

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฒ

บทที่

1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	4

2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ.....	6
2.2 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง	6
2.3 ข้อกำหนด ผลกระทบของศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสรั่ว	7
2.4 การติดตั้งเพื่อลดศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่ว.....	14
2.5 วงจรรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง.....	21
2.6 สรุป.....	24

3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ.....	25
3.2 กระแสรั่วกีดกร่อน.....	25
3.2.1 การเกิดกระแสรั่ว.....	26

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.2 ผลกระทบกระแสรั่ว	27
3.3 การประเมินกระแสรั่ว	30
3.4 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสตรง	31
3.5 การคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง	36
3.6 แบบจำลองการติดตั้งระบบเพื่อลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่ว.....	39
3.6.1 ผลการจำลองการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าระบบปกติ.....	39
3.6.2 ผลการจำลองการติดตั้งระบบตัวนำย้อนกลับ	44
3.6.3 ผลการจำลองการติดตั้งระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ	48
3.7 ศักยภาพการลดลงในระบบ.....	55
3.8 สรุป	56
4 ผลการจำลองและอภิปรายผล	
4.1 บทนำ.....	58
4.2 กรณีศึกษาที่ 1 (ความเร็วคงที่).....	58
4.3 กรณีศึกษาที่ 2 (รถไฟฟ้าขบวนเดียว MRT สายสีม่วงเหนือ).....	62
4.3.1 แบบจำลองการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าระบบปกติ	62
4.3.2 แบบจำลองการติดตั้งระบบตัวนำย้อนกลับ.....	77
4.3.3 แบบจำลองการติดตั้งระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ	89
4.3.4 แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อที่สถานีไฟฟ้าย่อย	96
4.4 ผลการประเมินการลดลงของระบบการติดตั้งเพิ่มจุดเชื่อมต่อกับรางวิ่ง	104
4.5 สรุป	105
5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	106
5.2 ข้อเสนอแนะ	106
รายการอ้างอิง.....	108
ภาคผนวก ก ระบบ Negative Resistance Converter Traction Power System	111
ภาคผนวก ข ผลการจำลองกรณีศึกษาที่ 2 (รถไฟฟ้าขบวนเดียว MRT สายสีม่วงเหนือ)	
ระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ	114

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ค ผลการจำลองกรณีศึกษาที่ 2 (รถไฟฟ้าขบวนเดียว MRT สายสีม่วงเหนือ)	
ระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ.....	134
ภาคผนวก ง บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา	152
ประวัติผู้เขียน	167

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ช่วงของแรงดันไฟฟ้าที่ได้รับอนุญาต ระบุไว้ในมาตรฐาน BS EN 50163 และ IEC 60850	7
2.2	วิธีการที่มีการใช้งานของค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่ว	14
3.1	แรงดันที่ยอมให้ผ่านได้ U_t ตามมาตรฐาน EN 50122-1	30
3.2	อุปกรณ์เสริมติดตั้งของระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ	49
4.1	พารามิเตอร์ของกรณีศึกษาที่ 1	59
4.2	ร้อยละการลดลงของค่าสูงสุดศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่ว	61
4.3	ข้อมูลพารามิเตอร์ของรถไฟไฟฟ้าสายสีม่วง	63
4.4	ตำแหน่งสถานีระบบรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)	64
4.5	กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และศักย์ไฟฟ้าที่รางของแบบจำลอง กรณีศึกษา รถไฟฟ้า MRT สายสีม่วง ผ่านแบบจำลองระบบปกติผ่านการต่อลงดินสองชั้น ..	73
4.6	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีรับ-ส่งผู้โดยสาร ระบบปกติ	75
4.7	เปรียบเทียบผลการประเมินกระแสรั่วระหว่างการจำลองผลการเคลื่อนที่รถไฟขบวน เดียวกับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางที่ได้จากแบบจำลองการต่อลงดินตามมาตรฐาน EN 50122-2	77
4.8	พารามิเตอร์ของสายเคเบิล	78
4.9	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 3 จุดเชื่อมต่อ	80
4.10	ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ ย้อนกลับ 4 จุดเชื่อมต่อ	81
4.11	ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ ย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ	82
4.12	ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ ย้อนกลับ 8 จุดเชื่อมต่อ	84
4.13	ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ ย้อนกลับ 21 จุดเชื่อมต่อ	85
4.14	ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ ย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ ($R_{RT} = 0.0175 \Omega/\text{km}$)	87

