

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(7)
สารบัญตาราง	(9)
สารบัญภาพ	(10)
คำอธิบายสัญลักษณ์/อักษรย่อ/ประมวลคำศัพท์	(14)
บทที่ 1 บทนำ	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
ขอบเขตของการวิจัย	3
คำนิยามศัพท์เฉพาะ	4
ประโยชน์ที่ได้รับ	5
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
ซูเปอร์คาปาซิเตอร์	7
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	32
การควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	47
แบตเตอรี่	54
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	58
กรอบแนวคิดในการวิจัย	66
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	69
แบบแผนงานวิจัย	69
การออกแบบระบบขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้า	71
เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล	74
การเก็บรวบรวมข้อมูล	77
การวิเคราะห์ข้อมูล	81

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัย	85
ผลการวิเคราะห์การประจุและปล่อยประจุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์	85
ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของซูเปอร์คาปาซิเตอร์	105
ผลการวิเคราะห์ซูเปอร์คาปาซิเตอร์กับการขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้า	107
ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของยานพาหนะไฟฟ้า	114
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	117
สรุปผล	117
อภิปรายผล	118
ข้อเสนอแนะ	120
เอกสารอ้างอิง	121
ภาคผนวก ก คุณลักษณะยานพาหนะไฟฟ้า	125
ภาคผนวก ข คุณลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้า	129
ภาคผนวก ค คุณลักษณะของซูเปอร์คาปาซิเตอร์	131
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	133

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	ข้อมูลซูเปอร์คาปาซิเตอร์และบริษัทผู้ผลิต	9
2.2	เปรียบเทียบอิเล็กทรอนิกส์แบบน้ำกับสารอินทรีย์	12
2.3	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุแต่ละชนิด	14
2.4	ความคงทนของวัสดุแต่ละชนิด	15
3.1	กระแสและเวลาในการชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์	74
4.1	ข้อมูลการประจุและปล่อยประจุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ 48V 10A	85
4.2	ข้อมูลการประจุและปล่อยประจุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ 48V 20A	87
4.3	ข้อมูลการประจุและปล่อยประจุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ 48V 30A	89
4.4	ข้อมูลการประจุและปล่อยประจุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ 48V 40A	91
4.5	ข้อมูลการประจุและปล่อยประจุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ 48V 50A	93
4.6	ข้อมูลการประจุและปล่อยประจุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ 48V 60A	95
4.7	ข้อมูลการประจุและปล่อยประจุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ 48V 70A	97
4.8	ข้อมูลการประจุและปล่อยประจุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ 48V 80A	99
4.9	ข้อมูลการประจุและปล่อยประจุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ 48V 90A	101
4.10	ข้อมูลการประจุและปล่อยประจุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ 48V 100A	103
4.11	แสดงค่าความต้านทานอนุกรมภายในซูเปอร์คาปาซิเตอร์(ESR) และพลังงานสูญเสีย W_R	107
4.12	แสดงพลังงานที่ใช้ชาร์จและขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้าที่กระแสชาร์จต่างกัน	114

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ซูปเปอร์คาปาซิเตอร์	7
2.2	เปรียบเทียบความแตกต่างของอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานไฟฟ้า	8
2.3	โครงสร้างตัวเก็บประจุแบบธรรมดา	10
2.4	เปรียบเทียบโครงสร้างตัวเก็บประจุแต่ละชนิด	10
2.5	เซลล์ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่มีการเรียงตัวของประจุแบบสองชั้น (EDLCs)	10
2.6	โครงสร้างซูปเปอร์คาปาซิเตอร์	11
2.7	พลังงานที่สะสมในซูปเปอร์คาปาซิเตอร์	16
2.8	เปรียบเทียบความจุและความต้านทานช่วงอุณหภูมิ -40°C ถึง $+65^{\circ}\text{C}$	18
2.9	วงจรสมมูลซูปเปอร์คาปาซิเตอร์	18
2.10	วงจรของซูปเปอร์คาปาซิเตอร์	19
2.11	ช่วงการเก็บประจุ/ปล่อยประจุ	19
2.12	การทดลองปล่อยประจุด้วยกระแสคงที่	20
2.13	รูปคลื่นใน 1 วัฏจักร สำหรับหาค่า CAP/ESR ของ SC รุ่น BMD0165 P048 BXX	21
2.14	การต่อตัวต้านทานในการปรับสมดุลแรงดัน	22
2.15	การต่อซีเนอร์ไดโอดในการปรับสมดุลแรงดัน	23
2.16	อุณหภูมิและแรงดันมีผลต่ออายุการใช้งานของซูปเปอร์คาปาซิเตอร์	24
2.17	ความจุกับวัฏจักรการนำกลับมาใช้งาน	25
2.18	ตัวเก็บประจุต่ออนุกรม	25
2.19	ตัวเก็บประจุต่ออนุกรม n ตัว	26
2.20	วงจรตัวเก็บประจุต่อขนาน	27
2.21	ตัวเก็บประจุต่อขนาน n ตัว	27
2.22	วงจร RC ในภาวะชั่วคราว	28
2.23	แทนที่ตัวเก็บประจุโดยการเปิดวงจร	29
2.24	วงจร RC ไม่มีแหล่งกำเนิดพลังงาน	29
2.25	คุณลักษณะของตัวเก็บประจุ	30
2.26	วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกกระตุ้น	33

