

Nghiên Cứu Điện Áp Hoạt Động Trên Mạng Tiếp Xúc Của Hệ Thống Tàu Điện Ngầm Cho Thiết Kế Đường Ray Dẫn Điện Mới – ROCS

Nguyễn Thái

Khoa Điện – Điện tử Viễn thông

Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

thai.nguyen@ut.edu.vn

Tóm tắt - Trong hệ thống tàu điện ngầm, chất lượng điện áp hoạt động là vấn đề quan trọng được giả định tính toán kỹ lưỡng khi thiết kế nhằm đáp ứng tần suất dịch vụ cao nhất. Đặc biệt, quá tải giờ cao điểm thường xuyên ảnh hưởng nghiêm trọng đến chất lượng, độ tin cậy của việc cung cấp nguồn, tính linh hoạt, an toàn hệ thống và hiệu quả khai thác của tuyến. Để đáp ứng các yêu cầu trên một cách tốt nhất, điện áp hoạt động và mạng tiếp xúc như một sự thỏa hiệp tối ưu giữa kinh tế kỹ thuật và hoạt động vĩnh cửu thuộc một hệ thống khi thiết kế. Thời gian gần đây, đường ray dẫn điện mới được nghiên cứu về động lực học dưới tác động của chuyển động tàu nhằm áp dụng thiết kế cho một số hệ thống đường sắt trên thế giới trong phạm vi không gian và điều kiện hẹp. Bài báo nghiên cứu về điện áp hoạt động trên đường ray dẫn điện mới trong thiết kế mạng tiếp xúc treo cao cố định – ROCS thuộc hệ thống tàu điện ngầm toàn tuyến. Matlab R2017b/Railway Systems là phần mềm đáng tin cậy để tiếp cận mô phỏng và phân tích một số dữ liệu cần thiết. Kết quả nghiên cứu cho thấy tính khả thi của ROCS với những ưu điểm vượt trội về kết cấu cũng như điện áp hoạt động định mức 750V DC.

Từ khóa - Tàu điện ngầm, điện áp hoạt động, mạng tiếp xúc ray thứ ba, mạng tiếp xúc treo cao.

I. GIỚI THIỆU

Tàu điện ngầm là phương tiện giao thông công cộng đường sắt đô thị chuyên chở khối lượng lớn có lịch sử hình thành và phát triển gần 130 năm, hiện tại có mặt trên 204 thành phố ở 64 quốc gia, trong đó có Việt Nam. Đây là tải đặc biệt, bởi triết lý vận hành của nó phụ thuộc vào thời gian trong ngày, mật độ dân cư và tốc độ phát triển đô thị. Song cung cấp điện kéo là hệ thống cố định, an toàn, tin cậy, có tuổi thọ tối thiểu trên 30 năm hoạt động liên tục và tiết kiệm chi phí.

Do đó, thiết kế cần phải kết hợp thỏa đáng giữa trang thiết bị, cấu trúc hệ thống, nguồn cung cấp, cấp

điện áp, nhu cầu phát triển tải và phương pháp vận hành hệ thống. Bên cạnh đó, việc chọn lựa cấu trúc cung cấp nguồn cho một hệ thống vận hành vĩnh cửu và hiệu quả là rất khó khăn. Vì vậy, nghiên cứu cụ thể và phân tích hệ thống điện chính xác sẽ cung cấp thông tin quan trọng, khách quan cho việc lập kế hoạch, thiết kế, lắp đặt và vận hành hệ thống.

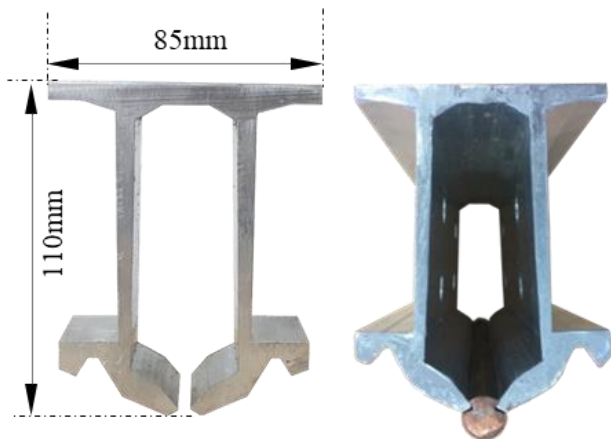
Thiết kế cung cấp điện kéo cho tuyến phụ thuộc vào năng lực phục vụ của nó theo từng giai đoạn phát triển, ví dụ như: 5 năm đầu, 10 năm và 10 năm tiếp theo... Thông thường giới hạn điện áp 750 V DC chỉ đáp ứng cho các tuyến có năng lực từ 24.000 người/giờ/hướng (p/h/d) đến 40.000 p/h/d, điện áp 1.500 V DC cho các tuyến có năng lực từ 30.000 p/h/d đến 60.000 p/h/d và điện áp 3.000 V DC cho các tuyến có năng lực lớn hơn. Đối với hệ thống 750 V DC chủ yếu dùng mạng tiếp xúc ray thứ ba, còn mạng tiếp xúc treo cao phổ biến với hai loại 1.500 V DC và 3.000 V DC. Những năm gần đây, có nhiều nghiên cứu áp dụng ray dẫn điện mới trong thiết kế mạng tiếp xúc treo cao cố định – ROCS cho tàu điện ngầm. Tuy nhiên, các nghiên cứu chỉ dừng lại ở phân tích những ưu điểm vượt trội về tính chất cấu trúc vật lý, vận tốc vận hành, kinh tế kỹ thuật, chi phí vận hành [1], [2]. Vì vậy, nghiên cứu này tập trung phân tích về vấn đề điện áp hoạt động của hệ thống tàu điện ngầm trên mạng tiếp xúc cố định treo cao theo tiêu chuẩn châu Âu EN 50163, tiêu chuẩn Liên minh Đường sắt Quốc tế UIC 600 và tiêu chuẩn Ủy ban Kỹ thuật Điện Quốc tế IEC 60850. Hầu hết các nghiên cứu và phân tích cung cấp nguồn sức kéo điện cho hệ thống đường sắt được mô phỏng dưới cơ chế rộng rãi, hiệu quả và tiết kiệm chi phí. Vì vậy, trong nghiên cứu này, Matlab R2017b/Railway Systems là phần mềm được chọn lựa cho việc mô phỏng điện áp hoạt động trên mạng tiếp xúc hiện đại phù hợp với tình hình phát triển chung trên thế giới.

II. MÔ TẢ HỆ THỐNG

Mạng tiếp xúc treo cao cố định – ROCS là hệ thống sử dụng các ray dẫn điện mới có cấu trúc như hình 1 và kết cấu lắp đặt như hình 2. ROCS ứng dụng lần đầu tiên ở đường hầm Sittenberg tại Áo vào năm 1984 và chỉ được áp dụng thiết kế trong những năm gần đây cho hệ thống đường sắt 25 kV/50 Hz, 15 kV/16,7 Hz, và 750 V DC đến 3.000 V DC tại các vị trí hạn chế như nhà ga, đường hầm... [2]-[6]. Nó được sử dụng thay thế cho mạng tiếp xúc ray thứ ba hoặc mạng tiếp xúc treo cao dây mềm nhờ những ưu điểm vượt trội với các đặc trưng:

- Thanh dẫn điện được làm bằng hợp kim nhôm theo tiêu chuẩn BS EN 573-3:2009. Thanh dẫn là khung định hình theo yêu cầu với chiều dài mỗi thanh từ 10 m đến 12 m, chiều cao là từ 80 mm đến 110 mm và tiết diện từ 2.202 mm² đến 2.223 mm².

- Dây tiếp xúc được làm bằng đồng theo tiêu chuẩn EN 50149 có tiết diện từ 80 mm² đến 193 mm² với hình dáng bình thường.

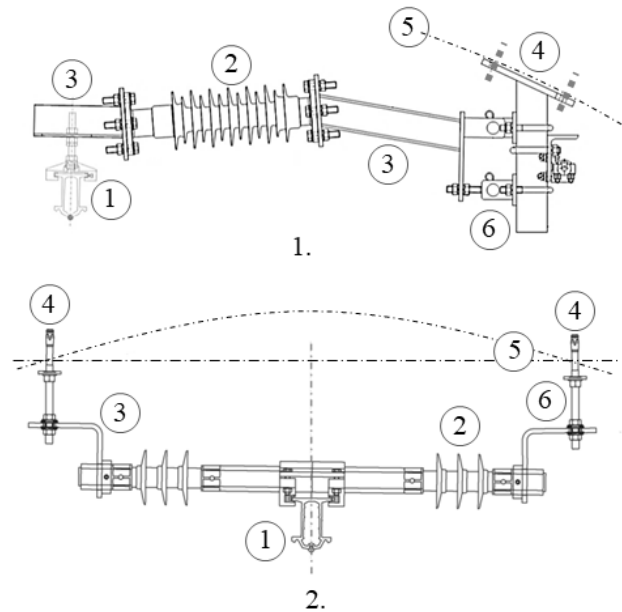


Hình 1. Cấu trúc thanh ray dẫn điện: Trước khi đun dây tiếp xúc (trái) và sau khi đun dây tiếp xúc (phải).

Cấu trúc bao gồm các thành phần: Thanh dẫn, dây tiếp xúc, giá đỡ công xôn (console) tay đòn cách điện một đầu, thanh ngang cách điện hai đầu, khớp nối, hệ co giãn nhiệt, giao tiếp phân đoạn, kết nối cấp nguồn và sứ cách điện. Các ưu điểm và khuyết điểm của hệ thống ROCS [1]-[3] như sau:

A. Ưu điểm của ROCS

- Tiết kiệm không gian kích thước đường hầm, thông quan giải phóng mặt bằng và chi phí xây dựng.



Hình 2. Kết cấu lắp đặt.

1. giá đỡ công xôn (console)

2. thanh ngang.

- | | |
|--------------------|--|
| (1) Thanh dẫn điện | (4) Chốt neo |
| (2) Sứ cách điện | (5) Vòm hầm/dầm treo |
| (3) Giá đỡ/cơ cấu | (6) Cơ cấu cố định và giới hạn độ cao. |

- Cấu trúc đơn giản, đa dạng các ứng dụng và cấu trúc lắp đặt, phù hợp với từng điều kiện sử dụng và vị trí lắp đặt.

- Cấu trúc đơn giản tiết kiệm chi phí lắp đặt, thay thế và bảo trì.

- Đường dây cố định, không xảy ra hiện tượng võng và đùn dây dẫn, giảm nguy cơ hư hỏng, đứt dây.

- Không cần thiết bị căng dây tự động, thuận lợi hơn tại các vị trí cuối phân đoạn.

- Không cần bù căng dây, do võng dây dẫn tự nhiên, không có các điểm nối chéo đầu cuối căng dây, không có chùng chéo dây tiếp xúc.

- Diện tích mặt cắt ngang lớn, tăng khả năng mang dòng điện, giảm số lượng trạm điện kéo cần thiết, hoặc tăng năng lực phục vụ của tuyến.

- Có thể thay thế từng phân đoạn mài mòn nhiều hơn dễ dàng hơn.

- Đơn giản hơn tại các vị trí giao cắt trên điểm đầu cuối đường ray, ga và depot.

• Thanh dẫn điện nhôm được sơn phủ bảo vệ chống tác động ô – xy hóa do môi trường ngoài.

• Tiêu chuẩn vật liệu rõ ràng, dễ sử dụng.

B. Khuyết điểm của ROCS

Chi phí ban đầu lớn, thiết kế phụ thuộc vào nhà cung cấp. Tuy nhiên, những khuyết điểm này không

đáng kể so với lợi ích về mặt kinh tế kỹ thuật lâu dài của nó mang lại.

C. Thông số kỹ thuật của ROCS,

Thông số kỹ thuật của ROCS được mô tả như bảng I.

BẢNG I. THÔNG SỐ KỸ THUẬT THANH CỨNG TREO CAO SỬ DỤNG TRONG THIẾT KẾ TÀU ĐIỆN NGẦM.

Thông số kỹ thuật thanh cứng treo cao		
Thành phần	Đơn vị	Giá trị
Điện áp DC	[V]	750 ÷ 3.000
Dòng định mức	[A]	4.000 ÷ 2.000
Dòng ngắn mạch	[kA]	4,5
Thời gian ngắn mạch	[ns]	60
Nhiệt độ môi trường	[°C]	- 40
Nhiệt độ của thanh dẫn	[°C]	90
Khoảng cách giá đỡ	[m]	12 ÷ 14
Chiều cao thanh dẫn	[mm]	80, 110, 130
Tiết diện thanh dẫn	[mm ²]	2.200 ÷ 2.400
Dây tiếp xúc EN 50149	[mm ²]	80 ÷ 161
Trọng lượng	[kg/m]	5,7 ÷ 6,1

III. THIẾT KẾ HỆ THỐNG

Các thông số cần thiết sử dụng cho thiết kế mạng tiếp xúc ROCS và kiểm tra đánh giá điện áp hoạt động được mô tả tóm tắt các số liệu cơ sở trong bảng II và bảng III, như sau:

BẢNG II. THÔNG SỐ TẢI HỆ THỐNG.

Thông số tải hệ thống		
Thành phần	Đơn vị	Giá trị
Điện áp DC	[Vdc]	750
Chiều dài tuyến	[km]	20
Số trạm khách (ST)	[xi]	20
Số trạm điện kéo (TPS)	[yi]	10
Khoảng cách $D_{TPS(st)}$	[km]	2,0
Khoảng cách $D_{ST(st)}$	[km]	1,0
Tần suất 4 phút	[p/h/d]	30.000
Tần suất 3 phút	[p/h/d]	40.000
Tần suất 2,5 phút	[p/h/d]	48.000
Tần suất 2 phút	[p/h/d]	60.000
Gia tốc tăng tốc	[m/s ²]	1,0
Vận tốc trung bình	[km/h]	35

Thông số tải hệ thống		
Thành phần	Đơn vị	Giá trị
Tàu 6 toa (7 người/m ²)	[p/t]	2.000
Trọng tải (đầy tải)	[tấn]	350
Công suất P _{TPS}	[kW]	2.3.000
Dòng cực đại cho phép	[A]	6.000

BẢNG III. THÔNG SỐ HỆ THỐNG SỨC KÉO.

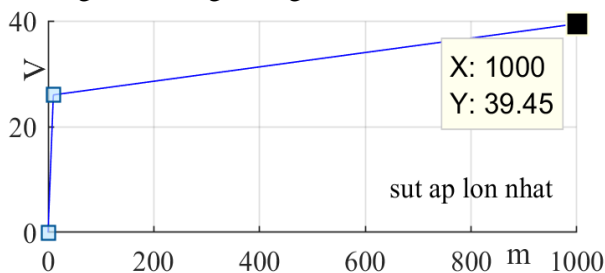
Thông số hệ thống phân phối dòng điện kéo		
Thành phần	Đơn vị	Giá trị
Điện áp DC	[Vdc]	750
ROCS 2214, CuETP 150	[A]	4.000
ROCS 2214, CuETP 150	[Ω/km]	0,0119 (khổ đơn)
ROCS 2214, CuETP 150	[Ω/km]	0,00595 (khổ đôi)
Ray UIC60 20 ⁰ C	[Ω/km]	0,03 (khổ đơn)
Ray UIC60 20 ⁰ C	[Ω/km]	0,075 (khổ đôi)
Cáp DC 100m, 500mm ²	[Ω]	0,0015
Trở kháng nguồn (3000kVA 8% điện kháng máy biến áp)	[Ω]	0,015 (1 bộ)
Trở kháng nguồn (3000kVA 8% điện kháng máy biến áp)	[Ω]	0,0075 (2 bộ song song)
Trở kháng nguồn (3000kVA 8% điện kháng máy biến áp)	[Ω]	0,005 (3 bộ song song)
Dòng cực đại cho phép	[A]	6.000

IV. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Nghiên cứu được mô phỏng trên phần mềm Matlab R2017b/Railway Systems phân tích điện áp hoạt động trên hệ thống tàu điện ngầm với thiết kế thanh dẫn điện mới – ROCS. Nghiên cứu được thực hiện trên năng lực vận tải lớn nhất của hệ thống 750V DC, theo số liệu bảng II và bảng III. Kết quả được tóm tắt với các trường hợp như sau:

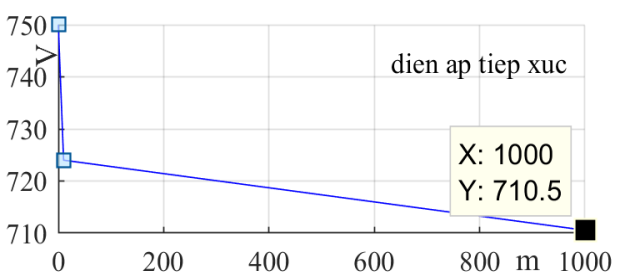
A. Trường hợp hoạt động bình thường

Trong trường hợp này, phạm vi cung cấp nguồn của một trạm điện kéo bất kỳ có bán kính là 1.000 m và khoảng cách các ga dừng là 1.000 m, vận tốc khai



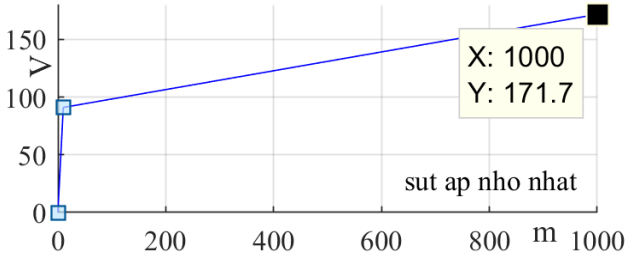
thác trung bình là 35 km/h, gia tốc tăng tốc là 1,0 m/s², tần suất dịch vụ là 2,5 phút/tàu/hướng. Khi đó, có 04 tàu xuất hiện trong phạm vi cung cấp nguồn của một trạm điện kéo trên cả hai hướng. Có hai trường hợp xảy ra:

1) Trường hợp 1: 04 tàu với vận tốc không đổi, sụt áp đầu nguồn là 26 V, sụt áp lớn nhất tại tàu ở cuối mỗi phân đoạn công suất là 39,45 V và điện áp tiếp xúc nhỏ nhất là 710,55 V DC, kết quả như hình 3. Như vậy, trong trường hợp này điện áp hoạt động thấp nhất là 710,55 V DC lớn hơn giá trị tiêu chuẩn 500 V DC, hệ thống làm việc bình thường.

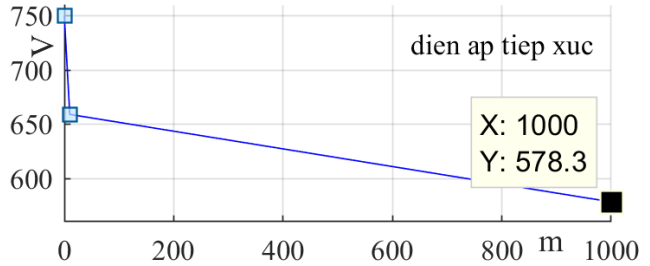


Hình 3. Điện áp hoạt động bình thường trường hợp 1.

2) *Trường hợp 2:* Trong 04 tàu, có 02 tàu cùng khởi động tăng tốc rời ga. Nếu tàu rời đi tại ga trạm điện kéo, sụt áp lớn nhất tại trạm và điện áp tiếp xúc là 659 V DC, trên cả hai phân đoạn bên trái và bên phải không có tàu chạy. Nếu tàu rời đi tại ga trong phân đoạn, sụt áp tại đó lớn nhất 171,7 V DC và



điện áp tiếp xúc nhỏ nhất là 578,3 V DC, kết quả như hình 4 mô tả cho trường hợp có 02 tàu cùng tăng tốc. Như vậy trong trường hợp hoạt động bình thường khi có 02 tàu cùng tăng tốc, điện áp tiếp xúc nhỏ nhất 578,3 V DC vẫn lớn hơn tiêu chuẩn điện áp tiếp xúc nhỏ nhất 500 V DC, hệ thống làm việc tốt.



Hình 4. Điện áp hoạt động bình thường trường hợp 2.

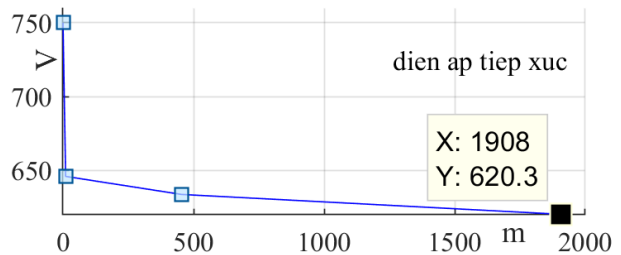
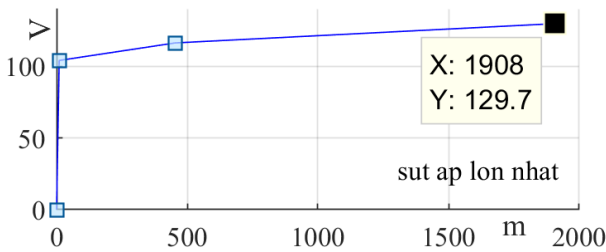
B. Trường hợp hoạt động sự cố hỏng 01 trạm điện kéo

Trong trường hợp sự cố, trạm liền kề có phạm vi cung cấp lớn nhất là 2 km. Trong phạm vi 3 km, luôn luôn xuất hiện 03 tàu/hướng và chỉ duy nhất 01 tàu/hướng ở chế độ tăng tốc. Do đó, sụt áp lớn nhất xảy ra ở các trường hợp như sau:

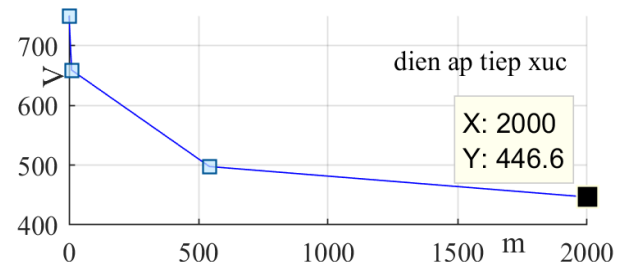
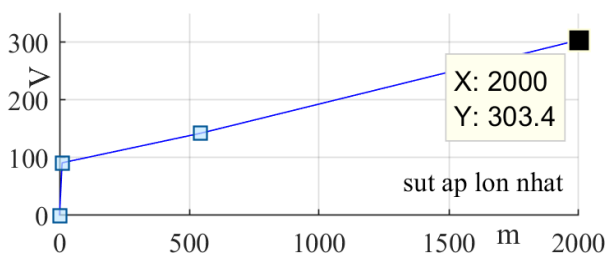
1) *Trường hợp 1:* Mỗi hướng có một tàu gần trạm điện kéo nhất ở chế độ tăng tốc rời khỏi ga. Lúc này, phân đoạn bên phải (2km), sụt áp lớn nhất 129,6626 V DC xảy ra tại tàu cách trạm điện kéo 1.908 m và điện áp tiếp xúc nhỏ nhất là 620,3374 V DC, kết quả như hình 5. Phía đối diện, phân đoạn bên trái tàu tăng tốc tại ga cách trạm điện kéo 1 km, điện áp tiếp xúc nhỏ nhất là 565,3 V DC và có xu hướng tăng dần khi tàu về gần trạm điện kéo. Như vậy, trong trường hợp này điện áp tiếp xúc thấp nhất là 565,3 V DC lớn hơn

điện áp thấp nhất cho phép 500 V DC, hệ thống làm việc bình thường.

2) *Trường hợp 2:* Mỗi hướng có 01 tàu tăng tốc ở vị trí ga xa nhất tại cuối phạm vi cung cấp là 2 km. Ở hướng đi, 01 tàu rời trạm điện kéo khỏi phạm vi cung cấp của nguồn để chuyển sang nhận nguồn từ trạm khác. Hướng còn lại, tàu di chuyển về gần nguồn hơn, sụt áp giảm dần khi về gần trạm và thoát khỏi vùng điện áp xấu sau thời gian tăng tốc. Khi đó, tàu tăng tốc sụt áp lớn nhất cuối đường dây là 303,4293 V DC và điện áp tiếp xúc nhỏ nhất là 446,5707 V DC, kết quả như hình 6. Mặc dù, kết quả mô phỏng tiếp theo cho thấy, sau thời gian tăng tốc 9,72 giây sụt áp là 78,5834 V DC và điện áp tiếp xúc là 671,4167 V DC (hình 7), nhưng trước đó trong quá trình tăng tốc sụt áp lớn hơn 30% gây nên điện áp tiếp xúc thấp hơn 500 V DC.



Hình 5. Điện áp hoạt động sự cố trường hợp 1.



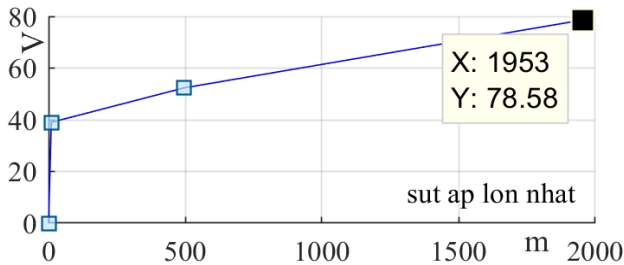
Hình 6. Điện áp hoạt động sự cố trường hợp 2.

Như vậy, điện áp tiếp xúc thấp nhất kéo dài trong thời gian tăng tốc nhỏ hơn điện áp thấp nhất 500 V

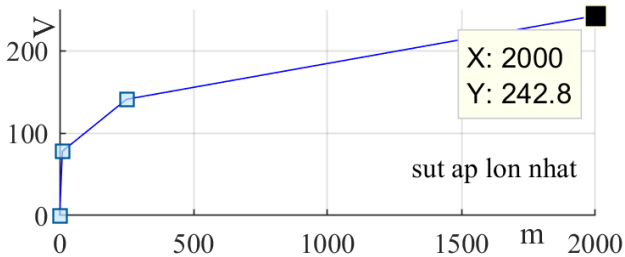
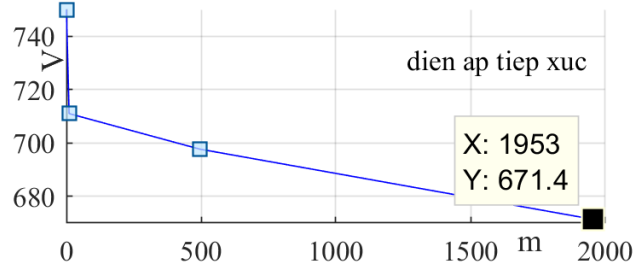
DC, vi phạm các tiêu chuẩn điện áp trên. Điều này không đảm bảo chất lượng điện áp hoạt động, cũng

như độ tin cậy cung cấp nguồn của hệ thống trong hoạt động sự cố.

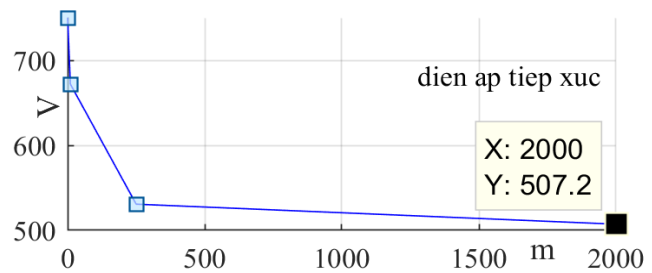
Trong trường hợp quá tải giờ cao điểm, trạm sử dụng ba bộ chỉnh lưu nguồn kết nối song song đảm bảo khả năng quá tải 450% trong 10 giây, theo tiêu chuẩn EN 50388 – 12, IEC 61850. Tuy nhiên, nguồn cung cấp từ một phía cho hệ thống với tần suất dịch



Hình 7. Điện áp hoạt động sự cố sau chế độ tăng tốc trường hợp 2.



Hình 8. Điện áp hoạt động sự cố với tần suất dịch vụ 3 phút/tàu/hướng.



C. Trường hợp hoạt động tần suất dịch vụ 3 phút/tàu/hướng khi sự cố hỏng một trạm điện kéo

Trong khi đó, ở trường hợp sự cố với tần suất dịch vụ 3 phút/tàu/hướng, phạm vi cung cấp của trạm điện kéo trên mỗi hướng chỉ có thể xuất hiện 02 tàu và duy nhất 01 tàu ở chế độ tăng tốc. Cũng tương tự, mỗi hướng có 01 tàu tăng tốc ở vị trí ga xa nhất tại cuối phạm vi cung cấp là 2 km. Ở hướng đi, 01 tàu rời xa trạm điện kéo, ra khỏi phạm vi cung cấp của nguồn để chuyển sang nhận nguồn từ trạm khác. Hướng còn lại, tàu di chuyển về gần nguồn hơn, sụt áp giảm dần khi về gần trạm và thoát khỏi vùng điện áp xấu sau thời gian tăng tốc. Tại đây, sụt áp tại vị trí xa nhất là 242,7625 V DC và điện áp tiếp xúc là 507,2375 V DC kết quả như hình 8. Trong trường hợp này, sụt áp lớn nhất khi tàu tăng tốc ở vị trí xa nguồn cung cấp và điện áp tiếp xúc là 507,2375 V DC lớn hơn điện áp tiếp xúc nhỏ nhất cho phép là 500 V DC, đáp ứng được yêu cầu thiết kế. Như vậy, thiết kế này với tần suất dịch vụ 3 phút/tàu/hướng và năng lực chuyên chở lên đến 40.000 người/giờ/hướng.

V. KẾT LUẬN

Bài báo phân tích năng lực đường ray dẫn điện mới cho hệ thống ROCS đã được thiết kế và mô phỏng trên phần mềm Matlab R2017b/Railway

vụ 2,5 phút/tàu/hướng khả năng chuyên chở lớn nhất của tuyến là 48.000 người/giờ/hướng theo cấp điện áp định mức 750 V DC là không khả thi khi sụt áp lớn hơn 300 V DC, mặc dù sau 9,72 giây điện áp tiếp xúc suy giảm không đáng kể 10,1%, đạt tiêu chuẩn chất lượng EN 50163, UIC 600 và IEC 60850.

Systems. Qua đó, đa dạng các trường hợp tải cho điện áp hoạt động của tàu vào khung giờ cao điểm. Tác giả phân tích so sánh các trường hợp sự cố có thể xảy ra đến khả năng đánh giá năng lực và điện áp hoạt động của tuyến.

Ngoài những ưu điểm vượt trội về cấu trúc vật lý so với mạng tiếp xúc trước, hệ thống ROCS còn đáp ứng tốt cho điện áp hoạt động trong thiết kế với cấp điện áp định mức 750 V DC, năng lực chuyên chở từ 24.000 người/giờ/hướng đến 40.000 người/giờ/hướng và nguồn cung cấp từ một hướng. Phần mềm Matlab được sử dụng mô phỏng là phương pháp tiếp cận khoa học tối ưu chi phí trong nghiên cứu thiết kế về cung cấp điện tàu điện ngầm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] M. K. Mak. "Adoption of Overhead Rigid Conductor Rail System in MTR Extensions", Journal of International Council on Electrical Engineering, vol. 2, no.4, pp. 463-466, 2014. DOI: 10.5370/JICEE.2012.2.4.463.

[2] S. Açıkbaş, M. T. Söylemez. "Energy loss comparison between 750 VDC and 1500 VDC power supply systems using rail power simulation", in Computers in Railways IX, WIT Transactions on The Built Environment, vol.74, 2004.

- [3] S. J. Bae, K. D. Jang, K. W. Lee, Y. C. Park. "A Study on Characteristics of Overhead Rigid Conductor System for Developing the High-speed System up to 250km/h", Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol.64, no.3, pp.492-497, 2015. DOI: 10.5370/KIEE.2015.64.3.492.
- [4] A. Oya et al., "Application of Overhead Rigid Conductor Line to Mountain Tunnel of Conventional Lines", in 2005 IEEE International Conference on Industrial Technology, 14-17 December 2005, Hong Kong, China, IEEE, 2005.
- [5] M. Shimizu, T. Kobayashi, A. Oya "Development of Transition Structures between Overhead Rigid Conductor Line and Catenary-Type Contact Line". QR of RTRI, vol. 49, no.2, pp.103-107, 2008. DOI: 10.2219/rtrigr.49.103.
- [6] C. Vera, J. Paulin, B. Suarez, P. Rodriguez, "Improved design of an overhead rail current conductor for application in underground lines", in The Eight International Conference on Maintenance & Renewal of Permanent Way; Power & Signaling; Structures & Earthworks, 29-30 June, 2005, London, UK, 2005.