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.15 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ ย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ ($R_{RT} = 0.047 \Omega/\text{km}$).....	88
4.16 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวแปลงเชิงลบ 3 จุดเชื่อมต่อ	90
4.17 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวแปลง ความต้านทานเชิงลบ 4 จุดเชื่อมต่อ.....	92
4.18 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวแปลง ความต้านทานเชิงลบ 5 จุดเชื่อมต่อ.....	93
4.19 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวแปลง ความต้านทานเชิงลบ 8 จุดเชื่อมต่อ.....	94
4.20 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวแปลง ความต้านทานเชิงลบ 21 จุดเชื่อมต่อ.....	95
4.21 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ ย้อนกลับตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ.....	99
4.22 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวแปลง ความต้านทานเชิงลบตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ	99
4.23 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ ย้อนกลับตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ.....	103
4.24 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวแปลง ความต้านทานเชิงลบตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ	103
4.25 ศักยภาพการลดลงของระบบการติดตั้ง	104
ข.1 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 3 จุดเชื่อมต่อ	115
ข.2 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 4 จุดเชื่อมต่อ	117
ข.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัว 4 จุดเชื่อมต่อ.....	118
ข.4 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 5 จุดเชื่อมต่อ	120
ข.5 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ	121
ข.6 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 8 จุดเชื่อมต่อ	123
ข.7 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 8 จุดเชื่อมต่อ	124
ข.8 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 21 จุดเชื่อมต่อ	126

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.9	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 21 จุดเชื่อมต่อ.. 127
ข.10	กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง กรณีใช้ $R_{RT} = 0.0175 \Omega/\text{km}$ 128
ข.11	กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง กรณีใช้ $= 0.047 \Omega/\text{km}$ 129
ข.12	กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ 130
ข.13	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ 131
ข.14	กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ 132
ข.15	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อย ของสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ 133
ค.1	กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 3 จุดเชื่อมต่อ 135
ค.2	กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 4 จุดเชื่อมต่อ 137
ค.3	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้ง 4 จุดเชื่อมต่อ 138
ค.4	กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 5 จุดเชื่อมต่อ 140
ค.5	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 5 จุดเชื่อมต่อ..... 141
ค.6	กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 8 จุดเชื่อมต่อ 143
ค.7	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 8 จุดเชื่อมต่อ..... 144
ค.8	กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง 21 จุดเชื่อมต่อ 146
ค.9	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 21 จุดเชื่อมต่อ..... 147
ค.10	กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ 148
ค.11	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อย ของสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ 149
ค.12	กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ 150
ค.13	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ 151

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสไฟฟ้ารั่วในระบบขนส่งรถไฟฟ้า.....2
2.1	รถไฟฟ้าขบวนเดียวของระบบรางกระแสตรงพร้อมระบบต่ายรวบรวมกระแสรั่ว.....8
2.2	วิธีการไม่ต่อลงดิน
2.3	วิธีการต่อลงดินโดยตรง.....9
2.4	วิธีการต่อลงดินผ่านไดโอด
2.5	ระบบการตรวจวัดศักย์ไฟฟ้าราง
2.6	ตารางระบบควบคุมการกักกร่อนสำหรับกระแสไฟฟ้ารั่ว..... 13
2.7	วงจรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรง..... 15
2.8	วงจรย้อนกลับและการต่อลงดินของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ
2.9	รูปแบบการติดตั้งตัวนำย้อนกลับในระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับ
2.10	วงจรทั่วไประบบ NRC-TPS ระหว่างสองสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าในขบวนเดียว
2.11	วงจรทั่วไประบบ NRC-TPS ระหว่างสองสถานีจ่ายกำลังไฟฟ้าในหลายขบวน..... 19
2.12	รูปแบบการทดลองระบบ TRA-TPS และ NRC-TPS ในห้องปฏิบัติการ
2.13	การต่อลงดินโดยใช้ไดโอด
2.14	Floating negative return current system
2.15	ระบบ SCCN ที่ใช้ drainage diode..... 23
2.16	ระบบจ่ายไฟผ่านรางที่สี่ของ LUL..... 24
3.1	เส้นทางการกักกร่อนสำหรับระบบรถไฟฟ้ากระแสตรง..... 25
3.2	กระบวนการกักกร่อนของกระแสไฟฟ้ารั่ว
3.3	การกักกร่อนที่เกิดขึ้นกับท่อโลหะที่อยู่ใต้ดิน
3.4	การกักกร่อนที่เกิดขึ้นกับรางรถไฟ
3.5	การเกิดสนิมในบริเวณเอวรางและฐานราง
3.6	แรงดันสัมผัสที่ยอมให้ผ่านได้ U_t ตามมาตรฐาน EN 50122-1 และมาตรฐาน HD637S1 .. 29
3.7	การคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าบนรางลาดเอียง
3.8	กราฟลักษณะสมบัติแรงดูดและแรงเบรกของรถไฟฟ้าสายสีม่วง (เหนือ)
3.9	โหมดการทำงานของรถไฟฟ้ากระแสตรง..... 35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10	รูปแบบสถานีจ่ายไฟฟ้า..... 37
3.11	สายส่งสถานีจ่ายไฟฟ้า 37
3.12	โหลดหรือรถไฟฟ้า 37
3.13	การสร้าง $[G]_{bus}$ 38
3.14	การสร้าง $[I]_{bus}$ 39
3.15	แบบจำลองพื้นฐานของการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าระบบปกติ 40
3.16	แบบจำลองกรณีที่มีสายส่งและรางของแบบจำลองการต่อลงดินสองชั้น..... 40
3.17	การต่อตัวนำระหว่างโนด p และ q ไต ๆ แบบสามระดับ 42
3.18	ระบบ TPS-TPS..... 44
3.19	แบบจำลองการติดตั้งระบบตัวนำย้อนกลับ 44
3.20	แบบจำลอง เมื่อเพิ่มจุดเชื่อมต่อของตัวนำย้อนกลับ 45
3.21	การต่อตัวนำระหว่างโนด p และ q ไต ๆ แบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 46
3.22	ระบบ RET-TPS..... 47
3.23	ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่รางของระบบตัวนำย้อนกลับ..... 48
3.24	ระบบ NEG-TPS..... 49
3.25	แบบจำลองเมื่อเพิ่มจุดเชื่อมต่อของตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 50
3.26	การต่อตัวนำระหว่างโนด p และ q ไต ๆ แบบติดตั้งตัวแปลงเชิงลบ..... 51
3.27	แบบจำลองระบบ NEG-TPS..... 52
3.28	รถไฟอยู่ในส่วนรางที่ 1 ของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 52
3.29	รถไฟอยู่ในส่วนรางที่ 2 ของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 53
3.30	รถไฟอยู่ในส่วนรางที่ 3 ของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 54
3.31	รถไฟอยู่ในส่วนรางที่ 4 ของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 55
4.1	แบบจำลองทั่วไปของกรณีศึกษาที่ 1 59
4.2	ผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางของกรณีศึกษาที่ 1 60
4.3	เส้นทางการเดินรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)..... 62
4.4	แบบจำลองการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าขบวนเดียว MRT สายสีม่วง 65
4.5	แผนผังการจำลองผล 66
4.6	ความเร็วจำกัดของ MRT สายสีม่วง 67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7	กระเดียนต์ของรถไฟฟ้า MRT สายสีม่วง (เหนือ) 67
4.8	กำลังไฟฟ้ารถไฟเทียบกับเวลา 68
4.9	กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน 1-10 69
4.10	แรงดันไฟฟ้าที่สถานีขับเคลื่อน 1-10..... 70
4.11	ศักย์ไฟฟ้าที่รางที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน 1-10..... 71
4.12	แรงดันไฟฟ้าตามตำแหน่งของรถไฟ 72
4.13	แรงดันรางตามตำแหน่งของรถไฟ 74
4.14	เคเบิล XLPE Single core แรงดัน 0.6/1kV 77
4.15	แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 3 จุดเชื่อมต่อ..... 79
4.16	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 3 จุดเชื่อมต่อ..... 79
4.17	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 4 จุดเชื่อมต่อ..... 81
4.18	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ..... 82
4.19	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 8 จุดเชื่อมต่อ..... 83
4.20	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 21 จุดเชื่อมต่อ 84
4.21	ศักย์ไฟฟ้าที่ราง ใช้สายเคเบิลค่าความต้านทานเท่ากับรางวิ่ง..... 86
4.22	ศักย์ไฟฟ้าที่ราง ใช้สายเคเบิลค่าความต้านทานมากกว่ารางวิ่ง 86
4.23	แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 3 จุดเชื่อมต่อ 90
4.24	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 3 จุดเชื่อมต่อ..... 90
4.25	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 4 จุดเชื่อมต่อ..... 92
4.26	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 5 จุดเชื่อมต่อ..... 93
4.27	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 8 จุดเชื่อมต่อ..... 94
4.28	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 21 จุดเชื่อมต่อ 95
4.29	แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ..... 97
4.30	แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุด เชื่อมต่อ 98
4.31	ศักย์ไฟฟ้าที่รางของการติดตั้งตัวนำย้อนกลับตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ 98

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ.....	99
4.33 แบบจำลองการติดตั้งตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ	101
4.34 แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุด เชื่อมต่อ	101
4.35 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของการติดตั้งตัวนำย้อนกลับตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ	102
4.36 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ.....	102
ก.1 อุปกรณ์ของระบบ NEG-TPS	112
ก.2 โหมดการทำงานของ NRC	113
ก.3 โหมดการทำงานของ SU.....	113
ข.1 แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 4 จุดเชื่อมต่อ.....	116
ข.2 แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ.....	119
ข.3 แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 8 จุดเชื่อมต่อ.....	122
ข.4 แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 21 จุดเชื่อมต่อ	125
ค.1 แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 4 จุดเชื่อมต่อ	136
ค.2 แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 5 จุดเชื่อมต่อ	139
ค.3 แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 8 จุดเชื่อมต่อ	142
ค.4 แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 21 จุดเชื่อมต่อ	145

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

TRA-TPS	=	Traditional traction power system
RET-TPS	=	Return conductor traction power system
NEG-TPS	=	Negative resistance converter traction power system
TPS	=	Traction power system
SCCN	=	Stray current collector mats solution
SCDD	=	Stray current drainage diode
OVPDs	=	Over-voltage protection devices
AT	=	Auto-transformer
RR	=	Rail-return system
BT	=	Booster transformer
NRC	=	Negative resistance converter
FCA	=	Feeder cable
SU	=	Switch unit
CBC	=	Cross-bonding-cables
CBN	=	cross-bonding-nodes
RIS	=	Rail insulation system
DES	=	Diode earthing system
FNRCs	=	Floating negative return current system
SCCNS	=	Stray current collecting net system
FRS	=	Fourth rail system
Fe	=	Iron
O ₂	=	Oxygen
H ₂ O	=	Hydrogen Oxide