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.27	วงจรมุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน 35
2.28	คุณลักษณะแรงบิด – ความเร็ว ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน 36
2.29	วงจรมุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม 36
2.30	คุณลักษณะแรงบิด – ความเร็ว ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม 38
2.31	วงจรมุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบซอร์ตซ์ซันต์คอมปาวด์ 39
2.32	วงจรมุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบล่องซันต์คอมปาวด์ 40
2.33	คุณลักษณะแรงบิด ความเร็ว ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม ทั้งดีฟเฟอเรนเชียลและคิวมูเลทีฟ 42
2.34	คุณลักษณะแรงบิด ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน อนุกรม และแบบผสม 43
2.35	Brushless DC Motors (BLDC) 45
2.36	Brushless DC Motors control (BLDC) 46
2.37	การควบคุมความต้านทานอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 48
2.38	คุณลักษณะความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 49
2.39	คุณลักษณะแรงบิด - ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน อนุกรม และแบบผสมต่อแบบคิวมูเลทีฟ 50
2.40	การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว 51
2.41	การควบคุมความต้านทานอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 52
2.42	การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน 52
2.43	การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม 53
2.44	การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 53
2.45	แบตเตอรี่แบบลิธียมไอออน 54
2.46	ระบบขับเคลื่อนรถยก รวมถึงระบบแบตเตอรี่สำรอง 57
2.47	Bidirectional boost converter 57
2.48	Bidirectional non inverting buck-boost converter 58
2.49	ระบบการอัดประจุไฟฟ้าให้กับซูเปอร์คาปาซิเตอร์และการขับเคลื่อน ยานพาหนะไฟฟ้า 66

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	70
3.2	โครงสร้างการออกแบบระบบขับเคลื่อนยานพาหนะไฟฟ้า	71
3.3	การต่อขนานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์	75
3.4	แบตเตอรี่ LION ขนาดพิกัด 12V, 42Ah	75
3.5	แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	76
3.6	อุปกรณ์เก็บข้อมูล AGILENT 34970a BENCHLINK DATA LOGGER	76
3.7	อิเล็กทรอนิกส์โหลด รุ่น KEYSIGH N3300A SYSTEM	76
3.8	การทดลองการประจุและปล่อยประจุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์	77
3.9	ติดตั้งซูเปอร์คาปาซิเตอร์กับยานพาหนะไฟฟ้า	77
3.10	วงจรที่ใช้ในการทดลองการประจุและปล่อยประจุของ ซูเปอร์คาปาซิเตอร์	79
3.11	แผนผังภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี สมุทรปราการ	79
3.12	แผนผังการทดลองวิ่งของยานพาหนะไฟฟ้ารวมระยะทาง 505 กิโลเมตร	80
3.13	ช่วงการชาร์จซูเปอร์คาปาซิเตอร์	81
3.14	ช่วงการทดลองวิ่งของยานพาหนะไฟฟ้า	81
4.1	แรงดันและกระแสช่วงการประจุและปล่อยประจุ ที่ 48V 10A	86
4.2	พลังงานช่วงการประจุและปล่อยประจุ ที่อิเล็กทรอนิกส์โหลด 10A	87
4.3	แรงดันและกระแสช่วงการประจุและปล่อยประจุ ที่ 48V 20A	88
4.4	พลังงานช่วงการประจุและปล่อยประจุ ที่อิเล็กทรอนิกส์โหลด 20A	89
4.5	แรงดันและกระแสช่วงการประจุและปล่อยประจุที่ 48V 30A	90
4.6	พลังงานช่วงการประจุและปล่อยประจุ ที่อิเล็กทรอนิกส์โหลด 30A	91
4.7	แรงดันและกระแสช่วงการประจุและปล่อยประจุ ที่ 48V 40A	92
4.8	พลังงานช่วงการประจุและปล่อยประจุ ที่อิเล็กทรอนิกส์โหลด 40A	93
4.9	แรงดันและกระแสช่วงการประจุและปล่อยประจุ ที่ 48V 50A	94
4.10	พลังงานช่วงการประจุและปล่อยประจุ ที่อิเล็กทรอนิกส์โหลด 50A	95
4.11	แรงดันและกระแสช่วงการประจุและปล่อยประจุ ที่ 48V 60A	96
4.12	พลังงานช่วงการประจุและปล่อยประจุ ที่อิเล็กทรอนิกส์โหลด 60A	97

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.13 แรงดันและกระแสช่วงการประจุและปล่อยประจุ ที่ 48V 70A	98
4.14 พลังงานช่วงการประจุและปล่อยประจุ ที่อิเล็กทรอนิกส์ไหลด 70A	99
4.15 แรงดันและกระแสช่วงการประจุและปล่อยประจุ ที่ 48V 80A	100
4.16 พลังงานช่วงการประจุและปล่อยประจุ ที่อิเล็กทรอนิกส์ไหลด 80A	101
4.17 แรงดันและกระแสช่วงการประจุและปล่อยประจุ ที่ 48V 90A	102
4.18 พลังงานช่วงการประจุและปล่อยประจุ ที่อิเล็กทรอนิกส์ไหลด 90A	103
4.19 แรงดันและกระแสช่วงการประจุและปล่อยประจุที่ 48V 100A	104
4.20 พลังงานช่วงการประจุและปล่อยประจุ ที่อิเล็กทรอนิกส์ไหลด 100A	105
4.21 ประสิทธิภาพของซูเปอร์คาปาซิเตอร์	106
4.22 แผนผังการทดลองวิ่งของยานพาหนะไฟฟ้ารวมระยะทาง 505 กิโลเมตร	108
4.23 กระแส แรงดันชาร์จที่ 50.52V กระแส 20.33A ทดลองวิ่งที่น้ำหนักรวม 480kg	109
4.24 พลังงานช่วงชาร์จ 50.52V กระแส 20.33A ทดลองวิ่งที่น้ำหนักรวม 480kg	109
4.25 แรงดัน กระแสชาร์จที่ 50.53V กระแส 39.53A ทดลองวิ่งน้ำหนักรวม 415kg	110
4.26 พลังงานช่วงชาร์จ 50.53V กระแส 39.53A ทดลองวิ่งที่น้ำหนัก 415kg	110
4.27 แรงดัน กระแสชาร์จที่ 50.50V 57.41A ทดลองวิ่งที่น้ำหนักรวม 480kg	111
4.28 พลังงานช่วงชาร์จ 50.50V กระแส 57.41A ทดลองวิ่งที่น้ำหนักรวม 480kg	112
4.29 แรงดัน กระแสชาร์จที่ 50.49V 79.15A ทดลองวิ่งที่น้ำหนัก 405kg	113
4.30 พลังงานช่วงชาร์จ 50.49V กระแส 79.15A ทดลองวิ่งที่น้ำหนัก 405kg	113
4.31 กระแส แรงดันช่วงเบรกและชะลอเบรก	114
4.32 ประสิทธิภาพของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนพาหนะไฟฟ้า	115

คำอธิบายสัญลักษณ์/อักษรย่อ/ประมวลคำศัพท์

SC	=	Supercapacitor
EDLCs	=	Electrochemical Double-Layer Capacitors
UL	=	Ultracapacitor
ESR	=	Equivalent Series Resistance
EPR	=	Equivalent Parallels Resistance
DC/DC	=	Direct Current to Direct Current
ϵ	=	Permittivity
η_{sc}	=	Efficiency
τ	=	Time Constant
ω	=	Angular Velocity
ϕ_p	=	Flux

มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี