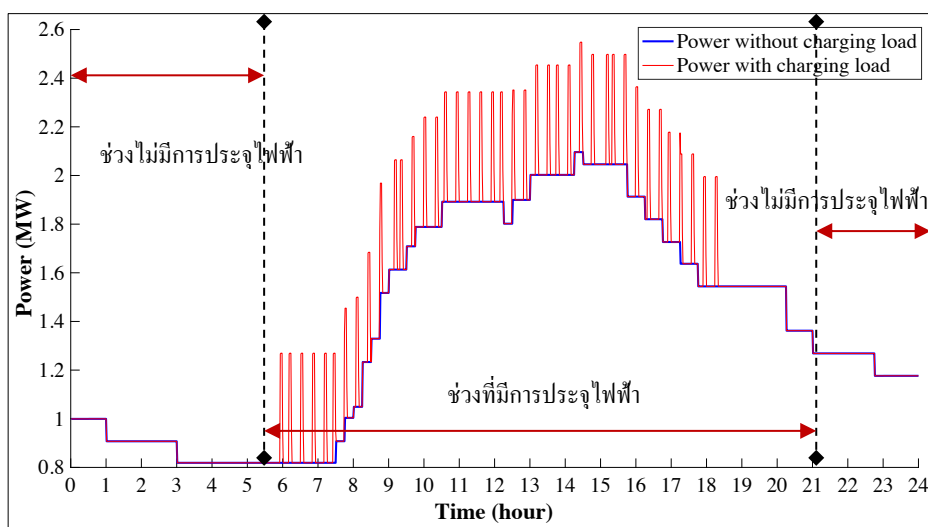


ข) กำลังไฟฟ้าของโหลด

รูปที่ 4.65 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบระบบไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRB06 สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไปที่ต้นทางและปลายทาง เส้นทางระบบไฟฟ้าสายสีม่วง

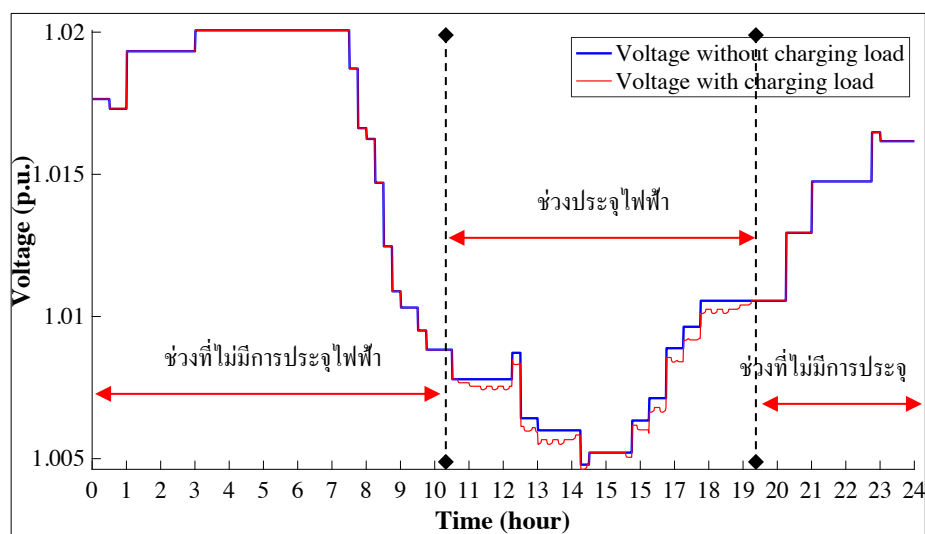


ก) แรงดันไฟฟ้า

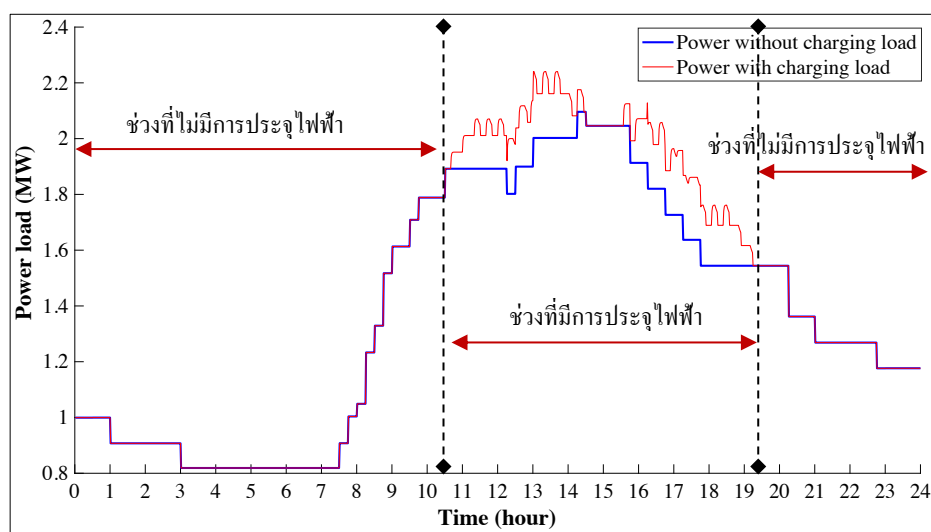


ข) กำลังไฟฟ้าของโหลด

รูปที่ 4.66 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบระบบไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRB06 สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ เส้นทางระบบไฟฟ้าสายสีม่วง

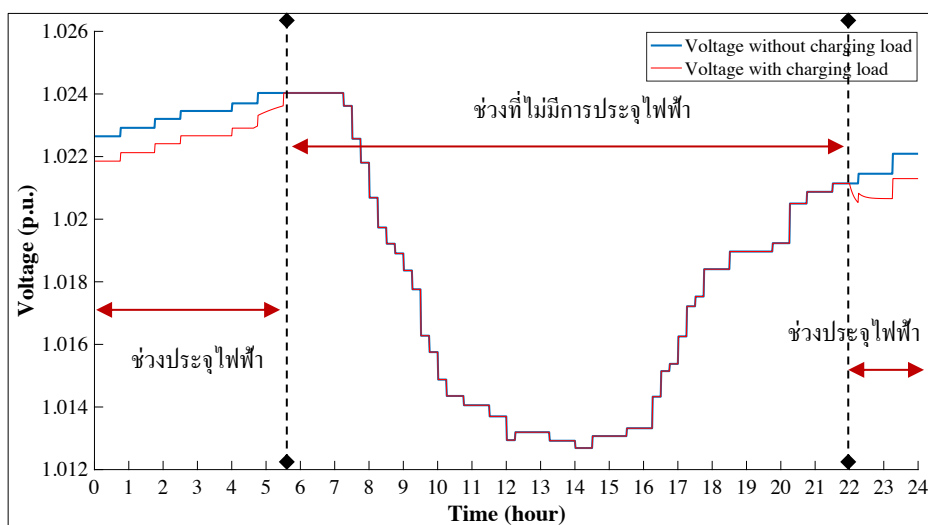


ข) แรงดันไฟฟ้า

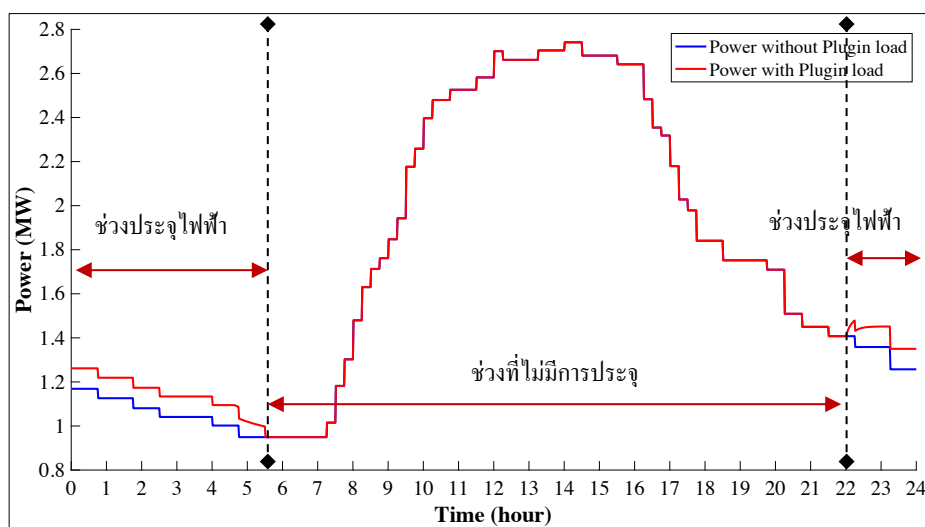


ก) กำลังไฟฟ้าของโหลด

รูปที่ 4.67 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบบัสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRB06 สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ เส้นทางบัสไฟฟ้าสายสีม่วง

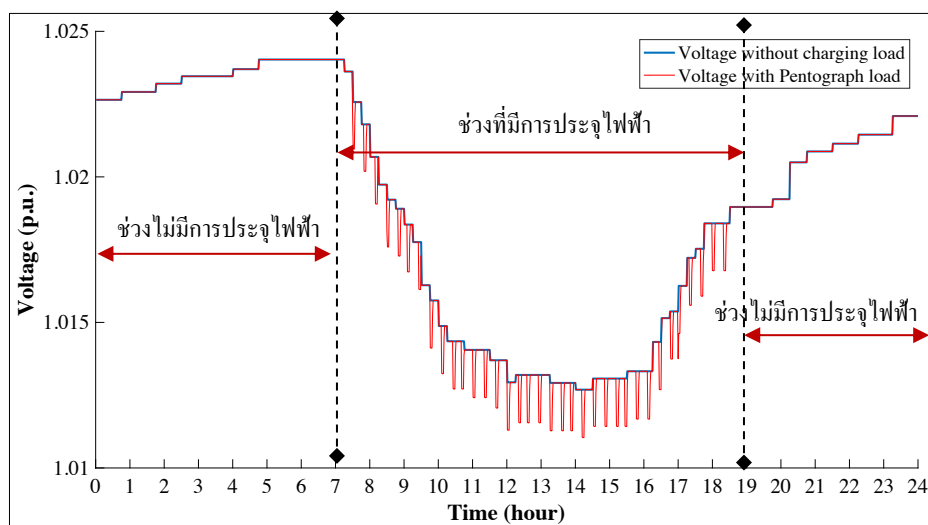


ก) แรงดันไฟฟ้า

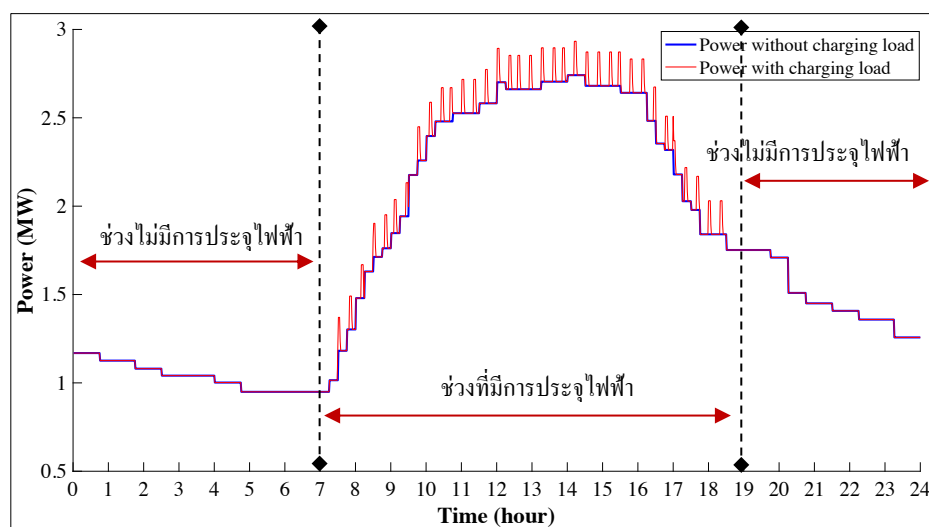


ข) กำลังไฟฟ้าของโหลด

รูปที่ 4.68 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบรถบัสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRD09 สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไปที่ต้นทางและปลายทาง เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง



ก) แรงดันไฟฟ้า



ข) กำลังไฟฟ้าของโหลด

รูปที่ 4.69 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบรถบัไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRD09 สำหรับกลยุทธ์
การประจุไฟฟ้าเร็วแบบเพนโทกราฟ เส้นทางรถบัไฟฟ้าสายสีม่วง

ผลการจำลองผลกระทบจากการประจุไฟฟ้าระบบบัสไฟฟ้า วงจรไฟฟ้า NRD09 สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง แสดงในรูปที่ 4.68 รูปที่ 4.68 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 1.0127 p.u. (สถานะปกติ 1.0127 p.u.) ซึ่งไม่มีความเปลี่ยนแปลง รูปที่ 4.68 (ข) แสดงกำลังไฟฟ้าเมื่อมีโหลดประจุไฟฟ้าของระบบบัสไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มมากขึ้น 0.8178 MWh (สถานะปกติ 0.7988 MWh) รูปที่ 4.69 แสดงผลกระทบการประจุไฟฟ้าระบบบัสไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ รูปที่ 4.69 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 1.0110 p.u. รูปที่ 4.69 (ข) แสดงกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าเมื่อมีโหลดประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น 0.8281 MWh

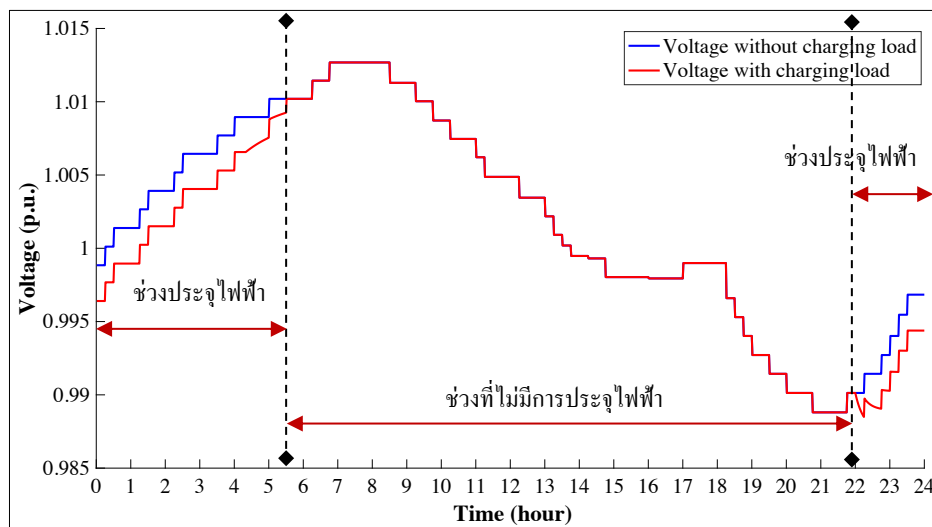
ตารางที่ 4.14 แสดงผลการจำลองผลกระทบการประจุไฟฟ้า สำหรับระบบบัสไฟฟ้าสายสีม่วง ในวงจรไฟฟ้า NRB06 ในสถานะปกติ แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 1.0048 p.u. และกำลังไฟฟ้าสูญเสีย 0.6072 MWh/วัน หลังจากติดตั้งโหลดการประจุไฟฟ้าของระบบบัสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 1.0046 p.u. ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของแรงดันไฟฟ้า แต่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าสูงสุด 0.6083 MWh/วัน เมื่อเชื่อมต่อโหลดการประจุไฟฟ้าแบบเร็ว สำหรับระบบบัสแบบสับเปลี่ยนเบตเตอร์ สำหรับวงจรไฟฟ้า NRD09 เป็นการประจุไฟฟ้าของระบบบัสไฟฟ้าที่ปลายทาง ในสถานะปกติ แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 1.0127 p.u. และกำลังไฟฟ้าสูญเสีย 0.7988 MWh/วัน หลังจากติดตั้งโหลดประจุไฟฟ้าของระบบบัสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 1.0110 p.u. ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของแรงดันไฟฟ้า แต่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงสุด 0.8281 MWh/วัน เมื่อเชื่อมต่อโหลดการประจุไฟฟ้าแบบเร็ว

ตารางที่ 4.14 ผลการจำลองผลกระทบการประจุไฟฟ้า สำหรับระบบบัสไฟฟ้าสายสีม่วง

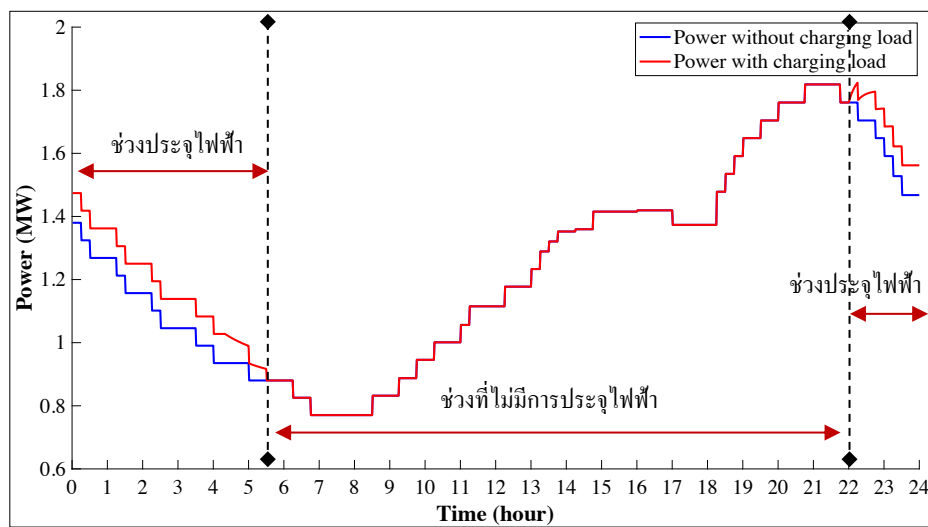
วงจรไฟฟ้า	กรณีศึกษา	แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด (p.u.)	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (p.u.)	กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (MWh/วัน)
NRB06 (โนด 5)	สถานะปกติ	1.0048	1.0131	0.6072
	ปลั๊กอิน	1.0048	1.0131	0.6076
	แผนโทกราฟ	1.0047	1.0131	0.6077
	สับเปลี่ยนเบตเตอร์	1.0046	1.0130	0.6083
NRD09 (โนด 30)	สถานะปกติ	1.0127	1.0191	0.7988
	ปลั๊กอิน	1.0127	1.0189	0.8178
	แผนโทกราฟ	1.0110	1.0189	0.8281

รูปที่ 4.70 แสดงผลกระทบจากการประจุไฟฟ้าระบบรถบัสดำเนินการ วงจรไฟฟ้า NRB08 สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน เส้นทางรถบัสดำเนินการสายสีเขียว รูปที่ 4.70 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 0.9885 p.u. (สถานะปกติ 0.9888 p.u.) ซึ่งมีความเปลี่ยนแปลงไม่มาก รูปที่ 4.70 (ข) แสดงกำลังไฟฟ้าเมื่อมีโหลดประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสดำเนินการ แสดงให้เห็นว่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มขึ้น 0.6361 MWh (สถานะปกติ 0.6231 MWh) รูปที่ 4.71 แสดงผลกระทบการประจุไฟฟ้าระบบรถบัสดำเนินการ สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ รูปที่ 4.71 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดขณะประจุไฟฟ้า 0.9888 p.u. ซึ่งมีความเปลี่ยนแปลงไม่มาก รูปที่ 4.71 (ข) แสดงกำลังไฟฟ้าของระบบจำหน่ายไฟฟ้าเมื่อมีโหลดประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสดำเนินการเพิ่มขึ้น 0.6323 MWh รูปที่ 4.72 แสดงผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัสดำเนินการ สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ รูปที่ 4.72 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 0.9841 p.u. รูปที่ 4.72 (ข) แสดงกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าเมื่อมีโหลดประจุไฟฟ้าระบบรถบัสดำเนินการเพิ่มขึ้น 0.6511 MWh

รูปที่ 4.73 แสดงผลกระทบจากการประจุไฟฟ้าระบบรถบัสดำเนินการ วงจรไฟฟ้า NRA08 สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน เส้นทางรถบัสดำเนินการสายสีเขียว รูปที่ 4.73 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 1.0152 p.u. (สถานะปกติ 1.0156 p.u.) ซึ่งไม่มีความเปลี่ยนแปลง รูปที่ 4.73 (ข) แสดงกำลังไฟฟ้าเมื่อมีโหลดประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสดำเนินการ แสดงให้เห็นว่ามีพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มขึ้น 0.5932 MWh (สถานะปกติ 0.5709 MWh) รูปที่ 4.74 แสดงผลกระทบการประจุไฟฟ้าระบบรถบัสดำเนินการ สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ รูปที่ 4.74 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดขณะประจุไฟฟ้าที่ 1.0145 p.u. รูปที่ 4.74 (ข) แสดงกำลังไฟฟ้าระบบไฟฟ้าเมื่อมีโหลดการประจุไฟฟ้าของรถบัสดำเนินการเพิ่มขึ้น 0.5876 MWh

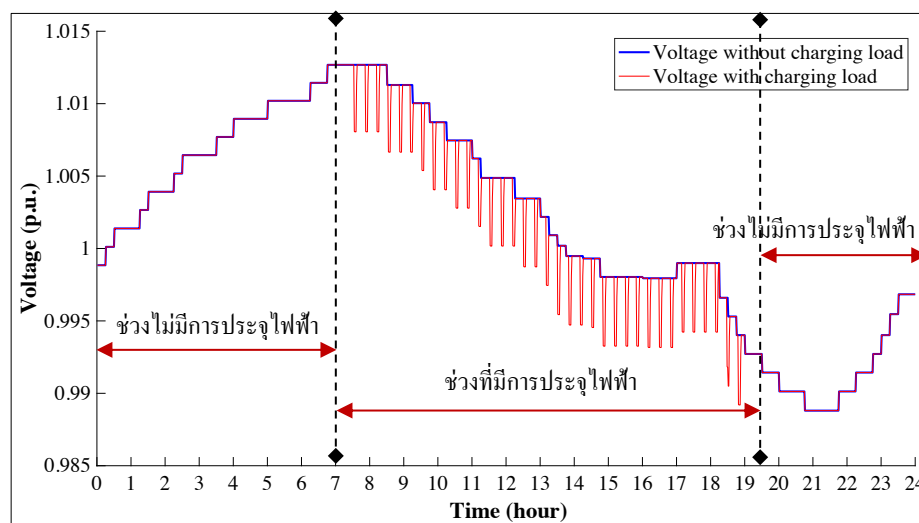


ก) แรงดันไฟฟ้า

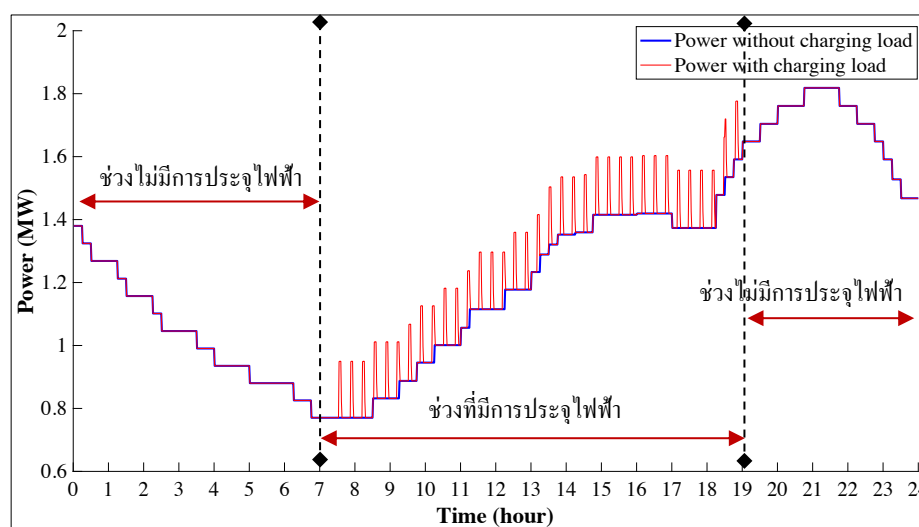


ข) กำลังไฟฟ้าของโหลด

รูปที่ 4.70 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบรถบัสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRB08 สำหรับกลยุทธ์
การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไปที่ต้นทางและปลายทาง เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว

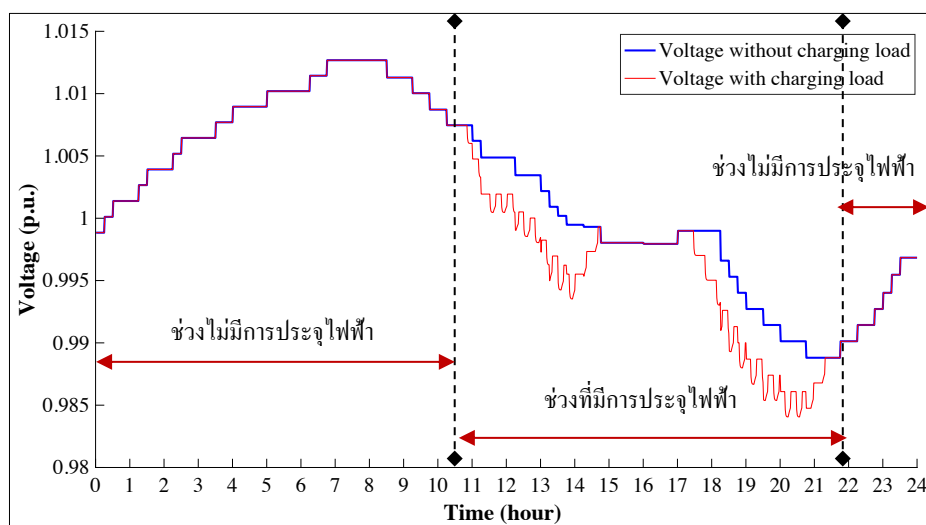


ก) แรงดันไฟฟ้า

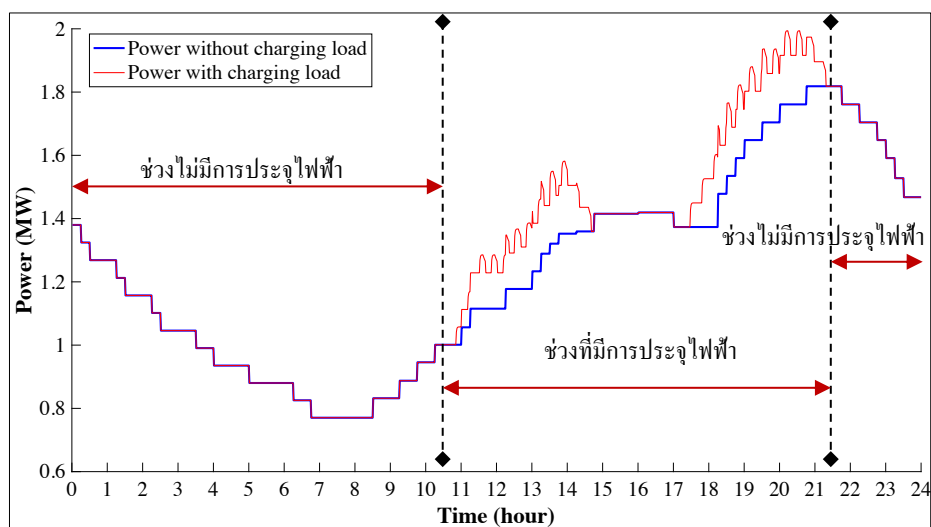


ข) กำลังไฟฟ้าของโหลด

รูปที่ 4.71 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบระบบไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRB08 สำหรับกลยุทธ์
การประจุไฟฟ้าเร็วแบบเพนโทกราฟ เส้นทางระบบไฟฟ้าสายสีเขียว

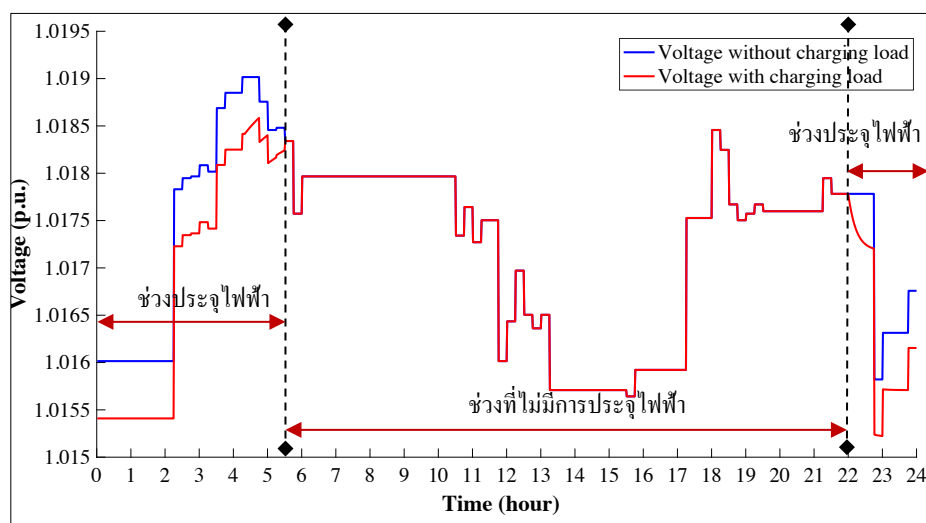


ก) แรงดันไฟฟ้า

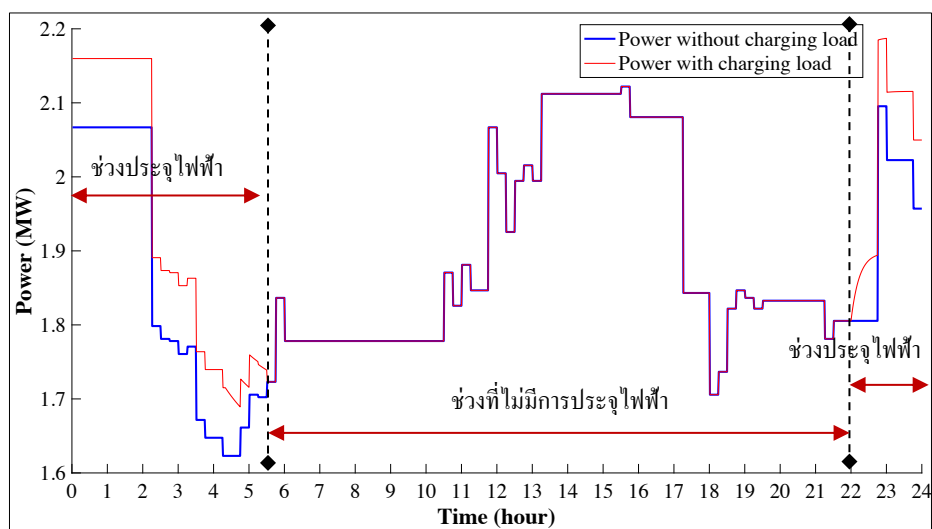


ข) กำลังไฟฟ้าของโหลด

รูปที่ 4.72 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบบัสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRB08 สำหรับกลยุทธ์
การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ เส้นทางบัสไฟฟ้าสายสีเขียว

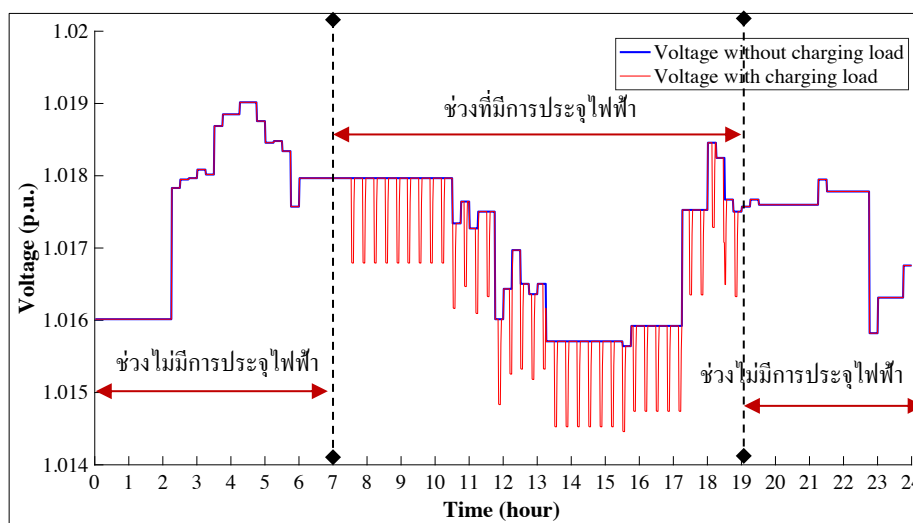


ก) แรงดันไฟฟ้า

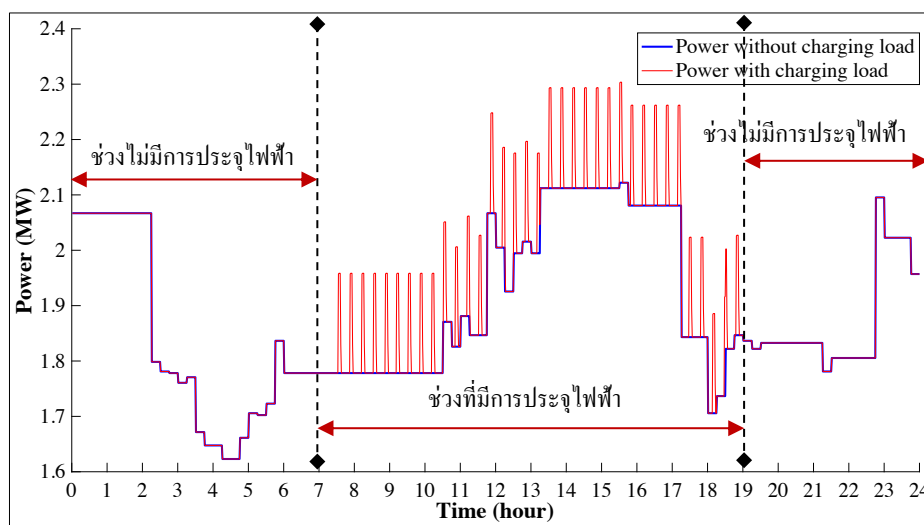


ข) กำลังไฟฟ้าของโหลด

รูปที่ 4.73 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบรถบัสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRA08 สำหรับกลยุทธ์
การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไปที่ต้นทางและปลายทาง เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว



ก) แรงดันไฟฟ้า



ก) กำลังไฟฟ้าของโหลด

รูปที่ 4.74 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบบดไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRA08 สำหรับกลยุทธ์
การประจุไฟฟ้าเร็วแบบเพนโทกราฟ เส้นทางบดไฟฟ้าสายสีเขียว

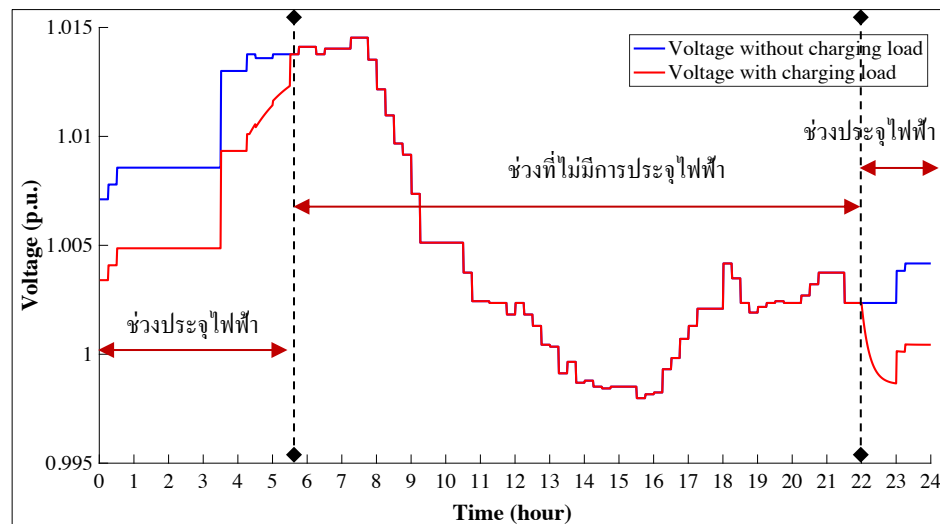
ตารางที่ 4.15 ผลการจำลองผลกระทบการประจุไฟฟ้า สำหรับระบบรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว

วงจรไฟฟ้า	กรณีศึกษา	แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด (p.u.)	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (p.u.)	กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (MWh/วัน)
NRB08 (โนด 12)	สถานะปกติ	0.9888	1.0020	0.6231
	ปลั๊กอิน	0.9885	1.0013	0.6361
	แพนโทกราฟ	0.9888	1.0015	0.6323
	สับเปลี่ยนแบตเตอรี่	0.9841	1.0007	0.6511
NRA08 (โนด 41)	สถานะปกติ	1.0156	1.0172	0.5709
	ปลั๊กอิน	1.0152	1.0170	0.5932
	แพนโทกราฟ	1.0145	1.0171	0.5876

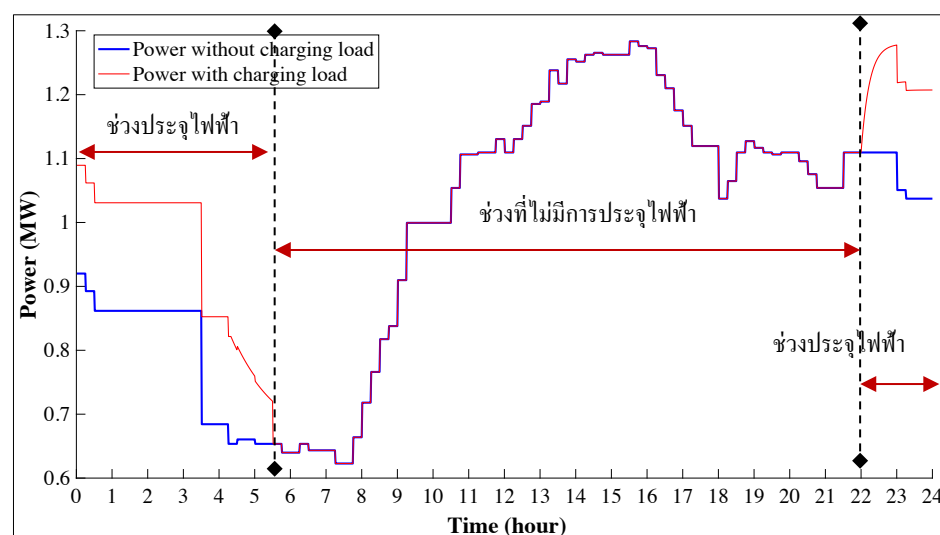
ตารางที่ 4.15 แสดงผลการจำลองผลกระทบการประจุไฟฟ้า สำหรับระบบรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว ในวงจรไฟฟ้า NRB08 ในสถานะปกติ แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 0.9888 p.u. และกำลังไฟฟ้าสูญเสีย 0.6231 MWh/วัน หลังจากติดตั้งโหลดประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 0.9841 p.u. ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของแรงดันไฟฟ้า แต่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าสูงสุด 0.6511 MWh/วัน เมื่อเชื่อมต่อโหลดการประจุไฟฟ้าแบบเร็ว สำหรับระบบรถบัสแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ สำหรับวงจรไฟฟ้า NRA08 เป็นการประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้าที่ปลายทาง ในสถานะปกติ แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 1.0156 p.u. และกำลังไฟฟ้าสูญเสีย 0.5709 MWh/วัน หลังจากติดตั้งโหลดประจุไฟฟ้า มีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 1.0145 p.u. อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานแรงดันไฟฟ้า แต่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียมากขึ้น

รูปที่ 4.75 แสดงผลกระทบจากการประจุไฟฟ้าระบบรถบัสไฟฟ้า วงจรไฟฟ้า NRB08 สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน เส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว รูปที่ 4.75 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 0.9980 p.u. (สถานะปกติ 0.9980 p.u.) ซึ่งมีความเปลี่ยนแปลงไม่มาก รูปที่ 4.75 (ข) แสดงกำลังไฟฟ้าเมื่อมีโหลดประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มขึ้น 0.5961 MWh (สถานะปกติ 0.5469 MWh) รูปที่ 4.76 แสดงผลกระทบการประจุไฟฟ้าระบบรถบัสไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแพนโทกราฟ รูปที่ 4.76 (ก) แสดงแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดขณะประจุไฟฟ้า 0.9906 p.u. ซึ่งมีความเปลี่ยนแปลงไม่มาก รูปที่ 4.76 (ข) แสดงกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าเมื่อมีโหลดประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น 0.5936 MWh รูปที่ 4.77 แสดงผลกระทบการประจุไฟฟ้าระบบรถบัสไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ รูปที่ 4.77 (ก) แสดง

แรงดันไฟฟ้าขณะประจุไฟฟ้า ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 0.9946 p.u. รูปที่ 4.77 (ข) แสดงกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าเมื่อมีโหลดประจุไฟฟ้าระบบบรรดบัไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น 0.6004 MWh

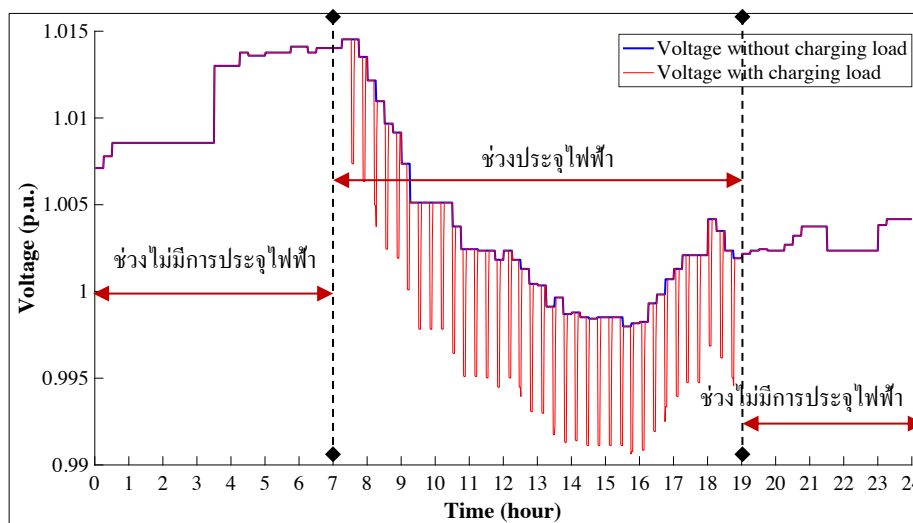


ก) แรงดันไฟฟ้า

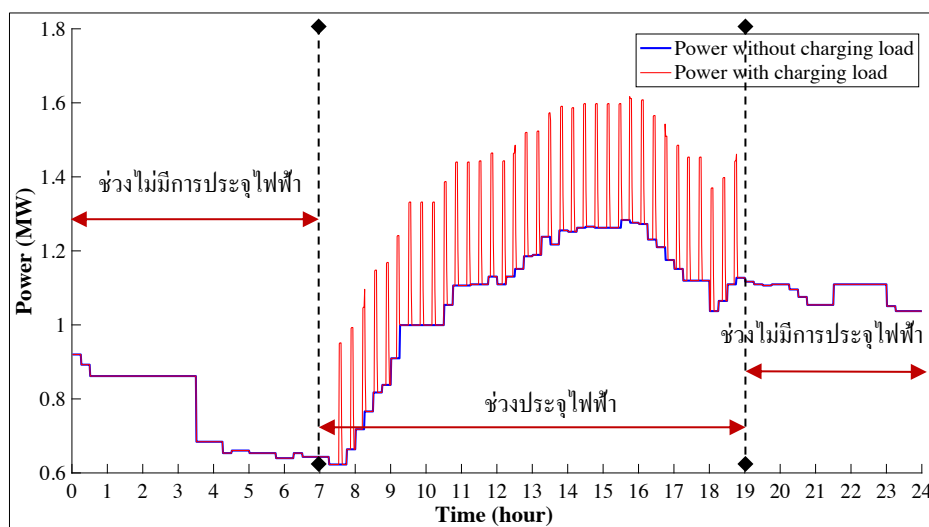


ข) กำลังไฟฟ้าของโหลด

รูปที่ 4.75 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบบรรดบัไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRA07 สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบทั่วไปที่ต้นทางและปลายทาง เส้นทางรถบัไฟฟ้าสายสีส้ม

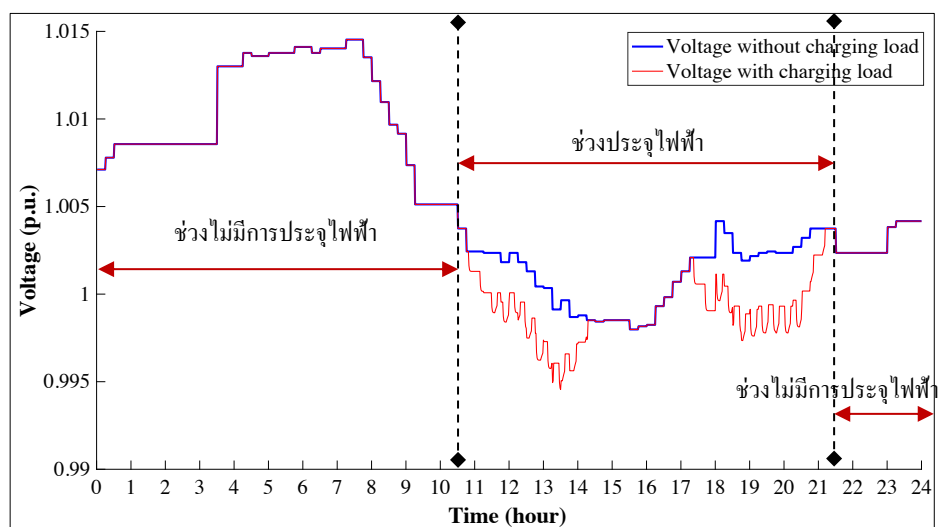


ก) แรงดันไฟฟ้า

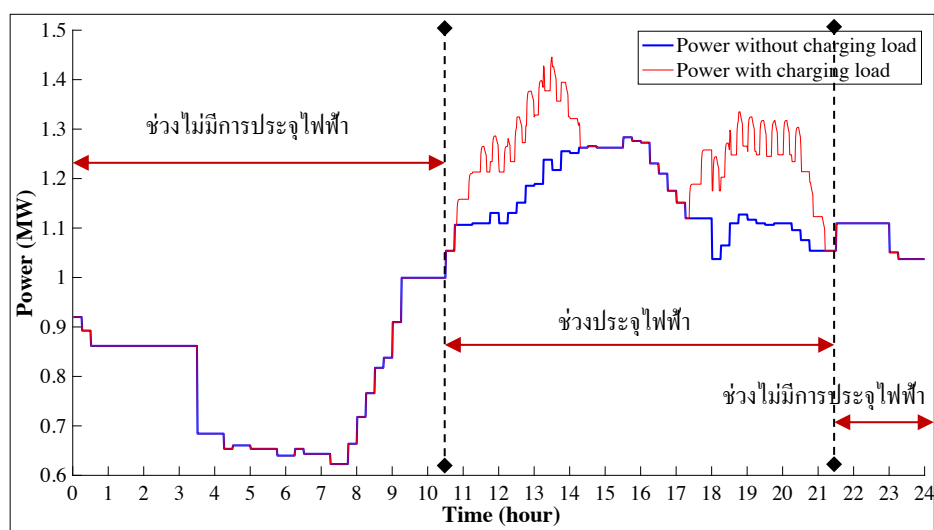


ข) กำลังไฟฟ้าของโหลด

รูปที่ 4.76 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบรถบัไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRA07 สำหรับกลยุทธ์
การประจุไฟฟ้าเร็วแบบเพนโทกราฟ เส้นทางรถบัไฟฟ้าสายสีส้ม



ก) แรงดันไฟฟ้า



ข) กำลังไฟฟ้าของโหลด

รูปที่ 4.77 ผลของการประจุไฟฟ้าระบบบัสไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้า NRA07 สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ เส้นทางบัสไฟฟ้าสายสี่สาม

ตารางที่ 4.16 แสดงผลการจำลองผลกระทบการประจุไฟฟ้า สำหรับระบบบรณัติไฟฟ้าสายสี่ลุ่ม ซึ่งมีวงจรไฟฟ้าที่ใช้ศึกษาหนึ่งวงจร คือ วงจรไฟฟ้า NRA07 แรงดันไฟฟ้าสถานะปกติ ต่ำสุด 0.9980 p.u. และกำลังไฟฟ้าสูญเสีย 0.5469 MWh/วัน หลังจากติดตั้งโหลดประจุไฟฟ้าของระบบบรณัติไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 0.9906 p.u. สำหรับโหลดประจุไฟฟ้าแบบแผนโทกราฟซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของแรงดันไฟฟ้า แต่ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มขึ้นสูงสุด 0.6004 MWh/วัน เมื่อเชื่อมต่อโหลดการประจุไฟฟ้าแบบเร็วสำหรับระบบบรณัติแบบสลับเปลี่ยนแบบเตอร์

ตารางที่ 4.16 ผลการจำลองผลกระทบการประจุไฟฟ้า สำหรับระบบบรณัติไฟฟ้าสายสี่ลุ่ม

วงจรไฟฟ้า	กรณีศึกษา	แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด (p.u.)	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (p.u.)	กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (MWh/วัน)
NRA07 (โหนด 6)	สถานะปกติ	0.9980	1.0055	0.5469
	ปลั๊กอิน	0.9980	1.0044	0.5961
	แผนโทกราฟ	0.9906	1.0047	0.5936
	สลับเปลี่ยนแบบเตอร์	0.9946	1.0045	0.6004

จากผลการจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้าระบบบรณัติไฟฟ้าบนระบบจำหน่ายไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา โดยทำการศึกษา 5 วงจร แสดงให้เห็นว่ามีกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะการประจุไฟฟ้าแบบแผนโทกราฟและการสลับเปลี่ยนแบบเตอร์ที่ใช้กำลังไฟฟ้าสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม ผลกระทบจากการประจุไฟฟ้าในการศึกษานี้มีผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าในระบบไม่มาก ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้ายังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ดังนั้น เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจึงทำการการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้าระบบบรณัติไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า

4.5 ผลการบรรเทาผลกระทบการประจุไฟฟ้าระบบบรณัติไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า

การจำลองการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้าระบบบรณัติไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะแบ่งผลการจำลองออกเป็น 2 หัวข้อ คือ ผลการจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้าระบบบรณัติไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด ได้ทำการหาค่าที่เหมาะสมของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายเพื่อใช้ปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสม 2 วิธีคือ การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอานานิคมผึ้งเทียม อีกหัวข้อหนึ่ง คือ ผลการจำลอง

การบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารั่วสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม คำนวณหาค่าขนาดของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายและขนาดของระบบกักเก็บพลังงานแบบตัวเก็บประจุ ผลการจำลองของหัวข้อดังกล่าวจะถูกรายงานดังต่อไปนี้

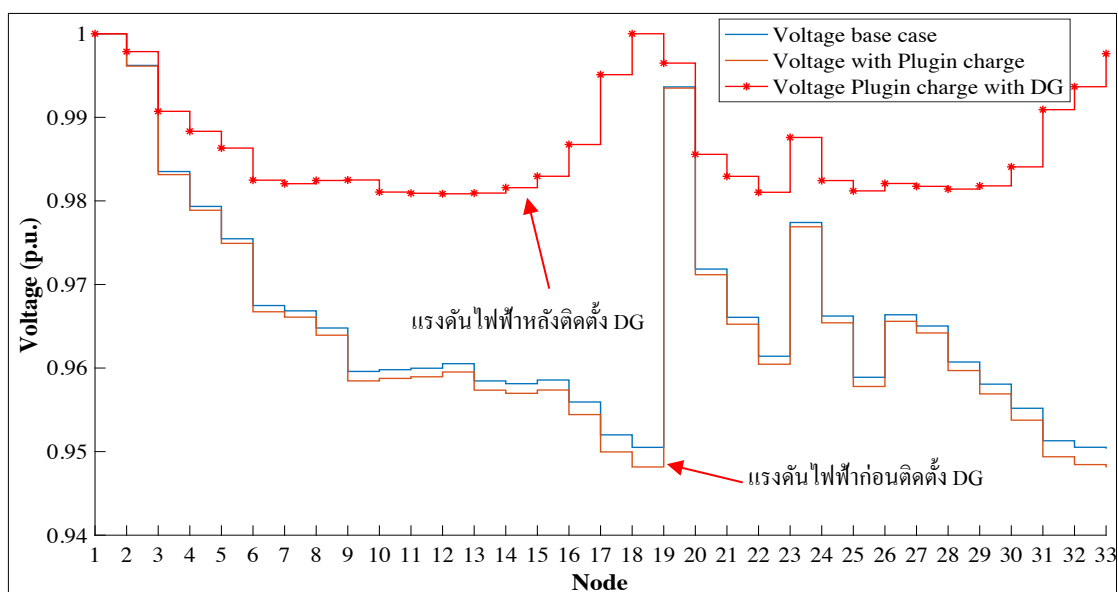
4.5.1 ผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารั่วสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด

ผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารั่วสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด ทำการหาค่าที่เหมาะสมของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายเพื่อปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ โดยใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสม 2 วิธี คือ การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม ผลการศึกษาวิจัยแสดงดังต่อไปนี้

1) ผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบการประจุไฟฟ้ารั่วสไฟฟ้าต่อระบบ

จำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด ด้วยวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค

ผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารั่วสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด ด้วยวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค จะแสดงผลการจำลองตามรูปแบบของระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับสถานีประจุไฟฟ้าระบบบรรณสไฟฟ้า รูปที่ 4.78 แสดงแรงดันไฟฟ้าหลังจากติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย สำหรับบรรณสไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน ผลของการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายขนาด 1.7828 MW ทำให้สามารถเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าขึ้น โดยมีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 0.9808 p.u. และสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียลง 0.0495 MW ดังแสดงในตารางที่ 4.17

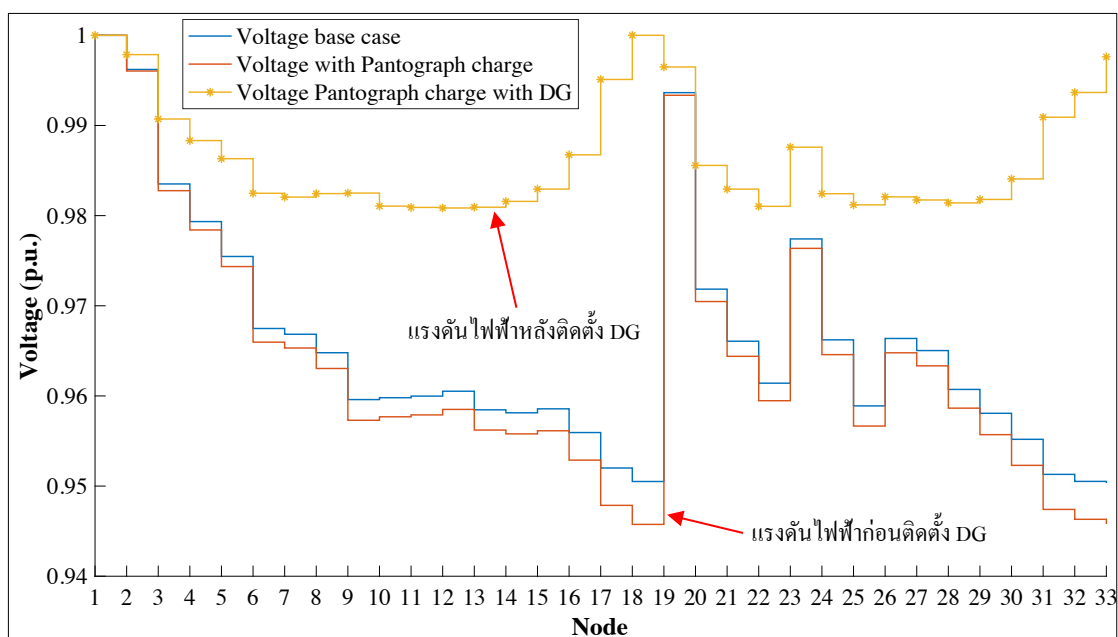


รูปที่ 4.78 แรงดันไฟฟ้าหลังจากติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย ด้วยวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค สำหรับระบบไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน

ตารางที่ 4.17 ผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้าที่ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย สำหรับการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย สำหรับระบบระบบไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน ด้วยวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค

กรณีศึกษา	แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด (p.u.)	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (p.u.)	กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (MW)
สถานะปกติ	0.9503	0.9655	0.1222
โหลดประจุไฟฟ้าที่โนด 18	0.9481	0.9644	0.1302
ติดตั้ง DG ที่โนด 18 ขนาด 1.7828 MW	0.9808	0.9865	0.0495

รูปที่ 4.79 แสดงแรงดันไฟฟ้าหลังจากติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย สำหรับระบบไฟฟ้าแบบแผนโทกราฟ ซึ่งผลของการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย ขนาด 1.8762 MW สามารถเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าขึ้น ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 0.9808 p.u. และสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียลง 0.0495 MW ดังแสดงในตารางที่ 4.18

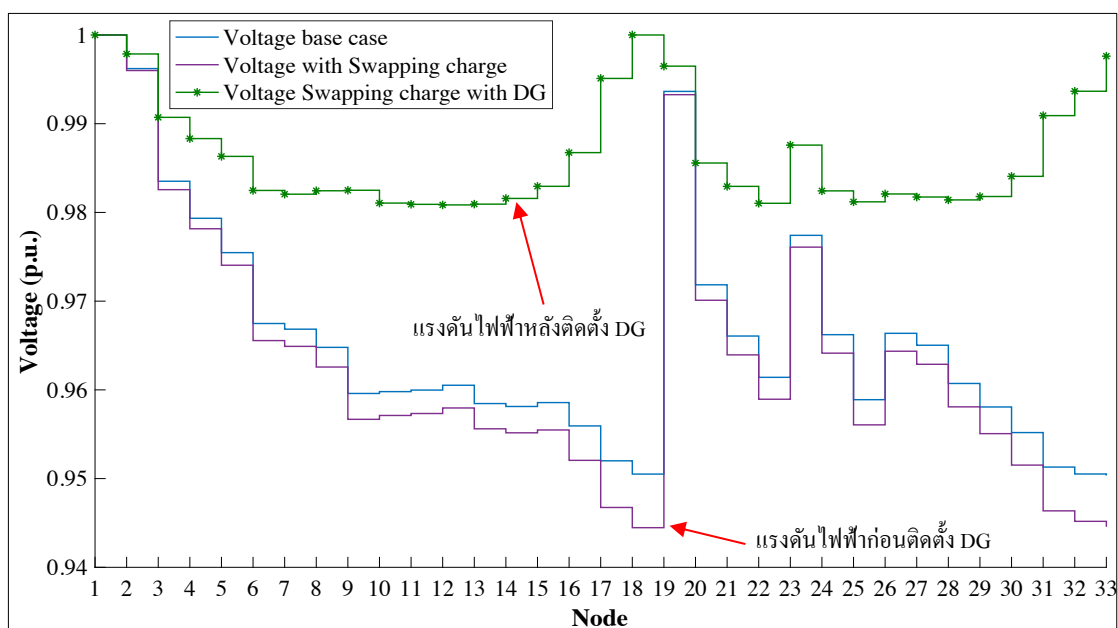


รูปที่ 4.79 แรงดันไฟฟ้าหลังจากติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย ด้วยวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค สำหรับรถบัสไฟฟ้าแบบแพนโทกราฟ

ตารางที่ 4.18 ผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้า ด้วยการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย สำหรับรถบัสไฟฟ้าแบบแพนโทกราฟ ด้วยวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค

กรณีศึกษา	แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด (p.u.)	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (p.u.)	กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (MW)
สถานะปกติ	0.9503	0.9655	0.1222
โหลดประจุไฟฟ้าที่โนด 18	0.9457	0.9634	0.1389
ติดตั้ง DG ที่โนด 18 ขนาด 1.8762 MW	0.9808	0.9865	0.0495

รูปที่ 4.80 แสดงแรงดันไฟฟ้าหลังจากติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย สำหรับรถบัสไฟฟ้าแบบแพนโทกราฟ ซึ่งผลของการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย ขนาด 1.9258 MW สามารถเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าขึ้น ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 0.9808 p.u. และสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียลง 0.0495 MW ดังแสดงในตารางที่ 4.19



รูปที่ 4.80 แรงดันไฟฟ้าหลังจากติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย ด้วยวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค สำหรับระบบไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

ตารางที่ 4.19 ผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า ด้วยการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย สำหรับระบบไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ ด้วยวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค

กรณีศึกษา	แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด (p.u.)	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (p.u.)	กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (MW)
สถานะปกติ	0.9503	0.9655	0.1222
โหลดประจุไฟฟ้าที่โนด 18	0.9445	0.9628	0.1436
ติดตั้ง DG ที่โนด 18 ขนาด 1.9258 MW	0.9808	0.9865	0.0495

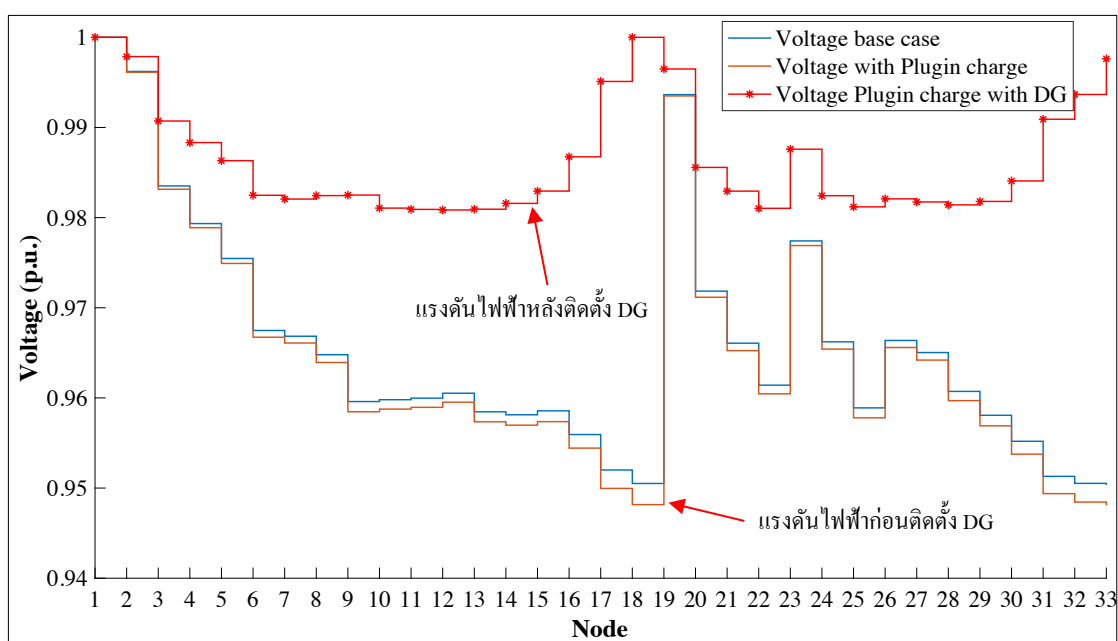
การจำลองการบรรเทาผลกระทบการประจุไฟฟ้าในระบบไฟฟ้า ด้วยการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย ด้วยการหาค่าที่เหมาะสมของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายด้วยวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคผลการจำลองทำให้ได้ค่าขนาดระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ติดตั้ง DG ที่โนด 18 จึงทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นที่ระดับแรงดันไฟฟ้ามาตรฐาน และสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้

2) ผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้าระดับสไฟฟ้า

ต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด

ด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม

ผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้าระดับสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด ด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม เพื่อเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหาคำตอบของทั้งสองวิธี ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าหลังจากติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายขนาด 1.7812 MW สำหรับระดับสไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน แสดงดังรูปที่ 4.81 ซึ่งผลของการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายสามารถเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าขึ้น โดยมีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 0.9808 p.u. และสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียลง 0.04945 MW ดังแสดงในตารางที่ 4.20

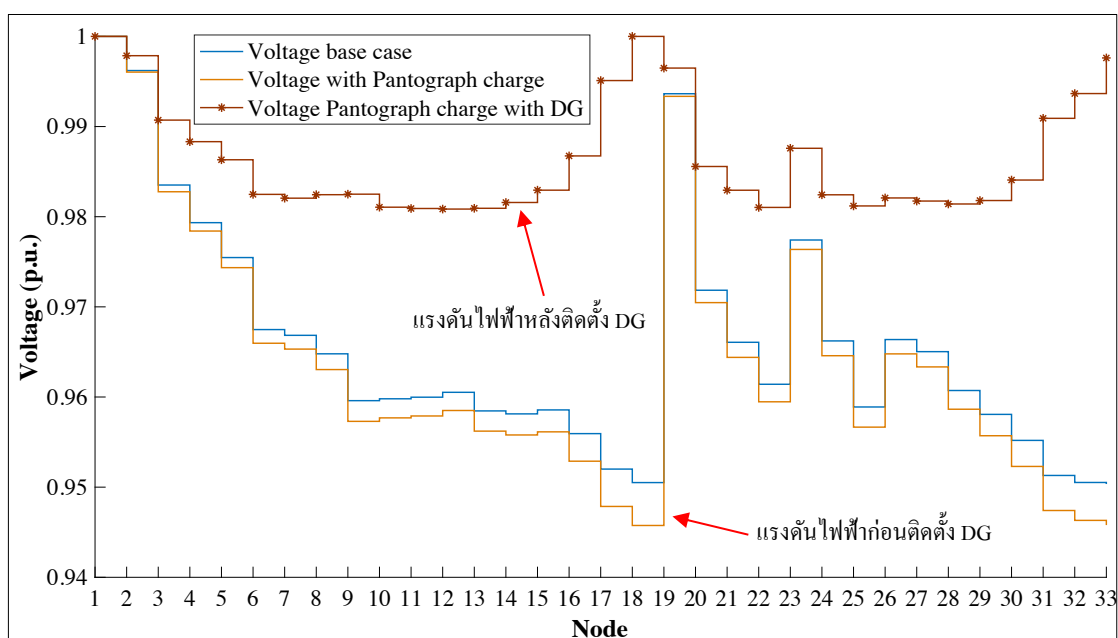


รูปที่ 4.81 แรงดันไฟฟ้าหลังจากติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย ด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม สำหรับระดับสไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน

ตารางที่ 4.20 ผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารบบัสไฟฟ้า ด้วยการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย สำหรับระบบไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน ด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม

กรณีศึกษา	แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด (p.u.)	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (p.u.)	กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (MW)
สถานะปกติ	0.9503	0.9655	0.1222
โหลดประจุไฟฟ้าที่โนด 18	0.9481	0.9644	0.1302
ติดตั้ง DG ที่โนด 18 ขนาด 1.7812 MW	0.9808	0.9865	0.04945

รูปที่ 4.82 แสดงแรงดันไฟฟ้าหลังจากติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย สำหรับระบบไฟฟ้าแบบแผนโทกราฟ ผลของการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย ขนาด 1.8758 MW สามารถเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าขึ้น ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 0.9808 p.u. และสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียลง 0.04945 MW ดังแสดงในตารางที่ 4.21

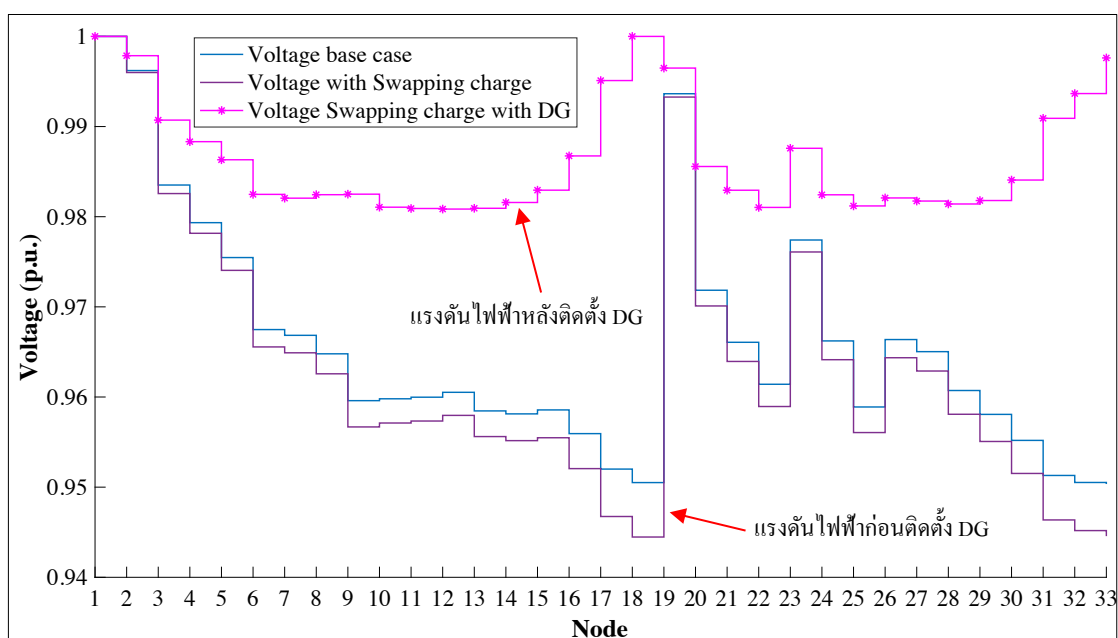


รูปที่ 4.82 แรงดันไฟฟ้าหลังจากติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย ด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม สำหรับระบบไฟฟ้าแบบแผนโทกราฟ

ตารางที่ 4.21 ผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารบบัสไฟฟ้า ด้วยการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย สำหรับระบบไฟฟ้าแบบแผนโทกราฟ ด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม

กรณีศึกษา	แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด (p.u.)	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (p.u.)	กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (MW)
สถานะปกติ	0.9503	0.9655	0.1222
โหลดประจุไฟฟ้าที่โนด 18	0.9457	0.9634	0.1389
ติดตั้ง DG ที่โนด 18 ขนาด 1.8758 MW	0.9808	0.9865	0.04945

รูปที่ 4.83 แสดงแรงดันไฟฟ้าหลังจากติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย สำหรับระบบไฟฟ้าแบบแผนโทกราฟ ผลของการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย ขนาด 1.9260 MW สามารถเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าขึ้น ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าต่ำสุด 0.9808 p.u. และสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียลง 0.04945 MW ดังแสดงในตารางที่ 4.22

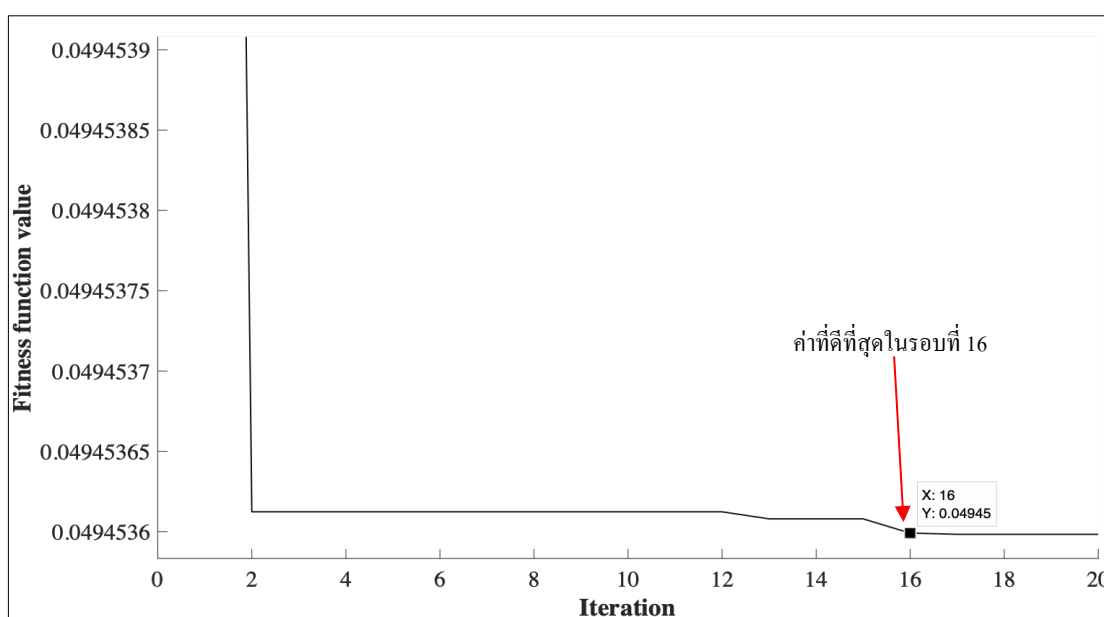


รูปที่ 4.83 แรงดันไฟฟ้าหลังจากติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย ด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม สำหรับระบบไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

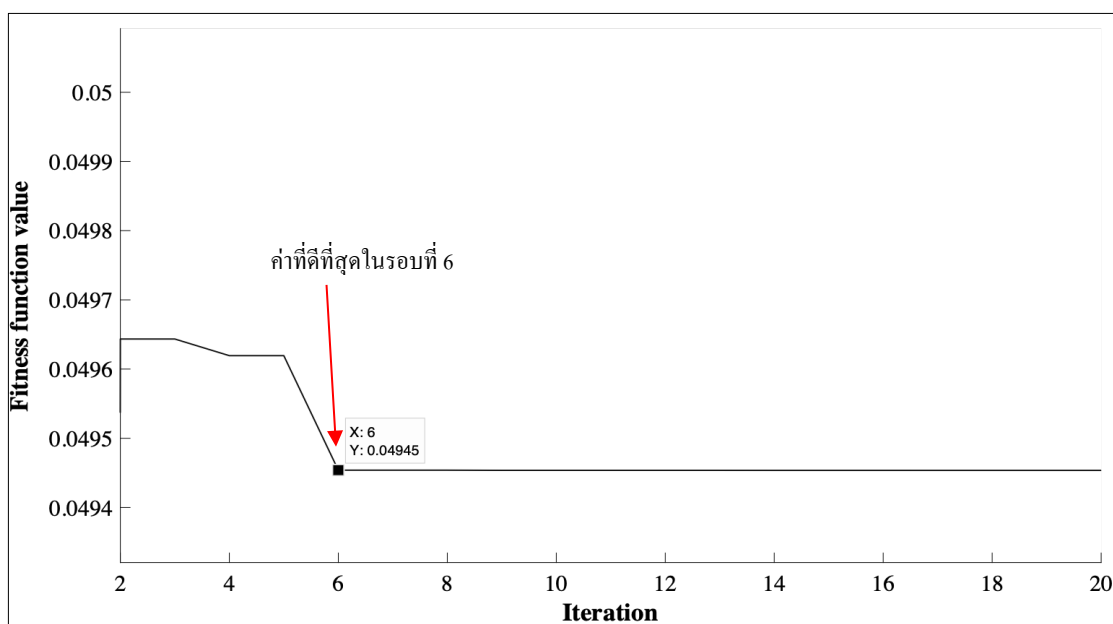
ตารางที่ 4.22 ผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารบบัสไฟฟ้า ด้วยการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย สำหรับระบบไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนเบตเตอร์ ด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม

กรณีศึกษา	แรงดันไฟฟ้าต่ำสุด (p.u.)	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (p.u.)	กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (MW)
สถานะปกติ	0.9503	0.9655	0.1222
โหลดประจุไฟฟ้าโนด 18	0.9445	0.9628	0.1436
ติดตั้ง DG ที่โนด 18 ขนาด 1.9260 MW	0.9808	0.9865	0.04945

ประสิทธิภาพการหาคำตอบของทั้ง 2 วิธี ถูกนำมาเปรียบเทียบกัน รูปที่ 4.84 แสดงตัวอย่างการหาคำตอบของวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค เฉพาะเชื่อมต่อโหลดการประจุไฟฟ้ารบบัสไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนเบตเตอร์ ซึ่งได้คำตอบที่ดีที่สุดในรอบที่ 16 โดยใช้เวลาคำนวณ 5816 วินาที และรูปที่ 4.85 แสดงตัวอย่างการหาคำตอบของวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม เฉพาะเชื่อมต่อโหลดการประจุไฟฟ้ารบบัสไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนเบตเตอร์ ได้คำตอบที่ดีที่สุดในรอบที่ 6 โดยใช้เวลาคำนวณ 42 วินาที สำหรับรอบการคำนวณ 50 รอบ



รูปที่ 4.84 การหาคำตอบของวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค



รูปที่ 4.85 การดูเข้าหาคำตอบของวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม

ตารางที่ 4.23 การเปรียบเทียบผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารอบัสไฟฟ้า โดยใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคและวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม

รูปแบบการประจุไฟฟ้า	โหนดที่ติดตั้งโหลด	โหนดที่ติดตั้ง DG	วิธีหาคำตอบ	ขนาดของระบบผลิตพลังงาน	กำลังไฟฟ้าสูญเสีย
ปลั๊กอิน	โหนด 18	โหนด 18	PSO	1.7828 MW	0.04945 MW
			ABC	1.7812 MW	0.04945 MW
แพนโทกราฟ	โหนด 18	โหนด 18	PSO	1.8762 MW	0.04945 MW
			ABC	1.8758 MW	0.04945 MW
สับเปลี่ยนแบตเตอรี่	โหนด 18	โหนด 18	PSO	1.9258 MW	0.04945 MW
			ABC	1.9260 MW	0.04945 MW

ตารางที่ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารอบัสไฟฟ้า โดยใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาคและวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม โดยกำหนดให้ติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าที่โหนด 18 แสดงให้เห็นว่าทั้งสองวิธีหาค่าที่เหมาะสมของขนาดระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เท่ากัน แต่วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุด

แบบอาณานิคมฝั่งเทียมสามารถหาค่าที่เหมาะสมได้เร็วกว่าวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค และใช้จำนวนรอบการคำนวณที่น้อยกว่า ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมฝั่งเทียมสำหรับการจำลองหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการจำลองการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งจะแสดงผลการจำลองในหัวข้อถัดไป

4.5.2 ผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้า

ต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา

การประจุไฟฟ้าให้กับระบบรถบัสไฟฟ้านั้นย่อมมีผลกระทบต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เนื่องจากมีโหลดการใช้งานเพิ่มขึ้นจากโหลดปกติซึ่งมีแค่โหลดภาคครัวเรือน ห้างสรรพสินค้า สำนักงาน และอุตสาหกรรม โดยจะมีผลกระทบมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับโหลดการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าแต่ละรูปแบบ ถึงแม้จะไม่สามารถหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าได้ แต่สามารถหาวิธีการจัดการหรือปรับปรุงคุณภาพของการจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อเตรียมความพร้อมรองรับการเพิ่มขึ้นของโหลดการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าในอนาคตได้ โดยในหัวข้อนี้เสนอการปรับปรุงคุณภาพการจ่ายกำลังไฟฟ้าด้วยการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย และชุดตัวเก็บประจุในระบบจำหน่ายไฟฟ้า เพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้น โดยผลการจำลองแสดงในหัวข้อดังต่อไปนี้

1) การบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา

การบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมฝั่งเทียม โดยมีกระบวนการและขั้นตอนการหาดำเนินงานและขนาดที่เหมาะสมดังที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.2 เพื่อลดขนาดของกำลังไฟฟ้าสูญเสียของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ซึ่งจะได้ผลการจำลองดังแสดงในตารางที่ 4.24 ถึงตารางที่ 4.28

ตารางที่ 4.24 ผลการจำลองการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรไฟฟ้า NRB06 สำหรับระบบ
รถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง

ผลการจำลอง	การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการติดตั้ง PV			
	สถานะปกติ	ปลั๊กอิน	แพนโทกราฟ	สับเปลี่ยน เบรกเตอร์
ขนาดระบบผลิตพลังงานไฟฟ้า (MW)	-	0.3998	0.3997	0.4000
โนดที่ติดตั้ง PV	-	33	33	33
ค่าใช้จ่ายของ PV (บาท)	-	761,219	761,028	761,600
พลังงานไฟฟ้าสูญเสีย เมื่อมีโหลดประจุไฟฟ้า (MWh)	0.6072	0.6076	0.6077	0.6083
ค่าใช้จ่ายของพลังงานสูญเสีย จากการประจุไฟฟ้า (บาท/ปี)	576,897.68	577,277.72	577,372.73	577,942.79
พลังงานสูญเสียเมื่อติดตั้ง PV (MWh)	-	0.5102	0.5105	0.5108
ค่าใช้จ่ายของพลังงานสูญเสีย เมื่อติดตั้ง PV (บาท/ปี)	-	484,738.47	485,023.50	485,308.53
การลดลงของค่าใช้จ่าย พลังงานสูญเสียหลังติดตั้ง PV (บาท/ปี)		92,539.25	92,349.23	92,634.26
ค่าพลังงานไฟฟ้าจากการขายไฟฟ้า (บาท/ปี)		2,948,877.93	2,948,140.34	2,950,353.11
ผลประโยชน์จากการติดตั้ง PV (บาท/ปี)		3,041,417.18	3,040,489.58	3,042,987.37
ผลการจำลอง	การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ			
ขนาดของชุดตัวเก็บประจุ (Mvar)	-	0.3908	0.3908	0.3910
โนดที่ติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ	-	28	28	28
ค่าใช้จ่ายของชุดตัวเก็บประจุ (บาท)	-	24,927	24,927	24,927
พลังงานไฟฟ้าสูญเสีย เมื่อติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ (MWh)	-	0.5389	0.539	0.5396
ค่าใช้จ่ายของพลังงานสูญเสีย เมื่อติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ (บาท/ปี)	-	512,006.20	512,101.21	512,671.26
ผลประโยชน์จากการติดตั้ง CB (บาท/ปี)	-	65,271.53	65,271.53	65,271.53

ตารางที่ 4.24 แสดงผลการจำลองการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรไฟฟ้า NRB06 สำหรับระบบสายลี้ม่วง แสดงให้เห็นว่าเมื่อติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่โนด 33 สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าลงได้ 0.5120 MWh 0.5105 MWh และ 0.5108 MWh ตามลำดับ ค่าใช้จ่ายสำหรับการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน แบบแพนโทกราฟ และแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ คือ 761,219 บาท 761,028 บาท และ 761,600 บาท สามารถลดค่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสีย 92,539 บาท 92,349 บาท และ 92,634 บาท ดังนั้น ผลประโยชน์จากการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้า คือ 3,041,417 บาท 3,040,489 บาท และ 3,042,987 บาท ตามลำดับ การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่โนด 28 สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้า 0.5389 MWh 0.5390 MWh และ 0.5396 MWh ตามลำดับ ค่าใช้จ่ายสำหรับการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ 24,927 บาท 24,927 บาท และ 24,927 บาท ตามลำดับ

ตารางที่ 4.25 แสดงผลการจำลองการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรไฟฟ้า NRD09 สำหรับระบบสายลี้ม่วง แสดงให้เห็นว่ามีการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้า ซึ่งมีค่าใช้จ่ายของพลังงานไฟฟ้าสูญเสียจากการประจุไฟฟ้า 776,987.69 บาท และ 786,773.67 บาท สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน และแพนโทกราฟ ตามลำดับ หลังจากติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าที่โนด 40 สามารถลดค่าใช้จ่ายของพลังงานสูญเสียได้ 705,635.56 บาท และ 725,112.50 บาท ซึ่งมีผลประโยชน์จากการติดตั้ง 4,469,705.04 บาท และ 4,411,323.82 บาท ตามลำดับ การติดตั้งชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่โนด 30 สามารถลดค่าใช้จ่ายของพลังงานสูญเสีย 677,987.79 บาท และ 688,533.85 บาท มีผลประโยชน์จากการติดตั้ง 776,987.69 บาท และ 786,773.67 บาท ตามลำดับ

ตารางที่ 4.25 ผลการจำลองการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรไฟฟ้า NRD09 สำหรับระบบ
รถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง

ผลการจำลอง	การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการติดตั้ง DG		
	สถานะปกติ	ปลั๊กอิน	แพนโทกราฟ
ขนาดระบบผลิตพลังงานไฟฟ้า (MW)	-	0.5149	0.5092
โนดที่ติดตั้ง PV	-	40	40
ค่าใช้จ่ายของ PV (บาท)	-	980,369	969,516
พลังงานไฟฟ้าสูญเสีย เมื่อมีโหลดประจุไฟฟ้า (MWh)	0.7988	0.8178	0.8281
ค่าใช้จ่ายของพลังงานสูญเสีย จากการประจุไฟฟ้า (บาท/ปี)	758,935.89	776,987.69	786,773.67
พลังงานสูญเสียเมื่อติดตั้ง PV (MWh)		0.7427	0.7632
ค่าใช้จ่ายของพลังงานสูญเสีย เมื่อติดตั้ง PV (บาท/ปี)		705,635.56	725,112.50
การลดลงของค่าใช้จ่าย พลังงานสูญเสียหลังติดตั้ง PV (บาท/ปี)		71,352.13	61,661.17
ค่าพลังงานไฟฟ้าจากการขายไฟฟ้า (บาท/ปี)		4,398,352.91	4,349,662.65
ผลประโยชน์จากการติดตั้ง PV (บาท/ปี)		4,469,705.04	4,411,323.82
ผลการจำลอง	การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ		
	สถานะปกติ	ปลั๊กอิน	แพนโทกราฟ
ขนาดของชุดตัวเก็บประจุ (Mvar)	-	0.5751	0.5728
โนดที่ติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ	-	30	30
ค่าใช้จ่ายของชุดตัวเก็บประจุ (บาท)		21,675	21,675
พลังงานไฟฟ้าสูญเสีย เมื่อติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ (MWh)	-	0.7136	0.7247
ค่าใช้จ่ายของพลังงานสูญเสีย เมื่อติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ (บาท/ปี)	-	677,987.79	688,533.85
ผลประโยชน์จากการติดตั้ง CB (บาท/ปี)	-	776,987.69	786,773.67

ตารางที่ 4.26 ผลการจำลองการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรไฟฟ้า NRB08 รถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว

ผลการจำลอง	การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการติดตั้ง PV			
	สถานะปกติ	ปลั๊กอิน	แพนโทกราฟ	สับเปลี่ยน แบตเตอรี่
ขนาดระบบผลิตพลังงานไฟฟ้า (MW)	-	0.1426	0.1406	0.1487
โหนดที่ติดตั้ง PV	-	26	26	26
ค่าใช้จ่ายของ PV(บาท)	-	271,510	267,702	283,124
พลังงานไฟฟ้าสูญเสีย เมื่อมีโหลดประจุไฟฟ้า (MWh)	0.6231	0.6361	0.6323	0.6511
ค่าใช้จ่ายของพลังงานสูญเสีย จากการประจุไฟฟ้า (บาท/ปี)	592,004.19	604,355.43	600,745.07	618,606.85
พลังงานไฟฟ้าสูญเสีย เมื่อติดตั้ง PV (MWh)		0.6152	0.6141	0.6288
ค่าใช้จ่ายของพลังงานสูญเสีย เมื่อติดตั้ง PV (บาท/ปี)		584,498.44	583,453.34	597,419.74
การลดลงของค่าใช้จ่าย พลังงานสูญเสียหลังติดตั้ง PV (บาท/ปี)		19,856.99	17,291.73	21,187.12
ค่าพลังงานไฟฟ้าจากการขายไฟฟ้า (บาท/ปี)		1,218,110.55	1,201,026.25	1,270,217.67
ผลประโยชน์จากการติดตั้ง PV (บาท/ปี)		1,237,967.54	1,218,317.98	1,291,404.79
ผลการจำลอง	การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ			
	สถานะปกติ	ปลั๊กอิน	แพนโทกราฟ	สับเปลี่ยน แบตเตอรี่
ขนาดของชุดตัวเก็บประจุ (Mvar)	-	0.2759	0.2749	0.2787
โหนดที่ติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ	-	17	17	17
ค่าใช้จ่ายของชุดตัวเก็บประจุ (บาท)		34,482	34,482	34,482
พลังงานไฟฟ้าสูญเสีย เมื่อติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ (MWh)	-	0.5821	0.5787	0.596
ค่าใช้จ่ายของพลังงานสูญเสีย เมื่อติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ (บาท/ปี)	-	553,050.30	549,819.98	566,256.62
ผลประโยชน์จากการติดตั้ง CB (บาท/ปี)	-	604,355.43	600,745.07	618,606.85

ตารางที่ 4.26 แสดงผลการจำลองการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรไฟฟ้า NRB08 รถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว แสดงให้เห็นว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าเพิ่มขึ้น หลังจากการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าที่โนด 26 และการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ ที่โนด 17 สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ ผลประโยชน์จากการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้า คือ 1,237,967.54 บาท 1,218,317.98 บาท และ 1,291,404.79 บาท และผลประโยชน์จากการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า 604,355.43 บาท 600,745.07 บาท และ 618,606.85 บาท ตามลำดับ

ตารางที่ 4.27 ผลการจำลองการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรไฟฟ้า NRA08 รถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว

ผลการจำลอง	การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการติดตั้ง DG		
	สถานะปกติ	ปลั๊กอิน	แพนโทกราฟ
ขนาดระบบผลิตพลังงานไฟฟ้า (MW)	-	0.6440	0.6376
โนดที่ติดตั้ง DG	-	49	49
ค่าใช้จ่ายระบบผลิตพลังงานไฟฟ้า (บาท)	-	1,226,176	1,213,990
พลังงานไฟฟ้าสูญเสียเมื่อมีโหลดประจุไฟฟ้า	0.5709	0.5932	0.5876
ค่าใช้จ่ายของพลังงานสูญเสียจากการประจุไฟฟ้า (บาท/ปี)	542,409.24	563,596.35	558,275.82
พลังงานไฟฟ้าสูญเสียเมื่อติดตั้ง DG (MWh)	-	0.5007	0.5008
ค่าใช้จ่ายพลังงานสูญเสียเมื่อติดตั้ง PV (บาท/ปี)		475,712.57	475,807.58
การลดลงของค่าใช้จ่ายพลังงานสูญเสียหลังติดตั้ง PV (บาท/ปี)		87,883.79	82,468.25
ค่าพลังงานไฟฟ้าจากการขายไฟฟ้า (บาท/ปี)		5,501,144.44	5,446,474.68
ผลประโยชน์จากการติดตั้ง PV (บาท/ปี)		5,589,028.23	5,528,942.93
ผลการจำลอง	การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ		
ขนาดของชุดตัวเก็บประจุ (Mvar)	-	0.4771	0.4730
โนดที่ติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ	-	26	26
ค่าใช้จ่ายของชุดตัวเก็บประจุ (บาท)	-	21,675	21,675
พลังงานไฟฟ้าสูญเสียเมื่อติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ (MWh)	-	0.5376	0.5329
ค่าใช้จ่ายของพลังงานสูญเสียเมื่อติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ (บาท/ปี)	-	510,771.07	506,305.63
ผลประโยชน์จากการติดตั้ง CB (บาท/ปี)	-	563,596.35	558,275.82

ตารางที่ 4.27 แสดงผลการจำลองการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรไฟฟ้า NRA08 รถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว แสดงให้เห็นว่ามีการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้า หลังจากการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าที่โนด 49 และการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุที่โนด 26 สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ การติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้ามีผลประโยชน์จากการติดตั้ง 5,589,028.23 บาท และ 5,528,942.93 บาท ผลประโยชน์จากการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า คือ 563,596.35 บาท และ 558,275.82 บาท ตามลำดับ

ตารางที่ 4.28 ผลการจำลองการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรไฟฟ้า NRA07 รถบัสสายสีส้ม

ผลการจำลอง	การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการติดตั้ง DG			
	สถานะปกติ	ปลั๊กอิน	แผนโทกราฟ	สับเปลี่ยนเบดเตอร์
ขนาดระบบผลิตพลังงานไฟฟ้า (MW)	-	0.1809	0.1762	0.1791
โนดที่ติดตั้ง DG	-	48	48	48
ค่าใช้จ่ายของ DG (บาท)	-	344,433	335,484	341,006
พลังงานไฟฟ้าสูญเสียเมื่อมีโหลดประจุไฟฟ้า (MWh)	0.5469	0.5961	0.5936	0.6004
ค่าใช้จ่ายของพลังงานสูญเสียจากการประจุไฟฟ้า (บาท/ปี)	519,606.96	566,351.63	563,976.39	570,437.04
พลังงานไฟฟ้าสูญเสียเมื่อติดตั้ง DG (MWh)		0.5034	0.5140	0.5168
ค่าใช้จ่ายของพลังงานสูญเสียเมื่อติดตั้ง DG (บาท/ปี)		478,277.82	488,348.83	491,009.10
การลดลงของค่าใช้จ่ายพลังงานสูญเสียหลังติดตั้ง PV (บาท/ปี)		88,073.81	75,627.56	79,427.94
ค่าพลังงานไฟฟ้าจากการขายไฟฟ้า (บาท/ปี)		1,545,274.89	1,505,126.79	1,529,899.02
ผลประโยชน์การติดตั้ง PV (บาท/ปี)		1,633,348.70	1,580,754.35	1,609,326.96

ตารางที่ 4.28 ผลการจำลองการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรไฟฟ้า NRA07 รถบัสสายสีส้ม (ต่อ)

ผลการจำลอง	การลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยการติดตั้ง DG			
	สถานะปกติ	ปลั๊กอิน	แพนโทกราฟ	สับเปลี่ยนเบรคเตอร์
ขนาดของชุดตัวเก็บประจุ (Mvar)	-	0.3167	0.2893	0.2922
โนดที่ติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ	-	6	28	28
ค่าใช้จ่ายของชุดตัวเก็บประจุ (บาท)	-	24,927	34,482	34,482
พลังงานไฟฟ้าสูญเสียเมื่อติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ (MWh)	-	0.5465	0.5459	0.5517
ค่าใช้จ่ายของพลังงานสูญเสียเมื่อติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ (บาท/ปี)	-	519,226.92	518,656.86	524,167.41
ผลประโยชน์จากการติดตั้ง CB (บาท/ปี)	-	566,351.63	563,976.39	570,437.04

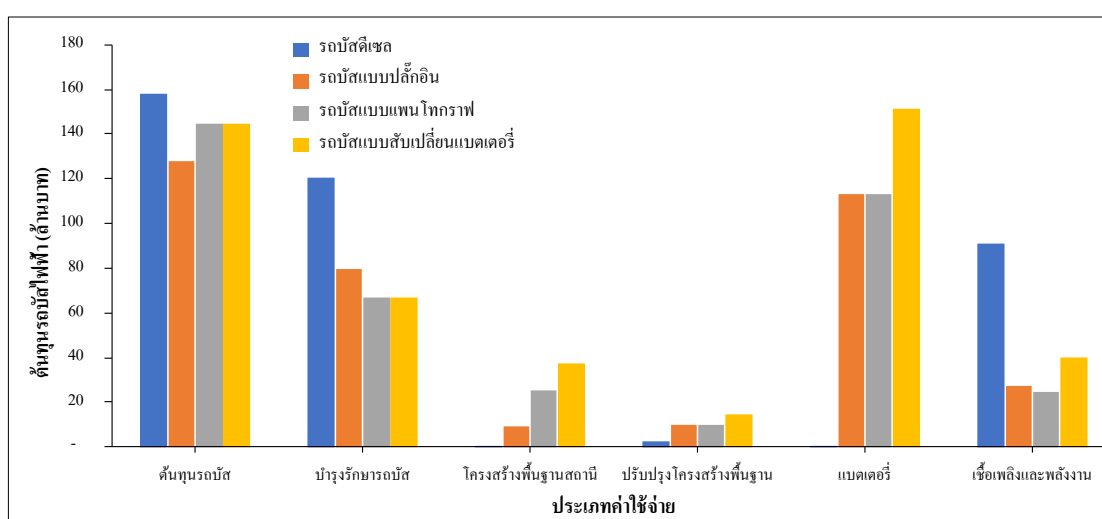
ตารางที่ 4.28 แสดงผลการจำลองการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรไฟฟ้า NRA07 สำหรับรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม แสดงให้เห็นว่ามีการเพิ่มขึ้นของกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้า แต่หลังจากการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าที่โนด 48 และการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุที่โนด 28 สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ การติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้ามีผลประโยชน์จากการติดตั้ง 1,633,348.70 บาท 1,580,754.35 บาท และ 1,609,326.96 บาท ผลประโยชน์จากการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า คือ 566,351.63 บาท 563,976.39 บาท และ 570,437.04 บาท ตามลำดับ

จากผลการจำลองการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา ด้วยการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายโดยใช้ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์และการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุ แสดงให้เห็นว่าวิธีการปรับปรุงทั้งสองแบบสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าได้ โดยการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าจะใช้ขนาดของชุดตัวเก็บประจุเล็กกว่าขนาดของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย อย่างไรก็ตาม ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายนั้นมีราคาของระบบที่สูงมากกว่าชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า แต่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากจึงเหมาะสมกับผู้สนใจลงทุนด้านพลังงานเพื่อผลิตไฟฟ้าขายให้กับระบบ และชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าก็สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้เช่นเดียวกันแต่มีการลงทุนที่ต่ำกว่าและสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้อย่างเดียวจึงเหมาะกับการนำมาใช้สำหรับปรับปรุงระบบไฟฟ้าโดยการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ดังนั้น หากมองในมุมของการไฟฟ้า การติดตั้งชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าจึงเหมาะสมมากกว่าการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้า

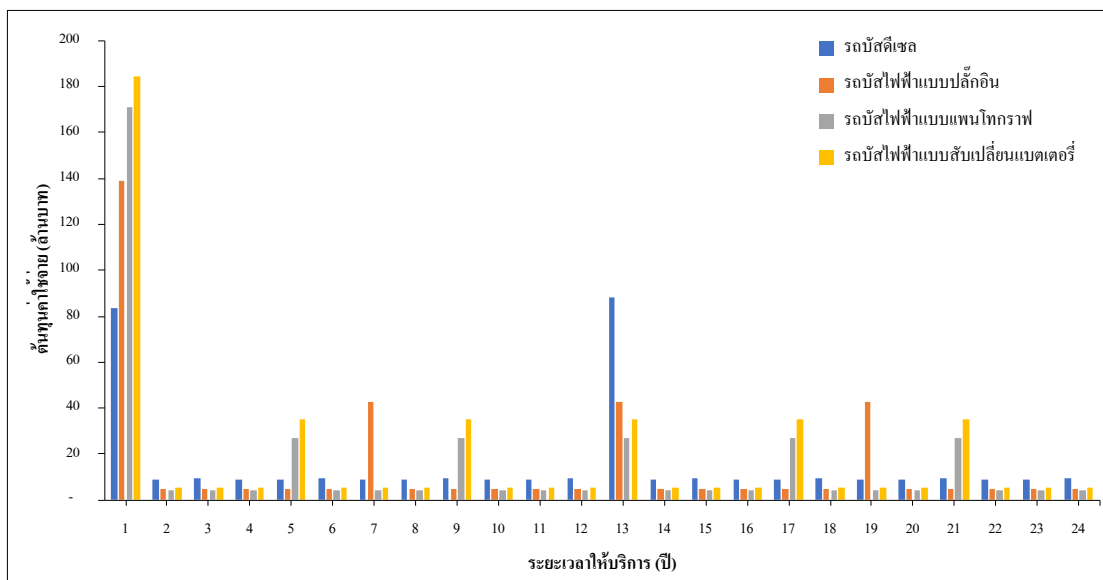
4.6 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนและผลกำไรสำหรับระบบรถบัสไฟฟ้าสาธารณะ

ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายและต้นทุนสำหรับระบบรถบัสไฟฟ้าสาธารณะ โดยใช้กรณีศึกษาสำหรับรถบัสไฟฟ้าที่มีรูปแบบการประจุไฟฟ้า 3 รูปแบบ การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายและต้นทุนสามารถคำนวณโดยการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างรถบัสไฟฟ้า 3 รูปแบบ และนำระบบรถบัสดีเซลมาพิจารณาเปรียบเทียบ พิจารณาค่าใช้จ่ายประเภทการประจุไฟฟ้าแบบต่าง ๆ ของรถบัสไฟฟ้า ค่าใช้จ่ายที่นำมาวิเคราะห์ คือ ต้นทุนการลงทุนรถบัส ค่าเชื้อเพลิงหรือพลังงาน ค่าบำรุงรักษารถบัส ค่าใช้จ่ายการเปลี่ยนแบตเตอรี่ และค่าใช้จ่ายในการลงทุนโครงสร้างพื้นฐานการชาร์จและค่าบำรุงรักษา คำนวณต้นทุนด้วยการวิเคราะห์ในโปรแกรม Microsoft excels ทำการวิเคราะห์การลงทุนในช่วงเวลา 24 ปี ปีแรกจะมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนของรถบัสและค่าใช้จ่ายโครงสร้างพื้นฐานการชาร์จสำหรับรถบัสไฟฟ้า ในปีถัดมาจะมีค่าบำรุงรักษาและเชื้อเพลิงหรือพลังงานเกิดขึ้นทุกปี

ต้นทุนสำหรับระบบรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วงแสดงดังรูปที่ 4.86 รถบัสไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่และรถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอินมีค่าใช้จ่ายด้านแบตเตอรี่สูงที่สุด เห็นได้ว่ารถบัสดีเซลมีค่าใช้จ่ายด้านการบำรุงรักษาและมีการใช้พลังงานสูง การเปลี่ยนแบตเตอรี่สำหรับรถบัสไฟฟ้าแบบแพนโทกราฟจะเกิดขึ้นหลังจาก 4 ปี รถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอินแบตเตอรี่ LFP ขนาด 140 kWh จะมีการเปลี่ยนแบตเตอรี่ทุก ๆ 8 ปี และรถบัสไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ใช้แบตเตอรี่ขนาด 80 kWh จะมีการเปลี่ยนแบตเตอรี่ทุก ๆ 4 ปี และมีแบตเตอรี่สำรองจำนวน 3 ลูก รูปที่ 4.87 แสดงค่าใช้จ่ายการลงทุนที่ระยะเวลา 24 ปี แสดงให้เห็นว่าปีแรกมีการลงทุนสูงสำหรับโครงสร้างพื้นฐานและการซื้อจริงของรถบัส โดยเฉพาะต้นทุนของรถบัสไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ที่มีการลงทุนสูงที่สุด

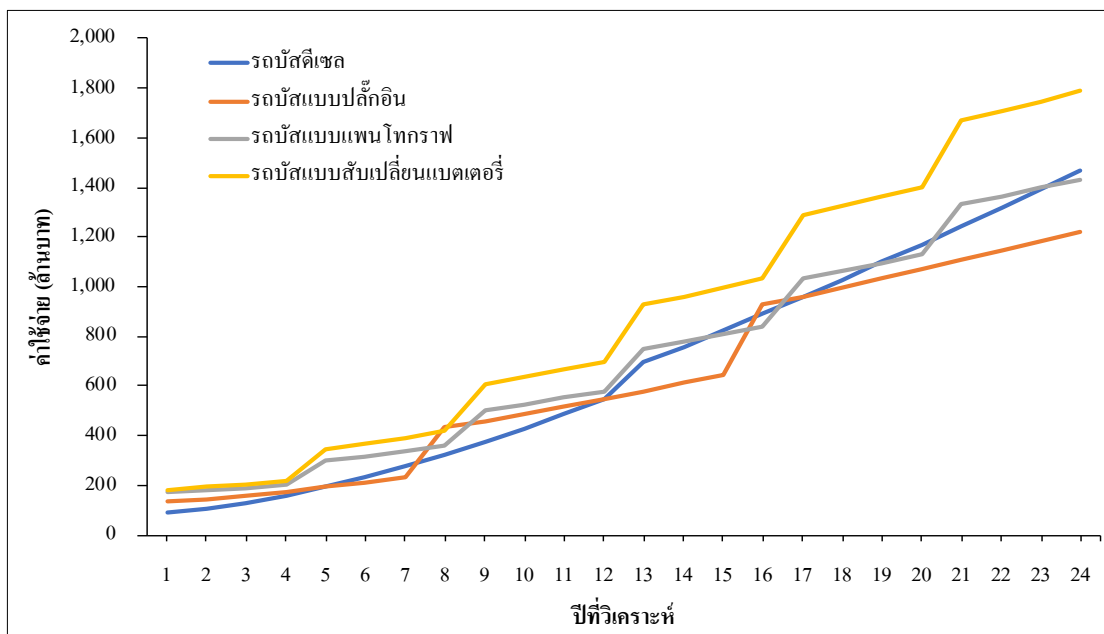


รูปที่ 4.86 ต้นทุนการลงทุนระบบรถบัสโดยสารสาธารณะสายสีม่วง



รูปที่ 4.87 ค่าใช้จ่ายการลงทุนรถบัสโดยสาร 24 ปี สำหรับระบบระบบไฟฟ้าสายลีม่วง

รูปที่ 4.88 แสดงค่าใช้จ่ายการลงทุนรถบัสตลอดอายุการใช้งาน 24 ปี เมื่อคิดอัตราการคิดลดของเงินลงทุน สำหรับระบบระบบไฟฟ้าสายลีม่วง พบว่าในปีแรกรถบัสเซลล์มีค่าใช้จ่ายการลงทุนต่ำที่สุด แต่หลังจากการให้บริการ 24 ปี รถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอินมีค่าใช้จ่ายโดยรวมน้อยที่สุด และรถบัสไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่มีการลงทุนสูงที่สุด รูปที่ 4.89 แสดงอัตราส่วนมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย สำหรับระบบรถบัสไฟฟ้าสายลีม่วง แสดงให้เห็นว่าในปีที่ 1 รถบัสเซลล์นั้นมีค่าอัตราส่วนมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่ายเข้าใกล้ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารายได้และรายจ่ายนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเข้าสู่ปีที่ 5 รถบัสเซลล์และรถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอินมีค่าอัตราส่วนมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่ายสูงสุดที่ 2.34 ในปีที่ 12 รถบัสเซลล์มีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเชื้อเพลิงที่มากขึ้นและมีการลงทุนเปลี่ยนรถบัสใหม่เนื่องจากหมดอายุการใช้งาน อย่างไรก็ตาม รถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอินมีค่าอัตราส่วนมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่ายในปีที่ 7 สูงสุดที่ 2.61 และในภาพรวมตลอดอายุการใช้งาน 24 ปี มีค่าสูงสุด 1.72 ซึ่งมากกว่าระบบรถบัสรูปแบบอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่าระบบรถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอินมีความคุ้มค่าการลงทุนและมีผลกำไรมากกว่าระบบรถบัสรูปแบบอื่น ๆ



รูปที่ 4.88 ค่าใช้จ่ายการลงทุนรบบีสตีสตลอดอายุการใช้งาน สำหรับระบบรบบีสไฟฟ้าสายลีม่วง



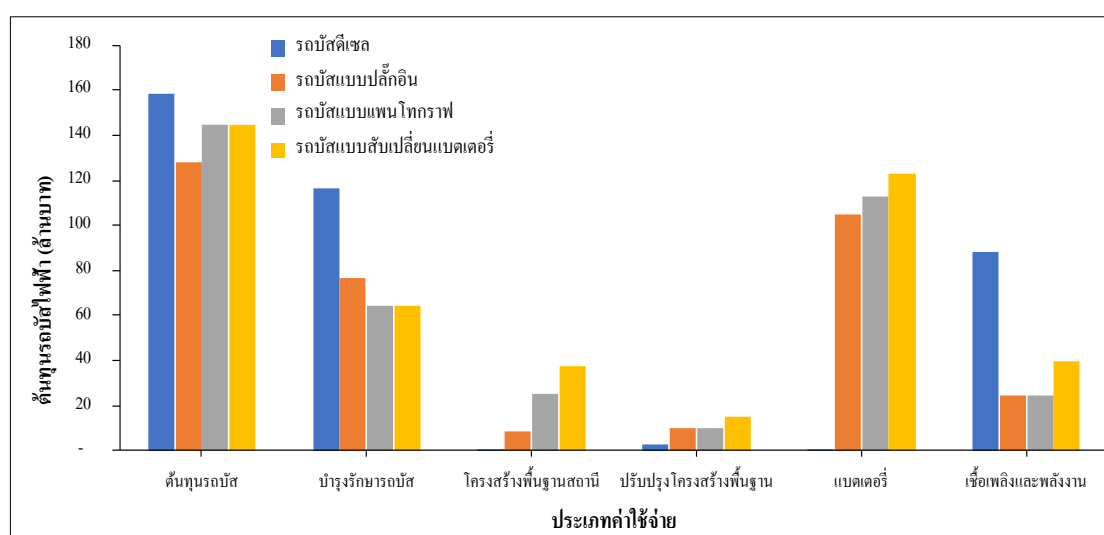
รูปที่ 4.89 อัตราส่วนมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย สำหรับรบบีสไฟฟ้าสายลีม่วง

ตารางที่ 4.29 การเปรียบเทียบต้นทุนรวมสำหรับระบบรถบัสไฟฟ้าสาธารณะสายสีม่วง

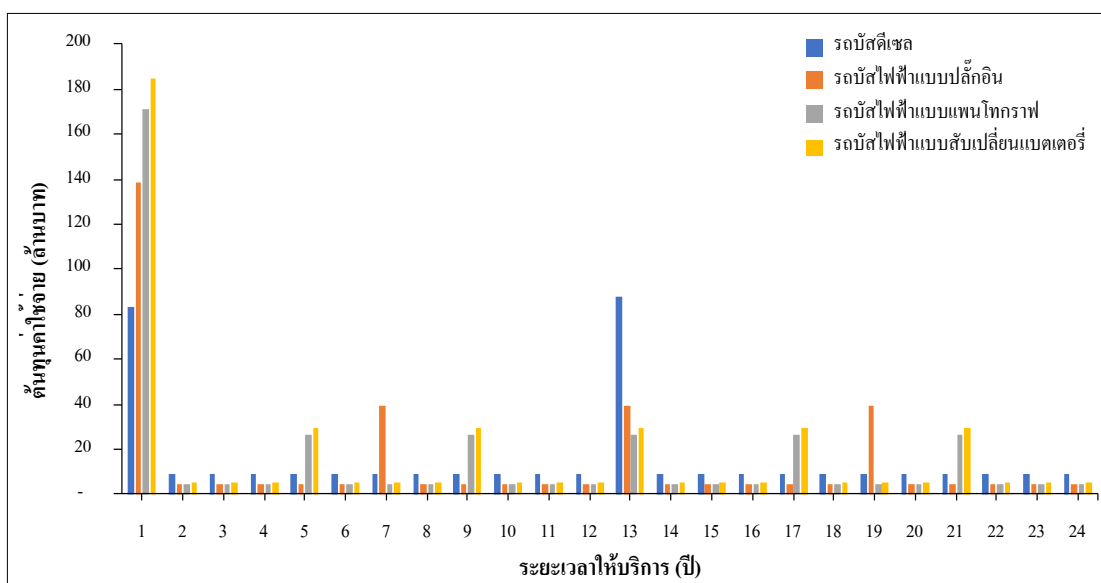
ชนิดของรถบัส	ต้นทุนรวม (ล้านบาท)	B/C ratio
รถบัสดีเซล	1,467.53	1.44
รถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน	1,224.94	1.72
รถบัสไฟฟ้าแบบแพนโทกราฟ	1,433.00	1.47
รถบัสไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่	1,787.22	1.18

ตารางที่ 4.29 แสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายรวมสำหรับการใช้งานรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง จากการเปรียบเทียบต้นทุนรวมของระบบรถบัสไฟฟ้าจะเห็นได้ว่ารถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอินมีต้นทุนต่ำที่สุด (1,224.94 ล้านบาท) ช่วยประหยัดเงินมากที่สุดในระยะเวลา 24 ปี

ต้นทุนสำหรับระบบรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว แสดงดังรูปที่ 4.90 โดยมีค่าใช้จ่ายด้านแบตเตอรี่ที่สูงที่สุดสำหรับรถบัสไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ เห็นได้ว่ารถบัสดีเซลมีค่าใช้จ่ายด้านต้นทุนรถบัสและการบำรุงรักษา รวมถึงมีการใช้พลังงานสูง การเปลี่ยนแบตเตอรี่สำหรับรถบัสไฟฟ้าแบบแพนโทกราฟ เกิดขึ้นหลังจาก 4 ปี รถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน จะมีการเปลี่ยนแบตเตอรี่ทุก ๆ 8 ปี และรถบัสไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่มีการเปลี่ยนแบตเตอรี่ทุก ๆ 4 ปี และมีแบตเตอรี่สำรองจำนวน 3 ลูก รูปที่ 4.91 แสดงค่าใช้จ่ายการลงทุนที่ระยะเวลา 24 ปี แสดงให้เห็นว่าในปีแรกมีการลงทุนที่สูงสำหรับโครงสร้างพื้นฐานและการซื้อจริงของรถบัส

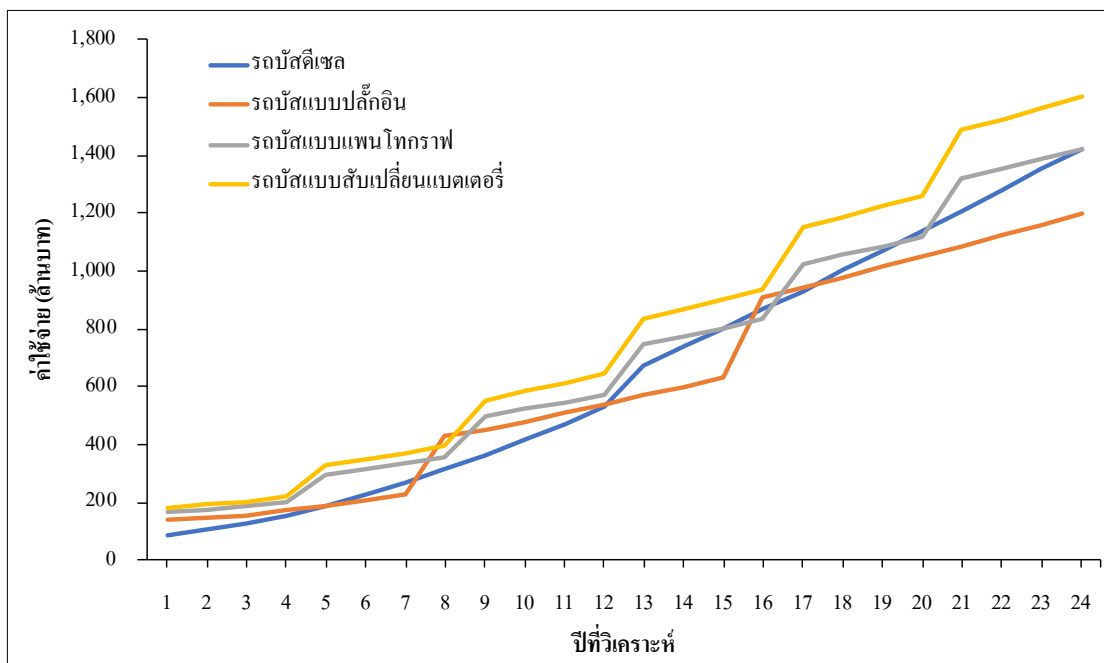


รูปที่ 4.90 ต้นทุนการลงทุนระบบรถบัสโดยสารสาธารณะสายสีเขียว

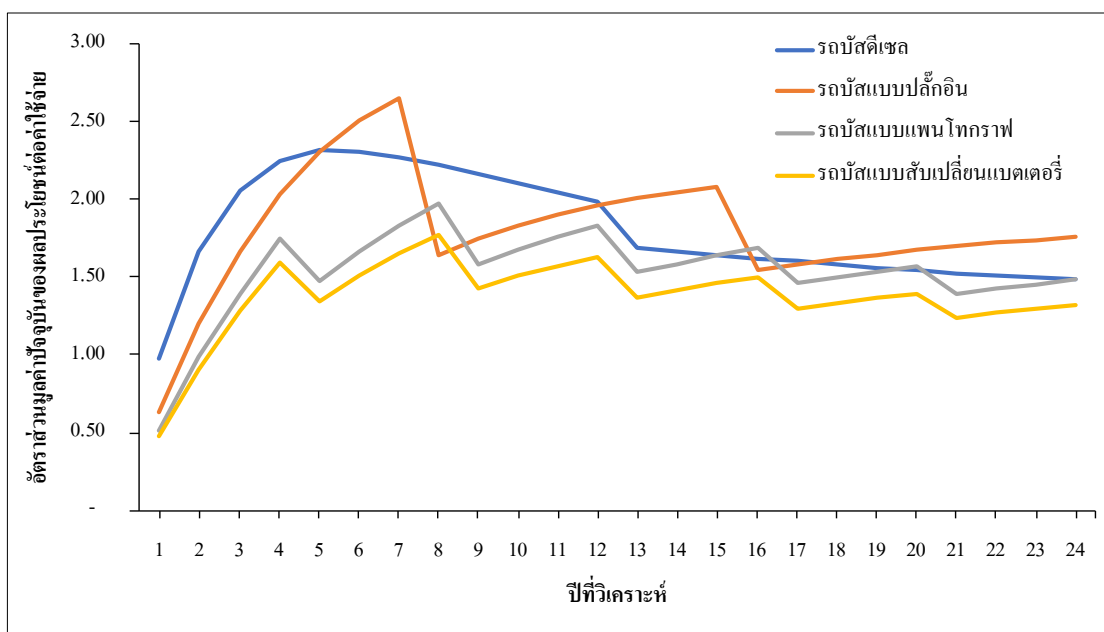


รูปที่ 4.91 ค่าใช้จ่ายการลงทุนรถบัสโดยสาร 24 ปี สำหรับระบบระบบไฟฟ้าสายสีเขียว

รูปที่ 4.92 แสดงค่าใช้จ่ายการลงทุนรถบัสตลอดอายุการใช้งาน 24 ปี สำหรับระบบระบบไฟฟ้าสายสีเขียว แสดงให้เห็นว่ามีการเพิ่มขึ้นของค่าใช้จ่ายในปีแรกถึงปีสุดท้าย หลังจากการให้บริการ 24 ปี รถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอินมีค่าใช้จ่ายโดยรวมน้อยที่สุด และรถบัสไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่มีการลงทุนสูงที่สุด รูปที่ 4.93 แสดงอัตราส่วนมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย สำหรับระบบรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว แสดงให้เห็นว่าในปีที่ 1 รถบัสดีเซลนั้นมีค่าอัตราส่วนมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่ายเข้าใกล้ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารายได้และรายจ่ายนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเข้าสู่ปีที่ 5 รถบัสดีเซลและรถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอินมีค่าอัตราส่วนมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่ายสูงสุดที่ 2.31 ในปีที่ 12 รถบัสดีเซลมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเชื้อเพลิงที่มากขึ้นและมีการลงทุนเปลี่ยนรถบัสใหม่เนื่องจากหมดอายุการใช้งานค่าอัตราส่วนมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่ายจึงลดลง อย่างไรก็ตาม รถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอินมีค่าอัตราส่วนมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่ายในปีที่ 7 สูงสุดที่ 2.65 และในภาพรวมตลอดอายุการใช้งาน 24 ปี มีค่าสูงสุด 1.76 ซึ่งมากกว่าระบบรถบัสรูปแบบอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่าระบบรถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอินมีความคุ้มค่าการลงทุนและมีผลกำไรมากกว่าระบบรถบัสแบบอื่น



รูปที่ 4.92 ค่าใช้จ่ายการลงทุนรถบัสตลอดอายุการใช้งาน สำหรับระบบรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว

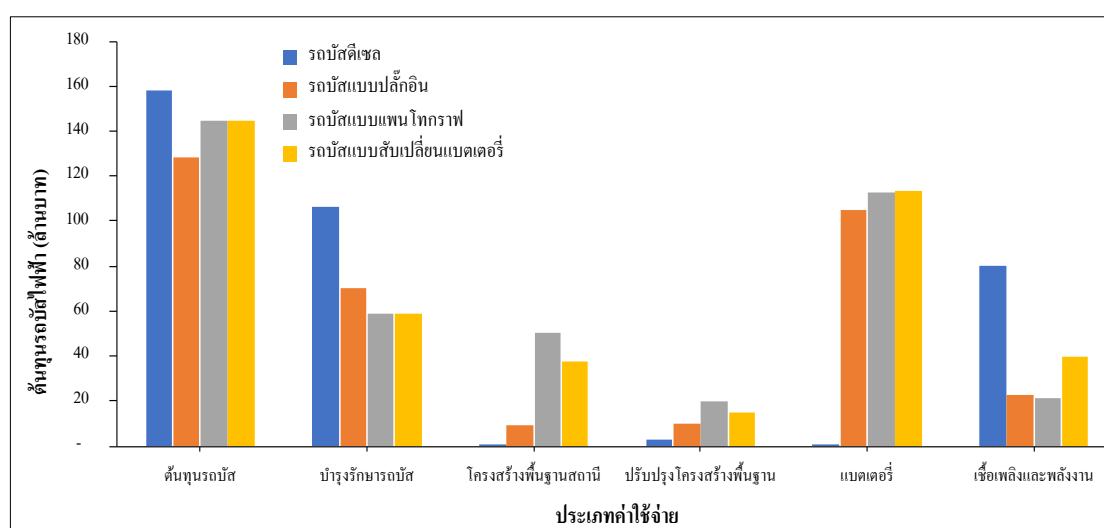


รูปที่ 4.93 อัตราส่วนมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย สำหรับรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว

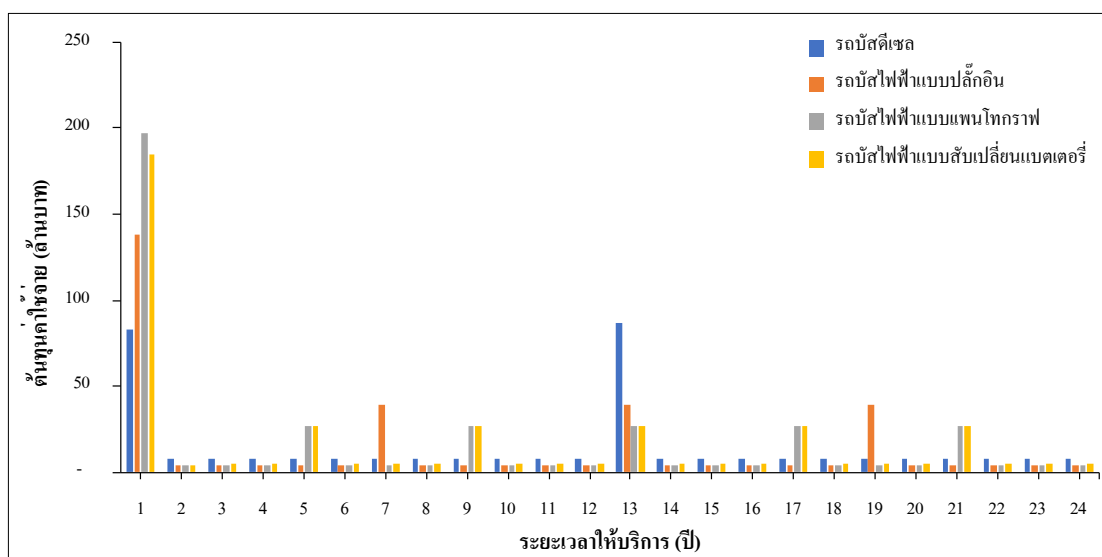
ตารางที่ 4.30 การเปรียบเทียบต้นทุนรวมสำหรับระบบรถบัไฟฟ้าสาธารณะสายสีเขียว

ชนิดของรถบั	ต้นทุนรวม (ล้านบาท)	B/C ratio
รถบัดีเซล	1,424.69	1.48
รถบัไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน	1,196.45	1.76
รถบัไฟฟ้าแบบแพนโทกราฟ	1,419.79	1.49
รถบัไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่	1,603.65	1.32

ตารางที่ 4.30 แสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายรวมสำหรับการใช้งานรถบัสายสีเขียว แสดงให้เห็นว่ารถบัไฟฟ้าแบบปลั๊กอินมีต้นทุนต่ำที่สุด (1,196.45 ล้านบาท) ช่วยประหยัดเงินมากที่สุด ในระยะเวลา 24 ปี ต้นทุนสำหรับระบบรถบัไฟฟ้าสายสีส้ม แสดงดังรูปที่ 4.94 โดยมีค่าใช้จ่ายด้านแบตเตอรี่ที่สูงที่สุดสำหรับรถบัไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่และรถบัไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน จะเห็นได้ว่ารถบัดีเซลมีค่าใช้จ่ายด้านการบำรุงรักษาและมีการใช้พลังงานสูง การเปลี่ยนแบตเตอรี่สำหรับรถบัไฟฟ้าแบบแพนโทกราฟที่มีการประจุไฟฟ้าระหว่างเส้นทาง เกิดขึ้นหลังจาก 4 ปี รถบัไฟฟ้าแบบปลั๊กอินจะมีการเปลี่ยนแบตเตอรี่ทุก ๆ 8 ปี และรถบัไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่จะมีการเปลี่ยนแบตเตอรี่ทุก ๆ 4 ปี และมีแบตเตอรี่สำรองจำนวน 3 ลูก รูปที่ 4.95 แสดงค่าใช้จ่ายการลงทุนที่ระยะเวลา 24 ปี แสดงให้เห็นว่าการลงทุนสูงในปีแรกสำหรับโครงสร้างพื้นฐานและการซื้อจริงของรถบั โดยเฉพาะต้นทุนของรถบัไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

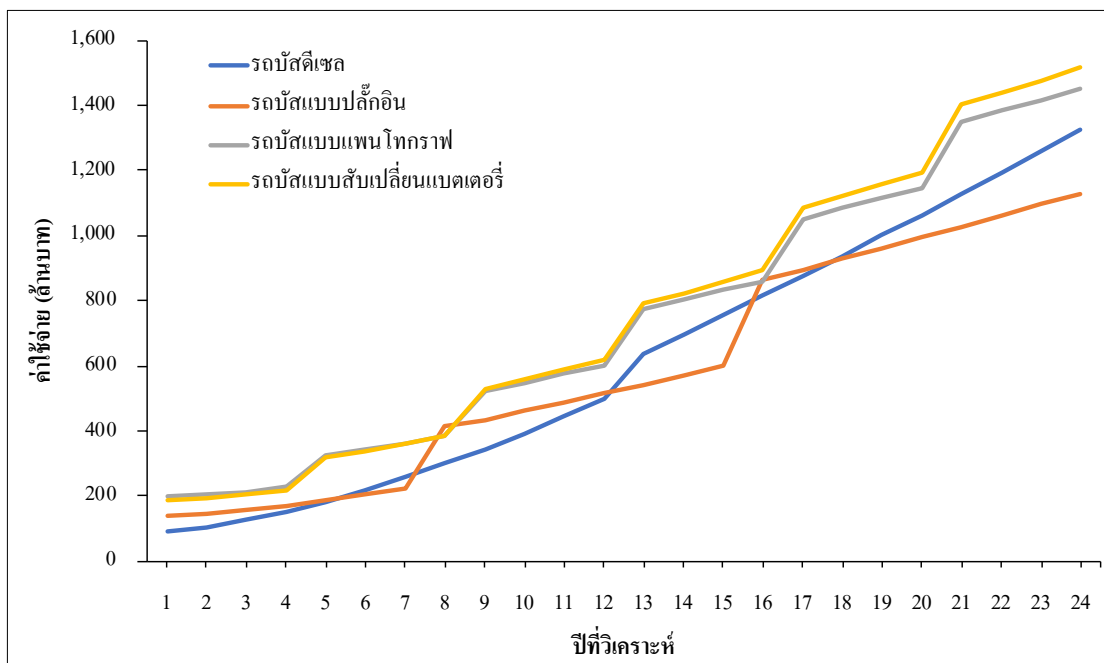


รูปที่ 4.94 ต้นทุนการลงทุนระบบรถบัโดยสารสาธารณะสายสีส้ม

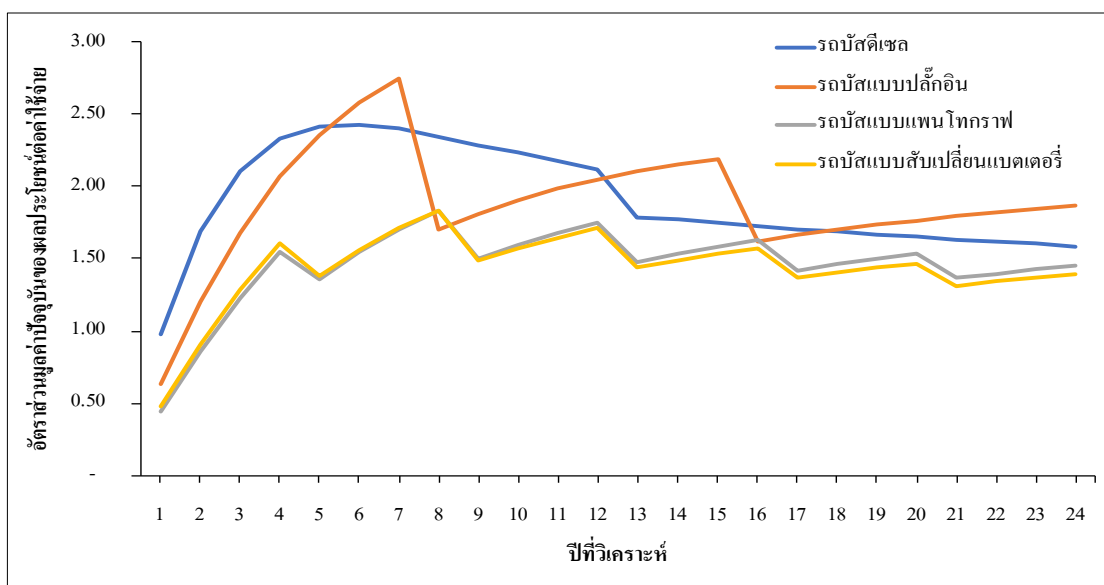


รูปที่ 4.95 ค่าใช้จ่ายการลงทุนรถบัสโดยสาร 24 ปี สำหรับระบบแบตเตอรี่ไฟฟ้าสายสี่สั้ม

รูปที่ 4.96 แสดงค่าใช้จ่ายการลงทุนรถบัสตลอดอายุการใช้งาน 24 ปี สำหรับระบบแบตเตอรี่ไฟฟ้าสายสี่สั้ม แสดงให้เห็นว่ามีการเพิ่มขึ้นของค่าใช้จ่ายในปีแรกถึงปีสุดท้าย ซึ่งรถบัสดีเซลค่อนข้างจะมีค่าใช้จ่ายน้อยกว่ารถบัสไฟฟ้า แต่หลังจากการให้บริการ 24 ปี รถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอินมีค่าใช้จ่ายโดยรวมน้อยที่สุด และรถบัสไฟฟ้าแบบสลับเปลี่ยนแบตเตอรี่มีการลงทุนสูงที่สุด รูปที่ 4.97 แสดงอัตราส่วนมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย สำหรับระบบรถบัสไฟฟ้าสายสี่สั้ม แสดงให้เห็นว่าในปีที่ 1 รถบัสดีเซลนั้นมีค่าอัตราส่วนมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่ายเข้าใกล้ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารายได้และรายจ่ายนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน และรถบัสไฟฟ้าจะเริ่มมีผลกำไรเมื่อเข้าสู่ปีที่ 2 เมื่อเข้าสู่ปีที่ 5 รถบัสดีเซลและรถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอินมีค่าอัตราส่วนมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่ายสูงสุดที่ 2.58 ในปี 12 รถบัสดีเซลมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเชื้อเพลิงที่มากขึ้นและมีการลงทุนเปลี่ยนรถบัสใหม่เนื่องจากหมดอายุการใช้งานซึ่งทำให้ค่าอัตราส่วนมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่ายลดลง อย่างไรก็ตาม รถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอินมีค่าอัตราส่วนมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่ายในปีที่ 7 สูงสุดที่ 2.74 และในภาพรวมตลอดอายุการใช้งาน 24 ปี มีค่าสูงสุด 1.87 ซึ่งมากกว่าระบบรถบัสรูปแบบอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่าระบบรถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอินมีความคุ้มค่าการลงทุนและมีผลกำไรมากกว่าระบบรถบัสแบบอื่น



รูปที่ 4.96 ค่าใช้จ่ายการลงทุนรถบัสตลอดอายุการใช้งาน สำหรับระบบรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม



รูปที่ 4.97 อัตราส่วนมูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์ต่อค่าใช้จ่าย สำหรับรถบัสไฟฟ้าสายสีส้ม

ตารางที่ 4.31 การเปรียบเทียบต้นทุนรวมสำหรับระบบรถบัสดำเนินการสายสีส้ม

ชนิดของรถบัสดำเนินการ	ต้นทุนรวม (ล้านบาท)	B/C ratio
รถบัสดำเนินการ	1,327.66	1.59
รถบัสดำเนินการแบบปลั๊กอิน	1,128.99	1.87
รถบัสดำเนินการแบบแท็กซี่โทกราฟ	1,448.13	1.46
รถบัสดำเนินการแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่	1,513.66	1.39

ตารางที่ 4.31 แสดงการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายรวมสำหรับการใช้งานรถบัสดำเนินการสายสีส้มจากการเปรียบเทียบต้นทุนรวมของระบบรถบัสดำเนินการจะเห็นได้ว่ารถบัสดำเนินการแบบปลั๊กอินมีต้นทุนต่ำที่สุด (1,128.99 ล้านบาท) ช่วยประหยัดเงินมากที่สุดในระยะเวลา 24 ปี เมื่อเทียบกับรถบัสดำเนินการแบบแท็กซี่โทกราฟ และรถบัสดำเนินการแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

ตารางที่ 4.32 แสดงมูลค่าปัจจุบันสุทธิของระบบรถบัสดำเนินการ แสดงให้เห็นว่ารถบัสดำเนินการแบบปลั๊กอินมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิต่ำที่สุด มีความคุ้มค่าการลงทุนสูงที่สุด รองลงมา คือ ระบบรถบัสดำเนินการแบบแท็กซี่โทกราฟ และที่มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิน้อยที่สุด คือ ระบบรถบัสดำเนินการแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ ดังนั้น การลงทุนของระบบรถบัสดำเนินการแบบปลั๊กอินมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิต่ำที่สุด ซึ่งบ่งชี้ว่าโครงการมีความเหมาะสมในการลงทุน

ตารางที่ 4.32 มูลค่าปัจจุบันสุทธิของระบบรถบัสดำเนินการ (NPV)

เส้นทาง	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (บาท)			
	รถบัสดำเนินการ	รถบัสดำเนินการแบบปลั๊กอิน	รถบัสดำเนินการแบบแท็กซี่โทกราฟ	รถบัสดำเนินการแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่
สายสีม่วง	280,142,420	292,445,438	231,534,250	139,047,624
สายสีเขียว	290,602,419	299,161,315	234,741,014	182,765,552
สายสีส้ม	313,168,430	315,494,050	211,289,310	204,215,888

จากผลการวิเคราะห์ต้นทุนของรถบัสดำเนินการของทั้ง 3 เส้นทาง แสดงให้เห็นว่า รถบัสดำเนินการแบบปลั๊กอินที่มีการประจุไฟฟ้าที่สถานีต้นทาง คือ กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการลงทุนตามสมมติฐานที่กำหนด การใช้พลังงานต่ำที่สุดของรถบัสดำเนินการเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากไม่เพียงส่งผลต่อค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเท่านั้น แต่ยังส่งผลต่อการสึกหรอของแบตเตอรี่และเวลาที่ใช้ในการประจุไฟฟ้าอีกด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับรถบัสดำเนินการแบบแท็กซี่โทกราฟแล้วรถบัสดำเนินการแบบปลั๊กอินยังมีการลงทุนที่

ใกล้เคียงกันเนื่องจากรถบัสดีเซลนั้นมีอายุการใช้งานของเครื่องยนต์น้อยกว่ารถบัสไฟฟ้าและมีการใช้เชื้อเพลิงที่สูงมาก รถบัสไฟฟ้ายังสามารถลดมลภาวะทางอากาศได้ด้วยการปล่อยมลพิษเป็นศูนย์ เพื่อลดความเสี่ยงของผู้ลงทุนอายุการใช้งานของรถบัสและแบตเตอรี่ต้องได้รับการรับประกันจากผู้ผลิต ราคาของสถานีประจุไฟฟ้าควรมีการตรวจสอบจากผู้ผลิตรายเดียวกัน และราคาน้ำมันดีเซลจะมีผลต่อการคำนวณการใช้พลังงานของรถบัสดีเซลอย่างมากซึ่งยังไม่คิดอัตราการปรับเพิ่มขึ้นของราคาน้ำมันใน 24 ปี

4.7 สรุป

ในบทที่ 4 นี้ได้ทำการวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้าในแต่ละเส้นทางที่เป็นเส้นทางกรณีศึกษา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา โดยทำการศึกษาค่าความชันของเส้นทางโดยใช้โปรแกรม Google earth pro ค่าความชันนี้จะมีผลต่อการใช้พลังงานของรถบัสไฟฟ้าสำหรับสร้างแรงฉุดลาก กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตันถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาแรงในการเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้าโดยทั่วไปถูกแบ่งออกเป็น 4 โหมดการทำงาน ได้แก่ โหมดเร่งความเร็ว โหมดคงค่าความเร็ว โหมดชะลอความเร็ว และโหมดเบรก โดยอัตราการใช้พลังงานของแต่ละโหมคนั้นแตกต่างกันไปตามความเร็วและความเร่งของรถบัสไฟฟ้า การเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟถูกนำมาใช้เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าขณะที่รถบัสไฟฟ้ามีการเบรกซึ่งสามารถช่วยลดการใช้พลังงานได้เป็นอย่างดี ผลการจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง พลังงานที่ใช้สำหรับการให้บริการระยะทางไปและกลับรวม 25.4 km มีอัตราการใช้พลังงานเฉลี่ย 1.1692 kWh/km ซึ่งมีการใช้พลังงานไฟฟ้า 118.79 kWh/คัน/วัน ผลการจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าสายสีเขียว พลังงานที่ใช้สำหรับการให้บริการระยะทางรวม 22.8 km มีอัตราการใช้พลังงานเฉลี่ย 1.2008 kWh/km มีการใช้พลังงานไฟฟ้า 108.68 kWh/คัน/วัน ผลการจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าสายสีชมพู พลังงานที่ใช้สำหรับการให้บริการระยะทางรวม 21.8 km มีอัตราการใช้พลังงานเฉลี่ย 1.2250 kWh/km ซึ่งมีการใช้พลังงานไฟฟ้า 100.24 kWh/คัน/วัน ดังนั้น รถบัสไฟฟ้ามีการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยทั้ง 3 เส้นทาง 1.1983 kWh/km ซึ่งมีอัตราการใช้พลังงานใกล้เคียงกับคุณสมบัติการใช้พลังงานของรถบัสไฟฟ้าที่นำมาใช้เป็นกรณีศึกษา

ผลการวิเคราะห์กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้า โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ทำการศึกษากลยุทธ์การประจุไฟฟ้าสำหรับรถบัสไฟฟ้า 3 รูปแบบ รูปแบบที่ 1 กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทางจะใช้รถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอินจำนวน 10 คัน ทั้ง 3 เส้นทาง กำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทาง

ตามเส้นทางกรณีศึกษา คือ 91.90 kW 89.02 kW และ 164.19 kW ตามลำดับ รูปแบบที่ 2 กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วยิ่งแบบแผนโทกราฟ ซึ่งจะใช้รถบัสไฟฟ้าแบบแผนโทกราฟ โดยมีรูปแบบการประจุไฟฟ้าแบบเร็วยิ่ง ทำการประจุไฟฟ้าเมื่อรถบัสหยุดให้บริการที่สถานีต้นทางและที่สถานีปลายทางใช้เวลาประจุไฟฟ้า 5 นาที มีจำนวนการประจุไฟฟ้า 8 ครั้งต่อวัน กำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วยิ่งแบบแผนโทกราฟ ตามเส้นทางกรณีศึกษาในหนึ่งวัน คือ 186.59 kW 173.51 kW และ 160.26 kW ตามลำดับ รูปแบบที่ 3 กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ โดยใช้รถบัสไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ ที่มีการประจุไฟฟ้าแบบเร็ว การประจุไฟฟ้านั้นจะทำการประจุไฟฟ้าเมื่อรถบัสหยุดสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ที่สถานีต้นทาง ซึ่งกำหนดให้มีสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่สถานีเดียว รถบัสไฟฟ้าสามารถให้บริการเที่ยวไป-เที่ยวกลับ 2 รอบ ต่อการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่หนึ่งครั้ง และกำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ ตามเส้นทางกรณีศึกษา คือ 236.72 kW 216.57 kW และ 200.49 kW ตามลำดับ

ผลการจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อเชื่อมต่อกับสถานีประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าเข้ากับระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบผลกระทบของการประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้าทั้ง 3 รูปแบบ ต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเชื่อมต่อโหลดการประจุไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้าเข้ากับระบบทดสอบทำให้เกิดแรงดันตกในระบบและเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียมากขึ้น ผลการจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา โดยมีวงจรไฟฟ้าที่นำมาศึกษา 5 วงจร ตามเส้นทางกรณีศึกษา ผลการจำลองผลกระทบการประจุไฟฟ้าระบบรถบัสไฟฟ้า ไม่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกต่ำกว่ามาตรฐานทุกวงจร แต่ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มมากขึ้น

ผลการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะแบ่งผลการจำลองออกเป็น 2 หัวข้อ คือ ผลการจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด ผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา

ผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด ซึ่งได้ทำการหาค่าที่เหมาะสมของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายเพื่อใช้ปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ การบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด ด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค และวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายสามารถเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบได้ ซึ่งทั้งสองวิธีจะได้คำตอบของขนาดระบบผลิตพลังงานไฟฟ้า

แบบกระจายที่เท่ากัน ประสิทธิภาพการลู่เข้าคำตอบของทั้ง 2 วิธี ถูกนำมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งการลู่เข้าหาคำตอบของวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม ได้คำตอบที่เร็วกว่าวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่ม ดังนั้น วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียมจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา

การบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา โดยการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายและชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า โดยใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียมในการเลือกตำแหน่งและขนาดที่เหมาะสมที่สุด ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการปรับปรุงทั้งสองแบบสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าได้ โดยการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าจะใช้ขนาดของชุดตัวเก็บประจุเล็กกว่าขนาดของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย อย่างไรก็ตาม ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายนั้นมีราคาของระบบที่สูงมากกว่าชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า แต่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มาก จึงเหมาะสมกับผู้สนใจลงทุนด้านพลังงานเพื่อผลิตไฟฟ้าขายให้กับระบบ และชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าก็สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้เช่นเดียวกันแต่มีการลงทุนที่ต่ำกว่าและสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้อย่างเดียวจึงเหมาะกับการนำมาใช้สำหรับปรับปรุงระบบไฟฟ้า โดยการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ดังนั้น หากมองในมุมของการไฟฟ้า การติดตั้งชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าจึงเหมาะสมมากกว่าการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้า

ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายและต้นทุนสำหรับระบบรถบัสไฟฟ้าสาธารณะ โดยใช้กรณีศึกษาสำหรับรถบัสไฟฟ้าที่มีรูปแบบการประจุไฟฟ้า 3 รูปแบบ อีกทั้งยังนำระบบรถบัสดีเซลมาพิจารณาเปรียบเทียบ การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายรวมจะเห็นได้ว่ารถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอินมีต้นทุนต่ำที่สุดสำหรับทั้ง 3 เส้นทางกรณีศึกษา ซึ่งช่วยประหยัดเงินลงทุนมากที่สุดในระยะเวลา 24 ปี เมื่อเทียบกับรถบัสดีเซล รถบัสไฟฟ้าแบบแพนโทกราฟ และรถบัสไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ จากต้นทุนทั้งหมดแบตเตอรี่เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการคำนวณ โดยเฉพาะรถบัสไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ที่ใช้จำนวนแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น ดังนั้น กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินสำหรับรถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน ที่มีการประจุไฟฟ้าที่สถานีต้นทางและปลายทาง เป็นกลยุทธ์การลงทุนที่ดีที่สุดตามสมมติฐานที่กำหนด การใช้พลังงานต่ำที่สุดของรถบัสไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากไม่เพียงส่งผลต่อค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเท่านั้น แต่ยังส่งผลต่อการสึกหรอของแบตเตอรี่และเวลาที่ใช้ในการประจุไฟฟ้าอีกด้วย

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

การศึกษาวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นการศึกษากลยุทธ์ที่เหมาะสมสำหรับการประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้าสาธารณะ โดยใช้พื้นที่กรณีศึกษา จังหวัดนครราชสีมา เริ่มศึกษาจากการวิเคราะห์พื้นที่และเส้นทางกรณีศึกษา เพื่อให้การจำลองมีความแม่นยำมากขึ้น รวมถึงทำการศึกษการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ของรถบัสไฟฟ้าโดยใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน ศึกษาผลกระทบและการบรรเทาผลกระทบจากการประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้า และวิเคราะห์ต้นทุนระบบรถบัสไฟฟ้าเพื่อหากลยุทธ์การประจุไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุด ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

ผลการวิเคราะห์กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้า โดยทำการศึกษากลยุทธ์การประจุไฟฟ้าสำหรับรถบัสไฟฟ้า 3 รูปแบบ และใช้เส้นทางกรณีศึกษา 3 เส้นทาง ผลการจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับเส้นทางรถบัสไฟฟ้าสายสีม่วง สายสีเขียว และสายสีส้ม คือ 118.79 kWh 108.69 kWh และ 100.24 kWh ตามลำดับ ดังนั้น รถบัสไฟฟ้าใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยทั้ง 3 เส้นทาง 1.1983 kWh/km มีอัตราการใช้พลังงานใกล้เคียงกับคุณสมบัติการใช้พลังงานของรถบัสไฟฟ้าที่นำมาใช้เป็นกรณีศึกษา สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้ารูปแบบที่ 1 กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินที่ต้นทางและปลายทางจะใช้รถบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน ผลการจำลองการประจุไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดตามเส้นทางกรณีศึกษา คือ 91.90 kW 89.02 kW และ 164.19 kW ตามลำดับ รูปแบบที่ 2 กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าเร็วแบบแผนโทกราฟ ซึ่งจะใช้รถบัสไฟฟ้าแบบแผนโทกราฟ โดยมีรูปแบบการประจุไฟฟ้าแบบเร็ว ผลการจำลองการประจุไฟฟ้ามีกำลังไฟฟ้าสูงสุดตามเส้นทางกรณีศึกษา คือ 186.59 kW 173.51 kW และ 160.26 kW ตามลำดับ รูปแบบที่ 3 กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าด้วยการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ โดยใช้รถบัสไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ที่มีการประจุไฟฟ้าแบบเร็ว ผลการจำลองการประจุไฟฟ้ามีกำลังไฟฟ้าสูงสุดตามเส้นทางกรณีศึกษา คือ 236.71 kW 216.57 kW และ 200.49 kW ตามลำดับ

ผลการจำลองการไหลของกำลังไฟฟ้าเมื่อเชื่อมต่อกับสถานีประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าเข้ากับระบบทดสอบ IEEE 33 โนด ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบผลกระทบของการประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้าทั้ง 3 รูปแบบ ต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่าเมื่อเชื่อมต่อโหลดการประจุไฟฟ้าของระบบรถบัสไฟฟ้าเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกต่ำกว่ามาตรฐาน

และค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มขึ้นจาก 0.0948 MW เป็น 0.1024 MW โดยเฉพาะการเชื่อมต่อโหลด ประจุไฟฟ้าแบบเร็วสำหรับรถบัสไฟฟ้าแบบเปลี่ยนแบตเตอรี่ แสดงให้เห็นว่าเกิดแรงดันไฟฟ้าตกที่ 0.9435 p.u. และกำลังไฟฟ้าสูญเสียมากที่สุด 0.1156 MW ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเชื่อมต่อ โหลดการประจุไฟฟ้าเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้าทำให้เกิดแรงดันตกและเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่ม มากขึ้น ผลการจำลองผลกระทบของการประจุไฟฟ้าระบบรถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา โดยมีวงจรไฟฟ้าที่นำมาศึกษา 5 วงจร ผลการจำลองผลกระทบการประจุไฟฟ้า ทั้ง 5 วงจร ไม่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกต่ำกว่ามาตรฐาน แต่มีค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเพิ่มมากขึ้น

ผลการจำลองการบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่าย ไฟฟ้า โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด ทำการหาค่าที่เหมาะสมของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้า แบบกระจายเพื่อใช้ปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบ การบรรเทาผลกระทบ ของการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบทดสอบ IEEE 33 โหนด ด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค และวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียม ได้ค่าระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมขนาดเท่ากัน ค่าที่เหมาะสมสำหรับระบบรถบัสไฟฟ้า แบบปลั๊กอิน โดยติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายที่โหนด 18 ขนาด 1.3481 MW มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลงจาก 0.1024 MW เป็น 0.0344 MW สำหรับรถบัสไฟฟ้าแบบแพนโท กราฟ ติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายที่โหนด 18 ขนาด 1.4427 MW กำลังไฟฟ้าสูญเสีย ลดลงจาก 0.1109 MW เป็น 0.0344 MW และสำหรับรถบัสไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ ติดตั้ง ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายที่โหนด 18 ขนาด 1.4929 MW ซึ่งมีกำลังไฟฟ้าสูญเสียลดลง จาก 0.1156 MW เป็น 0.0344 MW แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย สามารถเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าและลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบได้ ประสิทธิภาพการดูเข้า คำตอบของทั้ง 2 วิธี ถูกนำมาเปรียบเทียบกัน การดูเข้าคำตอบของวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบ กลุ่มอนุภาคได้คำตอบที่ดีที่สุดในรอบที่ 16 โดยใช้เวลาคำนวณ 5816 วินาที และการดูเข้าหา คำตอบของวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียมได้คำตอบที่ดีที่สุดในรอบที่ 6 ใช้เวลาคำนวณ 42 วินาที ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียมสำหรับการ จำลองหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการบรรเทาผลกระทบการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าต่อระบบ จำหน่ายไฟฟ้า โดยใช้ระบบจำหน่ายไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา

การบรรเทาผลกระทบของการประจุไฟฟ้ารถบัสไฟฟ้าต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้า จังหวัด นครราชสีมา ด้วยวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอาณานิคมผึ้งเทียมในการเลือกตำแหน่งและขนาดที่ เหมาะสมที่สุดของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายและชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า ผลการจำลอง แสดงให้เห็นว่าวิธีการปรับปรุงทั้งสองแบบสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบไฟฟ้าได้

โดยการติดตั้งชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าจะใช้ขนาดของชุดตัวเก็บประจุเล็กกว่าขนาดของระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจาย อย่างไรก็ตาม ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายนั้นมีราคาของระบบที่สูงมากกว่าชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า แต่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่า จึงเหมาะสมกับผู้สนใจลงทุนด้านพลังงานเพื่อผลิตไฟฟ้าขายให้กับระบบ และชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าก็สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้เช่นเดียวกันแต่มีการลงทุนที่ต่ำกว่าและสามารถลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียได้อย่างเดียวจึงเหมาะกับการนำมาใช้สำหรับปรับปรุงกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า ดังนั้น หากมองในมุมของการไฟฟ้า การติดตั้งชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าจึงเหมาะสมมากกว่าการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้า

ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายและต้นทุนสำหรับระบบรบบัสไฟฟ้าสาธารณะ โดยใช้กรณีศึกษาสำหรับรบบัสไฟฟ้าที่มีรูปแบบการประจุไฟฟ้า 3 รูปแบบ และนำระบบรบบัสดีเซลมาพิจารณาเปรียบเทียบ การเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายรวมจะเห็นได้ว่ารบบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอินมีต้นทุนต่ำที่สุดสำหรับทั้ง 3 เส้นทางกรณีศึกษา ซึ่งช่วยประหยัดเงินลงทุนมากที่สุดในระยะเวลา 24 ปี เมื่อเทียบกับรบบัสดีเซล รบบัสไฟฟ้าแบบแพนโทกราฟ และรบบัสไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ จากต้นทุนทั้งหมดแบตเตอรี่เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการคำนวณ โดยเฉพาะรบบัสไฟฟ้าแบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ที่ใช้จำนวนแบตเตอรี่เพิ่มขึ้น อีกทั้ง กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าของระบบรบบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอินมีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าน้อยกว่ากลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบอื่น ๆ ดังนั้น กลยุทธ์การประจุไฟฟ้าแบบปลั๊กอินสำหรับรบบัสไฟฟ้าแบบปลั๊กอิน ที่มีการประจุไฟฟ้าแบบทั่วไปที่สถานีต้นทางและปลายทาง เป็นกลยุทธ์การลงทุนที่ดีที่สุดตามสมมติฐานที่กำหนด การใช้พลังงานต่ำที่สุดของรบบัสไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากไม่เพียงส่งผลต่อค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเท่านั้น แต่ยังส่งผลต่อการสึกหรอของแบตเตอรี่และเวลาที่ใช้ในการประจุไฟฟ้าอีกด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาผลกระทบของโหลดการประจุไฟฟ้าของระบบรบบัสไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าขนาดเล็กแบบไมโครกริด ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อระดับแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียมากขึ้น รวมถึงการหาแนวทางในการปรับปรุงความน่าเชื่อถือของระบบไมโครกริด

5.2.2 ศึกษาการจัดการโหลดของระบบจำหน่ายไฟฟ้าหรือไมโครกริด เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานร่วมกับระบบรบบัสไฟฟ้าและการประจุไฟฟ้าของระบบรบบัสไฟฟ้า แทนการติดตั้งระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบกระจายและชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า

รายการอ้างอิง

- โครงการศึกษาแนวทางการจัดการโดยสารระบบไฟฟ้า จำนวน 200 คัน. รายงานรายละเอียดผลการศึกษาโครงการ. องค์การขนส่งมวลชนกรุงเทพ. มีนาคม 2559.
- ชำนาญ ห่อเกียรติ (2550). การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 2. 2550.
- ชนิดชัย กุลวรรณพงษ์ (2550). เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม. เอกสารประกอบการสอนสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. หน้า 191-196.
- บัณฑิต เพ็ชดา (2557). การวิเคราะห์ผลกระทบการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าแบบรวดเร็วต่อแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่ายโดยการจำลองมอนติคาร์โล. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 9-10.
- พินิจ วงศ์เดช (2561). กลยุทธ์การจัดการพลังงานที่เหมาะสมสำหรับไมโครกริดที่ใช้ระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริด โดยพิจารณาอายุการใช้งานของแบตเตอรี่. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. หน้า 56-58.
- รักษพล ชนานุวงศ์. แบตเตอรี่: อุปกรณ์ให้พลังงานแห่งอนาคต. นิตยสาร สสวท. ปีที่ 45 ฉบับที่ 204 มกราคม - กุมภาพันธ์ 2560.
- รายงานผลการดำเนินงานของคณะกรรมการกำหนดราคากลางการจัดซื้อจัดจ้างโดยสารปรับอากาศ ใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ (NGV) พร้อมซ่อมแซมและบำรุงรักษารถโดยสาร จำนวน 489 คัน, 2559. ที่ ม ๑ : http://www.bmta.co.th/sites/default/files/files/draft-tor/numatiraakhaaklaa ngchuerth_489_khan_11_miikh.59.pdf.
- ศุภฤกษ์ อัครวิทยาพันธุ์ (2541). แบตเตอรี่เก็บพลังงานแห่งอนาคต. บทความวิชาการศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ: MTEC. ตุลาคม-ธันวาคม, 2541.
- เอกพันธ์ ผัดศรี คณภรณ์ ก้อนแก้ว และ อัครินทร์ อินทนิเวศน์ (2561). การวิเคราะห์ประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบเชื่อมต่อกับสายส่งขนาด 300 kW. การประชุมวิชาการครั้งที่ 3 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา. 30 สิงหาคม พ.ศ. 2561.

- ABB. (2014). ABB and Volvo form global partnership for electric and hybrid bus fast- charging. **ABB Press Release**. Retrieved November 10, 2019, Available online: <http://www.abb.com/cawp/seitp202/6ce621212d3e502ac1257d1c002eb875.aspx>.
- Ackermann, T., Andersson, G., and Söder, L. (2001). Distributed generation: a definition. **Electric Power Systems Research**. Vol. 57, No. 3, pp. 195-204.
- Akhavan-Rezai, E., Shaaban, M. F., El-Saadany, E. F., and Zidan, A. (2012). Uncoordinated charging impacts of electric vehicles on electric distribution grids: Normal and fast charging comparison. **IEEE Power and Energy Society General Meeting**.
- Awasthi, A., Venkitesamy, K., Padmanaban, S., Selvamuthukumaran, R., Blaabjerg, F. and Singh, A.K. (2017). Optimal planning of electric vehicle charging station at the distribution system using hybrid optimization algorithm. **Energy**. Vol. 133, pp. 70-78.
- Baghzouz, Y., and Ertem, S. (1990). Shunt Capacitor Sizing for Radial Distribution Feeders with Distorted Substation Voltages. **IEEE Transactions on Power Delivery**. Vol. 5, No. 2, pp. 650 - 657.
- Bak, D., Bak, J., and Kim, S. (2018). Strategies for Implementing Public Service Electric Bus Lines by Charging Type in Daegu Metropolitan City, South Korea. **Sustainability**. Vol. 10, No. 10.
- Baker, P.R. (1978). **Biogas for Cooking Stoves**. London: Chapman and Hall.
- Battery Chargers and Charging Methods. Woodbank Communications Ltd (2005), United Kingdom. Retrieved November 10, 2019, Available online: <https://www.mpoweruk.com/chargers.htm>.
- Battery Charging Methods. Retrieved November 10, 2019, Available online: http://www1.labvolt.com/publications/Exercises/86351-00_4.pdf.
- Bayram, I. S., Michailidis, G., Devetsikiotis, M., and Granelli, F. (2013). Electric Power Allocation in a Network of Fast Charging Stations. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**. Vol. 31, No. 7, pp. 1235-1246.
- Bedell, R., Westerlund B., and Astrand, P. (2011). First Results from Field Testing of Fast Charged Hybrid Buses in Umea, Sweden. **2011 EEVC European Electric Vehicle Conference**.

- Bi, Z., Kleine, R. D., and Keoleian, G. A. (2016). Integrated Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Model for Comparing Plug-in versus Wireless Charging for an Electric Bus System. **Journal of Industrial Ecology**. Vol. 21 No. 2, pp. 344–355.
- Blackburn, S. (2005). The Oxford Dictionary of Philosophy, Oxford University Press, UK.
- Boonraksa, T., Boonraksa, P., Junhuathon, N., and Marungsri, B. (2020). Feasibility of On-Board Photovoltaics on Plug-in Electric Public Transportation Buses. **International Journal of Advanced Science and Technology**. Vol. 29, No. 6s, pp. 627-636.
- Boribun, B., Paolaor, P. and Kulworawanichpong, T. (2013). Impact of electric bus charging in power distribution systems. Paper presented in Advances in Nano. Biomechanics, Robotics and Energy Research. Seoul, Korea. Pp. 562-568.
- BYD - Build Your Dreams (2014). **BYD Website**. Retrieved November 10, 2019, Available online: <http://www.byd.com>.
- Costello, M. (2018). News - Volvo. Retrieved March 20, 2019, Available online: <https://www.goauto.com.au/news/volvo/volvo-working-on-wireless-ev-charging/2011-05-25/9536.html>.
- Courtenay, P. (2014). What is a tram? Retrieved November 10, 2019, Available online: <http://www.thetrams.co.uk/whatisatram.php>.
- Dong, X., Mu, Y., Jia, H., Wu, J., and Yu, X. (2016). Planning of Fast EV Charging Stations on a Round Freeway. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**. Vol. 7 No. 4, pp. 1452-1461.
- El-Zonkoly, A., Ashour, H., and Ahmed, A. (2014). Optimal allocation, sizing and energy management of PHEV parking lots in distribution system. 2014 5th International Renewable Energy Congress (IREC).
- EV Charging Station Installation Guidebook. CCRPC EV Charging Installation Guide June 2014. Retrieved May 20, 2018, Available online: <https://www.driveelectricvt.com/Media/Default/docs/electric-vehicle-charging-station-guidebook.pdf>.
- Fast and Ultra-fast Chargers. Retrieved November 10, 2018, Available online: https://batteryuniversity.com/learn/article/ultra_fast_chargers.

- Halmeaho, T., Rahkola, P., Pelikka, A., Ruotsalainen, S., and Tammi, K. (2015). Electric City Bus Energy Flow Model and Its Validation by Dynamometer Test. 2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). 19-22 Oct. 2015.
- Hu, Y., Liu, H. (2013). Damage Analysis of Lithium Iron Phosphate Batteries for Pure Electric Vehicles. **International Review of Electrical Engineering (IREE)**. Vol. 8, No. 2, pp. 341-350.
- Hutchinson, (2005). Simon Fraser University, Boston Trolleybus Photos. Retrieved November 10, 2019. Available online: http://www.sfu.ca/person/dearmond/chain/Boston_photos-5.htm.
- IEC 61851-1. Electric Vehicle Conductive Charging System – Part 1: General Requirements. IEC, 1st ed., 2001.
- IEC 61851-1/CDV. Electric Vehicle Conductive Charging System – Part 1: General Requirements. 69/160/CDV. IEC TC69 WG4, 2009.
- Kara, S., Li, W., and Sadjiva, N. (2017). Life Cycle Cost Analysis of Electrical Vehicles in Australia. **Procedia CIRP**. Vol. 61, pp. 767-772.
- Karaboga, D., Basturk, B. (2008). On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm. **Applied Soft Computing**. Vol. 8, No. 1, pp. 687-697.
- Karlsson Elin. (2016). Charging infrastructure for electric city buses, An analysis of grid impact and costs. EXAMENSARBETE INOM TEKNIKOMRÅDET, ENERGI OCH MILJÖ OCH HUVUDOMRÅDET ELEKTROTEKNIK, AVANCERAD NIVÅ, 30 HP STOCKHOLM, SVERIGE 2016. Retrieved November 10, 2019, Available online: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:967688/FULLTEXT01.pdf>.
- Kennedy, J., and Eberthart R. (1995). Particle Swarm Optimization. Proc. IEEE Int. Conf. Neural Network. 4: 1942-1948.
- Knowledge of London. (2014). **The London Omnibus**. Retrieved November 10, 2019, Available online: <http://www.knowledgeoflondon.com/buses.html>.
- Larminie, J. and Lowry, J. P. (2012). **Electric vehicle technology explained**. West Sussex, England: J. Wiley.

- Liu, J. (2017). Research and Implementation of Electric Vehicle Fast Charging Station Parking Guidance System Based on Mobile Terminal. **2017 9th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)**. Vol. 1, pp. 230-233.
- Liu, W., Niu, S., Xu, H., and Li, X. (2016). A New Method to Plan the Capacity and Location of Battery Swapping Station for Electric Vehicle Considering Demand Side Management. **Sustainability**. Vol. 8, No. 6, pp. 557.
- Maniere, F. (2011). Premiers omnibus a Nantes. Premiers omnibus a Nantes. Retrieved November 10, 2019, Available online: http://www.herodote.net/10_aout_1826-evenement-18260810.php.
- Neagoe-Stefana, A., Eremia, M., Toma, L., and Neagoe, A. (2015). Impact of charging Electric Vehicles in residential network on the voltage profile using Matlab. **International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)**, pp. 787-791.
- Negarestani, S., Fotuhi-Firuzabad, M., Rastegar, M., and Rajabi-Ghahnavieh, A. (2016). Optimal Sizing of Storage System in a Fast Charging Station for Plug-in Hybrid Electric Vehicles. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**. Vol. 2, Issue 4.
- Peter, V., Tom, T., Noshin, O., and Joeri, V. (2016). Developments and Challenges for EV Charging Infrastructure Standardization. **World Electric Vehicle Journal**. Vol. 8, No. 2, pp. 557-563.
- Potkány, M., Hitka, M., and Krajčirová, L. (2017). Life Cycle Cost Calculation at the Transport Company in the Supply of Production of Wooden Houses – Case Study. **MATEC Web of Conferences**, Vol. 134, pp. 1-7.
- Potkány, M., Hlatká, M., Debnár, M., and Hanzl, J. (2018). Comparison of the Lifecycle Cost Structure of Electric and Diesel Buses. **Nase More**. Vol. 65 No. 4, pp. 270-275.
- Prohaska, R., Kelly, K., and Eudy, L. (2016). Fast charge battery electric transit bus in-use fleet evaluation. **2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)**.
- Proterra Catalyst 40 ft. CATALYST ®: 40 FOOT BUS. Retrieved May 16, 2020. Available online: https://mk0proterra6iwx7rkkj.kinstacdn.com/wp-content/uploads/2019/07/114228_B_SPEC_35_001_Q3_2019_7.3.19.ppd.
- RC Charging Circuit Tutorial & RC Time Constant. (n.d.). Retrieved November 10, 2019, Available online: https://www.electronics-tutorials.ws/rc/rc_1.html.

- Rodrigue, J.P. (2014). Urban Mobility. The Geography of Transport Systems. Retrieved November 10, 2019, Available online: <http://people.hofstra.edu/geotrans/index.html>.
- Saadat, H. (1999). Power System Analysis. The McGraw-Hill companies, Inc.
- SAE J1772. **Electric Vehicle Conductive Charge Coupler**. SAE, 2001.
- Sakulphaisan, G., and Marungsri, B. (2018). Optimal Maximum Speed during Off-Peak Hours for Reduced Energy Consumption of the Bangkok MRT. Proceedings of the 2018 2nd International Conference on Electrical Engineering and Automation (ICEEA 2018). Vol. 139, pp. 135-138.
- Siemens. (2014). On the road – With electric power from the trolleybus to the eHighway. Retrieved June 20, 2020, Available online: <https://new.siemens.com/global/en/company/about/history/news/on-the-road-with-electric-power.html>.
- Silva, C., Sousa, D. M., and Roque, A. (2017). Charging electric vehicles from photovoltaic generation with intermediate energy storage. 2017 6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), pp. 596-601.
- Solaris Bus & Coach SA. (2014). **Group Urbino electric**. Retrieved November 10, 2018, Available online: http://www.solarisbus.com/vehicles_group/urbino-electric.
- Thiringer, T., and Haghbin, S. (2015). Power Quality Issues of a Battery Fast Charging Station for a Fully-Electric Public Transport System in Gothenburg City. **Batteries**. Vol. 1, No. 1, pp. 22-33.
- TOSA. (2014). TOSA2013. Retrieved November 10, 2019, Available online: <http://www.tosa2013.com/#/tosa2013>.
- Types of Charging Stations. Available online: <https://www.homeadvisor.com/cost/garages/install-an-electric-vehicle-charging-station/#stations>.
- VDL Bus & Coach. Retrieved May 20, 2018, Available online: <https://www.vdlbuscoach.com/en/products/citea-electric/citea-sle-xle-electric>.
- Veasey, C. (2014). What is a Trolleybus. Retrieved November 10, 2019, Available online: <http://www.trolleybus.net/subhtml/trams-trolleybuses.htm>.
- Vilppo, O., and Markkula, J. (2015). Feasibility of Electric Buses in Public Transport. **World Electric Vehicle Journal**. Vol. 7, No. 3, pp. 357–365.

- Volvo Group. (2014). **Volvo Group**. Retrieved November 10, 2019, Available online: <http://www.volvogroup.com>.
- Westbrook, M.H. (2001). The Electric Car: Development and Future of Battery, Hybrid and Fuel-Cell Cars, Warrendale, PA, USA: Society of Automotive Engineers, Inc.
- World's Largest Ultra-fast EV Charging Station Goes Live in Beijing. Fully Charging Electric Buses in 10 Minutes. Retrieved Jan. 10, 2019, Available online: <http://e-hike.net/tr/content/worlds-largest-ultra-fast-ev-charging-station-goes-live-beijing-fully-charging-electric>.
- Wu, X., Hu, C., and Chen, J. (2014). Energy Flow Chart-Based Energy Efficiency Analysis of a Range-Extended Electric Bus. **Mathematical Problems in Engineering**.
- Yarpiz. Artificial Bee Colony (ABC) in MATLAB Available online: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/52966-artificial-bee-colony-abc-in-matlab>, MATLAB Central File Exchange. Retrieved May 11, 2020.
- Zhou, Y. and Li, X. (2015). The state-of-art of the EV charging control strategies. 34th Chinese Control Conference (CCC).

ภาคผนวก ก

ชุดคำสั่งโปรแกรม MATLAB ที่ใช้งานวิจัย

ชุดคำสั่งโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในงานวิจัย

โดย นายธีระพงษ์ บุญรักษา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ. 2562

ชุดคำสั่งโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 4 ชุดคำสั่ง ดังนี้

1. ชุดคำสั่งโปรแกรมสำหรับการจำลองความต้องการพลังงานไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้า
2. ชุดคำสั่งโปรแกรมจำลองตารางเดินรถและสถานะประจุไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้า
3. ชุดคำสั่งโปรแกรมสำหรับการประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่รถบัสไฟฟ้า
4. ชุดคำสั่งโปรแกรมสำหรับปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

1. ชุดคำสั่งโปรแกรมสำหรับการจำลองความต้องการพลังงานไฟฟ้าของรถบัสไฟฟ้า

```

%ชุดคำสั่งหลัก -----
CB = 100;                                %การกำหนดระยะเบรก
eff = 0.95;                             %ประสิทธิภาพรวมของระบบรถบัสไฟฟ้า
TP.Masseff=18;                          %น้ำหนักรถบัส (Ton)
Geo.Station=Stationcal();               %การกำหนดสถานีและระยะห่างของสถานี
F.Gradient=FGradientcal(M);             %การกำหนดค่าเพื่อคำนวณแรงการเคลื่อนที่ ขึ้น-ลง ทางชัน
F.Fdrag=Fdragcal();                    %การคำนวณแรงการเคลื่อนที่ ขึ้น-ลง ทางชัน
TP.Speed=Speedcal(F,M,TP,CB,Geo);       %คำนวณความเร็วของรถบัส รับข้อมูลจาก
(F,M,TP,CB,Geo)
TP.Energy=Energycal(k,TP,eff);          %คำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่
%ชุดคำสั่งคำนวณแรงต้านอากาศ -----
function result=Fdragcal()
Roll=1.225;                             %ค่าความหนาแน่นอากาศ
A=2.16;                                 %พื้นที่ด้านหน้าของรถบัส (m²)
Cd=0.8;                                 %สัมประสิทธิ์แรงดึง (Drag coefficient)
for i=1:22
    v=i;
    Fdrag(i)=0.5*Roll*A*Cd*((v)^2);      %การคำนวณแรงต้านอากาศ
end
result=Fdrag;

```

```

%หาค่าสั่งคำนวณความเร็วของรถบัส -----
function Speed=SpeedCal(F,M,TP,CB,Geo)
initial_v=0;
final_v=0;
acc=1.44;                                %อัตราเร่งสูงสุดของรถบัสไฟฟ้า
if last ==1
initial_s=0;
else
initial_s=Geo.Station(2);
end
final_s=0;
CBD=CB;                                %ระยะเบรก
t1=0;
t2=0.1;
Brakemax=-0.8;
Ft=0;
Ohm=1;
Speed=[];
out=0;
b=0;
Urr=0.05                                %ประสิทธิภาพความต้านทานการหมุน
G=2;                                    %อัตราทดเกียร์ของระบบที่เชื่อมต่omotorกับเพลา
I=0.015;                                %โมเมนต์ความเฉื่อยโรเตอร์ของมอเตอร์
r=0.34                                  %รัศมีของล้อรถ
effort=0;
for j=1:17
for i=Ohm:500000
if i==1||out==1
result(1,Ohm)=0;
result(2,Ohm)=0;
result(3,Ohm)=0;
result(4,Ohm)=0;
result(5,Ohm)=0;
result(6,Ohm)=0;

```

```

final_s=initial_s+((initial_v*(t2-t1)) + ((0.5)*accmax*((t2-t1)^2)));
Ft=(TP.Masseff*accmax)+Fc+Fg+Fr+(Urr*TP.Masseff*9.8)+((I*(G^2)*accmax)/(r^2));
mode=100;                % โหมคเร่งความเร็ว
% โหมคความเร็วคงที่-----
else if round(initial_v) == round(speedlimit)
final_v=initial_v;
final_s=initial_s+((initial_v*(t2-t1)));
Ft=Fc+Fg+Fr+(Urr*TP.Masseff*9.8)+((I*(G^2)*accmax)/(r^2));
mode=200;                % โหมคความเร็วคงที่
acc=0;
end
end
end
% โหมคเบรก-----
if mode ==2
    if b==0
        bcc=-(initial_v^2)/(CBD*2)
        b=1;
    end
    if b==1
        final_v=initial_v+(bcc*(t2-t1));
        final_s=initial_s+abs((initial_v*(t2-t1)) + ((0.5) * bcc*((t2-t1)^2)));
        Ft=(TP.Masseff*bcc) +Fc+Fg+Fr+(Urr*TP.Masseff*9.8)+((I*(G^2)*bcc)/(r^2));
        mode=300;        % โหมคเบรก
    end
end
%Memory parameter -----
initial_v=final_v;
initial_s=final_s;
if mode==100
    accmax=acc;
else if mode==300
    accmax=bcc;
else if mode==200

```

```

    accmax=acc;
end
end
end

result(1,Ohm)=initial_v;
result(2,Ohm)=initial_s;
result(3,Ohm)=Ft;
result(4,Ohm)=accmax;
result(5,Ohm)=speedlimit;
result(6,Ohm)=effort;
result(7,Ohm)=mode;

%update parameter -----
if initial_v<=0
    initial_v=0;
    result(1,Ohm)=0;
    result(2,Ohm)=initial_s;
    Speed=result;
%ชุดคำสั่งคำนวณพลังงานไฟฟ้า -----
function info=Energycal(k,TP,eff)
    air_condition=5; % kW
    for i=1:k
        if TP.Speed(7,i) ~= 300
            MW(1,i)=abs(TP.Speed(3,i)*TP.Speed(1,i)*3.6);           %การคำนวณกำลังไฟฟ้า
            MW(1,i)=(MW(1,i)+air_condition)*0.1/eff;
            MW(2,i)=0;
        else
            MW(2,i)=TP.Speed(3,i)*TP.Speed(1,i)*3.6;
            MW(1,i)=air_condition*0.1;
            MW(2,i)=(MW(2,i))*0.1*eff;
        end
    end
end;

MW(3,1)=sum(MW(1,:))/36000;
MW(4,1)=sum(MW(2,:))/36000;
info=MW;

```

2. ชุดคำสั่งโปรแกรมจำลองตารางเดินรถและสถานะประจุไฟฟ้า สำหรับกลยุทธ์การประจุไฟฟ้า

%เริ่มต้นโหลดชุดข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้า ความเร็ว และตำแหน่งของรถบัส -----

load car1.mat

load car11.mat

load car2.mat

load car22.mat

load RegenPowBack.mat

load RegenPowGo.mat

load TractionPowBack.mat

load TractionPowGo.mat

load TT.mat

ESS_SIZE=40; %กำหนดขนาดของแบตเตอรี่สำหรับการใช้งาน

Pow_back=total_Traction_South_5;

Regen_back=total_Regen_South_5;

for i=1:length(Pow_back)

if i==1

Ene_back(i)=(Pow_back(1,1))/36000;

RegenEne_back(i)=(Regen_back(1,1))/36000;

else

Ene_back(i)=Ene_back(i-1)+(Pow_back(1,i))/36000;

RegenEne_back(i)=RegenEne_back(i-1)+(Regen_back(1,i))/36000;

end

end

Pow_go=total_Traction_North_5;

Regen_go=total_Regen_North_5;

for i=1:length(Pow_go)

if i==1

Ene_go(i)=Pow_go(1,1)/36000;

RegenEne_go(i)=Regen_go(1,1)/36000;

else

Ene_go(i)=Ene_go(i-1)+Pow_go(1,i)/36000;

RegenEne_go(i)=RegenEne_go(i-1)+Regen_go(1,i)/36000;

end

```

%จัดเตรียมข้อมูลของรถบัไฟฟ้าที่ขับไปใหม่ -----
total_power=[(total_Traction_North_5+total_Regen_North_5)(total_Traction_South_5+total_Regen_...
South_5)(total_Traction_North_5+total_Regen_North_5)(total_Traction_South_5+total_Regen_...
South_5)(total_Traction_North_5+total_Regen_North_5)(total_Traction_South_5+total_Regen_South...
_5)(total_Traction_North_5+total_Regen_North_5)(total_Traction_South_5+total_Regen_South_5)];
car1=[total_Position_North_5 total_Position_South_5 total_Position_North_5 total_Position_South_5...
total_Position_North_5 total_Position_South_5 total_Position_North_5 total_Position_South_5];
total_power(5,:)=car1;
%จัดเตรียมข้อมูลของรถบัไฟฟ้าที่ขากลับใหม่ -----
total_power_S=[(total_Traction_South_5+total_Regen_South_5) ...
(total_Traction_North_5+total_Regen_North_5) (total_Traction_South_5+total_Regen_South_5) ...
(total_Traction_North_5+total_Regen_North_5) (total_Traction_South_5+total_Regen_South_5) ...
(total_Traction_North_5+total_Regen_North_5) (total_Traction_South_5+total_Regen_South_5) ...
(total_Traction_North_5+total_Regen_North_5) ];
car2=[total_Position_South_5 total_Position_North_5 total_Position_South_5 total_Position_North_5 ...
total_Position_South_5 total_Position_North_5 total_Position_South_5 total_Position_North_5];
total_power_S(5,:)=car2;
%การคำนวณพลังงานและสถานะประจุไฟฟ้าที่ขับไป -----
for i=1:length(total_power)
    if total_power(1,i)==0
        total_power(2,i)=50;
    if total_power(5,i)<0.313 || total_power(5,i)>12699.68
        total_power(2,i)=500;          %Charge
    end
end
end
end
total_power(3,1)=ESS_SIZE;          %kWh
for i=1:length(total_power)-1
    if i<=1
        total_power(3,1)=ESS_SIZE;    %kWh
        total_power(4,1)=100; %SOC
    else if i> 1
        total_power(3,i)=total_power(3,i-1);          %Update Power
    end
end

```

```

total_power(4,i)=total_power(4,i-1);      %Update Soc
    end
end
if total_power(2,i)==0
    if i<=1
        total_power(3,1)= total_power(3,1)-total_power(1,1)/36000;
        total_power(4,1)=total_power(3,1)*100/ESS_SIZE;
    else if i>1
        total_power(3,i)= total_power(3,i-1)-total_power(1,i)/36000;
        total_power(4,i)=total_power(3,i)*100/ESS_SIZE;
    end
end
end
if total_power(2,i)==500
    if total_power(3,i)<=ESS_SIZE-0.01
        total_power(3,i)= total_power(3,i-1)+450/36000;
        total_power(4,i)=total_power(3,i)*100/ESS_SIZE;
    else if total_power(4,i) > ESS_SIZE-0.01
        total_power(3,i-1)= ESS_SIZE;
        total_power(4,i)=total_power(3,i)*100/ESS_SIZE;
    end
end
end
end
%การคำนวณพลังงานและสถานะประจุไฟฟ้าที่ขวกลับ -----
for i=1:length(total_power_S)
    if total_power_S(1,i)==0
        total_power_S(2,i)=50; %Stop
    if total_power_S(5,i)<0.313 || total_power_S(5,i)>12699.68
        total_power_S(2,i)=500;      %Charging
    else
        end
    end
end

```

```

end

total_power_S(3,1)=ESS_SIZE; %kWh

for i=1:length(total_power_S)

    if i<=1

        total_power_S(3,1)=ESS_SIZE;          % kWh

        total_power_S(4,1)=100; %SOC

    else if i> 1

        total_power_S(3,i)=total_power_S(3,i-1);    % Update Power

        total_power_S(4,i)=total_power_S(4,i-1);    % Update Soc

    end

end

if total_power_S(2,i)==0

    if i<=1

        total_power_S(3,1)= total_power_S(3,1)-total_power_S(1,1)/36000;

        total_power_S(4,1)=total_power_S(3,1)*100/ESS_SIZE;

    else if i>1

        total_power_S(3,i)= total_power_S(3,i-1)-total_power_S(1,i)/36000;

        total_power_S(4,i)=total_power_S(3,i)*100/ESS_SIZE;

    end

end

end

if total_power_S(2,i)==500

    if total_power_S(3,i)<=ESS_SIZE-0.01

        total_power_S(3,i)= total_power_S(3,i-1)+450/36000;

        total_power_S(4,i)=total_power_S(3,i)*100/ESS_SIZE;

    else if total_power_S(4,i) > 39.9

        total_power_S(3,i)= ESS_SIZE;

        total_power_S(4,i)=total_power_S(3,i)*100/ESS_SIZE;

    end

end

end

end

for i=1:length(total_power(2,:))

```



```

if total_power(2,i)>=500 || total_power(2,i)>=500
    if i<length(total_power)
DC_Power(i)=450;
    else
        DC_Power(i)=0;
    end
end
end
SOC_Car1=total_power(4,:);
SOC_Car2=total_power_S(4,:);
SOC_Car3=total_power(4,:);
SOC_Car4=total_power_S(4,:);
SOC_Car5=total_power(4,:);
SOC_Car6=total_power_S(4,:);
SOC_Car7=total_power(4,:);
SOC_Car8=total_power_S(4,:);
SOC_Car9=total_power(4,:);
SOC_Car10=total_power_S(4,:);
for i=1:length(SOC_Car1)
    if i<= 12000
SOC_timetable1(i)=SOC_Car1(1,i);
SOC_timetable2(i)=SOC_Car2(1,i);           %SOC_Car1
SOC_timetable3(i)=inf;
SOC_timetable4(i)=inf;
SOC_timetable5(i)=inf;
SOC_timetable6(i)=inf;
SOC_timetable7(i)=inf;
SOC_timetable8(i)=inf;
SOC_timetable9(i)=inf;
SOC_timetable10(i)=inf;
    else if i>12000 && i<=24000
SOC_timetable1(i)=SOC_Car1(1,i);
SOC_timetable2(i)=SOC_Car2(1,i);

```

```

SOC_timetable3(i)=SOC_Car3(1,i-12000);
SOC_timetable4(i)=SOC_Car4(1,i-12000);
SOC_timetable5(i)=inf;
SOC_timetable6(i)=inf;
SOC_timetable7(i)=inf;
SOC_timetable8(i)=inf;
SOC_timetable9(i)=inf;
SOC_timetable10(i)=inf;
    else if i>24000 && i<=36000
SOC_timetable1(i)=SOC_Car1(1,i);
SOC_timetable2(i)=SOC_Car2(1,i);
SOC_timetable3(i)=SOC_Car3(1,i-12000);
SOC_timetable4(i)=SOC_Car4(1,i-12000);
SOC_timetable5(i)=SOC_Car5(1,i-24000);
SOC_timetable6(i)=SOC_Car6(1,i-24000);
SOC_timetable7(i)=inf;
SOC_timetable8(i)=inf;
SOC_timetable9(i)=inf;
SOC_timetable10(i)=inf;
    else if i>36000&& i<=48000
SOC_timetable1(i)=SOC_Car1(1,i);
SOC_timetable2(i)=SOC_Car2(1,i);
SOC_timetable3(i)=SOC_Car3(1,i-12000);
SOC_timetable4(i)=SOC_Car4(1,i-12000);
SOC_timetable5(i)=SOC_Car5(1,i-24000);
SOC_timetable6(i)=SOC_Car6(1,i-24000);
SOC_timetable7(i)=SOC_Car7(1,i-36000);
SOC_timetable8(i)=SOC_Car8(1,i-36000);
SOC_timetable9(i)=inf;
SOC_timetable10(i)=inf;
    else if i>48000&& i<=60000
SOC_timetable1(i)=SOC_Car1(1,i);
SOC_timetable2(i)=SOC_Car2(1,i);

```

```

SOC_timetable3(i)=SOC_Car3(1,i-12000);
SOC_timetable4(i)=SOC_Car4(1,i-12000);
SOC_timetable5(i)=SOC_Car5(1,i-24000);
SOC_timetable6(i)=SOC_Car6(1,i-24000);
SOC_timetable7(i)=SOC_Car7(1,i-36000);
SOC_timetable8(i)=SOC_Car8(1,i-36000);
SOC_timetable9(i)=SOC_Car9(1,i-48000);
SOC_timetable10(i)=SOC_Car10(1,i-48000);
    else if i>60000
SOC_timetable1(i)=SOC_Car1(1,i);
SOC_timetable2(i)=SOC_Car2(1,i);
SOC_timetable3(i)=SOC_Car3(1,i-12000);
SOC_timetable4(i)=SOC_Car4(1,i-12000);
SOC_timetable5(i)=SOC_Car5(1,i-24000);
SOC_timetable6(i)=SOC_Car6(1,i-24000);
SOC_timetable7(i)=SOC_Car7(1,i-36000);
SOC_timetable8(i)=SOC_Car8(1,i-36000);
SOC_timetable9(i)=SOC_Car9(1,i-48000);
SOC_timetable10(i)=SOC_Car10(1,i-48000);
        end
        end
        end
    end
    end
    end
end
for i =1:length(car1)
    if i<length(car1)
        total_power_Allday(1,i)=total_power(1,i);
        total_power_Allday(2,i)=total_power(2,i);
        total_power_Allday(3,i)=total_power(3,i);
        total_power_Allday(4,i)=total_power(4,i);
        total_power_Allday(5,i)=car1(i);
    
```

```

total_power_Allday_S(1,i)=total_power_S(1,i);
total_power_Allday_S(2,i)=total_power_S(2,i);
total_power_Allday_S(3,i)=total_power_S(3,i);
total_power_Allday_S(4,i)=total_power_S(4,i);
total_power_Allday_S(5,i)=car2(i);

```

```
end
```

```
end
```

```
%-----
```

3. ชุดคำสั่งโปรแกรมสำหรับการประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่รถบัไฟฟ้า

```
%=====เริ่มต้นป้อนข้อมูลเบื้องต้น =====
```

```

kWh=40;                                % ขนาดแบตเตอรี่
t0=0;                                  % Start of constant I [mins]
t1=20;                                  % Start of constant V [mins]
t2=40;                                  % End_time
tv=t2-t1;                              % Time of constant V [mins]
ti=t1-t0;                              % Time of constant I [mins]
V_nominal=500;                         % Nominal phase voltage
cos=0.9;                               % Power factor 0.9
sin=0.436;
con_v=tv/5;                            % 5 = time of constant V
con_i=ti/5;

```

```
%===Trapezoidal
```

```
method=====
```

```

v_fun = @(t) (1-exp(-t/con_v));
v_int = integral(v_fun,t0,t1);
i_fun = @(t) (exp(-t/con_i));
i_int = integral(i_fun,t1,t2);
Int=(v_int+i_int);
K=V_nominal*Int;
I_nominal=(kWh*(10^3)*60)/K;           % 60 (I_nominal is level [min])
P=[]; V=[]; I=[]; ww=0; Inew=[];
x=1:t1;

```

```

V=V_nominal*(1-exp(-x/con_v));
x=1:t2-t1;
I=I_nominal*exp(-x/con_i);
for qq=1:t1
    Inew(qq)=I_nominal;
end
for qq=t1+1:t2
    V(qq)=V_nominal;
    Inew(qq)=I(qq-t1);
end
for qq=1:t2
    P(qq)=V(qq)*Inew(qq)/1000;
end
W=sum(P)/60;
Prated=max(P);
Cum_P=cumsum(P/60);
SOC=Cum_P*100/kWh;
for qq=1:size(P,2)
    if SOC(qq)>100
        SOC(qq)=100;
    end
end
end
%-----
figure                                %คำสั่งแสดงผล
yyaxis left
plot(1:t2,Inew,'r',1:t2,V)
xlabel('Time, t [mins]');
ylabel('Charge V, I');
yyaxis right
plot(1:t2,SOC,'k')
ylabel('Charge capacity (%)');
legend('Charge current : I [A]','Charge voltage : V [V]','Charge capacity','Location','NorthEast')
xlabel('Time, t [mins]');

```

```

ylabel('Charge capacity (%)');

figure

plot(1:t2,P,'k')

xlabel('Time, t [mins]');
ylabel('Power, P [kW]');

yyaxis right

plot(1:t2,SOC,'-k')

ylabel('Charge capacity (%)');

legend('Charge real power : P [kW]', 'Charge capacity', 'Location', 'NorthEast')

%-----

fprintf('P [kW]   V_nominal   I_nominal   W [kWh]   K\n')
fprintf('-----\n')
fprintf(' %.2f      %d        %.2f      %.2f      %d\n',Prated,V_nominal,I_nominal,W,Prated)
%-----

nums_EV=1;

cos0=0.9;          % 0=25.84

sin0=0.44;

P_EV_MW=(P)*nums_EV/1000;

MVA=(P/cos0)/1000;

Q_EV_Mvar=(MVA*sin0)*nums_EV;

S_EV_MVA=[];

for aa=1:size(P_EV_MW,2)

S_EV_MVA(aa)=abs(P_EV_MW(aa)+Q_EV_Mvar(aa)*j);

end;

%-----

```



```
        c0(i)=1;
    else
        c0(i)=0;
    end
end
penalty=10000; % penalty on each constraint violation
ObjVal=Cost+penalty*sum(c0);
```


ภาคผนวก ข

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย มี 6 วงจร ดังนี้

1. ระบบทดสอบ IEEE 33 โนด
2. ระบบจำหน่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา NRB06
3. ระบบจำหน่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา NRD09
4. ระบบจำหน่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา NRB08
5. ระบบจำหน่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา NRA08
6. ระบบจำหน่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา NRA07

1. ระบบทดสอบ IEEE 33 โนด

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลบัสของระบบทดสอบ IEEE 33 โนด

Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Load		Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Load	
		MW	Mvar			MW	Mvar
1	1.00000	0.080	0.040	18	1.00000	0.590	0.040
2	1.06000	0.100	0.060	19	1.00000	0.060	0.030
3	1.00000	0.070	0.030	20	1.00000	0.090	0.040
4	1.00000	0.120	0.080	21	1.00000	0.090	0.040
5	1.00000	0.060	0.030	22	1.00000	0.070	0.030
6	1.00000	0.060	0.020	23	1.00000	0.090	0.050
7	1.00000	0.160	0.080	24	1.00000	0.170	0.080
8	1.00000	0.150	0.070	25	1.04300	0.180	0.090
9	1.00000	0.060	0.020	26	1.00580	0.060	0.025
10	1.00000	0.050	0.015	27	1.01000	0.060	0.025
11	1.00000	0.045	0.030	28	1.08200	0.060	0.020
12	1.00000	0.060	0.035	29	1.07100	0.090	0.050
13	1.00000	0.060	0.035	30	1.05000	0.150	0.050
14	1.00000	0.080	0.050	31	1.01000	0.150	0.070
15	1.00000	0.060	0.010	32	1.08200	0.160	0.080
16	1.00000	0.060	0.020	33	1.07100	0.560	0.040
17	1.00000	0.060	0.020				

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลสายส่งของระบบทดสอบ IEEE 33 โนค

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)
1	1	2	0.0922	0.0470	20	17	18	0.4095	0.4784
2	2	19	0.4930	0.2511	21	19	20	0.7089	0.9373
3	2	3	0.3660	0.1864	22	20	21	0.4512	0.3083
4	3	23	0.3811	0.1941	23	21	22	0.8980	0.7091
5	3	4	0.8190	0.7070	24	23	24	0.8960	0.7011
6	4	5	0.1872	0.6188	25	24	25	0.2030	0.1034
7	5	26	0.7114	0.2351	26	26	27	0.2842	0.1447
8	5	6	1.0300	0.7400	27	27	28	1.0590	0.9337
9	6	7	1.0440	0.7400	28	28	29	0.8042	0.7006
10	7	8	0.1966	0.0650	29	29	30	0.5075	0.2585
11	8	9	0.3744	0.1238	30	30	31	0.9744	0.9630
12	9	10	1.4680	1.1550	31	31	32	0.3105	0.3619
13	10	11	0.5416	0.7129	32	32	33	0.3410	0.5302
14	11	12	0.5910	0.5260	33	8	21	1.0000	1.0000
15	12	13	0.7463	0.5450	34	9	15	1.0000	1.0000
16	13	14	1.2890	1.7210	35	12	22	1.0000	1.0000
17	14	15	0.7320	0.5740	36	18	33	0.5000	0.5000
18	15	16	0.1640	0.1565	37	25	29	0.5000	0.5000
19	16	17	1.5042	1.3554					

2. ระบบจำหน่ายไฟฟ้า ของสถานีไฟฟ้าจังหวัดนครราชสีมา NRB06

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลของระบบจำหน่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา NRB06

Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Load		Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Load	
		MW	Mvar			MW	Mvar
1	1.0300	0.0000	0.0000	23	1.0000	0.8500	0.5260
2	1.0000	0.0850	0.0527	24	1.0000	0.2210	0.1369
3	1.0000	0.1360	0.0843	25	1.0000	0.5440	0.3370
4	1.0000	0.2125	0.1317	26	1.0000	0.2970	0.1840
5	1.0000	0.1360	0.0840	27	1.0000	1.4790	0.9160
6	1.0000	0.0425	0.0263	28	1.0000	0.6375	0.3950
7	1.0000	0.0425	0.0263	29	1.0000	0.5950	0.3687
8	1.0000	0.1360	0.0843	30	1.0000	1.7850	1.1060
9	1.0000	0.8500	0.5268	31	1.0000	1.7000	1.0530
10	1.0000	0.8500	0.5268	32	1.0000	1.7000	1.0530
11	1.0000	0.2678	0.1659	33	1.0000	1.7000	1.0530
12	1.0000	0.0850	0.0527	34	1.0000	3.4000	2.1100
13	1.0000	0.4250	0.2630	35	1.0000	0.3145	0.1949
14	1.0000	0.2125	0.1320	36	1.0000	0.6970	0.4319
15	1.0000	0.8500	0.5260	37	1.0000	0.9860	0.6111
16	1.0000	0.2125	0.3120	38	1.0000	0.7650	0.4740
17	1.0000	1.0625	0.6580	39	1.0000	0.5100	0.3160
18	1.0000	0.0510	0.0320	40	1.0000	0.3485	0.2159
19	1.0000	1.7850	1.1060	41	1.0000	0.9350	0.5790
20	1.0000	1.4960	0.9270	42	1.0000	0.7775	0.4820
21	1.0000	0.0240	0.0345	43	1.0000	0.1360	0.0842
22	1.0000	0.3485	0.2150	44	1.0000	0.3570	0.2220

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลสายส่งของระบบจำหน่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา NRB06

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)
1	1	2	0.0011	0.0024	23	23	24	0.0129	0.0254
2	2	3	0.0073	0.0052	24	24	25	0.0071	0.0140
3	3	4	0.0077	0.0054	25	25	26	0.0195	0.0387
4	2	5	0.0150	0.0212	26	26	27	0.0131	0.0257
5	5	6	0.0239	0.0145	27	27	28	0.0065	0.0127
6	6	7	0.0063	0.0090	28	28	29	0.0102	0.0202
7	7	8	0.0082	0.0012	29	29	30	0.0134	0.0055
8	8	9	0.0025	0.0036	30	30	31	0.0021	0.0017
9	9	10	0.0027	0.0063	31	31	32	0.0021	0.0017
10	10	11	0.0169	0.0239	32	32	33	0.0021	0.0017
11	11	12	0.0098	0.0139	33	33	34	0.0146	0.0060
12	12	13	0.0100	0.0142	34	23	35	0.0088	0.0172
13	13	14	0.0311	0.0446	35	35	36	0.0216	0.0311
14	14	15	0.0213	0.0088	36	36	37	0.0237	0.0339
15	15	16	0.0191	0.0078	37	35	38	0.0379	0.0744
16	16	17	0.0043	0.0177	38	38	39	0.0120	0.0237
17	14	18	0.0152	0.0217	39	39	40	0.0134	0.0263
18	18	19	0.0225	0.0320	40	35	41	0.0203	0.0400
19	19	20	0.0184	0.0262	41	41	42	0.0093	0.0132
20	20	21	0.0353	0.0050	42	26	43	0.0147	0.0288
21	21	22	0.0243	0.0342	43	43	44	0.0144	0.0284
22	22	23	0.0224	0.0441					

3. ระบบจำหน่ายไฟฟ้า ของสถานีไฟฟ้านครราชสีมา NRD09

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลของระบบจำหน่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา NRD09

Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Load		Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Load	
		MW	Mvar			MW	Mvar
1	1.03	0.0000	0.0000	23	1	0.4530	0.1585
2	1	2.4540	0.8589	24	1	0.7598	0.2659
3	1	0.2359	0.0825	25	1	0.9721	0.3403
4	1	0.2359	0.0825	26	1	0.6229	0.2180
5	1	1.6045	0.5616	27	1	0.3869	0.1355
6	1	0.6984	0.2444	28	1	1.3686	0.4790
7	1	1.7272	0.6045	29	1	0.8967	0.3138
8	1	1.8499	0.6475	30	1	1.6029	0.5895
9	1	0.2635	0.0944	31	1	2.4257	0.8490
10	1	0.3964	0.1387	32	1	1.3827	0.4840
11	1	0.7920	0.3068	33	1	1.3213	0.4625
12	1	1.6612	0.5814	34	1	0.2076	0.0726
13	1	0.4809	0.1684	35	1	0.2737	0.0958
14	1	0.6512	0.2279	36	1	1.6610	0.5814
15	1	0.9203	0.3221	37	1	1.3400	0.4691
16	1	0.4814	0.1685	38	1	1.1232	0.3930
17	1	4.4030	1.5412	39	1	1.2930	0.4526
18	1	6.0500	2.1177	40	1	0.9533	0.3336
19	1	0.2454	0.0858	41	1	0.8683	0.3039
20	1	0.4813	0.1684	42	1	0.8400	0.2940
21	1	0.7928	0.2775	43	1	0.6890	0.2412
22	1	0.7362	0.2576				

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลสายส่งของระบบจำหน่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา NRD09

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)
1	1	2	0.0011	0.0016	22	22	23	0.0128	0.0159
2	1	3	0.0025	0.0036	23	22	24	0.0359	0.0253
3	3	4	0.0034	0.0048	24	24	25	0.0176	0.0073
4	4	5	0.0070	0.0074	25	22	26	0.0087	0.0035
5	5	6	0.0210	0.0117	26	26	27	0.0021	0.0082
6	6	7	0.0179	0.0074	27	27	28	0.0070	0.0039
7	4	8	0.0082	0.0117	28	28	29	0.0222	0.0092
8	8	9	0.0050	0.0071	29	19	30	0.0040	0.0093
9	9	10	0.0062	0.0122	30	30	31	0.0096	0.0040
10	10	11	0.0054	0.0106	31	31	32	0.0165	0.0068
11	11	12	0.0047	0.0067	32	31	33	0.0032	0.0075
12	10	13	0.0110	0.0255	33	33	34	0.0180	0.0127
13	13	14	0.0392	0.0090	34	34	35	0.0346	0.0244
14	14	15	0.0028	0.0054	35	34	36	0.0444	0.0314
15	14	16	0.0152	0.0216	36	36	37	0.0339	0.0140
16	16	17	0.0076	0.0031	37	33	38	0.0048	0.0095
17	17	18	0.0100	0.0058	38	38	39	0.0243	0.0100
18	16	19	0.0022	0.0044	39	38	40	0.0053	0.0104
19	19	20	0.0060	0.0025	40	40	41	0.0323	0.0133
20	20	21	0.0073	0.0030	41	41	42	0.0249	0.0103
21	21	22	0.0091	0.0064	42	40	43	0.0238	0.0098

4. ระบบจำหน่ายไฟฟ้า ของสถานีไฟฟ้านครราชสีมา NRB08

ตารางที่ ข.7 ข้อมูลของระบบจำหน่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา NRB08

Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Load		Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Load	
		MW	Mvar			MW	Mvar
1	1.03	0.0000	0.0000	16	1	0.2970	0.1840
2	1	0.0255	0.0158	17	1	0.5350	0.3310
3	1	0.2635	0.1633	18	1	1.0710	0.6630
4	1	0.2210	0.1360	19	1	0.5355	0.3318
5	1	0.2125	0.1320	20	1	0.2720	0.1680
6	1	0.1360	0.0843	21	1	0.3825	0.2370
7	1	0.2380	0.1470	22	1	0.2125	0.1316
8	1	0.0850	0.0526	23	1	0.2125	0.1316
9	1	0.3485	0.2159	24	1	0.2720	0.1686
10	1	0.3485	0.2159	25	1	0.5185	0.3210
11	1	0.2975	0.1843	26	1	0.4250	0.2630
12	1	0.3570	0.2210	27	1	1.5810	0.9790
13	1	1.7000	1.0530	28	1	0.2677	0.1659
14	1	0.3910	0.2420	29	1	0.2125	0.1316
15	1	0.3520	0.2180				

ตารางที่ ข.8 ข้อมูลสายส่งของระบบจำหน่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา NRB08

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)
1	1	2	0.00594	0.00842	15	15	16	0.00687	0.00973
2	1	3	0.00497	0.00705	16	16	17	0.00258	0.00372
3	3	4	0.02218	0.03119	17	17	18	0.00315	0.00429
4	4	5	0.00658	0.00916	18	18	19	0.00315	0.00429
5	5	6	0.00658	0.00272	19	19	20	0.00338	0.00481
6	6	7	0.00601	0.00246	20	20	21	0.00944	0.00134
7	4	8	0.00392	0.00278	21	21	22	0.00495	0.00973
8	8	9	0.02032	0.01116	22	22	23	0.00486	0.00687
9	9	10	0.01373	0.00973	23	23	24	0.00944	0.00134
10	10	11	0.00258	0.00183	24	23	25	0.00120	0.00169
11	5	12	0.00156	0.00220	25	25	26	0.00295	0.00206
12	12	13	0.00169	0.00240	26	16	27	0.00123	0.00858
13	12	14	0.00572	0.00687	27	27	28	0.00155	0.00109
14	14	15	0.08527	0.00121	28	28	29	0.00687	0.00486

5. ระบบจำหน่ายไฟฟ้า ของสถานีไฟฟ้านครราชสีมา NRA08

ตารางที่ ข.9 ข้อมูลบัสของระบบจำหน่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา NRA08

Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Load		Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Load	
		MW	Mvar			MW	Mvar
1	1.03	0.0000	0.0000	29	1	5.6180	3.1068
2	1	0.2180	0.1210	30	1	1.6400	0.9090
3	1	1.1020	0.6090	31	1	0.8930	0.4930
4	1	0.2180	0.1210	32	1	0.5950	0.3290
5	1	0.3580	0.1980	33	1	0.8570	0.4740
6	1	0.5510	0.3040	34	1	0.3670	0.2030
7	1	1.1800	0.6530	35	1	0.6910	0.3820
8	1	0.2180	0.1200	36	1	0.8480	0.4690
9	1	0.3410	0.1880	37	1	2.3620	1.3100
10	1	0.2270	0.1250	38	1	2.7120	1.5000
11	1	0.0700	0.0380	39	1	2.1800	1.2000
12	1	0.2450	0.1350	40	1	1.4830	0.8200
13	1	0.6730	0.3720	41	1	0.1830	0.1010
14	1	2.3700	1.3100	42	1	0.5330	0.2900
15	1	0.5070	0.2810	43	1	0.3670	0.2030
16	1	0.6650	0.3670	44	1	0.9360	0.5170
17	1	0.6650	0.3670	45	1	0.2530	0.1400
18	1	3.4300	1.8990	46	1	6.9000	3.8200
19	1	0.7170	0.3960	47	1	0.8920	0.4930
20	1	0.3580	0.1980	48	1	1.0930	0.6040
21	1	1.5660	0.8660	49	1	0.9010	0.4980
22	1	1.0850	0.6000	50	1	1.2420	0.6870
23	1	0.7430	0.4110	51	1	1.2680	0.7010
24	1	0.7700	0.4250	52	1	2.7740	1.5340
25	1	0.5250	0.2900	53	1	0.8400	0.4600
26	1	0.4460	0.2460	54	1	0.8000	0.4400
27	1	0.4810	0.2660	55	1	0.4460	0.2460
28	1	1.1370	0.6290	56	1	0.5420	0.3000

ตารางที่ ข.10 ข้อมูลสายส่งของระบบจำหน่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา NRA08

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)
1	1	2	0.001646	0.002321	29	27	30	0.025738	0.036427
2	2	3	0.001772	0.002518	30	30	31	0.028973	0.040787
3	3	4	0.005907	0.008439	31	30	32	0.004079	0.005907
4	4	5	0.004923	0.007032	32	32	33	0.015330	0.063290
5	5	6	0.003657	0.005204	33	30	34	0.037974	0.053445
6	6	7	0.005345	0.012517	34	34	35	0.014627	0.060899
7	7	8	0.003657	0.005345	35	34	36	0.010886	0.004487
8	8	9	0.003516	0.008298	36	36	37	0.016737	0.023769
9	9	10	0.009845	0.006892	37	37	38	0.021237	0.087622
10	10	11	0.047819	0.010408	38	26	39	0.009733	0.019156
11	5	12	0.032348	0.046413	39	39	40	0.014065	0.058227
12	12	13	0.006892	0.009705	40	40	41	0.005007	0.009845
13	13	14	0.028129	0.040787	41	41	42	0.020647	0.014486
14	14	15	0.003516	0.007173	42	42	43	0.023867	0.016849
15	15	16	0.026723	0.052039	43	43	44	0.021772	0.015330
16	15	17	0.026723	0.052039	44	44	45	0.019915	0.014065
17	14	18	0.029535	0.040787	45	41	46	0.023488	0.046272
18	18	19	0.056258	0.080168	46	46	47	0.004022	0.007876
19	19	20	0.035724	0.050773	47	47	48	0.007060	0.013910
20	20	21	0.026019	0.036990	48	48	49	0.004965	0.009775
21	21	22	0.057805	0.081855	49	49	50	0.022545	0.015921
22	22	23	0.006188	0.008720	50	50	51	0.054852	0.012658
23	23	24	0.044866	0.088325	51	51	52	0.021181	0.087200
24	23	25	0.018565	0.010323	52	8	53	0.015330	0.063290
25	25	26	0.045006	0.063993	53	53	54	0.006188	0.008776
26	26	27	0.023291	0.096201	54	54	55	0.003896	0.005527
27	27	28	0.029676	0.016455	55	10	56	0.012095	0.049929
28	28	29	0.029676	0.016455	56	19	33	0.015330	0.063290

6. ระบบจำหน่ายไฟฟ้า ของสถานีไฟฟ้านครราชสีมา NRA07

ตารางที่ ข.11 ข้อมูลป้สของระบบจำหน่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา NRA07

Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Load		Bus	Magnitude voltage (p.u.)	Load	
		MW	Mvar			MW	Mvar
1	1.03	0.0000	0.0000	26	1	0.2273	0.1140
2	1	0.5380	0.2019	27	1	0.3276	0.1229
3	1	2.3125	0.8670	28	1	4.6020	1.7660
4	1	0.4868	0.1826	29	1	0.8732	0.3740
5	1	0.0468	0.0176	30	1	3.0335	1.2992
6	1	0.2298	0.0984	31	1	0.6204	0.2657
7	1	0.0919	0.0393	32	1	1.4891	0.6378
8	1	1.0295	0.4409	33	1	1.6270	0.6968
9	1	0.4780	0.2047	34	1	0.2298	0.0984
10	1	0.6756	0.2893	35	1	0.1746	0.0748
11	1	0.5056	0.2168	36	1	0.9192	0.3937
12	1	0.6618	0.2834	37	1	1.3604	0.5826
13	1	0.7813	0.3346	38	1	1.5448	0.5796
14	1	0.2114	0.0900	39	1	0.9830	0.3688
15	1	1.1580	0.4960	40	1	3.1084	1.1662
16	1	1.1490	0.4921	41	1	0.4681	0.1756
17	1	0.0276	0.0118	42	1	0.3407	0.8781
18	1	0.1471	0.0630	43	1	0.9362	0.3512
19	1	0.1838	0.0787	44	1	1.0299	0.3864
20	1	0.4050	0.1713	45	1	0.4025	0.1510
21	1	1.3328	0.5708	46	1	0.3558	0.1335
22	1	1.2409	0.5315	47	1	1.0112	0.3793
23	1	0.3309	0.1417	48	1	1.8070	0.6779
24	1	0.4868	0.1826	49	1	1.5635	0.5866
25	1	0.9192	0.3937				

ตารางที่ ข.12 ข้อมูลสายส่งของระบบจำหน่ายไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า จังหวัดนครราชสีมา NRA07

Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)	Line number	From bus	To bus	R (ohms)	jX (ohms)
1	1	2	0.057288	0.034747	26	27	28	0.024341	0.034595
2	2	3	0.060602	0.087662	27	28	29	0.066911	0.039567
3	3	4	0.087005	0.032326	28	29	30	0.066717	0.011808
4	4	5	0.076220	0.042994	29	6	29	0.043503	0.061732
5	5	6	0.064322	0.091148	30	30	31	0.084934	0.012015
6	6	7	0.064501	0.050038	31	31	32	0.025791	0.036666
7	7	8	0.045687	0.036356	32	32	33	0.020923	0.029685
8	8	9	0.055263	0.049697	33	32	34	0.024910	0.049013
9	9	10	0.020384	0.084209	34	34	35	0.029571	0.058180
10	10	11	0.085060	0.062147	35	34	36	0.044642	0.063389
11	9	12	0.093971	0.057693	36	36	37	0.052617	0.074576
12	12	13	0.089209	0.057486	37	28	38	0.074452	0.010544
13	13	14	0.065941	0.036988	38	38	39	0.061422	0.087109
14	14	15	0.066738	0.022725	39	39	40	0.020374	0.028877
15	15	16	0.041306	0.088010	40	40	41	0.026309	0.037288
16	13	17	0.077890	0.015329	41	41	42	0.042947	0.018333
17	13	18	0.091104	0.078408	42	42	43	0.061735	0.048474
18	13	19	0.017971	0.012699	43	43	44	0.096345	0.067533
19	7	20	0.052721	0.010358	44	41	45	0.057900	0.082106
20	20	21	0.011141	0.045988	45	45	46	0.081308	0.021528
21	6	27	0.070640	0.010016	46	46	47	0.044538	0.063182
22	7	23	0.020301	0.039981	47	47	48	0.042715	0.060489
23	27	24	0.070640	0.010016	48	48	49	0.091762	0.089802
24	23	25	0.080138	0.011352	49	6	22	0.053009	0.038437
25	25	26	0.013009	0.018437					

ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อวารสารวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 3 บทความ

Terapong Boonraksa, and Boonruang Marungsri, “**Development of Fast Charging Station for Public Transport in Nakhon Ratchasima, Thailand,**” *GMSARN International Journal*, Vol. 13, No. 1, (2019), pp. 36-44. (Index by Scopus, Q3)

Terapong Boonraksa, Promphak Boonraksa, Nitikon Junhuathon, and Boonruang Marungsri, “**Feasibility of On-Board Photovoltaics on Plug-in Electric Public Transportation Buses,**” *International Journal of Advanced Science and Technology*, Vol. 29, No. 6s, (2020), pp. 627-636. (Index by Scopus, Q4)

Terapong Boonraksa, Promphak Boonraksa, Guntinan Sakulphaisan, and Boonruang Marungsri, “**Strategic Planning of Charging Stations for Electric Public Transportation Bus Systems: A Case Study,**” *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*, Vol. 15, No. 6, (2020). Accepted 10 June 2020. (Index by Scopus, Q2)

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 10 บทความ

Terapong Boonraksa and Boonreang Marungsri, “**Optimal Fast Charging Station Location for Public Electric Transportation in Smart Power Distribution Network,**” *The 2018 International Electrical Engineering Congress (iEECON 2018)*, Krabi, Thailand, 7-9 March 2018.

Terapong Boonraksa, Elifuraha Reuben Mmary and Boonruang Marungsri, “**Optimal Design of Charging Station for Electric Vehicles Integrated with Renewable DG,**” *2nd International Conference on Electrical Engineering and Automation (ICEEA 2018)*, Advances in Engineering Research, volume 139, Chengdu, China, 25-26 March, 2018.

Terapong Boonraksa, Nitikon Junhuathon and Boonruang Marungsri, “**The Study of Fast Charging Station for Electric Vehicles Integrated with Distributed Generation System,**” *14th Conference on Energy Network of Thailand (E-NETT)*, Rayong, Thailand, 13-15 June, 2018.

Terapong Boonraksa, Nuttapol Chartsuk, Promphak Dawan and Boonruang Marungsri, “**The Study of Charging Characteristics on Electric Bus Battery,**” *The 11th Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-11)*, Chaityaphum, Thailand, 28-30 November, 2018.

- Nuttapol Chartsuk, **Terapong Boonraksa** and Boonruang Marungsri, “**Comparison of the Charging Behavior of Electric Vehicles with Normal and Fast Charging,**” *Asian Conference on Engineering and Natural Sciences*, Hokkaido, Japan, 22-24 January, 2019.
- Terapong Boonraksa**, Promphak Dawan and Boonruang Marungsri, “**Impact of Electric Bus Charging on the Power Distribution System a Case Study IEEE 33 Bus System,**” *IEEE PES GTD Grand International Conference & Exposition Asia 2019*, BITEC Bangna, Bangkok, Thailand, 19-23 March, 2019.
- Terapong Boonraksa**, Nuttapol Chartsuk, Promphak Dawan and Boonruang Marungsri, “**The Study of Energy Requirements on the Fast Charging Station for the Electric Buses,**” *The 11th Conference of Electrical Engineering Network 2019 (EENET 2019)*, Phra Nakhon Si Ayutthaya, Thailand, 15-17 May, 2019.
- Terapong Boonraksa**, Promphak Dawan, and Boonruang Marungsri, “**Electric Bus Energy Requirements for the Stand-alone Fast Charging Station Combined with a PV Power Generation and Battery Energy Storage System,**” *15th Conference on Energy Network of Thailand (E-NETT)*, Nakhon Ratchasima, Thailand, 21-24 May, 2019.
- Terapong Boonraksa**, Promphak Dawan, Richard Joseph Mushi, Ashok Paudel, Boonruang Marungsri, “**The Study of Energy Consumption for Electric Buses Movement and Suitable Battery Size,**” *The 12th Thailand Renewable Energy for Community Conference (TREC-12)*, Phitsanulok, Thailand, 6-8 November, 2019.
- Terapong Boonraksa**, Promphak Dawan, and Boonruang Marungsri, “**Improvement of Voltage Drop due to Charging Station Load of Plug-in Electric Buses with Distributed Generation System Installation,**” *The 12th Conference of Electrical Engineering Network 2020 (EENET 2020)*, Nakhon Nayok, Thailand, 26-28 August, 2020.

ประวัติผู้เขียน

นายธีระพงษ์ บุญรักษา เกิดเมื่อวันที่ 14 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2532 ที่อำเภอวาริชภูมิ จังหวัดสกลนคร เริ่มศึกษาระดับอนุบาลและประถมศึกษา ที่โรงเรียนวาริชภูมิพิทยาคาร อำเภอวาริชภูมิ จังหวัดสกลนคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนมัธยมวาริชภูมิ อำเภอวาริชภูมิ จังหวัดสกลนคร เมื่อ พ.ศ. 2550 ในภายหลังได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2554 จากนั้น ได้ศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในกลุ่มวิจัยไฟฟ้ากำลัง และพลังงาน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2557 จากนั้น ศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต ในกลุ่มวิจัยไฟฟ้ากำลังและพลังงาน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ โดยมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษาดังปรากฏในภาคผนวก ค ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้า และวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง