

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฐ

บทที่

1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	7
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	7
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	7
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	8
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	9
2 ทัศนวิสัยวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1 บทนำ.....	11
2.2 การสำรวจทัศนวิสัยวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.2.1 การจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและการไหลกำลังไฟฟ้า.....	11
2.2.2 การประยุกต์ใช้ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินในระบบรถไฟฟ้าขนส่ง มวลชน.....	16
2.2.3 กลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน.....	21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3	สรุป	26
3	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	28
3.1	บทนำ.....	28
3.2	ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและระบบจ่ายไฟ.....	28
3.2.1	ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	28
3.2.2	ระบบจ่ายไฟสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน.....	36
3.2.3	ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทย.....	42
3.3	พลวัตการเคลื่อนที่ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	48
3.4	เทคนิคการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนด้วย วิธีการฉีดกระแส.....	56
3.5	ปัญหาไฟดับและผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน.....	60
3.5.1	สาเหตุของปัญหาไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน.....	61
3.5.2	ผลกระทบของปัญหาไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน.....	63
3.5.3	มาตรการในการรับมือปัญหาไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	64
3.6	ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน	68
3.6.1	องค์ประกอบระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน	69
3.6.2	ภาพรวมการทำงานของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน.....	78
3.7	แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	82
3.7.1	องค์ประกอบของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน.....	82
3.7.2	หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน.....	83
3.7.3	ประเภทของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	84
3.7.4	การวิเคราะห์ข้อมูลแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน	88
3.7.5	แบบจำลองแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน	93
3.8	การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน.....	97

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.8.1	การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งข้างทาง.....	97
3.8.2	การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับโครงข่ายระบบจ่ายไฟ.....	98
3.8.3	การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับรถไฟ.....	98
3.9	ผลกระทบแรงดันไฟฟ้าตกและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในโครงข่ายระบบจ่ายไฟ	101
3.10	สรุป	103
4	แบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	104
4.1	บทนำ.....	104
4.2	แบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	104
4.2.1	การพัฒนาแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	104
4.2.2	โครงสร้างการทำงานของแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	109
4.2.3	ข้อมูลจำเพาะของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ใช้เป็นกรณีศึกษา	110
4.2.4	การทดสอบแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน.....	115
4.3	แบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน	123
4.3.1	การพัฒนาแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน.....	123
4.3.2	โครงสร้างการทำงานของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน.....	130
4.3.3	ตัวอย่างการคำนวณการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS.....	133
4.3.4	ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา	145
4.3.5	การทดสอบแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน	147
4.4	แบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน.....	151
4.4.1	การทำงานของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน.....	151
4.4.2	การทดสอบแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน.....	154

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5	สรุป	165
5	การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน.....	166
5.1	บทนำ.....	166
5.2	เงื่อนไขการทดสอบและการออกแบบการจำลองผล	166
5.2.1	ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ	167
5.2.2	การกำหนดกรณีทดสอบและขั้นตอนการจำลอง.....	173
5.3	การทดสอบ.....	179
5.3.1	การทดสอบช่วงชั่วโมงเร่งด่วน ($H = 3.45$ นาที).....	180
5.3.2	การทดสอบช่วงชั่วโมงปกติ ($H = 6$ นาที).....	193
5.3.3	การทดสอบช่วงนอกชั่วโมงเร่งด่วน ($H = 8$ นาที).....	204
5.4	การอภิปรายผลการทดสอบ	214
5.4.1	ผลของ H และ %ESTS ต่อสมรรถนะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า ของระบบ	214
5.4.2	ภาระการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของ ESTS.....	216
5.4.3	ข้อพิจารณาเชิงออกแบบและความเป็นไปได้ในการใช้จริง.....	218
5.5	สรุป	219
6	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	220
6.1	บทนำ.....	220
6.2	สรุปผลการศึกษา	220
6.3	ข้อเสนอแนะ	222
	รายการอ้างอิง	224
	ภาคผนวก ก ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่และการออกแบบขนาด ESTS.....	238
ก.1	ข้อมูลจำเพาะของเซลล์แบตเตอรี่ TOSHIBA SCiB™ 23AH.....	239
ก.2	การออกแบบแบตเตอรี่แพ็ค	240

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ก.2.1	การกำหนดจำนวนเซลล์แบบอนุกรม	241
ก.2.2	การกำหนดจำนวนเซลล์แบบขนาน.....	241
ก.2.3	การตรวจสอบความสามารถในการรองรับกำลังไฟฟ้าของแพ็ค	244
ก.2.4	การคำนวณน้ำหนักรวมของเซลล์ในแพ็ค	245
ก.2.5	สรุปผลการออกแบบแพ็ค	246
ภาคผนวก ข	การคำนวณระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของ ESTS.....	248
ภาคผนวก ค	ผลการทดสอบกลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS	251
ภาคผนวก ง	บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	285
ประวัติผู้เขียน.....		312

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนและการไหลกำลังไฟฟ้า	12
2.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	16
2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับกลยุทธ์การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	21
3.1 แร่งต้นมาตรฐานสำหรับระบบจ่ายไฟของรถไฟฟ้าตามมาตรฐาน EN 50163:200	39
3.2 ค่าความแรงมาตรฐานสำหรับใช้กับรถไฟฟ้า.....	53
3.3 การเปรียบเทียบเทคนิคการวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า.....	57
3.4 ยอดสถิติการเกิดปัญหาไฟดับของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในแต่ละปี	67
3.5 ยอดสถิติการเกิดปัญหาไฟดับของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนรายสายของรถไฟฟ้า	67
3.6 การเปรียบเทียบความสามารถในการทำงานของแบตเตอรี่แต่ละประเภท	72
3.7 ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแต่ละประเภท	87
3.8 ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่ลิเทียมไททานเนียมไดออกไซด์ยี่ห้อต่าง ๆ ในท้องตลาด.....	91
3.9 การประเมินเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไททานเนียมไดออกไซด์ยี่ห้อต่าง ๆ ในท้องตลาด	92
3.10 การเปรียบเทียบการทำงานของแบบจำลองแต่ละแบบ	94
3.11 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า.....	100
4.1 ข้อมูลจำเพาะระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม	111
4.2 ข้อมูลตำแหน่งสถานีผู้โดยสารและสถานีจ่ายไฟในระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม.....	113
4.3 ข้อมูลตารางเดินรถของระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม.....	114
4.4 ผลการทดสอบแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	121
4.5 ลำดับการทำงานของแบบจำลอง ESTS ในแต่ละช่วงเวลาการจำลอง.....	132
4.6 ข้อมูลเริ่มต้นของกรณีตัวอย่าง	134
4.7 ตำแหน่งและระยะการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า	136
4.8 ความต้านทานของแต่ละเส้นทางในวงจรรถยนต์.....	138

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 สรุปการหาผลเฉลี่ยในแต่ละรอบ.....	142
4.10 พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของ ESTS ตามสัดส่วนการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า.....	146
4.11 การดึงพลังงานไฟฟ้าจาก ESTS ภายใต้เงื่อนไขบรรทุกน้ำหนักโหลดของรถไฟฟ้า	158
5.1 กรณีทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS ในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	174
5.2 การกำหนดขนาด ESTS ที่เหมาะสมในแต่ละกรณีทดสอบ	175
5.3 สรุปผลการทดสอบการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าด้วย ESTS สำหรับ 9 กรณีทดสอบ	215
5.4 ผลของการเพิ่ม %ESTS ต่ออัตราความสำเร็จในแต่ละค่า H	215
5.5 ผลเชิงไฟฟ้าของการทดสอบแต่ละกรณี.....	217
ก.1 ข้อมูลจำเพาะของเซลล์แบตเตอรี่ Toshiba SCiB™ 23 Ah	240
ก.2 สรุปผลการคำนวณของแบตเตอรี่แพ็ค Toshiba SCiB™ 23 Ah.....	246
ค.1 ผลการทดสอบ Case 01 ที่ค่า H เท่ากับ 3.45 นาที่ และ %ESTS เท่ากับ 25%	252
ค.2 ผลการทดสอบ Case 02 ที่ค่า H เท่ากับ 3.45 นาที่ และ %ESTS เท่ากับ 50%	255
ค.3 ผลการทดสอบ Case 03 ที่ค่า H เท่ากับ 3.45 นาที่ และ %ESTS เท่ากับ 75%	258
ค.4 ผลการทดสอบ Case 04 ที่ค่า H เท่ากับ 6 นาที่ และ %ESTS เท่ากับ 25%.....	261
ค.5 ผลการทดสอบ Case 05 ที่ค่า H เท่ากับ 6 นาที่ และ %ESTS เท่ากับ 50%.....	265
ค.6 ผลการทดสอบ Case 06 ที่ค่า H เท่ากับ 6 นาที่ และ %ESTS เท่ากับ 75%.....	269
ค.7 ผลการทดสอบ Case 07 ที่ค่า H เท่ากับ 8 นาที่ และ %ESTS เท่ากับ 25%.....	273
ค.8 ผลการทดสอบ Case 08 ที่ค่า H เท่ากับ 8 นาที่ และ %ESTS เท่ากับ 50%.....	277
ค.9 ผลการทดสอบ Case 09 ที่ค่า H เท่ากับ 8 นาที่ และ %ESTS เท่ากับ 75%.....	281

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	1
1.2 แผนแม่บทระบบขนส่งมวลชนทางรางในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (M-MAP2) ระยะ 20 ปี (พ.ศ.2553-2572).....	2
1.3 ข้อมูลสถิติการใช้ระบบขนส่งสาธารณะในประเทศไทย.....	3
1.4 ปัญหาไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน.....	4
1.5 การรับพลังงานไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าสองแหล่งในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน.....	5
3.1 ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ให้บริการรับส่งผู้โดยสารทั่วโลก.....	29
3.2 ขบวนรถไฟฟ้า	30
3.3 ตัวอย่างขบวนรถไฟฟ้า.....	30
3.4 ทางวิ่งรถไฟฟ้า.....	31
3.5 ตำแหน่งการสร้างรางวิ่งรถไฟฟ้า.....	31
3.6 รูปแบบการวางขานขาลาของสถานีผู้โดยสาร.....	32
3.7 สถานีจ่ายไฟย่อย	32
3.8 โรงจอดและศูนย์ซ่อมบำรุงรถ	33
3.9 ศูนย์ควบคุมการเดินรถ	34
3.10 เส้นทางระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล	35
3.11 ระบบป้อนไฟฟ้าแบบ Third rail และ Overhead line.....	37
3.12 ระบบจ่ายไฟกระแสตรง	37
3.13 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์รับกระแสไฟฟ้า	38
3.14 ระบบจ่ายไฟกระแสสลับ	41
3.15 แผนโทกราฟ	41
3.16 ตัวอย่างระบบจ่ายไฟกระแสตรงของรถไฟฟ้ามหานคร สายสีน้ำเงิน.....	44
3.17 ตัวอย่างระบบจ่ายไฟกระแสตรงของรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีเขียวเข้ม ส่วนต่อขยาย	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.18 เทคโนโลยีระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทย.....	47
3.19 ลักษณะสมบัติของแรงดูดลากของขบวนรถไฟฟ้า.....	49
3.20 แผนภาพวัตถุอิสระแสดงการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า.....	50
3.21 สัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ในระบบขนส่งมวลชนตามสมการเดวิส.....	53
3.22 เส้นโครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้า.....	55
3.23 ระยะวิกฤตการเบรก.....	55
3.24 โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน.....	58
3.25 แบบจำลองระบบจ่ายไฟกระแสดตรงของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน.....	58
3.26 ปัญหาไฟดับในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน.....	61
3.27 การหยุดชะงักในการให้บริการระบบ.....	63
3.28 ผู้โดยสารตกค้างบนขบวนรถไฟฟ้าหรือสถานีผู้โดยสาร.....	63
3.29 การจ่ายไฟแบบระบบคู่ขนาน.....	65
3.30 องค์ประกอบระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉิน.....	69
3.31 ความสามารถในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่แต่ละประเภท.....	72
3.32 การรับพลังงานไฟฟ้าจากระบบจ่ายไฟหลัก.....	79
3.33 การรับพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับจากการเบรก.....	79
3.34 การส่งพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินจากการเบรกให้กับรถไฟฟ้าขบวนอื่น ๆ.....	80
3.35 การขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าด้วยพลังงานไฟฟ้าจากอุปกรณ์กักเก็บพลังงานและ ระบบจ่ายไฟหลัก.....	80
3.36 การส่งพลังงานไฟฟ้าจากอุปกรณ์กักเก็บพลังงานให้กับส่วนอื่น ๆ ของระบบ.....	80
3.37 การดึงพลังงานไฟฟ้าที่กักเก็บไว้มาใช้ขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าขณะระบบจ่ายไฟขัดข้อง.....	81
3.38 การรับพลังงานไฟฟ้าย้อนกลับจากการเบรกในกรณีที่ระบบจ่ายไฟหลักขัดข้อง.....	81
3.39 การส่งพลังงานไฟฟ้าส่วนเกินจากการเบรกไปยังรถไฟฟ้าขบวนอื่น ๆ กรณี ระบบจ่ายไฟหลักเกิดขัดข้อง.....	82
3.40 ส่วนประกอบหลักของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน.....	83

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.41 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	84
3.42 รูปทรงของเซลล์แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน	89
3.43 แบบจำลองอย่างง่าย	95
3.44 แบบจำลองสมมุติฐาน	95
3.45 แบบจำลองสมมุติฐานแบบปรับปรุง	95
3.46 แบบจำลองตามเวลา	95
3.47 แบบจำลองอย่างง่ายแบบวงจรสมมูลอันดับ	96
3.48 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับระบบกักเก็บพลังงานแบบติดตั้งข้างทาง	98
3.49 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับโครงข่ายระบบจ่ายไฟ	98
3.50 การแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าระหว่างรถไฟฟ้ากับรถไฟฟ้า	99
3.51 ความต้านทานของรางตัวนำและรางวิ่งที่เพิ่มขึ้นตามระยะทาง	101
4.1 ลักษณะเส้นโครงร่างความเร็วของขบวนรถไฟฟ้าที่ควบคุมเชิงสัดส่วน	105
4.2 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองส่วนการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า	106
4.3 ระบบจ่ายไฟกระแสดตรงของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	107
4.4 แบบจำลองพายของระบบจ่ายไฟกระแสดตรง	107
4.5 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองในส่วนโครงข่ายระบบจ่ายไฟ	108
4.6 โครงสร้างการทำงานของแบบจำลองระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	109
4.7 ระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม	111
4.8 รายการสถานีผู้โดยสารบนเส้นทางระบบรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม	112
4.9 โครงร่างความเร็วของขบวนรถไฟฟ้า	113
4.10 คุณสมบัติแรงฉุดลากและแรงเบรกของขบวนรถไฟฟ้าบีทีเอส สายสีลม	114
4.11 โครงร่างความชันของทางวิ่ง	115
4.12 ความเร็ว-ระยะทางของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน	116
4.13 เวลา-ระยะทางของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน	116
4.14 แรงฉุดลากรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน	116

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน	117
4.16 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน	117
4.17 ความเร็ว-ระยะทางของรถไฟฟ้าหลายขบวน	118
4.18 ระยะทาง-เวลาของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวน.....	119
4.19 แรงฉุดลากรถไฟฟ้าหลายขบวน	119
4.20 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหลายขบวน	120
4.21 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าหลายขบวน	120
4.22 โครงสร้างสำหรับพัฒนาแบบจำลองการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า	123
4.23 แบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุดฉุดสำหรับการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้า	124
4.24 ระยะทางแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าจากระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุดฉุดไปยังขบวนรถไฟฟ้า	126
4.25 โครงสร้างการทำงานของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุดฉุด	131
4.26 ตัวอย่างเส้นทางการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS.....	134
4.27 วงจรย่อยการคำนวณตัวอย่างการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS.....	134
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับกำลังไฟฟ้าที่ต้องขับเคลื่อนรถไฟฟ้า	145
4.29 การใช้พลังงานไฟฟ้าขณะรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่าง ๆ.....	145
4.30 ข้อมูลจำเพาะของแบตเตอรี่แพ็ค Toshiba SCiB™ 23Ah.....	147
4.31 แรงดันไฟฟ้า-ระยะทางของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุดฉุด	148
4.32 กระแสไฟฟ้า-ระยะทางของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุดฉุด	148
4.33 กำลังไฟฟ้า-ระยะทางของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุดฉุด	148
4.34 พลังงานไฟฟ้า-ระยะทางของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุดฉุด	149
4.35 สถานะการชาร์จ-ระยะทางของระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุดฉุด	149
4.36 การใช้พลังงานไฟฟ้าของขบวนรถไฟฟ้ากรณีก่อนและหลังการติดตั้ง ESTS.....	150
4.37 แนวคิดของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุดฉุดสำหรับระบบรถไฟฟ้า ขนส่งมวลชน	152
4.38 โครงสร้างแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุดฉุดสำหรับระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	152

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.39 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลองระบบขับเคลื่อนตัวเองฉุกเฉินสำหรับระบบ รถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	153
4.40 ตำแหน่งจำลองสถานการณ์ไฟดับขณะขบวนรถไฟฟ้ากำลังเคลื่อนที่	155
4.41 การเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟดับ ณ ตำแหน่ง 25% ระหว่างสถานีผู้โดยสาร ...	155
4.42 การเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟดับ ณ ตำแหน่ง 50% ระหว่างสถานีผู้โดยสาร ...	156
4.43 การเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้าเมื่อเกิดไฟดับ ณ ตำแหน่ง 75% ระหว่างสถานีผู้โดยสาร ...	156
4.44 พลังงานไฟฟ้าที่ ESTS จ่ายเมื่อเกิดไฟดับ ณ ตำแหน่ง 25% ระหว่างสถานีผู้โดยสาร	156
4.45 พลังงานไฟฟ้าที่ ESTS จ่ายเมื่อเกิดไฟดับ ณ ตำแหน่ง 50% ระหว่างสถานีผู้โดยสาร	157
4.46 พลังงานไฟฟ้าที่ ESTS จ่ายเมื่อเกิดไฟดับ ณ ตำแหน่ง 75% ระหว่างสถานีผู้โดยสาร	157
4.47 ความสัมพันธ์เชิงระยะทาง-เวลาการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขณะไฟดับ	160
4.48 ความสัมพันธ์เชิงความเร็ว-เวลาการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขณะไฟดับ	160
4.49 แรงดันไฟฟ้าของ ESTS ที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าและขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้า	162
4.50 กระแสไฟฟ้าของ ESTS ที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าและขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้า	162
4.51 กำลังไฟฟ้าของ ESTS ที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้าและขบวนรถไฟฟ้าที่รับพลังงานไฟฟ้า	163
4.52 พลังงานไฟฟ้าคงเหลือและสถานะการชาร์จของ ESTS ที่ติดตั้งบนขบวนรถไฟฟ้า	164
5.1 การกระจายตำแหน่งของ ESTS ครอบคลุมแนวเส้นทาง	177
5.2 ตัวแปรทดสอบและตัวแปรควบคุมที่กำหนดการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS	177
5.3 ขั้นตอนการจำลองการแบ่งปันพลังงานไฟฟ้าของ ESTS	178
5.4 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$	181
5.5 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$	182
5.6 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$	182
5.7 กระแสไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$	183
5.8 กำลังไฟฟ้า ESTS และรถไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 3.45$ นาที และ $\%ESTS = 25\%$	183

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี $H = 3.45$ นาที่ และ $\%ESTS = 25\%$	183
5.10 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 3.45$ นาที่ และ $\%ESTS = 25\%$	184
5.11 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี $H = 3.45$ นาที่ และ $\%ESTS = 50\%$	185
5.12 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี $H = 3.45$ นาที่ และ $\%ESTS = 50\%$	185
5.13 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรฟไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 3.45$ นาที่ และ $\%ESTS = 50\%$	186
5.14 กระแสไฟฟ้า ESTS และรฟไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 3.45$ นาที่ และ $\%ESTS = 50\%$	186
5.15 กำลังไฟฟ้า ESTS และรฟไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 3.45$ นาที่ และ $\%ESTS = 50\%$...	187
5.16 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี $H = 3.45$ นาที่ และ $\%ESTS = 50\%$	187
5.17 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 3.45$ นาที่ และ $\%ESTS = 50\%$	188
5.18 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี $H = 3.45$ นาที่ และ $\%ESTS = 75\%$	189
5.19 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี $H = 3.45$ นาที่ และ $\%ESTS = 75\%$	189
5.20 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรฟไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 3.45$ นาที่ และ $\%ESTS = 75\%$	190
5.21 กระแสไฟฟ้า ESTS และรฟไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 3.45$ นาที่ และ $\%ESTS = 75\%$	190
5.22 กำลังไฟฟ้า ESTS และรฟไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 3.45$ นาที่ และ $\%ESTS = 75\%$...	191
5.23 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี $H = 3.45$ นาที่ และ $\%ESTS = 75\%$	191
5.24 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 3.45$ นาที่ และ $\%ESTS = 75\%$	192
5.25 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 25\%$	194
5.26 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 25\%$	194
5.27 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรฟไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 25\%$	195
5.28 กระแสไฟฟ้า ESTS และรฟไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 25\%$	195
5.29 กำลังไฟฟ้า ESTS และรฟไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 25\%$	195

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.30 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 25\%$	195
5.31 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 25\%$	196
5.32 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 50\%$	197
5.33 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 50\%$	197
5.34 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรฟไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 50\%$	198
5.35 กระแสไฟฟ้า ESTS และรฟไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 50\%$	198
5.36 กำลังไฟฟ้า ESTS และรฟไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 50\%$	198
5.37 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 50\%$	199
5.38 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 50\%$	199
5.39 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 75\%$	200
5.40 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 75\%$	200
5.41 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรฟไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 75\%$	201
5.42 กระแสไฟฟ้า ESTS และรฟไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 75\%$	201
5.43 กำลังไฟฟ้า ESTS และรฟไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 75\%$	202
5.44 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 75\%$	202
5.45 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 75\%$	203
5.46 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี $H = 8$ นาที่ และ $\%ESTS = 25\%$	205
5.47 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี $H = 8$ นาที่ และ $\%ESTS = 25\%$	205
5.48 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรฟไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 8$ นาที่ และ $\%ESTS = 25\%$	206
5.49 กระแสไฟฟ้า ESTS และรฟไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 8$ นาที่ และ $\%ESTS = 25\%$	206
5.50 กำลังไฟฟ้า ESTS และรฟไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 8$ นาที่ และ $\%ESTS = 25\%$	206
5.51 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี $H = 8$ นาที่ และ $\%ESTS = 25\%$	206
5.52 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 8$ นาที่ และ $\%ESTS = 25\%$	207
5.53 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี $H = 8$ นาที่ และ $\%ESTS = 50\%$	208
5.54 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี $H = 8$ นาที่ และ $\%ESTS = 50\%$	208

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.55 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรตไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 8$ นาที่ และ $\%ESTS = 50\%$	209
5.56 กระแสไฟฟ้า ESTS และรตไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 8$ นาที่ และ $\%ESTS = 50\%$	209
5.57 กำลังไฟฟ้า ESTS และรตไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 8$ นาที่ และ $\%ESTS = 50\%$	209
5.58 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี $H = 8$ นาที่ และ $\%ESTS = 50\%$	210
5.59 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 8$ นาที่ และ $\%ESTS = 50\%$	210
5.60 ความสัมพันธ์ระยะทาง-เวลา กรณี $H = 8$ นาที่ และ $\%ESTS = 75\%$	211
5.61 ความสัมพันธ์ความเร็ว-เวลา กรณี $H = 8$ นาที่ และ $\%ESTS = 75\%$	211
5.62 แรงดันไฟฟ้า ESTS และรตไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 8$ นาที่ และ $\%ESTS = 75\%$	212
5.63 กระแสไฟฟ้า ESTS และรตไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 8$ นาที่ และ $\%ESTS = 75\%$	212
5.64 กำลังไฟฟ้า ESTS และรตไฟฟ้าแต่ละขบวน กรณี $H = 8$ นาที่ และ $\%ESTS = 75\%$	212
5.65 พลังงานไฟฟ้า ESTS แต่ละชุด กรณี $H = 8$ นาที่ และ $\%ESTS = 75\%$	213
5.66 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 8$ นาที่ และ $\%ESTS = 75\%$	213
ก.1 ลักษณะทางกายภาพของเซลล์แบตเตอรี่ Toshiba SCiB™ 23 Ah.....	239
ค.1 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 3.45$ นาที่ และ $\%ESTS = 25\%$	254
ค.2 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 3.45$ นาที่ และ $\%ESTS = 50\%$	257
ค.3 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 3.45$ นาที่ และ $\%ESTS = 75\%$	260
ค.4 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 25\%$	264
ค.5 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 50\%$	268
ค.6 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 6$ นาที่ และ $\%ESTS = 75\%$	272
ค.7 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 8$ นาที่ และ $\%ESTS = 25\%$	276
ค.8 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 8$ นาที่ และ $\%ESTS = 50\%$	280
ค.9 อัตราความสำเร็จของการตอบสนองในกรณี $H = 8$ นาที่ และ $\%ESTS = 75\%$	284