บทที่ 4 ผลการจำลองและอภิปรายผล

4.1 บทนำ

จากบทที่ 3 ได้กล่าวถึงรูปแบบการจำลองผลประเภทต่าง ๆ ที่จะใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ เล่มนี้ ซึ่งการศึกษากระแสไฟฟ้ารั่วในระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกระแสตรง จำเป็นต้องพิจารณา ปัจจัยหลายประการ เช่น ลักษณะสมบัติของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้า ตารางการเดินรถ แบบจำลองการ ต่อลงดินของระบบไฟฟ้า เป็นต้น ปัจจัยที่กล่าวมานี้มีความซับซ้อนต่อการจำลองผล ดังนั้นจึงต้องใช้ เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ที่สามารถนำมาใช้เป็นซอฟแวร์ช่วยคำนวณผ่านแบบจำลองของระบบ ผ่าน โปรแกรม MATLAB เพื่อช่วยให้ผู้จัดทำเห็นสภาพการทำงานและผลที่ได้เสมือนจริง ในบทนี้ใช้ระบบ รถไฟฟ้ากระแสตรงแบ่งป็น 2 กรณีศึกษา ได้แก่ กรณีที่ 1 เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ประกอบด้วย รถไฟฟ้า 1 ขบวนวิ่งบนรางวิ่งและมีสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน 3 สถานีอยู่ที่ตำแหน่ง 0, 5 และ 10 กิโลเมตร ตามลำดับ และการจำลองการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าขบวนเดียว MRT สายสีม่วง (เหนือ)

4.2 กรณีศึกษาที่ 1 (ความเร็วคงที่)4.2.1 แบบจำลองการเคลื่อนที่กรณีศึกษาที่ 1

ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลพารามิเตอร์ในการสร้างแบบจำลอง แบบจำลองทั่วไปของ กรณีที่ 1 ดังรูปที่ 4.1 โดยใช้แรงดันไฟฟ้าของสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนพิกัด 1500 V และรถไฟใช้ กระแสฉุดลากคงที่ 1667

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของกรณีศึกษาที่ 1

Parameters	Variables	Values	Units
Substation voltage rated	<i>u</i> _{subs}	1500	V
Train current	i_L	1667	А
Catenary resistance	R _C	75	mΩ/km
Running rails resistance	R_{R}	9	mΩ/km
SUs resistance	R_{SU}	0.002	mΩ/km
FCAs resistance	R _{FCA}	0.00225	Ω/km
Rail-to-earth resistance	R _G	2	S•km
Distance	L	10	km



รูปที่ 4.1 แบบจำลองทั่วไปของกรณีศึกษาที่ 1

เมื่อพิจารณาจากแบบจำลองของ TRA-TPS, RET-TPS และ NEG-TPS ดังรูปที่ 4.1 เมื่อรถไฟมีการเคลื่อนที่ การคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วจะพิจารณาจากสมการ การเมตริกซ์ย่อยที่บัสสถานีย่อยแบบสามระดับต่อหนึ่งบัส สมการที่ (3.22) - (3.27) และการประเมิน หาค่าศักยภาพการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วในระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับและ ระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.36) และ (3.37) ที่กล่าว ไว้ข้างต้น

1) ผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีศึกษาที่ 1

จากรูปที่ 4.1 แบบจำลองกรณีศึกษาที่ 1 รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่จะ ประกอบไปด้วยรูปแบบของระบบทั้ง 3 ระบบไม่ว่าจะเป็นระบบปกติหรือ TRA-TPS (Traditional Traction Power System) ระบบการติดตั้งตัวนำหรือ RET-TPS (Return Conductor Traction Power System) และระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบหรือ NEG-TPS (Negative Resistance Converter Traction) สามารถนำผลการจำลองไปเปรียบเทียบเพื่อหาศักยภาพการลดลงของค่า ศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่วในขั้นตอนต่อไปได้ ผลการจำลองที่ความเร็วคงที่ ในกรณีจุดเชื่อมต่อที่ ตำแหน่ง 0, 1.25, 2.5, 3.75, 5, 6.25, 7.5, 8.75 และ 10 กิโลเมตร ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางของกรณีศึกษาที่ 1

จากรูปที่ 4.2 ของระบบ TRA-TPS ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด (*u_{rT}*) มีค่าเท่ากับ 13.32 V และกระแสไฟฟ้ารั่วสูงสุด (*i_{sT}*) มีค่าเท่ากับ 6.65 A ที่ *x* = 2.50 km และ *x* = 7.50 km เมื่อ รถไฟอยู่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน

ในระบบ RET-TPS ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด (u_{rR}) มีค่าเท่ากับ 2.66 V และ กระแสไฟฟ้ารั่วสูงสุด (i_{sR}) มีค่าเท่ากับ 0.67 A เมื่อรถไฟอยู่ตรงกลางของส่วนรางที่ 2, 3, 6 และ 7 โดยที่ x มีค่าเท่ากับ 1.88 km, 3.14 km, 6.88 km และ 8.14 km ตามลำดับ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง และกระแสไฟฟ้ารั่วสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบ RET-TPS พบว่าจะเกิดขึ้นเมื่อตำแหน่งรถไฟอยู่ตรงกลาง สถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนออกไป

ในระบบ NEG-TPS ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด (u_{rN}) มีค่าเท่ากับ 2.33 V และ กระแสไฟฟ้ารั่วสูงสุด (i_{sN}) มีค่าเท่ากับ 0.58 A เมื่อรถไฟอยู่ตำแหน่งตรงกลางของแต่ละส่วนรางใน ทุก ๆ ส่วน นั่นคือ x มีค่าเท่ากับ 0.62, 1.88, 3.14, 4.38, 5.62, 6.88, 8.14 และ 9.38 km เนื่องจากส่วนรางวิ่งถูกแบ่งออกเป็น 8 ส่วน (L/8) เท่า ๆ กัน ส่งผลให้การกระจายของศักย์ไฟฟ้าที่ราง และกระแสไฟฟ้ารั่วของรถไฟจึงมีค่าเท่ากันในทุก ๆ ส่วนของรางวิ่ง

2) ศักยภาพการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสรั่ว

จากสมการการประเมินศักยภาพการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและ กระแสไฟฟ้ารั่ว สมการที่ (3.36) และสมการที่ (3.37) สามารถสรุปค่าร้อยละการลดลงของระบบ ติดตั้งตัวนำย้อนกลับและระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบของค่าสูงสุดศักย์ไฟฟ้าที่รางและ กระแสไฟฟ้ารั่ว ได้ดังตารางที่ 4.2

י ע י ע				
	TRA-TPS	RET-TPS	NEG-TPS	
ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด (V)	13.32	2.66	2.33	
กระแสไฟฟ้ารั่ว (A)	6.65	0.67	0.58	
ร้อยละการลดลง (%)				
ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด (V)	Paco	80.03	82.51	
กระแสไฟฟ้ารั่ว (A)	Dase	89.92	91.28	

a	ิย		e 64	1 24 a		שוצו ע
maga and A D	5081000000000000	Neona eda	and	010100000	MICHORNICA	lalalogo
	20121021120910370	เป็น เป็นเป็น	וואוזשוי	ו בוער עערער.	งแตะกวะแส	
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	1000101111001/10140C		111100		100010110000001	01111 10 0

จากการเปรียบเทียบศักยภาพการลดลงระหว่าง RET-TPS กับ TRA-TPS พบว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อตำแหน่งรถไฟอยู่ระหว่าง NEG-TPS กับ TRA-TPS ประสิทธิภาพการลดลงค่าศักย์ไฟฟ้ารางและกระแสรั่วในตำแหน่งไกลจากสถานีจ่าย ไฟฟ้าขับเคลื่อน คิดเป็น 82.51% และ 91.28% ตามลำดับ

4.3 กรณีศึกษาที่ 2 (รถไฟฟ้าขบวนเดียว MRT สายสีม่วงเหนือ) 4.3.1 ผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีศึกษาที่ 2

ระบบรถไฟฟ้ามหานคร สายฉลองรัชธรรม (Metropolitan Rapid Transit Chalong Ratchadham Line หรือ MRT Purple Line) หรือ รถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง ในการ จำลองผลแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 เส้นทางการเดินรถ โดยระบบมีสถานีให้บริการ 16 สถานี และสถานี เรียงกระแส 10 สถานี ซึ่งระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังรถไฟผ่านรางที่สามที่พิกัดแรงดัน 750 V มี กำลังไฟฟ้าขับเคลื่อน 2.5 MW ตารางที่ 4.3 แสดงข้อมูลพารามิเตอร์ของรถไฟฟ้าสายสีม่วง และ ตารางที่ 4.4 แสดงตำแหน่งสถานีระบบรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) โปรแกรมการจำลองการ เคลื่อนที่กรณีศึกษาใช้ MATLAB/M-file โดยใช้แบบจำลองและสมการที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้เสนอ การคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าและการคำนวณการไหลของกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 4.3 เส้นทางการเดินรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

ข้อมูลจำเพาะ ข้อมูล		ค่า	หน่วย
Train parameters			
Movement feature	max.speed	80	km/h
	max. acceleration	1.2	m/s ²
	max. deceleration	0.9	m/s ²
Weight	train mass	135	ton
	passenger mass	75	ton
tractive effort curve	maximum tractive effort	228.8	Ν
	maximum braking effort	168.8	Ν
Efficiency	motor power factor	0.86	-
Auxiliary power	constant load	270	kW
Train resistance			
3 rd Rail Resistance	0.007	Ω/km	
Running Rail Resistance		0.0175	Ω/km
Structure Resistance		0.01	Ω/km
Rail-to-structure conducta	0.1	S.km	
Rail-to-earth conductance	0.1	S.km	
Substation parameter			
Voltage no-load		750	V
Short-circuit capacity		2.5	MW

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลพารามิเตอร์ของรถไฟฟ้าสายสีม่วง

รหัสสถานี	รหัสสถานีเรียงกระแส	สถานี	ตำแหน่ง	ตำแหน่ง
ให้บริการ			South	North
			Bound	Bound
			(km)	(km)
PP01	TSS1	คลองบางไผ่	0.00	41.86
PP02	TSS2	ตลาดบางใหญ่	1.27	40.59
PP03	TSS3	สามแยกบางใหญ่	2.83	39.03
PP04	-	บางพลู	4.40	37.46
PP05	TSS4	บางรักใหญ่	5.60	36.25
PP06	-	บางรักน้อย-ท่าอิฐ	6.85	35.02
PP07	TSS5	ไทรม้า	8.10	33.76
PP08	_	สะพานพระนั่งเกล้า	9.57	32.28
PP09	TSS6	แยกนนทบุรี 1	11.20	30.67
PP10	-	บางกระสอ	12.46	29.43

ศูนย์ราชการจังหวัดนนทบุรี

กระทรวงสาธารณสุข

แยกติวานนท์

วงศ์สว่าง

บางซ่อน

เตาปูน

13.36

15.15

16.35

18.07

19.36

20.92

28.50

26.71

25.51

23.87

22.48

20.92

ตารางที่ 4.4 ตำแหน่งสถานีระบบรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ)

PP11

PP12

PP13

PP14

PP15

PP16

TSS7

-

TSS8

TSS9

TSS10

_



รูปที่ 4.4 แบบจำลองการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าขบวนเดียว MRT สายสีม่วง (ก) ทิศทาง South Bound (ข) ทิศทาง North Bound

การจำลองผลเป็นไปตามผังงานในรูปที่ 4.5 โปรแกรมจะเริ่มต้นด้วยการตั้ง ค่าพารามิเตอร์ของรถไฟ ฯลฯ และตัวแปรที่จำเป็นในกระบวนการ จากนั้นจะไปถึงลูปหลักที่เริ่มต้น ด้วยการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถไฟเพื่อพิจารณาลักษณะการเคลื่อนที่ของรถไฟ เช่น ความเร็ว ตำแหน่ง และพลังงานที่ใช้ มีการตรวจจับตำแหน่งของรถไฟฟ้า จากนั้นพิจารณาแยกการคำนวณ 3 ระบบ สำหรับ RET-TPS และระบบ NEG-TPS จะคำนวณผ่านเงื่อนไขการแบ่งช่วงของรางวิ่ง ถ้ารถไฟ มาถึงสถานีสุดท้ายให้ยุติกระบวนการ ถัดไปจะมีการคำนวณกระแสไฟฟ้าเพื่อค้นหาแรงดันไฟฟ้าของ บัส และกลับไปที่ลูปหลักโดยทำซ้ำจนกว่าเวลาจะถึงเวลาสุดท้ายที่กำหนดไว้



รูปที่ 4.5 แผนผังการจำลองผล

ผลที่ได้คาดว่าจะได้รับผลการจำลองทั่วไปของรถไฟฟ้าขบวนเดียว ไม่ว่าจะเป็น แรงดันไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และตำแหน่งของรถไฟ รายละเอียดดังต่อไปนี้

ผลการจำลองทั่วไป

รถไฟฟ้าใช้กำลังไฟฟ้าในระหว่างโหมดความเร่งและโหมดควบคุมความเร็ว เพื่อ ควบคุมการขับเคลื่อนและใช้พลังงานเสริมภายในตัวรถไฟฟ้าในช่วงหยุดที่สถานีให้บริการ ดังความเร็ว ในการเคลื่อนที่เทียบกับเวลาในรูปที่ 4.6 แสดงภาพเกรเดียนต์ของรถไฟฟ้า MRT สายสีม่วง ดังรูปที่ 4.7 กำลังไฟฟ้ารถไฟฟ้าเทียบกับเวลา ดังรูปที่ 4.8 แสดงกำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน 1-10 ทั้ง สองทิศทางการเดินรถ ดังรูปที่ 4.9 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่สถานีขับเคลื่อน 1-10 ดังรูปที่ 4.10 แรงดันไฟฟ้าตามตำแหน่งของรถไฟฟ้า รูปที่ 4.11 ศักย์ไฟฟ้าที่รางตามตำแหน่งของรถไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.12 และค่ากำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่รางของแบบจำลองกรณีศึกษารถไฟฟ้า MRT สายสีม่วง ผ่านแบบจำลองระบบปกติผ่านการต่อลงดินสองชั้น ดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.6 ความเร็วจำกัดของ MRT สายสีม่วง



รูปที่ 4.7 เกรเดียนต์ของรถไฟฟ้า MRT สายสีม่วง (เหนือ)



รูปที่ 4.8 กำลังไฟฟ้ารถไฟเทียบกับเวลา



Power at TSS (North Bound)

รูปที่ 4.9 กำลังไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน 1-10

ΔЦ

1000 1500 2000 2500 3000 3500

1000 1500 2000 2500 3000 3500

Time (sec)

2.313 MW

500

500

TSS9 (MW)

0' 0

TSS10 (MW)

500

500

1000 1500 2000 2500 3000 3500

1000 1500 2000 2500 3000 3500

◄

Time (sec)

2.455 MW



Voltage at TSS (South Bound)

รูปที่ 4.10 แรงดันไฟฟ้าที่สถานีขับเคลื่อน 1-10



U_{RE} at TSS (South Bound)

รูปที่ 4.11 ศักย์ไฟฟ้าที่รางที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน 1-10



U_{RE} at TSS (North Bound)





รูปที่ 4.12 แรงดันไฟฟ้าตามตำแหน่งของรถไฟ

TSS	P _{S,max} (MW)	V _{C,min} (V)	U _{RE,max} (V)	U _{RE,min} (V)	U _{SE,max} (V)	U _{SE,min} (V)	
	South Bound						
TSS1	2.516	729.301	14.294	-4.108	0.867	-0.602	
TSS2	2.210	731.883	12.027	-4.104	0.871	-0.601	
TSS3	2.448	729.880	13.089	-4.062	0.883	-0.593	
TSS4	2.543	729.072	13.582	-3.381	0.792	-0.567	
TSS5	2.535	729.141	13.162	-3.404	0.724	-0.531	
TSS6	2.552	728.994	13.688	-3.448	0.637	-0.461	
TSS7	2.568	728.858	13.921	-3.487	0.446	-0.398	
TSS8	2.494	729.487	13.626	-3.831	0.395	-0.308	
TSS9	2.314	731.011	12.767	-3.820	0.294	-0.260	
TSS10	2.455	729.813	13.426	-3.774	0.343	-0.212	
		N	orth Bound	·			
TSS1	2.299	731.129	12.383	-3.728	0.346	-0.208	
TSS2	2.279	731.302	12.379	-3.773	0.284	-0.255	
TSS3	2.477	729.628	13.426	-3.791	0.396	-0.309	
TSS4	2.523	729.239	13.538	-3.526	0.453	-0.407	
TSS5	2.512	729.334	13.227	-3.491	0.627	-0.464	
TSS6	2.591	728.665	13.914	-3.446	0.723	-0.535	
TSS7	2.522	729.249	13.306	-3.423	0.803	-0.572	
TSS8	2.409	730.206	12.974	-4.013	0.903	-0.599	
TSS9	2.271	731.372	12.552	-4.060	0.891	-0.606	
TSS10	0.941	742.393	4.761	-4.064	0.886	-0.608	

ตารางที่ 4.5 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน และศักย์ไฟฟ้าที่รางของแบบจำลอง กรณีศึกษารถไฟฟ้า MRT สายสีม่วง ผ่านแบบจำลองระบบปกติผ่านการต่อลงดินสองชั้น



รูปที่ 4.13 แรงดันรางตามตำแหน่งของรถไฟ

จากรูปที่ 4.13 แสดงศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบปกติ จะเห็นได้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้า รางสูงสุดจะอยู่ที่ 70.46 V ที่ตำแหน่งสถานีรับส่งผู้โดยสารที่ 8 (PP08) เป็นตำแหน่งที่อยู่ระหว่าง สถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 5 และ 6 (TSS05-TSS06) เป็นระยะกึ่งกลางในระยะที่ไกลจากสถานีจ่าย กำลังไฟฟ้าขับเคลื่อนมากที่สุดในตำแหน่งอื่น ๆ และค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ยเท่ากับ 37.13 V ดัง ตารางที่ 4.6 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีรับ-ส่งผู้โดยสาร และค่าเฉลี่ยค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางของ ระบบปกติที่เกิดจากค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงที่สุดของสถานีไฟฟ้าย่อยแต่ละสถานีนำมาคำนวณเป็น ค่าเฉลี่ย ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นในการเปรียบเทียบกับทั้ง 2 ระบบ และพบว่าจะมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นที่จุด สถานีรับส่งผู้โดยสารในช่วงเร่งความเร็วและจะลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางตามการเคลื่อนที่ของ รถไฟฟ้าไปในทิศทางเดียวกัน สำหรับค่ากระแสไฟฟ้ารั่วเกิดจากผลรวมของกระแสไฟฟ้าไหลเข้าออกที่ โนดรางวิ่งที่ถูกกล่าวไปในบทที่ 3

South	bound	North	bound
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด
	(V)		(∨)
PP01	21.20	PP15	24.10
PP02	23.42	PP14	24.01
PP03	28.97	PP13	16.58
PP04	59.97	PP12	63.56
PP05	27.28	PP11	23.06
PP06	53.16	PP10	44.70
PP07	31.46	PP09	26.72
PP08	70.46	PP08	42.34
PP09	25.92	PP07	70.05
PP10	48.35	PP06	25.81
PP11	20.84	PP05	53.18
PP12	63.90	PP04	29.25
PP13	22.54	PP03	61.29
PP14	23.42	PP02	30.46
PP15	27.57	PP01	1.68
PP16	65.88	สูงสุด	70.46
		เฉลี่ย	37.13
	กร	ระแสไฟฟ้ารั่ว (mA/m)	0.00757

ตารางที่ 4.6 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีรับ-ส่งผู้โดยสาร ระบบปกติ

ศักย์ไฟฟ้าที่รางของแบบจำลองกรณีศึกษารถไฟฟ้าสายสีม่วงพบว่ามีค่า

ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดจากการคำนวณมีค่าเป็น 13.426 V ที่ TSS10 และ 70.46 V ที่ตำแหน่งรถไฟ ซึ่งอาจจะเกิดจากกระแสไฟฟ้าปริมาณมากที่จ่ายให้กับรถไฟในขณะนั้นเนื่องจากมีการเร่งความเร็ว และระยะห่างของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน ตามมาตรฐานยุโรปสำหรับศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดที่เกิดขึ้นจะ น้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าที่สามารถเข้าถึงได้ไม่เกิน 120 Vdc 2) การประเมินศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสรั่ว

การประเมินกระแสไฟฟ้ารั่วสำหรับโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) จะคำนวณแรงดันระหว่างรางวิ่งไปยังดินและกระแสที่ไหลผ่านไปยังดินตามมาตรฐาน EN 50122-2 เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าขับเคลื่อนสูงสุดเป็น

$$I_{tr} = \frac{P_{S,\max}}{V_{line,\min} - V_{rail,\max}} = \frac{2.455 \times 10^6}{729.813 - 13.426} = 3426.919 \,\text{A}$$

ความยาวของระยะทางที่ใช้ในการพิจารณา L= 1.58 km (ซึ่งเป็นระยะที่ยาว ที่สุดสำหรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าด้านเดียวของโครงการรถไฟฟ้ามหานคร สายสีม่วง (เหนือ) นั่นคือ สถานีบางซ่อน-เตาปูน หรือที่ TSS10) โดยกำหนดให้ค่าความต้านทานของรางวิ่งต่อหน่วยความยาว *R_R* = 0.0175 Ω/km/rail แต่การใช้งานจริงทางรถไฟมี 2 ราง

ดังนั้นค่าความต้านทานของรางวิ่งต่อหน่วยความยาวมีค่าเป็น R_{R2rail} = 0. 013825 Ω/km ที่ระยะทาง L= 1.58 km ค่าความนำต่อหน่วยความยาวมีค่าเป็น G_{RE} = 2 mS/km

$$L_c = \frac{1}{\sqrt{G_{RE} \times R_R}} = \frac{1}{\sqrt{0.002 \times 0.013825}} = 190.174$$

$$R_c = \sqrt{\frac{R_R}{G_{RE}}} = \sqrt{\frac{0.013825}{0.002}} = 2.629$$

ดังนั้น

$$U_{RE} = 0.5 \times I_{tr} \times R_c \times \left(1 - e^{-\left(\frac{L}{L_c}\right)}\right)$$

= 0.5 \times 3426.919 \times 2.629 \times \left(1 - e^{-\left(\frac{1.58}{190.174}\right)}\right) = 37.273V

และ

$$I_{s} = 0.5 \times \frac{I}{L_{c}} \times \left(1 - e^{-\left(\frac{L}{L_{c}}\right)}\right)$$
$$= 0.5 \times \frac{3426.919}{190.174} \times \left(1 - e^{-\left(\frac{1.58}{190.174}\right)}\right) = 0.07455 \text{ mA/m}$$

ดังนั้นจะได้ศักย์ไฟฟ้าที่รางในอัตรา 37.273 V และกระแสรั่วจากทางวิ่งในอัตรา 0.07455 mA/m สำหรับพิกัด 3426.919 A ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบผลการประเมินกระแสรั่วไหลระหว่างการจำลองผลการเคลื่อนที่รถไฟขบวน เดียวกับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางที่ได้จากแบบจำลองการต่อลงดินตามมาตรฐาน EN 50122-2

วิธีการ	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง (V)
การจำลองผลการเคลื่อนที่รถไฟขบวนเดียว	70.46
การคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางตามมาตรฐาน EN 50122-2	37.273

จากตารางพบว่าศักย์ไฟฟ้าที่รางมีค่าแตกต่าง เนื่องจากผลการจำลองการเคลื่อนที่ รถไฟขบวนเดียวมีกระแสรั่วที่สะสมอยู่ในดินที่ไหลย้อนกลับเข้าสู่สถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน แต่ค่าทั้งสอง กรณีผ่านมาตรฐานตามมาตรฐาน EN 50122-2 ที่กำหนด นั่นคือ แรงดันที่ยอมให้เข้าถึงได้มีค่าไม่เกิน 120 V และแนะนำว่าจะไม่เกิดความเสียหายในทางรถไฟในช่วง 25 ปี ถ้ากระแสรั่วไหลต่อหน่วย ความยาวไม่เกินค่า 2.5 mA/m

4.3.2 ผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีศึกษาที่ 2 (ระบบ RET-TPS)

แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟ MRT สายสีม่วงขบวนเดียวในระบบติดตั้งตัวนำ ย้อนกลับในตำแหน่งต่าง ๆ ที่แตกต่างกันไป โดยเลือกใช้สายเคเบิล 0.6/1kV CV 90°C XLPE INSULATED และ PVC SHEATHED ตามมาตรฐาน IEC 60502-1 (TIS 2143-2546) ดังรูปที่ 4.14 และค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 4.8 แบ่งการติดตั้งเป็น 5 ระยะ ได้แก่ ติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 3 จุดเชื่อมต่อ, 4 จุดเชื่อมต่อ, 5 จุดเชื่อมต่อ, 8 จุดเชื่อมต่อ และ 21 จุดเชื่อมต่อ โดยตำแหน่งจุด เชื่อมต่อทิศทาง North Bound เป็นระยะทางที่พิจารณาต่อเนื่องจากทิศทางของ South Bound



รูปที่ 4.14 เคเบิล XLPE Single core แรงดัน 0.6/1kV

a.	-	9 6	9
ตารางท 4	.8	พารามเตอรของสา	ยเคเบล

ข้อมูล	ค่า	หน่วย
າະບາ	DC	-
ขนาด	400	mm ²
เส้นผ่านศูนย์กลาง	71	mm ²
การนำกระแส	856	А
ความต้านทาน (R _{DC})	0.0047	Ω/km
ความต้านทาน ขนาน 2 เส้น	0.0235	Ω/km
ความต้านทาน ขนาน 3 เส้น	0.0156	Ω/km

 ติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 3 จุดเชื่อมต่อหรือทุก ๆ ประมาณ 10 กิโลเมตร ได้แก่ที่ระยะ 0, 10.47, 20.92, 30.92, และ 41.86 กิโลเมตร ตามลำดับ แบบจำลองการติดตั้งจุด เชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 3 จุดเชื่อมต่อแสดง ดังรูปที่ 4.15 ผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางตาม ตำแหน่งรถไฟฟ้า ดังรูป 4.16 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีรับ-ส่งผู้โดยสาร ของระบบติดตั้งตัวนำ ย้อนกลับ 3 จุดเชื่อมต่อ ดังตารางที่ 4.9 และกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับ การคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว ดังตารางที่ ข.1 ในภาคผนวก ข1.1



รูปที่ 4.15 แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 3 จุดเชื่อมต่อ (ก) ทิศทาง South Bound (ข) ทิศทาง North Bound



South	bound	North	bound
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด
	(V)		(V)
PP01	19.88	PP15	21.29
PP02	20.33	PP14	20.95
PP03	28.95	PP13	20.51
PP04	62.07	PP12	66.78
PP05	28.34	PP11	26.24
PP06	56.43	PP10	48.5
PP07	27.82	PP09	18.72
PP08	63.16	PP08	67.74
PP09	25.63	PP07	27.66
PP10	47.67	PP06	57.09
PP11	23.33	PP05	28.68
PP12	65.02	PP04	62.86
PP13	23.88	PP03	21.14
PP14	23.28	PP02	19.71
PP15	25.98	PP01	1.04
PP16	52.52	สูงสุด	67.74
		เฉลี่ย	35.58
	กร	ระแสไฟฟ้ารั่ว (mA/m)	0.00748

ตารางที่ 4.9 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 3 จุดเชื่อมต่อ

2) ติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 4 จุดเชื่อมต่อหรือทุก ๆ ประมาณ 7 กิโลเมตร ได้แก่ที่ระยะ 0, 7, 14, 20.92, 27.92, 34.92 และ 41.86 กิโลเมตร ตามลำดับ แบบจำลองการติดตั้ง จุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 4 จุดเชื่อมต่อแสดง ดังรูปที่ ข.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีรับ-ส่ง ผู้โดยสาร สำหรับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย ดังตารางที่ ข.3 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และ ศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว ดังตารางที่ ข.2 ในภาคผนวก ข1.2 ตามลำดับ ผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง ดังรูปที่ 4.17 ในภาคผนวก ข1.2 ตามลำดับ และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อ 4 จุดเชื่อมต่อ ดังตารางที่ 4.10



รูปที่ 4.17 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 4 จุดเชื่อมต่อ

ตารางที่ 4.10 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อ 4 จุด เชื่อมต่อ

4 จุดเจ	หน่วย	
ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด	70.93	V
ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย	35.55	V
กระแสไฟฟ้ารั่ว	0.00745	mA/m

3) ติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อหรือทุก ๆ ประมาณ 5 กิโลเมตร ได้แก่ที่ระยะ 0, 5, 10, 15, 20.92, 25.92, 30.92, 35.92 และ 41.86 กิโลเมตร ตามลำดับ แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อแสดง ดังรูปที่ ข.2 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว ดังตารางที่ ข.4 ค่าศักย์ไฟฟ้า ที่รางสูงสุดสถานีรับ-ส่งผู้โดยสาร สำหรับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย ดังตารางที่ ข.5 ใน ภาคผนวก ข1.3 ตามลำดับ ผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง ดังรูปที่ 4.18 และศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อ 5 จุดเชื่อมต่อ ดังตารางที่ 4.11



รูปที่ 4.18 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ

ตารางที่ 4.11	ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด	ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี	ีย และกระแสไฟฟ้	ไารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ
	ย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต	่อ		

South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด	Passenger	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด
	(∨)	Station	(V)
PP01	19.83	PP15	21.34
PP02	20.34	PP14	20.81
PP03	22.09	PP13	16.03
PP04	51.92	PP12	60.98
PP05	27.20	PP11	26.19
PP06	56.16	PP10	48.45
PP07	26.73	PP09	17.33
PP08	53.43	PP08	67.47
PP09	25.89	PP07	26.77
PP10	47.94	PP06	52.09
PP11	21.60	PP05	27.19
PP12	46.47	PP04	61.53
PP13	23.33	PP03	30.00

South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด	Passenger	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด
	(∨)	Station	(∨)
PP14	23.37	PP02	19.68
PP15	25.48	PP01	1.01
PP16	47.21	สูงสุด	67.47
เฉลี่ย			33.41
กระแสไฟฟ้ารั่ว (mA/m)			0.00744

ตารางที่ 4.11 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ ย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ (ต่อ)

4) ติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 8 จุดเชื่อมต่อหรือทุก ๆ ประมาณ 3 กิโลเมตร ได้แก่ที่ระยะ 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 20.92, 23.92, 26.92, 29.92, 32.92, 33.92, 35.92, 38.92 และ 41.86 กิโลเมตร ตามลำดับ แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 8 จุดเชื่อมต่อแสดง ดังรูปที่ ข.3 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหล ดังตารางที่ ข.6 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีรับ-ส่งผู้โดยสาร สำหรับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่ราง เฉลี่ย ดังตารางที่ ข.7 ในภาคผนวก ข1.4 ตามลำดับ ผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางดังรูปที่ 4.19 และศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วไหลของจุดเชื่อมต่อ 8 จุด เชื่อมต่อ ดังตารางที่ 4.12



8 จุดเชื่อมต่อ		หน่วย
ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด	60.35	V
ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย	31.19	V
กระแสไฟฟ้ารั่วไหล	0.00741	mA/m

ตารางที่ 4.12 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ ย้อนกลับ 8 จุดเชื่อมต่อ

5) ติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 21 จุดเชื่อมต่อ ที่ระยะทุก ๆ 1 กิโลเมตร แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 21 จุดเชื่อมต่อแสดงได้ดังรูปที่ ข.4 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว ดังตารางที่ ข.8 ค่าศักย์ไฟฟ้า ที่รางสูงสุดสถานีรับ-ส่งผู้โดยสาร สำหรับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย ดังตารางที่ ข.9 ใน ภาคผนวก ข1.5 ตามลำดับ ผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง ดังรูปที่ 4.20 และศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อ 21 จุดเชื่อมต่อ ดังตารางที่ 4.13



21 จุดเชื	หน่วย	
ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด	45.55	V
ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย	26.03	V
กระแสไฟฟ้ารั่ว	0.00711	mA/m

ตารางที่ 4.13 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วไหลของจุดเชื่อมต่อ ตัวนำย้อนกลับ 21 จุดเชื่อมต่อ

จากตารางที่ 4.9 - ตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.18 – รูปที่ 4.20 แสดงค่า

ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อในตำแหน่งต่าง ๆ พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดทุกกรณีการศึกษา ยกเว้นการเชื่อมต่อ 8 จุดเชื่อมต่อหรือการติดตั้งทุก ๆ 3 กิโลเมตร ค่าสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่งสถานีรับ-ส่งผู้โดยสารที่ 8 (PP08) เป็นตำแหน่งที่อยู่ระหว่างสถานี จ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 และ 5 (TSS06-TSS05) ในทิศทาง North Bound เนื่องจากเป็นสถานีย่อยที่

มีระยะห่างจากสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนมากที่สุด เมื่อเทียบกับระยะห่างของสถานีย่อยอื่น ๆ การติดตั้ง 8 จุดเชื่อมต่อหรือการติดตั้งทุก ๆ 3 กิโลเมตร ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง สูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่งสถานีย่อยที่ 4 (PP04) เป็นตำแหน่งที่อยู่ระหว่างสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 4

สูงสุดจะอยู่ทดาแหน่งสถานอออท 4 (PP04) เป็นตาแหน่งทอยู่ระหว่างสถานจายเพพาชบเศลอนท 4 และ 3 (TSS04-TSS03) ในทิศทาง North Bound สำหรับสถานีย่อยนี้ไม่ได้เป็นตำแหน่งที่มีระยะห่าง จากสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน แต่สถานีย่อยอยู่ใกล้เคียงกับจุดเชื่อมต่อ นั่นคือจุดเชื่อมต่อที่ 2 กับจุด

เชื่อมต่อ 3 จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งนี้ แตกต่างจากกรณีจุดเชื่อมต่ออื่น ๆ ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว จะมีแนวโน้ม คือ เมื่อเพิ่มจุดเชื่อม ต่อมากขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว จะมีค่าลดลง ตามลำดับ ร้อยละการลดลง เมื่อเทียบกับระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าปกติ จะมีค่าลดลงตามตารางที่ 4.25 ศักยภาพการลดลงของ ระบบการติดตั้ง

6) กรณีใช้สายเคเบิลที่มีความต้านทานเท่ากับค่าความต้านทานของรางวิ่ง (*R_{RT}* = 0.0175 Ω/km) และกรณีใช้สายเคเบิลที่มีความต้านทานมากกว่าค่าความต้านทานของรางวิ่ง (*R_{RT}* = 0.047 Ω/km) ใช้กรณีศึกษาเดียวกันกับระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อหรือทุก ๆ 5 กิโลเมตร เพื่อศึกษาแนวโน้มของค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วไหล ดังรูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 แสดงศักย์ไฟฟ้าที่ราง ตามลำดับ ตารางที่ ข.10 และตารางที่ ข.11 ในภาคผนวก ข.1.6 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการคำนวณกระแสไฟฟ้ารั่วทั้ง 2 กรณีการ เปลี่ยนค่าความต้านทานรางตัวนำย้อนกลับ



South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด
	(V)		(∨)
PP01	19.96	PP15	21.38
PP02	20.36	PP14	20.83
PP03	27.48	PP13	16.35
PP04	52.63	PP12	61.30
PP05	27.29	PP11	26.23
PP06	56.25	PP10	48.54
PP07	26.93	PP09	35.43
PP08	54.60	PP08	67.73
PP09	25.95	PP07	26.86
PP10	48.00	PP06	52.47
PP11	21.74	PP05	27.30
PP12	47.73	PP04	61.62
PP13	23.36	PP03	30.01
PP14	23.39	PP02	19.79
PP15	25.75	PP01	1.04
PP16	48.57	สูงสุด	67.73
		เฉลี่ย	34.45
กระแสไฟฟ้ารั่ว (mA/m) 0.00745			0.00745

ตารางที่ 4.14 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ ย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ (*R_{RT}* = 0.0175 Ω/km)

South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด
	(V)		(∨)
PP01	20.81	PP15	21.58
PP02	20.51	PP14	21.02
PP03	28.28	PP13	18.59
PP04	57.64	PP12	63.91
PP05	22.89	PP11	26.47
PP06	56.83	PP10	49.16
PP07	28.38	PP09	38.20
PP08	63.15	PP08	69.47
PP09	26.34	PP07	27.45
PP10	48.45	PP06	55.05
PP11	22.73	PP05	28.06
PP12	56.91	PP04	62.31
PP13	23.66	PP03	30.11
PP14	23.53	PP02	20.40
PP15	27.71	PP01	1.12
PP16	60.18	สูงสุด	69.47
		เฉลี่ย	36.15
	กร	ะแสไฟฟ้ารั่ว (mA/m)	0.00745

ตารางที่ 4.15 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ ย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ (*R_{RT}* = 0.047 Ω/km)

จากรูปที่ 4.21 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางของกรณีใช้สายเคเบิลเท่ากับความต้านทาน

ของรางวิ่ง จะเห็นได้ว่าค่าในตารางที่ 4.14 เมื่อเทียบกับค่าในตารางที่ 4.11 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 5 จุดเชื่อมต่อ ในตำแหน่ง จุดเชื่อมต่อเดียวกัน แต่ใช้ค่าความต้านทานตัวนำย้อนกลับต่างกัน ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด มีค่า เพิ่มขึ้นจาก 67.47 V เป็น 67.73 V และค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 33.41 V เป็น 34.45 V และจากรูปที่ 4.24 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางของกรณีใช้สายเคเบิลมากกว่าความต้านทานของรางวิ่ง จะเห็น ได้ว่าค่าในตารางที่ 4.14 เมื่อเทียบกับค่าในตารางที่ 4.11 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 67.47 V เป็น 69.47 V และค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 33.41 V เป็น 36.15 V ค่าศักย์ไฟฟ้า ที่รางสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกัน นั่นคือที่ตำแหน่งสถานีรับส่งผู้โดยสารที่ 8 (PP08) เป็นตำแหน่ง ที่อยู่ระหว่างสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 และ 5 (TSS06-TSS05) ในทิศทาง North Bound

ดังนั้นค่าความต้านทานของสายเคเบิลที่นำมาขนานกับรางวิ่งมีผลกับศักย์ไฟฟ้าที่ราง เนื่องจากพฤติกรรมการไหลกลับของกระแสไฟฟ้าที่รางมักจะเลือกเส้นทางที่ค่าความต้านทานน้อย กว่า ถ้าเลือกใช้ค่าความต้านทานเท่ากับหรือมากกว่าค่าความต้านทานของรางวิ่ง ศักย์ไฟฟ้าที่รางที่ได้ จะเพิ่มขึ้น ไม่ตรงกับวัตถุประสงค์ของงานวิทยานิพนธ์นี้ในการลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางนั่นเอง

4.3.3 ผลการจำลองการเคลื่อนที่กรณีศึกษาที่ 2 (ระบบ NEG-TPS)

แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟ MRT สายสีม่วงขบวนเดียวในระบบติดตั้งตัว แปลงความต้านทานเชิงลบในตำแหน่งต่าง ๆ ที่แตกต่างกันไป แบ่งการติดตั้งเป็น 5 ระยะ ได้แก่ ติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 3 จุดเชื่อมต่อ, 4 จุดเชื่อมต่อ, 5 จุดเชื่อมต่อ, 8 จุดเชื่อมต่อ, และ 21 จุดเชื่อมต่อ

 ติดตั้งระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 3 จุดเชื่อมต่อหรือทุก ๆ ประมาณ 10 กิโลเมตร ได้แก่ที่ระยะ 0, 10.47, 20.92, 30.92, และ 41.86 กิโลเมตร ตามลำดับ แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 3 จุดเชื่อมต่อแสดง ดังรูปที่ 4.23 ผลการจำลอง ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง ดังรูปที่ 4.24 และค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีย่อยของระบบติดตั้งตัวนำ ย้อนกลับ 3 จุดเชื่อมต่อ ดังตารางที่ 4.16 และกำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับ การคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว ดังตารางที่ ค.1 ในภาคผนวก ค1.1





รูปที่ 4.23 แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 3 จุดเชื่อมต่อ (ก) ทิศทาง South Bound (ข) ทิศทาง North Bound



ตารางที่ 4.16 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวแปลงเชิงลบ 3 จุดเชื่อมต่อ

South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด
	(∨)		(∨)
PP01	16.13	PP15	20.88
PP02	19.50	PP14	20.98
PP03	28.91	PP13	20.48
PP04	62.05	PP12	66.74

South bound		North bound	
Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด	Passenger Station	ศักย์ไฟฟ้ารางสูงสุด
	(V)		(V)
PP05	28.30	PP11	26.29
PP06	56.84	PP10	48.69
PP07	25.92	PP09	30.72
PP08	51.67	PP08	52.89
PP09	25.64	PP07	27.04
PP10	47.95	PP06	56.77
PP11	23.47	PP05	28.67
PP12	65.45	PP04	62.82
PP13	23.83	PP03	29.57
PP14	23.04	PP02	16.71
PP15	24.06	PP01	0.29
PP16	47.28	สูงสุด	66.74
เฉลี่ย			35.56
	กระแสไฟฟ้ารั่ว (mA/m)		

ตารางที่ 4.16 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบติดตั้งตัวแปลงเชิงลบ 3 จุดเชื่อมต่อ (ต่อ)

2) ติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 4 จุดเชื่อมต่อหรือทุก ๆ ประมาณ 7 กิโลเมตร ได้แก่ที่ระยะ 0, 7, 14, 20.92, 27.92, 34.92 และ 41.86 กิโลเมตร ตามลำดับ แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 4 จุดเชื่อมต่อ ดังรูปที่ ค.1 และผล การจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง ดังรูปที่ 4.25 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการ คำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว ดังตารางที่ ค.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีรับ-ส่งผู้โดยสาร สำหรับการ คำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย ดังตารางที่ ค.3 ในภาคผนวก ค1.2 ตามลำดับ และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อ 4 จุดเชื่อมต่อ ดังตารางที่ 4.17



ตารางที่ 4.17 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัว แปลงความต้านทานเชิงลบ 4 จุดเชื่อมต่อ

4 จุดเชื่อมต่อ		หน่วย
ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด	70.38	V
ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย	32.93	V
กระแสไฟฟ้ารั่วไหล	0.00746	mA/m

3) ติดตั้งจุดเชื่อมต่อระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 5 จุดเชื่อมต่อหรือทุก ๆ ประมาณ 5 กิโลเมตร ได้แก่ที่ระยะ 0, 5, 10, 15, 20.92, 25.92, 30.92, 35.92 และ 41.86 กิโลเมตร ตามลำดับ แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 5 จุดเชื่อมต่อ ดังรูปที่ ค.2 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว ดังตารางที่ ค.4 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีย่อย สำหรับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย ดังตารางที่ ค.5 ใน ภาคผนวก ค1.3 ตามลำดับ ผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางได้ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 5 จุดเชื่อมต่อ

ตารางที่ 4.18 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัว แปลงความต้านทานเชิงลบ 5 จุดเชื่อมต่อ

5 จุดเชื่อ	หน่วย	
ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด	66.72	V
ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย	32.29	V
กระแสไฟฟ้ารั่ว	0.00746	mA/m

4) ติดตั้งจุดเชื่อมต่อระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 8 จุดเชื่อมต่อหรือทุก ๆ ประมาณ 3 กิโลเมตร ได้แก่ที่ระยะ 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 20.92, 23.92, 26.92, 29.92, 32.92, 33.92, 35.92, 38.92 และ 41.86 กิโลเมตร ตามลำดับ แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวแปลง ความต้านทานเชิงลบ 8 จุดเชื่อมต่อ ดังรูปที่ ค.3 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว แสดงดังตารางที่ ค.6 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีย่อย สำหรับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย ดังตารางที่ ค.7 แสดงในภาคผนวก ค1.4 ตามลำดับ และผล การจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางตามตำแหน่งรถไฟ ดังรูปที่ 4.27



ตารางที่ 4.19 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัว แปลงความต้านทานเชิงลบ 8 จุดเชื่อมต่อ

8 จุดเชื่อมต่อ		หน่วย
ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด	57.54	V
ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย	30.20	V
กระแสไฟฟ้ารั่ว	0.00746	mA/m

5) ติดตั้งระบบตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 21 จุดเชื่อมต่อ ที่ระยะทุก ๆ 1 กิโลเมตร แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ 21 จุดเชื่อมต่อ ดังรูปที่ ค.4 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว ดังตารางที่ ค.8 ค่าศักย์ไฟฟ้า ที่รางสูงสุดสถานีย่อย สำหรับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย ดังตารางที่ ค.9 ในภาคผนวก ค1.5 ตามลำดับ และผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง ดังรูปที่ 4.28 ตามลำดับ



รูปที่ 4.28 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ 21 จุดเชื่อมต่อ

ตารางที่ 4.20 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัว แปลงความต้านทานเชิงลบ 21 จุดเชื่อมต่อ

21 จุดเชื	หน่วย		
ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด	39.65	V	
ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย	22.89	V	
กระแสไฟฟ้ารั่ว	0.0733	mA/m	

จากตารางที่ 4.16 - ตารางที่ 4.20 และรูปที่ 4.24 – รูปที่ 4.28 ที่กล่าวมา

ข้างต้น แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อใน ตำแหน่งต่าง ๆ พบว่าการติดตั้ง 3, 4 และ 21 จุดเชื่อมต่อ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่ง สถานีไฟฟ้าย่อยที่ 12 (PP12) เป็นตำแหน่งที่อยู่ระหว่างสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 8 และ 7 (TSS08-TSS07) ในทิศทาง North Bound สำหรับสถานีย่อยนี้ไม่ได้เป็นตำแหน่งที่มีระยะห่างจาก สถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนมากที่สุด แต่สถานีย่อยมีระยะห่างกับจุดเชื่อมต่อมากกว่า จึงทำให้ค่า ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งนี้

การติดตั้ง 4 จุดเชื่อมต่อหรือการติดตั้งทุก ๆ 7 กิโลเมตร ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง สูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่งสถานีย่อยที่ 8 (PP08) เป็นตำแหน่งที่อยู่ระหว่างสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 และ 5 (TSS06-TSS05) ในทิศทาง South Bound เนื่องจากเป็นสถานีย่อยที่มีระยะห่างจากสถานี จ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนมากที่สุด ทิศทางการเดินรถต่างกับของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ เนื่องจากค่า สภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น แรงเกรเดียนต์ของสองทิศทางที่ตรงข้ามกัน

การติดตั้ง 8 จุดเชื่อมต่อหรือการติดตั้งทุก ๆ 3 กิโลเมตร ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง สูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่งสถานีย่อยที่ 4 (PP04) เป็นตำแหน่งที่อยู่ระหว่างสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 4 และ 3 (TSS04-TSS03) ในทิศทาง North Bound เช่นเดียวกันกับระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับ นั่นคือ สถานีย่อยอยู่ใกล้เคียงกับจุดเชื่อมต่อ นั่นคือจุดเชื่อมต่อที่ 2 กับจุดเชื่อมต่อ 3 จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ รางสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งนี้ แตกต่างจากกรณีจุดเชื่อมต่ออื่น ๆ

ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว จะมีแนวโน้ม คือ เมื่อเพิ่มจุดเชื่อม ต่อมากขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว จะมีค่าลดลง ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์การ ลดลงระบบการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบเมื่อเทียบกับระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าปกติ จะมีค่า ลดลงตามตารางที่ 4.25 แสดงศักยภาพการลดลงของระบบการติดตั้ง

4.3.4 แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อที่สถานีไฟฟ้าย่อย

 ติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับและตัวแปลงความต้านทานเชิงลบที่สถานีไฟฟ้า ย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ ได้แก่ ที่ตำแหน่ง PP04, PP08, PP12 และ PP16 ตามลำดับ แบบจำลองการ ติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ ดังรูปที่ 4.29 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับ การคำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว ดังตารางที่ ข.12 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อย สำหรับการ คำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย ดังตารางที่ ข.13 ในภาคผนวก ข2.1 ตามลำดับ แบบจำลองการติดตั้ง จุดเชื่อมต่อตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ ดังรูปที่ 4.30 ผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางของการ ติดตั้งตัวนำย้อนกลับ ดังรูปที่ 4.31 และผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางของการติดตั้งตัวแปลงความ ต้านทานเชิงลบ ดังรูปที่ 4.32

กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการคำนวณค่า กระแสไฟฟ้ารั่ว ดังตารางที่ ข.12 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อย สำหรับการคำนวณ ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย ดังตารางที่ ข.13 ในภาคผนวก ข2.1 ตามลำดับ ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้า ที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ ดังตารางที่ 4.21 และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ ดัง ตารางที่ 4.22







รูปที่ 4.30 แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุด เชื่อมต่อ





รูปที่ 4.31 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของการติดตั้งตัวนำย้อนกลับตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ



- รูปที่ 4.32 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุด เชื่อมต่อ
- ตารางที่ 4.21 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ ย้อนกลับตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ

4 จุดเชื่อ	หน่วย			
ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด	ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด 56.33			
ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย	31.99	V		
กระแสไฟฟ้ารั่ว	0.0746	mA/m		

ตารางที่ 4.22 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัว แปลงความต้านทานเชิงลบตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ

4 จุดเชื่อ	หน่วย		
ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด	55.02	V	
ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย	30.84	V	
กระแสไฟฟ้ารั่ว	0.0746	mA/m	

จากตารางที่ 4.21, ตารางที่ 4.22, รูปที่ 4.31 และรูปที่ 4.32 ที่กล่าวมาข้างต้น

แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อในตำแหน่ง สถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 6 (PP06) เป็นตำแหน่งที่อยู่ระหว่างสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 4 และ 5 (TSS04-TSS05) ในทิศทาง North Bound สำหรับสถานีย่อยนี้เป็นตำแหน่งที่มีระยะห่างจากสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนมากที่สุด จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งนี้

2) ติดตั้งจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับที่สถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ ได้แก่ ที่ ตำแหน่ง PP04, PP06, PP08, PP10, PP12 และ PP16 ตามลำดับ แบบจำลองการติดตั้งจุดเชื่อมต่อ ตัวนำย้อนกลับ แสดงได้ดังรูปที่ 4.33 กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการ คำนวณค่ากระแสไฟฟ้ารั่วไหล แสดงดังตารางที่ ข.14 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อย สำหรับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย แสดงดังตารางที่ ข.15 แสดงในภาคผนวก ข2.2 ตามลำดับ แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ ดังรูปที่ 4.34 ผลการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง ของการติดตั้งตัวนำย้อนกลับ ดังรูปที่ 4.35 และผลการจำลองศักย์ไฟฟ้าที่รางของการติดตั้งตัวแปลง ความต้านทานเชิงลบ ดังรูปที่ 4.36

กำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สำหรับการคำนวณค่า กระแสไฟฟ้ารั่ว ดังตารางที่ ข.14 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดสถานีไฟฟ้าย่อย สำหรับการคำนวณ ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย ดังตารางที่ ข.15 ในภาคผนวก ข2.2 ตามลำดับ ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้า ที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำย้อนกลับ ดังตารางที่ 4.23 และศักย์ไฟฟ้าที่ราง สูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ ดัง ตารางที่ 4.24





รูปที่ 4.34 แบบจำลองการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ (ก) ทิศทาง South Bound (ข) ทิศทาง North Bound



รูปที่ 4.35 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของการติดตั้งตัวนำย้อนกลับต่ำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ

รูปที่ 4.36 ศักย์ไฟฟ้าที่รางของการติดตั้งตัวแปลงความต้ำนทานเชิงลบตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุด เชื่อมต่อ

6 จุดเชื่อ	หน่วย		
ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด	48.04	V	
ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย	28.55	V	
กระแสไฟฟ้ารั่ว	0.0746	mA/m	

ตารางที่ 4.23 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัวนำ ย้อนกลับตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ

ตารางที่ 4.24 ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของจุดเชื่อมต่อตัว แปลงความต้านทานเชิงลบตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ

6 จุดเชื่อ	หน่วย	
ศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด	47.64	V
ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย	27.85	V
กระแสไฟฟ้ารั่ว	0.0746	mA/m

จากตารางที่ 4.23 และรูปที่ 4.35 ที่กล่าวมาข้างต้น แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง

สูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของการติดตั้งตัวนำย้อนกลับจุดเชื่อมต่อในตำแหน่ง สถานีไฟฟ้าย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อยที่ 16 (PP16) เป็นตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อยสุดท้ายสำหรับเส้นทาง ไม่มีสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อน สำหรับ สถานีย่อยนี้เป็นตำแหน่งที่มีระยะห่างจากสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 10 (TSS10) หรือเป็นการจ่าย ไฟฟ้าขับเคลื่อนด้านเดียว จึงทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งนี้

จากตารางที่ 4.24 และรูปที่ 4.36 ที่กล่าวมาข้างต้น แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ราง สูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และกระแสไฟฟ้ารั่วของการติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบจุด เชื่อมต่อในตำแหน่งสถานีไฟฟ้าย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่ง สถานีไฟฟ้าย่อยที่ 8 (PP08) เป็นตำแหน่งที่อยู่ระหว่างสถานีจ่ายไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ 6 และ 5 (TSS06-TSS05) ในทิศทาง South Bound สำหรับสถานีย่อยนี้เป็นตำแหน่งนี้

4.4 ผลการประเมินการลดลงของระบบการติดตั้งเพิ่มจุดเชื่อมต่อกับรางวิ่ง

จากกรณีศึกษาทั้งหมดของระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับและระบบติดตั้งตัวแปลงความ ต้านทานเชิงลบ ทั้งหมด 5 ระยะการเชื่อมต่อ และการติดตั้งจุดเชื่อมต่อที่สถานีไฟฟ้าย่อย สามารถ สรุปผลการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางสูงสุด ศักย์ไฟฟ้าที่รางเฉลี่ย และค่ากระแสไฟฟ้ารั่ว ดังตาราง ที่ 4.25

			ศักย์ไฟฟ้าที่ราง (V)		ศักยภาพการลดลง (%)		
	จุดเชอมตอ	สูงสุด เฉลี่ย	PMM.12.1	ศักย์ไฟฟ้า	ศักย์ไฟฟ้า	กระแส	
			เนสย	(mA)	ที่รางสูงสุด	ที่รางเฉลี่ย	ไฟฟ้ารั่ว
Т	RA-TPS	70.46	37.13	0.00757	Base	Base	Base
RET- TPS	3 จุดเชื่อมต่อ	67.74	35.58	0.00748	3.86	4.17	1.19
	4 จุดเชื่อมต่อ	70.93	35.55	0.00745	0.67	4.26	1.58
	5 จุดเชื่อมต่อ	67.47	33.41	0.00744	4.24	10.02	1.72
	8 จุดเชื่อมต่อ	60.35	31.19	0.00741	14.35	16.00	2.11
	21 จุดเชื่อมต่อ	45.55	26.03	0.00711	35.35	29.89	6.08
	สถานีย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ	56.33	31.99	0.00746	20.05	13.84	1.45
	สถานีย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ	48.04	28.55	0.00746	31.82	23.11	1.45
NEG- TPS	3 จุดเชื่อมต่อ	66.74	35.56	0.00747	3.86	4.23	1.32
	4 จุดเชื่อมต่อ	70.38	32.93	0.00746	0.11	11.31	1.45
	5 จุดเชื่อมต่อ	66.72	32.29	0.00746	5.31	13.04	1.45
	8 จุดเชื่อมต่อ	57.54	30.20	0.00746	18.34	18.66	1.45
	21 จุดเชื่อมต่อ	39.65	22.89	0.00733	43.73	38.35	3.17
	สถานีย่อย 4 จุดเชื่อมต่อ	55.02	30.84	0.00746	21.91	16.94	1.45
	สถานีย่อย 6 จุดเชื่อมต่อ	47.64	27.85	0.00746	32.39	24.99	1.45

ตารางที่ 4.25 ศักยภาพการลดลงของระบบการติดตั้ง

จากตารางที่ 4.25 แสดงประสิทธิภาพการลดลงของระบบการติดตั้งทุกกรณีศึกษา พบว่า สำหรับการติดตั้งจุดเชื่อมต่อในกรณีที่เชื่อมต่อด้วยระยะทางเท่า ๆ กันทุกจุด ค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและ กระแสไฟฟ้ารั่ว จะแปรผันตรงกับจำนวนจุดเชื่อมต่อ นั่นคือถ้าเชื่อมต่อด้วยจำนวนจุดเชื่อมต่อที่มาก ขึ้น ค่าศักยภาพการลดลงจะมากขึ้นด้วยเช่นกัน และการติดตั้งที่จุดปัญหาต้นเหตุ คือ ที่ระยะรถไฟ ออกจากสถานีรับ-ส่งผู้โดยสาร ถ้ามีการติดตั้งจุดเชื่อมต่อที่จุดนี้ด้วยจำนวนจุดเชื่อมต่อที่ไม่มากไป ก็ จะสามารถลดค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นกัน

4.4 สรุป

แบบจำลองการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟฟ้า MRT สายสีม่วงเหนือที่มีการเดินรถจริงแล้วใน ปัจจุบัน จากผลการทดสอบสามารถนำมาใช้ในการประเมินศักย์ไฟฟ้าที่ราง ความต้องการกำลังไฟฟ้า ของสถานีไฟฟ้าขับเคลื่อน กำลังงานสูญเสียและแรงดันไฟฟ้าของรถไฟระหว่างการเคลื่อนที่ของ รถไฟฟ้าขบวนเดียว นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการจำลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบทาง รถไฟโดยคำนึงถึงศักย์ไฟฟ้าที่ราง แรงดันไฟฟ้าในโครงสร้างโลหะ และยังสามารถศึกษาเพิ่มเติมเพื่อ ศึกษากระแสไฟฟ้ารั่วได้

จากผลการประเมินการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าที่รางและกระแสไฟฟ้ารั่วของวิธีการติดตั้ง อุปกรณ์เสริมเข้าไปในระบบรถไฟฟ้า MRT สายสีม่วงเหนือภายในระบบปกติผ่านการต่อลงดินสองชั้น ด้วยระบบติดตั้งตัวนำย้อนกลับและระบบติดตั้งตัวแปลงความต้านทานเชิงลบ สามารถสรุปได้ว่ามี หลายปัจจัยในการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับศักยภาพการลดลง ไม่ว่าจะเป็นการเลือกสายเคเบิลที่มี ความต้านทานภายในหรือตำแหน่งการเชื่อมต่อที่เพิ่มเข้าไปในระบบปกติ